

PHYSIK

ERKENNTNISSE UND

PERSPEKTIVEN

Eine Publikation der
Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V. (DPG)

Herausgegeben von:
Joachim Ullrich, Ulrich Bleyer, Sarah Köster,
Claus Lämmerzahl, Dieter Meschede und Lutz Schröter

1. Auflage 2025

PDF-Version

ISBN 978-3-9826935-1-4

IMPRESSUM

Physik: Erkenntnisse und Perspektiven

1. Auflage 2025

Herausgeber

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (DPG)
Hauptstraße 5
D-53604 Bad Honnef
Telefon +49 (0) 22 24 92 32 0
dpg@dpg-physik.de
www.dpg-physik.de

Verantwortlich

Joachim Ullrich, Ulrich Bleyer, Sarah Köster,
Claus Lämmerzahl, Dieter Meschede und Lutz Schröter

Administration

Melanie Rutowski

Redaktion

Jens Kube und Denise Müller-Dum

Produktion und Gestaltung

awk/jk (Agentur für Wissenschaftskommunikation, Dr. Jens Kube)
mit Unterstützung von Annika Kreikenbohm und Cord-Patrick Neuber

Korrektorat

Svenja Conrad

Autor:innen

Die Urheberschaft ist an den einzelnen Artikeln vermerkt. Sofern nicht vermerkt, sind Herausgeberschaft und Redaktion die Urheber.

Produktionsassistenz

Lasse Grund, Sabrina Schaar, Elisabeth Stachura und Willo Wieghaus (awk/jk)
Yannick Gehlen (DPG)

Druck der Buchversion

teamdruck GmbH, Gutenbergstraße 8, 28816 Stuhr

Website

Die gesamten Inhalte und weitere Informationen sind online verfügbar:
<https://physik-erkenntnisse-perspektiven.de>
oder direkt zu einzelnen Artikeln:
[https://physik-erkenntnisse-perspektiven.de/\(Seitennummer\)](https://physik-erkenntnisse-perspektiven.de/(Seitennummer))

Nutzungsrechte

Die Texte stehen unter der Lizenz CC by-sa 4.0 international. Die Abbildungen stehen unter der Lizenz des ursprünglichen Lizenzgebers und sind daher in der Regel urheberrechtlich geschützt. Falls die Autor:innen oder die zuvor genannten Gestalter:innen als Urheber von Fotos oder Abbildungen angegeben sind, stehen auch diese unter der Lizenz CC by-sa 4.0 international.

ISBN 978-3-9826935-1-4



Die **Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)**, deren Tradition bis in das Jahr 1845 zurückreicht, ist die älteste und, gemessen an der Zahl ihrer Mitglieder, auch die größte nationale physikalische Fachgesellschaft der Welt. Sie versteht sich als offenes Forum für Physikerinnen und Physiker und möchte der Physik eine Stimme geben. Als gemeinnütziger Verein verfolgt sie keine wirtschaftlichen Interessen. Abiturient:innen, Studierende und Lehrkräfte sind in der DPG ebenso vertreten wie Lehrende und Forschende aus der Universität und Fachkräfte aus der Industrie.

Weltberühmte Wissenschaftler waren Präsidenten der DPG – so Max Planck und Albert Einstein. Mit Tagungen und wissenschaftlichen Publikationen fördert die DPG den Gedankenaustausch innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Physikalische Spitzenleistungen würdigt sie mit Preisen von internationaler Reputation. Die DPG motiviert mit Physikwettbewerben den naturwissenschaftlichen Nachwuchs und zeichnet – für herausragende Physikleistungen im Abitur – bundesweit Schülerinnen und Schüler aus. Sie engagiert sich auch in politischen Diskussionen: Themen wie Bildung, Forschung und Klimaschutz stehen dabei im Mittelpunkt.

Sitz der DPG ist das Physikzentrum Bad Honnef, welches auch Tagungsstätte der DPG und Treffpunkt für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus aller Welt ist. In Berlin unterhält die DPG ihre Hauptstadtrepräsentanz zur Vernetzung mit Akteurinnen und Akteuren aus Politik und Gesellschaft. Für alle Interessierten finden dort regelmäßig wissenschaftliche Gesprächsrunden und Vorträge statt.

Die DPG macht Physik öffentlich: Mit populärwissenschaftlichen Publikationen und öffentlichen Veranstaltungen beteiligt sie sich aktiv am Dialog zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit, anlassbezogen auch gemeinsam mit anderen Wissenschaftsorganisationen. Zentrales Anliegen ist es, allen Neugierigen einen Zugang zur Physik zu schaffen.

Genese dieses Werkes

Die vorliegende Publikation wurde ab Frühjahr 2022 vorbereitet. Das Herausgeberteam fand sich unter der Leitung des DPG-Präsidenten Joachim Ullrich (Amtszeit 2022–2024) zusammen. Ziel war es, für das Jahr 2025 eine Standort- und Perspektivbeschreibung der Physik zu erstellen, wie sie in der DPG repräsentiert ist. Eine ähnliche Denkschrift veröffentlichte die DPG zuletzt im Jahr 2000 mit dem Titel „Physik – Themen, Bedeutung und Perspektiven physikalischer Forschung“.

Für die neue Publikation, intern kurz „PEP“ genannt, wurden zunächst Themen und Schwerpunkte entlang der Gliederung der DPG gesammelt. Dabei halfen die Sprecher:innen der Sektionen und die Leitungen der Fachverbände der DPG. Die Struktur wurde anschließend in die Kapitel „Wissen“, „Wirkung“ und „Menschen“ gegliedert. Koordinierende aus den Sektionen und weitere engagierte Personen der DPG übernahmen die inhaltliche Arbeit, gewannen Autor:innen und sorgten für inhaltliche Konsistenz und angemessene Abdeckung relevanter Inhalte. Im Januar und Mai 2023 wurden die Struktur und Schwerpunkte der Publikation in zwei Workshops im Physikzentrum Bad Honnef festgelegt.

Anschließend erarbeiteten Herausgeberschaft und Redaktion gemeinsam mit rund 200 Autor:innen das vorliegende Werk. Dieses ist somit als eine Sammlung aufeinander abgestimmter Beiträge vieler Beteiligter und nicht als geschlossene Darstellung zu sehen. Für die Inhalte stehen die Autor:innen; durch oft gemeinsames Verfassen der Artikel und vielfaches Gegenlesen, nicht zuletzt durch die Herausgeberschaft, wurde eine stilistische und methodische Einheitlichkeit und Ausgewogenheit angestrebt.

Das von der Herausgeberschaft vorgeschlagene Vorgehen wurde vom DPG-Vorstand und DPG-Vorstandsrat im November 2023 bestätigt und beschlossen.

LIEBE LESERIN, LIEBER LESER,

willkommen in der Welt der Physik! Willkommen in der Welt der Neugierde und der Faszination von den Phänomenen der Natur, deren Teil und deren Beobachter wir gleichzeitig sind.

Stauen Sie mit uns über die Welt des Kleinsten, die Sphäre der Quanten und der elementaren Bausteine der Natur. Die Welt der Atome beginnt bei einer Größe von einem Millionstel eines Millimeters, wobei Elementarteilchen wie Quarks und Elektronen noch mindestens eine Milliarde Mal kleiner sind. Tauchen Sie mit uns ein in die unermesslichen Weiten des Universums mit wahrscheinlich einer Billion Galaxien. Licht braucht bis zu einer Million Jahre, um sie zu durchqueren, und schon für unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, braucht es hunderttausend Jahre. Als Entfernung entspricht das knapp einer Trillion Kilometer, einer Zahl mit 18 Stellen!

Wie entstanden das Universum, die Galaxien, die etwa 100 Milliarden Sonnen und die Planeten in unserer Milchstraße? Wie werden die Galaxien zusammengehalten, wie entstehen, wie entstanden die Elemente und wie unser Sonnensystem? Diese Welt des unvorstellbar Großen wird erstaunlicherweise nur verständlich, indem wir unser Wissen vom Aller kleinsten, den Bausteinen der Materie, hinzuziehen. Und so sind die Welten des Aller kleinsten und des Aller größten aufs Engste miteinander verwoben, die eine ohne die andere nicht denkbar – es ist eine Welt!

Aus dem Aller kleinsten, den Elementarteilchen, entsteht das Komplex: zunächst die Atome, die etwa hundert stabilen Elemente des Periodensystems. Diese wiederum finden sich zu Molekülen zusammen: kleinen, aber wichtigen, wie dem dreiatomigen Wasser, oder ebenso wichtigen komplexen Riesenmolekülen, wie der Desoxyribonukleinsäure (DNA) mit Hunderten Milliarden Atomen, die das Erbgut eines jeden Lebewesens speichern. Moleküle lassen die unbelebte wie die belebte Welt in ihrer unermesslichen Vielfalt und Schönheit, in ihrer Komplexität entstehen. Sie enthalten den Code des Lebens, wenn sie sich zu Viren, Bakterien, Zellen und schließlich zu Lebewesen mit Hunderten Milliarden Zellen beim Menschen auf wundersame Weise selbstorganisiert zusammenfinden.

Kommen Sie mit uns auf die Reise vom Aller kleinsten zum Aller größten, vom Einfachen zum Komplexen und staunen Sie mit uns über die Mess- und Experimentiertechnik, die dies alles erfahrbar macht. Messen ist die Grundlage für das Verstehen, das „Erkennen“: Mit mathematischen Modellen bringen wir die Messergebnisse miteinander in Verbindung. Genau diese Modelle oder „physikalischen Gesetze“ erlauben es uns, Vorhersagen zu machen: Wie verlaufen die Planetenbahnen, wie lange leuchtet unsere Sonne noch, wie entwickelt sich unser Klima? Physikalische Modelle sind der Schlüssel zur Grundlage unserer Technik. Wir nutzen sie, um Smartphones, Flugzeuge, Quantencomputer, Computertomografen und Ultraschallgeräte zu bauen, Moleküle und Medikamente zu konstruieren oder Impfstoffe zu entwickeln. Die „Erkennt-

nisse“, das „Wissen“ sind die Grundvoraussetzungen für das „Gestalten“, für das „Wirken“, das Entwickeln von „Perspektiven“.

Schließlich stehen hinter all dem die Menschen. Wer sind diese Forschenden, wie wird man zur Physikerin, wo und wie arbeitet der Physiker und, nicht zuletzt, wie ist das Verhältnis von Physik zur Kultur und zur Gesellschaft?

Kommen Sie mit uns, den Physikerinnen und Physikern, den Menschen, den nahezu 200 ehrenamtlichen Autor:innen auf diese nie endende Reise vom Wissen zum Wirken – getrieben vom Staunen, von der Neugierde und dem immerwährenden Drang, unseren Alltag zu erleichtern.

Lassen Sie sich von der Erkenntnis beeindrucken, dass unsere Erde ein winziges Staubkorn im Universum ist: ein wunderbarer, ein verwobener und verletzlicher Organismus, den wir noch lange nicht vollständig verstanden haben, ein winziges Raumschiff, einsam in den unermesslichen Weiten des Universums.

Schaffen wir gemeinsam Perspektiven aufgrund der Erkenntnis, dass wir untrennbarer Teil dieses Organismus sind, dass wir ohne ihn nicht leben können – um unsere Erde, unser Raumschiff im gigantischen Universum, bestmöglich zu schützen. Sie ist die einzige Welt, die wir haben.



*Joachim Ullrich
Präsident der DPG
2022–2024*

INHALT

Einleitung: Erkenntnisse und Perspektiven	1
Physik	5
Reine Neugier?	7

WISSEN 9

Die Vielfalt physikalischer Phänomene verstehen	11
Messen als Grundlage von Physik und Technik	16
Mathematik als Sprache der Physik	17
Big Data, Simulation und Numerik	19

DIE TEILE UND DAS GANZE 21

Die Welt in Raum und Zeit	21
Die Wahrscheinlichkeitswelt der Quanten	24
Fundamentale Theorien	27
Aus Vielem entsteht Neues	29
Nichtgleichgewicht und Strukturbildung	31

DAS KLEINSTE UND DAS GRÖSSTE 33

Das Standardmodell der Teilchenphysik	35
Auf der Spur der Elementarteilchen	39
Präzisionstests des Standardmodells	43
Neutrinos: Elementarteilchen mit Überraschungen	45
Quarks: Basis der Materie	48
Die Entstehung der Elemente	51
Jenseits des Standardmodells	53
Kosmische Objekte	57
Gravitation	59
Schwarze Löcher und Pulsare	61
Kosmologie: Das Große und Ganze	67
Quantengravitation	69
Teilchen aus dem All	70
Das James-Webb-Weltraumteleskop	71

DIE WELT DER MATERIE UM UNS HERUM 73

Magie der Materie	73
Strom ohne Widerstand	75
Topologische Quantenmaterialien	77
Robuste magnetische Muster	81
Neues aus einzelnen Atomlagen	83
Computerbasiertes Materialdesign	87
Klötzchenspiel mit kalten Atomen	89
Ultraschnelle Prozesse	93
Weiche und aktive Materie	97

UNSERE ERDE 101

Unsere Erde: Innen ganz unruhig	103
Die Vermessung der Welt	106
Landoberfläche und Biosphäre	108
Planetare Magnetfelder: Orientierungshilfe und Schutz	109
Der Ozean im Klimasystem	111
Die Kryosphäre	113
Atmosphäre: Haut aus Gas	115
Das Anthropozän	118
Globale Klimaentwicklung	120
Kippdynamiken im Erdsystem	123
Die arktische Verstärkung	127
Ein Jahr im arktischen Eis	129

PHYSIK UND LEBEN 131

Biophysik auf allen Skalen	131
Einblicke in die Welt der Proteine	133
Mikroskopie für kleinste Strukturen	135
Alleskönner Licht	137
Physik der Zelle	139
Das Denken verstehen	143
Ursprünge des Lebens	145
Lebende Systeme bauen	147

GRENZEN ERKENNEN UND ÜBERWINDEN 151

Perspektiven in der Grundlagenforschung	151
KI und Big Data verändern die physikalische Forschung	155
Mit Präzisionsmessungen auf der Suche nach neuer Physik	159
Neue Ansätze für Mikroskopie und Spektroskopie in Raum und Zeit	162
Spektroskopie und Quantenchemie: Vom Mikrokosmos zur Anwendung	165
Hinaus ins All!	168

WIRKUNG 171

TECHNOLOGIEN FÜR DAS 21. JAHRHUNDERT 173

Wie ist die Lage?	175
Mikrochips: Immer kleinere Strukturen	177
Magnetische Datenspeicherung	179
Rechenleistung rauf, Energiebedarf runter	184
Quantencomputer – Anwendungen und Realisierungen	187
Metalle in freier Form	189
Plasmen in Technik und Medizin	191
Energie aus Kernfusion	193

DIE QUANTENWELT ERSCHLIESSEN 195

Information	197
Quantenbits erzeugen und kontrollieren	199
Quantencomputer	201
Abhörer durch Quantenkommunikation	203
Modellsysteme für die Quantenwelt	205
Winzig klein und hochgenau	207
Die universelle Definition der physikalischen Einheiten	209

DIAGNOSE UND THERAPIE 213

In Scheiben geschnitten	215
Kontrastreiche Einblicke	217
Bilder aus Schall	219
Radioaktive Substanzen für die Gesundheit	221
Mit Strahlen gegen Krebs	224
Hören: Mehr als Akustik	227
Nano für die Medizin	229

KOMPLEXE WELT – VERNETZTE WELT 231

Dynamik komplexer Systeme	233
Komplex, chaotisch, verstehbar	237
Widerstandsfähig, da komplex	238
Von Schwärmen und Schleimpilzen	239
Alltag in einer vernetzten Welt	242

DIE ERDE IM BLICK 245

Fernerkundung	247
Erderkundung mit Satelliten	249
Erkundung des Ozeans	253
Wettervorhersage und Warnung vor Geo-Gefahren	256
Regen, Schnee und Unsicherheit	259
Schlechte Luft	261

GLOBALE HERAUSFORDERUNGEN 263

Die große Transformation	265
5 vor 12 oder schon später?	270
Kein Ersatz für Klimaschutz	271
Der Kampf gegen das Ozonloch – eine Erfolgsgeschichte? ..	275
Quantencomputing	277
Physik als tragende Säule der KI-Implementierung?	279
Allein im Universum?	281

MENSCHEN 285

BILDUNG UND BERUF 287

Alltagsbezogen, interaktiv und multimedial	289
Das Studium der Physik	291
Mehr als guter Unterricht	295
Der Arbeitsmarkt für Physiker:innen	297
Zehn Karrieren mit Physik	301

PHYSIK IN KULTUR UND GESCHICHTE 303

Grundlagenforschung als Kulturleistung	303
Was beschreibt die Physik?	305
Physikgeschichte	308
Physik und Kunst: Kreative Wechselwirkungen	311

FÜR DIE GESELLSCHAFT 315

Wissenschaft verbindet: Science Diplomacy	316
Technikfolgen und Gesellschaft	319
Disruptive Technologien und die Ambivalenz der Forschung ..	321
Die Büchse der Pandora	323
Ethik in der Forschung	327
Politikberatung mit Physik	329
Dialog mit der Gesellschaft	333

ANHANG 337

Sachregister	337
Mitwirkende	343

EINLEITUNG: ERKENNTNISSE UND PERSPEKTIVEN

Die Physik, als die Naturwissenschaft schlechthin und gemeinsame Kulturleistung, ist eine der größten Errungenschaften der Menschheit, weil sie es möglich macht, die materielle Welt durch Gesetze zu beschreiben, die nach unserem heutigen Wissensstand immer und überall gelten. Diese reichen von der Gravitation in der Astrophysik, also vom Größten, über elektromagnetische Phänomene bis in die submikroskopische Welt des Allerkleinsten, der Atome und Atomkerne. Wir können die Abläufe im Universum, auf der Erde, in den Atomen und Atomkernen exakt beschreiben und genaue Vorhersagen treffen. Es gibt bisher keine Experimente oder Beobachtungen, die den bisher gefundenen Gesetzen widersprechen. Damit hat die Menschheit enormes Wissen und beachtliche Erkenntnisse gewonnen, die es ihr ermöglichen, zu gestalten und Perspektiven zu schaffen.

Betrachtet man die unendliche Vielfalt in unserer Welt, so ist es mehr als erstaunlich und faszinierend, dass wir die Welt von den kleinsten räumlichen und zeitlichen Dimensionen von einem Billionstel eines Milliardstel Meters und entsprechenden Sekundenbruchteilen bis hin zur Ausdehnung und dem Alter des Universums von etwa 13,7 Milliarden Jahren erfassen, vermessen und mathematisch beschreiben können. Dies setzt voraus, dass wir Techniken zur Verfügung haben, physikalische Phänomene auf eben diesen kleinsten und größten Distanzen und Zeiten mit entsprechenden Genauigkeiten zu messen. Um z. B. Uhren mit Genauigkeiten zu bauen, dass sie vom fiktiven Start bei der Entstehung des Universums bis heute nur wenige Sekunden „falsch gehen“, muss alle Grundlagenphysik von Quanten- und Teilchenphysik über Elektrodynamik bis hin zur Gravitation berücksichtigt werden. Wie in dieser Publikation dargestellt, werden diese Genauigkeiten in Zukunft immer weiter verbessert. Wir sind sehr stolz auf diese hohe Kunst des Messens. Genauigkeit ist aber kein Selbstzweck, sondern wird jetzt und in Zukunft intensiv für praktische Anwendungen benötigt. Die Messgenauigkeit von Zeiten und Distanzen ist beispielsweise essenziell für die Realisierung der Weltzeit, für die täglich genutzten Navigationssysteme und für die globale Geodäsie, die wesentliche Daten für die Klimaforschung bereitstellt. Es sind genau diese praktischen und gesellschaftsrelevanten Anwendungen, die diese extreme Genauigkeit benötigen. **Physik ist extrem genau.**

Mit diesen Genauigkeiten müssen in gleichem Maße aber auch die Vorhersagen der Grundgesetze der Physik, wie Gravitation, Elektromagnetismus und Quantenphysik, Schritt halten. Deren Gültigkeit wird immer wieder mit den genauesten zur Verfügung stehenden Messgeräten geprüft. Andernfalls könnten Inkonsistenzen in der Interpretation der für praktische Anwendungen erhobenen Messdaten auftreten. Grundlagenforschung und praktische Anwendungen, auch die in der Industrie, gehen daher notwendigerweise Hand in Hand. **Physik ist überall.**

Es soll an dieser Stelle durchaus nicht verschwiegen werden, dass es in der Physik zahlreiche Fragen gibt, auf die es noch keine Antworten gibt. Dazu gehört die Frage nach dem Wesen der Dunklen Materie, deren Effekte wir unwiderlegbar beobachten, deren Teilchen wir aber bisher nicht imstande waren nachzuweisen. Es wird auch versucht, dies alternativ als Effekt einer modifizierten Gravitationstheorie zu interpretieren, was aber ebenfalls noch nicht gelungen ist. Des Weiteren gibt es die ungelösten Fragen nach der Dunklen Energie, der Baryonenasymmetrie und die nach der Quantisierung der Gravitation. Es mag sein, dass einfach noch die geniale Idee fehlt; eine große Hoffnung liegt aber auch darin, dass mit immer genaueren Messverfahren irgendwann neue Effekte gefunden werden, die uns Hinweise auf die Lösung dieser offenen Fragen geben. Es bleiben also noch viele Herausforderungen. **Physik ist und bleibt spannend.**

Die Physik zeigt uns auch genau, was wir definitiv nicht wissen können. So beschreibt die allgemeine Relativitätstheorie, dass wir niemals Informationen aus dem Inneren eines Schwarzen Lochs erhalten können. Und die Quantenmechanik zeigt mit ihrer Unschärferelation, dass wir in gewissen Konstellationen nicht beliebig genau messen können und dass wir einzelne Aspekte bei gewissen Messungen prinzipiell nicht vorhersagen können. Dieses absolute Unwissen kann aber von wichtigen Technologien wie der Quantenkryptografie oder Zufallsgeneratoren wiederum als wesentliche Ressource genutzt werden. **Physik ist kreativ.**

Mit den bisher gefundenen physikalischen Gesetzen können wir im Prinzip alle beobachteten Phänomene beschreiben, etwa wie Gravitationswellen entstehen, wie Sterne geboren

werden und sterben, wie das Sonnensystem und unsere Erde entstanden, wie Fahrzeuge, Smartphones, Flugzeuge und Satelliten funktionieren, wie Windräder und Photovoltaikanlagen zu bauen sind, wie man Chips für Computer herstellt und schließlich wie man Quantencomputer baut und wie man diese nutzen kann – von der Medizintechnik ganz zu schweigen. **Physik ist praktisch.**

Der Weg von grundlegenden Erkenntnissen zu praktischen gesellschaftsrelevanten Anwendungen ist oft erstaunlich kurz. Die ersten Atomuhren wurden Anfang der 1960er-Jahre gebaut, 1978 wurde der erste GPS-Satellit mit Atomuhr in die Erdumlaufbahn gebracht. In den 1940er-Jahren wurde die Kernspinresonanz im Experiment gezeigt und in den 1970er-Jahren die darauf aufbauende medizinische Bildgebung entwickelt, die heute regelmäßig angewendet wird.

Mit der Physik können wir unser Leben und die Welt hin zum Besseren gestalten. Wo wären wir heute, wenn wir nicht die Maschinen und Technologien hätten, die unser Leben einfacher und reicher machen, und wenn es die Entwicklungen in der Medizinforschung nicht gäbe? Unsere Lebenserwartung wäre schlicht um vieles geringer und viele medizinische Eingriffe wären nicht möglich. Seien wir froh, dass viele Entwicklungen in der Physik, die zunächst aus reinem Forschungstrieb entstanden sind, diese sehr praktischen und für unser tägliches Leben hilfreichen Anwendungen möglich machen. Aktuell sind viele Physikerinnen und Physiker damit beschäftigt, die neu gefundenen Methoden der künstlichen Intelligenz und die neuen Quantentechnologien zum Nutzen der Gesellschaft weiterzuentwickeln. **Physik macht unser Leben besser.**

Die Physik hilft nicht nur, unser Leben angenehmer und lebenswerter zu gestalten, sondern trägt auch essenziell dazu bei, aktuellen Herausforderungen zu begegnen: Wir müssen das Klima besser verstehen und effiziente und schnell wirkende Gegenmaßnahmen für den Klimawandel identifizieren. Wir müssen die Effizienz umweltverträglicher Energien erhöhen, desgleichen auch unsere Mobilität umweltfreundlicher gestalten. Sicherlich tragen in Zukunft auch dazu die Methoden der künstlichen Intelligenz und die neuen Quantentechnologien wesentlich bei. **Physik löst Probleme.**

Aus den Erkenntnissen der Physik ziehen alle Menschen einen großen Nutzen. Zur Wahrheit gehört aber auch, dass man seit jeher Technologien missbrauchen kann: Physik kann der Menschheit Wohlstand und Glück bringen, dieselben Ergebnisse können aber auch zum Schaden bis hin zur Auslöschung der Menschheit eingesetzt werden. Es ist genau die Anwendung von Physik und Wissenschaft in der Technik und deren Durchdringung unserer globalen Wirtschaft, die uns letztendlich auch ins Anthropozän katapultiert, also in die Situation gebracht hat, unsere natürlichen Lebensgrundlagen, die Bio-, Hydro-, Litho-, und Atmosphäre massiv zu beeinflussen, zu stören und vielleicht sogar zu zerstören. Aber auch hier kann die Physik Aussagen machen. Die Physik hat schon lange vorhergesagt, wie sich das Klima entwickelt, falls die Menschheit ihren Lebensstil nicht ändert. Auch sind die Auswirkungen von Kernwaffeneinsätzen auf das Klima mit physikalischen Methoden vorhersagbar. Die Physik kann zu der Überprüfung von Abrüstungsverträgen beitragen. Es ist letztendlich dem Menschen überlassen, wie er sich entscheidet. Der Politik und der Gesellschaft stehen all diese Informationen und Methoden zur Verfügung. Sie sollten sie nutzen, denn eine Politik, ein kollektives Handeln gegen die Naturgesetze kann dauerhaft nicht funktionieren.

Physik ist heute wichtiger denn je. Die Methodik der Physik ist transparent, alle Ergebnisse können immer und überall überprüft werden. Die Physik arbeitet ausschließlich faktenbasiert. Daher trägt sie zu einem geordneten und konstruktiven gesellschaftlichen Diskurs bei. **Physik basiert auf Fakten.**

Ohne die vielen Ergebnisse aus der Mathematik könnte die Physik nicht so erfolgreich die Welt beschreiben. Oft haben aber auch physikalische Fragestellungen mathematische Entwicklungen angestoßen. Die Physik kooperiert eng mit der Chemie, trägt essenziell zur medizinischen Diagnostik bei und hat große Berührungspunkte zur Biologie und Biochemie bis hin zu den Sozialwissenschaften, die Methoden der statistischen Physik verwendet, um Verhaltensweisen von Menschen zu modellieren. Physik fließt in die Informatik und das Ingenieurwesen ein. Zusammen mit der Philosophie werden die Methodik der Physik immer wieder hinterfragt sowie die Erkenntnisse der Physik interpretiert. **Physik ist interdisziplinär.**



Nur in internationaler Zusammenarbeit können die notwendigen intellektuellen und finanziellen Ressourcen zusammenkommen, um große Fragestellungen z. B. in der Hochenergie- und Astrophysik, der Umweltphysik oder der Energieforschung erfolgreich zu bearbeiten. Isolationismus behindert den Erkenntnisgewinn. Physikalische Forschung trägt zur kulturellen Verständigung bei. **Physik ist international.**

Schließlich wird Wissenschaft von Menschen betrieben und kostet Geld. Der Nutzen der Physik für die Gesellschaft ist, wenn die Erkenntnisse richtig eingesetzt werden, allerdings groß, und in den meisten Fällen übersteigt der langfristige Ertrag bei Weitem die Kosten. Die Rahmenbedingungen für Forschung und Entwicklung stellen auch eine Herausforderung für Politik und Gesellschaft dar. Innovative Physik gibt es nur in einer freien Gesellschaft. Auch benötigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mehr Unterstützung, unter anderem auch weil die private Lebensplanung nicht immer synchron mit den Bedürfnissen der Wissenschaft ist. Menschen sind die wichtigste Ressource der Wissenschaft.

Das Werk „Physik: Erkenntnisse und Perspektiven“ entstand in einem kollaborativen Prozess, der die breite Expertise der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) nutzte. Aus den verschiedenen Gruppierungen der DPG haben sich zahlreiche Kolleginnen und Kollegen bereit erklärt, ihr Fachwissen in die Erstellung des Buchs einzubringen. In zwei vorbereiteten Workshops im Januar und Mai 2023 wurden zentrale Themen und Perspektiven diskutiert und festgelegt. Insgesamt haben rund 200 Personen aus Forschung, Lehre und Industrie an der Ausarbeitung der Inhalte mitgewirkt. Diese breite Beteiligung spiegelt die Vielfalt und Tiefe der physikalischen Forschung und deren Anwendungen wider. Das Ergeb-

nis ist ein umfassendes Werk, das aktuelle Erkenntnisse aufgreift und gleichzeitig zukunftsweisende Perspektiven aufzeigt – ein Gemeinschaftswerk, das durch die kollektive Expertise der DPG getragen wird.

Diese Publikation ist in drei zentrale Kapitel gegliedert: „Wissen“, „Wirkung“ und „Menschen“. Jedes Kapitel bietet einen eigenständigen Blick auf die Physik – von den grundlegenden Erkenntnissen über ihre technologischen und gesellschaftlichen Auswirkungen bis hin zu den Menschen, die dahinter stehen. Die Themen variieren dabei in ihrer fachlichen Tiefe: Einige Abschnitte sind allgemein verständlich und richten sich an ein breites Publikum, während andere spezialisierte Inhalte für Leser:innen mit größeren physikalischen Vorkenntnissen behandeln. Diese Vielfalt ermöglicht es, die faszinierende Welt der Physik aus verschiedenen Blickwinkeln zu erkunden. Dabei ist es nicht notwendig, alle Themen im Detail zu verstehen; vielmehr sollen die unterschiedlichen Ebenen der Darstellung Interesse wecken, wichtige Themen benennen und zum Nachdenken anregen, unabhängig vom persönlichen Wissensstand. So laden wir Leser:innen aller Hintergründe ein, die spannenden Facetten der Physik zu entdecken und ihren eigenen Zugang zu finden.

Wir wünschen Ihnen, dass die vorliegende Schrift Ihre Neugier weckt, zum Nachdenken anregt und zur Faszination für die Erkenntnisse und Zukunftsperspektiven der Physik beiträgt!

*Joachim Ullrich, Ulrich Bleyer, Sarah Köster,
Claus Lämmerzahl, Dieter Meschede und Lutz Schröter*

Die Produktion von „Physik: Erkenntnisse und Perspektiven“ war für die Beteiligten eine spannende mehr als zweijährige Reise durch viele Themen auch außerhalb ihres eigenen Fachgebiets. Was sich für die Menschen hinter diesem Buch als besonders wichtig, lehrreich und vielleicht auch überraschend herausgestellt hat, erfahren Sie aus erster Hand im **Video** mit Ulrich Bleyer, Sarah Köster und Joachim Ullrich.

<https://physik-erkenntnisse-perspektiven.de/herausgeber>





Autorenworkshop im Mai 2023 im Physikzentrum Bad Honnef und online.



Herausgebertreffen in Göttingen im April 2024 zusammen mit dem Redaktionsteam (unten, v.l.n.r.: Claus Lämmerzahl, Dieter Meschede, Melanie Rutowski, Jens Kube, Joachim Ullrich, Ulrich Bleyer, Denise Müller-Dum, Sarah Köster, Lutz Schröter).

PHYSIK



Physik ist die grundlegende Naturwissenschaft.

Physik (von griechisch Physis, Natur, Beschaffenheit) war ursprünglich ein Teilgebiet der Philosophie und bezeichnete ganz allgemein die Untersuchung der Phänomene in der Natur. Das moderne Verständnis beruht im Wesentlichen auf dem „Messen“ und geht unter anderem auf Galileo Galilei zurück. Heute untersuchen die Physiker:innen die Struktur der Materie vom Kosmos bis hin zu den elementaren Bausteinen und deren fundamentale Wechselwirkungen. Beruhend auf Messergebnissen und den Zusammenhängen zwischen Messgrößen können mathematische Gesetzmäßigkeiten formuliert werden, die überall im Universum gelten. Sie werden ständig durch immer genauere Messungen überprüft und verfeinert. Die Anwendung dieser Erkenntnisse ermöglicht es, präzise Vorhersagen für sehr viele Vorgänge in Natur und Technik zu treffen. Dabei kennt die Physik die Grenzen der eigenen Vorhersagekraft sehr genau.

Der Erfolg der Physik basiert auf ihrer Methodik.

Die Erkenntnisse physikalischer Forschung müssen objektiv, reproduzierbar und überprüfbar sein. Vorhersagen müssen ihre Richtigkeit in Beobachtungen und Experimenten beweisen. Dieser unbestechliche Abgleich der Vorhersagen mit der Wirklichkeit ist der Grund, warum die Bedingungen für die Gültigkeit physikalischer Gesetze gut bekannt sind und ihre Vorhersagen Vertrauen genießen. Die physikalische Erkenntnis erfolgt dabei schrittweise durch vorläufige Arbeitshypothesen, deren Tests und Nachbesserungen bis hin zum physikalischen Gesetz, das sich aber trotzdem fortwährend der Kontrolle durch Messungen stellen muss. Die Messgenauigkeit bestimmt dabei die Grenze, mit der die Gesetzmäßigkeiten bestätigt werden können.

Physik ist Teil unserer Kultur und unverzichtbarer Bestandteil der Allgemeinbildung.

Mit ihren Messvorschriften, Modellen und Theorien liefert die Physik die Werkzeuge, die Gesetzmäßigkeiten und Strukturen der materiellen Welt zu erkennen, zu beschreiben und nutzbar zu machen. Sie eröffnet ebenso eine wissenschaftlich fundierte Perspektive auf Phänomene des Alltags. Dieses Verständnis schärft

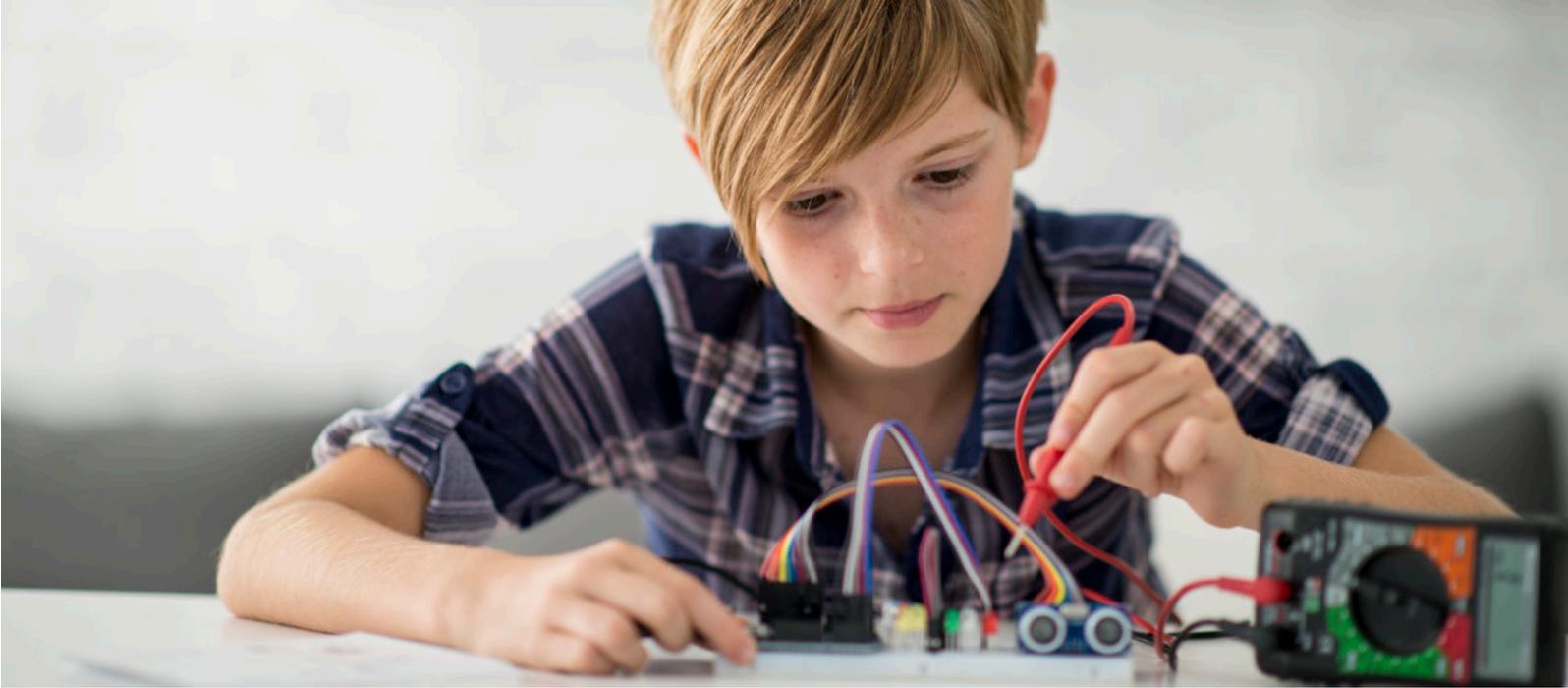
nicht nur unser Bewusstsein für Natur und Technik, sondern fördert auch das kritische Denken, nämlich den aktuellen Wissensstand im Licht neuer Erkenntnisse immer wieder kritisch zu hinterfragen und zu verfeinern. Physik hilft, die Komplexität unserer modernen Welt zu erfassen, zu begreifen und verantwortungsbewusst zu handeln. Darüber hinaus beantwortet sie auch grundlegende Fragestellungen der Menschheit zu ihrer Stellung im Kosmos. Sie ist deshalb Teil unserer Kultur und notwendiger Bestandteil unserer Bildung.

Neugierde ist der Motor der physikalischen Grundlagenforschung.

Physik ist in ihrem Kern Grundlagenforschung. Obwohl viele physikalische Entdeckungen zunächst keine verwertbaren Anwendungen zu haben scheinen, zeigt die Geschichte, dass sie später von unermesslichem Wert sein können. Die Entdeckung des Elektrons oder der Quantenmechanik resultierten aus reiner Neugierde, aber diese Erkenntnisse haben unser Leben grundlegend verändert. Physik überschreitet die Grenzen des direkt Sichtbaren und Bekannten mit dem Ziel, der Natur bislang unbekannte Phänomene und Gesetzmäßigkeiten zu entlocken. Genau dort entstehen die Innovationen von morgen und übermorgen.

Anwendungen der physikalischen Forschung verändern unseren Alltag.

Von der Elektrizität, die in unseren Wohnungen, im Verkehr und in der Kommunikation eine entscheidende Rolle spielt, bis hin zur Technologie in unseren Smartphones und medizinischen Geräten – physikalische Forschung hat unzählige Innovationen und Technologien hervorgebracht, die unseren Alltag prägen, unsere Lebensqualität ermöglichen und für unsere Gesundheit und unsere hohe Lebenserwartung essenziell sind. Herausragende Beispiele sind etwa Laser, die in der Medizin, der Materialbearbeitung und der weltweiten Kommunikation eingesetzt werden oder die Beiträge zu Computertechnologien. Auch Kernspintomografie oder Strahlentherapie spielen in der medizinischen Versorgung eine entscheidende Rolle. Physikerinnen und Physiker entdecken und entwickeln ständig neue Lösungen und Optionen für gesellschaftliche Herausforderungen.



Investitionen in die physikalische Forschung sind Investitionen in die Zukunft.

Investitionen in physikalische Forschung bringen nicht nur wissenschaftliche Erkenntnisse hervor, sondern fördern wirtschaftliche Sicherheit und technologische Weiterentwicklungen. Länder und Unternehmen, die intensiv in Forschung und Entwicklung investieren, sichern sich langfristig Innovationen und deren wirtschaftliche Verwertung. Anwendungen physikalischer Forschung schaffen neue Märkte und revolutionieren bestehende – von der Elektronik über die Medizin bis hin zur Raumfahrt. Sie kann auch dazu beitragen, hoffentlich schon bald neue, nachhaltige und resiliente Wirtschaftsformen zu entwickeln.

Physik wirkt über die Grenzen ihres Fachs hinaus.

Die Physik befasst sich mit den grundlegenden Phänomenen in der Natur. Damit ist sie Grundlage für alle naturwissenschaftlichen und technischen Gebiete. Von der Chemie und Biologie bis hin zur Informatik und den Ingenieurwissenschaften – die physikalischen Erkenntnisse sind für das Verständnis der Naturphänomene in vielen Disziplinen unverrückbare Voraussetzungen, die physikalischen Methoden wichtige Säulen der Erkenntniserweiterung. Gleichzeitig profitiert die Physik selbst vom Austausch mit anderen Forschungsgebieten, indem sie neue Ideen und Fragestellungen integriert. Diese Interdisziplinarität leistet wichtige Beiträge zur Lösung immer komplexerer Probleme.

Die Physik bietet Lösungen für zentrale gesellschaftliche Herausforderungen.

Klimawandel, nachhaltige Energieversorgung oder Ressourcenknappheit sind globale Herausforderungen, für deren Bewältigung physikalische Expertise genutzt werden muss. Physik ist der Schlüssel zur Gewinnung erneuerbarer Energien, für die Entwicklung effizienter Batterien und für Technologien zur Reduktion schädlicher Emissionen. Sie spielt eine entscheidende Rolle bei der Klimamodellierung, der Verbesserung von Katastrophenvorhersagen, der Optimierung des Ressourcenverbrauchs oder beim Verständnis der Ausbreitung von Epidemien. Die entsprechende Expertise der Physik und die daraus folgenden Hand-

lungsoptionen müssen im gesellschaftlichen Diskurs kommuniziert werden, um die Auswirkungen politischer Entscheidungen transparent zu machen.

Physik wird von Menschen gemacht.

Trotz immer leistungsfähigerer KI wird der entscheidende Fortschritt in der Physik von Menschen gemacht. Ohne die wissenschaftsbasierte Intuition oder die wissenschaftsbasierte Kontrolle von Ergebnissen kann es keinen gesicherten Fortschritt geben. Schon die Nutzung von Technologien erfordert Kenntnisse über die Technologie. Für unsere auf Wissenschaft und Technik basierende Gesellschaft ist daher naturwissenschaftliche Bildung von entscheidender Bedeutung. So hängt auch der Fortschritt der Physik in der Zukunft davon ab, wie gut es gelingt, junge Talente zu fördern und in die Forschung zu integrieren. Dies erfordert nicht nur eine gute Ausbildung an Schulen, Hochschulen und Universitäten, ausreichende finanzielle Unterstützung und planbare Karrierewege, sondern vor allem auch die Schaffung eines Umfelds, in dem Kreativität und Innovation gedeihen können.

Physik verbindet Menschen.

Physik ist objektiv. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten sind unabhängig von den Menschen, die diese erforschen oder nutzen. Daher stellt die Physik eine universelle Sprache zur Verfügung. Das trägt wesentlich zur Zusammenarbeit von Menschen aus unterschiedlichen Ländern und Kulturen bei. Physikerinnen und Physiker verstehen sich. Viele Fortschritte in der Physik sind das Ergebnis einer Zusammenarbeit von Forschenden aus verschiedenen Ländern und Kulturen, die gemeinsam an internationalen Einrichtungen und Projekten wie dem CERN, SESAME, ITER oder der ISS zusammenarbeiten. Physikalische Forschung kann über politische und gesellschaftliche Grenzen hinweg funktionieren. Die internationale Gemeinschaft der Forschenden bleibt auch in schwierigen Zeiten eine Brücke, die den Dialog aufrechterhält und den Fortschritt fördert.

*Joachim Ullrich, Ulrich Bleyer, Sarah Köster,
Claus Lämmerzahl, Dieter Meschede und Lutz Schröter*

REINE NEUGIER?

ZUM VERHÄLTNISS VON GRUNDLAGENFORSCHUNG UND ANGEWANDTER FORSCHUNG

Die Physik als Grundlagenwissenschaft der Naturerkenntnis untersucht die Struktur und Dynamik der Materie vom Kosmos bis hin zu den elementaren Bausteinen und deren fundamentale Wechselwirkungen (siehe auch den vorigen Artikel). Diese Fragestellungen erfordern Grundlagenforschung. Aber was verstehen wir darunter und in welchem Verhältnis steht sie zur angewandten Forschung? Beim Blick in die Geschichte ist erkennbar, dass das Verhältnis von Grundlagen- und angewandter Forschung eine vielfältige Entwicklung durchlaufen hat, die Begriffe sind deshalb noch heute Gegenstand historischer und wissenschaftstheoretischer Forschung (siehe auch Seite 308).

WISSENSCHAFT IST FREI!

Unser **Grundgesetz** sagt in §5, Absatz (3): „Kunst und Wissenschaft, Forschung und Lehre sind frei. Die Freiheit der Lehre entbindet nicht von der Treue zur Verfassung.“

Die Forschenden sind also frei in der Wahl ihrer Themen und Methoden, soweit sie nicht anderen Grundrechten wie der Menschenwürde entgegenstehen.

Forschung und Lehre sind Bestandteile der Wissenschaft, sodass die Freiheit auch für Zweck- und Auftragsforschung gesichert ist.

Im Gesetz nicht formuliert, aber vom Bundesverfassungsgericht klargestellt, ist die Verpflichtung des Staates, mit der Institution der Hochschulen Teilhabe an freier Wissenschaft zu organisieren.

Forschung als Teil der Wissenschaft genießt das Freiheitsrecht, es gibt aber keinen expliziten verfassungsrechtlichen Anspruch auf staatliche Förderung.

In welchem Umfang die Gesellschaft Betätigungsmöglichkeiten für die Ausübung von Wissenschaft bereitstellt, muss im Dialog zwischen Forschenden, Politik und Zivilgesellschaft verhandelt werden, damit die steigenden Bedürfnisse der Gesellschaft an wissenschaftlichen Ergebnissen und ihren Anwendungen erfüllt werden können.

Die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung ist eine der größten und erfolgreichsten Kulturleistungen der Menschheit (Seite 303). Naturwissenschaften unterziehen alle Hypothesen mit Experimenten und Beobachtungen einer objektiven Überprüfung und erkennen Gesetzmäßigkeiten, die ständig beim Vordringen in neue Bereiche der Natur bestätigt oder weiterentwickelt werden und dadurch verlässliche Voraussagen treffen können. Diese Methodik garantiert, sich der

„Wahrheit“ immer mehr anzunähern – das macht sie so erfolgreich – unabhängig davon, dass man eine „endgültige“ oder eine „ewige Wahrheit“, wie sie Glaubenssysteme bereithalten, nie erreichen kann. Nach verbreitetem Verständnis folgt die Grundlagenforschung ausschließlich der Suche nach Erkenntnis und Wahrheit und ist fester Bestandteil des Systems akademischer Forschung und Lehre, dessen Freiheit unser **Grundgesetz** sichert. Oft auch als „Neugierforschung“ bezeichnet, sind **Anwendungen** nicht Ziel von Grundlagenforschung.

Es sind allerdings die vielfältigen Anwendungen physikalischer Erkenntnisse, die die materielle Basis unserer modernen Gesellschaft ausmachen. Wissenschaftlich-technischer Fortschritt beruht entscheidend auf der Nutzung unseres Wissens über die Natur und ihre Gesetze. In der Physik sind es neue Verfahren, Materialien und Technologien, die unsere technikbasierte Lebensweise verändern. Praktisch-technische Probleme verlangen problemorientierte Forschung mit häufig großem Aufwand, eben angewandte Forschung. Direkt mit dem Ziel industrieller Anwendung verbunden wird auch von „Zweckforschung“ oder „Forschung und Entwicklung“ gesprochen.

Anwendungen bauen dabei auf dem von der Grundlagenforschung gelegten Fundament auf. Max Plancks Ausspruch „Dem Anwenden muss das Erkennen vorausgehen“ ist heute noch ein Motto der Max-Planck-Gesellschaft. Ob sich aus Erkenntnissen der Grundlagenforschung Anwendungen ableiten lassen, ist oft nicht vorhersehbar und daher wenig planbar. Grundlagenforschung ist langfristig angelegt und ihr Erfolg beruht wesentlich auf den Möglichkeiten der freien Entfaltung des kreativen Potenzials der Forschenden. Andererseits ist das Wechselspiel zwischen Erkenntnissen der Grundlagenforschung und den praktischen Anwendungen kein einseitiger Wissenstransfer. Neue technologische Entwicklungen dringen weit in die Grundlagen der Naturerkenntnis vor, die früher der Grundlagenforschung vorbehalten waren. Dabei entwickeln wir für unsere immer mehr auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basierende Lebensweise zunehmend komplexere Anwendungen. Quantentechnologien, künstliche Intelligenz oder Umweltforschung sind besondere Beispiele dafür. Auch ist Grundlagenforschung besonders dort ohne Hochtechnologie nicht denkbar, wo sie auf Geräte angewiesen ist, die Messungen am Grenzbereich des technologisch Möglichen benötigen. Die Grundlagenforschung benötigt die Hochtechnologie, und umgekehrt entstehen wichtige Anwendungen und neue Technologien aus dem Forschungsbetrieb selbst. Der Nachweis der Gravitationswellen zum Beispiel belegt das in eindrucksvoller Weise.

„SIR, ES IST SEHR WAHRSCHEINLICH, DASS IHR BALD STEUERN DARAUF ERHEBEN KÖNNT“

Um das Verhältnis von Grundlagenforschung und angewandter Forschung anschaulich zu beschreiben, wird oft eine Überlieferung von Michael Faraday bemüht. Er war eine der herausragenden Forscherpersönlichkeiten des 19. Jahrhunderts und hat wesentlich die phänomenologischen Erkenntnisse zu Elektrizität und Magnetismus gewonnen, den Feldbegriff eingeführt und das Induktionsgesetz entdeckt. Nach der Vorführung seiner Experimente vor dem späteren britischen Premierminister William Gladstone soll dieser gefragt haben, wozu denn diese ganzen Versuche nütze seien. Und hier kommt die legendäre Antwort, die Faraday gegeben haben soll: „Sir, es ist sehr wahrscheinlich, dass Ihr bald Steuern darauf erheben könnt.“ Welcher Art die möglichen Anwendungen seiner Forschung sein würden, konnte Faraday also nicht sagen. Aber ihm war klar, dass sie von großer gesellschaftlicher, also sowohl wirtschaftlicher als auch politischer Bedeutung sein würden. Wir leben heute in einer Phase technologischen Wandels, in der alle unsere Verfahren so weit wie möglich auf strombasierte Technologien umgestellt werden, um dem Klimawandel zu begegnen. Die Lehre vom Elektromagnetismus bestimmt also nicht nur heute unseren Alltag, sondern auch unsere Zukunft, wie wir im Abschnitt „Globale Herausforderungen“ ab Seite 263 darstellen. Die CO₂-Steuer ist ein aktuelles Beispiel einer mit den Ergebnissen der Natur- und Wirtschaftswissenschaften begründeten Steuergesetzgebung.

„Naturwissenschaftliche Forschung bildet immer eine solide Grundlage für den technischen Fortschritt, und die Industrie eines Landes wird niemals eine internationale Spitzenposition erreichen und halten, wenn sie nicht gleichzeitig an der Spitze der naturwissenschaftlichen Entwicklungen steht.“

Werner von Siemens: Votum betreffend die Gründung eines Instituts für die experimentelle Förderung der exakten Naturforschung und der Präzisionstechnik, 1916

Hier ist die Messung von Längenänderungen mit einer Genauigkeit eines Tausendstels des Protonenradius über einer Gesamtlänge von etwa einem Kilometer erforderlich. Ohne besondere Beschichtungstechniken für Spiegel, Lasertechnik und Messmethoden (Seite 25) wäre so ein Erfolg auf einem Gebiet, das geradezu exemplarisch für reinen Erkenntnisgewinn steht, nicht möglich.

So lässt unsere Gesellschaft mit ihrer auf Hochtechnologie beruhenden Wirtschaft die Grenzen zwischen Grundlagen und Anwendungen der Wissenschaft, nicht zuletzt auch im Bereich industrieller und militärischer Anwendungen, immer weiter verschwimmen. Damit rücken neben wirtschaftlichen auch ethische Fragen nach den möglichen Auswirkungen wissenschaftlicher Erkenntnisse und ihrer Anwendungen zunehmend und existenziell in den Vordergrund (Seite 319). Genforschung, Quantencomputing und künstliche Intelligenz sind, neben den bekannten, dramatischen Folgen von Entwicklung und Einsatz von Massenvernichtungswaffen, moderne Beispiele (Seite 323). Hier hat die Wissenschaft nicht nur die Verantwortung, ethische Maßstäbe für ihre Forschung zu setzen, sie hat auch die große Verpflichtung, Gesellschaft und Politik immer wieder auf die möglichen Folgen ihrer Erkenntnisse hinzuweisen, das Bewusstsein für mögliche Auswirkungen zu schärfen und sich mit Fachwissen und Fakten in die öffentliche Debatte einzubringen.

Die ständig wachsenden Erwartungen an wissenschaftliche Erkenntnisse und die Anforderungen an ihre Umsetzung in Wirtschaft und Technik verändern auch die Stellung der Wissenschaft. Gesellschaftlich relevante Fragestellungen wie Klimawandel, Energieversorgung oder Mobilität sind so komplex, dass bereits die Auswahl der Fakten, die für die Modellierung künftiger Szenarien einzubeziehen sind, Gegenstand

der Diskussion ist. Lösungsansätze für diese großen globalen Menschheitsprobleme bewegen sich auf dem sicheren Grund der durch die Grundlagenforschung erkannten Naturgesetze; bei ihrer Umsetzung muss aber zusätzlich eine Vielzahl gesellschaftlicher Implikationen berücksichtigt werden, was über den Rahmen der Naturwissenschaften hinaus geht. Damit verliert nicht nur die historisch gewachsene Trennung von Grundlagen- und angewandter Forschung immer mehr ihre Grundlage, es entwickelt sich auch eine zunehmend transdisziplinäre Arbeitsweise in der Forschung. Für die Ausgestaltung der Strukturen des Wissenschaftsbetriebs und seiner institutionellen und finanziellen Ausstattung bedeutet dies, das Gesamtsystem gleichermaßen zu entwickeln und auf höchstem Niveau in allen Bereichen hinarbeiten. Wie oft kommt es vor, dass Grundlagenerkenntnisse auf eine technische Neuerung angewiesen sind oder umgekehrt? Wie fatal, wenn dann eine der Komponenten vernachlässigt wurde!

Die Grundlagenforschung ist also nicht losgelöst von ihren Implikationen und Anwendungen zu sehen. Die Anforderungen der Gesellschaft an die Wissenschaft und umgekehrt die Forderungen der Forschenden nach Realisierungsmöglichkeiten für diese Anforderungen sind immer aufs Neue im Dialog zwischen Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft zu klären und daraus nachhaltige politische Entscheidungen abzuleiten.

Ulrich Bleyer



WISSEN

Die physikalische Forschung hat in den letzten Jahrzehnten in vielen Bereichen, besonders in der Grundlagenforschung, große Fortschritte gemacht. Solche Fortschritte können Verschiedenes bedeuten: Neue Phänomene und Zusammenhänge wurden entdeckt, offene Fragen beantwortet, und durch Modelle oder Theorien vorhergesagte Erscheinungen erstmals mit Messungen beobachtet.

Das grundsätzliche Verständnis der physikalischen Phänomene in der Natur hat sich dadurch gefestigt und konkretisiert. Die quantenmechanische Beschreibung der atomaren Welt funktioniert außerordentlich exakt, sodass es unter anderem möglich ist, die Ergebnisse grundlegender Messungen mit enormer Präzision, und auch Eigenschaften von Materialien im Computer vorherzusagen, um so Stoffe mit bestimmten Funktionalitäten gezielt herzustellen. Ebenso erfolgreich sind die Vorhersagen der allgemeinen und der speziellen Relativitätstheorie: Bahnen von Raumsonden und Planeten sind präzise berechenbar, und die relative Verlangsamung des Uhgengangs im Schwerfeld der Erde ist so genau bekannt, dass in jedem Smartphone die Satellitennavigation metergenau arbeiten kann.

Doch die Physik ist in diesen Grundlagenbereichen nicht „fertig“. Es gibt Aspekte, die sich noch immer eindeutigen Erklärungen entziehen: Auf großräumigen Skalen gibt es klare experimentelle Hinweise, dass eine unsichtbare Art von Materie (Dunkle Materie) und Energie (Dunkle Energie) die Bewegungen von Galaxien, Galaxienhaufen und die Entwicklung des Universums als Ganzes bestimmt. Die Frage, warum es genau drei Familien von Elementarteilchen gibt, die sich so deutlich in ihren Massen unterscheiden, entzieht sich ebenso noch der Erklärung. Ob und wie sich erfolgreiche Theorien der Welt der Atome, Elektronen und Elementarteilchen und von Raum und Zeit zusammenführen lassen, wird intensiv bearbeitet. Immer deutlicher wird, dass komplex zusammengesetzte Systeme sich anders verhal-

ten als die Summe ihrer Komponenten. Das Verhalten von Schwärmen, Menschengruppen oder anderen biologischen Systemen kann dabei mit physikalischen Methoden erforscht werden – ein Bereich, in dem in Zukunft deutliche Verständnisfortschritte zu erwarten sind.

Die offenen Fragen dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, das im gesamten Bereich „dazwischen“ – also von den Elementarteilchen über die Atome bis hin zu Sternen – die Theorien und Modelle sehr exakte und immer wieder erfolgreich überprüfte Vorhersagen machen. Die Physik hat in diesem riesigen Größen- und Zeitbereich einen wertvollen und vor allem verlässlichen Erkenntnisschatz angehäuft, den wir im Kapitel „Wissen“ schlaglichtartig darstellen – immer mit Blick auf seine Grenzen und damit auf die Perspektiven der Forschung kommender Jahrzehnte.

Während einige der Modellvorhersagen der Physik, wie die erst im Jahr 2012 durch Messungen belegte Existenz des Higgs-Teilchens, voraussichtlich nicht direkt zu gesellschaftlichen Auswirkungen oder wirtschaftlich nutzbaren Anwendungen führen werden, sind andere Vorhersagen global relevant: Schon seit mehr als fünfzig Jahren werden die Folgen des menschengemachten Klimawandels prognostiziert. Die Modelle werden dabei immer genauer. Der Erwärmungstrend setzt sich weiter fort und das Pariser Klimaziel von 1,5° C oder weniger Erderwärmung wurde bereits verfehlt. Die Auswirkungen des verstärkten Treibhauseffekts auf das komplexe Erdsystem bringt die Vorhersagemodelle an ihre Grenzen, da immer mehr Komponenten des Klimasystems in Zustände gelangen, bei denen nicht klar ist, ob ein nur kleiner zusätzlicher Temperaturanstieg zu großen und schnellen Veränderungen führen wird. Unser Platz im Universum wurde durch astrophysikalische Forschung mit zahlreichen neuen Observatorien auf der Erde und im Weltall so genau bestimmt wie nie zuvor. Wir kennen unsere kosmische Nachbarschaft, und auch die großräumigen Struk-



Die Essenz vieler Grundphänomene der Physik ist im Titelbild dieses Buchs künstlerisch dargestellt. Wer findet hier Felder, Teilchen, Kräfte? Ist Verschränkung gemeint? Die Raumkrümmung durch Massen, das Magnetfeld der Erde oder die Gluonen, die Quarks zusammenhalten? Sehen wir Sterne und Galaxien am Rande des Universums und zweidimensionale Materialien?

turen des Universums sind gut vermessen. Während für viele Jahrhunderte Beobachtungen von sichtbarem Licht die meisten Informationen lieferten, ist heute das ganze elektromagnetische Spektrum von den Radiowellen bis zu den Gammastrahlen für die Astronomie erschlossen. Zusätzlich werden andere Boten aus dem Universum genutzt: lichtschnelle Teilchen, die aus ganz anderen Regionen unserer Milchstraße und darüber hinaus zu uns gelangen, und Verzerrungen in der Raumzeit – Gravitationswellen –, die vom verschmelzen Schwarzer Löcher in Millionen Lichtjahre entfernten Galaxien berichten.

Fortschritt in der Wissenschaft bedeutet oft, dass die Grenzen des Wissens verschoben werden, ohne dass zunächst eine von der Art her grundsätzlich neue Erkenntnis gewonnen wird. Ein Beispiel für eine solche Grenzverschiebung ist die Suche nach der Masse des Neutrinos, von der bekannt ist, dass sie sehr klein ist, aber nicht ganz exakt Null sein kann. Die Messungen geben immer bessere Obergrenzen, ohne jedoch bisher genau die Masse bestimmt zu haben. Eine andere Art von Verschiebung ergibt sich in der Präzision von Zeitmessungen durch immer genauere Uhren. Während Atomuhren längst etablierte Taktgeber für jeden Alltagsbedarf sind, ermöglichen heutige optische Uhren oder zukünftige Kernuhren eine so große Präzision der Zeitmessung, dass auf Basis des minimal veränderten Uhrengangs im Schwerfeld der Erde die Höhe eines Orts auf wenige Millimeter genau bestimmt werden kann.

Auch der Bereich der alltäglichen Erfahrung wird durch physikalische Forschung weiter erschlossen. Die Entwicklung von Materialien, mit deren Hilfe wir unser Leben immer angenehmer gestalten können, nutzt zunehmend Effekte aus, die sich aus den exotischen mathematischen Regeln der Topologie ergeben. Damit können in Zukunft nicht nur elektronische, sondern auch spintronische oder photonische Bauteile zur Datenverarbeitung hergestellt werden. Mit leis-

tungsfähigen Computern wiederum ist es möglich geworden, die Eigenschaften von neuen Materialien vorherzusagen oder passende Zusammensetzungen zu suchen. Die Quantenphysik liefert auch hier den soliden theoretischen Unterbau. Dass Materialien in nur zwei Dimensionen beispielsweise als Graphen erzeugt werden können, ist eine gerade einmal zwanzig Jahre alte Entdeckung. Die Forschung dazu, welche Möglichkeiten sich aus der Kombination mehrerer zweidimensionaler Schichten ergeben, steckt noch in den Anfängen und zeigt schon jetzt interessante und nützliche Ergebnisse.

Die Lebenswissenschaften haben Einzug in die Physik gehalten – und umgekehrt. Mit modernen mikroskopischen Methoden lassen sich die Struktur und Funktion von Biomolekülen atomgenau aufklären, was bei der Suche nach medizinischen Wirkstoffen sehr hilfreich sein wird. Messungen an einzelnen Zellen und Nervenbahnen öffnen Horizonte für zukünftige Diagnose- und Therapieverfahren. Die Frage nach dem Ursprung des Lebens schließlich wird auch von physikalischer Seite angegangen, wenn Forschende versuchen, die Funktionen einfacher Zellen von Grund auf nachzubauen.

In welchen Bereichen neue Erkenntnisse mithilfe von künstlicher Intelligenz, Quantencomputern, immer besserer Messtechnik bis hinunter zu kleinsten Zeit- und Längenbereichen und mit Experimenten im Weltraum möglich sein werden, zeichnet sich zwar grundsätzlich ab. Doch der genaue Blick in die Zukunft bleibt – trotz aller Physik – unscharf, und Überraschungen sind immer möglich. Nur durch weitere Forschung werden sich noch mehr Geheimnisse der Natur lüften lassen.

DIE VIELFALT PHYSIKALISCHER PHÄNOMENE VERSTEHEN

Die Lebensweisen der Menschen sowie ihre Welt- und Selbstverständnisse sind wesentlich durch die Erkenntnisse der Physik geprägt worden. Was wissen wir über die Natur der Dinge, und wie wird dieses physikalische Wissen begründet?

Physiker:innen interessieren sich für natürliche Phänomene und Prozesse, die wir in der Welt erfahren und beobachten können, und versuchen, ihre Vielfalt zu verstehen. Wie bewegen sich Körper und warum? Weshalb sind manche Materialien fest und andere weich oder flüssig? Wie entstehen Farben? Warum sind manche Dinge magnetisch und andere nicht? Welche Stoffe leiten elektrischen Strom?

Physikalische Messgrößen: Intersubjektive Beobachtungen

Solche physikalischen Fragen haben einen anthropologischen Ursprung: Menschen mussten stets Entfernungen, Geschwindigkeiten oder Kräfte abschätzen, um besser überleben zu können.

Deswegen gehören einfache physikalische Messgeräte wie Lineale für Abstände, Sonnenuhren für Zeitdauern oder Waagen für Gewichte zu den frühesten Kulturleistungen der Menschheit. Im Laufe der Geschichte kamen weitere Apparaturen hinzu, mit denen sich wirkende Kräfte und Energien, Temperatur und Wärme, die Intensitäten von Licht und Farben quantitativ fassen ließen. Gemeinsam ist allen Messgeräten, dass sie unverändert nachgebaut und ihre Messungen überall und jederzeit wiederholt werden können. Vor allem aber weisen sie immer eine Skala auf, an der man eindeutig Zahlen als Messwerte ablesen kann. Dadurch werden Beobachtungen deutungsfrei und unabhängig von den Beobachtenden, da jede die Messung Anderer überprüfen und Einspruch erheben kann. Diese **intersubjektive Vergleichbarkeit** führt zu einer Akzeptanz der Messgrößen und verbürgt die weltweite Gültigkeit physikalischer Aussagen.

Auf dieser Wiederholbarkeit von Beobachtungen gründet die Physik ihre Erkenntnisse, indem sie allein mit solchen **physikalischen Größen** argumentiert, die durch Messgeräte gegeben sind. Diese Messgrößen werden durch einen Buchstaben symbolisiert, wobei die ablesbaren Zahlenwerte stets mit einer Einheit angegeben werden müssen, die für das verwendete Messgerät steht. So ist z. B. die Temperatur T diejenige Größe, die ein bestimmtes Thermometer anzeigt. Ist das Thermometer so gebaut, dass es auf „Grad Celsius“ geeicht ist, gibt man die konkreten Messwerte mit $T = 37^\circ\text{C}$ an, wobei die Einheit $^\circ\text{C}$ die Kon-

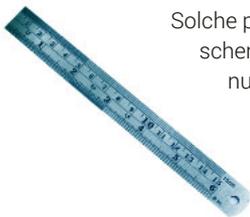
struktionsweise des Thermometers kenntlich macht. Entsprechend wird die elektrische Spannung U durch ein konstruiertes Voltmeter und der elektrische Strom I durch ein Amperemeter bestimmt. 2019 hat man sich für das internationale Einheitensystem (SI) auf festgelegte Werte für sieben definierende Konstanten geeinigt, darunter die fundamentalen Naturkonstanten c und h , sodass die SI-Einheiten nicht mehr von der Konstruktion und den physikalischen Eigenschaften von Messgeräten abhängen und sich jede physikalische Größe relativ zu diesen universalen Grundeinheiten ausdrücken lässt („Die universelle Definition der physikalischen Einheiten“ auf Seite 209).

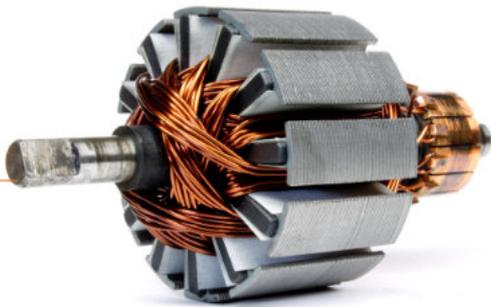
Es bleibt eine zentrale Aufgabe der Physik, neue Messgeräte zu erfinden, um reproduzierbare Phänomene zu entdecken und Messgeräte mit möglichst genauen und gut reproduzierbaren Werten für bekannte und vermeintlich verstandene Phänomene zu bauen, um eventuelle Abweichungen vom erwarteten Verhalten feststellen zu können („Mit Präzisionsmessungen auf der Suche nach neuer Physik“ auf Seite 159). Weil solche intersubjektiven Messgrößen bei individuellen Erlebnissen von Menschen nicht möglich sind, gehören Gedankenprozesse oder Intentionen zu denjenigen Phänomenen, die der Physik prinzipiell verborgen bleiben. Physik ist somit vor allem eine Wissenschaft der genauen Beobachtung und der Entdeckung wiederholbarer Phänomene und Prozesse, die aufgrund der Zahlenskala an Messgeräten verglichen werden können.

Physikalische Naturgesetze: Gleichbleibende Beziehungen zwischen Messgrößen

Vergleichende Messungen ermöglichen es, in der Vielfalt der Phänomene und Prozesse gleichbleibende Zusammenhänge zu erkennen. Liest man an einem Voltmeter zwischen den Enden eines Drahts einen Spannungswert U ab, tritt stets ein dazu proportionaler Wert I an einem Amperemeter auf. Solche Zusammenhänge lassen sich durch Gleichungen zwischen diesen Messgrößen ausdrücken – in diesem Beispiel durch das Ohmsche Gesetz $U = R \cdot I$, wobei das Verhältnis R , der Widerstand des Drahts, nur von dem verwendeten Draht abhängt, nicht aber davon, wer die Messungen durchgeführt hat oder wo. In diesen überprüfbareren Relationen zwischen physikalischen Messgrößen liegt der Grund für die Anwendbarkeit der Mathematik in der Physik (Seite 17).

Im Laufe der Geschichte traten immer feingliedrigere Beziehungen zutage. Neben geometrischen Proportionen





zwischen Abständen und algebraischen Relationen zwischen Zahlen erwies sich vor allem die Differenzialrechnung als fruchtbar. Sie betrachtet zum Beispiel, wie sich eine Größe kontinuierlich mit der Zeit ändert. So konnten Geschwindigkeiten v und Beschleunigungen a von Körpern als Verhältnis von messbaren Abständen und Zeiten eingeführt und die Newtonsche Bewegungsgleichung $F = m \cdot a$ erkannt werden, wobei die Masse m über ihr Gewicht durch eine Waage, die Kraft F durch eine Dehnungsfeder und die Beschleunigung a mit einem Längenmaßstab und einer Uhr bestimmt werden.

Solche jederzeit und überall überprüfbar Beziehungen zwischen messbaren Größen erwiesen sich faszinierenderweise als unabhängig von uns Menschen, d. h. als **universell gültige Naturgesetze**, auf die wir keinen Einfluss haben, die wir aber nutzen können. Unter den bekanntesten sind die vom Abstand r zwischen zwei Körpern der Massen m_1 und m_2 abhängende Gravitationskraft $F = G m_1 m_2 / r^2$ mit der Gravitationskonstanten G , die wir täglich als Schwere spüren, aber auch Satelliten auf ihren Bahnen hält; die Relation zwischen dem Strom in einer Drahtspule und der magnetischen Kraft, die wir in jedem **Elektromotor** nutzen; oder die Einsteinrelation $E = m \cdot c^2$ zwischen der Energie und Masse eines Körpers. Sie erlaubt uns zu verstehen, warum die Sonne über mehrere Milliarden Jahre leuchten und uns mit Wärme versorgen kann.

Es ist eine Aufgabe der theoretischen Physik, durch mathematische Umformulierungen solcher Gleichungen die Beziehungen der vielen experimentell entdeckten Naturgesetze zueinander zu klären. Denn diese sind nicht unabhängig voneinander, sondern manche können aus anderen logisch hergeleitet werden. So erlaubt etwa ein Theorem von Emmy Noether, aus Symmetrien von Raum und Zeit auf die zeitliche Konstanz von physikalischen Größen zu schließen, insbesondere auf die Erhaltung der Energie, des Impulses und des Drehimpulses. Nur eine Handvoll Grundgleichungen werden letztendlich benötigt, um alle beobachtbaren Relationen zwischen Messgrößen zu begründen und mit ihnen die Vielfalt der Phänomene in verschiedene **Phänomenbereiche** zu ordnen. Ein wichtiger Schritt dabei ist, grundlegende Objekte wie etwa Teilchen, Felder oder Quanten zu identifizieren, sodass sich Naturgesetze als Wechselwirkungsrelationen zwischen ihnen verstehen lassen.

Physikalische Entitäten: Elementare Teilchen und Felder

Beobachten wir die Natur, so fallen uns Objekte auf, die trotz ihrer Bewegungen und unterschiedlicher Beobachtungsperspektiven scheinbar dieselben bleiben: die Sonne, der Baum,

NATURGESETZE UND PHÄNOMENBEREICHE DER PHYSIK

Die Physik entdeckte in der Vielfalt der Phänomene viele gleichbleibende Beziehungen zwischen messbaren Größen, die durch mathematische Grundgleichungen ausgedrückt und so in physikalische Phänomenbereiche geordnet werden konnten:

- Die **klassische Mechanik** für alle Phänomene der Bewegung von Körpern mit der Masse m basiert auf der Newtonschen Gleichung

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

zwischen der Beschleunigung \vec{a} und der wirkenden Kraft \vec{F} .

- Die **Thermodynamik** für alle Phänomene der Wärme beruht auf der Clausiusschen Relation

$$dQ = TdS$$

zwischen der Änderung der Entropie S und der ausgetauschten Wärme dQ bei einem reversiblen Prozess.

- Die **Elektrodynamik** für alle elektrischen und magnetischen Phänomene gründet auf den Maxwell-Gleichungen

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = j^\nu \quad \text{und} \quad \partial_\mu {}^*F^{\mu\nu} = 0$$

zwischen Ladungs- und Stromdichten j^ν sowie den elektrischen und magnetischen Feldern $F^{\mu\nu}$.

- Die **Quantenphysik** für alle Phänomene der Unschärfe und Verschränkung von Zuständen basiert auf der Heisenbergschen Vertauschungsrelation

$$[\hat{r}, \hat{p}] = i\hbar$$

zwischen Ort \hat{r} und Impuls \hat{p} von Teilchen (Seite 24).

- Die **statistische Physik** für alle Phänomene der Unordnung und kollektiven Kooperation beruht auf der Boltzmannschen Gleichung

$$S = k_B \log W$$

zwischen Entropie S und Wahrscheinlichkeit W von Zuständen.

- Die **Kosmologie** und damit alle Phänomene der Struktur von Raum und Zeit gründen auf der Einsteinschen Gleichung (Seite 59)

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

zwischen der messbaren Krümmung $G_{\mu\nu}$ der Raumzeit und dem Energie-Impuls $T_{\mu\nu}$ der Materie (Seite 67).

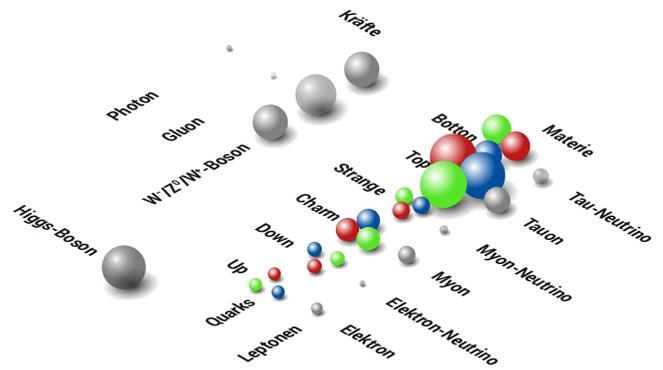
Natürlich spielen in der Regel viele der Phänomenbereiche gleichzeitig eine Rolle, z. B. im Abschnitt „Physik und Leben“ ab Seite 131 vor allem die Thermodynamik und die statistische Physik, im Abschnitt „Die Welt der Materie um uns herum“ ab Seite 73 vor allem die statistische Physik und die Quantendynamik, im Abschnitt „Das Kleinste und das Größte“ ab Seite 33 vor allem die Quantendynamik und die Kosmologie.

1																	2		
H																	He		
3	4													5	6	7	8	9	10
Li	Be													B	C	N	O	F	Ne
11	12													13	14	15	16	17	18
Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118		
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Ff	Uup	Lv	Ts	Og		
* 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71																			
Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu																			
** 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103																			
Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr																			

das Wasserglas. Die Physik machte es sich zur Aufgabe, nach Objekten zu suchen, die für physikalische Größen die gleichen Messwerte zeigen, egal wann und an welchem Ort oder in welcher räumlichen Orientierung sie gemessen wurden – sozusagen die gleichbleibenden Bausteine, aus denen die Vielfalt der sich verändernden Welt zusammengesetzt ist. Sonne, Baum und Wasserglas schieden aus: Ein Wasserglas zerbricht beim Aufprall, der Baum verliert im Herbst seine grünen Blätter, und selbst die Helligkeit der Sonne schwankt. Aber in der Vielfalt der Materialien konnten Substanzen wie Gold und Eisen gefunden werden, die stets gleiche physikalische Größen wie Massendichte, Farbe oder Festigkeit aufwiesen und sich chemisch gleich verhielten. Es zeigte sich, dass diese stofflichen, **chemischen Elemente** aus gleichen mikroskopischen Atomen aufgebaut sind, die sich zu Molekülen verbinden können und durch ihre verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten sowohl die Vielfalt als auch die Veränderbarkeit der Materialien hervorbringen (Seite 51).

Aber auch die chemischen Elemente konnten durch radioaktive Prozesse umgewandelt werden, da die Atome aus Elektronen und Atomkernen bestehen, zudem diese Kerne aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt sind und sich somit umwandeln können. Tatsächlich nutzt die Geophysik heute diese veränderlichen Eigenschaften von Elementen, indem sie geophysikalische Prozesse mithilfe von stabilen und radioaktiven Kernen des gleichen Elements (Isotopen) nachvollzieht (Seite 255).

Während Elektronen nach heutigem Stand zu den elementaren Bausteinen gezählt werden, gilt das nicht für die Protonen und Neutronen. Denn diese ließen sich wiederum in Quarks verschiedener elementarer Massen, Ladungen und Spins zerlegen (Seite 48). Hinzu kamen Entdeckungen von noch weiteren elementaren Teilchen wie den Neutrinos (Seite 45), den Myonen und den Tauonen. Die systematische Zusammenfassung aller bekannten Elementarteilchen und der Wechselwirkungen zwischen ihnen bezeichnen Physiker:innen heute als das **Standardmodell der Teilchenphysik** (Seite 35). Es liefert nicht nur eine Erklärung dafür, wie Materie zusammengesetzt ist, sondern auch dafür, wie ihre unterschiedlichen Eigenschaften zu verstehen sind: Für jeden Körper erhält man die gemessenen Werte, z. B. von Masse, Ladung oder magnetischem Moment, durch Addition der Werte seiner elementaren Bestandteile und der Eigenschaften ihrer Verbindungen.



Materie besteht aus elementaren Teilchen, die aufgrund ihrer Eigenschaften (Masse, Ladung, Spin) klassifiziert werden können: Man unterscheidet Quarks (up, down, charm, strange, top, bottom) und Leptonen (Elektron, Myon, Tauon, Neutrinos). Zudem treten elementare Kraftfelder auf, die sogenannten Eichbosonen (Photon, Gluonen, Z-Boson und W-Bosonen), sowie das Higgs-Boson (Seite 41), ohne das alle Teilchen ohne Masse wären.

Diese **Objektivierung der Materie** durch elementare Teilchen beruht allein auf der Beobachtung der Invarianz physikalischer Messgrößen: Nur solche vom messenden Beobachter und dem jeweiligen Geschehen unabhängigen Objekte können elementare physikalische Entitäten sein.

Sind die elementaren Objekte und ihre Wechselwirkungen bekannt, so kann man sich auch zusammengesetzten Objekten mit neuen Erkenntnissen zuwenden und so neuen Phänomenen auf die Spur kommen – etwa Weißen Zwergen und Roten Riesen in der Astrophysik (ab Seite 57), oder auch Skyrmionen in magnetischen Festkörpern (Seite 81). Aber vor allem können Biomoleküle sich in Wasser zu supramolekularen Komplexen zusammenfinden, Organellen und Zellen bilden, die für unser Leben essenziell sind (Seite 145). Das Wissen über die molekularen Bausteine und ihren physikalischen Wechselwirkungen in chemischen Bindungen ist somit für das Verständnis der lebenden Materie und damit auch für Biologie und Medizin unentbehrlich.

Messgeräte für Licht und Strahlungen zeigen aber noch eine zweite Klasse von physikalischen Entitäten, die sich nicht unmittelbar als elementare Teilchen verstehen lassen: die elektromagnetischen Felder. Sie breiten sich im gesamten Raum wellenartig aus und zwar stets mit der gleichen Geschwindigkeit – der Lichtgeschwindigkeit. Gleichzeitig sind sie an die elementaren Teilchen gekoppelt und führen zu Kräften zwischen diesen. Im Laufe der Geschichte wurden neben dem elektromagnetischen Feld und dem Gravitationsfeld (Seite 59) weitere elementare Kraftfelder gemessen: starke und schwache Kernkräfte, die von den in Atomkernen neu entdeckten elementaren Teilchen erzeugt und gespürt werden.

Es ist eine wichtige Aufgabe der Physik zu untersuchen, ob die elementaren Teilchen wirklich elementar, also nicht zusammengesetzt und unveränderlich sind, und ob die Felder wirklich fundamental, d. h. nicht als Teile eines umfassenden Felds begriffen werden können.

PRINZIPIEN DER PHYSIK

Für die Begründung des physikalischen Wissens wurden fundamentale Prinzipien formuliert, die unsere Erkenntnissuche leiten. Zunächst sind dies die methodischen Prinzipien wie die Wiederholbarkeit von Experimenten, die logische Widerspruchsfreiheit und Vollständigkeit von Argumentationen sowie die Unabhängigkeit der Aussagen von menschengemachten Konventionen.

Hinzu kommen Prinzipien des Weltverständnisses, die physikalische Theorien erfüllen sollten. Die wichtigsten sind u. a.

- **das Relativitätsprinzip:** Naturgesetze sind für alle Beobachtenden gleich, die sich gleichförmig zueinander bewegen; es gibt für sie keine ausgezeichneten Orte, Zeiten oder Geschwindigkeiten;
- **das Atomprinzip:** Materie ist aus fundamentalen Entitäten aufgebaut; alle ihre physikalischen Größen lassen sich aus Wechselwirkungsrelationen zwischen elementaren Teilchen und Feldern bestimmen;

- **das Lokalitätsprinzip:** Wechselwirkungen von Teilchen und Feldern sind nur am gleichen Ort zur gleichen Zeit möglich; es gibt keine Fernwirkungen;

- **das Kausalitätsprinzip:** Zeit zeigt eine Richtung, die erlaubt zwischen vorher und nachher, zwischen Ursache und Wirkung zu unterscheiden; es gibt keine Zeitumkehr oder Reise in die Vergangenheit;

- **das Superpositionsprinzip:** Quantenfelder lassen sich additiv überlagern; sie zeigen deswegen Wellenausbreitung und Interferenzen.

Letztlich wird die Physik von dem Prinzip der Einheit der Welt geleitet, dass Naturgesetze universell gelten und es keine alternativen Fakten gibt.

Wahrscheinlichkeit von Ereignissen: Quantisierung

Die scheinbare Verschiedenheit des Verhaltens von elementaren Teilchen und Feldern wurde durch die Entdeckung ihres gemeinsamen Quantencharakters aufgehoben: Teilchen erscheinen als lokale Ereignisse von Feldern, die nur die Wahrscheinlichkeiten ihrer Realisierungsorte darstellen. Auch Felder erscheinen daher in Messungen als Teilchen und Teilchen verhalten sich wie Felder, die im gesamten Raum ausgebreitet sind und Welleneigenschaften zeigen wie Licht („Die Wahrscheinlichkeitswelt der Quanten“ auf Seite 24). Das einheitliche Verhalten konnte durch Gleichungen für **Quantenfelder** beschrieben werden, deren Eigenschaften zu den anspruchsvollsten aktuellen Themen der Mathematik gehören (Seite 17). Diese Quantenfeldtheorie lieferte auch eine Erklärung dafür, wie die Vielfalt der chemischen Elemente während der Entwicklung des Universums entstand, warum es exotische Materiezustände gibt („Dipolare Gase“, Seite 92), wieso manche Leiter keinen elektrischen Widerstand haben oder topologische Isolatoren sind (Seite 77).

Die Quantisierung des Verhaltens aller physikalischen Entitäten war ein wichtiger erster Schritt zu einer Vereinheitlichung der Physik und ihres Weltverständnisses, in dem die gefundenen Naturgesetze im Standardmodell auf wenige Wechselwirkungsrelationen zwischen elementaren Quanten zurückgeführt werden können. Es bleibt eine herausfordernde Aufgabe der Physik zu klären, ob auch die Gravitation einen Quantencharakter zeigt (Seite 69) und damit eine einheitliche Beschreibung aller Naturgesetze im Kleinsten und im Größten möglich ist.

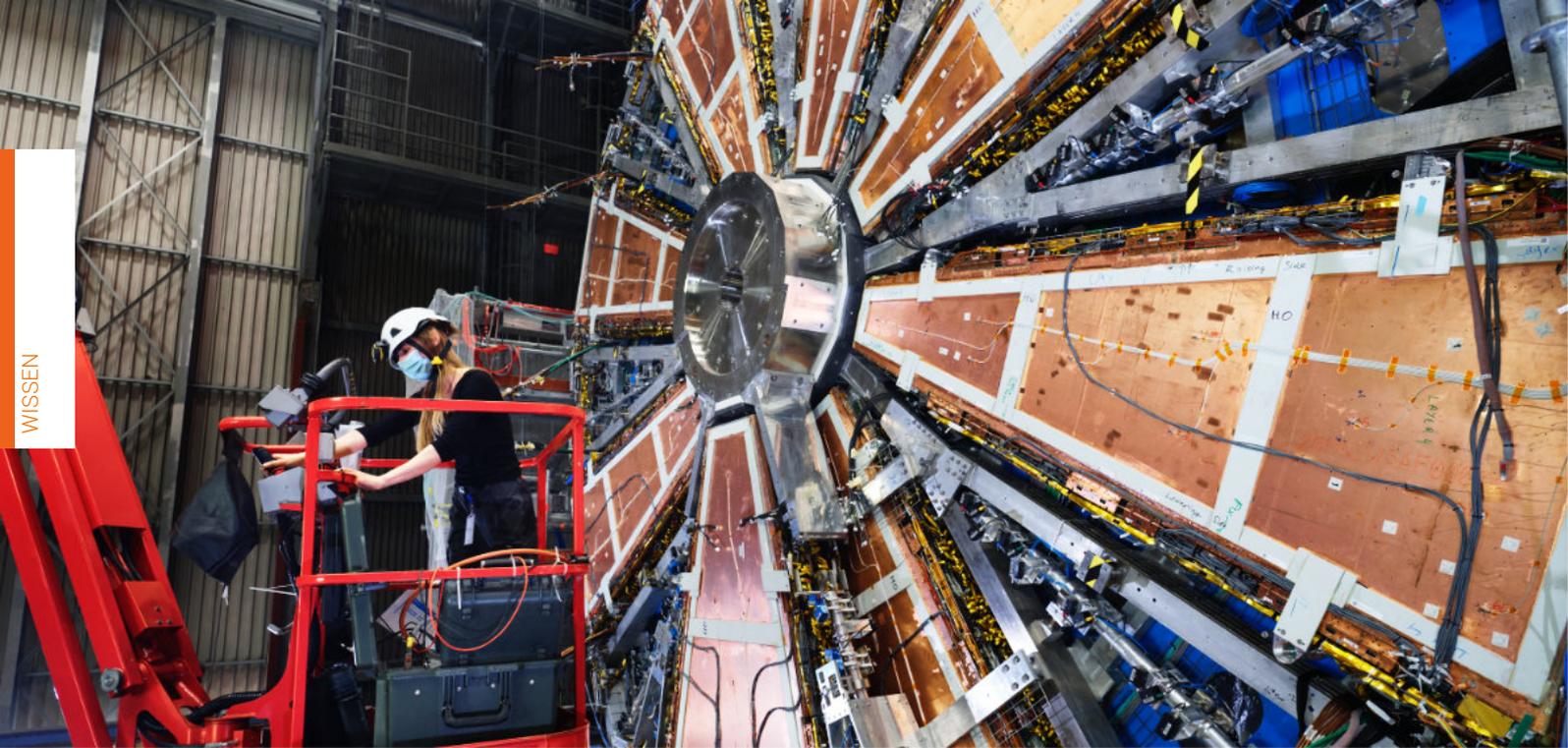
Um dieses Standardmodell der Physik besser verstehen und begründen zu können, wurden fundamentale Prinzipien for-

muliert wie das Relativitätsprinzip, die unserem Weltverständnis zu Grunde liegen und denen alle Naturgesetze zwischen physikalischen Größen und Entitäten genügen sollten. Die **Plausibilität dieser Prinzipien** bietet eine gewisse Sicherheit für die Gültigkeit der Naturgesetze. Aber sicher wissen können wir es nicht. Es bleibt eine Aufgabe der Physik, das Standardmodell zu hinterfragen und zu testen (Seite 43). Für diesen Zweck nutzt die Physik deshalb die Möglichkeit der Vorhersage und Überprüfung von Theorien durch Experimente.

Physikalische Vorhersagen: Test und Nutzen des Wissens

Naturgesetze determinieren kein Geschehen, sondern geben ihm nur einen Rahmen vor. Dieser kann genutzt werden, um durch technisch realisierbare Rahmenbedingungen Situationen zu schaffen, in denen Prozesse vorhersehbar ablaufen müssen und Ereignisse mit bestimmten Messwerten erwartbar werden. Treten diese nicht wie erwartet ein, so stimmt entweder die Theorie nicht, oder der Experimentaufbau lässt relevante Randbedingungen außer Acht. Auf dieser Widerlegungsmöglichkeit durch die **Faktizität vorhergesagter Ereignisse** beruht die Glaubwürdigkeit der Physik. Es ist daher eine zentrale Aufgabe der Physik, immer wieder neue Experimente zu entwerfen, um ihre Aussagen überprüfen und theoretische Annahmen falsifizieren zu können. Nur das, was keinem Experiment widerspricht, kann weiterhin als gültig angenommen werden – immer unter Vorbehalt zukünftiger Experimente.

Der Aufwand für solche Experimente steigt allerdings ständig, wie beim Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf (Seite 40), und die Datenmenge bei Messungen nimmt gigantische Ausmaße an. Um in immer komplexeren Situationen



Eine Wissenschaftlerin arbeitet an einem Teilchendetektor.

überhaupt Ereignisse vorhersagen zu können, setzt die Physik zunehmend auf die Unterstützung von Computern (Seite 19), z. B. für immer genauere Wettervorhersagen (Seite 256) oder gar die Berechnung der Entstehung von Sternen, Galaxien und Gravitationswellen (Seite 64). So lassen sich auch Materialien mit völlig neuen Eigenschaften mittlerweile digital entwerfen, bevor sie experimentell realisiert werden (Seite 87). Quantencomputer (Seiten 187, 201 und 277) erlauben dabei völlig neue Arten von Rechnungen (Seite 205).

Die Kontrollierbarkeit von bestimmten Zuständen physikalischer Systeme dient aber nicht nur der Vorhersage von experimentellen Testergebnissen, sondern vor allem dem gezielten Entwurf technischer Geräte für nützliche Aufgaben. Dies hat bereits seit der Industrialisierung mit dem Maschinenbau und der Elektrotechnik wie kaum etwas anderes unsere Gesellschaft verändert. Heute werden völlig neue physikalische Effekte technisch anwendbar, wie z. B. die Leitung und Kontrolle von Licht in Metamaterialien nicht nur für Glasfasertechnologien (Seite 80), oder die Konstruktion neuer Medizingeräte zur Diagnose und Therapie (Seite 224). Mit der Kontrolle der Kohärenz und Verschränkung von Quanten eröffnen Physiker:innen mit der Quantentechnologie gerade völlig neue Wege für die Ingenieurskunst. So dienen etwa Quantensensoren der Messung kleinster Veränderungen (Seite 207), was bereits in Fahrzeugen und Haushaltsgeräten zum Einsatz kommt (Seite 175). Die Abschätzung der Folgen dieser völlig neuen Techniken für die Gesellschaft gehört zentral zur Aufgabe der Physik und ist Grundlage ethischer Entscheidungen über ihre Akzeptanz (Seite 319). Die Physik tritt daher auch in einen ständigen Dialog mit der Gesellschaft (Seite 333), macht ihr Wissen bekannt und berät Politik und Zivilgesellschaft (Seite 329).

Vielfalt der Phänomene: Kollektives Verhalten

Das Mögliche ist bei Weitem noch nicht ausgelotet. Das Erstaunlichste an der Physik ist wohl ihre Fähigkeit, die unge-

heure Vielfalt an Phänomenen begreifbar zu machen (Seite 73). Mit nur einer Handvoll fundamentaler Gesetzmäßigkeiten und elementarer Teilchen kann sie beispielsweise die Bewegung von Planeten in Sonnensystemen fern der Erde erklären und dort nach Hinweisen auf Leben suchen (Seite 281). Auch die Komplexität der irdischen Prozesse lässt sich mithilfe der Physik zunehmend besser erfassen (Abschnitt „Unsere Erde“ ab Seite 102), sodass wir zum Beispiel verstehen, wie sich das Klima der Erde in Zukunft durch unsere menschlichen Eingriffe verändert (Seite 120 und Seite 237).

Doch nicht nur die unbelebte Natur ist Gegenstand der Physik: Durch die ungeheure Anzahl von Ereignisprozessen in der Welt, durch ihre Wechselwirkungen entsteht eine Vielfalt und Komplexität der Phänomene, die unser Leben überhaupt erst ermöglicht – Effekte der Selbstorganisation führen zu zellulärer und aktiver Materie (Abschnitt „Physik und Leben“ ab Seite 131). Diese beruhen auf kollektiven Effekten vieler Teilchen, die **emergente Phänomene** wie feste und flüssige Phasen der kondensierten Materie hervorbringen (Seite 29) und unglaublich komplexe, dynamische Strukturen der Materie fernab von thermodynamischen Gleichgewichtssituationen ermöglichen (Seite 31). So zeigt selbst das soziale Verhalten vieler Menschen beim Verkehr, bei Epidemien oder an der Börse kollektive Effekte, die sich mit den Methoden der Physik beschreiben lassen (Seite 242). Solche komplexen Prozesse können mit dem physikalischen Weltverständnis in ihren Strukturen und Gesetzmäßigkeiten begriffen werden. Weil aber Naturgesetze nicht determinieren und die technische Kontrolle von Zuständen in komplexen Systemen in der Regel nicht möglich ist, bleiben individuelle Situationen und einzelne Schicksale von Menschen durch Physik nicht verstehbar. Aber zu wissen, was prinzipiell möglich ist und was nicht, ist für unser Welt- und Selbstverständnis unabdingbar. Hierzu tragen physikalische Erkenntnisse wesentlich bei.

Klaus Mecke

MESSEN ALS GRUNDLAGE VON PHYSIK UND TECHNIK

Das „Messen“ ist allgegenwärtig in unserer durch Technologie geprägten modernen Gesellschaft, ist eine der wesentlichen konzeptionellen Grundlagen der Physik und hat sogar Kunst und Literatur beflügelt, wie etwa im Roman „Die Vermessung der Welt“.

Es gibt die „Wissenschaft des Messens und seiner Anwendung“, die **Metrologie**. Fast jedes Land hat ein nationales Metrologieinstitut, die in der Meterkonvention zusammengeschlossen sind, einer internationalen Organisation, repräsentiert durch das Internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM, franz. „Bureau International de Poids et Mesures“) in Paris. Unter anderem werden hier durch das „Joint Committee for Guides in Metrology“ (gemeinsamer Ausschuss für Richtlinien in der Metrologie) zusammen mit anderen internationalen Organisationen (z. B. ISO für die Normung, OIML für das gesetzliche Messwesen, ILAC für die Akkreditierung) die Begrifflichkeiten rund um das Messen im **Internationalen Wörterbuch der Metrologie** (VIM, franz. Vocabulaire international de métrologie) festgelegt. Zurzeit wird an VIM 4 gearbeitet.

Was also bedeutet „messen“ in der klassischen Welt (zu unterscheiden vom quantenmechanischen Messprozess, Seite Seite 24) und warum ist es so grundlegend? Schon in der Antike war bekannt, dass sich gewisse Eigenschaften von Phänomenen, Körpern oder Substanzen „messen“ lassen, oder präziser, sich über Verhältnisse vergleichen lassen, es also ein „größer“, „kleiner“ oder „gleich“ gibt. Diese Eigenschaften nennen wir allgemeine „Messgrößen“ (engl. general quantity, VIM 4) oder auch einfach nur „Größen“. Diese Größen sind **Zeit, Länge, Masse, Temperatur, Ladung** – um die wichtigsten zu nennen. Aus den sieben Basisgrößen des **internationalen Einheitensystems SI** (Seite 209) lassen sich dann alle anderen Größen (wie Kraft, Energie, Leistung, elektrischer Widerstand, magnetische Flussdichte, Kapazität) aufbauen.

So kann man etwa mithilfe der abgebildeten Balkenwaage ermitteln, ob einer von zwei individuellen Körpern (individuelle Messgrößen der generellen Messgröße Masse) „schwerer“, „leichter“ oder „gleich schwer“ ist, oder auch, ob er soundso viel Mal schwerer ist als der andere. Das gilt für alle Größen. Messen bringt also „Ordnung“ in die unendliche Vielzahl der natürlichen Phänomene. Darüber hinaus gibt es wichtige Eigenschaften, wie den Geruch oder den Geschmack, die sich dieser Ordnung entziehen.

Einigt man sich weiterhin auf „Einheiten“, also auf Maßverkörperungen, ursprünglich Artefakte, wie die berühmte „Königliche Elle“ in Ägypten oder das Urkilogramm in Paris, so kann man durch Vergleich den Wert einer individuellen Messgröße, $|Q|$, z. B. die Masse eines Stuhls (m_{Stuhl}) mittels eines numerischen Werts $\{Q\}$ multipliziert mit der Einheit $[Q]$ (hier 1 kg) ausdrücken: $m_{\text{Stuhl}} = 5,1 \text{ kg}$, oder formal: $|Q| = \{Q\} \cdot [Q]$. Wichtig ist, dass es immer eine Messunsicherheit gibt, die vom verwendeten Messgerät abhängt (beispielsweise die Ablesegenauigkeit bei der Verwendung eines Maßbands) und die eigentlich immer auch anzugeben ist. Die Einheiten der oben genannten Größen sind dann **Sekunde, Meter, Kilogramm, Kelvin, Coulomb**, aus denen dann andere Einheiten wie das Newton, Joule, Watt, Ohm, Tesla, Faraday etc. gebildet werden können.

Die numerischen Werte $\{Q\}$ können dementsprechend als reelle Zahlen aufgefasst werden, wie man beispielhaft daran sieht, dass das Verhältnis von Umfang zum Durchmesser eines Kreises zur reellen Zahl $\pi = 3,141\,592\dots$ führt. Dies wiederum bildet die Grundlage dafür, dass man verschiedene Messgrößen quantitativ zueinander in Bezug setzen und daraus allgemeine mathematische Beziehungen in Gleichungen ableiten kann: So führt die Messung der Zeiten, die verstreichen, wenn Körper unterschiedlicher Masse aus unterschiedlicher Höhe auf die Erde fallen, zu den Fallgesetzen. Letztendlich lassen sich so ganze Klassen von Phänomenen, wie etwa die gesamten elektromagnetischen Erscheinungen, anhand weniger Gleichungen mathematisch ausdrücken: mit den berühmten **Maxwell-Gleichungen**.

Dies ist die moderne Interpretation des verkürzten (und historisch geometrisch gemeinten) Zitats von Galileo Galilei: „Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.“

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned}$$

Joachim Ullrich



MATHEMATIK ALS SPRACHE DER PHYSIK

„Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.“ Diese Galileo Galilei zugeschriebene Einsicht hat sich als wegweisend für die bahnbrechenden Fortschritte im Verständnis der modernen Physik erwiesen.

Von Aristoteles über Ptolemäus bis auch noch zur Zeit von Nikolaus Kopernikus galt es als selbstverständlich, dass Bewegungen am Himmel auf Kreisen verlaufen. Denn Kreise sind eine „ideale“ und damit göttliche sowie eine allgemein verständliche Geometrie. Mit der Erkenntnis, dass die Planetenbahnen tatsächlich aber auf Ellipsen verlaufen, stellte Johannes Kepler die Erfahrung über den Glauben. Kepler hatte seine Gesetze anhand der Messungen von Tycho Brahe gefunden und nebenbei auch die Notwendigkeit von höherer Mathematik für das Verständnis der Natur aufgedeckt (Ellipsen sind Kegelschnitte und damit Teil der analytischen Geometrie). Isaac Newton ging weit über die **Planetenbewegung** hinaus, als er erkannte, dass alle Bahnen von Objekten, auch irdischen, ein und demselben **Kraftgesetz** folgen. Das bedeutet, dass ausschließlich die jeweilige momentan wirkende Kraft darüber entscheidet, wie ein Körper in diesem Moment abgelenkt wird. Dass sich bei den Planeten aus diesen vielen kleinen momentanen Änderungen im Prinzip geschlossene elliptische Bahnen ergeben, ist ein glücklicher Spezialfall.

Zur besseren Handhabung des Aufsummierens von vielen kleinen Änderungen entwickelten Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz die **Infinitesimalrechnung**, ohne die die gesamte moderne Physik undenkbar ist. Jede zeitliche Veränderung ist Lösung einer Differenzialgleichung. Wir sagen heute in vielen Bereichen der Physik, dass wir Phänomene verstanden haben, wenn wir dazu passende spezifische Differenzialgleichungen aufstellen können.

Eine Ursache, der Rest ist Mathe

Die Infinitesimalrechnung war ein entscheidender Schritt: Anstatt alle denkbaren Verläufe aufzulisten oder empirische Messreihen durch immer raffiniertere Funktionen anzupassen, geben wir nur noch die Ursache aller möglichen Verläufe an – der Rest ist Mathe! Das heißt, es gibt ein für alle erlernbares Instrumentarium, um aus der Ursache (z. B. dem Kraftgesetz) die Gesamtheit aller möglichen Auswirkungen zu berechnen, die jetzt in jedem Einzelfall nur noch von den jeweils vorliegenden Anfangsbedingungen abhängen.

Dabei stellte sich im 18. und 19. Jahrhundert heraus, dass es in allen Bereichen der Physik wiederkehrende Gesetzmäßigkeiten gibt, die zwar jeweils ganz verschiedene Sachverhalte betreffen, aber durch dieselbe Mathematik zum Ausdruck gebracht werden. Ein wichtiges Beispiel sind **Erhaltungssätze**: Viele kontinuierlich verteilte Entitäten können zwar räumlich umverteilt, aber nicht erzeugt oder vernichtet werden, wie die Anzahl von Molekülen in der Hydrodynamik, Ladungen in der

Elektrodynamik, Energie und Impuls in allen Kontinuumssystemen, aber auch abstraktere Größen in modernen Feldtheorien. All diese Erhaltungssätze werden durch dieselbe **Kontinuitätsgleichung** zum Ausdruck gebracht. Später hat die Mathematikerin Emmy Noether einen bahnbrechenden Perspektivwechsel beigetragen, indem sie erkannt hat, dass eine Kontinuitätsgleichung immer eine Konsequenz von **Symmetrien** ist.

Die Kontinuitätsgleichung bewirkte einen entscheidenden Durchbruch in der Elektrodynamik: Durch Laborexperimente hatte man bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts eine Reihe von universellen Gesetzmäßigkeiten für elektrische und magnetische Felder gefunden, die mit den Namen Coulomb, Ampère, Ørstedt, Faraday und Gauß verknüpft sind. James Clerk Maxwell erkannte, dass diese Gleichungen einen kleinen Schönheitsfehler hatten: Jede für sich war empirisch vielfach bestätigt, aber zusammengenommen standen sie im Widerspruch zu der Kontinuitätsgleichung für die elektrische Ladung! Sie würden also zulassen, dass elektrische Ladungen aus dem Nichts entstehen. Maxwell konnte die Gleichungen retten, indem er in einer von ihnen einen Zusatzterm einfügte, der in allen Laborexperimenten seiner Zeit extrem klein war. Mit dieser Ergänzung sind diese **Differenzialgleichungen** heute unter dem Namen „Maxwell-Gleichungen“ bekannt.

Der kleine Zusatzterm hatte eine dramatische Konsequenz: Die vervollständigten Maxwell-Gleichungen besitzen mathematische Lösungen, die sich als Wellen verstehen lassen. Nicht nur war damit die mathematische Erklärung für das Phänomen Licht gefunden – man wusste jetzt auch, wie man elektromagnetische Wellen selbst erzeugen konnte (Heinrich Hertz). Die Folge war die Entwicklung der drahtlosen Telegrafie (Guglielmo Marconi) und damit auch von Radio, Laser, Mobilfunk, WLAN und Satellitennavigation. Das war möglich, weil der Zusatzterm bei hohen Frequenzen sehr groß wird. Gefunden wurde er aber nicht im Labor, sondern durch die Kraft der Mathematik und ihrer Forderung nach innerer Widerspruchsfreiheit der Physik.

Mathematik und die moderne Physik

Ein anderes Beispiel für die innovative Kraft der Mathematik ist die Entstehung der Quantenmechanik in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Ausgangspunkt waren viele unverständliche Messdaten aus der relativ jungen Atomphysik, insbesondere die Tatsache, dass gewisse Größen – etwa die Lichtenergie – sich nicht kontinuierlich, sondern „gequantelt“ verhielten. Werner Heisenberg, geschult im abstrakten Den-

ken der Mathematik der analytischen Mechanik, erkannte in den Quantelungen ein Muster, das er seinem Doktorvater Max Born vorlegte. Dieser kannte mehr Mathematik als damals für die Physik gelehrt wurde, und identifizierte in Heisenbergs Muster eine Matrizenalgebra. Nur wenig später erklärte Erwin Schrödinger dieselben rätselhaften Quantelungen durch ein aus der Mathematik der Differenzialgleichungen mit Randbedingungen bekanntes Phänomen und stellte die Wellenmechanik auf. In dem folgenden Jahrzehnt überschlugen sich die Durchbrüche, nicht zuletzt dank der Erkenntnis, dass „**Matrizenmechanik**“ und „**Wellenmechanik**“ in einem mathematischen Sinne äquivalent sind. Man hatte also sogar gleich zwei Methoden mit unterschiedlichen Vorteilen, um von nun an quantenmechanische Phänomene zu erklären und vorherzusagen.

Erkenntnistheoretisch gesprochen trennten sich an dieser Stelle Ontologie („Was ist die Realität?“) und Epistemologie („Wie verstehen und beschreiben wir die Realität?“): Wir arbeiten mit mathematischen Konstrukten (wie der Wellenfunktion, Seite 24), die wir nicht direkt messen können, deren Berechnung aber alle Messergebnisse erklärt und vorhersagt. Diese Denkweise – auch in anderen Gebieten der Physik – ermöglicht abstrakte Erklärungsmuster, die nicht eins zu eins direkt den Beobachtungen in Experimenten entsprechen müssen. Die dadurch gewonnene Flexibilität prägt die Theoretische Physik bis heute.

Die allgemeine Relativitätstheorie (Gravitation und Kosmologie, Satellitentechnologie und -navigation), die Elementarteilchenphysik (schwache und starke Wechselwirkungen) und die quantenstatistische Mechanik (Phasenübergänge in der Festkörper- und Materialphysik) sind Früchte des mathematischen Zugangs. Ohne auf Einzelphänomene fixiert zu sein, hat er universelle Gesetzmäßigkeiten im Auge, die sich in jedem Einzelfall anders präsentieren, denen aber dieselbe Mathematik zugrunde liegt. Gruppentheorie, Differenzialgeometrie und Methoden der Stochastik lassen sich in vielen Bereichen der Physik erfolgreich anwenden.

In der heutigen Zeit ist es selbstverständlich, dass der reinen mathematischen Methode komplementär die computergestützte **Numerik** zur Seite steht. Während die meisten Probleme der modernen Physik sich nicht mehr exakt behandeln lassen, kann sie Näherungslösungen bereitstellen. Sie erlaubt uns, mit ungeahnter Flexibilität komplexe Systeme zu modellieren und zu simulieren (Wetter und Klima, Finanzmärkte und Pandemien, Festkörper und Energiekonversion, Satellitenbahnen und Schwarze Löcher) und technisch verwertbare Lösungen zu optimieren. Die Entwicklung und das Verständnis der zuverlässigen Funktionsweise der dazu nötigen Algorithmen ist selbst wieder ein eigener Zweig der Mathematik.

Die Mathematik der Zukunft

Trotz der unschätzbaren Unterstützung durch numerische Verfahren dürfte die Methode der „reinen“ Mathematik auch in Zukunft unverzichtbar bleiben. Sie erlaubt uns, durch konzeptionelles Denken Grenzen auszutesten, zu erweitern und

aufzulösen. Moderne Forschung arbeitet auf Gebieten, in denen qualitative Durchbrüche wohl nur mit bisher unbekannter Mathematik zu erwarten sind. Es zeichnet sich ab, dass die so erfolgreiche mathematische Physik des 20. Jahrhunderts an ihre Grenzen stoßen wird. Emergente Phänomene in komplexen Systemen fernab vom Gleichgewicht, also zum Beispiel in lebender und aktiver Materie, können wir zwar immer besser beschreiben und modellieren, aber von einem paradigmatischen Verständnis der zugrunde liegenden Gesetze sind wir weit entfernt. Konnte man die Quantenverschränkung als Gedankenexperiment noch mit 2x2-Matrizen verstehen, so sind diese für die fortschreitenden Weiterentwicklungen in den Bereich technologischer Anwendungen – von der Vielteilchen-Quantenmechanik angeregter Zustände von Festkörpern bis zu Kryptografie und Quantencomputing – nicht mehr adäquat. Die mathematische Struktur der Quantengravitation ist sogar noch völlig offen.

Innerhalb der Mathematik ist „alles denkbar“, weil es nicht ihre Aufgabe ist, die Natur abzubilden, sondern selbstgeschaffene logische Systeme zu entwickeln – in sehr vielen Fällen sind diese natürlich durchaus durch die physische Realität motiviert. Bei der Suche nach den unbekanntem Gesetzen der Physik der Zukunft muss die Mathematik aber immer physikalischen Prinzipien verpflichtet sein, wobei die spezifische Art der Umsetzung der Prinzipien offen ist. Wenn sie diese aus den Augen verliert, verliert sie sich in spekulativen Welten.

Werden also ganz neue Zweige der Mathematik Durchbrüche in der Physik ermöglichen – „Tensornetze“, „Kategorien“, „nicht-kommutative Geometrie“ oder „Komplexitätstheorie“, oder solche, die noch gar keinen Namen haben? Der Erfolg der vergangenen hundert Jahre lässt uns große Hoffnungen in die mathematische Methode für qualitative Erkenntnis-sprünge auch in den nächsten hundert Jahren setzen. Wie die Beispiele aus der Vergangenheit zeigen, müssen wir bereit sein, nicht nur viel Mathematik zu lernen und zu lehren, sondern auch die Mathematik selbst weiterzuentwickeln, um damit die harten Nüsse der Physik zu knacken.

In der Physikausbildung wird die Mathematik oft als große Hürde empfunden, die den Einstieg ins Studium der Physik erschwert. In fortschreitenden Semestern erfahren die Studierenden im Theoriekurs, dass Mathematik nicht nur ein (oft mühsam zu bedienendes) dienendes Werkzeug, sondern ein aktives Verfahren ist, um die Erfahrung der Welt zu ordnen und die Grenzen der Erkenntnis zu erweitern. Es gibt erfreulicherweise immer wieder Studierende, die sich von dieser Erfahrung begeistern lassen. Diese werden ihren Teil zum zukünftigen Verständnis der Physik beitragen.

Karl-Henning Rehren

BIG DATA, SIMULATION UND NUMERIK

Physik und Astronomie beruhen als empirische Wissenschaften auf den Daten von Experimenten und Beobachtungen, mit denen theoretische Modelle überprüft werden können. Während einfache Vorhersagen der Modelle wie etwa die Schwingungsdauer eines Pendels bereits in der Schule „von Hand“ zu berechnen sind, muss für den Abgleich von Beobachtungsdaten und Modellen in vielen Forschungsgebieten ein deutlich höherer Rechenaufwand betrieben werden.

Neben der Elementarteilchenphysik und Astronomie liefern die Klimaforschung, Erdbeobachtung, Quantenoptik, Kernphysik oder die Fusionsplasmaphysik sehr große Datenmengen. Durch die fortschreitende Miniaturisierung der Digital Elektronik erhöht sich kontinuierlich die Leistungsfähigkeit von Detektoren und Datenerfassung. Das Mooresche Gesetz (Seite 177) ist dabei gleichzeitig Fluch und Segen, denn die höheren Datenraten führen zu einem entsprechend starken Anwachsen des Datenvolumens und somit der erforderlichen Datenspeichergrößen. In diesem Zusammenhang wird gerne der Begriff Big Data verwendet. Auch die Datenrate sowie die Komplexität der Daten nehmen seit der Digitalisierung der Datenauslese drastisch zu.

Beispiele aus der Teilchen- und Astrophysik

Für die Interpretation der Daten werden wiederum hochauflösende Computersimulationen theoretischer Modelle verwendet, die zum Datenaufkommen noch zusätzlich beitragen. In der Elementarteilchenphysik stellt der **Large Hadron Collider (LHC)** des CERN (Seite 40) die bedeutendste Datenquelle dar. Das CERN ist entsprechend in der Big-Data-Forschung sehr erfahren. Dort wurde Anfang der 1990er-Jahre das World Wide Web ins Leben gerufen, wodurch die weltweite Kommunikation und Verteilung der Daten aus dem 200-Petabyte-Datenzentrum möglich wurde. Jüngst wurde die Luminosität des Teilchenstrahls im LHC erhöht und die Auflösung der Detektoren verbessert. Das zu erwartende Datenvolumen wird deswegen noch einmal stark anwachsen und erfordert Verbesserungen beim Datendurchsatz. Im OpenLab des CERN finden Public-Private-Partnerships zur Entwicklung von Quantencomputern und dafür geeigneten Algorithmen für die wissenschaftliche Datenanalyse statt.

Eine der bekanntesten Himmelsdurchmusterungen der Astronomie ist der **Sloan Digital Sky Survey (SDSS)**. Die Daten umfassen insgesamt verhältnismäßig handliche 40 TB, die im Jahr 2024 auf nur zwei großen handelsüblichen Festplatten Platz finden würden. Die Daten sind über das Sky-Server-Internet-Portal weltweit leicht und frei zugänglich. Der SDSS eignet sich hervorragend für Projekte der Bürgerwissenschaften oder für den Einsatz in Schulen und zeigt, wie Wissenschaften und die öffentliche Teilhabe daran modern kommuniziert werden können (Seite 333).

Ein Petabyte (PB) enthält eine Billion Bytes. Das entspricht 100 zurzeit üblichen großen Festplatten mit zehn Terabyte (TB) Speicherkapazität – oder etwa der Datenmenge, die für 2,5 Millionen Spielfilmstreams übertragen werden muss. Ein Exabyte (EB) sind 1000 Petabyte.

In wenigen Jahren wird das **Square Kilometre Array (SKA)** zur größten wissenschaftlichen Datenquelle werden. Das Radioteleskopfeld mit Standorten in Südafrika und Australien erreicht dann aufgrund seiner Größe bislang unerreichte Nachweiskennlinien für astronomische Objekte. Für die riesigen multidimensionalen Bilder werden allerdings Datenspeicher im Bereich von zehn **Exabyte** benötigt. Das SKA gewinnt aus den Rohdaten des Antennenfelds mit weltbesten Netzwerktechnik mittels eines Supercomputers mit 250 Petaflops (eine Billion Fließkommarechnungen pro Sekunde) Rechenleistung wissenschaftliche Daten mit 300 Petabyte pro Jahr. In dieser Leistungsklasse finden sich die derzeit weltgrößten Superrechner, wie der Fugaku am RIKEN in Japan (415 PFLOPS), der europäische Leonardo am CINECA in Italien (250 PFLOPS) oder der Summit am Oak Ridge National Laboratory in den USA (200 PFLOPS). Um die aus den Rohdaten gewonnenen wissenschaftlichen Daten zu den Instituten in Europa zu übertragen, wird eine Internetverbindung mit einer durchgehenden Bandbreite von 100 Gigabit/s benötigt. Mit dem SKA sollen nach Fertigstellung vor allem Himmelsdurchmusterungen in verschiedenen Frequenzbändern des Radiobereichs durchgeführt werden.

Multifrequenzbeobachtungen mit dem ebenfalls datenintensiven **Cherenkov Telescope Array (CTA)** oder die Beobachtung von Tausenden von Pulsaren zum indirekten Nachweis von Gravitationswellen mit der Pulsar-Timing-Methode erfordern eine sehr leistungsfähige Forschungsdateninfrastruktur mit freiem Zugang für die Forschenden an den Universitäten. Gravitationswellenobservatorien wie das Einstein-Teleskop werden voraussichtlich Hunderttausende Verschmelzungen Schwarzer Löcher beobachten und benötigen für die aufwendige Datenanalyse ebenfalls Höchstleistungsrechner. Das **Vera-Rubin-Observatorium** soll den gesamten Himmel nach Supernovae und anderen kurzzeitigen Phänomenen im Bereich des sichtbaren Lichts absuchen. Dabei fallen Datenmengen in Höhe von 5 PB/Jahr an. Zusammen mit den Datenprodukten wächst die Gesamtdatenmenge nach zehn Jahren auf 500 PB. Weitere tiefe Durchmusterungen werden mit Satellitenobservatorien wie **Euclid** (gestartet 2024, erste Beispieldaten auf Seite 68 unten) im nahen infraroten Wellenlängenbereich, mit **eROSITA** im Röntgenbereich und **Fermi-LAT** im Gammastrahlenbereich durchgeführt. Sie ermöglichen eine viele Wellenlängenbereiche umfassende Gesamtschau auf das Universum mit seinen Schwarzen Löchern und Neutronensternen, Gaswolken und Exoplaneten bis hin zu den entferntesten Galaxien.

← künstlerische Darstellung des im Bau befindlichen SKA-Observatoriums, das gigantische Datenmengen produzieren wird.

Für die Interpretation der Big Data aus der Astro- und Fusionsplasmaphysik werden Computersimulationen der (allgemein relativistischen) Magnetohydrodynamik und des Strahlungstransports durchgeführt. Letztlich geht es also darum, die Modelle aus physikalisch etablierten Theorien durch numerische Berechnungen in Vorhersagen zu überführen, die dann mit den Beobachtungsdaten abgeglichen werden. Abweichungen zwischen Modellvorhersage und Messdaten geben dann Hinweise darauf, wie die Modelle verändert werden müssen. Die Simulationen sind extrem rechenzeit- und datenintensiv und erfordern Zugang zu leistungsfähigen **High-Performance-Computing-Zentren**. Das Datenvolumen für astronomische Himmelsdurchmusterungen stellt eine Herausforderung für die Forschungsdateninfrastruktur dar.

Grenzen und neue Methoden

Big Data und Big Data Analytics erweisen sich leider schnell auch als zu groß, um sie zu handhaben. Sie erfordern eine Weiterentwicklung der Rechenzentren zu **Hochdurchsatz-Zentren** (High-Throughput-Computing, HTC). Für die Verteilung der Daten reicht die Bandbreite des Internets bald nicht mehr aus. Datenprodukte mit deutlich reduziertem Datenvolumen zu erzeugen, ist deswegen eine Kernaufgabe für Datenzentren. Der Rechenaufwand dafür ist bedeutend. Das CERN-Rechenzentrum benötigt beispielsweise vier Megawatt elektrische Leistung. Beim SKA-Mid in Südafrika ist die verfügbare Leistung aufgrund seiner Lage in der abgelegenen Karoo-Wüste auf 700 Kilowatt beschränkt. Die verfügbare elektrische Leistung könnte im Prinzip durch erneuerbare Energien erhöht werden. Man hofft auch auf stromsparende Green-Computing-Lösungen. Gegenwärtig ist damit allerdings meist nur die Nachnutzung der Abwärme der Rechenzentren gemeint. Einen echten Durchbruch in der Energieeffizienz um viele Größenordnungen könnte man erreichen, wenn man anstelle der üblichen Von-Neumannschen-Computerarchitektur neuronale Netze mit neuromorphen Chips und Memristoren nachbaut (Seite 184). Dazu müssen allerdings noch zahlreiche Probleme der Hochfrequenz-Elektronik überwunden werden. Ein weiterer Ansatz besteht im sogenannten Memory-Based-Computing, eine speziell für HTC zugeschnittene Hardware-Architektur.

Neben diesen Ansätzen mit bekannten elektrotechnischen Bauelementen stellen **Quantencomputer** eine revolutionäre Entwicklungslinie dar, um effizienter und schneller rechnen zu können. Eine signifikante Erhöhung der Bandbreite des Internets durch Quantentechnologien, zumindest für die ultraschnellen Datenleitungen zwischen den Rechenzentren, wäre ebenfalls eine Zukunftsvision. Die Vorprozessierung von Rohdaten kann mit **künstlicher Intelligenz** (KI) und speziellen Computerarchitekturen wirksam beschleunigt werden. In einigen Fällen können Detektoren mittels KI befähigt werden, als Smart Sensors nur relevante Informationen zu produzieren. Es ist bislang allerdings noch nicht vorstellbar, dass eine allgemeine KI die physikrelevanten Informationen selbstständig aus den Daten extrahieren kann.

Die Verteilung der Daten an die wissenschaftlichen Nutzer:innen bringt ein weiteres Problem mit sich. Sie arbeiten oft an Universitäten mit meist knappen Ressourcen. Selten kann dort eine ausreichend leistungsfähige IT-Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden. Beispiele für Lösungsansätze sind cloudbasierte virtuelle Maschinen, mit denen die Nutzer:innen ihre wissenschaftlichen Analysen in großen räumlich verteilten Datenzentren erledigen können, oder die Bereitstellung von kleineren Kopien von in großen Datenzentren vorbearbeiteten Daten für die Weiterverarbeitung in weniger leistungsfähigen lokalen Arbeitsplatzumgebungen.

Kompetenzentwicklung

Letztlich sind die Big-Data-Skills der alles begrenzende Faktor, wenn man nicht auf kommerzielle Lösungen von Drittanbietern hofft. Nachwuchswissenschaftler:innen müssen grundlegende Kenntnisse im Bereich digitaler Datenverarbeitung und Datenanalyse erlernen. Aufgrund des weltweit sich beschleunigenden Fortschreitens der digitalen Transformation kann dies nicht mit traditionellen Lehrformaten erreicht werden. Die Latenzzeit veralteter Lehrinhalte und der Dozent:innen steht in krassm Gegensatz zu den Anforderungen. Die Universitäten müssen Kreativräume öffnen, in denen Studierende ungeachtet ihrer fachlichen Herkunft gemeinsam Datenprobleme mit modernen Methoden lösen. Diese Data-Labs müssen technisch gut ausgestattet sein und einen Zugang zu CPU/GPU-Rechnern mit mindestens 1000 Kernen und Netzwerke mit 100 Gb/s anbieten. Ein permanentes barrierefreies Coaching durch lokale IT-Expert:innen ist ebenso notwendig. Physik und Astronomie stehen an der Schwelle einer neuen, verheißungsvollen Ära der Entdeckungen durch die Steigerung ihrer Möglichkeiten durch Big Data und Big-Data-Analyse.

Karl Mannheim



Die Kamera des Vera-Rubin-Observatoriums besitzt über 3,2 Milliarden Pixel verteilt auf 189 CCD Chips. Man würde 378 4K-Bildschirme benötigen, um ein damit gewonnenes Bild vollständig Pixel für Pixel darzustellen.

DIE TEILE UND DAS GANZE

Das Programm der Physik ist es, zuerst die allgemeingültige Grundlage für die Beschreibung der Phänomene der Natur zu legen: Raum und Zeit setzen den Rahmen, in dem sich physikalische Objekte nach den universellen Gesetzen der Quantenmechanik, der Relativitätstheorie und der statistischen Physik bewegen und verhalten. Hieraus erwachsen Strukturen und die unermessliche Vielfalt der Phänomene der Natur.

DIE WELT IN RAUM UND ZEIT

Physikalische Beschreibungen nehmen immer Bezug auf Ereignisse, die in Raum und Zeit stattfinden. Was jedoch genau Raum und Zeit selbst sind, ist keine so einfache Festlegung, wie man vielleicht vermuten könnte.

Im Alltagsverständnis ist Zeit eine Abfolge von physikalischen Zuständen, während der Raum den unveränderlichen Bezugsrahmen dafür zur Verfügung stellt. Dieses Verständnis lag lange den physikalischen Theorien über die Natur zugrunde. So beschreibt beispielsweise die klassische Mechanik, wie sich Objekte unter dem Einfluss von Kräften mit der Zeit durch den Raum bewegen. Mit absolut gedachten Raum- und Zeitbegriffen formulierte Isaac Newton daher seine drei Axiome: das Trägheitsgesetz, das Bewegungsgesetz und das Gesetz von der Gleichheit von Kraft und Gegenkraft.

Die frühere Idee einer absoluten Zeit hatte eine charmante Eigenschaft: Betrachtet man die gleiche Bewegung von unterschiedlichen Orten aus – geht man also beispielsweise einen Schritt zur Seite –, so ändert das nichts an den physikalischen Bewegungsgesetzen: Ein Objekt bewegt sich ohne äußeres Zutun geradeaus und mit konstanter Geschwindigkeit, egal, von wo aus man es beobachtet. Die Trägheitsbewegung bleibt also geradlinig-gleichförmig für bestimmte Änderungen des Raum-Zeit-Rahmens. Zu diesen sogenannten Galilei-Transformationen gehören Verschiebungen des räumlichen und zeitlichen Nullpunkts, räumliche Verschiebungen mit konstanter Geschwindigkeit und räumliche Verdrehungen (nicht aber der Drehvorgang selbst). In den einzelnen Bezugssystemen, den **Inertialsystemen**, gelten dann weiterhin die Bewegungsgesetze.

Diese (axiomatisch festgelegte) Unveränderlichkeit der klassischen Mechanik unter Galilei-Transformationen hat zur Folge, dass Geschwindigkeiten addiert werden können: Rennt eine Person von hinten nach vorne durch einen fahrenden Zug, so bewegt sie sich für außenstehenden Beobachtende mit einer Gesamtgeschwindigkeit fort, die sich aus denen des Rennens und des Fahrens durch Addition zusammensetzt.

Das Konzept stößt allerdings an Grenzen: Würde die Person im Zug nicht rennen, sondern einen Laserpuls losschicken, so würde dieser sich nicht etwa mit Lichtgeschwindigkeit plus Zuggeschwindigkeit fortbewegen. Denn mit James Clerk Maxwells Zusammenfassung und Vervollständigung der Elektrodynamik wurde offenbar, dass die Lichtgeschwindigkeit absolut ist – nichts ist schneller als das Licht, seine Geschwindigkeit lässt sich nicht addieren.

Wandlung des Raum- und Zeitbegriffs

Diesen Widerspruch zwischen klassischer Mechanik und Elektrodynamik löste Albert Einstein in der **speziellen Relativitätstheorie** dadurch auf, dass er die Galilei-Transformationen durch die Poincaré-Transformation ersetzte. Sie transformiert Raum und Zeit als Raumzeit, wodurch beide ihre Absolute verlieren. Die spezielle Relativitätstheorie behält das Konzept der Inertialsysteme bei, verändert aber deren Trans-

DER PFEIL DER ZEIT

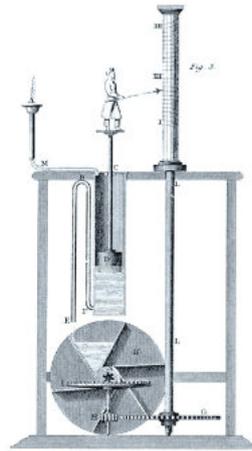
Bei Weitem die meisten mikrophysikalischen Gesetze ändern sich nicht, wenn die Zeitrichtung umgekehrt wird. Dennoch beobachten wir Ereignisse, die in einer, aber nicht in der entgegengesetzten Zeitrichtung ablaufen können. Diese Zeitrichtung tritt auf, wenn physikalische Systeme, die aus sehr vielen Teilen zusammengesetzt sind, von unwahrscheinlicheren in wahrscheinlicheren Zustände übergehen. Die zugehörige physikalische Größe ist die Entropie, die durch spontane Zustandsänderungen abgeschlossener Systeme mit der Zeit nicht abnehmen kann (siehe Seite 30). Eine Zeitrichtung wird auch durch die Wellenausbreitung definiert (Kugelwellen laufen nur nach außen und, obwohl mathematisch möglich, nie nach innen) sowie durch den irreversiblen Messprozess in der Quantenmechanik.

Für die exakte, für die Physik typische Beschreibung der Welt ist ein Rahmen erforderlich. Dieser wird durch Raum und Zeit vorgegeben, wie gleich dieser erste Artikel erläutert. Die Quantenmechanik (Seite 24) führt ein Verständnis der Welt ein, das der Alltagserfahrung in vielen Aspekten zuwiderläuft. Das Weltverständnis von Raum, Zeit und Quanten liefert jedoch das solide Fundament der Physik. Was genau diese fun-

damentalen Theorien sind und auf welchen Erkenntnissen sie basieren, aber auch, welche Grenzen diese fundamentalen Erkenntnisse haben, wird auf Seite 27 erörtert. Die Phänomene der Emergenz (Seite 29) und Strukturbildung (Seite 31) sind möglicherweise noch überraschender als die Wahrscheinlichkeitswelt der Quanten.



Galileo Galilei hat im gleichmäßigen Lauf der Jupitermonde eine weltweit sichtbare Uhr zum Nutzen der Seefahrt gesehen – bis Ole Christensen Rømer erkannte, dass aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit sich ihr Gang periodisch ändert: Die Uhr läuft zu schnell, wenn Jupiter sich der Erde nähert und zu langsam, während er sich entfernt.



Für die Zeitmessung haben Wissenschaft und Technik seit Jahrhunderten immer präzisere Messmethoden erfunden. Eine Wasseruhr (links) mutet gegenüber den modernsten Cäsium-Atomuhren der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (rechts) archaisch an. Die Zeit ist heute die Größe, die mit größter Genauigkeit vermessen werden kann. Neueste Konzepte arbeiten dabei mit optischen Atomuhren, die die Cäsium-Atomuhren noch einmal um Größenordnungen in der Ganggenauigkeit übertreffen. Eine ganz neue Entwicklung ist die Kernuhr (siehe Seite 161).

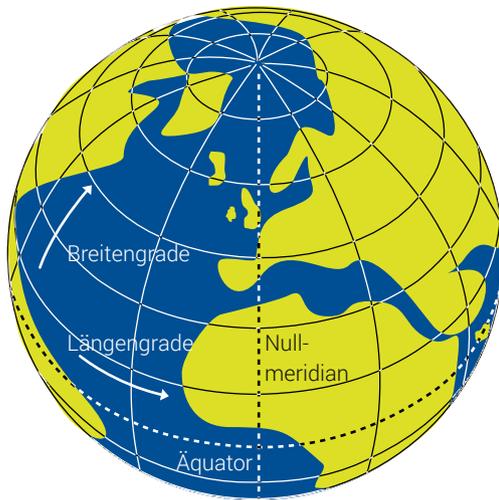
formationsgesetz. Im Gegensatz hierzu ersetzt die **allgemeine Relativitätstheorie** inertielle (also ruhende oder sich gleichförmig bewegende) durch frei fallende Bezugssysteme. Dadurch wird die Schwerkraft zu einer Eigenschaft der Raumzeit. Die Anwesenheit von Materie und Energie verändert ihre Geometrie. Dieses relativistische Raumzeit-Konzept liegt allen modernen Theorien der Physik zugrunde und ist doch im Alltag ziemlich unintuitiv. So erlaubt die Mathematik der allgemeinen Relativitätstheorie im Prinzip Zeitreisen, d. h. Reisen in die eigene Vergangenheit. Das ist allerdings nur unter extremsten Bedingungen möglich, wie bei sehr hohen Energien oder kosmologischen Zeitskalen, was es sehr unwahrscheinlich macht, dass dies jemals realisiert werden könnte.

Messung von Zeit und Länge

Die Frage, wie sich Raum und Zeit möglichst genau messen lassen, ist für die Physik von größter Relevanz. Tatsächlich ist

die physikalische Zeit unabhängig vom Menschen gegeben, und zwar durch bestimmte Phänomene oder zu konstruierende Apparate, die periodische Abläufe zeigen. Historisch gesehen ist die Rotation der Erde um ihre eigene Achse, die den Tag festlegt, eine erste Definition der Zeit. Später kamen menschengemachte Apparate wie die Wasser- und Sanduhren oder mechanische Uhren hinzu. Seit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind die Quarzuhren die gebräuchlichen Zeitmesser im Alltag. Schließlich nutzen wir heutzutage Atomuhren mit einer ungeheuren Genauigkeit: Eine solche Uhr, die mit dem Urknall begonnen hätte, die Zeit aufzuzeichnen, würde heute höchstens eine halbe Sekunde falsch gehen!

Im Falle der Newtonschen absoluten Zeit genügt das, um eine Zeit für das ganze Universum festzulegen: Wir definieren solch eine Uhr als Master-Uhr, bauen Duplikate und bringen diese überall hin. Damit haben wir die Zeit z. B. auf der Erde oder im Sonnensystem eindeutig festgelegt. Die Ortskoordinaten



Für die Angabe des Orts gibt man den Abstand von einem Referenzpunkt an. Das kann ein Vermessungspunkt auf der Erde sein, der Nullpunkt des Labortisches oder die geografische Länge und Breite, die die Winkelabstände vom Nullmeridian bzw. vom Äquator sind. Bei Längen- und Breitengrad muss für eine vollständige Positionsangabe noch der Abstand vom Erdmittelpunkt angegeben werden, der in der Praxis bzw. auf der Erdoberfläche allerdings durch die Form der Erde festgelegt ist.

nate kann man dann mit einem Urmeter einführen. Heute ist der Meter aufgrund der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit über eine Zeitmessung festgelegt (Seite 209). Allerdings findet die Genauigkeit der Bestimmung des Meters ihre Grenze in der Unbestimmtheit der Quantenmechanik.

In der relativistischen Physik werden Orts- und Zeitmessung schwieriger: An einer bewegten Uhr wird eine Zeit abgelesen, die gegenüber einer ruhenden Uhr verlangsamt ist; ebenso an einer Uhr, die in einem stärkeren Gravitationsfeld als eine Vergleichsuhr steht. Transportiert man zwei identische Uhren auf unterschiedlichen Wegen durch ein Gravitationsfeld vom Start zum Ziel, zeigen diese am Ziel unterschiedliche Zeiten an.

Diese Phänomene werden offenbar, wenn man eine Uhr mithilfe von Lichtstrahlen und frei fallenden Teilchen (z. B. realisiert durch optische Resonatoren) konstruiert. Sie zeigen eine geometrische Zeit an. Die Änderung des Gravitationsfelds bei unterschiedlichen Höhen von wenigen Zentimetern reicht aus, um bei den heutigen Atomuhren unterschiedliche Taktdauern zu beobachten!

Will man präzise Zeitmessungen vergleichen, so muss man zunächst die beteiligten Uhren synchronisieren, d. h. beim Vergleich der Zeiten zwischen zwei Uhren alle Zeitdilations-effekte, Rotverschiebungen und Rotationseffekte per Kon-



Die Markierung des Nullmeridians auf dem Boden vor dem Observatorium in Greenwich, einem Vorort Londons, ist auch ein Touristenmagnet.

struktion oder Rechnung eliminieren. Das kann mittels Einstein-Synchronisation, Synchronisation mit Pulsaren, mit Uhren auf Satelliten oder der ISS geschehen. In nicht zu starken Gravitationsfeldern wie im Sonnensystem kann man diese Verfahren anwenden. Dies hat große Relevanz für die Internationale Atomzeit, Navigationssysteme auf der Erde und in der Raumfahrt, für die Geodäsie und für astronomische Beobachtungen.

Matthias Bartelmann und Claus Lämmerzahl

DIE WAHRSCHEINLICHKEITSWELT DER QUANTEN

Die Bausteine der Materie, also die Elementarteilchen, ihre Austauschteilchen und damit auch alle Atome und Moleküle, sind den Regeln der Quantenmechanik unterworfen. Diese Regeln weichen von denen der Alltagsmechanik erheblich ab und ermöglichen neue Technologien, von denen wir früher nicht zu träumen wagten.

„Eine Revolution startet dort, wo das Althergebrachte ausgedient hat.“ Als Physiker:innen Anfang des 20. Jahrhunderts zunehmend Phänomene beobachteten, die sie mit klassischen Mitteln nicht erklären konnten, kündigte sich daher eine große Veränderung an. Max Planck, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Max Born, Pascual Jordan, Grete Hermann, Lucy Mensing und andere entwickelten die **Quantenmechanik** in der heute noch gültigen Form – eine Theorie, die unser Verständnis der Welt seither auf den Kopf gestellt und viele neuartige Technologien ermöglicht hat und weitere ermöglichen wird.

Die grundlegende Eigenschaft dieser Theorie lässt sich an einem viel zitierten Experiment beispielhaft zeigen: Schickt man Elektronen, Atome, Moleküle oder andere Quantenteilchen durch einen **Doppelspalt**, entsteht dahinter ein Überlagerungs- oder Interferenzmuster. Dieses eigentlich für Wellen typische Muster bildet sich heraus unabhängig davon, ob viele Teilchen auf einmal oder alle nacheinander den Spalt durchqueren. Das bedeutet, dass alle Atome miteinander eine klassisch nicht erklärbare Korrelation zeigen, was man auch salopp damit beschreibt, dass jedes Teilchen nur „mit sich selbst“ interferiert.

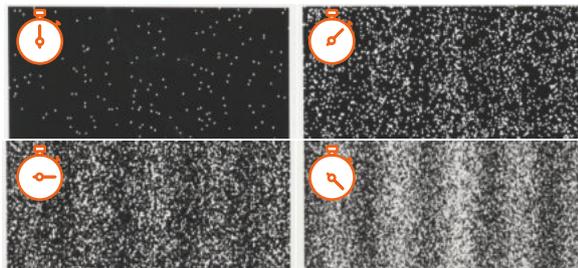
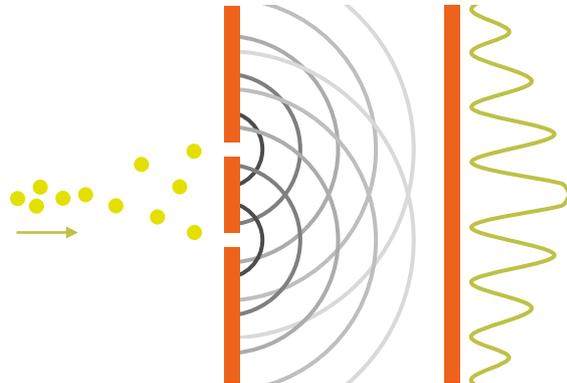
Wellenfunktion und Unschärfe

Mathematisch lässt sich der Zustand eines solchen Quantensystems durch eine Wellenfunktion beschreiben. Analog zur klassischen Mechanik stellt man sich dann die Frage, wie sich das System mit der Zeit verhält. In der Quantenmechanik wird dies durch die berühmte **Schrödingergleichung** beschrieben: Mit dieser Gleichung kann man z. B. die erlaubten Energiezustände von Elektronen in Atomen und Molekülen und auch in Festkörpern berechnen. Denn in der Quantenphysik können die Elektronen hier nicht mehr jede beliebige Energie annehmen, sondern nur noch ganz bestimmte Energiestufen. Deren Kenntnis liefert die Grundlage für die Spektroskopie, für Laser und für hochgenaue Uhren (Quantenmetrologie) wie auch für die gesamte Halbleiterphysik, auf der unsere heutigen Computer basieren. Wie bei einer echten Revolution wirkte sich das veränderte Weltbild also auf die Praxis aus. Das Aufkommen dieser ersten quantenbasierten Technologien wird daher auch als erste Quantenrevolution bezeichnet.

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$$

Seltsame Wellenfunktion

Die Änderung des Weltbilds lässt sich am besten anhand des Messvorgangs illustrieren. War man es in der klassischen Physik gewohnt, jede einzelne Messung vorhersagen und überprüfen zu können, so musste man sich nun mit einer Wellenfunktion auseinandersetzen, deren Bedeutung für die einzelne Messung die einer Wahrscheinlichkeit ist. Übersichtlich ist die Situation bei der Überlagerung der beiden Wellenzüge eines Teilchens, wenn es am Doppelspalt **mit sich selbst interferiert**. Die Wellenfunktion besteht hier aus der Überlagerung zweier Einzelwellen, die das bekannte Interferenzmuster bilden. Die Messung eines einzelnen Teilchens jedoch findet an genau einer Position auf dem Detektor statt



Woher wissen es die Teilchen? In einem Doppelspaltexperiment mit Quantenteilchen (z. B. Elektronen) lässt sich zeigen, dass Wellen- und Teilchennatur dieser Objekte gleichzeitig auftreten. Die Teilchenquelle links lässt immer nur einzelne Teilchen auf den Doppelspalt treffen. Jedes einzelne Teilchen nimmt nach dem Durchgang eine scheinbar zufällige Position auf dem Empfangsschirm rechts ein. Lässt man jedoch immer mehr Teilchen durch die Apparatur fliegen, dann bilden sich auf dem Empfangsschirm nicht etwa zwei Streifen, also einer je Spalt. Stattdessen entsteht ein Interferenzmuster, wie man es kennt, wenn zwei kreisförmige Wasserwellen an der Stelle der Spalte erzeugt würden. Die Menge der Teilchen verhält sich wie eine Welle, auch wenn einzelne Teilchen zeitlich völlig unabhängig voneinander die Apparatur durchqueren!

BOSE-EINSTEIN-KONDENSATE

Wir wissen, dass wir den absoluten Temperaturnullpunkt nie ganz erreichen können – auch das ist eine Folge des Unschärfeprinzips. Mit Quantentechnologien wie Laserfallen und Laserkühlung ist es allerdings möglich, Quantensysteme bis auf unter ein Milliardstel Grad abzukühlen. Dort zeigt sich ein besonderes Quantenphänomen, die Bose-Einstein-Kondensation: Alle (bosonischen) Quantenteilchen gehen in denselben Grundzustand und bilden dort ein großes kohärentes System. Dieses kann z. B. zur Erzeugung von kohärenten Atomstrahlen (Atomlaser) eingesetzt werden, die extrem genaue Messverfahren ermöglichen.

und kann kein Wellenmuster zeigen. Es ist somit auch unvorhersagbar, wo genau das nächste Teilchen auftritt. Viele dieser Teilchen bilden dann jedoch schließlich genau die Wahrscheinlichkeit ab, die sich aus der Wellenfunktion ergibt.

Eine Einzelmessung liefert auch keine Information über den ursprünglichen Quantenzustand des Messobjekts – durch die Beobachtung geht dieser irreversibel verloren. Die scheinbare Zufälligkeit des einzelnen Messausgangs bei Quantensystemen bereitet unter anderem einem der Wegbereiter der Quantenmechanik, Albert Einstein, größtes Unbehagen. Viele weitere Physiker:innen vertraten lieber die Ansicht, dass das Messergebnis irgendwo im Quantenzustand doch bereits festgelegt sei, und wir nur nicht in der Lage seien, diese Eigenschaft zu erkennen. Solche Theorien mit „verborgenen Parametern“ haben sich experimentell aber als grundsätzlich falsch erwiesen. Der quantenmechanische Einzelmessprozess ist also mit einer intrinsischen Unbestimmtheit verbunden, die auch nicht anderweitig überwunden werden kann. Diese Unbestimmtheit ist zwar der klassischen Welt vollkommen fremd, sie ist aber nicht schlimm (etwa für technische Anwendungen), wir können damit umgehen und sie auch zu unserem Vorteil nutzen.

Verschränkung und offene Fragen

Ein Meilenstein in der weiteren Entwicklung der Quantenmechanik war die Vorhersage der Verschränkung und dann auch der experimentelle Nachweis dieses Quantenphänomens. In seiner einfachsten Realisierung existiert Verschränkung in einem System aus zwei Quantenteilchen, bei denen jedes Teilchen zwei Zustände einnehmen kann, wie z. B. Spin aufwärts und Spin abwärts. Der verschränkte Zustand ist dann die Verknüpfung dieser beiden Zustände: Misst man bei verschränkten Teilchen den Spin des einen Teilchens, so ist festgelegt, wie eine Messung des Spins des zweiten Teilchens aussehen muss. Die Ergebnisse sind demnach korreliert. Nur, woher „weiß“ das eine Teilchen, dass an dem anderen eine Messung durchgeführt wurde, und wie diese ausgefallen ist, auch wenn die beiden Teilchen sehr weit voneinander entfernt sind? Auch wenn man dies noch nicht versteht, kann man Verschränkung experimentell nachweisen und sogar technisch ausnutzen. Für große Teilchensysteme ist die Anzahl der verschränkten Zustände dabei viel größer als die der nicht verschränkten Zustände. Verschränkung ist somit der natürliche Zustand von Vielteilchen-Quantensystemen.

UNSCHÄRFE UND SQUEEZING

Wenn man den Ort eines Quantenteilchens mit einer bestimmten Genauigkeit messen will, impliziert das eine bestimmte Unschärfe in seinem Bewegungszustand. Mit anderen Worten: Je genauer man den Ort eingrenzt, desto weniger kann man über den Impuls sagen. Diese Heisenbergsche Unschärferelation hat essentielle Auswirkungen auf die prinzipielle Genauigkeit von Messungen.

Die Heisenbergsche Unschärferelation verlangt zwar, dass das Produkt der Messungenauigkeiten zweier zusammenhängender Größen einen bestimmten Wert nicht unterschreitet. Sie schreibt jedoch nicht vor, dass beide Messungenauigkeiten gleich groß sind. Konkret bedeutet dies, dass wir sehr wohl eine der Messungen sehr genau durchführen können, wenn uns die andere Messung „egal“ ist. Ein typisches Beispiel ist die genaue Messung der Phase von Licht zu Ungunsten der Messgenauigkeit seiner Amplitude. Man bezeichnet dieses Licht dann als „gequetscht“ (engl.: squeezed). Das vermutlich prominenteste Beispiel für solche Prä-

zisionsmessungen mit gequetschtem Licht ist die interferometrische Gravitationswellendetektion. Denn diese sind in einem weiten Bereich ihres Messfensters durch das Quantenrauschen der verwendeten Laser begrenzt, obwohl diese Laser bereits technisch so rauscharm wie möglich sind. Das verbleibende Quantenrauschen der Laser tritt in einem Interferometer in zwei Formen in Erscheinung: als Photonen-Schrotrauschen (die „Krisseligkeit“ bei der Messung der Leistung der Laser) und als Quanten-Strahlungsdruckrauschen (das „Wackeln“ der Interferometerspiegel, wenn die variierende Laserleistung auf sie trifft). Beide Effekte haben ihren Ursprung in der Quantennatur des Lichtes, machen sich aber völlig unterschiedlich bemerkbar (als Detektorrauschen und als Rückwirkungsrauschen, da die wackelnden Spiegel das Licht „zurückschubsen“ und so die Phasenlage seiner Wellenzüge ändern). Zusammen bilden diese beiden Manifestationen des Laser-Quantenrauschens das Standard-Quantenlimit der Interferometrie. Es müssen nicht-klassische Methoden verwendet werden, um diese untere Grenze der Messgenauigkeit zu unterbieten, wie z. B. das frequenzabhängige Squeezing.

Trotz all der theoretischen Einsichten und experimentellen Erfolge gibt es weiter offene Fragestellungen: So ist beispielsweise unklar, wie sich die Natur der Wellenfunktion anschaulich verstehen und interpretieren lässt, oder was genau während des Messprozesse mit ihr geschieht. Unklar ist auch, wie sich die klassische Mechanik als Grenzfall der Quantenmechanik herleiten lässt. Auch die Verbindung der Quantenmechanik mit der allgemeinen Relativitätstheorie ist noch nicht abschließend gelungen.

Die Quantentheorie beschreibt bisher alle Experimente in ihrem Anwendungsbereich korrekt. Es gibt kein einziges Experiment, welches im Widerspruch zur Quantentheorie steht. Allerdings gibt es keine rein auf Experimenten aufgebaute Axiomatik der Quantentheorie. Daher ist man auf einen gewissen Grad der Interpretation angewiesen, was zur Folge hat, dass es einige konkurrierende Interpretationen der Quantenmechanik gibt, die teilweise auch, wenn sie mit leicht anderen Axiomen starten, unterschiedliche experimentelle Konsequenzen vorhersagen. Allerdings wurde bisher keine Abweichung von der „Standard-Quantenmechanik“ gefunden.

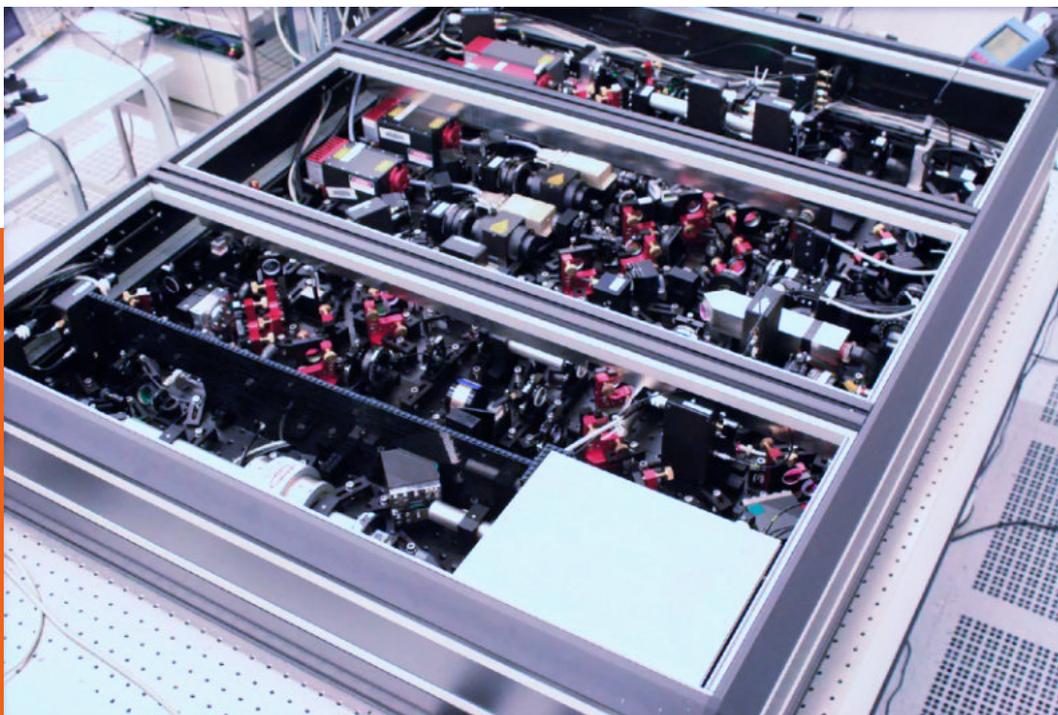
Quantentechnologie

Die Forschung auf dem Gebiet der Quantenmechanik ist sehr spannend und herausfordernd: Wir untersuchen Gesetzmäßigkeiten, die einerseits sehr kontraintuitiv sind. Andererseits ermöglicht die Quantenmechanik gerade deshalb neue, unerwartete und damit oft revolutionäre Technologien (ab Sei-

te 196). Nach der ersten Quantenrevolution, in der Quanteneigenschaften vieler Quantenteilchen ausgenutzt wurden, standen bald Einzelquantensysteme im Vordergrund: einzelne Quantenzustände, die zum Beispiel Anwendung im Quantencomputing, in der Quantenkryptografie und Quantenkommunikation bis hin zum Quanteninternet finden. Speziell in der Quantenkryptografie hat es die Physik es geschafft, aus einem prinzipiellen Unwissen (des Ergebnisses einer Einzelmessung) etwas Konstruktives zu gewinnen. Teil dieser auf Einzelquantensystemen basierenden zweiten Quantenrevolution sind aber auch das Design von Quantenmaterialien, die Quantenbildgebung und Quantenmetrologie. Letztere nutzt die Quantenmechanik, um ein allein auf der Definition von bestimmten Naturkonstanten aufgebautes Einheitensystem zu definieren (Seite 209). Auch quantenbasierte Künstliche Intelligenz besitzt ein noch nicht abzusehendes Potenzial.

Obwohl wir also die Regeln kennen, lässt sich mit Sicherheit sagen, dass wir nur einen Bruchteil des Potenzials der Quantenmechanik erforscht haben. Es werden noch viele neue quantenbasierte Prozesse und Materialien gefunden werden, die als Grundlage für vollkommen neue Technologien und Anwendungen dienen können, und die auch unser Verständnis der Materie und ihrer Wechselwirkung weiterbringen. Die Revolution, die diese Theorie angestoßen hat, ist noch lange nicht am Ende.

*Matthias Bartelmann, Michèle Heurs,
Claus Lämmerzahl und Reinhard Werner*



Deutlich komplexer als ein Doppelspaltexperiment ist die technische Realisierung des Quetschlichts, hier am Beispiel des GEO600-Gravitationswellendetektors.

FUNDAMENTALE THEORIEN

Theorien sind die höchste Form physikalischer Erkenntnis. Wie findet man solche Theorien, wie entwickeln sie sich, und wie bilden die einmal aufgestellten Theorien die Welt ab? Welchen Anwendungsbereich besitzen sie und wie werden sie überprüft?

Idealerweise werden Theorien – innerhalb eines allgemeingültigen methodischen Rahmens – durch eine endliche Anzahl von **Schlüsselexperimenten** festgelegt. So kann man z. B. das Newtonsche Gravitationsgesetz (Seite 59) unter der Annahme, dass Raum und Zeit Kontinua sind, durch das Ausmessen von Auslenkungen von Massen an Pendeln oder Federn durch andere Massen in Abhängigkeit von deren Abstand und Größe bestimmen. Man wird dann auch notwendigerweise auf die Gravitationskonstante geführt. Bei höherer Messgenauigkeit findet man Abweichungen oder neue Effekte, wie die gravitative Rotverschiebung, was zu einer neuen, die alten Effekte aber einschließenden, Theorie führt. So gelangt man von der Newtonschen zur Einsteinschen Gravitationstheorie. Dabei bleibt die Newtonsche Theorie immer noch im Rahmen gewisser Näherungen ein gültiger Teil der Einsteinschen Theorie. Ähnlich verhält es sich bei der Weiterentwicklung von klassischer Mechanik zur Quantenmechanik. Im Rahmen der Quantenmechanik ist die klassische Mechanik in gewissen Bereichen (etwa beim „klassischen Grenzfall“) immer noch effektiv gültig.

Findet man in einem Experiment eine Abweichung von den theoretischen Gesetzmäßigkeiten, sucht man zuerst nach einem experimentellen Fehler oder denkt an bisher nicht berücksichtigte Einflüsse. Wenn sich trotz langen Suchens keine konventionelle Erklärung finden lässt, versucht man mit vorläufigen Hypothesen eine Gesetzmäßigkeit zu formulieren, deren Auswirkungen man dann auch in anderen, konzeptionell unabhängigen, Experimenten zeigen können sollte. Wenn sich in diesen Experimenten in der Tat neue Effekte nachweisen lassen, wird versucht, daraus eine Theorie zu formulieren, an die jedoch strenge formale Bedingungen gestellt werden, etwa in Bezug auf Symmetrien, Erhaltungssätze, Kausalität oder anderes. Eine neue Theorie ist dann so lange gültig, bis man verifizierte Abweichungen gefunden hat.

Hier geben wir einen Überblick über wichtige, grundlegende Theorien der Physik und weisen dabei auf Widersprüche und offene Fragen des Theoriengebäudes sowie deren Grenzen hin.

Quantentheorie und Relativitätstheorie

Wir können nun zwei Arten von fundamentalen physikalischen Theorien unterscheiden: die **Rahmentheorien**, die immer und überall und für alle physikalischen Systeme gelten, und die **Theorien zu den vier Wechselwirkungen**. Mit diesen Theorien sollten im Prinzip alle Phänomene der unbelebten Natur beschreibbar sein. Es gibt bis heute kein einziges expe-

rimentelles Resultat, das diesen Theorien offensichtlich widerspricht. Auf trotzdem existierende Probleme werden wir noch eingehen.

Die Theorien zu den vier Wechselwirkungen sind bekannt: es sind dies die allgemeine Relativitätstheorie, die alle gravitativen Phänomene beschreibt, dann die Maxwellsche Theorie für alle elektromagnetischen Phänomene, sowie die Theorie der schwachen und starken Wechselwirkung, die grundlegend für den Aufbau der Materie sind. Bis auf die Gravitation sind alle Wechselwirkungen quantisiert, d. h. als Quantenfeldtheorie formulierbar.

Was sind nun die genannten Rahmentheorien? Da ist zunächst die **Quantentheorie**. Alle Materie und alle Felder bestehen letztlich aus kleinsten Teilchen und Wellen, die beide den Regeln der Quantenmechanik gehorchen. Auch wir Menschen bestehen letztlich aus Quarks und Elektronen und weiteren Teilchen. Eine weitere Rahmentheorie ist die **spezielle Relativitätstheorie**. Alle Beschreibungen der Physik müssen sich bei einem Wechsel des Bezugssystems so transformieren, wie diese es vorschreibt.

Da alle Formen von Materie und Energie ein Gravitationsfeld erzeugen und das Gravitationsfeld alle Formen von Materie und Energie beeinflusst, stellt auch die **allgemeine Relativitätstheorie** eine solche Rahmentheorie dar. Hier fällt schon auf, dass diese Theorie eine Sonderstellung einnimmt: Die allgemeine Relativitätstheorie ist sowohl Rahmentheorie als auch Theorie für eine der vier Wechselwirkungen. Und in der Tat ist die Struktur dieser Theorie ganz anders als die Theorie der anderen drei Wechselwirkungen. Bisher ist es nicht gelungen, diese Gravitationstheorie mit den Theorien für die anderen drei Wechselwirkungen zu vereinheitlichen. Die Probleme, auf die man dabei stößt, müssen im Rahmen einer neuen Theorie, der Theorie der Quantengravitation (Seite 69), gelöst werden. Eine weiterer wichtiger Baustein im Theoriegebäude ist die Beschreibung von makroskopischen Phänomenen, die auf der Wechselwirkung vieler Teilchen beruhen und mithilfe statistischer Ansätze beschrieben werden, auf die wir weiter unten eingehen.

Theorie von Allem?

Mit den beschriebenen Theorien könnte die fundamentale Beschreibung der unbelebten Natur eine eindeutige Form erhalten haben. Leider ist es doch nicht ganz so einfach. Obwohl wir, wie oben erwähnt, bisher keine Beobachtungen und Experimente kennen, die den oben genannten Theorien wi-



dersprechen, gibt es einerseits innerhalb einiger dieser Theorien nicht verstandene Punkte, und andererseits gibt es auch zwischen den Rahmentheorien Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie Inkompatibilitäten. Eines der großen Probleme der modernen theoretischen Physik ist, dass Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie nicht miteinander verträglich sind. So sagt die allgemeine Relativitätstheorie voraus, dass es unter sehr allgemeinen Voraussetzungen Schwarze Löcher gibt, die notwendigerweise in ihrem Innern eine Singularität haben. Allerdings verbietet die Quantentheorie das Entstehen von Singularitäten, da kein Quantensystem sich auf einen Punkt zusammenpressen lässt. Damit liegen zur Existenz von Singularitäten zwei widersprüchliche Aussagen vor. Diese beiden Theorien können also nicht gleichzeitig richtig sein. Zwar ist die Singularität zum Glück hinter dem Ereignishorizont verborgen und entzieht sich damit unserer Beobachtung, trotzdem sollten etablierte Rahmentheorien immer und überall kompatibel sein.

Ein weiterer Punkt ist, dass es in der Quantenphysik die Nullpunktsenergie gibt, die auch experimentell sehr gut bestätigt ist (etwa durch Messungen des Casimir-Effekts). Während in der Newtonschen Physik und auch in der Quantenphysik nur Energiedifferenzen eine Rolle spielen (eine konstante Energie ist nicht messbar, nur Energiedifferenzen sind messbar), spielen in der allgemeinen Relativitätstheorie absolute Energiewerte eine Rolle. Auf der rechten Seite der Einstein-Gleichungen taucht der Energie-Impuls-Tensor auf, d. h. insbesondere die Energie erscheint dort. Damit erzeugt die Nullpunktsenergie ein Gravitationsfeld. Wenn man nun die Nullpunktsenergien aller Teilchen im Universum zusammennimmt und das daraus folgende Gravitationsfeld errechnet, würde sich eine kosmologische Entwicklung ergeben, die vollkommen im Widerspruch zu allen Beobachtungen steht. Das theoretische Ergebnis liegt um 120 Größenordnungen neben den Beobachtungen. Darüber hinaus spielt der Begriff der Zeit in der allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantentheorie eine vollkommen unterschiedliche Rolle.

Wenn man eine vereinheitliche „Theorie von Allem“ anstrebt – also eine Theorie, die den Anspruch hat, zumindest für die gesamte unbelebte Natur gültig zu sein –, können Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie nicht unverändert bleiben. Es müssen entweder die Quantentheorie oder die allgemeine Relativitätstheorie angepasst werden – oder gar beide zusammen. Man sucht daher nach einer vereinheitlichten Quantengravitationstheorie, die die bisherige Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie ersetzt.

Vielteilchensysteme und statistische Physik

Die oben beschriebenen Fundamentaltheorien sollten prinzipiell geeignet sein, alle unbelebten Systeme zu beschreiben. Es gibt jedoch praktische Grenzen. In Systemen, die aus vielen Konstituenten aufgebaut sind, von aus sehr vielen Ato-

men bestehenden Festkörpern bis hin zu großen Gruppen von Lebewesen, treten häufig Phänomene auf, die nicht durch die Eigenschaften der einzelnen Konstituenten erklärbar sind. Diese Erscheinungen werden als emergente Phänomene bezeichnet. 1972 wies der Nobelpreisträger Philip W. Anderson in seinem Aufsatz „More is different“ darauf hin, dass verschiedene naturwissenschaftliche Felder auf makroskopischer Ebene jeweils angepasste eigenständige theoretische Ansätze benötigen.

Dieser Zugang ist eine Alternative zum oben beschriebenen Ansatz fundamentale, allgemein gültige Theorien zur Beschreibung der Natur zu verwenden. Hierbei sollte aus reduktionistischer Sicht eine detaillierte Kenntnis der Bestandteile des Mikrokosmos zu einem einheitlichen, besseren Verständnis aller beobachteten Phänomene führen. Jedoch ist dieser Ansatz für emergente Phänomene meistens nicht praktikabel, weil diese häufig erst in Systemen mit sehr vielen Teilchen auftreten. Im Gegenteil können zu detaillierte, mikroskopische Beschreibungen den Blick aufs Wesentliche verstellen und sind insbesondere aufgrund des in der Regel hohen Rechen- und Simulationsaufwandes oft nicht für Vorhersagen auf makroskopischer Ebene geeignet.

Die statistische Physik stellt hier Methoden bereit und umfasst Teiltheorien wie Thermodynamik und statistische Mechanik. Hierbei geht es häufig darum, wie man für makroskopische Systeme und ihre Dynamik eine effektive Beschreibung gewinnen kann. Dabei werden neue Begrifflichkeiten wie das Konzept der Phasenübergänge und neue Größen wie Temperatur oder Entropie eingeführt. Die Methoden der statistischen Physik können prinzipiell auf alle physikalischen Systeme und auf alle Wechselwirkungen angewendet werden. Zunächst für abgeschlossene Systeme im thermodynamischen Gleichgewicht entwickelt, hat die Physik in den letzten Jahren zunehmend Nichtgleichgewichtsphänomene in offenen makroskopischen Systemen betrachtet und dafür Methoden wie die nichtlineare Dynamik entwickelt. Phänomene fernab vom Gleichgewicht umfassen komplexe dynamische Phänomene, nichtlineare Wellen und Strukturbildung auf sehr verschiedenen Längenskalen und sind in vielen Feldern Gegenstand aktueller Forschung.

Fazit

Im Rahmen der oben beschriebenen Ansätze können die physikalischen Aspekte der unbelebten Welt von der atomaren Skala bis zu kosmologische Phänomenen beschrieben werden. Selbst in der Biologie können immer mehr Phänomene auf physikalische Prozesse zurückgeführt werden (ab Seite 131). Zudem werden die Methoden der statistischen Physik immer häufiger auch auf komplexe und vernetzte Systeme außerhalb der Physik angewandt (ab Seite 231).

Markus Bär und Claus Lämmerzahl

AUS VIELEM ENTSTEHT NEUES

Die Weisheit, dass das Ganze mehr als die Summe seiner Teile ist, stammt ursprünglich von dem griechischen Philosophen Aristoteles. Das „mehr“ entsteht aus der Wechselwirkung zwischen den Teilen untereinander und mit der Umgebung eines Systems. Dieses „mehr“ manifestiert sich in vielen uns im Alltag umgebenden Systemen der unbelebten und belebten Natur.

In einem berühmten Essay aus dem Jahr 1972 mit dem Titel „More is different“ – zu Deutsch: „Mehr ist anders“ – legte der amerikanische theoretische Festkörperphysiker Philip W. Anderson dar, dass es zwar durchaus die Kenntnis der Einzelbausteine brauche, um bestimmte Phänomene zu verstehen – diese Kenntnis aber nicht ausreicht, um alle Phänomene zu erklären. So besteht Materie aus einer riesigen Zahl identischer Atome und Moleküle, die wiederum aus Elektronen, Protonen und Neutronen aufgebaut sind. Durch die Wechselwirkung zwischen Atomen und Molekülen treten in der Materie allerdings ganz neue Phänomene und Strukturen auf, die sich in keiner Weise durch die Eigenschaften isolierter Atome oder Moleküle oder durch deren subatomare Bausteine verstehen lassen.

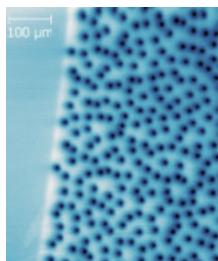
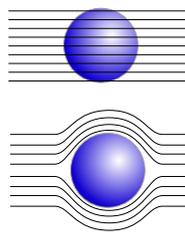
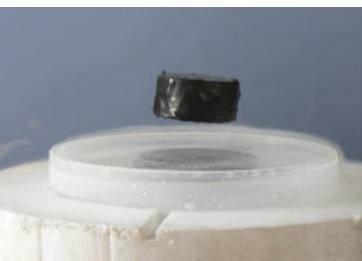
So erklärt der Aufbau einzelner Kupferatome nicht die allseits bekannte Stromleitung durch Kupferkabel. Durch Wechselwirkungen nach den Gesetzen der Quantenphysik ordnen sich Metallatome zu einem Kristallgitter, und einige Elektronen pro Atom werden Teil des sogenannten Gases gemeinsamer Leitungselektronen. Diese bewegen sich bei angelegter Spannung entgegen dem Ohmschen Widerstand durch das Kristallgitter eines Metalls. Mit den Eigenschaften einzelner Atome ist dieses im Alltag sehr wichtige Phänomen der Stromleitung nicht erklärbar. Solch ein Entstehen von Neuem aus dem Zusammenwirken von Komponenten nennt man **Emergenz**.

Supraleitung als emergentes Phänomen

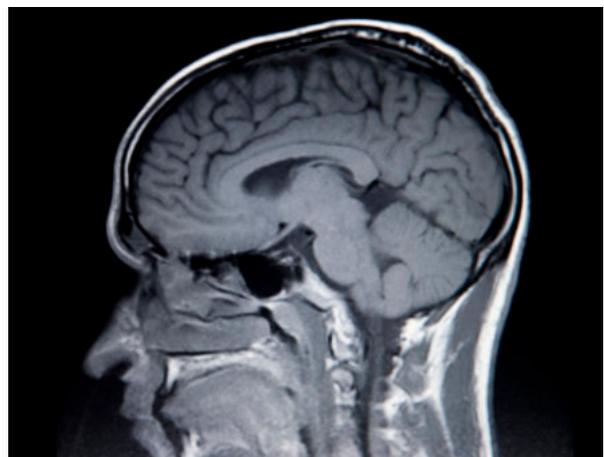
Ist schon die normale Stromleitung ein emergentes Phänomen, so setzt die **Supraleitung** noch ein weiteres obendrauf: Der niederländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes beobachtete 1911 erstmals eine widerstandslose Stromleitung durch Quecksilber und nannte das Phänomen Supraleitung. Sie geht in verschiedenen Metallen (z. B. Niob) unterhalb einer vom jeweiligen Material abhängigen, sehr tiefen Temperatur T_c durch einen Phasenübergang aus der (emergenten) normalleitenden Phase eines Metalls mit Ohmschen Widerstand hervor. Es ist nur eines von vielen Beispielen in der Natur, in denen emergente Phänomene durch Phasenübergänge (bzw. Bifurkationen) einsetzen.

Durch den sogenannten **Meißner-Ochsenfeld-Effekt** werden Magnetfelder aus Supraleitern verdrängt, weshalb diese in einem Magnetfeld schweben können, sofern die Magnetfeldstärke unter einem bestimmten kritischen Wert liegt.

1950 schlugen Witali Ginzburg und Lew Landau die nach ihnen benannte universale Ginzburg-Landau-(GL)-Gleichung für den Phasenübergang zur Supraleitung vor. Die GL-Theorie beschreibt zentrale experimentelle Beobachtungen und erlaubt wichtige Vorhersagen. Sie stellt bei einem Phasenübergang den fundamentalen Zusammenhang zwischen einer neuen Ordnung in einem System, hier die Supraleitung, und



Links: Der Meissner-Ochsenfeld-Effekt lässt einen Supraleiter über einem Magneten schweben, Mitte: Magnetfeldlinien durch Normalleiter (oben) und deren Verdrängung im Typ-I-Supraleiter (unten), rechts: Starke Magnetfelder durchdringen einen Typ-II-Supraleiter in der Form der sogenannten Abrikosov-Gitter.



Eine MRT-Aufnahme des menschlichen Schädels. Die räumliche Auflösung nimmt mit der Stärke des Magnetfelds zu. Daher sind auch für diese Anwendung die gegenüber großen Magnetfeldern robusten Typ-II-Supraleiter so enorm wichtig.

Kontrollparametern her, hier die Einstellgrößen Temperatur und Magnetfeld.

Die GL-Theorie beschreibt auch die technisch sehr wichtigen Typ-II-Supraleiter, die unter anderem in der **Magnetresonanztomografie (MRT)** in der Medizin zum Einsatz kommen. In Typ-II-Supraleiter dringen Magnetfelder in Form von schmalen Schläuchen, sogenannten Flusslinien, ein. Die Flusslinien bilden ein zweidimensionales, nach dem russischen Theore-

EMERGENZ

Der schillernde Begriff Emergenz (von lateinisch emergere „Auftauchen“, „Herauskommen“, „Emporsteigen“) beschreibt die Möglichkeit der Herausbildung von neuen Eigenschaften und Strukturen in einem aus Einzelteilen bestehenden System, die sich erst durch Wechselwirkung der Teile erklären lassen. Emergente Phänomene in Vielteilchensystemen sind im Alltag zahlreich: Stromleitung, Supraleitung, Halbleiter, Magnetismus, kollektive Bewegung von Vogel- und Fischschwärmen oder von Schaf- und Gnuherden, Selbstorganisation in der Biologie von der Zelle bis zum Organismus.

Diese Beispiele für Emergenz können zwei unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden. In stromleitenden Metallen und Magneten ist die Wechselwirkung zwischen den Atomen zeitunabhängig und das ist entscheidend für deren zuverlässige technische Verwendbarkeit. Vögel in Schwärmen reagieren auf das Flugverhalten der Nachbarn und die Reaktion und Wechselwirkung zwischen Molekülen in Zellen hängt von deren lokaler Konzentration ab. Durch diese Rückkopplung wird die Wechselwirkung zwischen den Einzelteilen zeitabhängig und das ist kennzeichnend für Emergenz in komplexen Systemen.

tiker Alexei Abrikosov benanntes, Gitter. Durch die Ausbildung der Flussliniengitter bleibt diese räumlich modulierte Supraleitung bis zu weit größeren Magnetfeldbereichen stabil, was insbesondere bei leistungsstarken Magnetspulen von großer technischer Bedeutung ist.

Auf der mikroskopischen Ebene beruht die Supraleitung auf der Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen und den kollektiven Schwingungen der Metallatome um ihre Gitterplätze im Kristall, wie die amerikanischen Physiker John Bardeen, Leon Neil Cooper und John Robert Schrieffer mit der nach ihnen benannten **BCS-Theorie für Supraleitung** entdeckt haben. Durch diese Wechselwirkung zeigt sich die Emergenz darin, dass zwei Leitungselektronen sogenannte **Cooper-Paare** bilden, die in der Theorie als ein Teilchen (Quasiteilchen) erfasst werden. Die Gesamtheit der Cooper-Paare wird durch eine sich über den gesamten Festkörper erstreckende Welle beschrieben, die den Gesetzmäßigkeiten der GL-Theorie unterliegt. Durch diesen Zusammenhang bekommen die Parameter in der phänomenologischen GL-Theorie eine mikroskopische Bedeutung.

Das Verstehen des emergenten Phänomens Supraleitung beruht also auf dem Wechselspiel zwischen seiner raum-zeitlichen Beschreibung durch die GL-Theorie und seiner mikroskopischen Erklärung durch die BCS-Theorie. Dies zeigt, wie in der (Vielteilchen-)Physik der kondensierten Materie emergente fundamentale Eigenschaften durch scharfsinnige Identifizierung der dafür wesentlichen Mechanismen und deren Berücksichtigung in mathematischen Modellen erklärt werden.

Hier Details, dort das große Ganze

Elektrische Stromleitung und Supraleitung sind natürlich nicht die einzigen emergenten Phänomene in der kondensierten Materie. Ein weiteres Beispiel ist das neuartige Material **Graphen**, für dessen Herstellung 2010 der Nobelpreis verliehen wurde (siehe Seite 84). Graphen ist ultradünn: Es besteht aus einer einzigen Schicht von Kohlenstoffatomen und zeichnet sich durch eine Reihe neuer emergenter Materialeigenschaften aus, zu denen ein extrem niedriger elektrischer Widerstand, hohe Wärmeleitfähigkeit und enorme Stabilität gehören. Die mikroskopische Erklärung sieht folgendermaßen aus: Die Kohlenstoffatome bilden ein sechseckiges Gitter in Form eines Bienenwabemusters. In dieser Struktur führt das Wechselspiel zwischen Atomgitter und Elektronen zu frappierenden emergenten Eigenschaften: So verhalten sich Elektronen in Graphen, als ob sie keine Masse hätten, d. h. wie relativistische Teilchen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Eine immer detailliertere Kenntnis des subatomaren Aufbaus der Materie liefert aber keinen Beitrag zur Erklärung emergenter Phänomene in Vielteilchensystemen wie der Supraleitung.

Eine immer detailliertere Kenntnis des subatomaren Aufbaus der Materie liefert aber keinen Beitrag zur Erklärung emergenter Phänomene in Vielteilchensystemen wie der Supraleitung. Entscheidend ist die Identifikation der wesentlichen Wechselwirkungen zwischen den Teilen, sei es zwischen den Atomen in einem Festkörpergitter, den viel größeren Molekülen/Proteinen in einer Zelle oder fliegenden Vögeln in Schwärmen. Eine Berücksichtigung aller Einzelteileigenschaften bis in den subatomaren Bereich verstellt schnell den Blick auf das Wesentliche und würde zudem einen unvorstellbaren hohen Rechenaufwand ohne zusätzlichen Erkenntnisgewinn bedeuten.

50 Jahre nach Andersons wegweisendem Artikel gegen eine radikal reduktionistische Sichtweise auf Naturphänomene ist das Konzept der Emergenz so aktuell wie nie zuvor. Die in der Physik entwickelten Herangehensweisen zur Berücksichtigung wesentlicher Wechselwirkungen zwischen Teilen strahlen mittlerweile in eine Vielzahl von Disziplinen von der Neurobiologie bis zur Verkehrsplanung aus (mehr dazu im Abschnitt „Komplexe Welt – vernetzte Welt“ ab Seite 231).

Markus Bär, Klaus Richter und Walter Zimmermann

NICHTGLEICHGEWICHT UND STRUKTURBILDUNG

Unsere Welt ist voll mit faszinierenden Strukturen und Mustern, wie zum Beispiel Wolkenstreifen. Wir verdanken sie meistens dem Umstand, dass sich die Welt im Nichtgleichgewicht befindet. Muster erfüllen oftmals auch lebenswichtige Funktionen und erstrecken sich von Mikrometern bis hin zu Hunderttausenden von Lichtjahren.

Unsere Erde ist ein offenes System im Nichtgleichgewicht, das permanent große Mengen an Strahlungsenergie von der Sonne empfängt und umgewandelt zum Teil als Wärmestrahlung ins Weltall wieder abgibt. Dieser Energiefluss treibt viele spannende Phänomene auf der Erde an, so auch das Pflanzenwachstum, und ermöglicht dadurch die Vielfalt des Lebens. Da die Sonnenstrahlung nicht gleichmäßig auf die Erdoberfläche trifft, wird sie zum Motor für eine große Zahl faszinierender dynamischer Phänomene wie die Atmosphärenbewegungen (Wind, Niederschläge, Wolken, Hydrologie) und die Meeresströmungen.

Dagegen sind alltägliche Umgebungseinflüsse auf viele wichtige Materialien wie Metalle oder Halbleiter im Vergleich zu

den für Veränderungen notwendigen Einwirkungen gering. Solche Gegenstände können daher als abgeschlossene Systeme im thermischen Gleichgewicht betrachtet werden.

Situationen abseits des physikalischen Gleichgewichts treiben auch chemische und technische Prozesse in der Industrie, unterschiedliche Transportphänomene und die Fortbewegung mit Verkehrsmitteln oder Katastrophen wie Erdbeben an. Nichtgleichgewichtszustände lassen sich sogar einfrieren: Durch sehr schnelles Abkühlen können Materialien in solchen Zuständen verharren, was beispielsweise die stärksten bekannten Metalllegierungen und die zähesten Kunststoffe hervorbringt.

THERMISCHE KONVEKTION

Die thermische Konvektion spielt eine zentrale Rolle bei der Dynamik in der Atmosphäre (Titelbild), im Erdinneren und bei vielen technischen Prozessen. Das Konvektionssystem spielt auch beim Verständnis systemübergreifender Phänomene der Strukturbildung eine Schlüsselrolle: Hier gelingt die Modellierung von periodischen Konvektionsmustern gut, so dass durch die quantitative Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment an diesem System auch universelle Gesetzmäßigkeiten der Strukturbildung exemplarisch nachgewiesen und verstanden wurden.

Die Abbildung rechts zeigt einen Ausschnitt einer ebenen, horizontalen Konvektionszelle. Die obere Behälterwand hat eine niedrigere Temperatur als die untere. Dadurch entsteht eine instabile Schichtung im Gravitationsfeld: kältere und schwerere Flüssigkeit oben sowie wärmere und leichtere unten. Der resultierende Wärmestrom von unten nach oben bedeutet Nichtgleichgewicht in der Flüssigkeitsschicht. Setzt sich die leichtere untere Flüssigkeit nach oben und gleichzeitig die schwerere obere Flüssigkeit nach unten in Bewegung, so entsteht u. a. viskose Reibung. Daher wird diese Schichtung erst ab einer kritischen Temperaturdifferenz instabil, die von den Materialeigenschaften und

der Schichtdicke abhängt. Mit Überschreiten der kritischen Temperaturdifferenz setzt die Konvektion ein. Durch die Konvektion wird effizienter Wärme transportiert als ohne. Mit Durchleuchtung der Konvektionszelle lassen sich die Konvektionsmuster sichtbar machen. Diese verändern sich, wenn man die seitlichen Begrenzungen einer Konvektionszelle variiert. Je nach Berandung orientieren sich Streifenmuster ganz allgemein entweder senkrecht zur Berandung wie die Konvektionsstreifen oder parallel.

Abweichungen von der Parallelität der oberen und unteren Wand führen zu Einschränkungen der möglichen Musterwellenlängen, auch das ist eine an diesem System beobachtbare universelle Eigenschaft periodischer Muster. So wird exemplarisch auch die räumlich benachbarte Koexistenz von Streifen- oder Bienenwabenmustern beobachtet (unten mitte) oder es kommt zu neuartigen raumzeitlichen Mustern, wie dem Spiral-Defekt-Chaos (unten rechts).



← Konvektionszelle

↓ Exemplarische Muster in kreisförmigen Konvektionszellen



Titelbild: wuttichok/iStock, links: awk/jk,

← parallele Wolkenbänder, die durch parallele Konvektionswalzen entstehen



Nichtgleichgewicht und Musterbildung

Viele Phänomene fernab vom thermischen Gleichgewicht sind Gegenstand aktueller Forschung. Eine bedeutende Klasse davon sind Phasenübergänge weit im Nichtgleichgewicht, bei denen sich eintönige homogene Zustände durch Strukturbildung in Muster mit sehr unterschiedlichen Zeit- und Längenskalen verwandeln. Ein Alltagsbeispiel ist ein langer Applaus: Ein zunächst unstrukturierter Klatschlärm schlägt durch Umgebungswahrnehmung (Rückkopplung) oft in synchrones periodisches Beifallklatschen um. Der unstrukturierte Lärm klingt immer ähnlich, egal, wann man anfängt, zuzuhören. Beim Übergang zum rhythmischen Beifall wird diese Symmetrie gebrochen und durch eine Periodizität mit diskreter Symmetrie ersetzt: Jetzt macht es einen Unterschied, zu welchem Zeitpunkt man mit dem Zuhören beginnt.

Bei den **Konvektionsstrukturen** wird nicht eine zeitliche, sondern eine räumlich homogene Symmetrie gebrochen. Derartige und in der Natur weit verbreitete Nichtgleichgewichtsübergänge zu periodischen Strukturen sind weitere Beispiele für **Bifurkationen** (Verzweigungen) zwischen Zuständen in der nichtlinearen Physik, die häufig mit Instabilitäten homogener Zustände zusammenhängen (siehe auch „Kippdynamiken im Erdsystem“ auf Seite 123).

Die spannenden Antriebsmechanismen von Instabilitäten sind so unterschiedlich wie die Systeme selbst; umso faszinierender ist es, dass Muster systemübergreifende Eigenschaften besitzen. So sind räumlich periodische Muster nicht nur bei einer Wellenlänge, sondern für eine Bandbreite unterschiedlicher Wellenlängen intrinsisch stabil. Während eine kleine Kugel nach den Regeln der Mechanik immer zum niedrigsten Punkt einer Mulde mit der niedrigsten Lageenergie rollt, werden Wellenlängen von Mustern im Nichtgleichgewicht durch Anfangsbedingungen oberhalb einer Bifurkation aus dem stabilen Band gewählt. Auch Umgebungsbedingungen bzw. Randbedingungen beeinflussen die Bandbreite von stabilen Musterwellenlängen. Mit den universellen Eigenschaften der Musterbildung in Physik, Chemie, Technik bis hin zu den Lebens- und Gesellschaftswissenschaften beschäftigt sich das Gebiet der Strukturbildung. Weitere Beispiele werden im Abschnitt „Komplexe Welt – vernetzte Welt“ ab Seite 231 beschrieben.

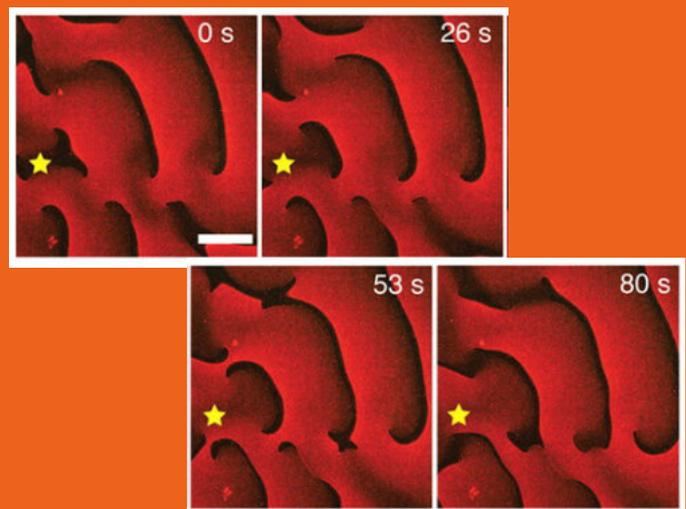
Markus Bär und Walter Zimmermann

STRUKTURBILDUNG IN BIOLOGIE UND CHEMIE

Der englische Mathematiker Alan Turing postulierte bereits 1952, dass ein einfaches System aus zwei Chemikalien, die diffundieren und miteinander reagieren, das nach ihm benannte Turing-Muster hervorbringt. Es gehört zur gleichen Musterklasse wie Konvektionsrollen. Da die beiden Chemikalien hierfür sehr unterschiedliche Diffusionseigenschaften besitzen müssen, hat es 40 Jahre gedauert, sie in einem chemischen Experiment nachzuweisen. Proteine in Zellen bewegen sich (diffundieren) ebenfalls oft sehr unterschiedlich schnell. **Turing-Muster** spielen daher in der Zellbiologie eine wichtige Rolle. Auch die Hautpigmentmuster beim **Kaiserfisch** zählen zu den Turing-Mustern.

Strukturbildungsprozesse in lebenden Systemen erfüllen wichtige Funktionen (ab Seite 131). So lässt sich bei länglichen Kolibakterien kurz vor ihrer Zellteilung im Zellinneren eine Schwingung (genauer, eine stehende Welle) der Konzentration von sogenannten **Min-Proteinen** beobachten. Weil der Knoten der stehenden Welle immer in der Zellmitte liegt, wird dort die Zellteilung ausgelöst. Der Musterbildungsprozess erfüllt also die zentrale Funktion, die Mitte der Zelle zu finden, damit das genetische Material immer zu gleichen Teilen auf die beiden Tochterzellen aufgeteilt wird. Es lassen sich im Labor in einer Lösung die zellinterne Energiequelle Adenosintriphosphat (ATP) und die unterschiedlichen Min-Proteine mit einer künstlichen Lipidmembran, an die sich Proteine binden können, zusammenbringen (Seite 147). Da in diesem Fall mehr als zwei Proteinsorten diffundieren und reagieren, lässt sich die faszinierende Strukturbildung in Form von Wanderwellen oder rotierenden Spiralen beobachten. Erst eingeschränkte Geometrien (kleines langgestrecktes, quasi-eindimensionales Bakterium vs. große ausgedehnte zweidimensionale Grenzschicht in der Petrischale) führen in solchen In-vitro-Experimenten von laufenden zu den für die Zellteilung wichtigen stehenden Wellen.

Raumzeitliche Dynamik von Min-Proteinen im Kolibakterium in vitro.



DAS KLEINSTE UND DAS GRÖßTE

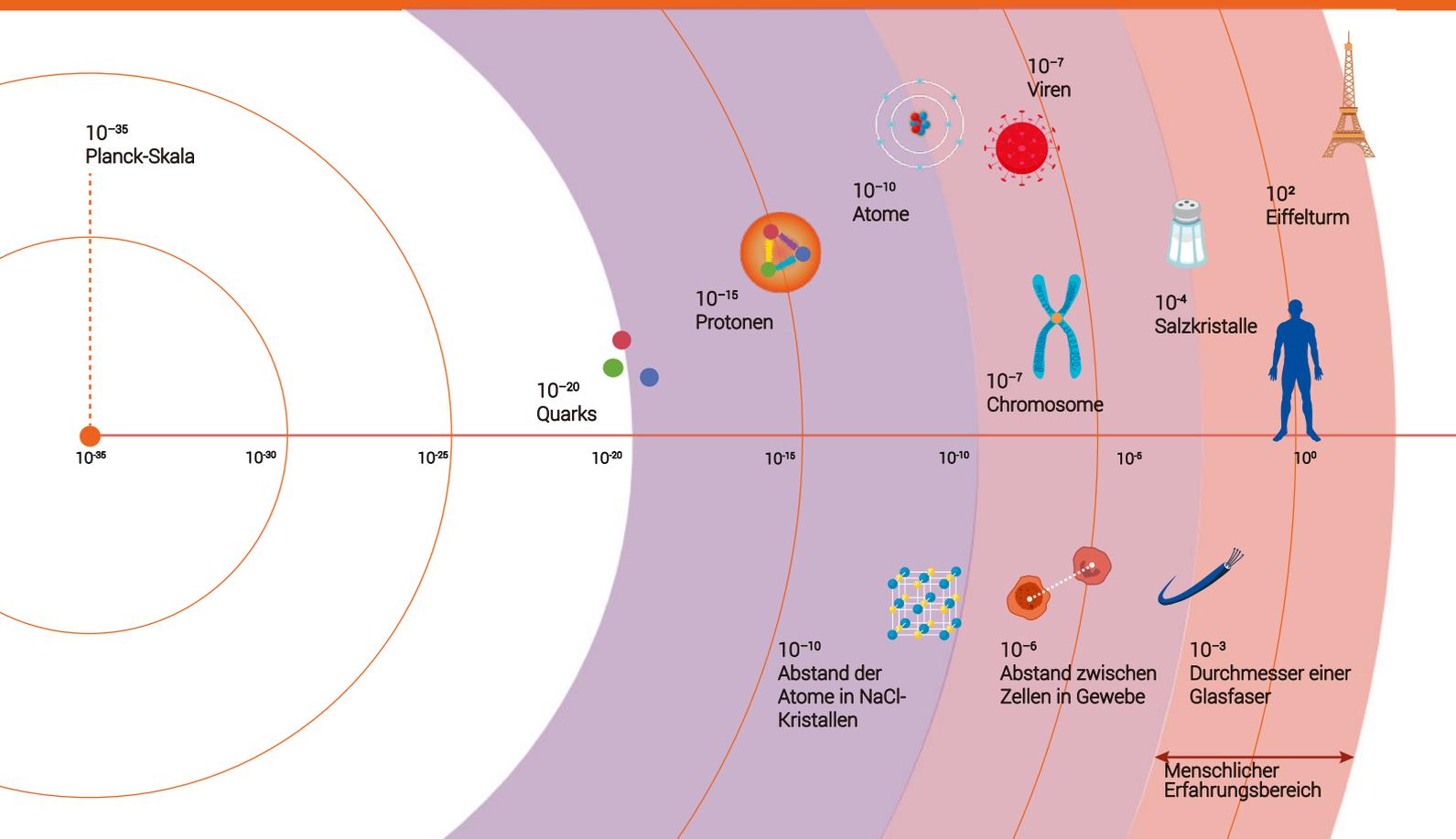
Unsere Alltagswelt spielt sich auf Längen von etwa einem Millimeter bis hin zu maximal einigen Tausend Kilometern ab. Mit den Messgeräten der Physik wurde der Erfahrungsbereich stark erweitert: Aller kleinste Materiebausteine sind weit unter der Größe eines Atoms bekannt, und die Grenze des beobachtbaren Universums lässt sich im Mikrowellenbereich erkennen. Zwischen den Längenextremen der Physik liegen 47 Größenordnungen!

In diesem Abschnitt wird die Physik in den Extremen der Längenskalen beleuchtet: Das Aller kleinste (und ein paar etwas größere Zusammensetzungen wie Atome) sowie das Aller größte, womit wir die Objekte des Weltalls bis hin zum ganzen Universum meinen.

Für die greifbare Kommunikation über die typischen Eigenschaften bei unterschiedlichen Längen-, Zeit-, Massen- und

Energieskalen in diesen Extrembereichen haben Forschende oft eigentümliche Einheiten entwickelt, ohne die wir in diesem Abschnitt nicht auskommen: So wird die Masse im Bereich der Elementarteilchenphysik in Energie geteilt durch die Lichtgeschwindigkeit im Quadrat angegeben. Dahinter steckt der Zusammenhang zwischen Masse und Energie, $E = mc^2$. Doch damit nicht genug, die Energie wird in einer „typischen“ Energie angegeben, nämlich in der Energie, die ein gebräuchliches Teilchen – das Elektron – besitzt, nachdem es durch ein elektrisches Feld der Spannung 1 Volt beschleunigt wurde: ein Elektronenvolt. Diese Energie ist im Alltagsmaßstab winzig, doch für Teilchen eine handliche Größe.

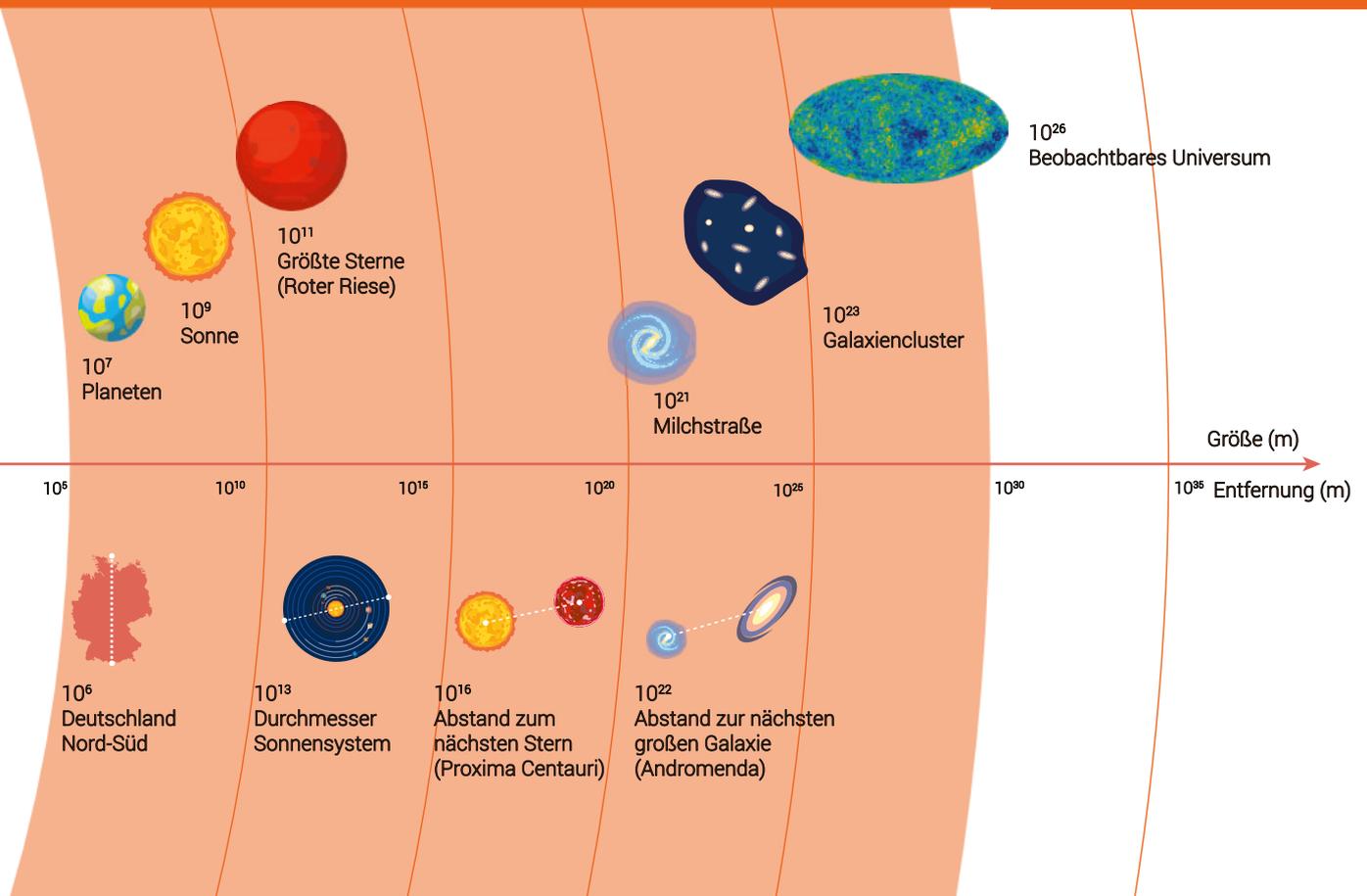
In der Praxis der Teilchenphysik wird allerdings mit deutlich höheren Energien gearbeitet. Das schwerste Elementarteilchen „wiegt“ 173 Milliarden Elektronenvolt geteilt durch c^2 . Beschleuniger bringen Protonen auf einige Billionen Elektro-



nenvolt. Die Zehnerpotenzen werden dabei mit Einheitenvorsätzen angegeben, von denen einige auch im Alltag geläufig sind: Milli-, Zenti-, Kilo-, Mega- und Giga-. Das zuvor genannte Quark hat dann die Masse $173 \text{ GeV}/c^2$, der Beschleuniger bringt es auf Energien von 7 TeV.

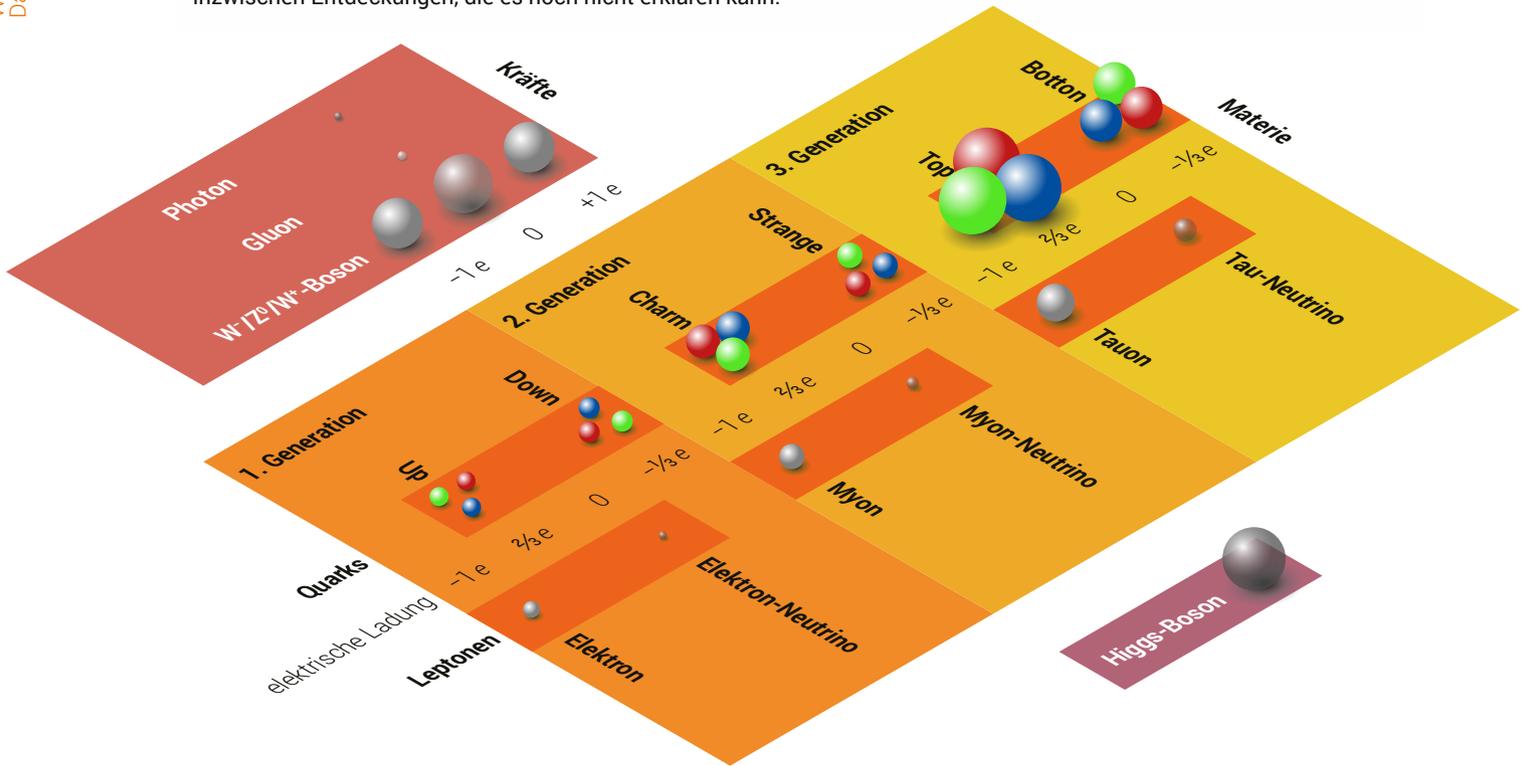
Die Astrophysik hat sich ebenfalls Einheiten gebaut, die sich aus der Natur ihrer Forschungsobjekte ergeben. Sternmassen werden in Vielfachen oder Teilen der Sonnenmasse angegeben, Planetenabstände von ihrem Zentralgestirn in der Astronomischen Einheit, die praktischerweise genau den Abstand Erde–Sonne auf 1 setzt. Für Abstände zwischen Sternen kommt – wie zuvor schon für die Teilchenmassen – die Lichtgeschwindigkeit mit ins Spiel: Dort werden Lichtjahre verwendet, die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Ein anderes Entfernungsmaß ist das Parsec, das mit etwas mehr als 3,26 Lichtjahren die Entfernung angibt, bei der der sichtbare Abstand Erde-Sonne genau eine Winkelbogenminute beträgt. Längen kommen im Maßstab der kosmologischen Entfernungen oft mit den Einheitenvorsätzen Mega oder Giga im Gepäck, also als etwa Megaparsec, kurz Mpc. Keine Astronom:in wird das ohne kurz nachzudenken in Meter umrechnen können, aber weiß trotzdem genau, was gemeint ist.

Trillion	Exa-	10^{18}	1 000 000 000 000 000 000
Billiarde	Peta-	10^{15}	1 000 000 000 000 000
Billion	Tera-	10^{12}	1 000 000 000 000
Milliarde	Giga-	10^9	1 000 000 000
Million	Mega-	10^6	1 000 000
Tausend	Kilo-	10^3	1 000
Tausendstel	Milli	10^{-3}	0,001
Millionstel	Mikro, μ	10^{-6}	0,000 001
Milliardstel	Nano	10^{-9}	0,000 000 001
Billionstel	Piko	10^{-12}	0,000 000 000 001
Billiardstel	Femto	10^{-15}	0,000 000 000 000 001
Trillionstel	Atto	10^{-18}	0,000 000 000 000 000 001



DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Die physikalische Grundlagenforschung der letzten 100 Jahre hat zu einem erstaunlich konsistenten Bild vom Aufbau der Materie und den grundlegenden Kräften geführt. Experimente bestätigen bislang dieses Standardmodell – es gibt aber inzwischen Entdeckungen, die es noch nicht erklären kann.



Quarks und Leptonen sind die fundamentalen Bausteine der Materie. Zwischen ihnen wirken unterschiedliche Kräfte, die über den Austausch von Kraftteilchen übertragen werden. Über die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld erhalten die Fermionen und die W- und Z-Bosonen ihre unterschiedlichen Massen (in der Abbildung durch die Größe der jeweiligen Teilchen dargestellt). Die Neutrinos werden im Standardmodell als masselos betrachtet.

Die uns bekannte Materie besteht aus wenigen winzigen Bausteinen, den **Elementarteilchen**. In den 1960er- und 1970er-Jahren gelang es, eine Theorie zu entwickeln, die die Wechselwirkungen zwischen diesen fundamentalen Bausteinen beschreibt. Durch aufwendige Messungen konnten Forschende dieses Standardmodell (SM) der Teilchenphysik immer genauer überprüfen. Bis heute gibt es keinen eindeutigen experimentellen Befund, der ihm widerspricht. Allerdings sind einige Phänomene, wie z. B. die Gravitation, die Dunkle Materie, die Dunkle Energie oder die im Universum beobachtete Asymmetrie von Materie und Antimaterie im SM nicht berücksichtigt oder mit ihm nicht zu erklären. Ob diese Effekte mit dem SM in einer umfassenderen Theorie vereinigt werden können, wird derzeit erforscht (siehe Seiten 54 und 69).

Symmetrien

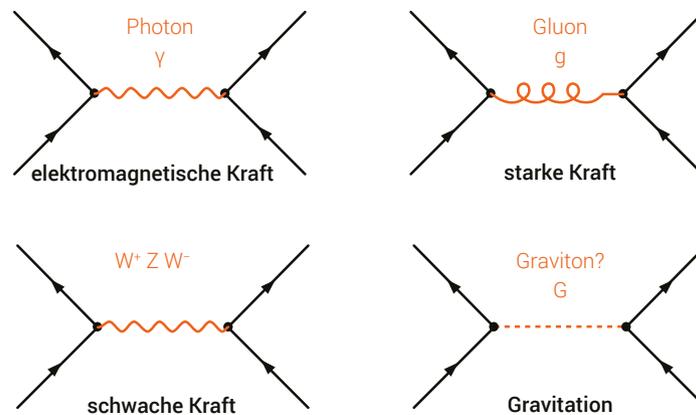
In der Physik spielen Symmetrien, verstanden als Invarianzen unter mathematischen Transformationen, eine wichtige Rolle. Wenn man z. B. einen Kreis durch eine Rotation um einen

beliebigen Winkel dreht, ist der Kreis invariant unter dieser Rotation, er sieht nach der Drehung genauso aus wie zuvor. Das **Noether-Theorem** (benannt nach der Mathematikerin Emmy Noether, 1882–1935) formuliert einen Zusammenhang zwischen physikalischen Erhaltungsgrößen und Symmetrien. Die Invarianz physikalischer Gleichungen bei zeitlicher und räumlicher Verschiebung bzw. Rotation führt dabei zur Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung. Andere Erhaltungssätze, wie die Erhaltung der elektrischen Ladung, hängen mit der **Eichsymmetrie** zusammen, auf die bei der Behandlung der Wechselwirkungen näher eingegangen wird.

Marierteilchen

Die uns bekannte Materie besteht aus zwei verschiedenen Arten von Elementarteilchen, den **Quarks** und den **Leptonen**. Diese Teilchen haben eine Gemeinsamkeit, die auf der Quantenphysik beruht: Die Quantenzahl ihres Eigendrehimpulses (**Spin**) ist $\frac{1}{2}$. Teilchen mit einer halbzahligem Spinquantenzahl ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$ usw.) nennt man **Fermionen**. Insgesamt sind je sechs Quarks und Leptonen bekannt. Zu den Leptonen gehören ne-

In Feynman-Diagrammen lassen sich die grundlegenden Wechselwirkungen zwischen den Quarks und Leptonen durch den Austausch (orange Linien) von Kraftteilchen, den Eichbosonen, grafisch darstellen. Gluonen treten dabei nur mit Quarks oder mit sich selbst in Wechselwirkung. Bisher ist nicht bekannt, ob dieses Austauschprinzip auch für die Gravitation gültig ist und ob das Graviton existiert.



ben den bekannten Elektronen noch die ebenfalls elektrisch geladenen Myonen und Tauonen sowie die zugehörigen elektrisch neutralen Neutrinos, die im SM als masselos betrachtet werden.

Die Quarks haben allesamt eine elektrische Ladung, die entweder genau $\frac{2}{3}$ oder $-\frac{1}{3}$ der Elementarladung e (dem Betrag der Ladung des Elektrons) beträgt. Sie werden im SM anhand ihrer Masse zu Paaren angeordnet. Am leichtesten sind die Up- und Down-Quarks, dann kommen die Charm- und Strange-Quarks. Am schwersten schließlich sind die Top- und Bottom-Quarks. Man spricht auch von den drei Generationen von Quarks. Ähnlich werden auch die Leptonen in zugehörigen Generationen zusammengefasst.

Die Massenunterschiede zwischen den Generationen sind enorm. So ist das Top-Quark etwa 80 000-mal so massereich wie das Up-Quark. Auch bei den Leptonen gibt es starke Unterschiede: Die Masse des Tau-Leptons übersteigt die des Elektrons um das 3500-fache. Die uns vertraute stabile Materie aus Atomen besteht nur aus Teilchen der jeweils ersten Quark- und Lepton-Generation, den Up- und Down-Quarks und dem Elektron. Alle anderen elektrisch geladenen Quarks und Leptonen sind instabil.

Wechselwirkungen

Die Wechselwirkungen zwischen den Materiebausteinen (Fermionen) sind im SM auf den Austausch von Kraftteilchen zurückzuführen. Im Gegensatz zu den Fermionen haben die Kraftteilchen die Spinquantenzahl 1 und gehören mit dieser Eigenschaft zu den Bosonen (Teilchen mit ganzzahliger Spinquantenzahl). Üblicherweise bezeichnet man die Kraftteilchen als Eichbosonen oder Vektorbosonen.

Das Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Photon. Es kann mit allen elektrisch geladenen Teilchen in Wechselwirkung treten. Das SM kennt neben der elektrischen noch zwei weitere Arten von Ladung: die schwache und die starke Ladung und entsprechend die schwache und die starke Wechselwirkung.

Letztere wird durch masselose Gluonen vermittelt, die mit allen Teilchen mit starker Ladung interagieren. Nur Quarks tragen diese starke Ladung – und die Gluonen selbst. In einem Proton kommen drei Zustände dieser Ladung vor, die in ihrer

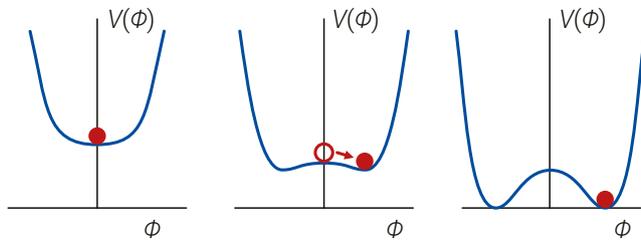
Summe ladungsneutral sind. Dieses Mischungsverhalten der Ladungen der starken Wechselwirkung entspricht genau dem Farbmischverhalten aus den Grundfarben Rot, Grün und Blau, weshalb sie sich als Farbladung intuitiv darstellen lassen. Wie bei den Grundfarben ergibt die Überlagerung eines roten, grünen und blauen Quarks einen neutralen Zustand: Weiß in der Optik, neutrale Farbladung beim Proton. In Experimenten lassen sich nur solche farbneutralen Bindungszustände von Quarks wie das Proton oder das Neutron beobachten, aber freie – und somit farbige – Quarks nicht.

Die Vermittler der schwachen Wechselwirkung sind die W- und Z-Bosonen, die etwa hundertmal massereicher sind als ein Proton. Aufgrund ihrer großen Masse ist die Reichweite dieser Bosonen sehr kurz. Dies ist der Grund für die geringe Stärke der schwachen Wechselwirkung bei Energien, die kleiner als die W- und Z-Massen sind, wie etwa beim radioaktiven Betazerfall von Atomkernen.

Der bereits bei den Symmetrien erwähnte Zusammenhang zwischen Wechselwirkung und Eichsymmetrie lässt sich anschaulich am Beispiel einer Verkehrsampel erläutern. Unter globaler Eichsymmetrie versteht man, dass sich Messgrößen wie die Zahl der Verkehrsunfälle nicht ändern, wenn man global (überall) die internationale Ampelkonvention (Eichung) ändert und ab sofort bei Grün angehalten und bei Gelb losgefahren werden soll. Abgesehen von physiologischen Unterschieden in der Farbwahrnehmung und Gewöhnungseffekten sollte diese Symmetrie erfüllt sein, d. h. gegenüber dieser globalen Transformation bleibt die Anzahl der Verkehrsunfälle invariant. Nun könnte man fordern, dass es auch eine lokale Eichsymmetrie geben soll; das würde bedeuten, dass die Anzahl der Unfälle gleich bleiben soll, wenn sich die Eichung lokal (von Ampel zu Ampel) ändert. Dies ist nur möglich, wenn es eine Wechselwirkung zwischen Ampel und Autofahrern gibt, die die Änderung der lokalen Eichung mitteilt, etwa durch ein Hinweisschild an jeder Ampel. Die lokale Eichsymmetrie erzwingt also eine Wechselwirkung und definiert gleichzeitig eindeutig deren Eigenschaften.

Der Higgs-Mechanismus

Die lokale Eichsymmetrie verlangt, dass alle Teilchen masselos sein müssen, was in klarem Widerspruch zur Beobachtung steht. Eine Lösung bietet der Higgs-Mechanismus. Hierbei tritt ein zusätzliches Bosonenfeld mit Spinquantenzahl 0



Potenzial V in Abhängigkeit von der Feldstärke Φ des Higgs-Felds (zur Illustration des Higgs-Mechanismus wurde hier die Darstellung in nur einer Dimension gewählt). Die Form des Potenzials ändert sich z. B. mit sinkender Temperatur T von links nach rechts. Vermutlich war das Potenzial $V(\Phi)$ des Higgs-Felds kurz nach dem Urknall symmetrisch mit einem Minimum des Felds (roter Punkt) bei $\Phi = 0$ (links). Innerhalb einer Milliardstel Sekunde sank die Temperatur und es kam zu einer Symmetriebrechung (Mitte), sodass es – in dieser vereinfachten Darstellung – zur Ausbildung zweier äquivalenter Minima des Higgs-Felds kommt, welche beide bei $\Phi \neq 0$ liegen (rechts). Welches der beiden Minima nun ausgewählt wird, ist zufällig, jedoch wird die Symmetrie um $\Phi = 0$ gebrochen.

zum SM hinzu. Man kann sich dieses sogenannte **Higgs-Feld** analog zum elektrischen Feld oder Gravitationsfeld als etwas vorstellen, das den ganzen Raum des Universums durchdringt. Es zeigt sich nun, dass die ursprünglich masselosen Eichbosonen, Quarks und Leptonen erst durch die Wechselwirkung mit dem energiereichen Higgs-Feld massiv werden. Die Masse eines elementaren Teilchens ist in diesem Modell gewissermaßen die Wechselwirkungsenergie mit dem Higgs-Feld! Das erklärt zwar den Mechanismus der Massenerzeugung, aber die genauen Massenwerte der Quarks und Leptonen lassen sich nicht vorhersagen. Ein wichtiges Forschungsgebiet ist daher die **Flavourphysik** (siehe „Teilchen mit Geschmack“ auf Seite 47), deren Ergebnisse in Zukunft vielleicht bessere Einblicke in den genauen Mechanismus der Massenerzeugung gewähren werden. Der Higgs-Mechanismus verleiht den elementaren Materieteilchen (Leptonen, Quarks) ihre Masse. Gebundene Teilchenzustände (Hadronen), die aus Quarks zusammengesetzt sind (z. B. Protonen und Neutronen) erhalten zusätzlich einen Massenbeitrag über die Gluonbindungsenergie. Dieser ist für Protonen und Neutronen wesentlich größer als der Beitrag der Quarkmassen (siehe auch Seiten 48 und 50).

Die Entdeckung des **Higgs-Teilchens** im Jahr 2012 von den ATLAS- und CMS-Experimenten am Large Hadron Collider (LHC) des CERN krönte den Erfolg des SM. Ein Jahr nach dem experimentellen Nachweis erhielten François Englert und Peter Higgs den Nobelpreis für Physik für den Vorschlag des Higgs-Mechanismus. Genauere Messungen am LHC in den darauffolgenden Jahren bestätigten, dass das neue Teilchen genau die vom SM vorhergesagten Eigenschaften hat.

Der Higgs-Mechanismus könnte auch erklären, warum Neutrinos eine Masse haben. Dass sie eine Masse haben, und nicht masselos sind, wie das SM ursprünglich annahm, ist mittlerweile experimentell bewiesen: In den 1990er-Jahren wurde beobachtet, dass sich ein Neutrino einer Generation in ein Neutrino einer anderen Generation umwandeln kann

(Neutrinooszillation). Dies ist nur möglich, wenn die Neutrinos massiv sind, was man mit dem Higgs-Feld erklären könnte. Da Neutrinos elektrisch neutral sind, wäre aber ebenso ein Modell denkbar, in dem Neutrinos **Majorana-Teilchen** (ihre eigenen Antiteilchen) sind. Diese Frage wird sehr intensiv in speziellen Experimenten untersucht (siehe auch Seiten 45 und 48).

Ausblick

Das SM der Teilchenphysik ist äußerst erfolgreich. Viele experimentelle Tests bestätigen diese Theorie mit beeindruckender Präzision. In den kommenden Jahren werden viele noch genauere Messungen möglich sein. Bisher beruhen die Ergebnisse der LHC-Experimente auf nur fünf Prozent der langfristig angestrebten Datenmenge! Die kommenden 15 Jahre in der Phase höchster Intensität des LHC werden vollkommen neue Möglichkeiten eröffnen, das SM mit hoher Präzision zu testen. Ein Schwerpunkt wird auf dem Higgs-Sektor liegen, da dieser der am wenigsten getestete Teil des SM ist. Eine präzise Vermessung der Eigenschaften des Higgs-Bosons könnte Hinweise auf neue Physik jenseits des SM liefern. Ein konkretes Ziel ist die Vermessung der bisher nicht nachgewiesenen Selbstwechselwirkung von drei Higgs-Bosonen. Die ist ein wichtiger Aspekt zum Verständnis des frühen Universums. Möglicherweise lässt sich mit einem verbesserten Verständnis des Higgs-Mechanismus und der sogenannten Flavourphysik, die sich mit den Quarkmassen und Wechselwirkungen der Quarks beschäftigt, die Anzahl der freien Parameter der Theorie eingrenzen.

Aus astrophysikalischen Messungen ist bekannt, dass die der Materie aus Leptonen und Hadronen zugeordnete Energie nur etwa fünf Prozent des Energieinhalts des Universums darstellen. Der Rest wird der Dunklen Materie und Dunklen Energie zugeschrieben. Zur Erklärung dieser beiden Phänomene gibt es im SM keine geeigneten Kandidaten (Seite 67). Bisher ist unklar, ob beide Energiebeiträge durch bisher unentdeckte Teilchen oder Felder erklärt werden können. Falls ja, müsste das SM um diese Beiträge ergänzt werden. Darüber hinaus sind fundamentale Prozesse bisher unverstanden, die zur Ausbildung unseres Universums beitragen und verhindert haben, dass im frühen Universum die ganze Materie zerstrahlt ist. Es gibt viele experimentelle und theoretische Forschungsaktivitäten, um diese Fragen zu klären. Das Higgs-Boson könnte das einzige Teilchen im SM sein, das mit der Dunklen Materie und der Dunklen Energie Wechselwirkungen zeigt. Am LHC stünde damit ein Tor zum „Dunklen Sektor“ offen, das es zu nutzen gilt.

Beim Ziel, jenseits des SM eine verbesserte Theorie zu finden, werden zwei unterschiedliche Wege beschritten. Einerseits sucht man nach neuen Symmetrien und Konzepten, um in einem großen Wurf eine „Theorie von Allem“ zu formulieren. Bekannte Beispiele dieser Forschung sind die Große Vereinheitlichung, die Supersymmetrie und die Superstring-Theorie (siehe Seite 53). Andererseits werden mögliche Abweichungen vom SM mit sogenannten effektiven Theorien parametrisiert. Dies könnte mithilfe von Präzisionsmessungen und the-

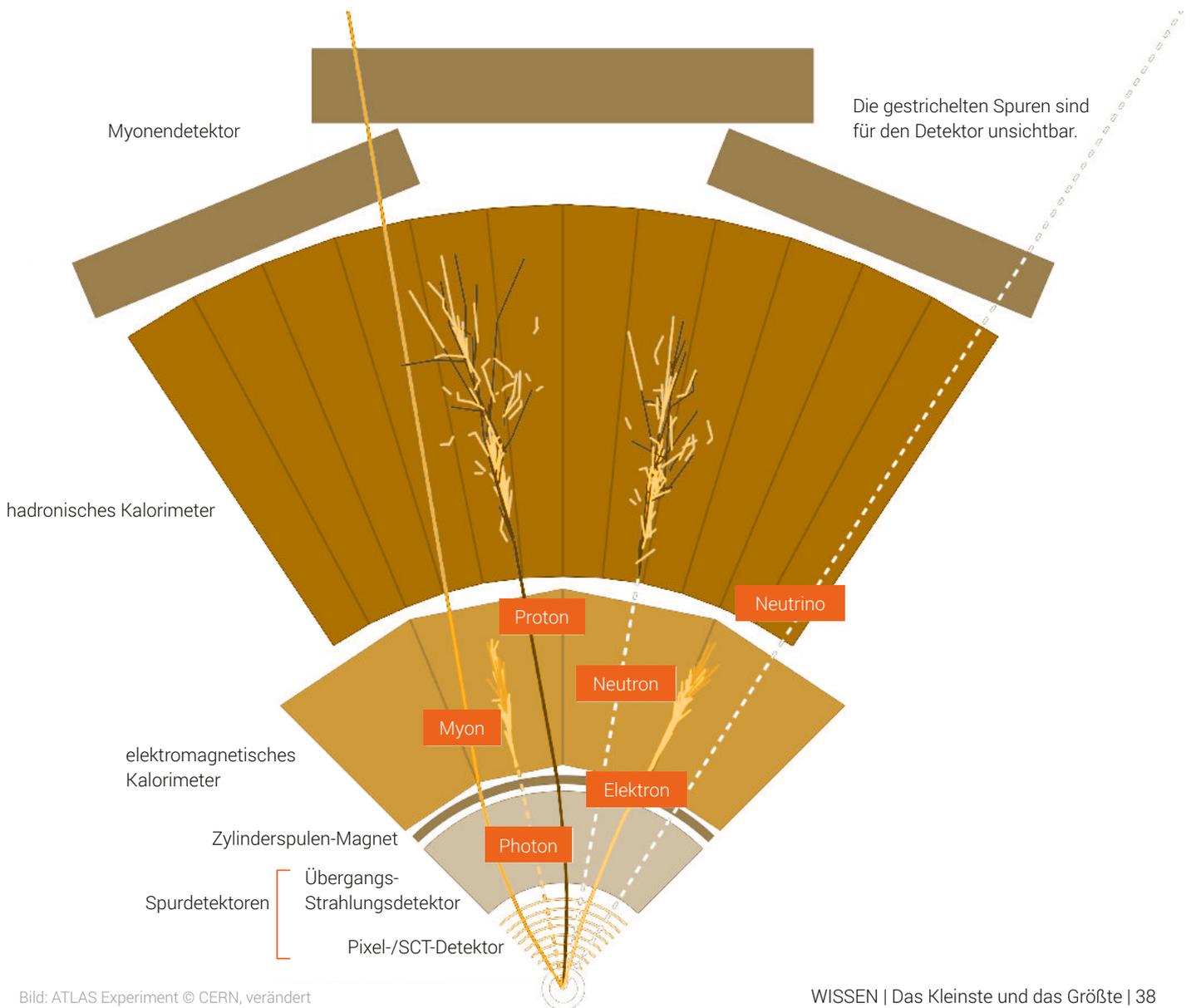
oretischen Berechnungen Hinweise auf eine neue Physik liefern.

Gleichzeitig mit der experimentellen Bestätigung des SM der Teilchenphysik entwickelte sich auch das SM der Kosmologie. Mit immer genaueren Messungen wurde das sogenannte Lambda-CDM-Modell vielfach bestätigt. Dabei steht Lambda für die kosmologische Konstante und CDM für kalte Dunkle Materie (engl. „cold dark matter“). Da bisher keine kosmologischen Messgrößen für die Entwicklung des Universums vor der Entstehung der Atomkerne ca. drei Minuten nach dem Urknall experimentell zugänglich sind, werden die Vorgänge in Sekundenbruchteilen nach dem Urknall aus dem SM der Teilchenphysik abgeleitet. In Zukunft könnte es gelingen, mithilfe von Gravitationswellen einen direkten experimentellen Zugang zu Prozessen kurz nach dem Urknall zu erhalten. Damit würden sich Kosmologie und Teilchenphysik

noch stärker als bisher gegenseitig befruchten, und das frühe Universum könnte zum Labor der Teilchenphysik in einem Energiebereich werden, der mit bisherigen Beschleunigern nicht zugänglich ist.

*Peter Braun-Munzinger, Herbert Dreiner,
Gregor Herten und Stephan Paul*

Experimenteller Nachweis und Klassifikation der Teilchen des SM am Beispiel des ATLAS-Detektors: Im Wesentlichen benötigt man einen Spurdetektor (Tracker), ein elektromagnetisches und hadronisches Kalorimeter und einen äußeren Myondetektor. Elektrisch neutrale Teilchen (Photon, Neutron, Neutrino) hinterlassen im Spurdetektor kein Signal. Elektronen und Photonen werden nahezu vollständig im elektromagnetischen Kalorimeter absorbiert, während Hadronen (wie etwa Protonen und Neutronen) einen Großteil ihrer Energie im hadronischen Kalorimeter deponieren. Myonen verlieren im Detektor nur wenig Energie und können daher als einzige Teilchen auch ein Signal im Myondetektor hinterlassen. Neutrinos fliegen ohne Wechselwirkung durch den gesamten ATLAS-Detektor. Weitere Details zu den verschiedenen Detekortechnologien finden sich im Artikel „Auf der Spur der Elementarteilchen“ auf Seite 39.



AUF DER SPUR DER ELEMENTARTEILCHEN

Indem man hochenergetische Teilchen auf Kollisionskurs schickt, lässt man an Teilchenbeschleunigern all die Elementarteilchen entstehen, aus denen die Materie aufgebaut ist – manche existieren dabei nur für winzige Sekundenbruchteile. Diese Bausteine des Universums lassen sich mit komplexen Messanordnungen, den Detektoren, nachweisen und analysieren. Beschleuniger und Detektoren werden dabei immer leistungsfähiger.

Durch energiereiche Zusammenstöße können zusammengesetzte Teilchen wie Protonen in ihre elementaren Bestandteile zerlegt werden. Wenn die Energie einer Kollision groß genug ist, kann sie auch zur Erzeugung von Materie in Form von neuen Elementarteilchen umgewandelt werden. Die direkten Reaktionsprodukte zerfallen jedoch in der Regel extrem schnell in leichtere Teilchen, die vom Entstehungsort wie Glassplitter bei einem Verkehrsunfall wegfliegen. Diese Bruchstücke gilt es in Teilchendetektoren nachzuweisen, um die ursprüngliche Reaktion zu rekonstruieren. In einem typischen Experimentaufbau der Teilchenphysik kommen daher viele verschiedenartige Detektortypen gleichzeitig zum Einsatz, mit denen die Zerfallsprodukte einer Teilchenreaktion nachgewiesen werden können. Daraus lassen sich komplexere physikalische Messgrößen ableiten, beispielsweise, in welche Teilchen genau die Ursprungsteilchen wie häufig und unter welchen Bedingungen zerfallen oder wie schwer die Teilchen sind.

Mit vielen Detektoren auf der Suche

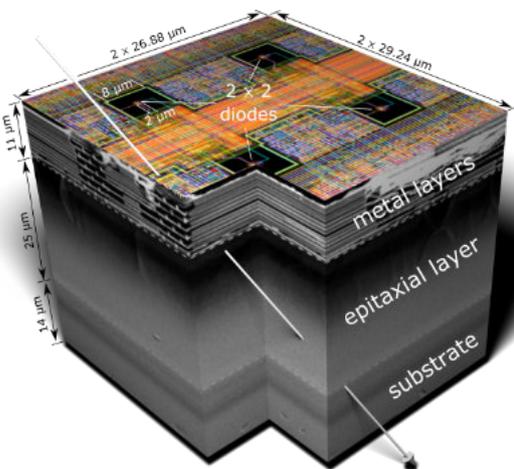
Die Bahnen von elektrisch geladenen Teilchen werden mit **Spurdetektoren** gemessen. Weil die Detektoren in ein Magnetfeld eingebettet sind, ergeben sich aus der Bahnkrümmung die elektrische Ladung und der Impuls dieser Teilchen. Durch Zurückverfolgen ihrer Bahnen kann ggf. ein gemeinsamer Ursprungsort (Vertex) festgestellt werden. Im Maßstab der Elementarteilchen eher langlebige Kollisionsprodukte wie das Bottom-Quark zerfallen beispielsweise erst nach weni-

gen Piko-(Billionstel-)Sekunden und können so über ihre Tochterteilchen direkt nachgewiesen werden. Die Geschwindigkeit von geladenen Teilchen kann über ihre Flugzeit zwischen zwei Detektorebenen, über den Energieverlust in Materie oder über die Emission von elektromagnetischer Strahlung (etwa als Tscherenkowstrahlung) gemessen werden. Photonen und Elektronen werden in elektromagnetischen Kalorimetern vollständig absorbiert, woraus sich ihre Energie bestimmen lässt. Die Energie von Hadronen – wie Protonen und Neutronen – hingegen wird in hadronischen **Kalorimetern**, äußerst massiven Anordnungen aus Absorber- und Detektormaterial, bestimmt. Energiereiche Myonen durchdringen selbst diese Detektoren und werden in dahinter liegenden Spurdetektoren nachgewiesen.

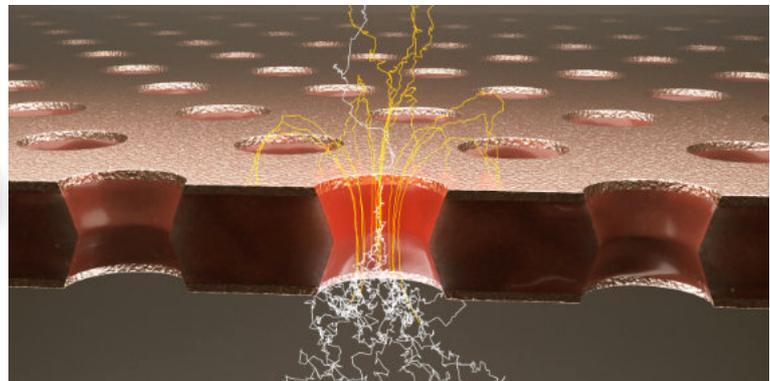
Als Detektormaterialien kommen Festkörper, Gase oder Flüssigkeiten zum Einsatz. Durch die Wechselwirkung der Teilchen mit dem Detektormaterial wird kurzfristig direkt oder indirekt (z. B. über die Emission von Licht) elektrische Ladung freigesetzt. Dies induziert elektrische Signale, aus denen durch hochintegrierte Verstärker- und Digitalisierungselektronik Informationen zu Zeit, Amplitude und – bei entsprechender Strukturierung des Detektionsvolumens – Ort der Detektion gewonnen werden. Komplexe Detektionssysteme setzen sich aus vielen einzelnen Komponenten zusammen, die häufig speziell für diese Anwendung entwickelt wurden. Bei der Integration dieser Komponenten muss die Infrastruktur zur

weiter auf Seite 42

Monolithische aktive Pixeldetektoren kombinieren Sensor und Elektronik im selben dünnen Siliziumchip.



Struktur eines Gas-Elektronen-Vervielfachers (GEM), einer Detektor-Mikrostruktur, in der Ladungen verstärkt werden; die Löcherstruktur ist nur 50 Tausendstel Millimeter dick.



◀ Einbau eines Spurdetektorsystems in das ATLAS-Experiment am Teilchenbeschleuniger LHC, CERN

Der LHC befindet sich unterirdisch in der Nähe von Genf. Die vier großen Detektoren ATLAS, CMS, ALICE und LHCb sind entlang des Rings verteilt.

DER LARGE HADRON COLLIDER (LHC)

ist der weltweit größte und leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger. Er ist Teil des Europäischen Forschungszentrums CERN bei Genf und ging 2008 in Betrieb. In einem 27 Kilometer langen unterirdischen Ring erreichen Protonen fast Lichtgeschwindigkeit. An vier Kreuzungspunkten treffen die Protonenpakete in gegenläufigen Strahlen aufeinander. Dabei hat jedes Proton eine Energie von 7 TeV (Tera-Elektronenvolt); dies entspricht einer 7500-fachen Energie im Vergleich zur Protonenmasse. In einem weiteren Betriebsmodus werden Pakete von Bleikernen auf hohe Energie (ca. 285 TeV) beschleunigt und aufeinandergeschossen. Die ebenfalls unterirdisch installierten Detektoren ALICE, ATLAS, CMS und LHCb registrieren die Teilchenreaktionen elektronisch und werten sie aus.

Um die (fast) lichtschnellen Protonen auf ihrer Kreisbahn zu halten, braucht es 1232 Ablenkmagnete. Dabei handelt es sich um supraleitende Elektromagnete, die bei einer Temperatur von 1,9 Kelvin ($-271\text{ }^{\circ}\text{C}$) den elektrischen Strom widerstandslos leiten und somit sehr starke Magnetfelder von 8,36 Tesla erzeugen. Zum Vergleich: Das Erdmagnetfeld hat am Äquator eine Stärke von etwa 0,00003 Tesla. Der Bau des LHC und der Experimente war nur durch viele in-

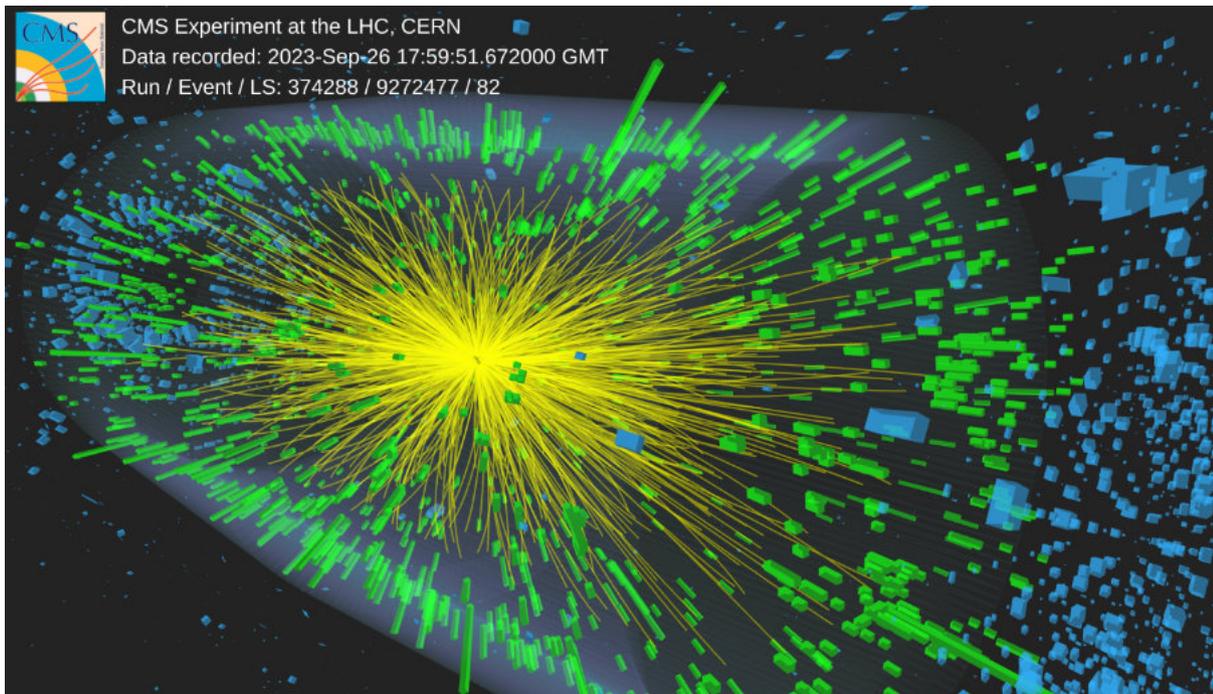


novative Technologien möglich, die mittlerweile auch außerhalb der Teilchenphysik Anwendung finden – unter anderem in der Medizin. Mehr als 10 000 Wissenschaftler:innen aus ungefähr 500 akademischen Instituten weltweit tragen zum LHC-Projekt bei.

Jeder Protonenstrahl besteht aus fast 3000 Paketen mit je 100 Milliarden Protonen. Die Teilchen sind allerdings so klein, dass es bei jedem Aufeinandertreffen der Pakete nur zu etwa 40 Kollisionen kommt. Da sich aber 40 Millionen Mal pro Sekunde Teilchenpakete treffen, ereignen sich im LHC mehr als eine Milliarde Kollisionen pro Sekunde! Die Analyse der dabei entstehenden riesigen Datenmengen geschieht mithilfe des LHC-Computing-Grids, einem weltweiten Computernetzwerk, in dem Zehntausende Rechner miteinander verbunden sind.

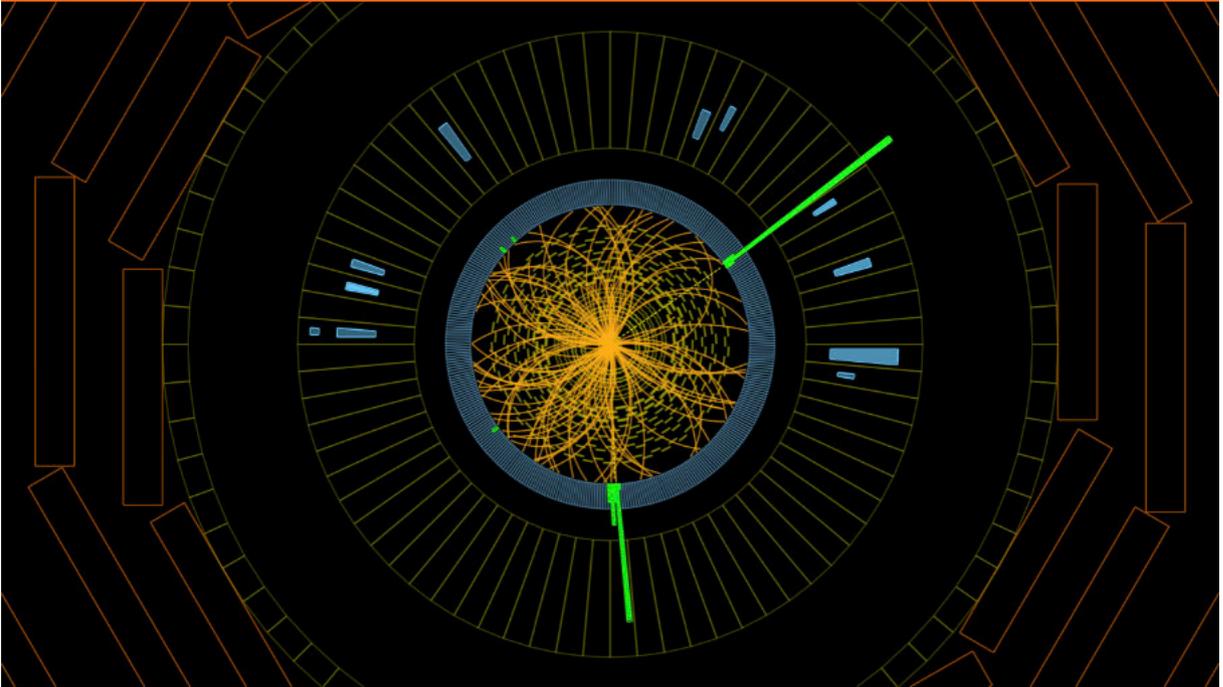
Gregor Hertel

Rekonstruierte Spuren geladener Teilchen im Inneren (gelbe Linien) sowie Energieeinträge im äußeren Raum (grüne und blaue Boxen) des CMS-Experiments am Teilchenbeschleuniger LHC.



DIE ENTDECKUNG DES HIGGS-BOSONS

Am 4. Juli 2012 verkündeten die ATLAS- und die CMS-Kollaborationen am LHC gemeinsam die Entdeckung eines neuen Teilchens mit den Eigenschaften des lange gesuchten Higgs-Bosons (siehe auch „Das Standardmodell der Teilchenphysik“ auf Seite 35). Die Suche nach diesem Teilchen war zuvor jahrzehntelang erfolglos geblieben. Erst der 2008 in Betrieb genommene LHC lieferte die erforderliche Energie und Intensität und die beiden Großexperimente ATLAS und CMS die nötige Messgenauigkeit, um dieses seltene Teilchen zu identifizieren.



Ereignisbild einer Proton-Proton-Kollision im CMS-Detektor mit zwei registrierten hochenergetischen Photonen (lange grüne Linien). Bei einem einzelnen solchen Ereignis könnte es sich um den Zerfall eines Higgs-Bosons in zwei Photonen oder um ein zufälliges Untergründereignis handeln. Ein signifikantes Signal des Higgs-Bosons kann nur durch eine statistische Analyse vieler ähnlicher Ereignisse erreicht werden.

Das Higgs-Teilchen taucht dabei nicht direkt in den Detektoren auf, sondern vielmehr seine Zerfallsprodukte. Die beiden Experimente konzentrierten sich auf zwei vorhergesagte Zerfälle des Higgs, die zwar äußerst selten sind (weniger als 1%), deren Zerfallsprodukte sich aber gut nachweisen lassen: Zum einen der Zerfall in zwei Photonen ($H \rightarrow \gamma\gamma$), zum anderen der Zerfall in zwei Leptonenpaare ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ Leptonen}$).

Die statistische Analyse zeigte, dass das Signal die Nachweisschwelle für eine Entdeckung überschreitet. Genauere Messungen in den folgenden Jahren bestätigten eindrucksvoll, dass das neue Teilchen einen Spin von 0 hat und genau die erwarteten Kopplungseigenschaften des Higgs-Bosons im SM besitzt.

Ein Jahr nach der Entdeckung des Higgs-Bosons am LHC erhielten François Englert und Peter Higgs den Nobelpreis für Physik für die „theoretische Entdeckung eines Mechanismus, der zu unserem Verständnis des Ursprungs der Masse subatomarer Teilchen beiträgt.“

Gregor Herten

Stromversorgung, Datenauslese und Kühlung auf möglichst leichten Trägerstrukturen mechanisch kompakt und stabil untergebracht werden.

Mikrometeregenaue Präzisionsmessungen – wie solche zur Spur- und Vertexmessung – erfordern entsprechend kleine Detektorzellen und sehr dünne Detektoren über große Flächen. Dadurch wird eine unerwünschte Teilchenstreuung oder die Bildung von Sekundärteilchen minimiert. Monolithische aktive **Pixeldetektoren** integrieren die Sensorik und Elektronik in den gleichen, mit modernsten Halbleiterprozessen hergestellten Chips, in Pixel von nur wenigen zehn Mikrometern Kantenlänge. Diese Sensorchips lassen sich auf nur wenige zehn Mikrometer Dicke reduzieren und sind dadurch flexibel wie eine Folie.

Auch **gasgefüllte Detektoren** nutzen die winzige elektrische Ladung, die beim Durchgang von ionisierender Strahlung erzeugt wird, zum Nachweis von Teilchen. Um ein elektronisch nachweisbares Signal zu erzeugen, wird das elektrische Signal durch Lawinenbildung von immer weiteren Elektronen in hohen elektrischen Feldern verstärkt. Gasgefüllte Detektoren können sehr große Volumina abdecken, ohne dass dafür viel Material benötigt würde. Fotolithografische Technologien erlauben es heutzutage, Verstärkungs- und Auslesestrukturen herzustellen, die nur wenige Mikrometer groß sind. Mit mikrostrukturierten Gasdetektoren lassen sich sehr hohe Teilchenraten hochgenau verarbeiten.

Aufwendige Datenauswertung und lange Experimentierdauer

Moderne Verfahren zur Datenauslese und Datenverarbeitung ermöglichen Experimente mit extrem hohen Datenraten. Detektorsysteme etwa, die für die nächste Ausbaustufe des Large Hadron Colliders (LHC) entwickelt werden, sollen bis zu zehn Billionen (10^{13}) Teilchenspuren pro Sekunde vermessen! Diese stammen aus Hunderten sich überlagernder Kollisionen. Klassische Verfahren lesen die Detektordaten dann vollständig aus, wenn ein schneller Prozessor ein Kollisionsereignis als „interessant“ erkennt (Trigger). Neuere Methoden wenden stattdessen Data Streaming an. Dabei senden die Detektoren kontinuierlich die Daten von Teilchentreffern an einen Computer-Cluster. Dies ist ein Hochleistungscomputersystem, das Teilchenspuren, Teilchenmassen, Zerfallstopologien und somit die zugrunde liegenden physikalischen Wechselwirkungsprozesse sehr schnell erfassen kann. Spezialisierte Rechner mit programmierbaren integrierten Schaltungen, Grafikkartensysteme, massiv parallel arbeiten-

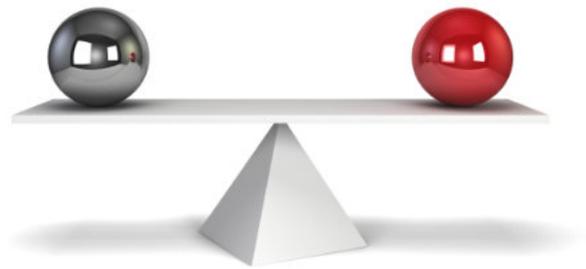
de Algorithmen sowie Methoden der künstlichen Intelligenz kommen dabei zum Einsatz.

Die Forschungsarbeiten erfolgen in Zusammenschlüssen von Gruppen an Universitäten und Forschungszentren mit internationaler Ausrichtung. Die Teilnehmenden planen, konstruieren und stellen Komponenten eines Experimentes bereit, das sie dann über Jahre hinweg an einem Beschleuniger betreiben. Die Entwicklung und der Bau der Detektoren erfordert Fachwissen, das in langjähriger Arbeit an speziell eingerichteten Detektorlaboren oder Werkstätten aufgebaut wird. Von der Konzeption des Forschungsziels bis zum Experimentierbetrieb können viele Jahre vergehen. Da es sich bei den untersuchten Prozessen um statistische quantenphysikalische Ereignisse handelt, dauern Messkampagnen in der Regel ebenfalls mehrere Jahre, denn erst mit genügend ähnlichen Daten aus vielen Teilchenkollisionen lässt sich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit sagen, ob es sich bei einer Messung mit neuem Inhalt tatsächlich um eine Entdeckung oder nur eine statistische Fluktuation handelt. Oft werden die Experimentieranlagen nach einer Anfangsphase erweitert oder modernisiert, wie der LHC, der zum Jahr 2028 zum **High-Luminosity-LHC** ausgebaut wird, da sich sowohl die technischen Möglichkeiten für Detektoren und Datenverarbeitung als auch der wissenschaftliche Kenntnisstand weiterentwickeln.

Experimente der Astroteilchenphysik nutzen prinzipiell ähnliche Technologien, aber in anderer Zusammensetzung. Ihre Signalquellen sind die natürliche Strahlung aus dem All – und die ist teils noch energiereicher als das, was mit Teilchenbeschleunigern machbar ist. Gammastrahlungsausbrüche und Supernovaexplosionen beschleunigen einzelne Teilchen auf Energien weit über dem, was irdische Beschleuniger erreichen können. Für den Nachweis hochenergetischer Strahlung werden auch die Erdatmosphäre, das Ozeanwasser oder das Eis in der Antarktis genutzt. Als Signal wird häufig durch die Teilchen erzeugtes Licht nachgewiesen, die Tscherenkowstrahlung. Für die Suche nach seltenen Ereignissen, wie z. B. den Nachweis von Neutrinos oder Dunkler Materie, kommen spezielle Aufbauten aus flüssigen Szintillatoren, hochreinem Wasser, verflüssigten Edelgasen oder hochempfindlichen Quantensensoren zum Einsatz. Sie sind häufig in tiefen Untergrundlaboratorien angesiedelt, um den Hintergrund aus kosmischer Strahlung und natürlicher Radioaktivität zu minimieren.

Johann M. Heuser und Bernhard Ketzer

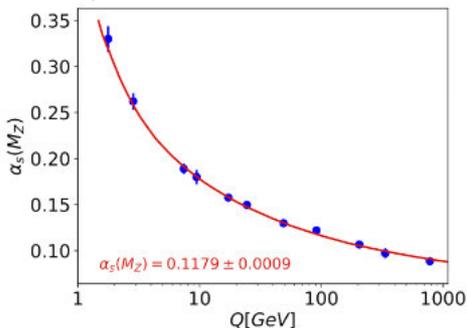
PRÄZISIONSTESTS DES STANDARDMODELLS



Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschreibt drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen: die starke und die schwache Wechselwirkung sowie die elektromagnetische Wechselwirkung. Die letzten beiden werden manchmal als elektroschwache Wechselwirkung zusammengefasst. Ob diese drei Kräfte die Welt der kleinsten Teilchen vollständig beschreiben, untersucht die Elementarteilchenphysik.

Die starke Wechselwirkung wird durch die Austauschteilchen der starken Kraft, die Gluonen, vermittelt: Sie tragen im Gegensatz zu Photonen eine Ladung, die **Farbladung**, und können an andere Teilchen mit Farbladung koppeln. Das sind eben nicht nur die Quarks, zwischen denen sie eigentlich die Wechselwirkung vermitteln, sondern auch andere Gluonen.

Dies hat wichtige Konsequenzen. Bei niedrigen Energien ist die starke Wechselwirkung so groß, dass unter normalen Bedingungen keine freien Quarks und Gluonen existieren können; es kommt zum sogenannten Confinement. Umgekehrt gilt: Bei hohen Energien sinkt die Kopplungsstärke. Quarks und Gluonen verhalten sich dann wie nahezu freie Teilchen. Dieses Phänomen bezeichnet man als **asymptotische Freiheit**. In diesen Fällen ist es möglich, mit den Methoden der Störungstheorie sehr genaue Berechnungen der **Quantenchromodynamik** (QCD, also der Quantentheorie der Farbladungen) durchzuführen, die sich experimentell überprüfen lassen – zum Beispiel an Teilchenbeschleunigern.



Ein wichtiger experimenteller Test der QCD ist die genaue Messungen von der Kopplungsstärke α_s bei verschiedenen Energien Q . Die Übereinstimmung der Daten mit der theoretischen Vorhersage (Linie) für $\alpha_s(M_Z) = 0,1179 \pm 0,0009$ ist eine Bestätigung für die asymptotische Freiheit in der QCD.

und in entgegengesetzter Richtung auseinander fliegen, so steigt der Theorie zufolge die starke Wechselwirkung mit deren Abstand immer weiter an. Irgendwann ist die Energie so groß, dass aus dieser Energie ein neues Quark-Antiquark-Paar gebildet wird. Auf diese Weise entstehen neue Hadronen, deren Flugrichtung mit der des ursprünglichen Quarks übereinstimmt – und diese detektiert man. Da es meist mehrere Hadronen mit leicht unterschiedlichen Richtungen sind, spricht man bei diesen Hadronenbündeln von sogenannten „Jets“. Deren Form, Winkelverteilung und Häufigkeit geben

dann Aufschluss über die Kopplungsstärke, also darüber, wie stark die Quarks und Gluonen miteinander wechselwirken.

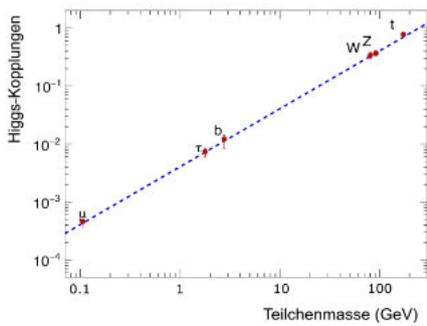
Solche Hadronenjets wurden in vielen Experimenten an verschiedenen Beschleunigern mit hoher Genauigkeit untersucht: Darunter waren die Beschleuniger PETRA und HERA am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg, der Beschleuniger LEP am Forschungszentrum CERN sowie dort auch am Large Hadron Collider (LHC) und am amerikanischen Beschleuniger Tevatron in Illinois (USA). Die Experimente bestätigten die Vorhersagen der Quantenchromodynamik zur starken Wechselwirkung: Innerhalb der Messgenauigkeit entsprachen die Vorhersagen der Theorie den Messergebnissen.

Theorie und experimentelle Überprüfung der schwachen Wechselwirkung

Die schwache Wechselwirkung ist, wie der Name bereits verrät, um einige Größenordnungen schwächer als die starke, aber auch als die elektromagnetische Wechselwirkung. Sie spielt zum Beispiel beim radioaktiven Betazerfall eine Rolle oder bei der Streuung von Neutrinos. In den 1960er-Jahren hatten Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung in einer einheitlichen Theorie, die nach ihnen benannt ist, zusammengefasst. Einige Aspekte dieser Theorie wurden bereits Anfang der 1970er-Jahre durch Experimente am CERN bestätigt.

Um aus dieser Theorie experimentell überprüfbare Vorhersagen abzuleiten, benötigt man vier Basisparameter, die experimentell bestimmt werden müssen, und mit denen alle weiteren Messgrößen berechnet werden können: die Kopplungskonstante der elektromagnetischen Wechselwirkung, die Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung, die Masse des Z-Austauschteilchens der schwachen Wechselwirkung und die des Higgs-Bosons. Die Kopplungskonstanten geben an, wie stark die Wechselwirkung ist, also etwa welche Kraft ein Elektron auf ein anderes ausübt. Die Kopplungskonstante der schwachen Wechselwirkung lässt sich aus dem Zerfall von Myonen bestimmen – Elementarteilchen, die Elektronen sehr ähnlich, aber deutlich schwerer sind und die dieser Art von Wechselwirkung unterliegen.

Für die Tests der elektroschwachen Theorie verwendet man diese vier Basisgrößen und vergleicht Messungen mit verschiedenen Teilchen im Eingangs- und Ausgangszustand.



Kopplungsstärke des Higgs-Bosons an Fermionen und Bosonen (gemessen von den ATLAS- und CMS-Experimenten). Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Erwartung im SM.

Die vier Experimente am LEP haben z. B. gemessen, wie oft Z-Bosonen beim Aufprall von Elektronen auf ihre Antiteilchen – die Positronen – entstehen. Die sehr genauen Messwerte stimmen mit hoher Präzision mit der Standardmodellvorhersage überein. Mit diesen und ähnlichen Messungen konnte die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung mit sehr guter Präzision verifiziert und bestätigt werden.

Weitere Tests folgten mit dem HERA-Collider bei DESY, mit dem die Reaktionen von Elektronen und Positronen mit Protonen bei hohen Energien untersucht wurden. Damit konnten die **elektroschwachen Kopplungen** zwischen Leptonen und Quarks für den W- und Z-Bosonen-Austausch sehr genau bestimmt werden. Auch bei diesen Messungen wurden die Vorhersagen des SM eindrucksvoll bestätigt.

Die elektroschwache Wechselwirkung wurde anschließend in (Anti-)Proton-Proton-Kollisionen am Tevatron und am LHC bei hohen Energien getestet. Ein wichtiger Meilenstein gelang am Tevatron in den 1990er-Jahren mit der Entdeckung des lange gesuchten Top-Quarks. Mit einer Masse von $172,7 \pm 0,3$ GeV ist es das schwerste bekannte Elementarteilchen. Die gemessene Masse stimmt hervorragend mit den Vorhersagen überein, die sich aus den präzisen LEP-Daten durch so genannte Strahlungskorrekturen ableiten lassen. Damit ist gemeint, dass Teilchen wie das Top-Quark, die schwerer sind als die bei LEP verfügbare Energie, kleine Veränderungen in den Daten hervorrufen. Genaue Messungen erlauben es, diese Abweichungen zu erkennen und eine Abschätzung der Masse des Top-Quarks zu erhalten.

Der größte Erfolg des LHC war die Entdeckung des letzten noch fehlenden Teilchens im SM – des **Higgs-Bosons** – im Jahr 2012 (Seite 41). Die Datenanalysen der folgenden Jahre lieferten bereits sehr genaue Messungen der Eigenschaften des Higgs-Bosons. Die Messungen ergaben eine Masse von $125,25 \pm 0,17$ GeV. Die weiteren Eigenschaften des Teilchens sind kompatibel mit einem Spin-0-Higgs-Teilchen, wie im Standardmodell (SM) vorhergesagt. Eine wichtige Eigenschaft des Higgs-Teilchens ist, dass die Stärke, mit der es an andere Teilchen ankoppelt, proportional zu deren Masse ansteigen sollte. Dies wurde mit den Messungen am LHC **eindrucksvoll bestätigt**. Ziel der ab 2029 beginnenden Phase der höchsten Luminosität am LHC ist es, die Eigenschaften des Higgs-Bosons noch genauer zu vermessen. Insbesondere wird es dann möglich sein, die Kopplung der Higgs-Bosonen untereinander experimentell zu bestimmen.

Aufgrund seiner hohen Energie bietet der LHC die einzigartige Möglichkeit, Kollisionsereignisse zu erzeugen, bei denen am Ende **zwei oder mehr Vektorbosonen** (Photon, W, Z) entstehen. Diese sind daher besonders interessant, da die auftre-

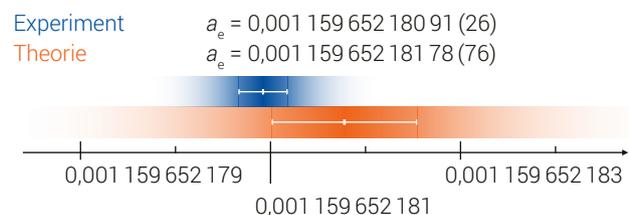
tenden Kopplungen untereinander im SM eindeutig festgelegt sind. Schon kleine Abweichungen von dieser Vorhersage würde Physik jenseits des SM erfordern. Bis jetzt stimmen alle Messungen mit den Vorhersagen überein. Zukünftige Messungen bei höchster Luminosität werden einen noch viel genaueren Test ermöglichen.

Auch kleinere Experimente tragen bei

Nicht immer müssen die Messungen an den riesigen Teilchenbeschleunigern durchgeführt werden. Paradebeispiele für kleinere Experimente sind hier die Messungen des **anormalen magnetischen Moments** des Elektrons und Myons. Diese Größe gibt an, wie sich die Teilchen im Magnetfeld verhalten. Für Elektronen wird die Messung mithilfe von Teilchenfallen, für Myonen in einem kleinen Speicherring durchgeführt.

Die Messungen an Elektron und Myon ergänzen sich und testen unterschiedliche Aspekte der elektroschwachen Theorie. Das Elektron dient als sehr genauer Test der Quantenelektrodynamik, während beim Myon, aufgrund seiner höheren Masse, Beiträge der schwachen und starken Wechselwirkung einen größeren Einfluss haben. Noch nicht entdeckte schwere Teilchen außerhalb des SM würden sich daher beim Myon eher bemerkbar machen als beim Elektron. Einen Unterschied zwischen Theorie und Experiment kann man als indirekten Hinweis deuten, dass es noch Teilchen und Wechselwirkungen gibt, die nicht im SM beschrieben werden.

Um einen Eindruck von der Genauigkeit zu bekommen, ist hier der experimentelle Wert für das anomale magnetische Moment des Elektrons dem theoretischen Wert gegenübergestellt. Die Zahlen in Klammern geben jeweils die Unsicherheiten in den letzten beiden Stellen an. Erst nach der elften Nachkommastelle ergeben sich Unterschiede, die allerdings aufgrund der Unsicherheiten zu erwarten sind.



Alle im SM vorhergesagten Teilchen wurden mittlerweile entdeckt, und es wurden keine weiteren Teilchen gefunden. Auch bei den Wechselwirkungen der Teilchen untereinander wurden bisher keine Abweichungen von der Theorie gefunden, die größer sind als die bekannten Messunsicherheiten. Insgesamt kann man sagen, dass das SM alle Tests mit Bravour bestanden hat; allerdings erfordert die Entdeckung der Neutrinooszillationen eine Erweiterung des SM, um Neutrinomassen konsistent beschreiben zu können. Vollständig ist das SM also trotz seiner Erfolge nicht.

Gregor Herten und Jörg Pretz

NEUTRINOS: ELEMENTARTEILCHEN MIT ÜBERRASCHUNGEN

Im Standardmodell der Teilchenphysik haben die Neutrinos keine Masse und wandeln sich nicht von einer Familie in eine andere um. Die Beobachtungen jedoch widersprechen diesen beiden Eigenschaften. Zukünftige Experimente dürften noch einige andere Überraschungen bereithalten.

Neutrinos sind Elementarteilchen, die bei der schwachen Wechselwirkung entstehen – beispielsweise, wenn ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umgewandelt wird. Wie das Elektron mit seinen Verwandten Myon und Tauon oder die Quarks kommen auch Neutrinos in drei Familien oder „Flavours“ (engl. Geschmacksrichtung, Sorte) vor: als Elektron-, Myon- oder Tau-Neutrino. Die Quantenmechanik der Neutrinos beinhaltet eine überraschende Eigenschaft: Wenn sie eine Masse haben, auch wenn sie nur minimal von exakt Null abweicht, dann wandeln sich Neutrinos von allein von einer Sorte in die andere um – und wieder zurück. Da dies periodisch geschieht, spricht man von der **Neutrinooszillation**.

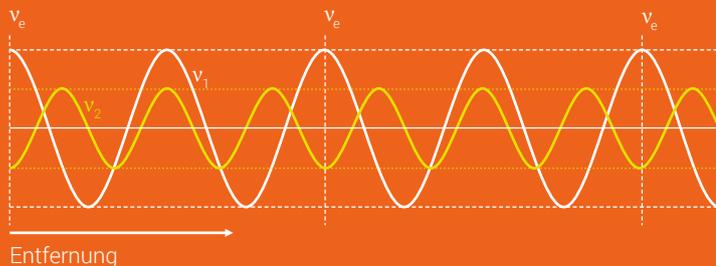
Die Vermutung, dass es solche Neutrinooszillationen tatsächlich geben könnte, äußerte der italienische Physiker Bruno Pontecorvo bereits 1957. Anfang der 1990er-Jahre verdichteten sich die Hinweise durch Messungen von Neutrinos, die von der Sonne kommen: Beobachtungen der Experimente Homestake, Gallex, Sage und Kamiokande zeigten, dass weniger Elektron-Neutrinos aus dem Innern der Sonne auf der

Erde ankommen als von Modellen der Sonne vorhergesagt. Ein Teil könnte sich auf dem Weg in Myon- oder Tau-Neutrinos verwandeln.

Den experimentellen Durchbruch brachten zwei Experimente um die Jahrtausendwende: Das Super-Kamiokande-Experiment beobachtete 1998 in Japan die Umwandlung atmosphärischer Myon-Neutrinos, also von Neutrinos, die beim Auftreffen kosmischer Strahlung auf die Erdatmosphäre entstehen. Das Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Kanada berichtete über die Umwandlung von Elektron-Neutrinos aus der Sonne in Myon- oder Tau-Neutrinos. Die Entdeckung, dass Neutrinos sich von einer Familie in eine andere umwandeln können und somit eine Masse ungleich Null haben, war ein Meilenstein in der Elementarteilchenphysik, der Astrophysik und der Kosmologie. Sie ist ein überzeugender experimenteller Beweis für die Unvollständigkeit des Standardmodells (SM), denn dieses beschreibt Neutrinos als masselos. Für diese Entdeckung erhielten Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald 2015 den Physik-Nobelpreis.

NEUTRINOOSZILLATIONEN IM VAKUUM

Der Quantenzustand von Neutrinos, die eine Masse haben, lässt sich als Überlagerung verschiedener Massenzustände beschreiben, welche sich als Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen und Geschwindigkeiten ausbreiten. Je nachdem, nach welcher Entfernung man es misst, erwischt man das Neutrino in einer anderen Phase. Ein Neutrino, welches als Elektron-Flavour produziert wurde, kann nach einer bestimmten Entfernung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit als Myon- oder auch Tau-Neutrino und schließlich wieder als Elektron-Neutrino nachgewiesen werden. Die Wahrscheinlichkeiten, einen bestimmten Flavourzustand zu beobachten, ändern sich periodisch; dieser Effekt wird als Neutrinooszillation bezeichnet. Neutrinooszillationen beruhen also auf einem Interferenzeffekt von Materiewellen. Im Bild wurden vereinfacht nur Mischungen zwischen zwei Neutrinos angenommen.



Der physikalische Mechanismus der Neutrinomischung in der Sonne unterscheidet sich von der Oszillation im Vakuum. Aufgrund der elastischen Streuung von Elektron-Neutrinos an Elektronen in der dichten Sonnenmaterie kommt es zu einer energieabhängigen Verstärkung der Oszillation, die durch den Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein-(MSW)-Materieeffekt der solaren Neutrinos vorhergesagt wird. Das Borexino-Experiment im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor konnte diesen Effekt bestätigen – ein Meilenstein im Verständnis der solaren Neutrinos.

Offene Fragen der Neutrinophysik

Wie schnell die Neutrinos zwischen den verschiedenen Flavour-Sorten oszillieren, ist nur von den Differenzen der Quadrate der Massen abhängig, nicht aber von den absoluten Massen selbst. Während die Vakuumoszillationen keine Aussage über die Reihenfolge der Neutrinomassen von leicht nach schwer erlauben, kann für solare Neutrinos mithilfe des MSW-Effekts immerhin bestimmt werden, dass Elektron-Neutrinos leichter als Myon-Neutrinos sind. Genauere Erkenntnisse soll in den nächsten Jahren in China das JUNO-Experiment mit starker europäischer Beteiligung liefern, das die Oszillationen von Reaktor-Neutrinos mit hoher Genauigkeit messen wird. Mit dem gleichen Ziel sollen die sich in Vorbereitung befindenden Experimente Hyper-Kamiokande in Japan und DUNE in den USA die Massenordnung mit Myon-Neutrinos aus Beschleunigern untersuchen. Darüber hinaus

◀ *Blick in das Innere des KATRIN-Experiments, mit dem die obere Grenze der Masse des Neutrinos immer genauer bestimmt wird.*

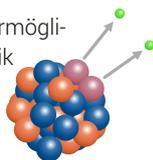
soll geprüft werden, ob sich die Oszillationswahrscheinlichkeiten von Neutrinos und Anti-Neutrinos unterscheiden.

Die **Neutrinomassen** sind mindestens fünf Größenordnungen kleiner als die Massen aller anderen Fermionen des SM, was auf einen anderen zugrunde liegenden Mechanismus der Massenerzeugung hinweist. In Betazerfällen führt die Neutrinomasse zu einer Verringerung der maximalen beobachtbaren Elektronenenergie sowie zu einer leichten Verzerrung der anderen beobachtbaren Energien, weil ein Teil der Energie in die Masse des Neutrinos umgewandelt wird. Das weltweit empfindlichste Experiment für solche Messungen ist das KATRIN-Experiment in Karlsruhe, das den Betazerfall von Tritium mit hoher Genauigkeit misst. Um die kleine Signatur einer Neutrinomasse nachzuweisen, sind eine starke Tritiumquelle (100 Milliarden Zerfälle pro Sekunde) und eine Energieauflösung auf der Elektronenvolt-Skala erforderlich. Die KATRIN-Kollaboration konnte für die Neutrinomasse im Betazerfall bisher eine obere Grenze von 0,8 eV mit 90% Gewissheit angeben. In den kommenden Jahren wird KATRIN seine Empfindlichkeit weiter verbessern und die Masse des Neutrinos bis auf 0,3 eV genau bestimmen oder diese Zahl als neue obere Grenze festlegen können. Darüber hinaus wird KATRIN im Rahmen des TRISTAN-Projekts nach bisher unentdeckten **hypothetischen sterilen Neutrinos** suchen. Diese können nicht mit W-Bosonen (dem geladenen Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung) reagieren und Massen im keV-Bereich haben. Sie sind auch als Kandidaten für die Dunkle Materie (Seite 67) interessant

Die Suche nach dem Majorana-Teilchen

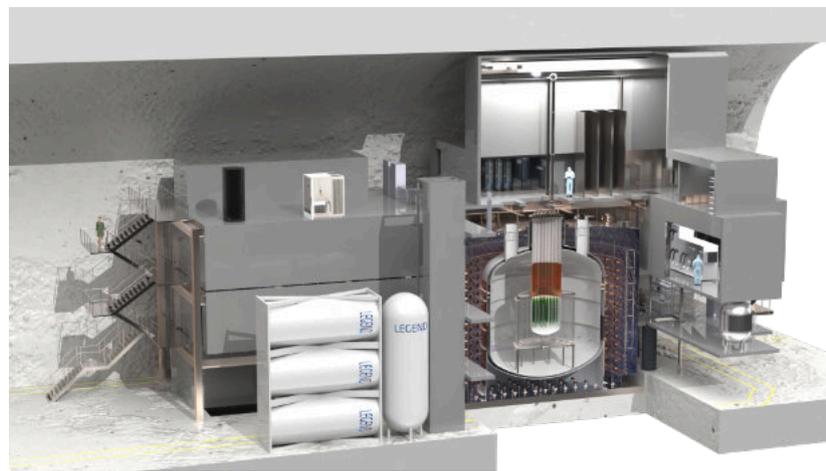
Neutrinos sind die einzigen Fermionen, also Elementarteilchen mit halbzahligem Spin, ohne elektrische Ladung. Daher könnten sie mit ihren Antiteilchen identisch sein. Die Existenz solcher **Majorana-Neutrinos** könnte einen Schlüssel zur Erklärung der Fragen liefern, warum Materie im heutigen Universum so viel häufiger vorkommt als Antimaterie und warum Neutrinos so viel leichter sind als die anderen Elementarteilchen.

Majorana-Neutrinos würden Kernzerfälle ermöglichen, die bislang im SM der Teilchenphysik nicht enthalten sind. Der sogenannte neutrinolose doppelte Betazerfall wandelt zwei Neutronen in einem Kern gleichzeitig in zwei Protonen um und emittiert dabei zwei Elektronen und keine Anti-Neutrinos. Anschaulich wird beim Zerfall eines Neutrons ein Anti-Neutrino emittiert und sofort als Neutrino von einem zweiten Neutron absorbiert, wodurch es einen weiteren Betazerfall auslösen kann. Das geht nur, wenn das Anti-Neutrino und das Neutrino identisch sind. Könnte man solche Zerfälle beobachten, so wäre die Majorana-Natur der Neutrinos belegt.



Das Experiment mit der derzeit höchsten Empfindlichkeit dafür ist das kürzlich abgeschlossene europäische GERDA-Experiment am Gran-Sasso-Laboratorium in Italien. Es unter-

sucht den Zerfall des Elements Germanium-76. Bisher wurde allerdings kein doppelter Betazerfall ohne Neutrinos entdeckt: Er muss bei diesem Element mit 90% Sicherheit seltener sein als einmal in $1,8 \cdot 10^{26}$ Jahren. Basierend auf dem experimentellen Konzept des GERDA-Experiments hat im Gran Sasso im Frühjahr 2023 das Nachfolgeexperiment LEGEND-200 begonnen, das Folgeexperiment LEGEND-1000 befindet sich in Vorbereitung. Ziel der europäisch-amerikanischen Zusammenarbeit ist es, bis zum Ende des nächsten Jahrzehnts die Empfindlichkeit dieser Messungen um den Faktor 100 zu verbessern und Majorana-Neutrinomassen mit einer Nachweisempfindlichkeit von mindestens 18 meV zu erreichen.



Das geplante LEGEND-1000-Experiment: Hochreine Germaniumdetektoren werden zur Suche nach dem neutrinolosen Doppel-Betazerfall in einem instrumentierten Flüssiggargontank im italienischen Untergrundlabor Laboratori Nazionali del Gran Sasso betrieben.

Neben LEGEND-1000 werden weltweit weitere Experimente mit radioaktivem Xenon-136, Molybdän-100 und Tellur-130 mit ähnlicher Empfindlichkeit vorbereitet, um den Doppel-Betazerfall in verschiedenen Isotopen und mit verschiedenen experimentellen Techniken zu beobachten und damit die Majorana-Natur der Neutrinos zweifelsfrei etablieren zu können.

Schon jetzt ist klar, dass das Standardmodell (SM) erweitert werden muss: Entweder müssen sogenannte rechtshändige Neutrinos und/oder sogar neuartige Majorana-Fermionen hinzugefügt werden. Darüber hinaus sind Neutrinos einzigartige Botenteilchen, um astrophysikalische Prozesse zu untersuchen, die sonst nicht zugänglich sind. Nach der erfolgreichen Analyse solarer Neutrinos und der Beobachtung der Supernova 1987a in der Milchstraße mithilfe von Neutrinos hat das IceCube-Experiment am Südpol die ersten extragalaktischen Quellen hochenergetischer Neutrinos entdeckt. Neutrinos haben somit die Tür zu einem besseren Verständnis unseres Universums geöffnet. Ihre Erforschung ist demnach nicht nur für die Elementarteilchenphysik, sondern auch für die Astrophysik und die Kosmologie relevant.

Gregor Herten und Stefan Schönert

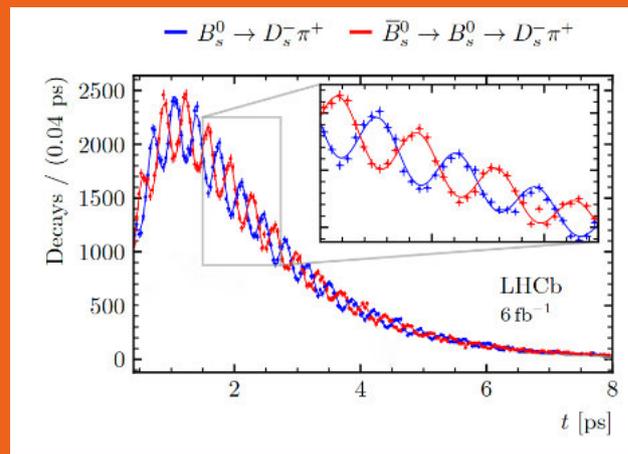
TEILCHEN MIT GESCHMACK

Im Standardmodell gibt es jeweils sechs verschiedene Sorten von Quarks und Leptonen. Diese Sorten nennt man „Flavour“, was auf Deutsch so viel wie „Aroma“ oder „Geschmacksrichtung“ bedeutet – einen Geschmack im herkömmlichen Sinn haben sie allerdings nicht. Es gibt Quarks in den Flavours „Up“, „Down“, „Charm“, „Strange“, „Top“ und „Bottom“. Die Leptonen-Flavours heißen Elektron, Elektron-Neutrino, Myon, Myon-Neutrino, Tau und Tau-Neutrino. Wie sich von der letzten Aufzählung her erahnen lässt, gehören Flavours immer in Zweiergruppen, sogenannten Generationen, zusammen (Seite 35). Diese insgesamt drei Generationen enthalten demnach jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen, die erste Generation zum Beispiel das Up- und das Down-Quark sowie das Elektron und das Elektron-Neutrino.

Aus Sicht der starken und elektromagnetischen Wechselwirkungen sind die zweite und dritte Generation schwerere Kopien der ersten Generation. Das bedeutet die Generationen unterscheiden sich in ihrer Masse und verhalten sich ansonsten aber symmetrisch. Die starke und elektromagnetische Wechselwirkung erlauben nicht den Übergang zwischen Teilchen einer Generation noch den Übergang zu Teilchen einer anderen Generation.

Die schwache Wechselwirkung dagegen unterscheidet zwischen den Generationen. Sie erlaubt Übergänge innerhalb einer Generation sowie auch zwischen den Generationen. Diese Übergänge verletzen die Symmetrie zwischen den drei Generationen. Diese Symmetriebrechung ist mit dem Higgs-Mechanismus verknüpft, der erklärt, warum die Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung nicht masselos sind (siehe Seite 36). Ebenso führt die Mischung zwischen den Generationen zu unterschiedlichen Raten für Zerfälle von Teilchen und Antiteilchen, d. h. zur Verletzung der Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie.

Diese Symmetrieverletzung wurde 1965 zum ersten Mal in Zerfällen neutraler Kaonen – aus Quark und Antiquark zusammengesetzter Teilchen, die ein Strange-Quark oder -Antiquark enthalten – nachgewiesen (Nobelpreis 1980). Die Erklärung des Phänomens erforderte die Mischung von Quarks aus drei Generationen, obwohl damals nur zwei Generationen bekannt waren. Nach der experimentellen Entdeckung dieser dritten Generation



Nachweis der periodischen Umwandlung von Teilchen und Antiteilchen: In blau ist die Zahl der B-Teilchen gezeigt, die als solche entstanden und auch zerfallen sind, in rot ist die Zahl der B-Teilchen gezeigt, die als B-Teilchen entstanden, aber als Anti-B-Teilchen zerfallen sind, sich also zwischenzeitlich umgewandelt haben. Die Umwandlung ist aufgrund der Quarkmischung möglich. Die genaue Vermessung des Prozesses erlaubt Parameter der Quarkmischungsmatrix zu bestimmen. Die Daten wurden mit dem LHCb-Experiment am CERN gewonnen.

gelang 2001 am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in den USA und am Forschungszentrum KEK in Japan der Nachweis dieser Teilchen-Antiteilchen-Asymmetrie auch bei neutralen Bottom-Hadronen, also aus Quark und Antiquark bestehenden Teilchen, die ein Bottom-Quark oder -Antiquark enthalten. Bottom- und Charm-Hadronen werden aktuell in großen Mengen in Proton-Proton-Kollisionen am LHC (ca. 10^{12} pro Jahr) und in Elektron-Positron-Kollisionen am KEK produziert und untersucht. Das erlaubt, die Quarkmischungen über das Studium vieler unterschiedlicher Zerfälle sehr präzise zu bestimmen. Zudem kann das SM diese Prozesse sehr genau berechnen. Durch den Vergleich der Messungen mit Theorievorhersagen wird das SM getestet und nach potenziellen Abweichungen gesucht.

Stephanie Hansmann-Menzemer



Die Wissenschaftler:innen der LHCb-Kollaboration vor ihrem Experiment am LHC. In dem hausgroßen Gerät im Hintergrund befinden sich zahlreiche Detektoren für Elementarteilchen.

Grafik: LHCb, angepasst
Foto: Maximilien Brice; Rachel Barbier, © CERN



QUARKS: BASIS DER MATERIE

Protonen und Neutronen machen den größten Teil der Masse des sichtbaren Universums aus. Sie sind viel schwerer als die elementaren Bausteine, aus denen sie aufgebaut sind. Der Grund dafür ist die starke Wechselwirkung, die aus drei nahezu masselosen Up- und Down-Quarks die schweren Protonen und Neutronen formt.

Der Higgs-Mechanismus (siehe Seite 35) ist eine Erklärung, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten. Er trägt jedoch nur zu einem kleinen Teil zu der Masse der Protonen und Neutronen bei. Tatsächlich erzeugt die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks die Masse der aus ihnen zusammengesetzten Teilchen dynamisch. Man spricht von einer emergenten Eigenschaft.

Die starke Wechselwirkung wird durch die **Quantenchromodynamik** (QCD, siehe „Das Standardmodell der Teilchenphysik“ auf Seite 35) beschrieben. Demnach verfügen Quarks und Antiquarks über eine quantenmechanische Eigenschaft, die als Farbladung bezeichnet wird – sie haben eine Farbe bzw. eine Anti-Farbe. Möglich sind rot, blau und grün sowie anti-rot, anti-blau und anti-grün. Die Bezeichnung „Farbe“ ist hierbei nur als Metapher zu verstehen. Über diese Farbladung können sie an andere Teilchen mit Farbladung koppeln, analog zur Kopplung oder Wechselwirkung von elektrisch geladenen Teilchen. Durch die Farbwechselwirkung können im Prinzip viele verschiedene gebundene Systeme entstehen (sog. Hadronen), die jedoch alle eine Eigenschaft haben müssen: Sie müssen farbneutral, d. h. weiß sein. Die einfachsten weißen Kombinationen sind 3-Quark-Systeme aus einem roten, blauen und grünen Quark (sog. Baryonen) oder Systeme aus einem Quark und einem Antiquark mit der entsprechenden Anti-Farbe, z. B. rot – anti-rot (sog. Mesonen).

Die Kopplung geschieht über den Austausch von Gluonen, die selbst ebenfalls eine Farbladung tragen und daher wiederum auch untereinander in Wechselwirkung treten können. Diese Eigenschaft der starken Wechselwirkung generiert viele extrem komplexe Phänomene.

Eines dieser Phänomene ist die asymptotische Freiheit: Bei steigender Energie nimmt die Kopplungsstärke der Quarks untereinander ab (Seite 43) – im Extremfall verhalten sie sich wie freie Teilchen. Für diesen Fall können die Gleichungen der QCD durch Näherungen gelöst werden.

Meist hat man es aber eher mit niedrigen Energien zu tun – und für die wird die Kopplungsstärke sehr groß. Deshalb findet man Teilchen mit Farbladung auch nie isoliert vor (siehe Seite 50). Mit den Näherungen der QCD kommt man hier in der theoretischen Beschreibung nicht weiter. Stattdessen simuliert man die Wechselwirkung der Quarks untereinander für verschiedene diskrete Punkte auf der vierdimensionalen Raumzeit mithilfe der Gleichungen der QCD („Gitter-QCD“). Diese extrem rechenaufwendigen Arbeiten werden von theoretischen Physiker:innen in internationaler Zusammenarbeit

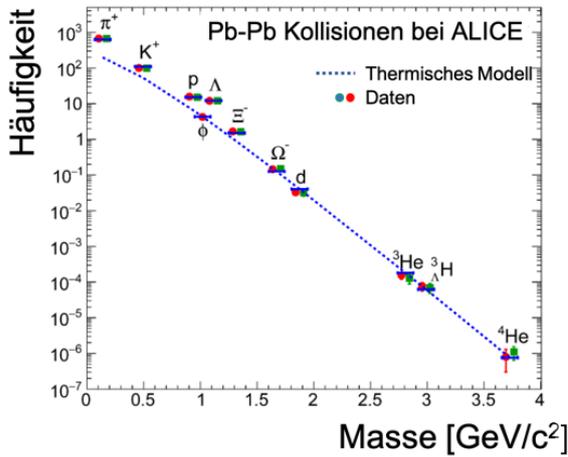
auf Supercomputern durchgeführt, wie z. B. JUWELS des Supercomputing Centers des Forschungszentrums Jülich. Mit komplexen statistischen Methoden lassen sich diese simulierten Daten analysieren, ähnlich wie bei der Auswertung experimenteller Daten. Zu den großen Erfolgen der Gitter-QCD gehört die genaue Berechnung der Massen aller stabilen oder langlebigen aus Quarks zusammengesetzten Teilchen, der Grundzustände vieler Hadronen (Proton, Neutron, Δ , Λ , Σ , Ξ , Ω , ρ , φ , K^*).

Die Komplexität der starken Wechselwirkung erfordert konzeptionell viele komplementäre Pfade, welche jeweils theoretisch und experimentell gemeinsam erforscht werden. So lassen sich aus Quarks und Gluonen bestehende Hadronen mit hochenergetischer Strahlung anregen. Ähnlich wie bei der Anregung eines Moleküls liefert auch die Anregung eines Hadrons Informationen über seine Bestandteile und deren Kopplung – nämlich anhand der diskreten Energiewerte, die zu solch einer Anregung führen.

Außerdem kann man beobachten, wie Leptonen oder Photonen an Hadronen gestreut werden, und daraus Erkenntnisse über deren Inneres gewinnen. Und schließlich dienen auch hochenergetische Kollisionen von Protonen oder Kernen der Untersuchung von Quarks und Gluonen. Die Experimente finden und unter starker Beteiligung deutscher Wissenschaftler:innen an verschiedenen Teilchenbeschleunigern weltweit statt, wie dem CERN (Schweiz) oder dem Jefferson Lab (USA), aber auch an kleineren nationalen Anlagen, z. B. an ELSA (Bonn) oder MAMI (Mainz). In Zukunft soll mit FAIR (siehe Seite 52) ein internationales Zentrum zur Erforschung der starken Wechselwirkung in Deutschland etabliert werden.

Der Urknall im Labor

In den ersten 10 Mikrosekunden nach dem Urknall bestand das Universum aus den freien elementaren Bausteinen des SM der Teilchenphysik – es war so heiß und energiereich, dass freie Quarks und Gluonen existieren konnten. In einem Phasenübergang kondensierte diese **Quark-Gluon-Plasma** genannte Urknallmaterie zur jetzt sichtbaren Materie des Universums, die aus Protonen, Neutronen und Elektronen gebildet wird. Um die Entstehungsgeschichte des Universums nachzuvollziehen, braucht es Erkenntnisse über die Struktur der Urknallmaterie und ihren Phasenübergang zu Hadronen. Seit über 30 Jahren werden hierzu Experimente in den weltweit größten Beschleuniger-Laboren in Europa (CERN, GSI), USA (Brookhaven), Russland (JINR), und Japan (J-PARC) mit insgesamt über 5000 Forschenden gemacht. Dabei werden



Teilchenproduktion in der Kollision schwerer Blei-Ionen am LHC gemessen mit dem ALICE-Experiment. Die gemessenen Häufigkeiten von Hadronen mit verschiedener Masse (Datenpunkte) werden sehr gut mit dem thermodynamischen Modell (gestrichelte Kurve und blaue Balken) beschrieben, aus der sich die Temperatur des Phasenübergangs ableiten lässt. Bei den höchsten Energien am LHC werden Teilchen und Antiteilchen mit gleicher Wahrscheinlichkeit erzeugt. Für schwere Teilchen mit einer Masse größer als 1500 MeV/c² wird dann die Teilchenhäufigkeit durch nur zwei wesentliche Parameter bestimmt, die jeweilige Teilchenmasse und die Übergangstemperatur. Die Temperatur des Phasenübergangs ergibt sich aus der Steigung der Kurve. Für Teilchen mit kleinerer Masse wird in der Analyse auch der Zerfall instabiler schwerer Hadronen berücksichtigt (blaue horizontale Linien). Dann erhält man für alle Hadronen von Pionen bis Omega-Baryonen volle Übereinstimmung mit den Daten mit einer Temperatur des Phasenübergangs von 156,5 MeV.

schwere Atomkerne wie Gold oder Blei mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinandergeschossen. Als Resultat entsteht ein submikroskopisch kleiner heißer „Feuerball“ aus elementaren Quarks und Gluonen, der einen Zustand nachbildet, der der Materie beim Urknall ähnlich ist. Die Quarks und Gluonen darin können allerdings nicht als freie Teilchen beobachtet werden, da sie sich beim Phasenübergang vom Quark-Gluon-Plasma zu normaler Materie quasi sofort zu Hadronen zusammenschließen, die dann messbare Spuren in den Detektoren hinterlassen („Auf der Spur der Elementarteilchen“ ab Seite 39).

Die Temperatur dieses Phasenübergangs wurde seit 1990 in vielen Beschleunigerexperimenten bestimmt. Das gelingt über die Messung der relativen Häufigkeiten der verschiede-

nen in der Kollision entstandenen Hadronen, denn die Teilchenproduktion im Phasenübergang folgt den Gesetzen der Thermodynamik. Dabei ergibt sich für alle Teilchen die gleiche Übergangstemperatur von 156,5 MeV. Diese Temperatur stimmt sehr gut mit theoretischen Untersuchungen im Rahmen der Gitter-QCD überein. Damit wurde eine der fundamentalen Größen der Physik des Quark-Gluon-Plasmas experimentell bestimmt: die Temperatur des Phasenübergangs.

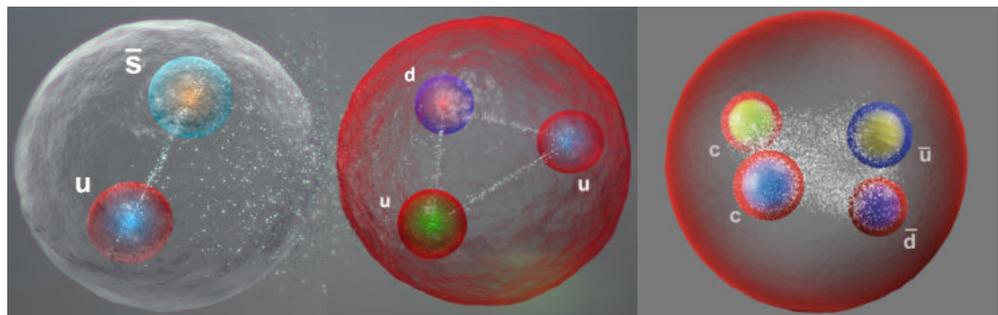
Durch viele Messungen konnten weitere Eigenschaften dieses Plasmas bestimmt werden. Eine der größten Überraschungen war, dass sich das Quark-Gluon-Plasma trotz seiner enormen Dichte wie eine nahezu ideale Flüssigkeit verhält. Zukünftige Messungen mit dem LHC, insbesondere zum Verhalten von schweren Quarks im Plasma, werden neue Einblicke in die bisher nur wenig verstandenen Prozesse des Phasenübergangs der Urknallmaterie erlauben.

Die im QCD-Phasenübergang des frühen Universums gebildeten instabilen Hadronen zerfallen im Abkühlprozess entweder direkt oder vernichten sich in der Begegnung mit ihren entsprechenden Antiteilchen. Jedoch werden hierbei nicht alle Teilchen vernichtet, da die Anzahl der Teilchen und Antiteilchen im Feuerball nicht exakt gleich ist. Der Ursprung dieser Asymmetrie ist bislang unbekannt. Wir verdanken ihr jedoch alle Strukturen im Universum wie Galaxien, Sterne, Planeten bis hin zum Leben (siehe „Jenseits des Standardmodells“ auf Seite 53).

Exotische Materie

Bei Temperaturen unterhalb des Phasenübergangs existieren Quarks und Gluonen nicht als freie Teilchen, sondern bilden gebundene Zustände, die Hadronen. Die Bindung der Quarks und Gluonen unterliegt strengen Regeln, deren tiefe Ursache noch nicht vollständig geklärt ist. So können sich diese Teilchen nur zu Hadronen mit ganzzahliger elektrischer Ladung zusammenfügen und die Mischung der Farbladungen der Einzelteile muss beim zusammengesetzten System farbneutral sein. Darüber hinaus können sie nur Zustände mit bestimmten Quantenzahlen bilden, sowohl bezüglich des Gesamtdrehimpulses, als auch im Verhalten gegenüber diskreten Symmetriebetrachtungen. Da die starke Wechselwirkung nicht zwischen den sechs verschiedenen Flavourzuständen der Quarks unterscheidet, wird erwartet, dass sich das Muster der realisierten gebundenen Zustände für die verschiedenen Quark-Flavours wiederholt.

Künstlerische Darstellung eines Kaons (ein Meson aus Quark und Antiquark, u und \bar{s}), Protons (ein Baryon aus drei Quarks, u und d) und eines neuen Hadrons mit zwei schweren Quarks (c) und zwei Antiquarks (\bar{u} , \bar{d}). Sie folgt dem Modell eines engen Tetraquark-Systems im Gegensatz zu Vorstellungen einer Molekülbildung aus Hadronen.



Lange Zeit waren nur zwei Formen von Hadronen bekannt: die Mesonen, die aus einem Quark und einem Antiquark gebildet werden, sowie die Baryonen, die aus drei Quarks bestehen. Jedoch war spekuliert worden, dass sich ein so komplexes Hadron auch in andere Zustände anregen lässt, wobei die zugeführte Energie in Schwingungen und Rotation sowohl der Quarks als auch der Gluonen umgewandelt werden kann. Signaturen solcher exotischen Teilchen aus leichten Quarks mit Gluon-Anregungen wurden über viele Jahrzehnte gesucht und nach vielen widersprüchlichen Beobachtungen Anfang der 2010er-Jahre durch Experimente am CERN bestätigt. Das Studium von Hadronen mit schweren Quarks der Flavour, Charm und Bottom am LHC und an Elektron-Positron Kollidern führte zur erstmaligen Beobachtung von Zuständen mit neuartigen Kombinationen aus Quarks und Antiquarks. Seit 2015 sind Systeme mit vier Quarks und einem Antiquark (sog. Pentaquarks) sowie Systeme aus zwei Quarks und zwei Antiquarks (sog. Tetraquarks) bekannt. Es ist bisher nicht klar, ob diese Beobachtungen auf Hadronen mit schweren Quarks beschränkt sind, und was die innere Struktur dieser Systeme ist: kompakt (atomartig) oder groß (molekülartig). Damit haben die jüngsten Forschungsergebnisse ein neues Forschungsfeld zum Verständnis der Zusammensetzung der sichtbaren Materie eröffnet.

Die starke Wechselwirkung bei sehr kleinen Energien

Die leichtesten beobachteten Hadronen, die Pionen, spielen eine besondere Rolle beim Verständnis der starken Wechselwirkung bei kleinen Energien. Sie sind aus einem Up- oder Down-Quark und einem Up- oder Down-Antiquark aufgebaut. Ihre Masse beträgt jedoch nur etwa ein Siebtel der Masse eines Protons, das aus drei leichten Quarks besteht. Dieser markante Unterschied hängt mit der Symmetrie der Händigkeit der spintragenden, (fast) masselosen Quarks zusammen. Diese chirale Symmetrie ist bei niedrigen Energien gebrochen, was zur Ausbildung (fast) masseloser Bosonen führt, zu denen die Pionen gehören. Bei sehr niedrigen Energien ($\ll 1$ GeV) sind dann nicht mehr die Quarks, sondern die leichtesten Anregungen des QCD-Grundzustands, die Pionen, die relevanten theoretischen Freiheitsgrade. Dieser effektive theoretische Unterbau erlaubt präzise Aussagen über die Wechselwirkung leichter Mesonen bei sehr niedrigen Energien. Messungen der letzten Jahre am CERN haben diese Vorhersagen mit hoher Genauigkeit überprüft. Mit dem Konzept der chiralen Symmetriebrechung halten wir neben dem Higgs-Mechanismus einen weiteren Schlüssel zum Ursprung der Masse des sichtbaren Universums in der Hand.

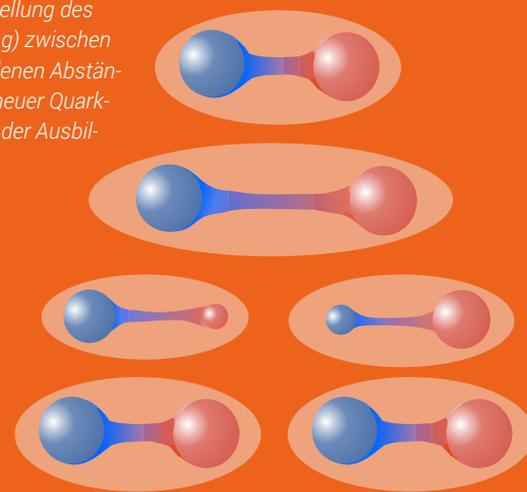
Peter Braun-Munzinger, Bernhard Ketzer und Stephan Paul

NIE ALLEIN: CONFINEMENT

Nicht nur die Quarks, sondern auch die Gluonen, die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung, tragen Farbladung. Dies führt zu einer Selbstwechselwirkung, die bewirkt, dass die Kopplungsstärke vom Abstand zwischen den Quarks abhängt, und zwar anders als bei anderen Wechselwirkungen: Sie nimmt bei größeren Abständen zu! Nur bei sehr kleinen Abständen ist die Kopplungsstärke gering genug, dass Quarks sich nahezu wie freie Teilchen verhalten können. Für diesen Fall der sogenannten asymptotischen Freiheit können wir die Wechselwirkung der Quarks im SM mit Näherungsmethoden präzise berechnen. Diese Berechnungen auf der Basis der QCD stimmen mit Experimenten sehr gut überein. Bei größeren Abständen der Quarks voneinander, wie sie in Hadronen vorliegen, sind die Vorhersagen der QCD jedoch noch sehr ungenau und viele experimentelle Ergebnisse noch unverstanden.

Dies trifft auch auf den experimentellen Befund zu, dass Quarks und Gluonen nie als freie Teilchen beobachtet werden. Dies wird als Confinement bezeichnet. Bei einer Kollision können sie zwar voneinander getrennt werden, allerdings nimmt mit steigendem Abstand die Kopplungsstärke zu. In einem vereinfachten Modell bilden die Gluonen zwischen den Quarks einen Flussschlauch aus Farbe (String), dessen Energie linear mit seiner Länge zunimmt. Bei einem kritischen Abstand der Quarks voneinander ist so viel Energie in der Bindung gespeichert, dass daraus ein neues (leichtes) Quark-Antiquark-Paar erzeugt wird und der Farbschlauch damit abreißt. Anstatt einzelner Quarks sehen wir in unseren Detektoren also neu erzeugte Hadronen, die in sogenannten Jets der Richtung des ursprünglichen Quarks folgen.

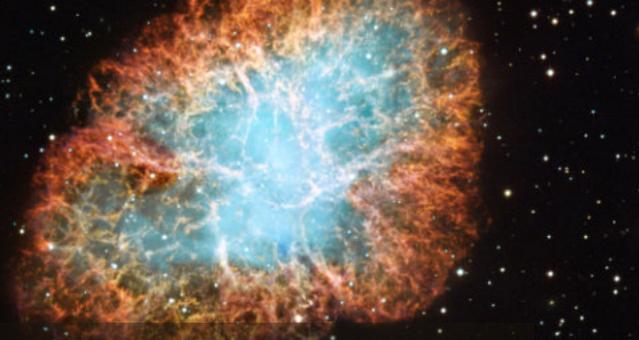
Konzeptionelle Darstellung des Farbschlauchs (String) zwischen Quarks bei verschiedenen Abständen, der Erzeugung neuer Quark-Antiquark-Paare und der Ausbildung von Hadronen



Dieses Confinement sollte auch Bindungszustände erzeugen können, die ausschließlich aus Gluonen bestehen, sogenannte Gluebälle. Die Suche nach ihnen wird an vielen Experimenten weltweit verfolgt, jedoch fehlt bisher ein eindeutiger Nachweis.

Das Confinement konnte bisher nicht theoretisch bewiesen werden und ist eines der sieben Millenniumprobleme, für deren Lösung ein Preisgeld von jeweils einer Million US-Dollar ausgelobt ist.

DIE ENTSTEHUNG DER ELEMENTE



Das Periodensystem verzeichnet 118 chemische Elemente, von denen 94 natürlich auf der Erde vorkommen. Die meisten von ihnen gibt es sogar in verschiedenen Varianten, den Isotopen. Doch warum gibt es überhaupt so viele verschiedene Elemente, und wie sind sie entstanden? Fragen darauf liefern Kernphysik und Astrophysik gemeinsam.

„Astrophysik ist oft angewandte Kernphysik“: So fasste Physik-Nobelpreisträger Willy Fowler launig zusammen, dass kernphysikalische Prozesse einen entscheidenden Anteil an der Entwicklung vieler astrophysikalischer Objekte haben und so die Entstehung der Elemente im Universum ermöglichen. Die Elementsynthese begann schon in den ersten drei Minuten nach dem **Urknall** – also lange bevor es Sterne gab. Damals bestand das heiße Universum aus Protonen und Neutronen. Es gab auch zahlreiche Elektronen, doch bis diese sich mit den Kernbestandteilen zu Atomen verbanden, dauerte es noch 380 000 Jahre. Für die primordiale Elemententstehung spielen die Elektronen keine Rolle. Mit der Expansion und der damit verbundenen Abkühlung verbanden sich die Kernteilchen zu ersten Atomkernen. Hierbei wurden die Neutronen fast alle in Heliumkernen eingebettet – bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Während freie Neutronen nach einer mittleren Lebensdauer von knapp 15 Minuten zerfallen, konnten sie in den Heliumkernen bis heute bestehen bleiben. Das Ergebnis dieser **primordialen Nukleosynthese** war beschränkt auf die leichtesten Elemente: 75% Wasserstoff, 25% Helium und Spuren von Lithium. Diese theoretisch bestimmten Häufigkeiten der primordialen Nukleosynthese stimmen sehr gut mit den Beobachtungen überein und sind ein bedeutender unabhängiger Test des SM der Kosmologie.

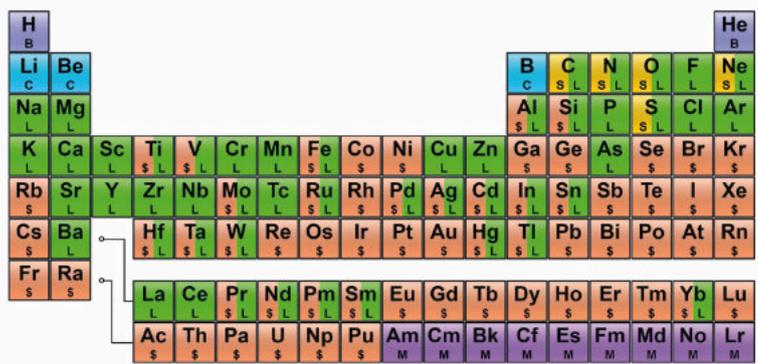
Die erstmalige Elemententstehung direkt nach dem Urknall

Elemententstehung in Sternen

Die Hauptproduzenten der Elemente sind seitdem die Sterne. Je nach ihrer Masse verbringen sie viele Millionen bis Milliarden Jahre in einem Gleichgewicht aus Schwerkraft und Energiefreisetzung und leuchten. Die dafür notwendige Energie beziehen sie aus Kernreaktionen in ihrem Inneren. Dabei fusionieren leichte zu schwereren Kernen. In einer ersten und am längsten andauernden Phase verbrennen Sterne Wasserstoff zu Helium, was als **Wasserstoffbrennen** bekannt ist. Die Sonne befindet sich seit mehr als 4,5 Milliarden Jahren in dieser Phase. Einige der Kernreaktionen erzeugen dabei Neutrinos, deren Beobachtung

nicht nur die Vorstellungen des Fusionsreaktors im Inneren der Sonne, sondern auch die Existenz von Neutrinooszillationen (siehe auch Seite 45) bestätigten. Es ist ein Triumph der nuklearen Astrophysik, dass die Kernprozesse im Zentrum der Sonne mittlerweile so gut verstanden sind, dass die Sonne für die Forscher:innen zu einer kalibrierten Neutrinoquelle geworden ist.

Massereiche Sterne durchlaufen nach dem **Wasserstoffbrennen** noch weitere Sequenzen von Kernreaktionen, wobei die Endprodukte des vorherigen Brennens zum nuklearen Brennmaterial der nächsten Brennphase werden. Schließlich bildet sich im Inneren ein Kern bestehend aus Atomkernen wie Eisen und Nickel. Dies sind die Elemente, bei denen die Kernbestandteile am stärksten aneinander gebunden sind. Das bedeutet, dass Fusionsreaktionen mit diesen Kernen keine weitere Energie freisetzen können. Damit verliert also ein solcher Stern die Energiequelle, mit der er sich langfristig gegen seine eigene Anziehungskraft wehren könnte. Sein Zentrum kollabiert (das geschieht in Sekundenbruchteilen, wenn die Bedingungen dazu reif sind!), die dabei freiwerdende Gravitationsenergie erhitzt den Kern ein letztes Mal und der Stern explodiert in einer **Supernova**. Dabei werden die meisten der in vorigen Brennphasen produzierten Elemente in den Weltraum geschleudert, übrig bleibt ein kompakter Rest aus Kernmaterie – ein **Neutronenstern**, quasi ein Atomkern in Größe einer Großstadt. Bei ihm kann das Doppelte der Masse unserer Sonne auf eine Kugel mit einem Radius von zwölf Kilometern zusammengepresst sein. Während der Supernovaexplosion kommt es zu einem kurzzeitigen explosiven



Das Periodensystem der chemischen Elemente mit Angabe der hauptsächlich kosmischen Produktionsstätten.

← Der Krebsnebel ist der Überrest der SupernoVAexplosion aus dem Jahr 1054. In den filamentartigen Wolken verteilen sich die schweren Elemente im interstellaren Medium. Auch die schweren Elemente auf unserer Erde (z. B. Gold) entstanden vor Milliarden von Jahren in Sternexplosionen.

Brennen, das einen Teil der Sauerstoff- und Siliziumschalen zu instabilen Nickel-56-Kernen fusioniert. Deren radioaktive Zerfälle erzeugen das wochenlange Nachleuchten einer Supernova und produzieren etwa die Hälfte des Eisens im Universum. Die andere Hälfte entsteht durch ein ähnliches explosives Brennen in einer thermonuklearen Supernova, in der ein **Weißer Zwerg** in einem Doppelsternsystem vollständig zerrissen wird. Thermonukleare Supernovae haben eine entscheidende Rolle bei der Entdeckung gespielt, dass sich das heutige Universum beschleunigt ausdehnt.

Die Herkunft schwerer Elemente

Woher aber stammen die Elemente, die schwerer als Eisen und Nickel sind, also mehr Protonen als diese beiden Kerne enthalten? Sie entstehen durch zwei unterschiedliche Sequenzen, bei denen zunächst freie Neutronen eingefangen werden, die anschließend unter Emission eines Betateilchens in ein Proton umgewandelt werden. Bei dem sogenannten **s-Prozess** ist die Neutronendichte gering. Das hat zur Folge, dass die Betazerfälle schneller ablaufen als aufeinander folgende Neutroneneinfänge. Es ist also unwahrscheinlich, dass ein weiteres Neutron eingefangen wird, bevor das zuvor entstandene radioaktive Nuklid zerfallen ist. In der Folge entstehen vor allem stabile Nuklide bis zum Bismut. Dieser s-Prozess läuft vor allem in asymptotischen **Roten Riesensternen** ab.

Die schwersten Elemente, wie etwa Thorium oder Uran, entstehen hingegen im r-Prozess. Hierbei folgen Neutroneneinfänge zunächst schneller aufeinander als die Betazerfälle, was nur bei extrem hohen Neutronendichten geschieht. Die in diesem Prozess entstehenden Kerne haben also einen deutlichen Neutronenüberschuss. Das macht sie experimentell schwer erreichbar, weshalb die meisten der beteiligten Kerne noch nicht im Labor hergestellt werden konnten. Ihre Eigenschaften lassen sich daher bislang nur theoretisch abschätzen.

Bei der Suche nach Gravitationswellen (siehe Seite 64) wurden zwei verschmelzende Neutronensterne als Ursprung des Ereignisses GW170817 ausgemacht und als ein Ort der r-Prozess-Produktion identifiziert. Neutronensternverschmelzungen sind dadurch in den wissenschaftlichen Fokus gelangt. Zukünftige Gravitationswellendetektoren (LISA) und das James-Webb-Teleskop lassen eine detaillierte und reichliche Ernte an neuen Informationen erwarten.

Eine neues Kapitel im Verständnis der Entstehung der Elemente im Universum wird mit der Großforschungsanlage FAIR aufgeschlagen, wo es möglich sein wird, viele Aspekte der Physik von Neutronensternen und ihren spektakulären Verschmelzungen sowie von anderen extremen astrophysikalischen Objekten wie Supernovae im Experiment nachzubilden und zu beobachten.

Karlheinz Langanke und Norbert Pietralla

FAIR – DAS UNIVERSUM IM LABOR

Einzigartige Einblicke in die Struktur der Materie und die Entwicklung des Universums soll zukünftig das internationale Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) liefern. Dazu wird derzeit ein neuer, zum Teil unterirdischer, Gebäudekomplex (mittig im Bild) im Anschluss an die bestehenden Anlagen des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt (links oben im Bild) gebaut. Des Herzzstück ist ein neues Synchrotron (SIS100) mit 1,1 Kilometer Länge, das Ionen aller chemischen Elemente von Wasserstoff bis Uran auf bis zu 99% Lichtgeschwindigkeit beschleunigen kann. Damit können unter anderem eine Vielzahl von Teilchen sowie Antiprotonen mit allerhöchsten Intensitäten erzeugt und in anschließenden Anlagen und Detektoren untersucht werden.

So sind Messungen in einem Temperatur- und Dichtebereich geplant, in dem Kernmaterie den Vorhersagen zufolge einen Phasenübergang durchmacht. Weitere Experimente sollen Aufschluss über den r-Prozess, die starke Wechselwirkung oder fundamentale Symmetrien geben. Auch um dichte Plasmen zu untersuchen, wie es sie im Universum gibt, sind die Möglichkeiten von FAIR geeignet. Schließlich sollen auch Anwendungen in der Biophysik, Medizin und Materialforschung adressiert werden – etwa wie man Astronaut:innen vor kosmischer Strahlung schützt, mit Ionen Krankheiten heilt und Materialeigenschaften verändert.

Weltweit arbeiten im Jahr 2024 ca. 3000 Wissenschaftler:innen aus rund 50 Ländern an der Vorbereitung der Experimente. Bei der Realisierung der Anlagen entstehen technologische Neuentwicklungen in vielen Bereichen, zum Beispiel in der Informationstechnologie oder in der Supraleitungstechnik.

Inti Lehmann



JENSEITS DES STANDARDMODELLS

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist zwar extrem erfolgreich, aber trotzdem unzureichend – es beschreibt als die Physik der kleinsten Bestandteile der Materie nicht vollständig alle Phänomene. Neue Experimente begeben sich gezielt auf die Suche nach „neuer Physik“.

Die experimentelle Teilchenphysik befindet sich seit der Entdeckung des Higgs-Bosons im Jahr 2012 in einer interessanten Situation: Einerseits bestätigen zahllose Messungen an verschiedenen experimentellen Anlagen die Vorhersagen des Standardmodells (SM) der Elementarteilchenphysik mit immer größerer Genauigkeit. Andererseits muss es bislang nicht entdeckte grundlegende Phänomene bei hohen Energieskalen geben. Das ist sicher, denn einige experimentelle Befunde lassen sich mit dem SM nicht erklären oder stehen mit ihm im Widerspruch. So sind Neutrinos im SM per Konstruktion masselos, Beobachtungen mit dem Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Kanada zeigten 2001 anhand der Oszillationen solarer Neutrinos aber, dass zumindest zwei der drei postulierten Neutrino-Arten eben doch eine – wenn auch sehr kleine – Masse haben (siehe „Neutrinos: Elementarteilchen mit Überraschungen“, Seite 45).

Weitere offene Fragen im SM ergeben sich aus der Astrophysik und der Kosmologie, z. B. die nach dem Ursprung der geheimnisvollen **Dunklen Materie** im Universum. Diese wird vom SM nicht erfasst. Möglicherweise ließe sie sich mit der Existenz eines bislang noch unbekanntes Elementarteilchens erklären: schwach wechselwirkende massereiche Teilchen, sogenannte WIMPs. Danach wird intensiv experimentell gesucht, z. B. mit deutscher Beteiligung im Gran-Sasso-Labor in Italien. Es könnte aber auch sein, dass die Dunkle Materie aus mehr als einer Teilchenart besteht: aus einem ganzen „Dunklen Sektor“. Auf die Suche danach machen sich Forschende am CERN. Neue Detektoren, wie das FASER-Experiment, sollen nach elektrisch neutralen langlebigen Teilchen suchen, die zum Dunklen Sektor gehören. Mit Experimenten am Bonner ELSA-Beschleuniger, am Mainzer MESA-Beschleuniger und auch am CERN sollen Dunkle Photonen aufgespürt werden. Weitere mögliche Dunkle-Materie-Kandidat sind **Axionen** – neutrale und besonders leichte hypothetische Elementarteilchen – und andere axionartige Teilchen (ALPS). Hierzu wird eine neue Generation von Experimenten am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY entwickelt.

Auf der Suche nach Erklärungen

Ein weiteres Rätsel der Kosmologie und damit auch der Elementarteilchenphysik: Wir beobachten im Universum praktisch keine Antimaterie – die Sterne überall im Kosmos, die Planeten und wir sind aus Materie aufgebaut. Wir würden aber erwarten, dass im Urknall gleich viel Materie und Antimaterie entstanden ist. Das hinsichtlich Materie und Antimaterie symmetrische Universum hat sich demnach zu einem asymmetrischen gewandelt. Die für diesen Prozess nötigen

Zutaten sind zwar im SM vorhanden, die daraus berechnete Asymmetrie ist aber viel kleiner als die beobachtete. Hier braucht es – wie bei der Dunklen Materie – neue Physik jenseits des SM. Insbesondere müsste die Verletzung der sogenannten CP-Symmetrie (siehe „Teilchen mit Geschmack“ auf Seite 47) – also der Erwartung, dass alle physikalischen Gesetze gleich blieben, wenn man Teilchen und Antiteilchen vertauscht und gleichzeitig die Raumkoordinaten spiegelt – viel deutlicher sein. Hierzu gibt es viele theoretische Vorschläge. Experimentell könnten diese neuen Quellen von CP-Verletzung als ein elektrisches Dipolmoment verschiedener Systeme (Atome, Moleküle, Neutronen, Kerne) beobachtet werden. Auch danach wird momentan sowohl in Speicherringen als auch in Teilchenfallen intensiv gesucht.

Das SM wirft auch in seiner Struktur Fragen auf, die auf neue Physik hinweisen. Die Quarks haben die elektrischen Ladungen $+\frac{2}{3}$ (up) und $-\frac{1}{3}$ (down) der Elementarladung. Dadurch hat ein Proton (up-up-down) die Ladung $+1$. Dagegen hat das Elektron die Ladung -1 . Experimentelle Messungen bestätigen, dass die Proton- und die Elektronladung exakt betragsgleich mit entgegengesetzten Vorzeichen sind. Aber warum ist das so? Im SM haben das Elektron und die Quarks zunächst gar nichts miteinander zu tun. Warum sollten ihre elektrischen Ladungen so fein aufeinander abgestimmt sein?

Die große Vereinheitlichung

In der Vergangenheit haben wir gelernt, dass die Schwerkraft auf der Erde sowie die Anziehung zwischen Erde und Mond den gleichen Ursprung haben, die im Newtonschen Gravitationsgesetz (und präziser in der allgemeinen Relativitätstheorie) beschrieben wird. Im 19. Jahrhundert stellte sich heraus, dass Magnetismus und Elektrizität den gleichen Ursprung haben, weil der Magnetismus durch bewegte elektrische Ladungen entsteht. Die Phänomene sind also in einer Beschreibung vereinheitlicht. Lassen sich starke, schwache und elektromagnetische Kraft in ähnlicher Weise zu einer Kraft vereinheitlichen?

Mathematisch geht das! Interessanterweise sagt solch eine **große Vereinheitlichung (GUT)** genau die Ladungsquantisierung von Quarks und Elektronen wie beobachtet vorher. Sie sagt außerdem voraus, dass das Proton nicht stabil ist, sondern ganz selten zerfallen müsste – z. B. in ein neutrales Pion und ein Positron. Deshalb wird nach solchen Prozessen zur

weiter auf Seite 55

STRINGTHEORIE, GRAVITATION UND STREUPROZESSE AM LHC

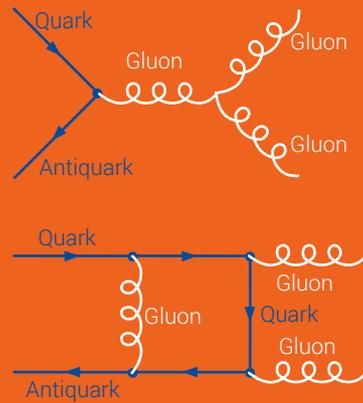
Ein großer Traum der Physik ist die Vereinheitlichung aller vier Grundkräfte in der Natur, wie sie im SM der Teilchenphysik beschrieben sind, zu einer Kraft (siehe Seite 53). Aus mathematischen Gründen unterscheiden sich die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft jedoch grundsätzlich von der Gravitation. Eine mögliche Lösung bietet die Stringtheorie.

In der Quantenfeldtheorie, welche die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft beschreibt, werden die grundlegenden Objekte der Natur, die Teilchen, als mathematische Punkte angenommen. Bei der Stringtheorie nimmt man stattdessen an, dass die grundlegenden Objekte der Natur sehr, sehr kleine Schnüre (engl. strings) und eben keine Punkte sind.

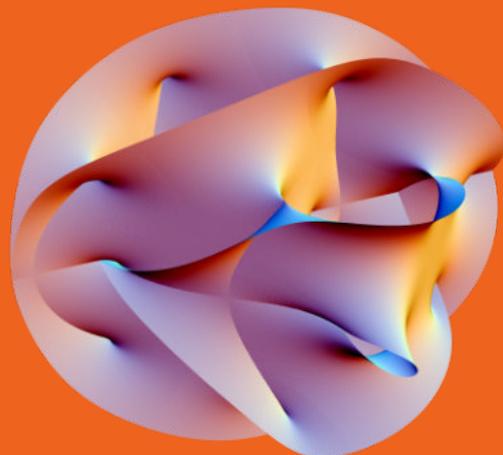
Wenn man eine Theorie solcher Schnüre quantisiert, passieren zwei erstaunliche Sachen. Erstens enthält die Theorie immer ein masseloses Teilchen mit Spin 2. Dies ist genau das Graviton, also das kleinste Quantum der Gravitationswechselwirkung, beziehungsweise das Quantum der kürzlich beobachteten Gravitationswellen. Somit enthält eine quantisierte Stringtheorie immer auch die Gravitation! Es ist auch möglich, die anderen Wechselwirkungen mit einzubauen. Somit stellt die Stringtheorie eine mathematisch konsistente Vereinheitlichung der vier Kräfte in der Natur dar.

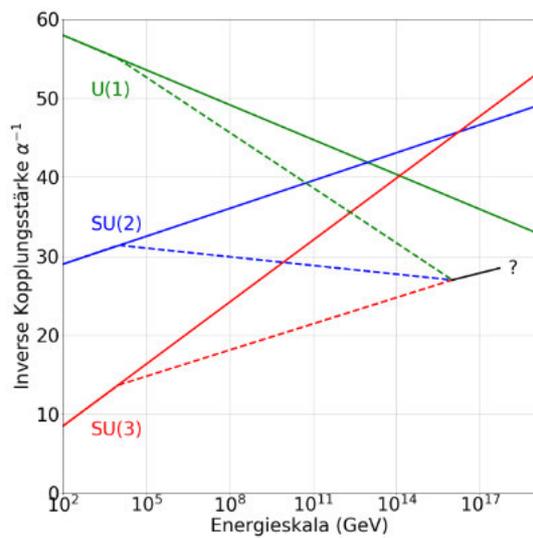
Zweitens lässt die quantisierte Stringtheorie sich nur in einem hochdimensionalen Raum mathematisch konsistent formulieren: Konkret sind das zehn, elf oder 26 Dimensionen. Wir beobachten aber nur vier Dimensionen, nämlich die drei Raumdimensionen und die Zeit. Um das in Übereinstimmung zu bringen, können die Dimensionen jenseits der vier, die wir beobachten, nicht wie diese unendlich ausgedehnt sein. Stattdessen schließen sie auf sich selbst wie ein Kreis, und dieser Kreis ist sehr, sehr klein – wir sagen: kompakt. Die Struktur dieser kompakten Extra-dimensionalen, auch Calabi-Yau-Räume genannt, ist sehr reichhaltig und mitentscheidend für die möglichen beobachtbaren Eigenschaften der Stringtheorie bei den experimentell erreichbaren Energien. Leider sind die mathematischen Lösungen auch so vielfältig, dass Stringtheorien eine sehr große Bandbreite an Vorhersagen machen, aber eben keine definitiven, die man durch Messungen falsifizieren oder verifizieren könnte.

Herbert Dreiner



Jedem Feynman-Diagramm (oben) entspricht genau eine mathematische Formel, auch Amplitude genannt. Um die Wahrscheinlichkeit eines Streueignisses zu berechnen, muss man alle Amplituden addieren und danach quadrieren. Diese Diagramme kommen in verschiedenen Ordnungen vor. In höherer Ordnung können das auch schnell Tausende von Diagrammen werden. Es ist nun wichtig, den zugrundeliegenden mathematischen Raum dieser Feynman-Diagramme zu verstehen. Erstaunlicherweise ist das wieder solch ein Calabi-Yau-Raum, wie er durch den „Knoten“ unten dargestellt wird. Somit tragen Entwicklungen in der Stringtheorie unmittelbar zur Präzision der Berechnung von Streuprozessen im SM für den LHC bei.





Wenn wir die Kopplungsstärken der drei Kräfte zu hohen Energien projizieren, so treffen sie sich annähernd. Mit der Hinzunahme von Supersymmetrie bei der Extrapolation (gestrichelt) treffen sie sich genau.

Zeit experimentell intensiv in sehr großen Experimenten unter der Erde gesucht.

Wenn wir das SM zu einer sogenannten **supersymmetrischen Theorie** erweitern, treffen sich die Kopplungsstärken der verschiedenen Wechselwirkungen bei sehr hohen Energien. In der Supersymmetrie geht man davon aus, dass sich Teilchen mit ganzzahligem Spin und Teilchen mit halbzahligem Spin ineinander umwandeln lassen. Erst vor dem Hintergrund dieser Theorie ist eine GUT mathematisch konsistent. So eine supersymmetrische Theorie sagt im Prinzip die Entdeckung neuer Teilchen am LHC vorher, allerdings bei unbekannter Energie. Bislang konnte sie experimentell nicht bestätigt werden.

Neue Fragen, neue Geräte, neue Physik

Die Erforschung der neuen Physik jenseits des SM erfordert große Anlagen und umfangreiche Ressourcen. Deshalb findet auf europäischer und internationaler Ebene eine enge Abstimmung über die Prioritäten künftiger Großexperimente statt. Der nächste wichtige Schritt ist ein Upgrade des LHC am CERN, der **High-Luminosity-LHC (HL-LHC)**, der 2029 in Betrieb gehen soll. Mit dem HL-LHC geht eine wesentliche Verbesserung der Experimente CMS und ATLAS einher. Für die LHC-Experimente LHCb und ALICE wird derzeit über eine Erweiterung Mitte der 2030er-Jahre diskutiert.

Mit dem HL-LHC sollen zehnmals mehr Daten gewonnen werden als mit dem LHC bis 2025. Die Verbesserungen der Experimente dienen zum einen der Anpassung an die erhöhte Zahl von Ereignissen pro Zeit. Zum anderen werden durch verbesserte Auflösung, einen größeren Anteil nicht-verworfenen Ereignisse und verbesserte Datenrekonstruktion, bei denen u. a. verstärkt Methoden der Künstlichen Intelligenz zum Einsatz kommen, neue Möglichkeiten zur Suche nach bisher unentdeckten Teilchen oder Phänomenen geschaffen. So sollen unter anderem die Eigenschaften des Higgs-Bosons genauer vermessen und neue Teilchen mit bislang nicht zugänglichen Signaturen oder bislang zu geringen Raten gesucht werden.

Zukünftige neue Teilchenbeschleuniger sind ebenfalls in Planung. Eine **Higgs-Factory** ist ein Elektron-Positron-Collider mit einer sehr hohen Zahl an Begegnungen pro Fläche und Zeit (hohe Luminosität) bei sehr hohen Energien. Higgs-Factories erlauben höchstpräzise Messungen der schwersten

bekanntesten Elementarteilchen (Higgs-Boson, Top-Quark, W- und Z-Boson). Neben der direkten Suche nach neuen Teilchen steht an einer Higgs-Factory auch die indirekte Suche nach neuer Physik im Mittelpunkt.

Am CERN wird derzeit solch ein neuer zirkularer Elektron-Positron-Collider, der **Future Circular Collider (FCC-ee)**, mit einem Umfang von etwa 90 Kilometern in einer Machbarkeitsstudie untersucht. Er könnte Mitte der 2040er-Jahre in Betrieb gehen. Nach Ausschöpfung des Physikprogramms mit Leptonen könnte in ferner Zukunft ein Hadronen-Collider mit bis zu 100 TeV im gleichen Tunnel realisiert werden, wie das schon beim LHC im ehemaligen LEP-Tunnel erfolgreich durchgeführt wurde. Ähnliche Pläne für Zirkularcollider existieren in China.

Alternativ wird das Konzept für einen **Elektron-Positron-Linearcollider** untersucht. Dabei werden die Teilchen nicht im Kreis, sondern auf gerader Strecke beschleunigt. Am weitesten ausgearbeitet sind der supraleitende International Linear Collider (ILC) und der normalleitende Compact Linear Collider (CLIC). Bei etwas geringerer Luminosität als der FCC-ee, liefern Linearcollider die Möglichkeit, die Spins der beteiligten Elementarteilchen gezielt auszurichten, was weitreichende zusätzliche Möglichkeiten für Präzisionsexperimente bietet. Darüber hinaus können Linearcollider später für höhere Energien umgerüstet werden: durch Verlängerung des Beschleunigers oder Einbau von verbesserten oder ganz neuartigen Beschleunigungselementen.

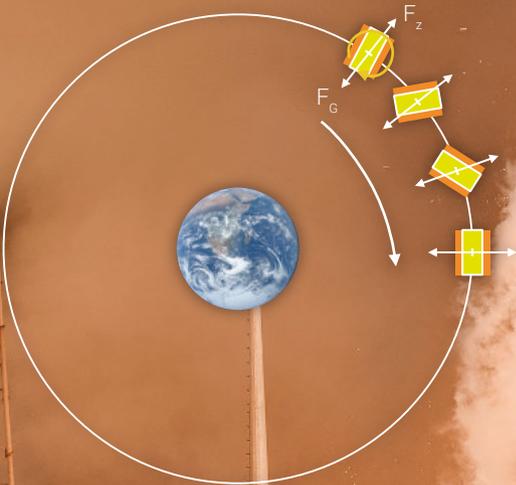
Klaus Desch, Herbert Dreiner und Jörg Pretz

SCHWER GLEICH TRÄGE?

Alle Körper werden von der Schwerkraft gleich stark angezogen, egal aus welchem Material sie bestehen. Das zumindest ist das Ergebnis von Fallexperimenten, die seit Galileo Galilei mit immer größerer Präzision durchgeführt werden. Als schwaches Äquivalenzprinzip stellt sich diese experimentell überprüfte Annahme auch Untersuchungen im Weltall: Mit der Satellitenmission Microscope, die von 2016 bis 2018 ihre Messungen im Orbit ausführte.

Die Hauptinstrumente waren **zwei Differentialakzelerometer**. Eines bestand aus zwei zylindrischen und ineinanderliegenden Testmassen aus unterschiedlichen Materialien (orange und gelb im Bild). Wenn das schwache Äquivalenzprinzip verletzt wäre, würde eine periodische Kraft diese beiden Zylinder mit der Rotation des Satelliten relativ zueinander bewegen. Die Schwerkraft F_G , die zum Erdmittelpunkt zeigt wird im Orbit nämlich gerade durch die Zentrifugalkraft F_Z aus der Orbitalbewegung um die Erde ausgeglichen.

Eine Bewegung würde bedeuten, dass die mit der Gravitation verbundene schwere Masse und die mit der Zen-



trifugalkraft wirkende Träge Masse je nach Material unterschiedlich wären – eine Verletzung des schwachen Äquivalenzprinzips.

Im zweiten, formgleichen Referenzakzelerometer bestanden die zylindrischen Massen aus gleichem Material. Hier sollte aufgrund einer Verletzung des schwachen Äquivalenzprinzips keine relative Bewegung der Massen zu beobachten sein.

Versetzt man den Satelliten in eine Rotationsbewegung mit geeigneter Rotationsfrequenz, so verschiebt man das gesuchte Signal, also die periodische Relativbewegung der beiden Testmassen aus unterschiedlichem Material, in sehr rauscharme Frequenzbereiche verbessert somit die Qualität der wissenschaftlichen Daten.

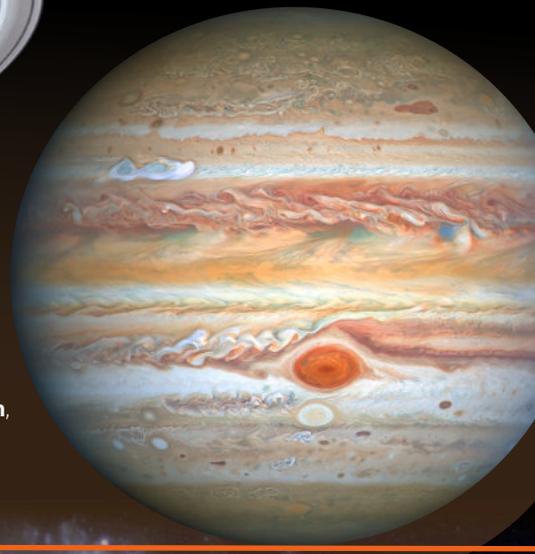
Gegenüber Tests auf der Erde haben Satellitentests mehrere Vorteile:

- Es steht das volle Gravitationsfeld der Erde zur Verfügung.
- Schwache Signale können wegen sehr langer Freifallzeiten akkumuliert werden.
- Es gibt kein seismisches Rauschen.
- Man kann alle Freiheitsgrade im Weltraum ausnutzen.

All diese Vorteile wurden mit dem Design der Microscope-Mission ausgenutzt und führten in Summe zu einer um zwei Größenordnungen verbesserten Bestätigung der Gültigkeit des schwachen Äquivalenzprinzips.

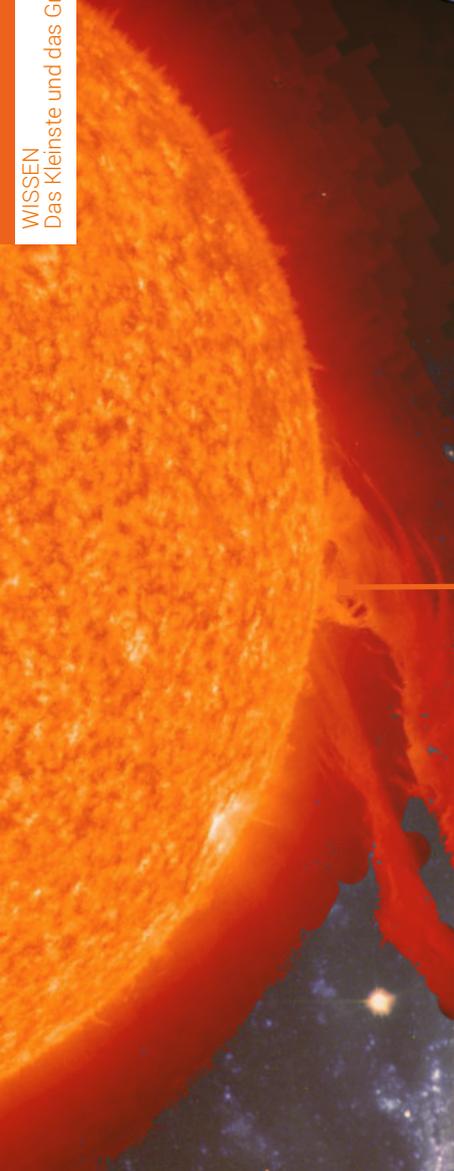
Meike List

Start einer Soyuz-VS-14-Trägerrakete mit mehreren Satelliten als Nutzlast, darunter Microscope.

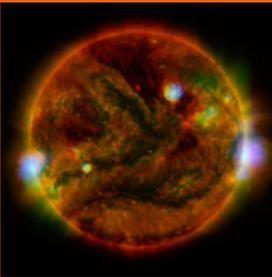


Acht **Planeten** mit vielen **Monden**, zahlreiche **Zwergplaneten**, **Asteroiden**, **Kometen** und die **Sonne** bilden unser **Sonnensystem**.

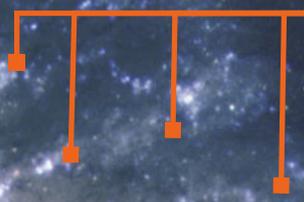
KOSMISCHE OBJEKTE



Im Röntgenlicht zeigt die **Sonne**, dass sie alles andere als ein ruhiges Gestirn ist. Aktive Regionen werden hier deutlich sichtbar. Solche Regionen können zu Massenauswürfen und Teilchenstürmen führen.



Planeten entstehen überall im Universum rund um junge Sterne in **Staubscheiben**. Mit ALMA können die Ringe in Staubschreiben sichtbar gemacht werden, in denen die Protoplaneten ihre Bahnen ziehen.

Unser **Sonnensystem** befindet sich in einem Arm unserer **Milchstraße**. Natürlich können wir die Milchstraße nicht von oben abbilden, das Bild hier zeigt eine ähnliche Galaxie.

Im Zentrum der Milchstraße sitzt ein **massereiches Schwarzes Loch**. 2022 gelang ein erstes Bild davon mit einem die ganze Erde umfassenden Radiointerferometer.

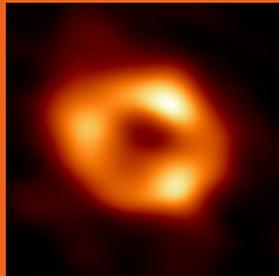
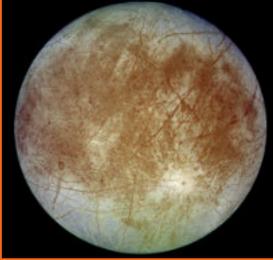


Bild: [nyk/jk](#) mit Hintergrund: NASA; ESA; JAXA; Brent Robertson (UC Santa Cruz), Ben Johnson (Center for Astrophysics, Harvard & Smithsonian), ESO; Sonne: NASA; Saturn: NASA, ESA, A. Simon (Goddard Space Flight Center), and M.H. Wong (University of California, Berkeley); Erde: EUMETSAT/Mars: NASA/ESA and The Hubble Heritage Team STScl/JRA; Kästen: NASA/JPL/DLR; ESO/A. Ciikota et al.; NASA/JPL-Caltech/GSFC/JAXA; ESO, Smithsonian Center for Astrophysics and Gordon and Betty Moore Foundation) and P. Challis (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) ESO/PHANGS; S. Dagnello (NRAO/AUI/NSF)

Die vier großen **Jupitermonde** sind fast schon kleine Planeten. Ob dort die Voraussetzungen für die Entwicklung von Leben existieren, untersucht die Weltraummission JUICE, die 2031 Jupiter erreichen soll.



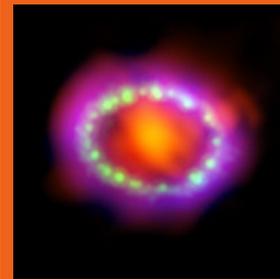
Galaxienhaufen sind so etwas wie Leitfossilien für die Kosmologie. Sie erlauben Einblicke in die Ausdehnungsgeschichte des Universums.

Galaxien und Galaxienhaufen können das Licht dahinterliegender Objekte ablenken. Das kann zu eigentümlichen Bögen und Mehrfachbildern führen, wie hier im Einsteinkreuz.



Die **Milchstraße** ist eines von unzähligen Sternensystemen im Universum. Die Aufnahme des James-Webb-Teleskops enthält praktisch nur **Galaxien**, einige so weit entfernt, dass sie nur als Punkte auszumachen sind.

Am Ende ihrer Lebensdauer können massereiche Sterne als **Supernova** explodieren. Dabei wird ein großer Teil der chemischen Elemente erbrütet. Supernovae sind auch Teilchenbeschleuniger, und eine ihrer Arten kann zur Entfernungsmessung verwendet werden.



Neutronensterne sind Überreste von Sternexplosionen. Oft senden sie als Pulsare regelmäßige Radiopulse entlang ihrer Magnetachse aus. Zuweilen findet man sie sogar in **Doppelsternsystemen**.



Unter anderem aus der Bewegung von Sternen in Galaxien, und daraus, dass es ausgeprägte Strukturen im Universum gibt, lässt sich übereinstimmend ableiten, dass es eine Form von Materie gibt, die sich bisher allen direkten Beobachtungsmethoden entzieht: die **Dunkle Materie**.



In manchen Galaxien entstehen besonders viele Sterne. Mit einer speziellen Aufnahmetechnik konnten die **Sternentstehungsregionen** in der Galaxie M61 hier sichtbar gemacht werden.



Im Zentrum vieler Galaxien finden sich **Schwarze Löcher**. Manche senden intensive Strahlung aus, weil Material in sie hineinstürzt. Dabei werden energiereiche Teilchen ausgesendet.



GRAVITATION

Die Gravitation – die Schwerkraft – beherrscht alle großskaligen Phänomene im Universum, vom Urknall über die Entstehung von Galaxien und Sternen bis hin zu Planetensystemen. Sie wird äußerst präzise mit der allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben, die einige überraschende Vorhersagen beinhaltet.

Zwar beschreibt schon die auf Isaac Newton zurückgehende Gravitationstheorie die Mehrzahl der galaktischen und planetaren Phänomene zutreffend und für viele Zwecke ausreichend genau. Für das Verständnis der kosmischen Entwicklung, der Pulsare oder der Schwarzen Löcher braucht es jedoch die von Albert Einstein entwickelte allgemeine Relativitätstheorie (ART). Diese wird auch für in den letzten Jahren entwickelte sehr genaue experimentelle Methoden immer wichtiger, ebenso wie für Alltagsanwendungen wie das GPS, die Definition der internationalen Atomzeit oder die Geodäsie.

Diese Beschreibung der Schwerkraft durch die Metrik der Raumzeit ist erheblich komplizierter und damit auch reichhaltiger als die Newtonsche Beschreibung. Außer der Anziehung zwischen Massen enthält sie einen Anteil, der wie ein gravitatives Magnetfeld wirkt, und einen weiteren, der wellenförmige Schwingungen der Raumzeit beschreibt. Jeder dieser Anteile äußert sich auf ganz spezielle Weise in Beobachtungen oder Experimenten.

Experimentelle Bestätigung der ART

Einstein selbst konnte die Vorhersagen seiner Theorie nur im sehr schwachen Gravitationsfeld des Sonnensystems überprüfen. Er erkannte, wie ein bis dahin unverstandener, kleiner Beitrag zur Periheldrehung des Planeten Merkur aus seiner Theorie folgt. Weiterhin sagte er voraus, dass Sternlicht, das auf seinem Weg zu irdischen Teleskopen nahe an der Sonne vorbeigeht, doppelt so stark abgelenkt würde

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

wie aufgrund der Newtonschen Theorie zu erwarten wäre. 1919 konnte Sir Arthur Eddington diese Ablenkung während einer totalen Sonnenfinsternis tatsächlich messen. Daraufhin erlangte die ART große Akzeptanz als neue, verbesserte Theorie der Raumzeit und der Gravitation.

Die ART sagt viele weitere Effekte voraus, die sich aus der vorherigen Newtonschen Gravitationstheorie nicht ergeben. Zu den bekanntesten und wichtigsten Auswirkungen der allgemeinen Relativitätstheorie gehören:

- **Periheldrehung:** Körper umlaufen andere Körper nicht auf geschlossenen, elliptischen Bahnen, sondern auf Rosettenbahnen, die sich von einem Umlauf zum nächsten umso stärker unterscheiden, je stärker das Gravitationsfeld ist.
- **Lenze-Thirring-Effekt:** Rotierende Massen ziehen die umgebende Raumzeit mit sich und versetzen sie dadurch selbst in eine Rotation. Diese führt dazu, dass Kreisel in solchen Gravitationsfeldern ihre Rotationsachse ändern.
- **Gravitationslinseneffekt:** Massen lenken Licht auf ähnliche Weise ab wie Sammellinsen. Dies führt zu beobachtbaren Bildverzerrungen und Mehrfachbildern. In extremen Fällen können Lichtstrahlen von der Rückseite ihrer Quellen zum Beobachtungspunkt gelangen.
- **Gravitative Rotverschiebung und Zeitverzögerung:** Lichtsignale, die Gravitationsfelder verlassen, erscheinen entfernten Beobachtenden rotverschoben. Ebenso gehen Uhren in

GRUNDZÜGE DER ALLGEMEINEN RELATIVITÄTSTHEORIE

Die ART baut auf zwei Grundsätzen auf. Erstens: Alle Körper fallen im Gravitationsfeld gleich schnell, unabhängig von ihrer Größe und Zusammensetzung. Dies ist das Äquivalenzprinzip. Zweitens lauten physikalische Gesetze in allen Bezugssystemen gleich, unabhängig davon, wo und in welchem Bewegungszustand sich das Bezugssystem befindet. Die Gültigkeit dieser Grundlagen wurde experimentell mit enorm hoher Genauigkeit gesichert. Diese beiden Grundsätze besagen, dass die Gravitation durch eine Geometrie beschreibbar ist, die Raum und Zeit miteinander verknüpft (Raumzeit) und dass man sie durch Wahl eines geeigneten Bezugssystems verschwinden lassen kann: Im freien Fall wirkt lokal keine Schwerkraft.

Die **Einsteinschen Feldgleichungen** legen fest, wie die Geometrie der Raumzeit auf die Anwesenheit von Materie und Energie reagiert. Dies führt zu einer Metrik, die den Abstand zweier beliebiger Punkte in der Raumzeit beschreibt. Der Abstand zweier Punkte auf einer Kurve durch die Raumzeit lässt sich interpretieren als diejenige Zeit, die aus eigener Sicht vergeht, wenn man sich längs dieser Kurve bewegt. Aus dieser Überlegung ergibt sich ein Bewegungsgesetz, bei dem an die Stelle gerader Linien für frei fallende Körper die kürzesten Linien (Geodäten) treten. Diese geodätischen Linien folgen mit ihrer Krümmung der Geometrie der Raumzeit.

stärkeren Gravitationsfeld langsamer als solche in schwächeren. Und von außen gesehen scheint Licht sich in einem stärkeren Gravitationsfeld langsamer auszubreiten (Shapiro-Effekt). Die lokal gemessene Lichtgeschwindigkeit bleibt trotzdem immer gleich.

- **Gravitationswellen und Strahlungsrückwirkung:** Laut ART strahlen zwei auf Ellipsen umeinander sich bewegende Körper Gravitationswellen ab. Dadurch verliert das System Energie, sodass die Bahnen schrumpfen und die Körper sich immer näher kommen. Das geschieht allerdings – bis auf die Ausnahme der Endphase in der Verschmelzung kompakter massereicher Objekte – sehr langsam.

Die Einsteinschen Feldgleichungen sagen aber auch Objekte voraus, die weit jenseits der menschlichen Vorstellungskraft liegen. Das sind insbesondere die Schwarzen Löcher, die sehr seltsame Eigenschaften besitzen. Die bekannteste davon ist, dass das Gravitationsfeld in ihrer Nähe so stark ist, dass selbst Licht aus einem Bereich des Schwarzen Lochs nicht mehr entkommen kann. Allerdings gibt es charakteristische Strahlung von Materie außerhalb und in der Nähe von Schwarzen Löchern, insbesondere von Akkretionsscheiben. Dies erlaubt seit 2019 die Beobachtung des „Schattens“ von Schwarzen Löchern durch weltweit zusammengeschaltete Radioteleskope (siehe Seite 61).

Ein neues Fenster ins Universum

Schwarze Löcher zeigen sich auch in den erwähnten Gravitationswellen (siehe auch Seite 64). Diese Wellen der Raumzeit sind typischerweise sehr schwach, wurden aber 2015 zum ersten Mal direkt nachgewiesen (Nobelpreis 2017). Die Kollision von zwei Schwarzen Löchern regt die Raumzeit zu derart starken Schwingungen an, dass mittlerweile über 200 solcher Ereignisse durch Gravitationswellen beobachtet werden konnten. Auch andere Objekte und Vorgänge mit extremer Gravitation erzeugen Gravitationswellen – etwa Systeme von Neutronensternen, aber prinzipiell auch Supernovae oder die Expansion des Universums im Urknall. Die Gravitationswellenastronomie liefert also insbesondere Informationen über Vorgänge, die im elektromagnetischen Spektrum unsichtbar bleiben, wie den Verschmelzungsprozess Schwarzer Löcher.

Die ART ist gegenwärtig die bei Weitem genaueste und erfolgreichste Theorie der Gravitation, die wir kennen. Zugleich ist jeder Test der Relativitätstheorie auch der Versuch, die Physik jenseits der ART zu erkunden. Vieles deutet darauf hin, dass eine Kombination von ART und Quantentheorie weitere Überraschungen bereithält.

*Matthias Bartelmann, Bernd Brügmann,
Eva Hackmann und Claus Lämmerzahl*

FUNDAMENTALE ENTWICKLUNGEN IN DER GRAVITATIONSPHYSIK

- ca. 1590 **Galileo** Äquivalenzprinzip
- 1609–1619 **Kepler** Kepler-Gesetze der Planetenbewegung
- 1687 **Newton** Newtonsches Gravitationsgesetz
- Mitte 19. Jhd. **Urbain Leverrier** Beobachtung der Periheldrehung
- 1905 **Einstein** spezielle Relativitätstheorie
- 1915 **Einstein** allgemeine Relativitätstheorie
- 1919 **Eddington** Lichtablenkung
- 1960 **Pound und Rebka** gravitative Rotverschiebung
- 1965 **Penzias und Wilson** kosmische Hintergrundstrahlung (Nobelpreis)
- 1968 **Shapiro** gravitative Zeitverzögerung
- 1974 **Hulse und Taylor** Binärsystem Neutronenstern-Pulsar J1915+1606 (Nobelpreis)
- ab 1992 **Genzel und Ghez** Sterne um Sgr A* (Nobelpreis)
- 1998 **Perlmutter, Riess, Schmid** beschleunigte kosmische Expansion (Nobelpreis)
- 2003 **Burgay** Doppelpulsar PSR J0737-3039
- 2004 **Ciufolini** Lense-Thirring-Effekt
- 2012 **Everitt** Schiff-Effekt
- 2015 **LIGO-Konsortium** Gravitationswellen (Nobelpreis)
- 2019 **EHT-Konsortium** Schatten Schwarzer Löcher

Vier Gravitationswellendetektoren beteiligen sich zur Zeit an der Beobachtung: die beiden LIGO-Detektoren in den USA, VIRGO in Italien (Foto unten) und KAGRA in Japan. Das Messprinzip ist identisch: In zwei senkrecht zueinander stehenden Armen verlaufen Laserstrahlen. Geht eine Gravitationswelle durch den Detektor, dann wird ein Arm etwas länger, der andere etwas kürzer, was durch eine geschickte Überlagerung des Laserlichts aus beiden Armen sichtbar gemacht werden kann, auch wenn es nur Bruchteile eines Atomkerndurchmessers sind!



SCHWARZE LÖCHER UND PULSARE

In unserem Universum entstehen und vergehen Sterne – teils auf spektakuläre Art. Erst in einigen Milliarden Jahren wird dieser Prozess zum Erliegen kommen. Bis dahin formen die Sterne am Ende ihres Lebens exotische Objekte, die beeindruckend sind und auch Einblicke in die Extrembereiche der Physik erlauben.

Zu den exotischsten Objekten im Universum gehören **Neutronensterne** und **Schwarze Löcher**: In ersteren werden der Zustand der Materie und die Gravitation ins Extreme getrieben. Dort treten die höchsten möglichen Dichten und Drücke auf. Und in Schwarzen Löchern gibt es so starke Gravitationsfelder, dass nichts mehr aus ihrem Bereich entweichen kann – nicht einmal Licht. Sterne mit einer Masse von weniger als dem rund Zehnfachen der Sonnenmasse entwickeln sich zu **Weißen Zwergen**, wenn ihr Vorrat an Brennstoff aufgebraucht ist. Sie verglühen dann langsam und werden zu Sternleichen. Dagegen entstehen Neutronensterne aus dem Kollaps großer, massereicher Sterne. Wenn zwei Neutronensterne miteinander verschmelzen oder besonders massereiche Sterne kollabieren, können Schwarze Löcher entstehen. Daneben gibt es auch supermassereiche Schwarze Löcher in Zentren von Galaxien.

Beobachtung Schwarzer Löcher

Schwarze Löcher werden durch die allgemeine Relativitätstheorie (ART) von Albert Einstein vorhergesagt und sind extrem kompakte Objekte, die sich durch ihre starke Anziehungskraft auszeichnen. Die Theorie beschreibt sie als Regionen, in denen die Gravitation so stark ist, dass nichts, was sich innerhalb eines bestimmten Radius – dem sogenannten Ereignishorizont – befindet, entkommen kann, nicht einmal Licht. Diese Objekte enthalten im Zentrum eine punktförmige Singularität, in der in einem gewissen Sinne die Masse konzentriert und die Raumzeit unendlich gekrümmt ist und letztendlich die Beschreibung der Physik zusammenbricht.

Die ART sagt präzise voraus, wie sich Sterne und Lichtstrahlen in der Nähe von Schwarzen Löchern bewegen. So gibt es etwa Bahnen, die sich auf einer Spirale auf das Schwarze Loch zubewegen, Bahnen, die das Schwarze Loch mehrfach umrunden und dann wieder ins Unendliche zurückkehren, und solche, die durch die Rotation des Schwarzen Lochs beeinflusst werden und ihre Bahnlage verändern. Selbst Licht kann im Abstand von 1,5 **Schwarzschildradien** auf einer instabilen Kreisbahn um ein Schwarzes Loch zirkulieren, wodurch eine sogenannte Lichtsphäre entsteht. Eine Astronautin würde dort ihren eigenen Hinterkopf sehen. Diese komplexen, durch die ART berechenbaren Bahnen erlauben Rückschlüsse auf die physikali-

schen Bedingungen um Schwarze Löcher, auch wenn wir keine Informationen aus ihrem Innern bekommen.

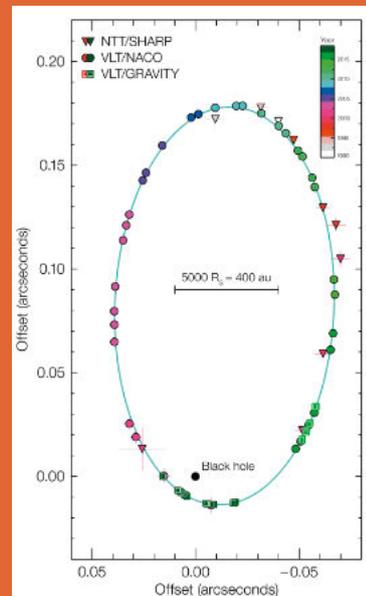
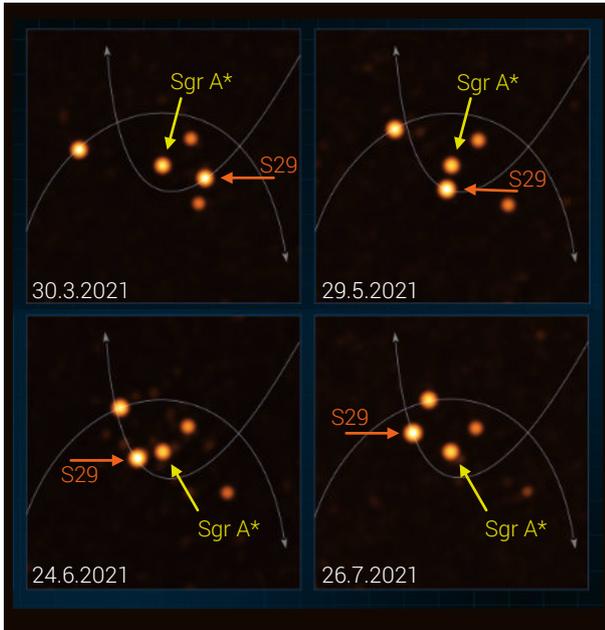
Obwohl Schwarze Löcher nicht direkt nachweisbar sind, sprechen starke Belege für ihre Existenz. Theoretisch könnte es immer noch Objekte geben, die einen minimal größeren Radius als den Ereignishorizont haben, jedoch müsste es sich dabei um eine höchst exotische Materieform handeln, für die es bisher keinerlei Hinweise gibt.

Schwarze Löcher spielen eine zentrale Rolle in der Astrophysik. In den Zentren der meisten Galaxien finden sich supermassereiche Schwarze Löcher mit Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Solche Schwarzen Löcher besitzen gewaltige Anziehungskräfte, die zu gewaltigen Prozessen führen: In einem als Akkretion bezeichneten Prozess wird benachbartes Material auf einer Spiralbahn in Richtung des Schwarzen Lochs gezogen und dabei durch Reibung und andere Prozesse stark erhitzt. Es wird zum Plasma und setzt große Energiemengen in Form von Strahlung frei. Diese Strahlung erstreckt sich über das gesamte elektromagnetische Spektrum und zeigt oft auffällige, zeitlich veränderliche Leuchterscheinungen. Die gewaltigen Magnetfelder um Schwarze Löcher können das einfallende Plasma bündeln und es in Form von hochenergetischen Teilchenströmen, sogenannten Jets, mit enormen Geschwindigkeiten in den Weltraum schleudern.

In unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße, konnten Astronomen im galaktischen Zentrum die Bewegung von Sternen beobachten, deren Bahnen auf ein **supermassereiches Schwarzes Loch** hindeuten. Die zentrale Region der Milchstraße beherbergt einen dichten, leuchtenden Sternhaufen sowie extrem heißes Gas. Durch die Nähe unseres galaktischen Zentrums im Vergleich zu den Kernen entfernter Galaxien lässt sich dieses supermassereiche Schwarze Loch besonders genau untersuchen. Da das Zentrum der Milchstraße von Staubpartikeln verdeckt ist, sind Beobachtungen im sichtbaren Licht jedoch nicht möglich. Langwelligeres Infrarot- oder Radiolicht sowie kurzwellige Röntgen- und Gammastrahlung können diesen Staub jedoch durchdringen, wodurch die Beobachtung der Bewegungen von Gas und Sternen in der Nähe des Zentrums möglich wird.

Bereits in den 1970er-Jahren deuteten Beobachtungen der Gasgeschwindigkeiten nahe der kompakten Radioquelle **Sagittarius A*** (Sgr A*) auf eine Masse von Millionen Sonnen hin. Spätere Messungen der Geschwindigkeit von Sternen in den 1990er-Jahren bestätigten diese Hypothese. Die Indizien, dass es sich bei dieser Massenkonzentration um ein

Der **Schwarzschildradius** ist ein Maß für die Größe des Schwarzen Lochs. Licht, das den Schwarzschildradius nach innen passiert, wird unumkehrbar in die Singularität im Zentrum gelenkt. Der Schwarzschildradius für ein Schwarzes Loch mit der Masse der Sonne beträgt rund drei Kilometer.



Die Arbeiten von **Reinhard Genzel** und von **Andrea Ghez** über die Vermessung der Sternbahnen nahe Sgr A* und dem Nachweis eines ultrakompakten Objekts im Zentrum unserer Milchstraße wurde 2020 mit dem **Nobelpreis für Physik** ausgezeichnet. Die Messungen von Genzel und seiner Gruppe begannen Anfang der 1990er Jahre mit eigens dafür entwickelten Teleskopen, die an verschiedenen Teleskopen der Europäischen Südsternwarte (ESO) eingesetzt wurden. Nicht nur die Position, auch die Geschwindigkeit der Sterne konnte dabei zur Bestätigung der ART und der Existenz des supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße beitragen.

Diese Bilder wurden zwischen März und Juli 2021 mit dem GRAVITY-Instrument am Very Large Telescope Interferometer (VLT) der ESO aufgenommen. Sie zeigen Sterne in der Umgebung von Sgr A* (gelber Pfeil). Einer dieser Sterne – S29 – wurde beobachtet, als er sich dem Schwarzen Loch bis auf 13 Milliarden Kilometer näherte, was gerade einmal der 90-fachen Entfernung zwischen Sonne und Erde entspricht. Die Sterne in der Nähe von Sgr A* werden mit S1...Sx. Der * in Sgr A* kennzeichnet, dass es sich um eine Radioquelle handelt.

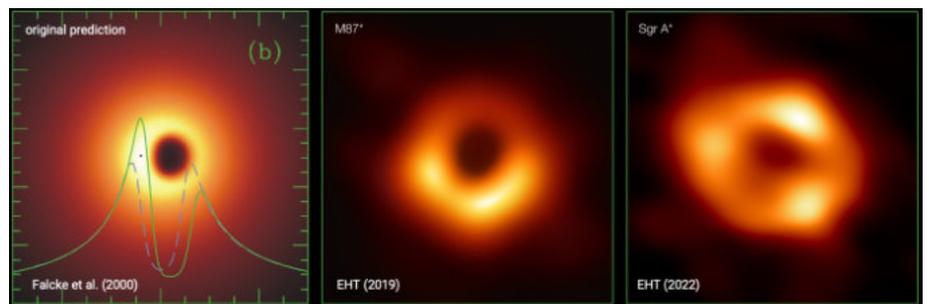
Schwarzes Loch handelt, verdichteten sich durch immer bessere Beobachtungstechnologien in den frühen 2000er-Jahren. Durch den Einsatz von hochauflösenden Teleskopen wie dem Very Large Telescope (VLT) der ESO und dem Keck-Teleskop auf Hawaii konnten Astronomen 2002 beobachten, dass der Stern S2 eine stark elliptische Umlaufbahn um Sgr A* beschreibt. Diese Umlaufbahn führte den Stern auf etwa 1200 Schwarzschildradien an das Schwarze Loch heran. Bis 2010 konnten Astronomen zudem die Bahnen von etwa 20 weiteren Sternen in unmittelbarer Nähe von Sgr A* analysieren, die teils extrem nahe an das galaktische Zentrum herankommen.

Die Nähe und die Bewegungsmuster dieser Sterne schließen die Hypothese eines gewöhnlichen Sternhaufens aus, da ein solcher die beobachteten Effekte nicht hervorrufen würde. Weitere Fortschritte wurden 2016 und 2017 mithilfe interferometrischer Methoden erzielt, die eine Auflösung im Bereich von etwa drei Mikrobogensekunden erreichte.

Diese Messungen erlaubten eine noch präzisere Bestimmung der Masse und Entfernung des Schwarzen Lochs und ergaben, dass es rund 4,3 Millionen Sonnenmassen in 8280 Parsec Entfernung von uns besitzt. Die auf der Erde beobachtete Strahlung des Sterns S2 auf seiner hochelliptischen Bahn um Sgr A* zeigt eine gravitative Rotverschiebung und eine Laufzeitverzögerung, die auch in di-

rekter Nähe zum Schwarzschild-Horizont die Gültigkeit der ART zeigen und somit die Existenz eines Schwarzen Lochs weiter bestätigen. Es wurden auch Materiewolken nachgewiesen, die Sgr A* in einem Abstand von 5 Schwarzschildradien umkreisen. Damit ist nachgewiesen, dass Sgr A* ein ultrakompaktes Objekt sein muss. Alle notwendigerweise extrem exotischen Modelle von ultrakompakten Objekten, die keine Schwarzen Löcher sind, stehen im Widerspruch zu den Beobachtungen.

Die Entwicklung des Event Horizon Telescope (EHT) markiert einen bedeutenden Fortschritt, da es 2019 gelang, das erste Bild des Schattens eines Schwarzen Lochs in der Galaxie M87 aufzunehmen. Die Größe und Form dieses Schattens stimmen mit den Vorhersagen der ART überein und bestätigen die Berechnungen zur Raumzeitkrümmung. Innerhalb der ART ist die Größe des Schattens proportional zur Masse des Schwarzen Lochs, was eine direkte Überprüfung der Theorie ermöglichte. Die Beobachtung der Schattenform erlaubt den Vergleich mit alternativen Gravitationstheorien, die abweichende Form und Größe des Schattens vorhersehen würden. Auch Sgr A* wurde vom EHT beobachtet und sein Schatten vermessen, dessen Größe mit den Messungen mittels GRAVITY kompatibel ist.



Eine frühe Modellvorhersage des Schattens des Schwarzen Lochs in Sgr A* (links) im Vergleich zu den von der Event Horizon Telescope Collaboration 2019 und 2022 veröffentlichten Bildern von M87* (Mitte) und Sgr A* (rechts).

Für das EHT sind mehrere Radioteleskope weltweit interferometrisch zusammengeschaltet. So entsteht ein gemeinsames Teleskop mit sehr großer Basislänge, was die benötigte höchste Winkelauflösung ermöglicht.



In den kommenden Jahren soll das EHT durch eine erweiterte Anzahl an Teleskopen verbessert werden, darunter zusätzliche Stationen in Namibia, auf den Kanarischen Inseln und in den USA. Auch die europäische Forschung beteiligt sich mit Einrichtungen wie ALMA und dem NOEMA-Array in Frankreich. Mehr Teleskope, die gemeinsam eine größere Basislänge für die benutzte Methode der Radiointerferometrie und eine bessere Verteilung über die Erdkugel bieten, ermöglichen nicht nur schärfere Bilder, sondern auch eine genauere Analyse dynamischer Prozesse im Plasmaring um Schwarze Löcher. Durch die Aufnahme von Bildern in kurzen zeitlichen Abständen lassen sich Veränderungen in der Materiestruktur und der Energieverteilung um Schwarze Löcher besser verstehen.

Darüber hinaus ermöglichen die Kombination von hochauflösenden Bildern im Submillimeterbereich und Beobachtungen mit dem GRAVITY+-Interferometer der ESO Einblicke in verschiedene Wellenlängenbereiche und Dynamiken. So wird es

möglich, die Wechselwirkungen zwischen Plasmaströmen und Magnetfeldern um das Schwarze Loch im Detail zu untersuchen. Künftig könnte auch die Entdeckung eines Pulsars in der Nähe eines Schwarzen Lochs, etwa mit dem Square Kilometre Array (SKA), dazu beitragen, die ART in diesen Extremregionen zu testen. Pulsare bieten durch ihre mit ihrer Rotation präzise wiederkehrenden Strahlungsimpulsen eine Art kosmische Uhr und erlauben darüber hochgenaue Messungen ihrer Bewegungen.

In der fernen Zukunft könnten Radioteleskope im Weltraum die Abbildung Schwarzer Löcher, die Ausmessung des Schattens und die Beobachtung weiterer Ereignisse in ihrer Nähe weiter verbessern. Ein einzelnes Radioteleskop im Orbit wäre ein erster Schritt, langfristig ist jedoch der Einsatz von mehreren solchen Teleskopen in der Erdumlaufbahn geplant. Dies würde eine höhere Auflösung und Frequenzabdeckung ermöglichen, was für die Untersuchung von Jets und Plasmabewegungen um Schwarze Löcher entscheidend ist. Die nächsten Jahrzehnte versprechen, durch Fortschritte in der Teleskoptechnik ein vollständigeres Bild von Schwarzen Löchern und ihren Effekten auf das umliegende Universum zu gewinnen. Durch genauere Messungen des Drehimpulses und der Jets könnten die Fragen zur Struktur und Entstehung dieser kosmischen Objekte endgültig geklärt und das Verständnis der ART auf eine völlig neue Grundlage gestellt werden.



In der Umgebung supermassereicher Schwarzer Löcher finden viele Prozesse statt, die zur Emission von Materie und Strahlung in unterschiedlichen Energiebereichen führen. Diese künstlerischen Darstellung zeigt sowohl den Schatten des Schwarzen Lochs im Zentrum als auch eine Akkretionsscheibe und einen gewaltigen Jet aufgeheizten Materials.

Gravitationswellen

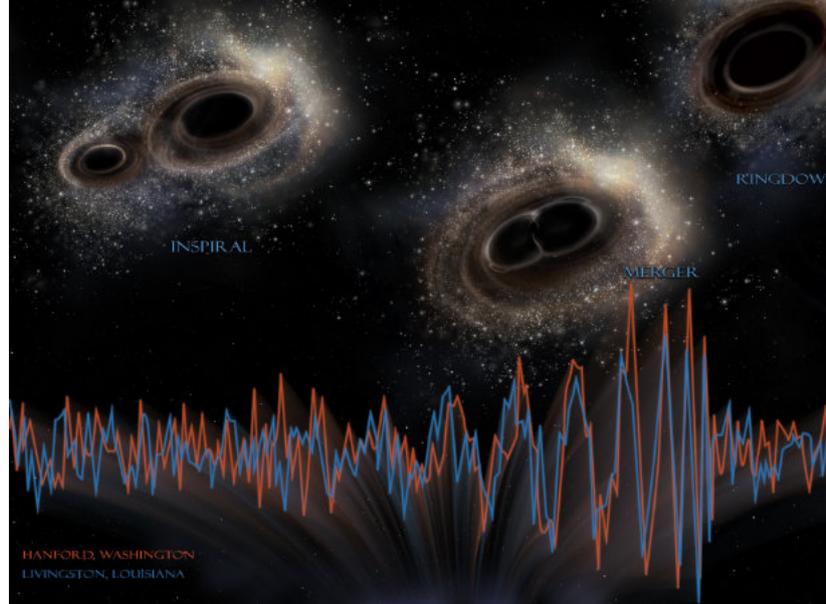
Die **Gravitationswellenastronomie** erlaubt es seit 2015, kosmisches Rauschen durch Gravitationswellen zu „hören“ – eine völlig neue Art, Ereignisse im fernen Universum zu erfassen. Diese Wellen sind Schwingungen der Raumzeit, die entstehen, wenn extrem massereiche Objekte wie Schwarze Löcher oder Neutronensterne kollidieren und verschmelzen. Die ersten Beweise für die Existenz von Gravitationswellen gab es schon seit den 1980er-Jahren dank Messungen an Pulsaren. Direkt wurden Gravitationswellen auf der Erde erstmals von den Detektoren LIGO und Virgo beobachtet. Schon das erste Ereignis überraschte die Fachwelt: Zwei Schwarze Löcher, jeweils mit mehr als 30 Sonnenmassen, verschmolzen zu einem größeren Schwarzen Loch. Solche großen Massen waren für stellare Schwarze Löcher, also solche, die aus ausgebrannten Sternen entstehen, bis dahin unerwartet und warfen neue Fragen zur Entstehung dieser Objekte auf. Heute registrieren die Detektoren regelmäßig Gravitationswellen von Verschmelzungen Schwarzer Löcher mit bis zu 100 Sonnenmassen. Diese Schwarzen Löcher sind zwar sehr massereich, aber noch weit masseärmer als die supermassereichen Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien. Auch die Kollisionen von Neutronensternen, die ebenfalls Gravitationswellen freisetzen, liefern entscheidende Informationen über die Entstehung schwerer Elemente wie Gold und Platin, die bei solchen Zusammenstößen erzeugt werden (siehe Seite 51).

Wie man mithilfe der Quantenphysik Laser verbessern kann, um mit ihnen dann Gravitationswellenastronomie zu betreiben, ist das Arbeitsfeld von **Michèle Heurs**. Im Video berichtet Sie über ihre Forschung, ihre Motivation und welche Herausforderungen das Feld birgt.

<https://physik-erkenntnisse-perspektiven.de/heurs>



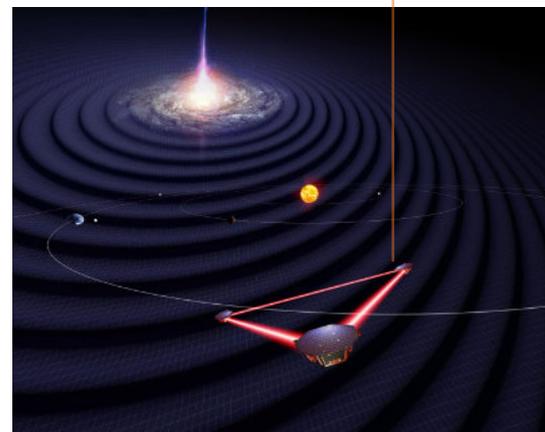
Viele **Technologien** der Gravitationswellenforschung wurden in Deutschland entwickelt, insbesondere am GEO600-Detektor in Hannover. GEO600 war weltweit der erste, der mit gequetschtem Licht arbeitete, einer Technik, die die Empfindlichkeit der Messungen verbessert (siehe Seite 25). Diese Technologie wird inzwischen auch am Virgo-Observatorium eingesetzt und führt zu erhöhter Messgenauigkeit. Auch in der Laserentwicklung ist Deutschland führend: Hochleistungslasersysteme mit über 400 Watt, die für künftige Detektoren wie das europäische Einstein-Teleskop (ET) und den amerikanischen Cosmic Explorer (CE) benötigt werden, wurden hier entwickelt. Das ET, ein geplantes unterirdisches Observatorium in Europa, ist als Dreieck mit drei Kilometern Sei-



Beim Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher werden intensive Gravitationswellen abgestrahlt – am stärksten unmittelbar vor dem Ende des Prozesses. Auf der Erde wurden im Jahr 2015 zum ersten Mal die daraus folgenden minimalen Verzerrungen der Raumzeit mit den beiden LIGO-Detektoren gemessen (blaue und orange Kurve).

tenlänge konzipiert und wird das erste Observatorium der dritten Generation sein. 2021 wurde das ET in den europäischen ESFRI-Fahrplan für Forschungsinfrastrukturen aufgenommen. Aktuell dient das 10-Meter-Prototyp-Interferometer in Hannover zur Weiterentwicklung der Technologie, um die Standardquantengrenze in einem wichtigen Frequenzbereich zu überschreiten und damit die Empfindlichkeit weiter zu steigern. Hier forscht man an kontinuierlichen, präzisen Messungen und der Kontrolle komplexer quantenphysikalischer Systeme.

Auch im Bereich der **Interferometrie** im Weltraum werden große Fortschritte erzielt. Ein im Weltraum positionierter Gravitationswellendetektor kann niederfrequente Signale erfassen, die durch supermassereiche Schwarze Löcher aus galaktischen Zentren und aus der Frühzeit des Universums stammen. Ein Meilenstein war die erfolgreiche LISA-Pathfinder-Mission, die zwischen 2015 und 2017 das Potenzial der geplanten LISA-Mission (Laser Interferometer Space Antenna) testete und deutlich mehr als die nötige Präzision im Sub-Millihertz-Bereich unter Beweis stellte. **LISA** (Start in den 2030er-Jahren) wird aus drei Satelliten bestehen, die ein riesiges, im Weltraum positioniertes Interferometer mit einer Seitenlänge von 2,5 Millionen Kilometern bilden. Diese Mission, von Deutschland initiiert und von der ESA übernommen, wird es ermöglichen, die Verschmelzung supermassereicher Schwarzer Löcher überall im Universum zu beobachten. Durch die hohe Empfindlichkeit für niederfrequente Gravitationswellen kann LISA Informationen aus bisher unerreichten Bereichen des



Universums liefern und die von Einstein vorhergesagte Raumzeitgeometrie mit nie dagewesener Genauigkeit bestätigen.

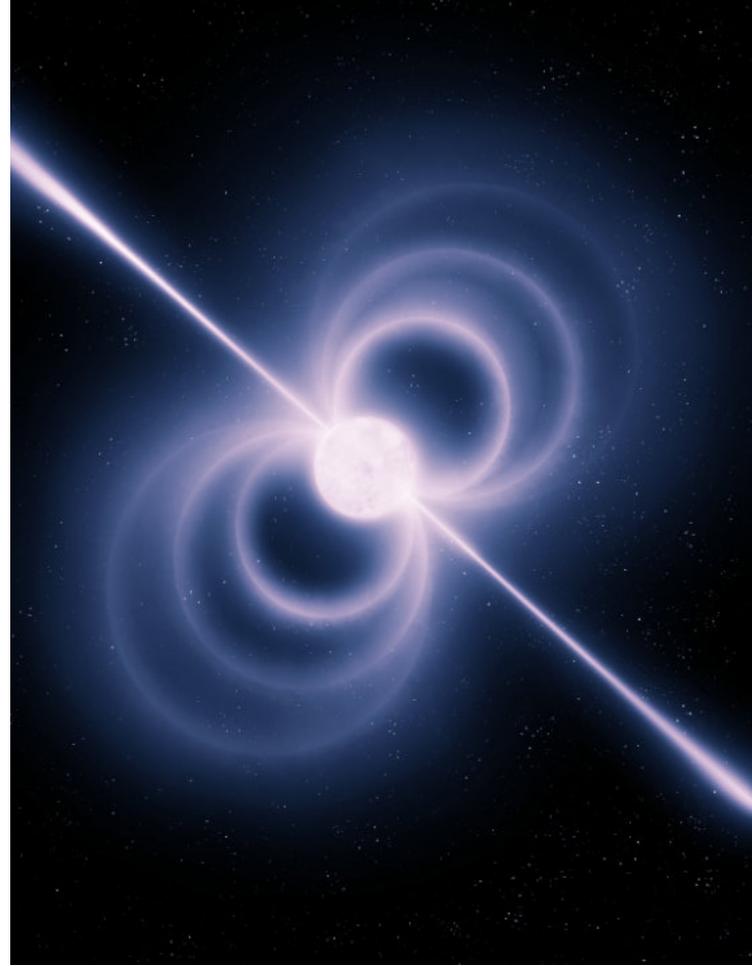
Der weitere Ausbau des Event Horizon Telescope und die geplanten Entwicklungen im Bereich der Gravitationswellenforschung werden es ermöglichen, die Physik extrem massereicher Objekte besser zu verstehen und die allgemeine Relativitätstheorie auch unter extremen Bedingungen weiter zu überprüfen. Die Kombination von hochauflösenden Beobachtungen und weltraumgestützter Interferometrie wird neue dynamische Einblicke in die Prozesse um Schwarze Löcher geben, wie etwa die Entstehung und Beschleunigung von Plasmaströmen (Jets) und die Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung.

Mit den künftigen Missionen und Observatorien rückt die Vision einer umfassenden Gravitationswellenkarte des Universums näher. Wir könnten so Antworten auf einige der tiefsten Fragen finden: Wie entstanden die ersten Schwarzen Löcher? Gibt es Schwarze Löcher aus der Frühzeit des Universums, die die Galaxienbildung beeinflussten? Welchen Einfluss hatten sie auf die Entstehung schwerer Elemente? Die Gravitationswellenastronomie, von der erstmals Albert Einstein vor über 100 Jahren sprach, wird uns in den kommenden Jahrzehnten völlig neue Einblicke in das Leben und die Geschichte des Kosmos eröffnen. Hier helfen insbesondere auch die **Pulsare**, die ein Fenster des Gravitationswellenspektrum eröffnen, das anders nicht erschließbar ist.

Pulsare

Pulsare sind hoch magnetisierte, **rotierende Neutronensterne**, die intensive Radiostrahlung entlang ihrer Magnetfeldachsen aussenden. Sie sind in der Astrophysik von großem Interesse, da sie Einblicke in Zustände extremer Materiedichte geben. Die Dichte von Neutronensternen, den dichtesten Objekten im Universum, erreicht etwa 10^{17} kg/m^3 und steigt zum Zentrum hin weiter an. Die präzise Beobachtung von Pulsaren ermöglicht es, Aussagen über die bisher unbekannt Zustandsgleichung von Materie bei solche Dichten zu machen. Von Beobachtungen untermauerte Untersuchungen zeigen, dass die Neutronensterne maximal etwas mehr als zwei Sonnenmassen schwer sein können und dabei einen Radius von höchstens zwölf Kilometern besitzen.

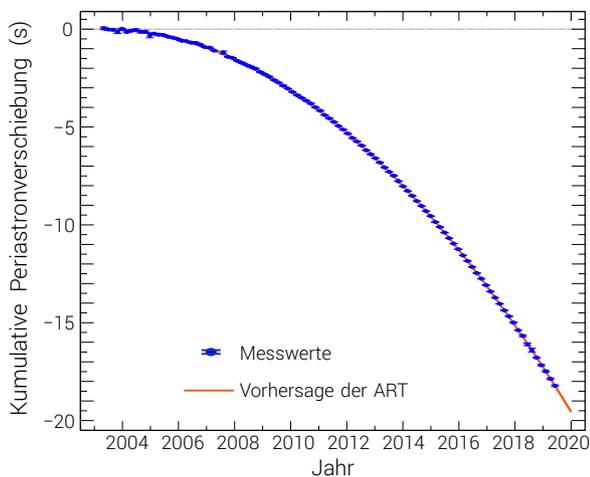
Mit dem **Pulsar-Timing**, einer Methode zur Messung der Ankunftszeiten der Pulse, können Wissenschaftler:innen die Rotation von Pulsaren genau verfolgen. Besonders junge Pulsare zeigen Unregelmäßigkeiten, die Hinweise auf den Zustand im Innern geben und darauf hinweisen, dass der Neutronenstern unter seiner harten Kruste einen flüssigen Kern besitzen könnte. Pulsare strahlen im Radiobereich mit außergewöhnlich hoher Kohärenz und oft starker Polarisation, was eine detaillierte Analyse der Magnetosphäre der Pulsare erlaubt. Die Magnetfelder von Pulsaren können mit Werten von 10^9 bis 10^{11} Tesla extrem stark sein – eine Größenordnung, die auf der Erde nicht erreicht werden kann. Diese starken Magnetfelder erzeugen in der Nähe der Magnetpole durch Paarbildung ein Plasma.



Künstlerische Darstellung eines Pulsars. Der Neutronenstern rotiert schnell um seine Achse, die nicht mit der Achse des Magnetfelds übereinstimmt. Dadurch kreisen die Jets und die damit verbundene Strahlung wie ein Leuchtturm um die Rotationsachse. Pulse in vielen Wellenlängenbereichen gelangen so zu uns, die den Objekten ihren Namen gegeben haben: aus dem englischen Begriff pulsating star (pulsierender Stern).

Beobachtungen zusammen mit Simulationen ergeben neue Einblicke in die Struktur der Magnetosphäre, die zur Emission der Strahlung der Pulsare beitragen. Neuere Studien haben auch gezeigt, wo die Strahlung im Gammabereich erzeugt wird. Bei der Beobachtung und Analyse von Pulsaren spielt der genaue Ursprung der Strahlung oft eine untergeordnete Rolle, während die genaue Messung der Ankunftszeit der einzelnen Pulse entscheidend ist. Besonders die stabilen **Millisekundenpulsare** sind als kosmische Uhren bekannt und können, was die Genauigkeit betrifft, fast mit Atomuhren konkurrieren. Diese Millisekundenpulsare sind oft Milliarden Jahre alt und durch die Akkretion von Masse von einem Begleitstern entstanden.

In Doppelsystemen, wo Pulsare und Weiße Zwerge oder andere Neutronensterne sich gegenseitig umkreisen, lassen sich genaue Messungen durchführen, um Theorien der Gravitation zu überprüfen. Die Beobachtung von Effekten wie der Präzession der Umlaufbahn und der Laufzeitverzögerung des Lichts durch die Gravitation bestätigt dabei bisher Einsteins Relativitätstheorie mit hoher Genauigkeit. Ein herausragendes Beispiel ist der **Hulse-Taylor-Doppelpulsar**, dessen Umlaufperiode sich durch den Energieverlust durch Abstrahlung von Gravitationswellen stetig verringert, und zwar genau in dem Maß, wie es die ART vorhersagt (Nobelpreis 1993).



Die Verschiebung der Umlaufperiode im Doppelpulsar, hervorgerufen durch das Schrumpfen der Bahn aufgrund von Gravitationswellenabstrahlung. Die orange Linie ist die entsprechende Vorhersage der ART, die damit mit einer Genauigkeit von $1,3 \cdot 10^{-4}$ (mit 95% Vertrauensintervall) bestätigt wird.

Heute erlauben Beobachtungen mit weiteren Systemen nicht nur Überprüfungen zur Gravitationswellenabstrahlung die 1000-mal präziser sind als die LIGO-Tests, sondern es können auch Aspekte der Gravitationsphysik untersucht werden, die anders nicht zugänglich sind (beispielsweise spezielle Effekte der Lichtausbreitung und das starke Äquivalenzprinzip in starken Gravitationsfeldern).

Pulsare können auch als Detektoren für Gravitationswellen dienen. Ein Netzwerk von Millisekundenpulsaren, das **Pulsar Timing Array**, bildet einen galaktischen Detektor für Gravitationswellen. Die Entfernung zwischen Erde und Pulsaren verändert sich periodisch durch Gravitationswellen, was die Ankunftszeiten der Pulse beeinflusst. Hierbei werden Gravitationswellenfrequenzen gemessen, die unterhalb derer von LISA liegen. Diese Methode führte kürzlich zum Nachweis eines Gravitationswellenhintergrunds, der vermutlich durch Verschmelzungen von Galaxien im frühen Universum entstand. Die Beobachtungen können als Beweise interpretiert werden, dass die oben beschriebenen supermassiven Schwarzen Löcher im Zentrum der Galaxien durch die Kollision von Galaxien entstanden sind.

Dank neuer, empfindlicher Teleskope wie dem Square Kilometer Array (SKA) wird die Pulsarforschung weiter voranschreiten. Das SKA wird den Nachweis und die Analyse von Pulsaren verbessern, was zur Entdeckung neuer Objekte führen wird. Mit bisher verfügbaren Teleskopen konnten nur rund 20% der Pulsare in der Milchstraße erfasst werden, was darauf hinweist, dass es noch Tausende weitere, unentdeckte Pulsare gibt. Manche davon könnten sich in der Nähe von Schwarzen Löchern befinden und uns noch detailliertere Informationen über diese extremen Objekte liefern. So sind Pulsare wertvolle Instrumente zur Untersuchung fundamentaler physikalischer Theorien.

Karsten Danzmann, Reinhard Genzel, Heino Falcke und Michael Kramer

GRAVITATIONSLENSEN

Nach der ART werden Lichtstrahlen in Gravitationsfeldern abgelenkt, was zu beobachtbaren Phänomenen führt, den Gravitationslinsen. So werden z. B. von Quasaren Mehrfachbilder gesehen, wenn eine zwischen uns und dem Quasar liegende Galaxie dessen Licht auf verschiedenen Wegen zu uns lenkt. Auch können Galaxien zu Bögen oder Ringen deformiert werden. Besonders wichtig ist der Gravitationslinseneffekt als Mittel zum Nachweis von Dunkler Materie mit zwei Verfahren. Erstens beobachtet man Galaxien, die von uns aus gesehen hinter einem Galaxienhaufen liegen, und berechnet aus der statistisch signifikanten Deformation dieser Galaxien die Flächen-dichte der gravitierenden Materie. Diese und andere Beobachtungen deuten darauf hin, dass ca. 85% der in Galaxienhaufen enthaltenen Materie dunkel ist. Zweitens beobachtet man sogenannte Mikrolinsenereignisse. Dabei geht ein Stern von uns aus gesehen hinter einer (dunklen) Masse, z. B. einem Braunen Zwerg, vorbei, wobei es durch die fokussierende Wirkung des Gravitationsfelds erst zu einem Anstieg und dann zu einem Abfall der Sternhelligkeit kommt. Aus der Häufigkeit dieser Ereignisse kann man berechnen, wieviel solcher dunklen Massen es in unserer Galaxis gibt.

Während diese Phänomene seit Jahrzehnten routinemäßig beobachtet werden, hat eine neue Art von Beobachtungen in der jüngeren Vergangenheit Schlagzeilen gemacht. Auf Aufnahmen des Hubble-Welt-

raumteleskops aus dem Jahre 2016 sowie auf neueren Aufnahmen des James-Webb-Weltraumteleskops wurde die gleiche Supernova an mehreren Orten nacheinander beobachtet. Das wurde durch die unterschiedlichen Lichtwege der verschiedenen durch die Gravitationslinse entstandenen Mehrfachbilder möglich. Wenn das Modell des lichtablenkenden Galaxienhaufen richtig ist, wird ein weiteres Bild des Ereignisses um das Jahr 2035 auftauchen.

Volker Perlick



KOSMOLOGIE: DAS GROBE UND GANZE

Vorstellungen vom Aufbau der Welt begleiten die Menschheit seit Jahrtausenden. Auch die moderne Physik erlaubt es, ein Weltmodell zu konstruieren. Es beruht auf Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie und auf der Beobachtung, dass bei Weitem die meisten Galaxien sich von uns entfernen und dabei ihre Geschwindigkeit mit steigendem Abstand zunimmt.

Die Kosmologie geht von zwei Einfachheits- oder Symmetrieannahmen aus: Diese besagen, dass das Universum von uns aus betrachtet in jeder Richtung gleich aussähe, wenn man seine Eigenschaften über genügend große Bereiche mittelt, und dass dies auch von allen anderen möglichen Beobachtern im Universum von ihrem Ort aus ebenfalls beobachtet werde. Die erste Annahme lässt sich durch Messungen belegen, die zweite indes kaum. Zusammen mit den Grundgleichungen der **allgemeinen Relativitätstheorie** ergeben diese beiden Annahmen eine Klasse physikalischer Modelle der Struktur des Kosmos, die zunächst von Alexander Friedmann 1922 mathematisch formuliert, dann von Georges Lemaître 1927 sowohl unabhängig hergeleitet als auch empirisch begründet wurde.

Diese Friedmann-Lemaître-Modelle erlauben keinen statischen Kosmos, der sich also weder ausdehnt noch zusammenzieht. Und tatsächlich: Die Bewegung der Galaxien zeigt an, dass sich unser Universum ausdehnt. Jeder beliebige Ausschnitt aus dem Universum muss früher kleiner gewesen sein als heute. In manchen Friedmann-Lemaître-Modellen bleibt ein solcher Ausschnitt immer endlich groß (größer als ein Punkt), auch wenn man beliebig lange in der Zeit zurückgeht. In anderen schrumpft er in endlicher Vergangenheit zu einem Punkt zusammen, hat also keine räumliche Ausdehnung mehr. Beobachtungen zeigen, dass in unserem Universum vor endlicher Zeit alle Abstände beliebig klein gewesen sein müssen, falls es überhaupt durch ein Friedmann-Lemaître-Modell beschrieben werden kann. Das bedeutet, dass vor Milliarden von Jahren das gesamte Universum aus einem sehr dichten und damit auch sehr heißen Anfangszustand hervorgegangen sein muss: dem **Urknall**.

Es gibt überzeugende Anzeichen eines heißen Anfangs in den Beobachtungsdaten. Eines ist der kosmische Mikrowellenhintergrund („Cosmic Microwave Background“, CMB), der als diffuse elektromagnetische Strahlung das gesamte Universum anfüllt. Sein Spektrum weist ihn als Wärmestrahlung mit einer heutigen Temperatur von 2,7 Kelvin aus. Ein weiteres Indiz sind die Häufigkeiten der leichtesten chemischen Elemente im Universum, vor allem des Deuteriums und des Heliums, im Verhältnis zum Wasserstoff. Sie zeigen an, dass das gesamte Universum während weniger Minuten nach seiner Entstehung heiß genug war, um Wasserstoff durch Kernfusion zu diesen leichten Elementen zu verschmelzen.

Der CMB bekräftigt die erste der beiden Symmetrieannahmen, auf denen das physikalische Weltmodell beruht: Seine Temperatur ist in jeder Richtung am Himmel beinahe gleich.

Abweichungen von der mittleren Temperatur liegen im Bereich von wenigen Hunderttausendstel Grad. Diese Temperaturschwankungen des CMB wurden durch mehrere Satelliten präzise vermessen. Aus ihrer Stärke und ihrer räumlichen Ausdehnung können wesentliche Parameter eines Friedmann-Lemaître-Modells genau bestimmt werden, vor allem die räumlichen Dichten von Strahlung und Materie, aber auch die räumliche Krümmung.

Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Oberfläche einer Kugel wird als positiv, diejenige eines Pferdesattels als negativ gekrümmt bezeichnet. Auch unser Universum könnte räumlich gekrümmt sein. Jedoch stellt es sich anhand der Temperaturschwankungen im CMB als räumlich flach heraus. Das wiederum geht nur, wenn die Gesamtdichte aller Strahlungs- und Materieformen im Universum einen gewissen kritischen Wert erreicht. Die Materiedichte, die ebenfalls den Beobachtungen des CMB entnommen werden kann, reicht dafür nicht aus. Dennoch ist sie erheblich größer als der Anteil derjenigen Materie, aus der im frühen Universum die leichten chemischen Elemente entstanden. Neben dieser gewöhnlichen Materie muss es daher eine Materieform geben, die nicht dadurch in Erscheinung treten kann, dass sie leuchtet, und die daher als Dunkle Materie bezeichnet wird.

Darüber hinaus muss es einen weiteren Beitrag zur kosmischen Energiedichte geben, der zusammen mit der Materie- und Strahlungsdichte gerade den kritischen Wert ergibt. Angelehnt an die Dunkle Materie wird er als Dunkle Energie bezeichnet. Dieser Befund wird durch gänzlich andere Beobachtungen bekräftigt. Eine bestimmte Klasse von Sternexplosionen eignet sich dazu, Entfernungen im Universum genau zu messen – auch über gigantische Entfernungen hinweg. Solche Messungen zeigen, dass die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums seit mehreren Milliarden Jahren zunimmt. Die Schwerkraft hingegen, die auf jede Art von Materie wirkt (auch auf die Dunkle Materie), sollte dagegen für eine Verlangsamung der Ausdehnung sorgen! Die Dichte der Dunklen Energie, die aus dieser Beschleunigung bestimmt werden kann, stimmt genau mit dem Betrag überein, der in der Bilanz der kosmischen Energie- und Materieformen zur kritischen Dichte fehlt.

Die einfachste Form, die Dunkle Energie zu erklären, führt über eine **kosmologische Konstante**. Zwischenzeitlich als überflüssig betrachtet, erwies sie sich in den 1970er-Jahren als theoretische Notwendigkeit. So wie die Newtonsche Gra-

← Jeder Punkt in dieser Darstellung steht für eine Galaxie. Die Farbe kodiert dabei die Entfernung von blau (nah) zu rot (fern).

gravitationskonstante den gewohnten, anziehenden Teil der Schwerkraft quantifiziert, beschreibt die kosmologische Konstante einen auf kosmischen Längenskalen wirksamen, abstoßenden Teil – ohne eine Aussage zu treffen, was diese Abstoßung genau verursacht. Es gibt zahlreiche Versuche, die Dunkle Energie durch eine zeitlich veränderliche, bisher unbekannte Energieform zu erklären. Bisher deutet jedoch kein empirischer Hinweis darauf hin, dass die Dunkle Energie etwas anderes als die kosmologische Konstante sein müsste.

hebt dazu beigetragen, dass sich der Inhalt des Universums zu Galaxien und Galaxienhaufen zusammengeklumpt hat.

Es gibt intensive Bemühungen darum, durch Änderungen des Gravitationsgesetzes die gleichen Effekte zu erklären, die die Dunkle Materie erzeugt. Vielfältige Verallgemeinerungen der allgemeinen Relativitätstheorie haben bisher aber keine überzeugenden Möglichkeiten dafür erbracht.

Kandidaten für Dunkle Materie

massereiche, schwach wechselwirkende Elementarteilchen (WIMPS) möglich

massearme Elementarteilchen (Axionen oder ähnliche Teilchen) möglich

Schwarze Löcher aus der Frühzeit des Universums möglich, aber in einigen Massenbereichen ausgeschlossen

Kandidaten für Dunkle Energie

kosmologische Konstante möglich, bisher mit allen Beobachtungen verträglich

dynamisches Quantenfeld möglich

Die Inflationsphase

Die weitgehende Richtungsunabhängigkeit des CMB wirft ein weiteres erhebliches Problem auf. Der CMB entstand knapp 400 000 Jahre nach dem Urknall. Während dieser Zeit konnten sich Signale höchstens 400 000 Lichtjahre weit ausgebreitet haben. Am Himmel erscheint diese Strecke innerhalb des damals jungen Universums nur wenige Male größer als der Vollmond. Es ist kaum zu verstehen, wie sich die Temperatur des jungen Universums über Entfernungen hinweg gleichmäßig einstellen konnte, die erheblich größer als diese Strecke sind und heute den ganzen Himmel umfassen.

Eine Lösung bietet die kosmologische Inflation. Sie postuliert, dass es im sehr frühen Universum eine Phase gab, während der sich das Universum derart ausdehnte, dass vorher mikroskopische Abstände kosmische Dimension erreichten. Konsequenzen der Inflationstheorie können durch Beobachtungen überprüft werden. Eine davon betrifft die statistische Verteilung kosmischer Strukturen und wurde mit hoher Genauigkeit bestätigt. Eine weitere betrifft statistische Schwankungen der Raumzeit, die als Gravitationswellenhintergrund beobachtet werden könnten. Über erste Anzeichen eines solchen Signals wurde 2023 berichtet.

In der Kosmologie treffen die Physik des Allerkleinsten und des Allergrößten direkt aufeinander und regen sich gegenseitig an. Unser Verständnis des Universums im Ganzen hängt eng mit dem seiner aller kleinsten Teile zusammen.

Matthias Bartelmann

Die ersten zwei Wochen Datenaufnahme des Euclid-Teleskops zeigen schon Millionen von Galaxien. Euclid wird ein Drittel des gesamten Himmels erfassen und wichtige Hinweise für die Suche nach Dunkler Materie geben.

Die Fragen danach, wie die Dunkle Materie und die Dunkle Energie erklärt werden könnten, bestimmen einen wesentlichen Teil der modernen Kosmologie. Das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik enthält keine Elementarteilchen, die als Dunkle Materie geeignet wären, die also nur durch ihre Schwerkraftwirkung in Erscheinung treten. Obwohl die Zusammensetzung der Dunklen Materie bislang unbekannt ist, konnte ihre Verteilung vor allem mithilfe des **schwachen Gravitationslinseneffekts** auf großen Ausschnitten des Himmels kartiert werden. Der Mitte 2023 gestartete **Euclid-Satellit** soll wesentlich zur Aufklärung der beiden dunklen kosmischen Komponenten beitragen.

Während Dunkle Materie zuerst durch ihre Wirkung in Galaxienhaufen und Galaxien entdeckt wurde, wird ihre Existenz heute am überzeugendsten anhand der Temperaturschwankungen des CMB begründet. Wenn der bei Weitem überwiegende Teil des kosmischen Materials aus gewöhnlicher Materie bestünde, wären die heutigen kosmischen Strukturen nur dann erklärbar, wenn die Temperaturschwankungen im CMB um etwa das Hundertfache größer wären als sie sind. Die Dunkle Materie hat während der 13 Milliarden Jahre er-

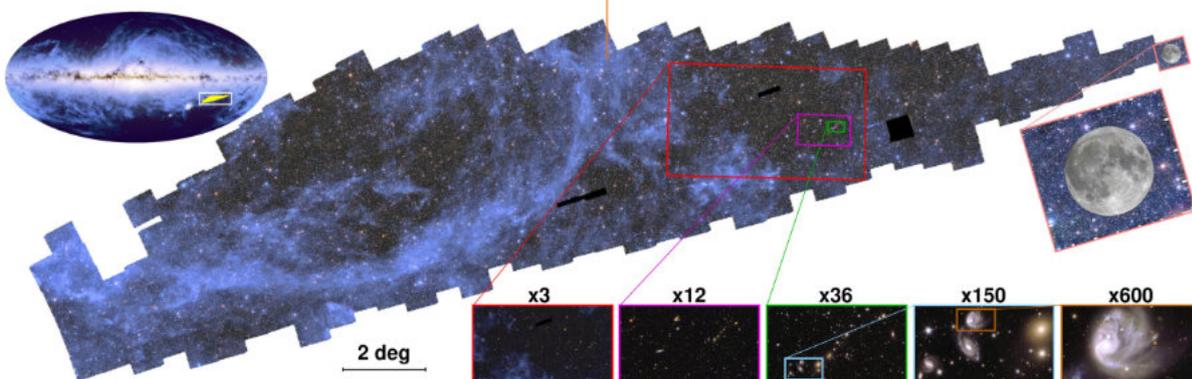


Bild: ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, CEA Paris-Saclay, image processing by J.-C. Cuillandre, E. Bertin, G. Anselmi; ESA/Gaia/DPAC; ESA/Planck Collaboration

QUANTENGRAVITATION

Es gibt viele überzeugende Gründe, warum neben allen Teilchen- und Wechselwirkungsfeldern auch die Gravitation zu quantisieren ist. Weltweit wird an verschiedenen theoretischen Ansätzen gearbeitet und versucht, beobachtbare Konsequenzen herzuleiten.

In der Quantengravitation wollen wir die Quanteneigenschaften der Gravitation verstehen. Unser Ausgangspunkt sind **Gravitationswellen**. In der Quantenphysik gibt es eine Dualität zwischen Wellen und Teilchen; so hat Licht sowohl Eigenschaften einer Welle als auch eines Teilchens, des Photons. Wir erwarten, dass diese Dualität auch für die Gravitation gilt und Gravitationswellen sich durch Teilchen, **Gravitonen**, beschreiben lassen. Gravitonen haben einen Spin von 2, ihr Eigendrehimpuls ist also doppelt so groß wie der von Photonen; ihre Masse ist wahrscheinlich Null (Beobachtungen beschränken die Masse auf kleiner als $10^{-32} \text{ eV}/c^2$ oder 10^{-68} kg). Gravitonen treten mit allen Formen von Energie in Wechselwirkung – und daher auch mit anderen Gravitonen. Die Stärke der Wechselwirkung hängt jedoch von der Energie ab. Zum Beispiel interagieren die Gravitonen in einer Gravitationswelle, die beim Verschmelzen zweier astrophysikalischer Schwarzer Löcher entsteht und vom LIGO/VIRGO/KAGRA-Detektornetzwerk detektiert wird, praktisch gar nicht miteinander.

Das **Elektronenvolt, eV**, ist eine Energieeinheit besonders in der Teilchenphysik. Photonen sichtbaren Lichts haben eine Energie von 1,6 bis 3,3 eV, Teilchen im Large Hadron Collider prallen mit 10^4 Giga-Elektronenvolt (GeV, 1 000 000 000 eV) aufeinander.

Wegen dieser schwachen Wechselwirkung ist es bisher unmöglich, einzelne Gravitonen zu detektieren. Ihre Wechselwirkungsstärke vergrößert sich jedoch, wenn die Massen der ver-

schmelzenden Schwarzen Löcher sehr viel kleiner wären, denn dann würde die Frequenz der Gravitationswelle steigen und nach $E = h\nu$ auch die Energie der Gravitonen. Bei der Planck-Energie von 10^{19} GeV wird die Wechselwirkungsstärke so groß, dass die theoretische Beschreibung zusammenbricht und die Theorie ihre Vorhersagekraft verliert.

Das Forschungsziel ist daher, eine Theorie zu entwickeln, die Gravitonen oberhalb dieser Energie beschreibt. Eine zentrale Schwierigkeit hierbei ist, dass Gravitonen nicht einfach nur Teilchen sind, die durch die Raumzeit propagieren. Stattdessen ist die Raumzeit selbst dynamisch, d. h., Zeiten und Längen ändern sich dynamisch. Gravitationswellen beschreiben solche Änderungen, und Gravitonen sind diskrete, quantisierte „Mengen“ einer solchen Änderung. Theorien der Quantengravitation fragen daher auch nach der **fundamentalen Quantenstruktur der Raumzeit**. Unser aktuelles Verständnis der fundamentalen Struktur der Raumzeit (die allgemeine Relativitätstheorie) bricht zusammen, denn berechnet man die Krümmung der Raumzeit im Inneren eines Schwarzen Lochs, oder auch in der Vergangenheit unseres Universums, so ergibt sich eine anwachsende Krümmung, die schließlich unendlich wird. Diese Unendlichkeit ist physikalisch unsinnig

und signalisiert, dass die allgemeine Relativitätstheorie in diesem Bereich nicht gelten kann.

Die verschiedenen theoretischen Ansätze, die entwickelt wurden und werden, um die Struktur der Raumzeit zu beschreiben, unterscheiden sich stark und umfassen z. B. eine fundamentale Skalensymmetrie, bei der die Raumzeit fraktal und selbstähnlich wird (in der „asymptotisch sicheren Quantengravitation“), oder fundamentale Diskretheit, bei der die Raumzeit auf kleinsten Skalen aus fundamentalen, unteilbaren „Atomen“ der Raumzeit besteht (z. B. in der Schleifenquantengravitation).

Diese theoretischen Ansätze gehen oft über unser anschauliches Vorstellungsvermögen hinaus und lassen sich in unserer Alltagssprache schwer formulieren. Daher wird die Mathematik als abstrakte Sprache benutzt. In dieser Sprache beschreiben wir die Struktur der Raumzeit präzise und treffen Vorhersagen für experimentelle Tests. Wegen der hohen Energien, die man bräuchte, um die Wechselwirkung von Gravitonen zu testen oder die fundamentale Struktur der Raumzeit aufzulösen, sind experimentelle Tests schwierig und benötigen kreative Ideen. Eine solche Idee kommt aus der Astrophysik: Wenn Licht über Millionen von Lichtjahren reist, dann können die winzigen Effekte, die die fundamentale Struktur der Raumzeit am Licht verursacht, sich messbar aufsummieren. Eine zweite spekulative Idee betrifft Schwarze Löcher und besagt, dass Modifikationen durch Quantengravitationseffekte vielleicht nicht nur im Zentrum eines Schwarzen Lochs zu finden sind, sondern möglicherweise sogar schon die Raumzeit am Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs beeinflussen. Sogar unser Universum als Ganzes kann man als Quantengravitationsexperiment begreifen, denn es expandiert ausgehend von einer frühen Phase, in der Energien so hoch waren, dass Effekte der Quantengravitation sehr wichtig waren. Im Moment sind die meisten Theorien aber noch nicht weit genug entwickelt, um dieses „Universum als Experiment“ nutzen zu können.

Insgesamt ist die Quantengravitation ein sich stark entwickelndes Forschungsfeld, in dem spannende Fragen wie „Gibt es eine kleinste messbare Länge?“, „Gibt es außer dem Graviton noch weitere fundamentale Anregungen der Raumzeit?“ und „Hat das Universum einen Anfang?“ noch keine Antwort haben.

Astrid Eichhorn

TEILCHEN AUS DEM ALL

Im Jahr 1912 entdeckte der österreichische Physiker Victor Hess die kosmische Strahlung. Sie besteht aus hochenergetischen Protonen und Atomkernen mit Beimischungen von Elektronen, Photonen und Neutrinos sowie den zugehörigen Anti-Teilchen. Die Erforschung der kosmischen Strahlung ist bis heute aktuell und Teil des breit angelegten interdisziplinären Forschungsfeldes der Astroteilchenphysik.

Die kosmischen Teilchen kommen mit extremen Energien auf der Erde an, millionenfach größer, als sie an irdischen Teilchenbeschleunigern erreicht werden können. Wenn sie auf die Atmosphäre treffen, interagieren sie mit den Luftteilchen und erzeugen dabei kaskadenartig weitere Teilchen. Besonders bei großen Energien können diese sogenannten **Luftschauer** bis zum Erdboden vordringen und dort gemessen werden. Empfindliche Kameras können sogar die Fluoreszenz-Leuchtschauer messen, die die Teilchen in der Atmosphäre hinterlassen. Schauerteilchen, die sich in der Atmosphäre schneller bewegen als Licht, erzeugen außerdem bläuliches **Tscherenkowlicht**, das mit Teleskopen erfasst werden kann. Schließlich wird durch die Ablenkung von Schauerteilchen im

Die Lichtgeschwindigkeit in der Luft ist bis zu ca. 0,3 Promille niedriger als im Vakuum. Die Teilchen fliegen aufgrund ihrer hohen Energie aber praktisch mit Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Kosmische Schauer, die durch geladene Teilchen ausgelöst werden, geben uns allerdings nur eingeschränkte Informationen über die Herkunft der elektrisch geladenen kosmischen Teilchen. Denn diese werden auf dem Weg zur Erde in galaktischen und intergalaktischen Magnetfeldern abgelenkt. Die Richtung, in der sie auftreffen, zeigt demnach nicht mehr die Himmelsgegend an, aus der sie kommen. Photonen und Neutrinos hingegen bleiben als neutrale Teilchen von Magnetfeldern unbeeinflusst und breiten sich geradlinig aus. Aus ihren Flugrichtungen lassen sich daher ihre Herkunftsorte am Himmel ermitteln. Mit dem Neutrinoobservatorium IceCube am Südpol wurden inzwischen erste Quellen hochenergetischer Neutrinos identifiziert. Die nächsten Schritte sind eine Erweiterung von IceCube und der Bau des Neutrinoobservatoriums KM3NeT im Mittelmeer. Die Astronomie mit hochenergetischen Photonen (Gammastrahlung) ist mit den Experimenten H.E.S.S., MAGIC und VERITAS bereits als Zweig der Astrophysik etabliert. Diese Experimente messen die Tscherenkowstrahlung entlang der Luftschauber. Sie werden durch hochgelegene Bodendetektoren wie HAWC und LHAASO ergänzt, die die Schauerteilchen direkt nachweisen können.

Die Ergebnisse der Gammastrahlungsastronomie der vergangenen zwanzig Jahre haben unser Bild des Hochenergie-Universums revolutioniert. Hunderte von Quellen wurden identifiziert, darunter Supernova-Explosionswolken, Neutronensterne und Schwarze Löcher. Zurzeit wird ein neues Observatorium, das Cherenkov Telescope Array (CTA), mit Dut-

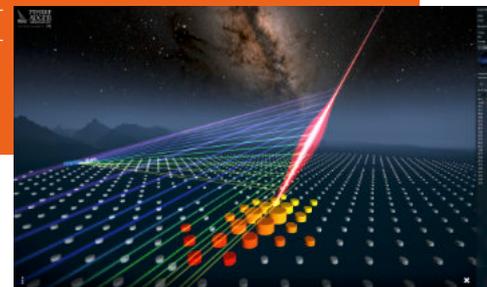
zenden von Tscherenkowteleskopen verschiedener Größen auf der Nord- und der Südhalbkugel vorbereitet.

Auch bei der Klärung des Rätsels der Dunklen Materie, die den Materieinhalt unseres Universums dominiert, aber sich nicht direkt durch Licht zu erkennen gibt, spielt die Astroteilchenphysik eine zentrale Rolle. Sollte die Dunkle Materie aus bisher unbekanntem Teilchen bestehen, so müssten diese sich in Gravitationszentren im Weltall ansammeln, dort annihilieren und damit sowohl Gammastrahlung als auch Neutrinos aussenden. Die hohe Sensitivität der Instrumente der nächsten Generation macht entsprechende Suchen sehr vielversprechend.

Thomas Lohse

Das zwischen 2004 und 2008 in Betrieb genommene **Pierre-Auger-Observatorium** ist das bisher größte Detektorfeld zur Messung der kosmischen Strahlung. Sein Ziel: Die Zusammensetzung und Herkunft kosmischer Strahlen bei höchsten Energien zu entschlüsseln. Das Observatorium aus Bodendetektoren, Fluoreszenzdetektoren und Radioempfängern deckt ein Areal von 3000 km² in einer Grassteppe in Argentinien ab.

Rekonstruktion eines kosmischen Luftschaubers am Pierre-Auger-Observatorium. In diesem Ereignis sprechen sowohl Bodendetektoren als auch zwei seitlich angeordnete Fluoreszenzdetektoren an.

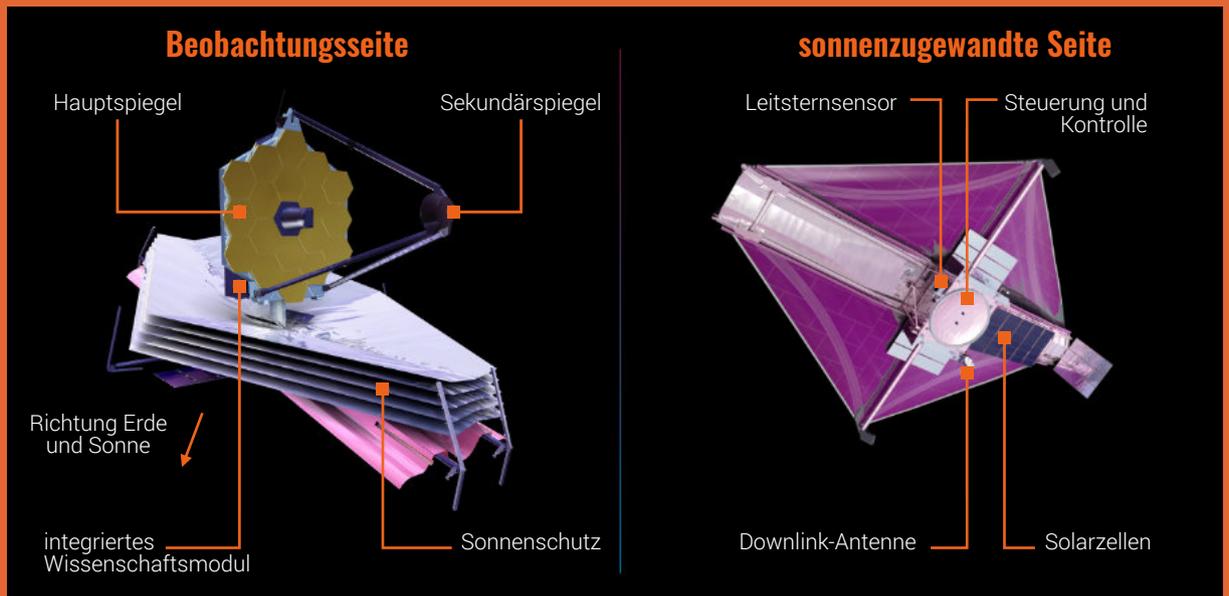


MULTIMESSENGER-ASTRONOMIE

Schon lange hat man erkannt, dass die verschiedenen Ansätze der Astroteilchenphysik sich gegenseitig ergänzen. Dies hat zur „Multimesseger-Astronomie“ geführt, in der alle kosmischen Boten – oft in zeitgleichen Beobachtungen – kombiniert werden. Neben Observatorien für geladene kosmische Strahlung, Neutrinos und Gammastrahlung haben sich nach dem erstmaligen Nachweis von Gravitationswellen auch die Gravitationswellendetektoren ins weltweite Multimesseger-Netzwerk eingefügt. Beteiligt sind auch Observatorien der traditionellen Astrophysik in allen Wellenlängenbereichen, vom Radiobereich über das sichtbare Licht bis hin zur Röntgenstrahlung.

DAS JAMES-WEBB-WELTRAUMTELESKOP (JWST) DAS GRÖßTE OBSERVATORIUM IM ALL

Silvia Scheithauer



Das JWST (engl. James Webb Space Telescope) ist ein Weltraumteleskop mit vier Instrumenten für die Beobachtung von Licht mit Wellenlängen von 0,6–28,5 μm :

- Nahinfrarot-Kamera **NIRCam**
- Nahinfrarot-Spektrograf **NIRSpec**
- Nahinfrarot-Kamera und spaltloser Spektrograf **NIRISS**
- Mittelinfrarot-Kamera-Spektrograf **MIRI**

Partner: amerikanische (NASA), europäische (ESA), kanadische (CSA) Weltraumagenturen

Satellitentechnik: segmentierter, faltbarer Hauptspiegel mit 6,5 m Durchmesser, fünfteiliges, tennissplatzgroßes Sonnenschutzschild für Passivkühlung der Nahinfrarotinstrumente auf 40 K, zusätzlicher Kryokühler für MIRI auf 7 K, gefaltete Startkonfiguration, vollautomatisches Entfalten des Satelliten im Weltraum

Start: 25. Dezember 2021, Ariane-5-Rakete, europäischer Weltraumbahnhof Kourou, 6200 kg Startgewicht

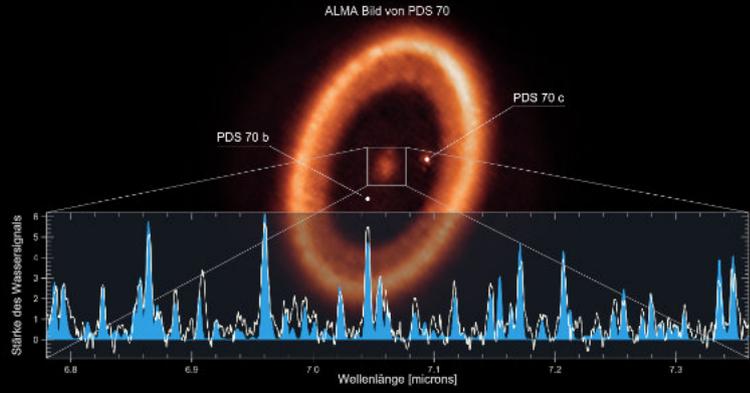
Orbit: 1,5 Millionen km von der Erde entfernt um den Lagrangepunkt 2. Das JWST kreist also nicht um die Erde, sondern befindet sich immer von der Sonne aus gesehen hinter der Erde.

Beginn des Wissenschaftsbetriebs: 12. Juli 2022

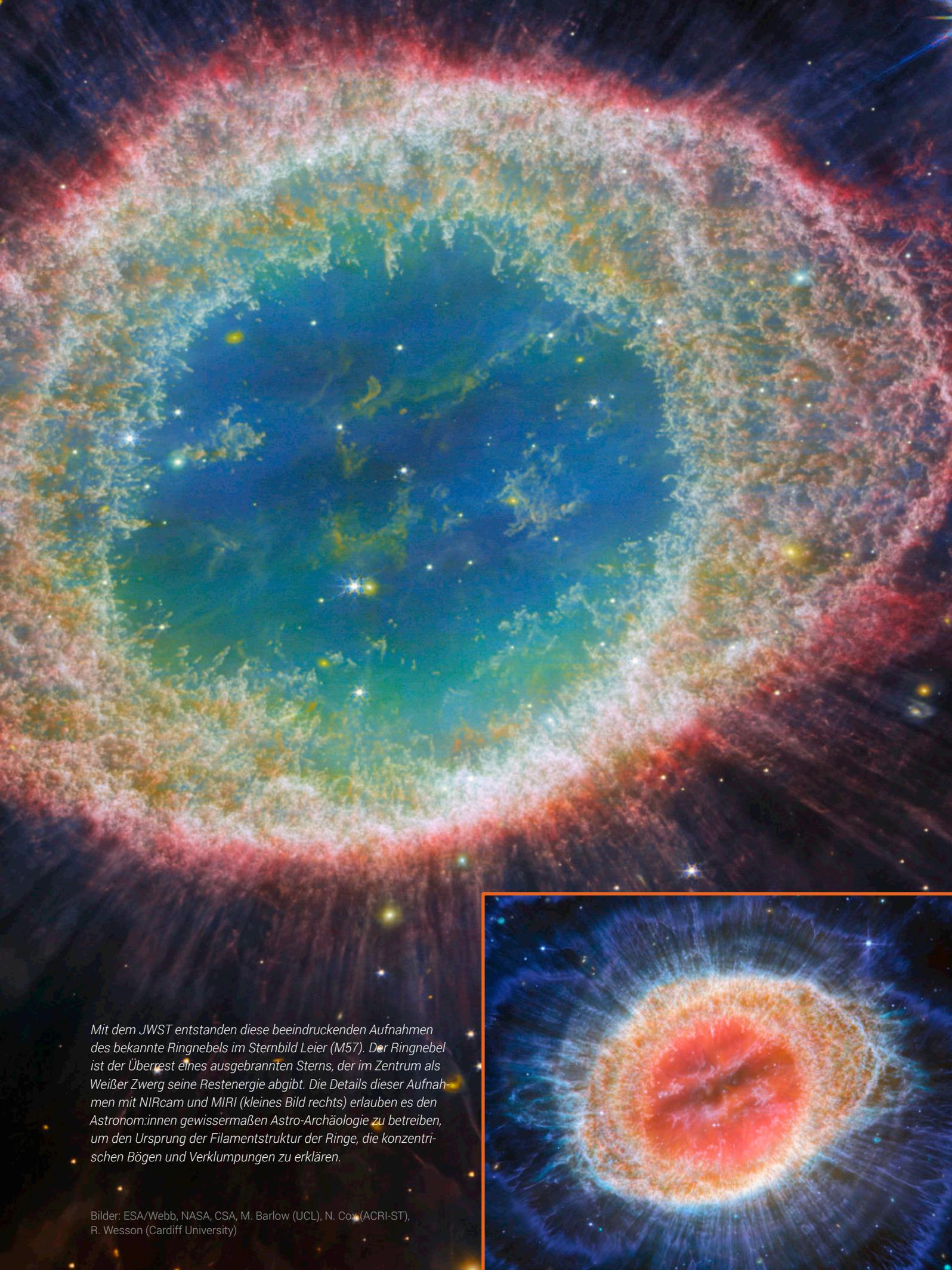
Wissenschaftliche Zielsetzungen:

- Galaxien: Suche nach den ersten Galaxien, Entstehung und Entwicklung
- Sterne und Planetensysteme: Entstehung und Entwicklung
- Planeten: Spektroskopie der Atmosphären von Exoplaneten und Suche nach lebensfreundlichen Planeten, direkte Beobachtung von Exoplaneten um helle Sterne, Planeten unseres Sonnensystems

Wasser in der terrestrischen Planetenentstehungszone der PDS 70 Scheibe
G. Perotti et al.



Mit dem MIRI-Instrument auf dem JWST wurde Wasser in der Entstehungszone von terrestrischen Planeten um den Stern PDS 70 entdeckt, hier abgebildet mit seiner spektralen Signatur in weiß im Vergleich mit dem theoretischen Wasserspektrum in blau. Planeten, die in dieser Region entstehen, würden schon von Geburt an über ein Wasserreservoir verfügen und hätten damit eine größere Wahrscheinlichkeit, sich zu lebensfreundlichen Planeten zu entwickeln. Das Hintergrundbild zeigt den Staubring um PDS 70, aus dem Planeten entstehen, aufgenommen mit dem Antennenfeld ALMA in Südamerika.



Mit dem JWST entstanden diese beeindruckenden Aufnahmen des bekannte Ringnebels im Sternbild Leier (M57). Der Ringnebel ist der Überrest eines ausgebrannten Sterns, der im Zentrum als Weißer Zwerg seine Restenergie abgibt. Die Details dieser Aufnahmen mit NIRcam und MIRI (kleines Bild rechts) erlauben es den Astronom:innen gewissermaßen Astro-Archäologie zu betreiben, um den Ursprung der Filamentstruktur der Ringe, die konzentrischen Bögen und Verklumpungen zu erklären.



DIE WELT DER MATERIE UM UNS HERUM

Die Physik beschreibt die Welt vom unsichtbaren Kleinen bis hin zum gigantisch Großen. Dazwischen befindet sich die scheinbar alltägliche Materie, die jedoch auch selbst voller faszinierender Geheimnisse steckt. Die Physik konnte viele von ihnen in den letzten Jahrzehnten erklären und nutzt nun ihre Erkenntnisse dazu, die Materie nach den Bedürfnissen für technische Anwendungen maßzuschneidern. Doch längst nicht alle Eigenschaften der Materie sind bereits aufgeklärt.

MAGIE DER MATERIE

Physikalische Neugier stößt in die Mikrowelt der Elementarteilchen vor, mit beispiellosen Errungenschaften in deren Erzeugung, Nachweis und theoretischer Erklärung. Auf der anderen Seite vermessen Kosmolog:innen das Universum und detektieren Kollisionen Schwarzer Löcher. Zwischen diesen beiden Extremen erstreckt sich eine weitere wichtige, faszinierende und vielschichtige Welt: Die Welt der **kondensierten Materie**.

Auf den ersten Blick erscheint uns Materie vertraut, da sie überall sichtbar um uns herum existiert: der Boden auf dem wir stehen, das Wasser, das wir trinken, und natürlich wir selbst bestehen aus normaler Materie. Aber warum ist Materie so, wie sie ist, und wie lassen sich neue, faszinierende Materialeigenschaften im 21. Jahrhundert maßschneidern?

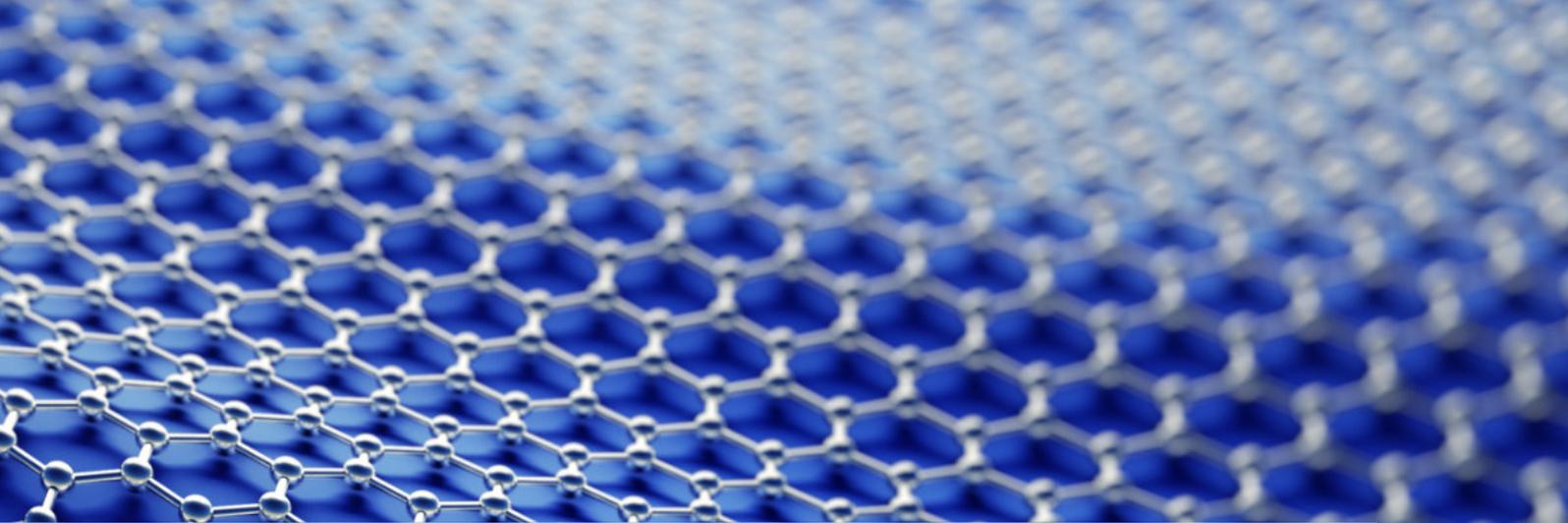
Grundlagen dafür sind einerseits die Mechanismen der Quantenphysik und andererseits das Phänomen der Emergenz, das heißt die Ausbildung von neuen Eigenschaften eines Systems infolge des Zusammenspiels seiner Elemente (siehe Seite 30). Die wissenschaftliche Beschreibung dieser Konzepte hilft beim Verständnis von Materie und eröffnet attrak-

tive Anwendungsmöglichkeiten, die sich durch die enormen technologischen Fortschritte der letzten Jahre heute ausschöpfen lassen. So lassen sich extrem kleine Strukturen oder Schichten mit der Dicke von nur einem Atom in höchster kristalliner Reinheit herstellen. In nahezu perfekt isolierten Systemen kann das Zusammenspiel der Bestandteile von Materie bis hinab zu einzelnen Atomen genau kontrolliert werden.

Das Gebiet der kondensierten Materie reicht heute von kristallinen Festkörpern und synthetischen Atomgittern über komplexe Fluide (Flüssigkeiten) oder granulare Materie (wie etwa Sand) bis hin zu Bausteinen der belebten Natur. Die Materie und deren erstaunliche Eigenschaften sind doppelt relevant: Die Forschungsbereiche, die sich mit ihren Geheimnissen befassen, stellen den größten Anteil der physikalischen Forschung und Lehre, und sie ist die Basis für praktisch alle technologischen Anwendungen.

Die grundlegenden Konzepte der Elementarteilchenphysik einerseits und der Physik der kondensierten Materie und modernen Atomphysik andererseits haben vieles gemeinsam,

Der Begriff „kondensierte Materie“ spielt auf die verschiedenen Aggregatzustände an, die Materie einnehmen kann. Festkörper und Flüssigkeiten werden dabei als „kondensiert“ bezeichnet. Die beiden anderen Aggregatzustände bilden Gase und Plasmen, wobei in letzteren die Elektronen und Atomkerne voneinander getrennt sind.

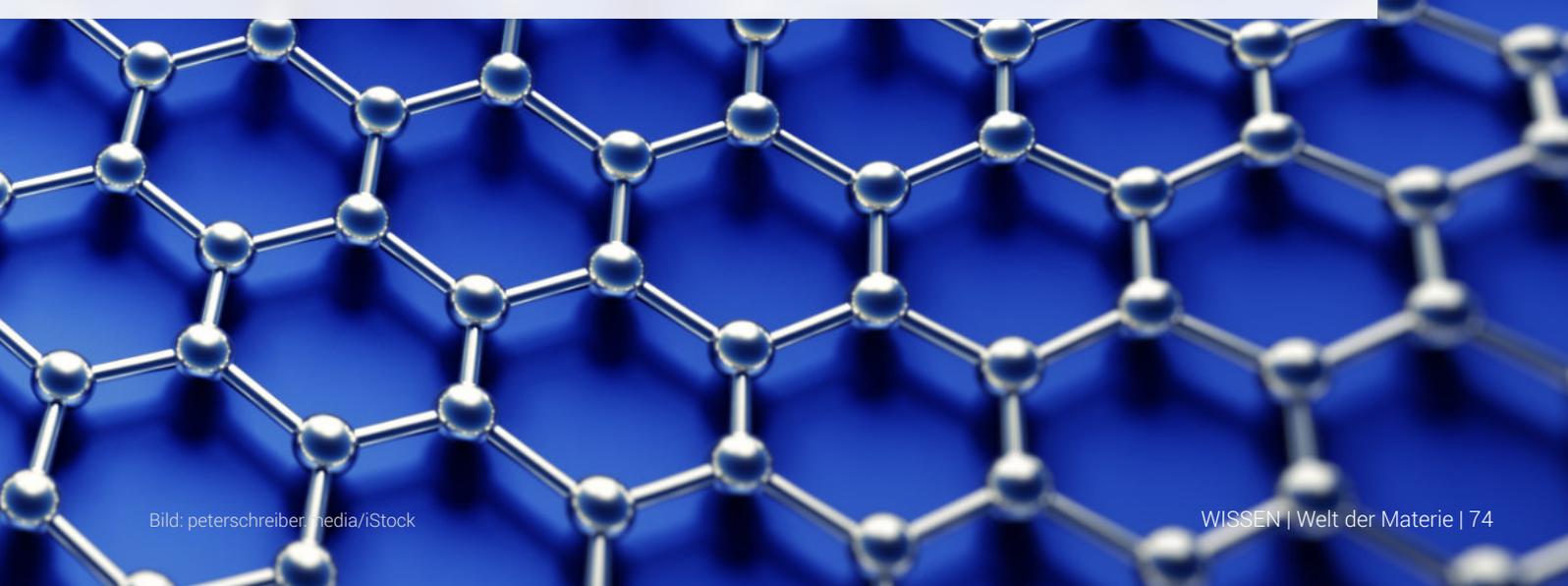


unterscheiden sich aber in ihrer Ausprägung. Im Mittelpunkt der Physik der kondensierten Materie stehen nicht die Eigenschaften der einzelnen Bausteine wie Proton, Neutron, Elektron oder Photon, sondern das Wechselspiel zwischen enorm vielen dieser Teilchen.

In den großen Anordnungen, die sie in der Materie einnehmen, verlieren die Grundbausteine ihre „elementaren“ Eigenschaften: Tritt ein freies Elektron in ein periodisches Kristallgitter eines Festkörpers und gerät in die Kraftfelder der vielen Gitteratome und anderen Elektronen, so verändert es seine ursprünglichen Eigenschaften wie beispielsweise seine Masse und „spürt“ in Wechselwirkung mit den Kraftfeldern einen Widerstand. Diese geradezu magisch anmutende Translation ist ein Musterbeispiel von Emergenz. Das Elektron wandelt sich unter dem Einfluss des Festkörpers in ein verändertes, neues Teilchen – ein Quasiteilchen. Solche Quasiteilchen existieren auch in anderen Ausprägungen wie Phononen, Exzitonen oder Magnonen. Ihre häufig frappierenden, emergenten Eigenschaften der Materie sind sehr real: Elektrischer Widerstand (mit Phänomenen wie Supraleitung und Quantentransport), Magnetismus, mechanische

Stabilität oder Absorption und Emission von Licht sind direkter Ausdruck des mannigfaltigen Wechselspiels der nahezu unzählbar vielen Bestandteile, aus denen Materie besteht. Diese Eigenschaften der kondensierten Materie werden insbesondere in der Nanotechnologie aufgegriffen und zielgerichtet in maßgeschneiderten Materialsystemen und elektronischen Bauelementen eingesetzt, um beispielsweise Computerchips mit immer höherer Leistungsfähigkeit zu entwickeln, und den Weg für neue Anwendungsperspektiven in der Quantentechnologie zu bereiten. In den folgenden Kapiteln dieses Abschnitts werden die faszinierenden Eigenschaften von Materie mit ihren facettenreichen, maßgeschneiderten Funktionen illustriert. Das Spektrum reicht von sogenannten topologischen Quantenmaterialien über atomar dünne funktionelle Schichten und künstliche Atomgitter bis hin zur Lichtwellenelektronik.

*Oliver Benson, Stephan Reitzenstein,
Klaus Richter und Martin Wolf*



STROM OHNE WIDERSTAND

Energie ohne Verluste: Supraleiter könnten die Technik revolutionieren – vom verlustfreien Stromtransport bis zu ultraschnellen Computern. Doch die Forschung steht vor Herausforderungen: Wie kann Supraleitung bei Raumtemperatur gelingen?

Wenn Strom durch ein Kabel fließt, geht immer ein Teil der Energie verloren. Der Grund dafür ist der elektrische Widerstand, der einen Teil der transportierten Energie in Wärme umwandelt. Es gibt allerdings Materialien, die Strom ohne jeglichen Widerstand leiten können – Supraleiter. Diese faszinierenden Materialien zeigen ihr Potenzial jedoch oft nur bei extrem niedrigen Temperaturen.

Im Jahr 1911 machte der Physiker Heike Kamerlingh Onnes eine bahnbrechende Entdeckung: Als er Quecksilber auf extrem niedrige Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt abkühlte, verschwand der elektrische Widerstand des Metalls plötzlich komplett. Diese Beobachtung legte den Grundstein für die Forschung an Supraleitern. Bereits zwei Jahre später erhielt Kamerlingh Onnes für seine Arbeiten den Nobelpreis für Physik. Doch wie dieser Effekt zustande kommt, blieb fast 50 Jahre lang ein Rätsel.

Die Aufklärung des Phänomens gelang erst in den 1950er Jahren. In metallischen Leitern bewegen sich Elektronen durch ein Kristallgitter. Normalerweise stoßen sie dabei aneinander oder an Defekte im Gitter, was den elektrischen Widerstand verursacht. Doch unterhalb einer kritischen Temperatur (T_c) geschieht etwas Außergewöhnliches: Je zwei Elektronen finden sich spontan zu **Cooper-Paaren** zusammen. Diese Paare haben einzigartige quantenphysikalische Eigenschaften und bilden ein Kollektiv, das sich widerstandsfrei durch das Material bewegen kann. Man kann sich das wie eine Kette vorstellen, die Störstellen einfach umgeht.

Konventionelle Supraleiter

Für die Bildung von Cooper-Paaren ist eine Bindungskraft erforderlich, die die elektrische Abstoßung der Elektronen überwiegt. Bei sogenannten konventionellen Supraleitern sind Bewegungen der positiv geladenen Gitterionen für die effektive Anziehung der Elektronen verantwortlich. Zu den konventionellen Supraleitern gehören Elemente wie **Quecksilber** und **Blei** sowie metallische Legierungen, die Supraleitung nur bis wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt zeigen. Diese Temperaturen werden durch Kühlung mit flüssigem

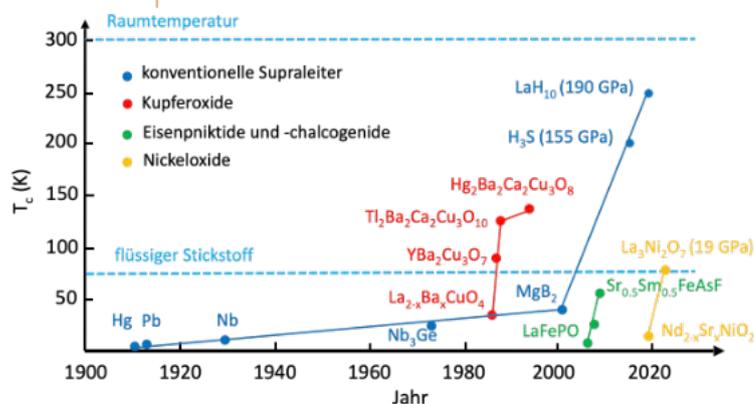
Entwicklung der maximalen kritischen Temperatur (T_c) verschiedener Klassen von Supraleitern von der Entdeckung des Phänomens im Jahr 1911 bis zur Gegenwart

Helium erreicht, was technisch aufwendig und teuer ist. Trotzdem werden solche Supraleiter bereits in wichtigen Technologien eingesetzt, etwa in Hochfeld-Magneten für **Kernspintomografen** (Seite 217), für den **Large Hadron Collider** (Seite 40) oder in **Qubits für Quantencomputer** (Seite 199).

Seit den 1950er-Jahren wurden **viele neue konventionelle Supraleiter** entdeckt, u.a. die Verbindung MgB_2 mit $T_c = 39\text{ K}$ (-234 °C) im Jahr 2001. Gleichzeitig wurde die theoretische Beschreibung der konventionellen Supraleitung kontinuierlich verbessert, sodass heute verlässliche Vorhersagen der kritischen Temperatur möglich sind. Indem er solchen Vorhersagen folgte, entdeckte der Physiker Mikhail Eremets ab 2015 eine Reihe von Wasserstoffverbindungen mit kritischen Temperaturen bis -23 °C – allerdings nur unter extrem hohem Druck, vergleichbar zum Druck im Erdkern und damit nicht für Anwendungen geeignet. Weltweite Forschungsanstrengungen zielen derzeit darauf hin, durch theoriegeleitete Synthese neuer Supraleiter den erforderlichen Druck systematisch zu reduzieren.

Unkonventionelle Supraleiter

Eine parallele Entwicklung begann im Jahr 1986, als die Physiker Johannes Georg Bednorz und Karl Alexander Müller Supraleitung in einer Klasse von **Kupferoxiden** entdeckten, in der bis zu diesem Zeitpunkt kaum jemand dieses Phänomen vermutet hätte. Während sich nämlich konventionelle Supraleiter oberhalb von T_c ausnahmslos als gute Metalle verhalten, weisen Kupferoxide nur eine vergleichsweise geringe Leitfähigkeit auf und neigen überdies dazu, isolierende antiferromagnetische Zustände auszubilden. Diese Eigenschaften lassen sich auf eine effektiv sehr starke elektrische Abstoßung zwischen den Elektronen zurückführen. Dennoch



← Ein Supraleiter schwebt über einem Magneten: der Meißner-Ochsenfeld-Effekt

erreichen diese „unkonventionellen“ Supraleiter bei Normaldruck kritische Temperaturen deutlich oberhalb vom 100 Kelvin (-173 °C) – mehrfach höher als der Rekord bei konventionellen Supraleitern. Für die bahnbrechende Entdeckung dieser **Hochtemperatursupraleiter** wurden Bednorz und Müller im Jahr 1987 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

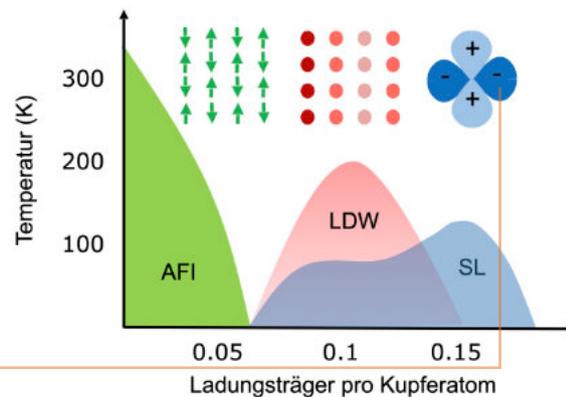
Seitdem hat die Forschung gewaltige Fortschritte bei der Klärung des Mechanismus der unkonventionellen Supraleitung zu verzeichnen. So hat sich u. a. herausgestellt, dass der Quantenzustand der Cooper-Paare in den Kupferoxid-Supraleitern eine **„d-Wellen-Symmetrie“** aufweist – analog zu den d-Orbitalen im Wasserstoff-Atom. Eine solche Symmetrie ist inkompatibel mit dem Mechanismus der konventionellen Supraleitung, der auf Gitterschwingungen beruht. Experimentalphysiker:innen konnten aber mittels Neutronen- und Photonenstreuung nachweisen, dass eine fluktuierende antiferromagnetische Ordnung auch in supraleitenden Kupferoxiden vorhanden ist, und Theoretiker:innen konnten zeigen, dass magnetische Korrelationen dieser Art Cooper-Paare mit d-Wellen-Symmetrie stabilisieren.

Die Theorie der unkonventionellen Supraleiter hat allerdings noch nicht dieselbe Vorhersagekraft wie diejenige für ihre konventionellen Geschwister, denn die starke Wechselwirkung zwischen den Elektronen kann neben der Supraleitung auch noch eine Vielzahl weiterer Ordnungszustände erzeugen. Erst kürzlich wurde in den Kupferoxiden eine periodische Modulation der Ladungsdichte entdeckt, die mit der Supraleitung koexistiert und T_c reduziert. Die quantitative theoretische Beschreibung kollektiver Zustände und Anregungen in stark korrelierten Elektronensystemen und deren wechselseitige Beeinflussung bleibt eine der größten Herausforderungen in der Festkörperphysik.

Auch wenn in der Grundlagenforschung noch wichtige Fragen offen sind, zeigen Anwendungen von Hochtemperatur-Supraleitern bereits ein enormes Potenzial, denn statt flüssigem Helium genügt der wesentlich kostengünstigere flüssige Stickstoff zur Kühlung in den supraleitenden Zustand. Die industrielle Verarbeitung dieser Materialien ist wegen der komplexen, anisotropen Kristallstruktur zwar aufwendig und dementsprechend teuer. Doch die Nachfrage nach supraleitenden Kabeln hat in jüngster Zeit stark zugenommen – u. a. aufgrund massiver Investitionen in die Entwicklung kompakter **Kernfusionsreaktoren**, die hohe Magnetfelder benötigen. Die zu erwartenden Skalierungseffekte könnten in den kommenden Jahren die Herstellungskosten erheblich senken und damit den Weg zu großflächigen Anwendungen hochtemperatursupraleitender **Kabel in der Energie- und Medizintechnik** ebnen.

Neue Materialien

Bednorz und Müller leiten die Veröffentlichung, in der sie über die Entdeckung der Kupferoxid-Supraleiter berichten, mit den Worten ein: „An vorderster Front der Supraleitungsforschung steht die empirische Suche nach neuen Materialien.“ Dieses



Schematisches Phasendiagramm von Kupferoxid-Supraleitern als Funktion der Ladungsträgerkonzentration. Die Skizzen zeigen die antiparallele Ausrichtung benachbarter Elektronenspins im antiferromagnetischen Isolator (AFI) und die periodische Modulation der elektrischen Ladung der Kupferionen in einer Ladungsdichtewelle (LDW). Im Supraleiter (SL) arrangieren sich die Cooper-Paare in einem Quantenzustand mit d-Wellen-Symmetrie.

Diktum ist heute so aktuell wie damals. Tatsächlich führte eine Vielzahl von Forschungsansätzen weltweit in den letzten Jahren zur Entdeckung unkonventioneller Supraleitung mit hoher kritischer Temperatur in mehreren Eisen- und Nickelbasierten Verbindungsklassen. Nachdem der chinesische Physiker Meng Wang im Jahr 2023 über eine **Nickeloxid-Verbindung** berichtete, die unter moderatem Druck bereits durch Kühlung mit flüssigem Stickstoff supraleitend wird, schreitet die Forschung an dieser Verbindungsklasse derzeit besonders rasant voran. Ein langfristiges Forschungsziel bleibt dabei die Entwicklung von Materialien, die Supraleitung bei Normaldruck und Raumtemperatur zeigen, denn wenn keine Kühlung erforderlich wäre, würde sich das Potenzial von Supraleitern für alltagstaugliche Geräte noch einmal vervielfältigen. In Zukunft werden sowohl bei der Optimierung bekannter Supraleiter als auch bei der Exploration neuer Materialklassen verstärkt künstliche Intelligenz und Robotik eingesetzt, wodurch sich die Effizienz der empirischen Suche nach Raumtemperatur-Supraleitern deutlich erhöhen könnte. Beim gegenwärtigen Forschungsstand ist kein allgemeines Prinzip bekannt, das diesem Ziel entgegensteht.

Bernhard Keimer

TOPOLOGISCHE QUANTENMATERIALIEN

Eine besondere mathematische Eigenschaft der Geometrie von Objekten hat sehr praktische Auswirkungen. Nicht nur die Grundlagenforschung begeistert sich deshalb für sogenannte topologische Materialien – auch die angewandte Physik hat längst ein Auge auf diese geworfen.

Kann man ein Objekt spiegeln, und es sieht danach immer noch genauso aus wie vorher, so ist es spiegelsymmetrisch. Genauso gibt es auch Symmetrien bezüglich Drehachsen, Punkten oder Bewegungen – so lernt man es bereits in der Schule. Die Symmetrie ist aber nicht nur ein wichtiges Konzept in der Geometrie, sondern auch ein zentrales Leitprinzip der modernen Physik. Mit ihr lassen sich Materiezustände und die Übergänge zwischen ihnen beschreiben: Zum Beispiel werden durch die regelmäßige Anordnung der Atome in einem Kristallgitter bestimmte Richtungen im Raum ausgezeichnet. Dadurch gibt es nur diskrete Drehungen, die den Kristall in sich selbst überführen. Schmilzt man das Material, geht die atomare Ordnung verloren und alle Richtungen im Raum werden gleichwertig. In diesem Sinn hat die Schmelze eine höhere Symmetrie (mehr Symmetrieachsen) als der Kristall.

Die **Topologie** ist ein weiteres mathematisches Konzept, das in der Physik eine fast ebenso grundlegende Rolle spielt. Sie beschäftigt sich damit, welche Eigenschaften geometrischer Objekte bei kontinuierlichen Verformungen (wie Dehnen oder Verdrehen, nicht aber Zerreißen oder Verkleben) unverändert bleiben. Die Topologie erklärt die Stabilität bestimmter geometrischer Muster in physikalischen Systemen, wie etwa Wirbel in einem Stromfluss oder sogenannte **Skyrmionen** in zweidimensionalen Magneten (Seite 81).

So wie sich zwei verschiedene Aggregatzustände durch ihre Symmetrie unterscheiden können – zum Beispiel flüssig und fest – können sich zwei physikalische Zustände auch durch ihren topologischen Charakter unterscheiden.

Quanten-Hall-Effekt und Topologie

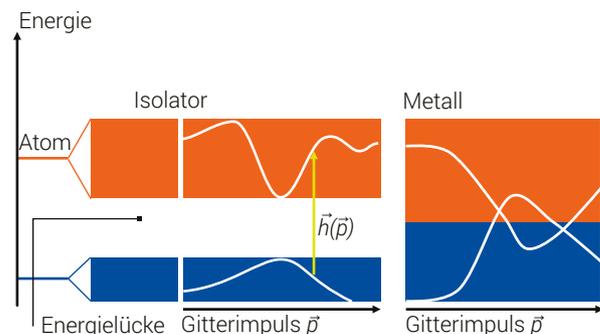
Wie bei vielen anderen physikalischen Entdeckungen kam man der fundamentalen Rolle der Topologie durch eine experimentelle Beobachtung auf die Spur. Im Jahr 1980 untersuchte Klaus von Klitzing bestimmte Halbleiterstrukturen mithilfe von extrem starken Magnetfeldern. Die Elektronen können sich in diesem Experiment nur in einer dünnen zweidimensionalen Schicht bewegen. Allerdings verhindert das Magnetfeld, dass nach Anlegen einer elektrischen Spannung ein Strom in Richtung der elektrischen Feldes fließen kann, d. h. die Struktur wird elektrisch isolierend. Stattdessen gibt es einen elektrischen Strom senkrecht zur angelegten Spannung. Dieses Phänomen wird als Hall-Effekt bezeichnet und war im Prinzip schon lange bekannt. Was von Klitzing aber völlig überraschend bei den von ihm verwendeten hohen Magnetfeldern beobachtete, war die Tatsache, dass der gemessene

Hall-Widerstand (das Verhältnis aus angelegter Spannung und dem senkrecht fließenden Hall-Strom) nur ganz bestimmte Werte annimmt, die sich aus ganzzahligen Brüchen ergeben: Er ist quantisiert. Dieses Phänomen bezeichnet man als **Quanten-Hall-Effekt**.

Normalerweise lassen sich Quanteneffekte eher im Mikrokosmos beobachten, beispielsweise bei einzelnen Atomen. Dass sich nun ein Quantenphänomen an makroskopischen Halbleiterstrukturen – von unterschiedlicher Probengröße, chemischer Zusammensetzung oder Probenreinheit – als ganzzahlige Vielfache einer Naturkonstanten mit überragender Präzision (bis auf zehn Ziffern genau!) messen ließ, war erstaunlich.

Um das zu verstehen, betrachten wir, wie elektrische Leiter und Isolatoren quantenmechanisch beschrieben werden. Im einzelnen Atom können Elektronen nur ganz bestimmte, feste Energiewerte annehmen. Werden Atome im Kristallgitter eines Festkörpers periodisch angeordnet, werden daraus breite Energiebänder, die die Energiebereiche beschreiben, welche prinzipiell von den Elektronen besetzt werden können.

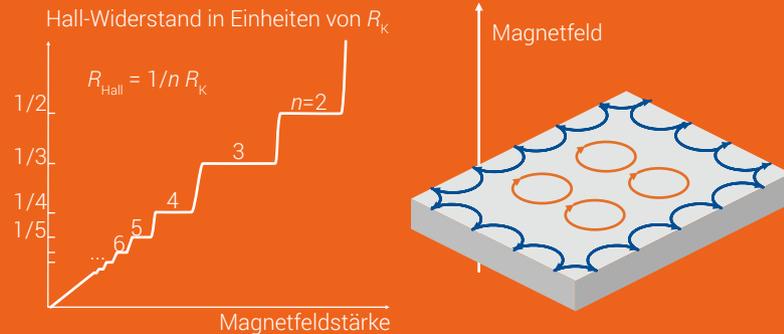
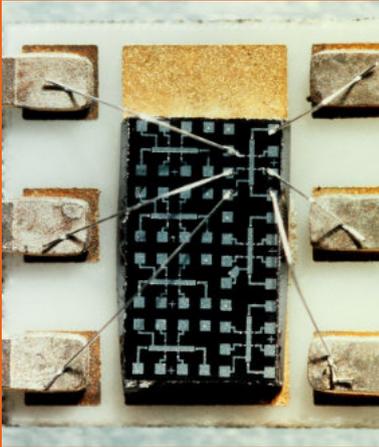
Ob ein Material ein elektrischer Leiter oder Isolator ist, hängt davon ab, wie die Energien der Elektronen tatsächlich auf diese Bänder verteilt sind und wie sich besetzte und unbesetzte **Bänder** gegenüberstehen. Bei einem Isolator sind alle Bänder entweder vollständig besetzt oder vollständig leer, und zwi-



Während Elektronen in einem isolierten Atom nur diskrete Energiewerte annehmen können, weiten sich die energetischen Zustände in einem Festkörper zu breiten Bändern auf. In Isolatoren und Halbleitern sind vollbesetzte (blau) und leere (orange) Elektronenbänder durch eine Energielücke h voneinander getrennt. In einem Metall ist mindestens ein Band nur teilweise gefüllt, sodass es keine Lücke zwischen besetzten und leeren Zuständen gibt.

DER QUANTEN-HALL-EFFEKT

In einem Feldeffekttransistor, wie er von Klaus von Klitzing untersucht wurde (links), können sich die Elektronen nur in einer dünnen zweidimensionalen Schicht bewegen. In einem angelegten Magnetfeld werden die Elektronen durch die Lorentzkraft auf enge Kreisbahnen gezwungen, durch die der Transistor im Inneren elektrisch isolierend wird. Am Rand werden die Elektronen auf ihren Kreisbahnen dagegen immer wieder reflektiert, sodass die Elektronen effektiv um die gesamte Probe herumgeführt werden (rechts). Diese Randbewegung ist für den beobachteten Quanten-Hall-Effekt verantwortlich, in dem nur bestimmte Widerstände auftreten (Mitte, mehr dazu auf Seite 211).



schen ihnen liegt eine Energielücke. Um die Elektronen zur Stromleitung anzuregen, müssen sie diese Energielücke überwinden, wofür normalerweise die Energie fehlt. In einem Metall ist dagegen mindestens ein Band nur teilweise gefüllt, sodass es gar keine Energielücke gibt. Daher sind Metalle gute elektrische Leiter.

Für die quantenmechanische Beschreibung der Elektronen benötigt man aber nicht nur ihre Energie, sondern auch ihren Impuls \vec{p} (für ein freies, nichtrelativistisches Elektron ist der Impuls das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit). Dadurch hängt die Energielücke zwischen besetzten und unbesetzten Bändern im Prinzip auch vom Impuls ab. Zum anderen – und das ist eine relativ neue Erkenntnis – handelt es sich bei der Energielücke nicht einfach nur um einen Energiewert, sondern sie hat auch eine Richtung. Somit lässt sich die Energielücke als dreidimensionaler Vektor $\vec{h}(\vec{p})$ darstellen, wobei der Betrag dieses Vektors einfach die Anregungsenergie beim Impuls \vec{p} ist.

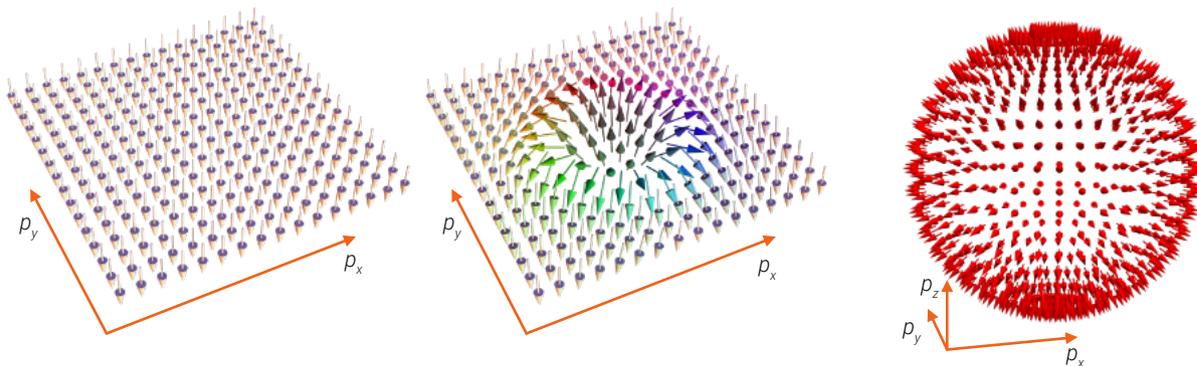
Um die Bandstruktur eines Isolators zu beschreiben, muss man jedem Impuls einen solchen Energielücken-Vektor zuordnen. Das sich ergebende Vektorfeld $\vec{h}(\vec{p})$ kann man sich wie einen zweidimensionalen Magneten vorstellen, in dem die Vektoren \vec{h} an jedem Punkt im Impulsraum die Magnetisierungsrichtung und -größe anzeigen. Das Spannende ist nun, dass die Energielückenvektoren im Impulsraum topologische – und das bedeutet hier wirbelartige – Konfigurationen einnehmen können, ähnlich wie die Skyrmionen im Ortsraum. Die Anzahl dieser Impulsraum-Wirbelstrukturen ist eine topologische Unveränderliche, die gegenüber äußeren Störungen extrem robust ist. Dies bedeutet: Man kann den Wirbel nicht aufbrechen, ohne dass die Länge des Lückenvektors \vec{h} für einen bestimmten Impuls \vec{p} verschwindet – und der Isolator sich damit zu einem Metall wandelt. Eine veränderte Topologie bedeutet damit veränderte makroskopische Eigenschaften, wie oben vorausgeschickt.

Eine buchstäbliche Randerscheinung

Auch wenn dies zunächst wie eine mathematische Kuriosität klingt, haben die Lückenvektor-Wirbel bemerkenswerte physikalische Konsequenzen am Rand des Materials: Da sie nur innerhalb des Materials existieren können, muss der Lückenvektor am Rand verschwinden, d. h. die Energielücke wird dort zwangsläufig Null. Dies hat die messbare Folge, dass eine dünne Randschicht metallisch wird, also den elektrischen Strom leitet, während das Innere des Materials elektrisch isolierend bleibt. Tatsächlich leitet der Rand den Strom nahezu ideal, denn die topologischen Lückenvektor-Wirbel erzwingen, dass sich die Elektronen am Rand nur in eine Richtung bewegen und nicht zurückgestreut werden können. Dies ist eine Situation, die in „normalen“ Metalldrähten nicht auftritt: Dort führt Rückstreuung an Störungen und Verunreinigungen des Kristallgitters immer zu einem materialabhängigen elektrischen Widerstand. Beim Quanten-Hall-Effekt dagegen entsteht zu jedem Lückenvektor-Wirbel im Inneren des Materials ein perfekter Einbahnstraßenkanal am Rand, sodass der Widerstand entlang des Rands verschwindet. Gleichzeitig trägt jeder Wirbel einen universellen, also materialunabhängigen Beitrag zum Kehrwert des Hall-Widerstandes bei. Der Quanten-Hall-Effekt misst damit direkt die Anzahl der Lückenvektor-Wirbel!

Topologische Isolatoren

Der Quanten-Hall-Effekt hat noch einen Zwilling, den gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effekt. Dabei führen Wechselwirkungen zwischen den Elektronen zu weiteren Spannungsstufen. Lange dachte man, dass diese beiden Phänomene die einzigen Beispiele für isolierende Materialien wären, deren Eigenschaften durch Topologie bestimmt sind. Tatsächlich wurden Mitte der 2000er-Jahre aber Isolatoren entdeckt, die ebenfalls topologische Wirbel des Energielücken-Vektors aufweisen, ohne dafür aber Magnetfelder oder eine Beschrän-



Die faszinierenden Eigenschaften topologischer Quantenmaterialien verstecken sich in der Textur des Energielücken-Vektors. Bei einem normalen Isolator ist dies unspektakulär (links), bei topologischen Isolatoren treten Wirbel auf (mittleres Bild), die an magnetische Skyrmionen erinnern. Bei einem dreidimensionalen topologischen Metall nimmt die Lückenvektor-Textur die Gestalt eines Iglus an, wobei der Lückenvektor im Zentrum Null wird.

kung der Elektronen auf zwei Dimensionen zu erfordern: Bei dieser neu entdeckten Materialklasse, den **topologischen Isolatoren** ist das Innere isolierend und der Rand nahezu perfekt leitend – bei dreidimensionalen Objekten die gesamte Oberfläche.

Wie beim Quanten-Hall-Effekt sind auch bei topologischen Isolatoren die Randzustände und Quantisierungsphänomene eine direkte Folge ihrer topologischen Bandlücke. Elektronen können sich in diesen Zuständen entlang des Rands bzw. der Oberfläche eines topologischen Isolators bewegen, wobei die Orientierung ihrer Spins fest an ihre Bewegungsrichtung gekoppelt ist: Elektronen, die sich in entgegengesetzten Richtungen bewegen, haben auch entgegengesetzt orientierte Spins. Dieses Phänomen schützt die Randlektronen – ähnlich zum Quanten-Hall-Effekt – vor Rückstreuung: Einmal in Bewegung gesetzt, bewegen sie sich ungebremst weiter.

Topologische Eigenschaften treten auch in anderen Materialklassen auf. In topologischen Metallen erzwingt die Topologie beispielsweise, dass der Lückenvektor $\vec{h}(\vec{p})$ an einem bestimmten Impuls \vec{p} verschwindet. **Topologische Supraleiter** sind ein weiteres Beispiel: Trotz ihrer perfekten elektrischen Leitfähigkeit ähneln sie Isolatoren in der Hinsicht, dass sie ebenfalls eine Energielücke für elektronische Anregungen besitzen. Bei einem topologischen Supraleiter wird diese Lücke an der Oberfläche des Materials durch Zustände gefüllt, die ungewöhnliche Eigenschaften besitzen: Sie verhalten sich in einem bestimmten Sinn wie Teilchen, die man als ihr eigenes Antiteilchen auffassen kann. Diese Zustände werden als „Majorana-Moden“ bezeichnet, weil ihre mathematische Beschreibung große Ähnlichkeiten mit der von sogenannten Majorana-Fermionen besitzt, hypothetischen Elementarteilchen aus der Hochenergiephysik, die in der Tat ihr eigenes Antiteilchen darstellen. Jenseits von elektronischen Quantenmaterialien können topologische Phasen aber auch in **photonschen und mechanischen Systemen** sowie in elektrischen Schaltkreisen erzeugt werden.

Mögliche Anwendungen

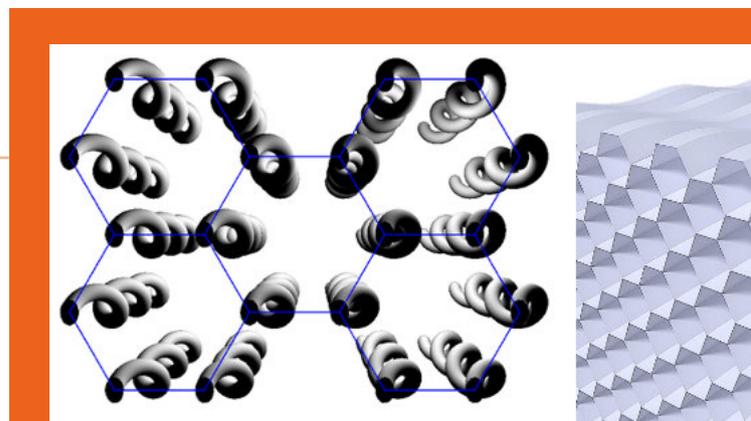
Die Erforschung topologischer Materialphasen wurde bisher hauptsächlich aus wissenschaftlicher Neugier betrieben. Darüber hinaus eröffnen sich aus den einzigartigen Eigenschaften topologischer Materialien vielfältige Anwendungsperspektiven. So wird die bisher unübertroffene Genauigkeit des

Quanten-Hall-Effekts in der Metrologie genutzt, um hochpräzise **Strom- und Spannungsnormale** zu realisieren (Seite 209ff.). Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Quantenelektronik, die auf der hochgenauen Kontrolle einzelner Elektronen in Nanostrukturen basiert. Topologische Supraleiter haben großes Potenzial für das Quantencomputing, weil sie sich zur Speicherung und Verarbeitung von Quanteninformation eignen, die optimal vor äußeren Störungen geschützt ist (Seite 199).

Ganz besonders großes Potenzial besitzen topologische Materialien für eine nachhaltige Mikroelektronik. Bereits heute geht ein substantieller Teil der weltweit produzierten elektrischen Energie durch Wärmeverluste in der siliziumbasierten Informations- und Kommunikationstechnologie verloren. Computerchips, die den verlustfreien Stromfluss durch die Einbahnstraßen-Randkanäle topologischer Isolatoren nutzen, könnten hier ein vielversprechender Ausweg sein.

Das ist allerdings nur der Anfang – wir entdecken ständig neue topologische Materialien und können sogar deren Eigenschaften maßschneidern. In den kommenden Jahren wird es eine zentrale Aufgabe der Physik sein, das enorme Potenzial dieser neuen Klasse von Quantenmaterialien zu erschließen.

Piet W. Brouwer und Ralph Claessen



TOPOLOGISCHE PHOTONIK

Licht zu verwenden, um Information zu übertragen, zu verarbeiten und zu speichern: Das ist ein Anliegen der Photonik. Mit dem Erfolg der Topologischen Isolatoren in der Festkörperphysik entstand der Wunsch, topologische Prinzipien auch auf Licht anwenden zu können. Die möglichen Anwendungen für die Photonik wären von unschätzbarem Wert.

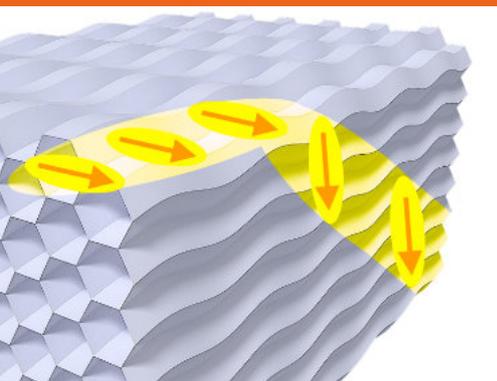
Leider funktioniert der ursprünglich für Festkörper vorgeschlagene Mechanismus nur bei Elektronen und nicht bei Photonen. Das hat mit deren grundlegenden Eigenschaften zu tun: Elektronen sind Fermionen und tragen eine elektrische Ladung, Photonen sind Bosonen und tragen keine Ladung. In der Welt der Quantenmechanik folgen sie daher grundlegend anderen Prinzipien.

2005 schlug der britische Physiker und Nobelpreisträger Duncan Haldane vor, die Teilchenspins mit starken Magnetfeldern zu beeinflussen, um **topologische Zustände für Licht** zu erzeugen. Dieser Idee folgend gelang es einer Gruppe am MIT im Jahre 2009 erstmals, topologisch geschützte Randzustände im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums zu demonstrieren. Damit läutete sie die experimentelle Phase der topologischen Photonik ein. Dieser Ansatz ist jedoch für sichtbares Licht nicht möglich, denn in diesem Wellenlängenbereich sind die magnetischen Effekte aller Materialien dafür zu klein.

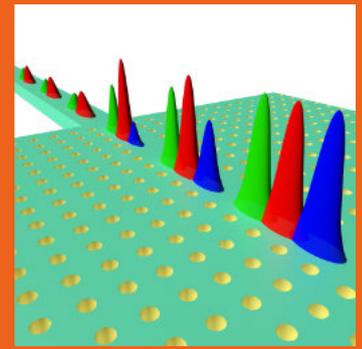
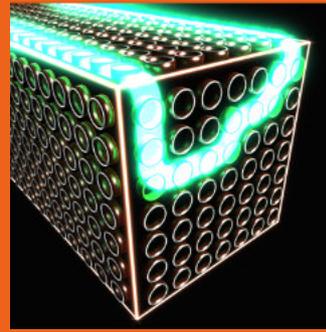
Eine vielversprechende Idee, topologische Effekte im sichtbaren Spektralbereich zu realisieren, war, das zugrundeliegende photonische System zeitlich zu modulieren, sodass die Zeitumkehrsymmetrie (eine fundamentale Symmetrie in der Physik) gebrochen wird. Dies – so kann man theoretisch zeigen – würde die Topologie des Systems ändern. Die Modulationsfrequenz sollte jedoch im gleichen Bereich wie die Lichtfrequenz liegen, was bei sichtbarem Licht einer Frequenz im Petahertz-Bereich entspricht. Elektronisch ist dies nicht zu erreichen; die schnellsten elektronischen Schaltungen sind rund 10 000-mal langsamer.

Im Jahre 2013 konnte dieses Problem durch die Nutzung eines Systems **gekoppelter Wellenleiter** gelöst werden, in welchem einer der beiden Wellenleiter die Rolle des Modulators des anderen Leiters übernimmt. Eine Distanz von einem Zentimeter entspricht ungefähr einer Laufzeit des Lichts von zehn Femtosekunden, sodass eine räumliche Struktur entlang der Wellenleiter im Millimeterbereich genau den Einfluss auf die Physik des propagierenden Lichts hat wie eine echte zeitliche Modulation auf der benötigten Zeitskala. Die Modulation selbst wurde durch eine helixförmige

Verdrillung der Wellenleiter realisiert, wodurch sich schließlich topologisch geschützte Randzustände ausbildeten. Das Licht, welches am Rand der Struktur eingekoppelt wird, läuft streufrei und ungehindert am Rand des Systems ent-



Photonische topologische Isolatoren konnten erstmals in komplexen Systemen verdrillter Wellenleiter realisiert werden (links). Das Licht, welches am Rand der Struktur eingekoppelt wird, läuft streufrei und ungehindert am Rand des Systems entlang, um Ecken und Kanten, selbst um Defekte (rechts).



Mithilfe topologisch geschützter Lichtströme in optischen Medien würden phantastische Möglichkeiten eröffnet. So könnte Licht innerhalb kleinster Bereiche auf beliebigen dreidimensionalen Pfaden geführt werden (links). Darüber hinaus wäre es auch denkbar, langsames Licht in speziellen Kanälen streufrei über bisher unerreichte Distanzen zu führen.

lang, um Ecken und Kanten. Selbst Defekte, die man in das System einbrächte (z. B. fehlende oder zusätzliche Wellenleiter), würden das Licht nicht stören. Diese Ergebnisse demonstrierten erstmalig, dass topologisch geschützte Randzustände auch für optische Systeme im sichtbaren Wellenlängenbereich existieren und dass sich in optischen Strukturen die zugrundeliegende Topologie in der Tat durch periodische Modulation des Systems beeinflussen lässt.

Nach Bekanntwerden dieser Experimente brachten in kurzer Folge eine Reihe weiterer Resultate das Feld der topologischen Photonik deutlich weiter voran. So wurden topologische Randzustände beispielsweise in Metamaterialien im Subwellenlängenbereich demonstriert, oder auch in Ringresonatoren aus Silizium, was für das Feld der Siliziumoptik von großer Bedeutung ist. Ein großer Vorteil optischer Systeme ist darüber hinaus, dass in ihnen eine Reihe experimenteller Einschränkungen, wie sie in der Festkörperphysik zu finden sind, nicht existieren. Dazu gehören insbesondere die Wechselwirkung von Elektronen untereinander sowie Gitterschwingungen, welche viele Effekte überdecken. Daher lassen sich in optischen Systemen auch Phänomene realisieren, die in Festkörpern nur sehr schwer oder gar nicht nachzuweisen sind.

Diese Entwicklung macht deutlich, dass dem neuen Forschungsgebiet der topologischen Photonik in vielerlei Hinsicht eine goldene Zukunft bevorsteht. Neben dem offensichtlichen grundlagenphysikalischen Interesse werden topologische Prinzipien in der Optik hochgradig robuste optische Bauelemente ermöglichen, die unempfindlich gegen äußere und innere Störungen sind. Dies kann Einkopplerverluste und unerwünschte Reflexion in optischen Systemen potenziell um Größenordnungen verringern. Topologische Oberflächenzustände werden es erlauben, die Energieanforderungen klassischer Datensignale deutlich zu verringern und Quantenzustände vor Störungen zu schützen.

Alexander Szameit

ROBUSTE MAGNETISCHE MUSTER

In magnetischen Materialien können Muster auf der Nano- und Mikroskala auftreten. Deren Eigenschaften lassen sich auch für die Entwicklung neuartiger Computerchips nutzen.

Ob Streifen, Punkte, Blasen oder Kreise: Muster sind nicht nur schön anzusehen – sie können auch sehr praktisch sein. In der Tierwelt beispielsweise dienen Fellmuster der Tarnung. Doch auch in der Physik treten Muster auf. Diese Texturen haben viele spannende Eigenschaften und Anwendungen. Man findet sie unter anderem in Festkörpern. Ihre Schlüsselcharakteristiken und die zugrunde liegenden mikroskopischen Wechselwirkungen lassen sich zum Beispiel an magnetischen Materialien untersuchen.

Bestimmte Schlüsselcharakteristiken von Texturen – beispielsweise die Zahl ihrer „Wirbel“ – bleiben unverändert, wenn man die gemusterten Objekte langsam verformt. Ähnlich zu einem Haarwirbel auf einem Tennisball kann man diese Wirbel, egal wie man die Haare kämmt, nie ganz entfernen, nur verschieben. Solche unter langsamen Deformationen unveränderlichen Eigenschaften bezeichnet man ganz allgemein als die **Topologie** eines physikalischen Systems.

Topologie als mathematische Disziplin spielt in vielen Bereichen der Physik eine wichtige Rolle (siehe „Topologische Quantenmaterialien“ auf Seite 77). Oft werden bestimmte magnetische Wirbel, **Skymionen**, als Beispiel für eine wichtige Topologie genannt. Ursache für topologische Texturen wie Skymionen sind Wechselwirkungen, die dafür sorgen, dass sich die magnetischen Momente der Atome in einem Material gegeneinander verkippen.

In Ferromagneten sorgt die dominierende Wechselwirkung dafür, dass die magnetischen Momente dazu streben, sich in die gleiche Richtung auszurichten. Auf der Nano- und Mikroskala bilden sich zusätzlich magnetische Domänen, die durch schmale Zwischenbereiche, **Domänenwände**, voneinander getrennt sind. Ändert man nun Eigenschaften des Materials wie dessen Dicke oder legt ein Magnetfeld an, so verändern sich die magnetischen Domänen und Domänenwände in Form und Größe. Tatsächlich entstehen in allen magnetischen Materialien solche Domänen – oder allgemei-

ner **magnetische Texturen** –, sodass die durch die magnetischen Momente gespeicherte Energie einen möglichst geringen Wert einnimmt. So können in einigen Materialien beispielsweise periodische magnetische Anordnungen entstehen.

Aus der Kombination von magnetischen Domänen und periodischen magnetischen Strukturen können topologische Texturen entstehen, also solche, die eine der zuvor genannten unveränderlichen Eigenschaften wie Wirbel beinhalten. Neben Skymionen können auch Texturen mit ungewöhnlichen Namen wie Meronen und Hopfionen auftreten, welche ebenfalls äußerst robust sind. Sind solche wirbelartigen Texturen räumlich kompakt, verhalten sie sich oft wie Teilchen, sind also beispielsweise stabil und können sich bewegen.

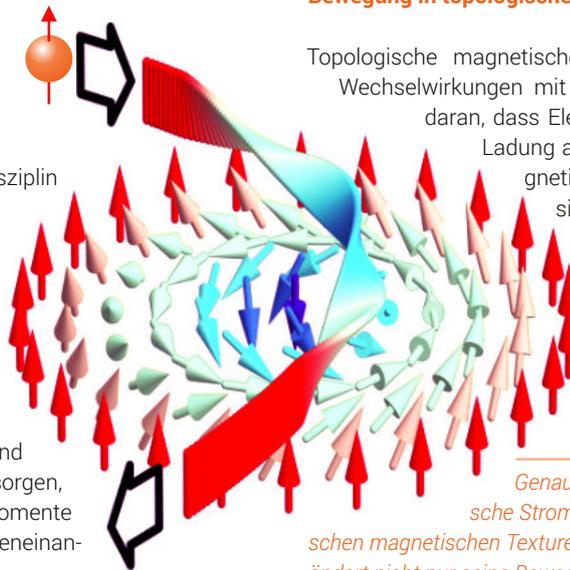
Bewegung in topologischen Texturen

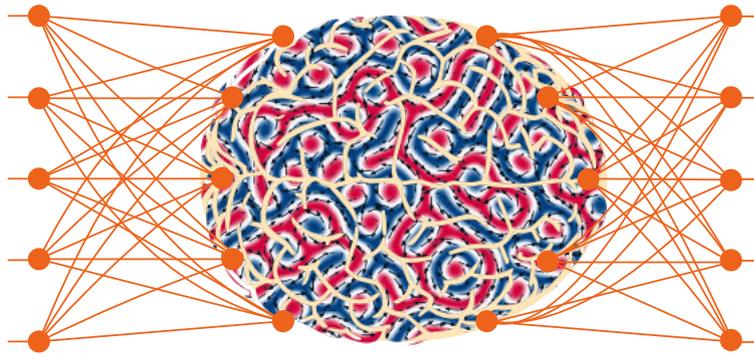
Topologische magnetische Texturen zeigen interessante Wechselwirkungen mit elektrischen Strömen. Das liegt daran, dass Elektronen neben ihrer elektrischen Ladung aufgrund ihres Spins auch ein magnetisches Moment besitzen. Bewegt sich ein Elektron durch ein Material, so beeinflussen sich Spin und magnetische Textur gegenseitig. Das Elektron richtet seine Spinorientierung entlang der magnetischen Textur am jeweiligen Ort aus, an dem es sich befindet. Durch die Rich-

Genauso ungewöhnlich wie der elektrische Stromfluss ist die Dynamik der topologischen magnetischen Texturen. Ein Elektronen (orange Kugel) ändert nicht nur seine Bewegungsrichtung, sondern auch die Ausrichtung seines Spins (farbcodiert) beim Durchgang durch ein Skymion.

tungsänderungen des Elektronenspins wirken wiederum Kräfte auf die magnetische Textur, sodass sich diese verändern kann.

Dieses komplizierte Wechselspiel lässt sich erstaunlich einfach physikalisch beschreiben – mithilfe emergenter zeit- sowie ortsabhängiger magnetischer und elektrischer Felder. Enthält die magnetische Textur Skymionen, so spürt das





Zentrale Komponente eines physikalischen Reservoir-Computers ist Materie, welche drei Haupteigenschaften erfüllt: Komplexität (also etwa komplexe Muster bildet), Nichtlinearität und kurzzeitige Speicherfähigkeit. Topologische magnetische Texturen können die Rolle des Reservoirs übernehmen, da sie dafür die wesentlichen notwendigen Eigenschaften erfüllen.

Elektron diese emergenten Felder und wird dadurch von seiner ursprünglichen Bewegungsbahn abgelenkt. Diese Ablenkung der Elektronen lässt sich in der Form von Hall-Spannungen beobachten. Die Größe der Hall-Spannung hängt von der Anzahl der Wirbel pro Fläche ab und damit von den topologischen Eigenschaften. Gleichzeitig erlaubt die Richtungsänderung der Elektronen, die magnetischen Texturen zu verschieben.

Spinwellen in topologischen Texturen

Die Kopplung zwischen Elektronen und den magnetischen Texturen ist außergewöhnlich effizient und erlaubt es, die magnetischen Texturen schon bei winzigen Stromdichten zu bewegen, was man ebenfalls sehr genau messen kann.

Die Dynamik der magnetischen Momente in magnetisch geordneten Materialien hat einen wellenartigen Charakter, der auch als Spinwelle bezeichnet wird. Dabei kreiselt sozusagen jedes magnetische Moment um seine Ruhelage. Da sich die Ruhelage der magnetischen Momente in einer topologischen Textur von einem magnetischen Moment zum nächsten dreht, ändert sich die Richtung, in die sich die Spinwelle räumlich ausbreitet.

Die Bewegung einer Spinwelle, die sich über ein Skyrmion hinweg ausbreitet, kann nun so verstanden werden, als ob die Spinwelle an ein fiktives magnetisches Feld koppelt, welches die Topologie repräsentiert – ähnlich zum Elektron beim Skyrmion induzierten Hall-Effekt.

Enthält die magnetische Textur Wirbel, die sich nicht einfach herauskämmen lassen, so läuft die Spinwelle auf einem Bogen. Betrachtet man weiterhin eine periodische Anordnung von Skyrmionen, so überlagern sich diese Kreisbahnen der Spinwellen. Während sich die Wellen im Inneren des Materials gegeneinander aufheben, bleiben am Rand des Materials Wellen übrig, die sich zu einem Spinstrom entlang des Rands des Materials verstärken. Mit den Spinwellen am Rand von Materialien mit Skyrmionengittern ist deshalb eine effiziente, energiegunstige und richtungsabhängige Informationsaus-

breitung verbunden, die sich in Zukunft in technologischen Anwendungen nutzen lässt.

Magnetische Hardware

Aufgrund ihrer besonderen, zuvor beschriebenen Eigenschaften eignen sich topologische magnetische Texturen sehr gut als mögliche Hardwarekomponenten im Bereich der Informationsspeicherung und Informationsverarbeitung. In den letzten Jahren wurden auch Anwendungen von magnetischen Mustern im Bereich des Computings vorgeschlagen.

Beim **neuromorphen Computing** etwa handelt es sich um eine Technologie, die von der Funktionsweise unseres Gehirns inspiriert ist. Die Hardware künstlicher neuronaler Netze könnte künftig aus magnetischen Bauteilen bestehen, die besonders kompakt und energieeffizient sind. Ebenfalls nutzt man beim physikalischen **Reservoir-Computing** die natürliche komplexe Dynamik eines physikalischen Systems, die durch eingehende Signale erzeugt wird, um komplexe Aufgaben auf einfache Aufgaben herunterzubrechen.

Magnetische Systeme erfüllen auf ideale Weise alle Kriterien, die ein Reservoir benötigt (Nichtlinearität, Komplexität und Kurzzeitgedächtnis) um seine Aufgabe zu erfüllen, da sie von Natur aus nichtlinear und komplex auf externe Stimuli reagieren. Auch ihre Fähigkeit, Informationen für eine begrenzte Zeit zu speichern – eine Eigenschaft, die als „fading memory“ (engl.: verblassende Erinnerung) bekannt ist – ergibt sich aus im Material vorhandenen Dämpfungsmechanismen. Dank ihrer Kompatibilität mit der derzeit verwendeten Hardware-technologie lassen sich magnetische Reservoirs zudem im Prinzip nahtlos in moderne elektronische Geräte integrieren.

Mit magnetischen Materialien lassen sich auf diese Weise also Klassifizierungsaufgaben lösen, Muster erkennen und fortsetzen und so künftige Ereignisse vorhersagen.

Karin Everschor-Sitte und Christian Pfleiderer

NEUES AUS EINZELNEN ATOMLAGEN

Geschichtete Kristalle können mit erstaunlich einfachen Techniken in einzelne Atomlagen getrennt werden und dabei ihre elektronischen Eigenschaften drastisch ändern. Durch die Kombination solcher zweidimensionaler Kristalle zu Heterostrukturen können neuartige Effekte in Festkörpern beobachtet werden, zugleich sind sie eine vielversprechende Plattform für eine Vielzahl neuartiger Anwendungen.

Bleistift, Klebeband, Nobelpreis

Einzelne Atomlagen voneinander lösen, und das mit bloßen Händen? Was wie eine unmögliche Aufgabe klingt, hat vermutlich jedes Schulkind schon tausendfach unbewusst getan: bei jedem Bleistiftstrich. **Bleistifminen** bestehen aus **Grafit**, einem geschichteten Material: Jede einzelne Atomlage besteht aus stark (kovalent) aneinander gebundenen Kohlenstoffatomen, während benachbarte Lagen nur über die schwache **Van-der-Waals-(vdW)-Wechselwirkung** aneinandergelockt sind. Reibt man diesen Schichtstapel über eine Oberfläche, schälen sich nach und nach Schichten ab, im Extremfall sogar nur einzelne Atomlagen.

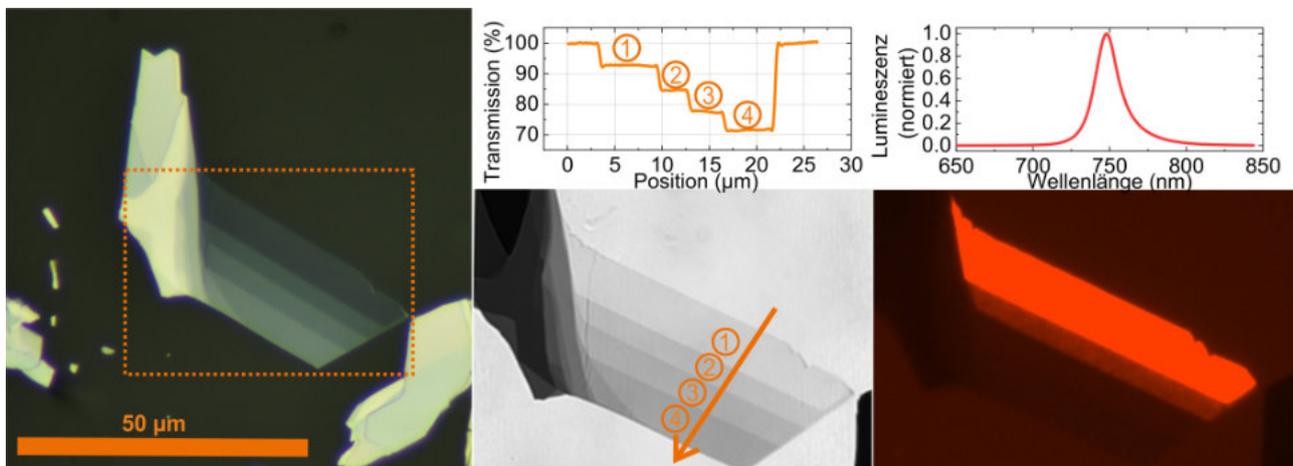
Mit viel Fantasie, Geschick und **Klebeband** konnte dieser Abschälprozess vor etwa 20 Jahren soweit verbessert werden, dass einzelne Atomlagen von Grafit, das Graphen, gezielt auf Oberflächen aufgebracht und untersucht werden konnten. Dabei zeigten sich so erstaunliche mechanische und elektronische Eigenschaften, dass die Entdecker von Graphen mit dem **Physik-Nobelpreis 2010** geehrt wurden. Mit dieser Entdeckung wurde ein neues Kapitel der Festkörperphysik eingeleitet, und weltweit wird intensiv an zweidimensionalen Kristallen geforscht. Noch immer ist Klebeband ein wichtiges Handwerkszeug dieser Forschung.

Der zweidimensionale Zoo

Grafit ist nicht das einzige geschichtete Material, wir kennen bereits Tausende von Kristallen mit ähnlicher Struktur. Inzwischen sind für alle Arten von Festkörpern, wie beispielsweise Isolatoren, Metalle, Halbleiter, Supraleiter oder Ferromagneten, zweidimensionale Materialien bekannt. In vielen Fällen ändern sich dabei die Materialeigenschaften drastisch, wenn sich die Anzahl der Lagen ändert.

Ein eindrucksvolles Beispiel dafür sind halbleitende **Übergangsmetall-Dichalcogenide** wie Molybdänsulfid (MoS_2) und Wolframdiselenid (WSe_2). Diese Materialien sind schon seit Jahrzehnten bekannt, MoS_2 ist ein natürlich vorkommendes Material und ein gängiges Additiv für Motoröle. Dicke Schichten dieser Materialien sind indirekte Halbleiter, so wie etwa Silizium. Erstaunlicherweise ändert sich das für einzelne Monolagen. Sie werden zu direkten Halbleitern und zeigen starke **Photolumineszenz**. Außerdem absorbieren sie ungewöhnlich

Mikroskopbilder einer Flocke aus halbleitendem Wolframdiselenid (WSe_2). Die markierte Länge von $50\ \mu\text{m}$ entspricht der Dicke eines menschlichen Haars. Wird die Flocke mit Weißlicht durchleuchtet, kann die Anzahl der Lagen abgezählt werden: Eine Monolage absorbiert etwa sieben Prozent, zwei Lagen 14 Prozent usw. Die drastischen Änderungen der elektronischen Struktur mit der Anzahl der Lagen werden im Fluoreszenzmikroskop deutlich. Nur die Monolage zeigt starke Photolumineszenz im roten Spektralbereich, da sie ein direkter Halbleiter ist. Mit steigender Anzahl der Lagen bricht die Lumineszenz ein, da Wolframdiselenid dann zu einem indirekten Halbleiter wird.



GRAPHEN – WENN BLEISTIFTE UND GRUNDLAGENFORSCHUNG DIE ZUKUNFT GESTALTEN

Wir alle kennen Kohlenstoff aus unserem Alltag – in verschiedenen Gitterformen kommt er als Grafit, Diamant oder Kohle vor. Bei Graphen dagegen sind die Atome nicht dreidimensional, sondern zweidimensional in Sechsecken angeordnet: eine einzige Atomlage Kohlenstoff.

Die Entdeckung von Graphen im Jahr 2004 brachte den Physikern **Andre Geim** und **Konstantin Novoselov** den Nobelpreis ein. Sie hatten es geschafft, dieses ultradünne Material „mit Bleistift und Klebeband“ herzustellen und seine herausragenden Eigenschaften zu untersuchen: das dünnste Material der Welt, stärker als Stahl, eine bessere elektrische Leitfähigkeit als Kupfer, ein hervorragender Wärmeleiter, dabei flexibel, nahezu transparent und undurchlässig für Flüssigkeiten und Gase.

Auch die Elektronen in Graphen haben besondere Eigenschaften: In der Honigwabenstruktur bewegen sie sich, als hätten sie keine Masse. Das ist bedingt durch ihre bemerkenswerte lineare Bandstruktur, mathematisch äquivalent zu der Beschreibung ultraschneller relativistischer Teilchen mittels der Dirac-Gleichung – wobei Graphen-Elektronen nur etwa 300-mal langsamer sind als die Lichtgeschwindigkeit. Die daraus resultierenden sehr robusten Quanten-Hall-Zustände sind für die Metrologie insbesondere seit der Neudefinition des SI-Systems im Mai 2019 sehr wertvoll (siehe Seite 209).

Die Realisierung exotischer Quantenphänomene im Labor, elegante, theoretische Beschreibungen und das Potenzial für vielfältige Anwendungen – Graphen hat den Weg in die zweidimensionale Welt geebnet.

viel Licht und könnten dadurch Solarzellen mit minimalem Materialeinsatz und hoher Ausbeute ermöglichen. Zweidimensionale Materialien bieten eine Vielzahl weiterer attraktiver Eigenschaften: Sie sind transparent, flexibel und dehnbar. Definitionsgemäß bestehen sie nur aus Oberflächen und können dementsprechend sehr stark mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung treten. Damit sind sie auch sehr interessant für die Sensorik und können neuartige Anwendungen ermöglichen. So wurden bereits Sensoren aus Graphen demonstriert, die wie ein Abziehtattoo auf die Haut geklebt werden und dort Temperatur und Feuchtigkeit messen können.

Flachstapeln

Die Möglichkeiten zweidimensionaler Materialien potenzieren sich durch ihre Kombination. Im Unterschied zu herkömmlichen Festkörpern, die sich nicht so einfach miteinander verbinden lassen, können verschiedene zweidimensionale Kristalle mit einfachen Methoden übereinandergestapelt werden, ohne dass auf unterschiedliche Gitterkonstanten oder Kristallsymmetrien Rücksicht genommen werden muss. Dabei kommt es zu einer elektronischen Wechselwirkung zwischen den Lagen.

Mit den so entstehenden Heterostrukturen können alle üblichen elektronischen Bauelemente wie Transistoren, Photodetektoren, Leuchtdioden oder Solarzellen realisiert werden. Diese können sogar auf Substraten wie etwa biegbaren transparenten Folien aufgebracht werden, ohne ihre Funktionalität einzubüßen. Daraus sind zukünftig ganz neue Anwendungsmöglichkeiten wie aufrollbares elektronisches Papier oder mit Solarzellen beschichtete Rucksäcke denkbar. Diese neuartigen **vdW-Schichtstrukturen** zeichnen sich aber nicht nur durch zukunftsweisende Anwendungsmöglichkeiten aus, sondern zeigen auch nach wie vor spannende und teils überraschende grundlegende Eigenschaften, die es zu erforschen und verstehen gilt. Werden zwei Lagen übereinandergesta-

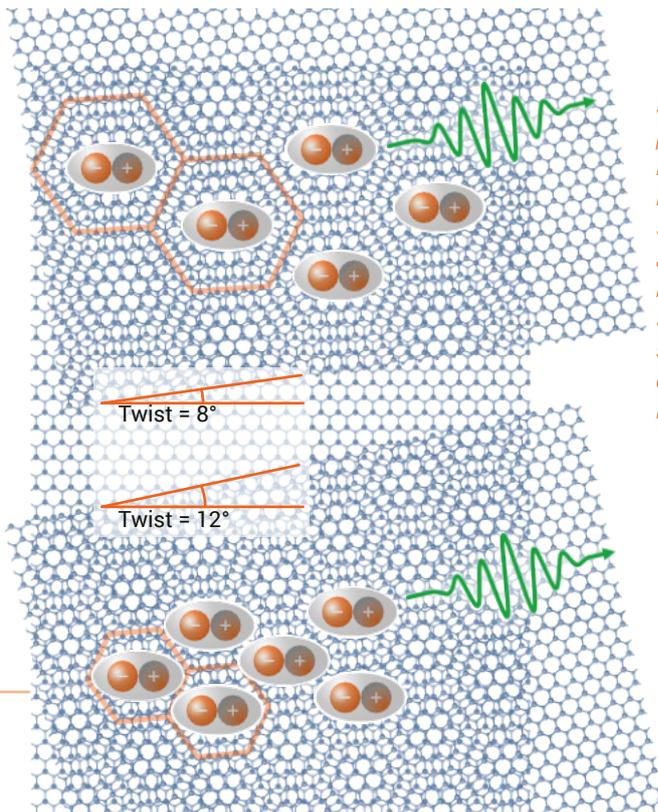
pelt, so ist die Stärke der Wechselwirkung zwischen den Lagen nicht zwingend für alle elektronischen Zustände gleich ausgeprägt, sondern hängt stark von deren Energie und Impuls ab. So kann es sein, dass sich für elektronische Zustände mit einer bestimmten Energie und einem bestimmten Impuls die Schichten nahezu unabhängig erscheinen und für eine minimal andere Energie mit verändertem Impuls die Wechselwirkung zwischen den Lagen so stark ist, dass die elektronischen Zustände nicht mehr einer Lage zuzuordnen sind. Das Schichtsystem verhält sich wie ein neues künstliches Material. Das Besondere ist, dass es dadurch möglich wird, die Vorzugsrichtung von dynamischen Eigenschaften wie Ladungs- und Wärmetransport in der Ebene und senkrecht dazu zu beeinflussen.

Physik mit Twist

Die Möglichkeiten die Materialeigenschaften durch Materialkombinationen und Stapelfolgen maßzuschneidern, erscheinen grenzenlos. Damit aber nicht genug. Die vdW-Wechselwirkung zwischen den einzelnen Lagen ermöglicht einen weiteren Freiheitsgrad – den Rotationsfreiheitsgrad, also den **Twist** genannten Winkel zwischen zwei gleichen oder unterschiedlichen Lagen. Dass dieser Twist, der zunächst wie ein vernachlässigbares Detail erscheint, höchst relevant ist, war sehr schnell für Graphen in Kombination mit hexagonalem Bornitrid klar. Dieses wurde zunächst als sehr reines ultraflaches, isolierendes vdW-Material und somit perfektes Trägermaterial für Graphen verwendet.

Jedoch zeigte sich schnell, dass sich die Graphen-Ladungsträger in Sandwichstrukturen mit einem Twist nahe 0° anders verhalten als bei anderen Drehwinkeln: In Anwesenheit eines senkrechten Magnetfelds, wie es auch der Quanten-Hall-Effekt (Seite 78) erfordert, wird ein fraktales, selbstähnliches Spektrum der nicht wechselwirkenden zweidimensiona-





Schematische Darstellung zweier verdreht übereinander gestapelter hexagonaler Kristallgitter wie beispielsweise „twisted“ Bilagen-Graphen oder Übergangsmetalldichalkogenide. Die überlagerte hexagonale Struktur (angedeutet durch die orangefarbene Sechsecke), das sogenannte Moirégitter, wird klar sichtbar. Wie am Beispiel für Twists von 8° und 12° gezeigt, wird die Gitterkonstante des Moirégitters mit zunehmendem Winkel kleiner. Somit kann die Größe und Tiefe der nulldimensionalen Einschlusspotenziale für Exzitonen e^-h^+ , die so eingeschlossen einzelne Photonen emittieren können, durch den Verdrehwinkel beeinflusst werden.

len Elektronen beobachtet. Dieses als „Hofstadters Schmetterling“ bekannte Diagramm resultiert aus Elektronen in einem periodischen Gitterpotenzial.

Diese periodische Modulation der niederenergetischen Energielandschaft folgt aus der Überlagerung der beiden hexagonalen Kristallgitter von hexagonalem Bornitrid und Graphen mit nur 1,8% Unterschied der Gitterkonstanten. Das so entstehende **Moirémuster** ist wieder ein hexagonales Gitter mit größerer Gitterkonstante, welches die periodische Modulation bewirkt. Moirémuster kennen wir alle aus unserem Alltag, wenn sich beispielsweise zwei gewebte Gardinen leicht überlagern oder wenn mit einer Handykamera ein Bildschirm abfotografiert wird. Das überlagerte Rechteckmuster im letzteren Beispiel entsteht aus der Überlagerung der Pixel des Chips der Kamera und der Pixel des Bildschirms.

Ein Moirémuster entsteht auch, wenn zwei Graphenlagen leicht verdreht aufeinandergestapelt werden. Bei verdrehtem („twisted“) Bilagengraphen (TBL) mit einem Twist von etwa $1,1^\circ$ werden teils exotische Quantenphänomene beobachtet. Das Moirémuster zwingt die Elektronen dazu, sich erheblich zu verlangsamen. Die Elektronen werden schwerer und können dichter zusammen sein. Dadurch treten sie nun intensiv miteinander in Wechselwirkung, was zu stark korreliertem Verhalten führen kann. Die Elektronen spüren sich also gegenseitig, und es kann durch starke Korrelation passieren, dass in der Nachbarschaft eines Elektrons ein Moiré-Gitterplatz aufgrund von Coulomb-Abstoßung nicht besetzt werden kann. Das ansonsten äußerst gut leitende Graphen wird somit zu einem **korrelierten Isolator**. Abhängig von der Anzahl der Elektronen in diesen TBL ändert sich die Korrelation und es können weitere emergente Quantenphänomene wie Supraleitung oder magnetische Ordnungsphänomene auftreten.

Nicht nur verdrehtes Graphen, sondern auch andere verdrehte zweidimensionale Materialien zeigen dieses Verhalten. Beispielsweise ist auch für verdrehte Halbleiterbilagen wie tWSe_2 stark korreliertes Verhalten vorhergesagt und wird intensiv erforscht. Da halbleitende Materialien gebundene Elektron-Loch-Paare – **Exzitonen** – beheimaten, können diese Quasiteilchen im Moirémuster gefangen werden. Diese Exzitonen verhalten sich dann wie in einem nulldimensionalen Quantentrog und zeigen beispielsweise Einzelphotonenemission. Dies ist an sich schon spannend, da nun periodische Netzwerke von Einzelphotonenemittern erzeugt werden können. Zudem ermöglichen sich so neuartige Anwendungen im Bereich der Quantentechnologie.

Es gibt auch Materialkombinationen und Twistwinkel, bei denen das Moirémuster keine Rolle spielt, dennoch können in diesen Schichtstrukturen interessante Phänomene erforscht werden. Da Exzitonen bosonische Quasiteilchen sind, sind Ensembles von langlebigen Exzitonen in vdW-Bilagen geeignete Kandidaten, um exzitonische Bose-Einstein-Kondensation zu untersuchen. Hierbei handelt es sich um ein Phänomen, bei dem alle Teilchen in den Grundzustand kondensieren und eine makroskopische Wellenfunktion, also einen gemeinsamen Zustand, ausbilden und nicht mehr als einzelnes Teilchen existieren. Aufgrund des Pauli-Prinzips ist dies für Fermionen, also Elektronen und Löcher, alleine verboten.

Diese spannenden grundlegenden Eigenschaften, aber auch das große Anwendungspotenzial von zweidimensionalen Kristallen und deren Kombination in Schichtstrukturen erfordern zum einen Kristalle hoher Qualität und zum anderen skalierbare Herstellungsmethoden.



Zoom auf einen Chip mit einer Molybdändiselenid-Flocke (links, blau-türkis). Um die Flocke auf dem makroskopischen Chip unter dem Mikroskop schnell finden zu können, ist dieser mit einem Koordinatensystem versehen (Mitte).

Herausforderungen

In der Grundlagenforschung wird meist noch die von den ersten Arbeiten bekannte Klebebandmethode, kombiniert mit verschiedenen mikromechanischen Stapelmethode, verwendet. Die als Ausgangsmaterial genutzten, meist künstlich gezüchteten Volumenkristalle sind in hoher Qualität verfügbar, und diese Methode erlaubt einen hohen Freiheitsgrad an Materialkombination und Design, ist aber in keinem Fall skalierbar.

Um die Herausforderung der Skalierbarkeit bei der Herstellung zu meistern, gibt es zwei Hauptpfade: In einem „Top-Down“-Ansatz werden vdW-Volumenkristalle mit mechanischen und (elektro-)chemischen Methoden in kleine, ultradünne Kristallite zerlegt und in Lösungsmittel konzentriert. Diese Lösungen können in Tintenstrahl- oder auch Sprühverfahren aufgebracht werden, sodass sich dünne Filme mit einem dichten Netzwerk an zweidimensionalen Kristalliten bilden. Unter Verwendung verschiedener Materialien können so funktionale Bauelemente einfach und kosteneffizient hergestellt werden. Diese Herstellungsmethode erfüllt aber oft nicht die erforderlichen Anforderungen an die elektronischen und optischen Eigenschaften.

In diesem Fall kommen ähnliche Bottom-Up-Verfahren zum Einsatz, wie sie in der Halbleiterindustrie derzeit in Verwendung sind. Das Wachstum von atomar dünnen Kristallen ist eine Herausforderung, da keine chemischen Verbindungen zum Substrat gewünscht sind, sich aber dennoch möglichst ein homogener Film ohne Korngrenzen und anderen Defekten ausbilden soll. Aber auch hier schreitet die Entwicklung schnell voran: Seit 2020 gibt es im hierzu gegründeten Graphene-Flagship-Programm der Europäischen Union eine Pilotlinie, die den Aufbau eines Ökosystems für integrierte 2D-

Materialien in der Halbleiterindustrie vorantreiben soll. So konnte der Herstellungspreis für Graphen mittels chemischer Gasphasenabscheidung soweit gesenkt werden, dass kommerzielle Anwendungen möglich werden. Ähnliche Verfahren für die Herstellung in Wafergröße werden derzeit beispielsweise für zweidimensionale halbleitende Übergangsmetall-Dichalkogeniden etabliert.

Fazit

Eine kommerzielle Anwendung von zweidimensionalen Materialien in der nahen Zukunft erscheint möglich. Ob die etablierte und hochspezialisierte Siliziumtechnologie durch zweidimensionale Materialien ersetzt wird oder ob sich zuvor Anwendungen durchsetzen, bei denen die Materialien ihre besonderen Eigenschaften wie Flexibilität, Transparenz, hybride Integration sowie starke Licht-Materie-Wechselwirkung und einstellbares korreliertes Verhalten voll und ganz ausspielen können, ist offen. Neben dem gesellschaftlich und insbesondere ökologisch höchst relevanten Thema der solaren Energiewandlung und Anwendungen im Bereich der Quantentechnologien sind auch die Umsetzung von neuromorphen Bauteilen und Schaltkreisen denkbar.

Zweidimensionale Materialien und Materialkombinationen sind ein höchst aktuelles Forschungsfeld – es liegt in unserer Hand, was wir aus einzelnen Atomlagen bauen. Es bleibt spannend, welche faszinierenden Eigenschaften noch zum Vorschein kommen und wann die ersten zweidimensionalen Bauelemente in der täglichen Anwendung erscheinen und von jedermann käuflich erworben werden können.

Angelika Knothe, Tobias Korn und Ursula Wurstbauer

COMPUTERBASIERTES MATERIALDESIGN

Mit leistungsstarken Computern lassen sich die Eigenschaften eines Festkörpers ausgehend von der atomaren Ebene berechnen. Das trägt nicht nur zu einem besseren Verständnis der Grundlagen bei, sondern ermöglicht die Beschleunigung und Optimierung der Materialentwicklung, was zu rasanten, bahnbrechenden Innovationen für industrielle Anwendungen führen kann.

Bringt man Atome nahe genug aneinander, so können sie Verbindungen eingehen: Es entstehen Moleküle oder Kristalle. Die Vermittler der jeweiligen Bindungen sind die Elektronen. Das grundlegende Prinzip dabei ist die Minimierung der Energie: Stabile Moleküle und Festkörper befinden sich im Zustand geringster Energie, dem Grundzustand. Aus diesem Grunde kristallisieren Festkörper in der Natur in regelmäßigen Gittern. Je nach chemischer Zusammensetzung bilden sich drei-, zwei- bzw. eindimensionale Systeme heraus.

Mit modernen Syntheseverfahren lassen sich neue **Festkörper nach Maß** herstellen. Dabei wird Atom für Atom, Atomlage für Atomlage auf den wachsenden Festkörper gebracht, um so das Material mit den gewünschten makroskopischen Eigenschaften zu produzieren, welches dann für spezielle elektronische oder mechanische Bauteile verwendet werden kann. Doch auch auf theoretischer Seite ist einiges möglich: Diese Materialien können mithilfe der Grundgleichung der Quantenmechanik – der **Schrödingergleichung** – sehr genau beschrieben werden. Durch Lösen dieser Gleichung lassen sich die Struktur und die elektronischen Eigenschaften beliebiger Festkörper bestimmen und darauf aufbauend die makroskopischen elektrischen, optischen und mechanischen Eigenschaften eines Bauelements verstehen. Allerdings ist das mathematisch nicht immer so einfach, wie es sich vielleicht zunächst anhören mag.

QUANTENTHEORIE

Die Quantentheorie (Seite 24) ist die Grundlage der modernen Atom- und Molekülphysik sowie der Festkörperphysik. Ihre Phänomene finden Anwendung in der Quantenoptik, für Quantencomputing und in der Quantenkryptografie.

Die fundamentale Gleichung der Quantentheorie ist die **Schrödingergleichung**, die mithilfe des Hamiltonoperators H einen Zusammenhang zwischen Energie E und Materie für jedes beliebige System herstellt. Die Information über alle beteiligten Teilchen steckt in einer Wellenfunktion ψ . Im Falle eines Festkörpers wird diese Wellenfunktion sehr komplex. Sie ist nur für kleine Systeme bestehend aus einer Größenordnung von 100 Atomen exakt lösbar.

$$H\psi = E\psi$$

Dichtefunktionaltheorie

Eine Methode zur mathematischen Lösung der Schrödingergleichung für Systeme mit vielen Elektronen (wie einem Festkörper) ist die Dichtefunktionaltheorie (DFT). Sie geht auf Walter Kohn zurück, der 2006 für diese Entwicklung mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt wurde.

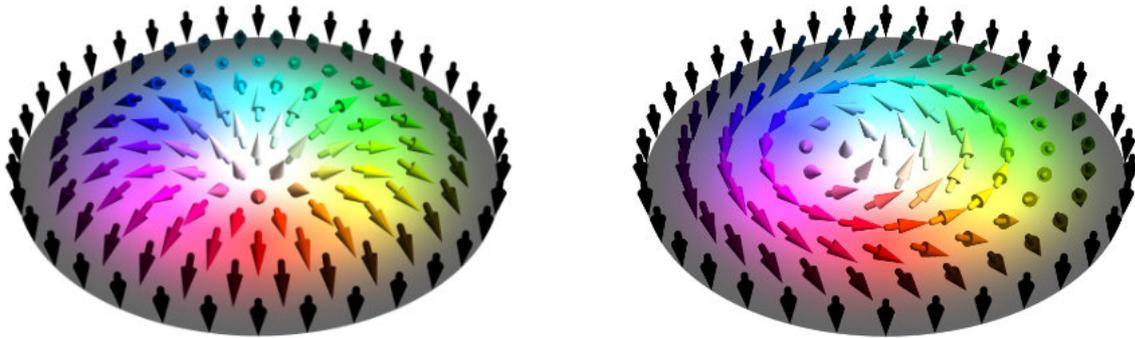
Der zentrale Begriff in der DFT ist die **Elektronendichte**. Sie gibt an, wie die Elektronen im Raum verteilt sind. Im Unterschied zur quantenmechanischen Wellenfunktion, die von den Koordinaten aller Elektronen abhängt, ist die Elektronendichte eine Funktion von nur drei Raumkoordinaten. Das Ziel der DFT besteht darin, die Elektronendichte zu finden, welche die Energie des Systems unter Berücksichtigung aller Wechselwirkungen zwischen den Elektronen sowie den Elektronen mit den Atomkernen minimiert. Diese Elektronendichte gibt dann die tatsächliche Elektronenverteilung im Festkörper an. In Verbindung mit der stetigen Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Computern hat die DFT die theoretische Quantenchemie und die Festkörpertheorie auf ein neues Niveau der mikroskopischen Beschreibung gebracht.

Das Wechselspiel zwischen Elektronen und Atomkernen gestattet es, die Positionen der Atomkerne zu finden, die die Energie des Grundzustands minimieren. Mit der resultierenden Anordnung wird das Energieeigenwertspektrum des Systems berechnet, und darauf aufbauend lassen sich die elektrischen, optischen und mechanischen Eigenschaften untersuchen.

Um darüber hinaus auch magnetische Systeme zu beschreiben, muss man neben der Ladung eines Elektrons auch dessen **Spin** berücksichtigen. Der Spin kann als Eigendrehimpuls des Elektrons veranschaulicht werden und hat entsprechend der Drehrichtung des Elektrons zwei Einstellmöglichkeiten: Spin auf und Spin ab. Mit dem Spin ist ein magnetisches Moment verbunden. In nichtmagnetischen Festkörpern ist die Zahl von Spin-Auf- und Spin-Ab-Elektronen gleich. In der Summe entsteht also kein magnetisches Moment. In magnetischen Systemen besitzen mehr Elektronen die eine als die andere Spinrichtung. Infolgedessen bilden sich magnetische Momente an den atomaren Positionen aus. Die magnetischen Momente treten miteinander in Wechselwirkung, was zur Energie des Systems beiträgt.

Abhängig von der chemischen Zusammensetzung der Festkörper dominieren verschiedene magnetische Konfigurationen im Grundzustand, beispielsweise die ferromagnetische,

← Heterostruktur aus den Perowskiten KTaO_3 und LaTiO_3 . Die beiden Perowskit-Bestandteile sind Isolatoren, die im Kontakt eine leitfähige Grenzfläche ausbilden. Ein wesentlicher Aspekt für die Formierung der leitfähigen Grenzfläche ist die Verkipfung der Sauerstoffoktaeder, die sich nach struktureller Relaxation zeigt (K pink, Ta braun, La grün, Ti blau, O rot).



Stabile nicht-kollineare Verteilungen der Spin-Ausrichtungen sind solche magnetischen Wirbel. Je nach Anordnung der Spins werden sie als Néel-Skyrmion (links) oder Bloch-Skyrmion (rechts) bezeichnet. An jedem Gitterplatz ist ein magnetisches Moment lokalisiert und hier durch einen Pfeil dargestellt.

in der alle magnetischen Momente in die gleiche Richtung zeigen, oder die antiferromagnetische, in der die magnetischen Momente benachbarter Atome antiparallel orientiert sind. Neben der sogenannten kollinearen magnetischen Konfiguration kann es auch energetisch günstig sein, wenn benachbarte magnetische Momente gegeneinander verkippt sind. Ein prominentes Beispiel für eine derartige nicht-kollineare Konfiguration sind **Skyrmionen** (Seite 81).

Kombination von klassischen und quantenmechanischen Simulationen

Bei der Suche nach dem Grundzustand eines Festkörpers unter Berücksichtigung seiner atomaren und elektronischen Struktur wird das System am absoluten Temperaturnullpunkt betrachtet. Den Einfluss der Temperatur zu simulieren, ist jedoch auch wichtig. Dazu wird die Dichtefunktionaltheorie mit klassischen Simulationsmethoden wie Molekulardynamik, Monte-Carlo-Simulationen und Modellen der Kontinuumsmechanik verbunden. Diese Techniken erlauben es, neben der atomaren Struktur sowie den mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften nun auch die thermischen Eigenschaften von Materialien zu betrachten.

Durch den Einsatz von Computersimulationen lassen sich komplexe Materialsysteme analysieren. Das ermöglicht Vorhersagen, wie diese Systeme auf **äußere Einflüsse wie Temperatur, Druck und anderen Umweltbedingungen** reagieren, um experimentelle Untersuchungen zu motivieren und zu ergänzen. Die Ergebnisse computerbasierter Simulationen

können helfen, neue Materialien zu entwerfen und bestehende Materialien zu optimieren. Zum Beispiel können sie bei der Entwicklung von leichten und doch starken Materialien für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt oder bei der Verbesserung der Effizienz von Solarzellen und Batterien helfen.

Darüber hinaus trägt die computerbasierte Materialphysik zur Grundlagenforschung bei, indem sie Einblicke in physikalische Mechanismen und Phänomene auf atomarer Ebene liefert. Sie kann auch dazu beitragen, grundlegende Fragen der Materialwissenschaft zu beantworten, zum Beispiel nach dem Verhalten von Materialien in extremen Umgebungen wie Hochtemperatur- und Hochdruckbedingungen.

Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) werden in zunehmendem Maße an Bedeutung gewinnen, um gigantische Mengen von Materialdaten zu analysieren. Auf der Grundlage dieser Daten können KI-Algorithmen wie maschinelles Lernen und neuronale Netze trainiert werden, um Modelle für das Materialverhalten unter verschiedenen Bedingungen zu erstellen oder neue, bisher unbekannte Materialien mit gewünschten Eigenschaften zu entwerfen. So kann computerbasiertes Materialdesign den Designprozess beschleunigen und die Anzahl der benötigten Experimente auf dem Weg zum Wunschmaterial reduzieren.

Ingrid Mertig

KLÖTZCHENSPIEL MIT KALTEN ATOMEN

Atome einzeln kontrollieren zu können, ist nicht nur ein Wunsch von Materialwissenschaftler:innen. Es ermöglicht, Quantenmaterialien genau zu untersuchen, zu erzeugen und in Zukunft auch technisch zu nutzen.

Ließe sich Materie Atom für Atom beliebig zusammensetzen, so könnte man aus den nahezu unendlich vielen Möglichkeiten die Konfigurationen mit den besten Eigenschaften für bestimmte Anwendungen auswählen – zum Beispiel die besten Supraleiter, die besten Magnete oder die besten Wärmeleiter.

Die größten Chancen, Atome und ihre Wechselwirkungen zu kontrollieren, hat man bei sehr kalten Atomen – denn diese bewegen sich von selbst nur wenig. Zuerst gelungen sind der Nachweis und die Kontrolle einzelner Atome deshalb in einem kalten **Tunnelmikroskop**, einem Gerät, das den quantenmechanischen Tunneleffekt ausnutzt, um einzelne Atome auf Oberflächen nachzuweisen. Atome lassen sich damit auch von der Oberfläche abtrennen und verschieben. Solch ein kaltes Tunnelmikroskop wird in der Regel bei Temperaturen von einigen 10 Millikelvin betrieben.

Die Fortschritte in der Atom- und zunehmend auch der Molekülphysik in den letzten Jahrzehnten ermöglichen mittlerweile Temperaturen, die noch viel dichter am absoluten Temperaturnullpunkt (0 Kelvin) liegen. Dort kommt die thermische Bewegung von Teilchen in einem Gas beinahe zum Stillstand. Einzelne Atome aus diesen Gasen lassen sich mithilfe von Licht kühlen, einfangen, positionieren und nachweisen.

Die makroskopischen Eigenschaften von **Quantenmaterie** sind durch quantenphysikalische Phänomene bestimmt, wie zum Beispiel die Supraleitung. Es gibt Quantenmaterie, die aus Teilchen mit halbzahligem Spin besteht (fermionische Quantenmaterie) und solche aus Teilchen mit ganzzahligem Spin (bosonische Quantenmaterie), wie etwa Atome mit gerader Neutronenzahl. Ein Beispiel für synthetische Quantenmaterie sind **Bose-Einstein-Kondensate** – ein Aggregatzustand von Bosonen, die nicht mehr voneinander unterscheidbar sind und einen gemeinsamen Quantenzustand einnehmen. Eine daraus resultierende Eigenschaft dieser Quantenmaterie ist die **Suprafluidität**, also der Verlust der inneren Reibung einer Flüssigkeit. Im Bereich der fermionischen Quantenmaterie sind **Fermi-Gase** zu nennen, die wie die Elektronen in einem Metall leitende oder isolierende Materiezustände bilden können.

Anders als beim Tunnelmikroskop, wo die Atome wie klassische Teilchen hin- und hergeschoben werden, erlaubt es diese berührungslose Methode, Atom für Atom synthetische Quantenmaterie aufzubauen, denn da die Atome nicht „angefasst“ werden, behalten sie ihre delokalisierten Quantenzustände unter bestimmten Bedingungen bei. So lässt sich nicht nur die geometrische Anordnung der Atome kontrollieren, sondern auch die Wechselwirkung zwischen ihnen. Es lassen sich lokale, langreichweitige, richtungsabhängige,

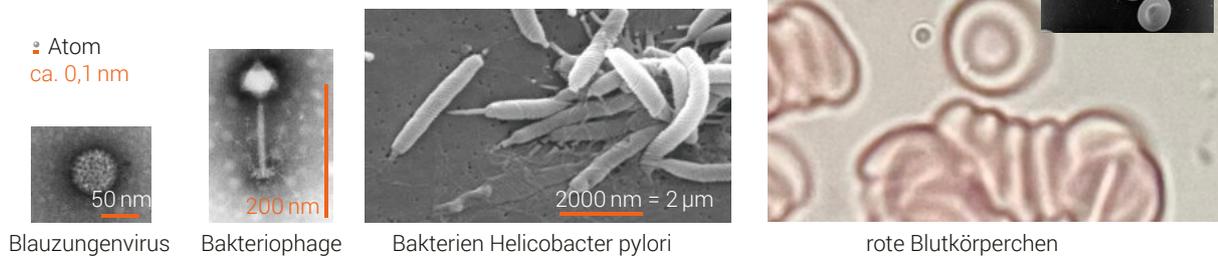
zeitlich schaltbare, starke und schwache Wechselwirkungen realisieren, um synthetische Quantenmaterialien zu erschaffen und zu erforschen.

Typische Atome, die in solchen Experimenten zum Einsatz kommen, sind Alkaliatome wie Rubidium oder Erdalkaliatome wie Calcium, aber auch Edelgase wie Helium oder seltene Erden. Normalerweise verklumpen Stoffe aus diesen atomaren Spezies nahe am Temperaturnullpunkt zu Festkörpern. Die Methode der Laserkühlung erlaubt es jedoch, die synthetischen Quantenmaterialien lange genug gasförmig zu halten, um sie zu untersuchen. Um den Übergang zu einem Festkörper möglichst lange hinauszuzögern, werden die mittleren Abstände zwischen den Atomen größer als 100 Nanometer gehalten – das ist mehr als hundertmal so weit voneinander entfernt wie in einem echten Kristall. Die Quanteneffekte zeigen sich trotzdem, denn die Materiewellenlänge kann viel größer werden als der Abstand zwischen den Atomen. Diese synthetischen Quantenmaterialien können die Untersuchung der Eigenschaften und der einzelnen Effekte auf eine sehr saubere, gut definierte und reproduzierbare Weise ermöglichen.

Die Kühlung von Molekülen hin zum Quantenregime ist experimentell wesentlich anspruchsvoller als die Kühlung von Atomen. Das liegt daran, dass bereits einfachste Moleküle aus nur zwei Atomen von Natur aus vibrieren oder rotieren. Man muss sie also nicht nur an einem Ort einfangen, sondern sie auch an der Rotation und Vibration hindern. Die üblichen Techniken für die Atomkühlung sind dafür allerdings nicht ausgelegt.

Dieses Problem lässt sich umgehen, indem man zunächst zwei Sorten Atome soweit abkühlt, dass die Quanteneffekte dominieren, und dann aus Paaren dieser bereits ultrakalten Atome ultrakalte Moleküle baut. Diese Technik ist sehr erfolgreich und hat bereits zur Erzeugung der ersten Molekülgase im Quantenregime geführt. Sie ist jedoch auf solche Moleküle beschränkt, die aus Atomen bestehen, die sich selbst kühlen lassen. Das sind in der Regel Moleküle aus zwei Alkali-Atomen. Der zweite Ansatz besteht in dem Versuch, eine Vielzahl chemisch unterschiedlicher Moleküle genau wie Atome direkt mit Lasern zu kühlen. Dies funktioniert nicht mit allen Molekülen. Aber durch eine geschickte Auswahl der internen Zustände und günstigen Eigenschaften in der Molekülstruktur lassen sich nicht nur viele zweiatomare, sondern mittlerweile auch polyatomare molekulare Gase abkühlen, einfangen und in **optischen Pinzetten** Molekül für Molekül manipulieren. Optische Pinzetten sind stark fokussierte La-

Giganten unter den Atomen: Die Rydberg-Atome sind so groß wie rote Blutkörperchen!



serstrahlen, die es erlauben, einzelne Atome oder Moleküle festzuhalten. So lassen sich beispielsweise einfachste chemische Reaktionen zwischen genau zwei Molekülen in definierten Quantenzuständen beobachten. Mit der Dipol-Dipol-Wechselwirkung lassen sich die Moleküle in zwei solcher Pinzetten sogar miteinander verschränken. Eine weitere Kontrolle dieser Vorgänge ist durch zusätzliche externe Felder (z. B. Mikrowellen oder Magnetfelder) möglich, welche die chemischen Reaktionen verändern oder sogar verschwinden lassen. Im zweiten Fall lassen sich dann aus Molekülen, genau wie aus Atomen, stabile Gase im Quantenregime erzeugen und für die Erzeugung neuer Materiezustände verwenden.

Wechselwirkungen neutraler Atome

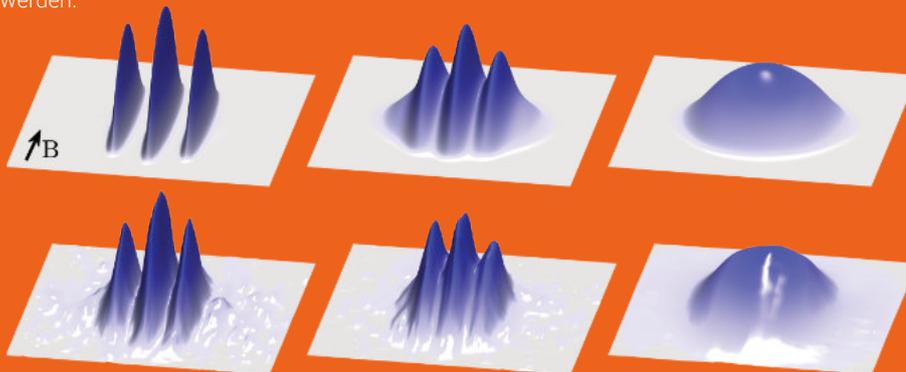
Die stärksten im Labor realisierten Wechselwirkungen zwischen neutralen Atomen erhält man durch sogenannte Ryd-

berg-Zustände. Diese Zustände, benannt nach dem schwedischen Physiker Johannes Rydberg, sind dadurch gekennzeichnet, dass sich ein Elektron aus der Atomhülle in einer energetisch hoch angeregten Schale verhältnismäßig weit weg vom Kern befindet. In den Laboraufbauten mit lasergekühlten Atomen nahe am absoluten Nullpunkt lassen sich die fragilen **Rydberg-Atome** so gut kontrollieren, dass sich ein Elektron im Mittel viele Mikrometer vom Atomkern entfernen kann. Verglichen mit einem Atom im elektronischen Grundzustand bedeutet das eine Vergrößerung des Atomdurchmessers um das Zehntausendfache! Rydberg-Atome erreichen also die Größe von Bakterien oder Blutzellen und sind damit Giganten auf atomaren Längenskalen.

Dadurch, dass sich die Elektronen so weit vom Kern entfernen und dadurch nur schwach gebunden sind, können zwei Rydberg-Atome sehr stark miteinander in Wechselwirkung

SUPRAFESTKÖRPER

In einem Glas Honig liegt eine klassische Mischung von Kristall und Flüssigkeit vor. Es gibt aber auch quantenmechanische Überlagerungen unterschiedlicher Aggregatzustände. Unter einem „Suprafestkörper“ (engl.: supersolid) versteht man einen Materiezustand, der gleichzeitig Eigenschaften eines kristallinen Festkörpers und einer Supraflüssigkeit, bei der keine Reibung der Bestandteile untereinander vorliegt, zeigt. Ein solcher exotischer Zustand konnte erstmalig in dipolaren Quantengasen anhand der charakteristischen Anregungen nachgewiesen werden.



Phasenübergang ausgehend von einem strukturlosen Bose-Einstein-Kondensat (rechts) zu einer Reihe von äquidistanten Tröpfchen (links). Dazwischen (Mitte) kann man den Überlagerungszustand detektieren, welcher in weiteren Messungen alle Eigenschaften eines Suprafestkörpers gezeigt hat. Oben die theoretische Vorhersage, unten die Messung.

treten. Mit schnellen Laserpulsen lässt sich diese Wechselwirkung an- und ausschalten. Darüber hinaus kann man sogar die Natur der Wechselwirkung einstellen. So lässt sich zum Beispiel sowohl die winkelabhängige Dipol-Dipol-Wechselwirkung erzeugen, als auch die im Raum in allen Richtungen gleiche Van-der-Waals-Wechselwirkung. Anders als bei den magnetischen Atomen und polaren Molekülen haben wir es hier jedoch mit einer Anregung zu tun, die nur einige zehn Mikrosekunden anhält. Im Experiment muss man sich also etwas beeilen.

Kalte Atome und Quantencomputer

Die Forschung mit lasergekühlten Rydberg-Atomen hat in den letzten Jahren einen massiven Schub erhalten, als deren Eigenschaften erstmals mit dem Konzept sogenannter optischer Pinzetten kombiniert wurde. Setzt man viele davon ein, so lassen sich Tausende von Atomen gezielt im Raum anordnen und somit große Strukturen aus einzelnen Atomen mit nahezu beliebiger Geometrie aufbauen. Jedes dieser Atome kann dann zum Beispiel als **Qubit** in einem Quantencomputer eingesetzt werden. Logische Operationen zwischen benachbarten Qubits lassen sich dann über die schnelle Laseranregung in die Rydberg-Zustände realisieren. Dabei dauert diese Verknüpfung nur einen Bruchteil einer Mikrosekunde, und macht sich den sogenannten **Rydberg-Blockadeeffekt** zu Nutze. Dieser Effekt entsteht durch die starke Wechselwirkung zwischen benachbarten Rydberg-Atomen und verbietet deren gleichzeitige Anregung, was ein zentraler Grundbaustein für den Aufbau eines universellen Quantencomputers ist.

Die Rydberg-Atome eignen sich ähnlich gut zur Realisierung von Quantencomputern wie jene, die auf gefangenen Ionen oder supraleitenden Qubits basieren. Neben der Implementierung von quantenlogischen Schaltungen lassen sich die Rydberg-Atomaneordnungen auch verwenden, um Quantenmaterialien gezielt „nachzubilden“ und deren Phasen und deren Nichtgleichgewichtsdynamik zu studieren. Anders als in den optischen Gittern können die Atome hier allerdings nicht

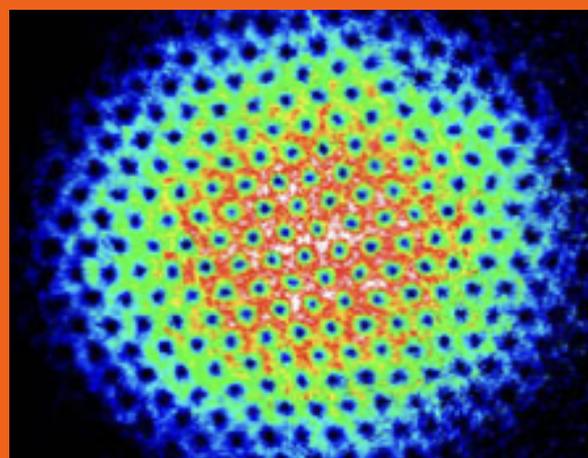
zwischen den optischen Pinzetten hin- und hertunneln. Die Materialien, die somit nachgebildet werden können, sind daher solche mit lokalisierten Elektronen, deren Spins im Kollektiv zum Beispiel einen Quantenmagneten bilden.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der lasergekühlten Rydberg-Atome liegt in der Quantenoptik. Hierbei wird wieder der Blockadeeffekt ausgenutzt, der dafür sorgen kann, dass sich Tausende Atome gefangen in einer gemeinsamen optischen Falle zu einem sogenannten „Superatom“ zusammenschließen. Ein solches Superatom kann dann in einer Art und Weise an eingestrahlte Laserfelder koppeln, dass starke Nichtlinearitäten für einzelne Photonen erzeugt werden. Mit diesem Werkzeugkasten lassen sich dann beispielsweise Lichtschalter für einzelne Photonen bauen, oder logische Operationen zwischen einzelnen Photonen realisieren.

Die immensen Fortschritte in der präzisen Kontrolle einzelner Atome und Moleküle und ihrer Wechselwirkung ermöglichen uns mehr und mehr, Quantenmaterie im Labor Baustein für Baustein zusammensetzen und die Eigenschaften der resultierenden Quantensysteme genauestens zu beeinflussen und auszunutzen. Damit werden sowohl ganz neue Einblicke in die hochkomplexe Physik korrelierter Vielteilchensysteme möglich („Modellsysteme für die Quantenwelt“ auf Seite 205) als auch fundamental neue Anwendungen, wie z. B. Quantencomputer basierend auf einzelnen Atomen und Molekülen (auf Seite 187 und ab Seite 199). Dieses eng verzahnte Wechselspiel zwischen Grundlagenforschung in der Quantenmechanik und direkten Anwendungen in der Quantentechnologie wird das Gebiet der ultrakalten Atome und Moleküle auch in den nächsten Jahrzehnten antreiben.

*Sebastian Hofferberth, Tim Langen, Robert Löw,
Florian Meinert, Silke Ospelkaus und Tilman Pfau*

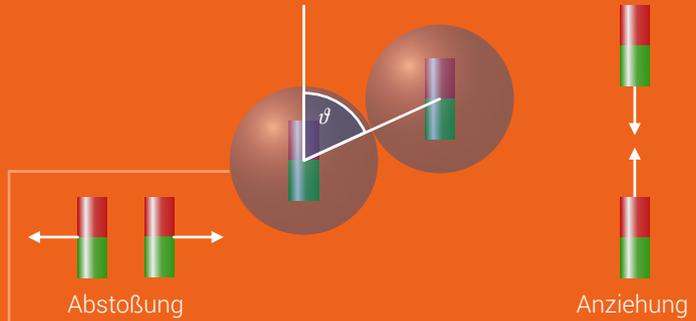
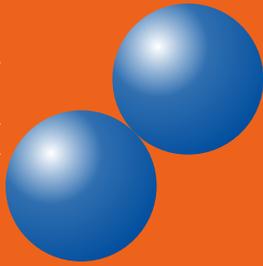
Wenn ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) in schnelle Drehung versetzt wird, treten Wirbel in das Kondensat ein und ordnen sich in einem regelmäßigen Gitter (Abrikosov-Gitter) an. In diesem Falschfarbenbild, das entlang der Drehachse aufgenommen wurde, entspricht jeder dunkle Fleck im Kondensat dem atomfreien Kern eines einzelnen Wirbels. Die sechseckige Anordnung der Wirbel ist deutlich zu erkennen. Das Auftreten dieser Wirbel ist eine Folge der supraflüssigen Natur eines BEC.



DIPOLARE GASE

Kontaktwechselwirkung

Die Wechselwirkung zwischen Atomen ist ein komplexer Vorgang, insbesondere wenn dabei die quantenmechanischen Eigenschaften der Atome berücksichtigt werden müssen. Kühlt man Atome jedoch bis nahe zum absoluten Nullpunkt, bewegen sie sich nicht nur sehr langsam, sondern ihre Wechselwirkung vereinfacht sich auch zu einer sogenannten **Kontaktwechselwirkung**: Kommen sich zwei Atome nahe, stoßen sie wie klassische Billardkugeln aneinander. Eine solche Wechselwirkung ist also kurzreichweitig und isotrop, also in allen Richtungen gleich. In Bose-Einstein-Kondensaten führt sie beispielsweise zu einer Suprafluidität des atomaren Gases. Das heißt, das Gas kann reibungsfrei strömen und bildet bei Rotation **quantisierte Wirbel** aus. Ob die Kontaktwechselwirkung anziehend oder abstoßend ist, lässt sich dabei sehr einfach durch ein externes Magnetfeld einstellen. Die Eigenschaften der entstandenen Quantenmaterie lassen sich also durch einfaches Drehen eines Knopfes, in diesem Fall an einer Stromquelle zur Kontrolle des Magnetfelds, kontrollieren.



Magnetische Dipol-Dipol-Wechselwirkung

Stark magnetische Atome, wie zum Beispiel die seltenen Erden Dysprosium oder Erbium, verhalten sich zusätzlich zur Kontaktwechselwirkung selbst wie winzige Stabmagnete. Sie zeigen deshalb die charakteristischen Konsequenzen der langreichweitigen und richtungsabhängigen dipolaren Wechselwirkung. Wenn etwa die atomaren Magnete durch ein äußeres Magnetfeld ausgerichtet werden, so ziehen sie sich an, falls sie sich entlang der Magnetachse treffen. Kommen sie sich hingegen seitwärts nahe, so stoßen sie sich ab. Durch diese **Winkelabhängigkeit** dehnt sich ein gefangenes Quantengas entlang des Magnetfelds aus und zieht sich senkrecht dazu zusammen (Magnetostriktion). Ein solches Verhalten von magnetischen Festkörpern ist seit Langem bekannt (und ist zum Beispiel für das Brummen eines elektrischen Transformators verantwortlich), für ein Gas kann der Effekt jedoch erst bei den tiefen Temperaturen in einem Bose-Einstein-Kondensat beobachtet werden.

Werden die Atome durch das Fallenpotenzial so eingeschlossen, dass der anziehende Teil der Wechselwirkung dominiert, kann es auch zu einem Kollaps des Gases kommen. In Fällen, in denen eine abstoßende Kontaktwechselwirkung mit einer anziehenden Dipol-Dipol-Wechselwirkung konkurriert, lässt sich dieser Kollaps durch die stabilisierende Wirkung von Quantenfluktuationen aufhalten, und es bilden sich stabile Tröpfchen, welche auch ohne äußere Kräfte ähnlich wie Wassertropfen gebunden bleiben. Die Dichte dieser Quantentröpfchen ist etwa 100 Millionen Mal niedriger als die von den leichtesten bisher bekannten Tröpfchen aus Helium. Insbesondere können sich aus mehreren dieser Quantentröpfchen auch wieder periodische Anordnungen ähnlich der Kristall-

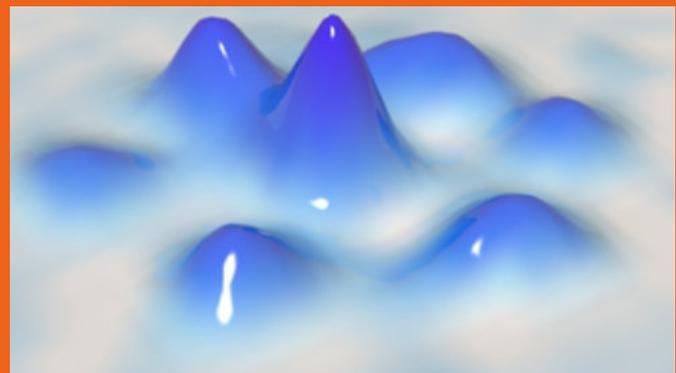
struktur eines Festkörpers bilden. Der resultierende Suprafestkörper kann entgegen unserer Intuition suprafluid und fest zugleich sein, was nochmals die faszinierenden Möglichkeiten neuartiger synthetischer Quantenmaterie unterstreicht.

Elektrische Dipol-Dipol-Wechselwirkung und ultrakalte Moleküle

Noch stärkere dipolare Wechselwirkungen lassen sich mit elektrischen Dipolen erreichen. Der elektrische Dipol entsteht in einem Molekül durch die ungleiche elektrische Ladungsverteilung zwischen zwei unterschiedlichen Atomen, ein Atom zieht dabei die Elektronen stärker an sich als das andere. Die dipolaren Wechselwirkungsenergien können um ein Vielfaches stärker werden als die Wechselwirkungen zwischen magnetischen Atomen. Auch hier können die Dipole wieder durch ein externes Feld – in diesem Fall ein elektrisches Feld – ausgerichtet werden. Da diese Dipole zunächst entlang der Molekülachsen und diese in einem Gas zufällig ausgerichtet sind, lässt sich mit der Stärke des elektrischen Feldes nun auch die Stärke der Wechselwirkung im Laborsystem extern kontrollieren. Dies liefert einen weiteren Regler, um in Experimenten definierte neue Zustände zu erzeugen.

Tim Langen, Silke Ospelkaus und Tilman Pfau

Sieben Quantentröpfchen aus mehreren Tausend ultrakalten Dysprosium Atomen werden in einer harmonischen Falle gefangen. Das Bild wurde mit einer Phasenkontrastmethode in situ aufgenommen. Die Abstände zwischen den Tröpfchen betragen etwa zwei Mikrometer.





ULTRASCHNELLE PROZESSE

Mit ausgeklügelten Methoden lassen sich ultraschnelle Prozesse auf Atomebene verfolgen. Das liefert Erkenntnisse über die Struktur und Funktion von Materie – und erlaubt es, diese gezielt zu manipulieren.

In zahlreichen physikalischen, chemischen und biologischen Systemen laufen Prozesse ab, die schneller sind als alles Alltägliche: Sie dauern nur Bruchteile von Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) bis zu einigen Pikosekunden ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). Die Ultrakurzzeitphysik erfasst derartige Vorgänge zeitaufgelöst mit Methoden der Spektroskopie und der Strukturforschung. In Verbindung mit Theorie und Simulation lassen sich aus ultraschnellen Abläufen quantitative Informationen darüber gewinnen, wie bestimmte Wechselwirkungen die Funktion oder Struktur eines Materials auf atomaren Längen- und Zeitskalen beeinflussen. Neben der Grundlagenforschung kommen die Methoden der Ultrakurzzeitphysik auch im Bereich bildgebender Verfahren, in der Materialbearbeitung und in der Telekommunikation zum Einsatz.

Elektronen in flüssiger Umgebung

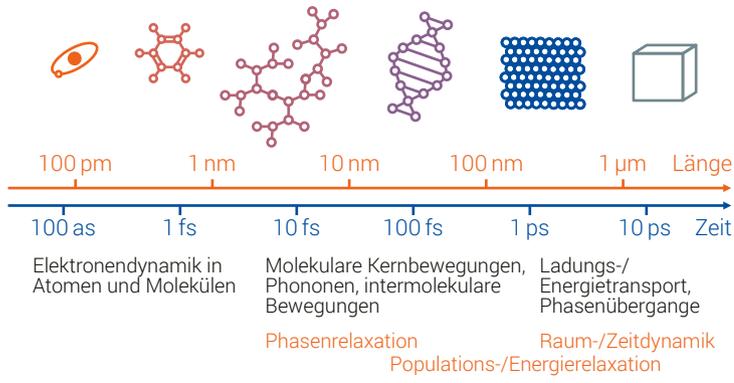
Ein Beispiel aktueller Grundlagenforschung der Ultrakurzzeitphysik sind Prozesse, die aufgrund elektrischer Felder in Flüssigkeiten stattfinden. In Wassermolekülen (H_2O) zum Beispiel ist die Ladung räumlich nicht gleich verteilt: Die Moleküle besitzen ein elektrisches Dipolmoment – und dies hat einige Konsequenzen: Im flüssigen Zustand führt dies etwa zu lokalen elektrischen Feldern von bis zu 200 MV/cm ! Weil sich die Moleküle aber bewegen, fluktuieren Richtung und Stärke dieser Felder auf einer Femtosekunden-Zeitskala. In

Die Einheitenvorsätze der Nanowelt

- Nano** 0,000 000 001
- Piko** 0,000 000 000 001
- Femto** 0,000 000 000 000 001
- Atto** 0,000 000 000 000 000 001

Eine Femtosekunde ist also eine Billiardstel Sekunde, ein Nanometer ein Milliardstel Meter.

Längen- und Zeitskalen in der atomaren Welt hängen zusammen. Um also Prozesse, die durch die Elektronen der beteiligten Atome vermittelt werden, zu beobachten, müssen Vorgänge im Bereich von Piko-, Femto- oder Attosekunden aufgezeichnet werden. Gleichzeitig ist eine sehr hohe räumliche Auflösung notwendig, weil diese Prozesse auf sehr kleinem Raum auf der Skala von Nanometern stattfinden.



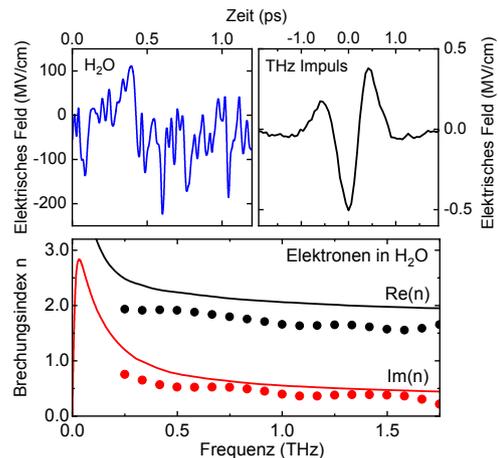
METHODEN DER ULTRAKURZZEITPHYSIK

Das zentrale Werkzeug der Ultrakurzzeitphysik sind Lichtimpulse, die heute in einem Frequenzbereich vom fernen Infrarot (Terahertzbereich) bis zu harter Röntgenstrahlung zur Verfügung stehen. Die Impulse dauern zwischen ca. 50 Attosekunden und einigen Hundert Femtosekunden. Sie lassen sich im Labor mithilfe von Lasern und Methoden der nichtlinearen Optik erzeugen. Daneben liefern Großgeräte wie Freie-Elektronen-Laser ultrakurze Lichtimpulse im Bereich des extremen Ultravioletten (EUV/XUV) und der weichen und harten Röntgenstrahlung. Die mittleren optischen Leistungen betragen bis zu einige Watt, die Spitzenintensitäten räumlich fokussierter Impulse bis zu 10^{20} W/cm^2 . Die zeitlichen und spektralen Eigenschaften ultrakurzer Lichtimpulse lassen sich in weiten Bereichen kontrolliert verändern und quantitativ charakterisieren. Neben ultrakurzen Lichtimpulsen lassen sich auch Femtosekunden-Elektronenimpulse erzeugen.

Die zeitaufgelöste Ultrakurzzeitspektroskopie beruht vorwiegend auf der aufeinanderfolgenden nichtlinearen Wechselwirkung von mindestens zwei ultrakurzen Impulsen mit der zu untersuchenden Probe. Bei der Anrege-Abtast-Methode erzeugt der erste Impuls eine Anregung, deren Dynamik mittels eines zweiten Impulses über die nichtlineare Veränderung optischer Eigenschaften, z. B. der Probenabsorption, verfolgt wird. Durch wiederholte Messungen zu verschiedenen Verzögerungszeiten des Abtastimpulses relativ zum Anregungsimpuls werden Einzelschritte des Ablaufs erfasst und damit die Dynamik des Prozesses rekonstruiert. Die Zeitauflösung ist durch die Dauer der beiden Impulse, die Genauigkeit ihrer Synchronisation und ggf. durch den Durchlauf des Impulses durch die Probe bestimmt. Neben dieser Anrege-Abtast-Methode stehen Verfahren der nichtlinearen Vierwellenmischung zur Verfügung, bei der eine Abfolge von

← Raumzeitliche Abbildung des nanoskaligen Phasenübergangs in einer wenige Mikrometer großen Tantal-Disulfid-Probe, aufgenommen mit einem ultraschnellen Transmissions-Elektronenmikroskop.

Das elektrische Feld in Wasser (H_2O) fluktuiert auf ultrakurzen Zeitskalen und erreicht Spitzenwerte von 200 MV/cm. Damit lassen sich Wassermoleküle spontan ionisieren. Ein Lichtimpuls im THz-Frequenzbereich beschleunigt die so erzeugten Elektronen von ihrem Erzeugungsort über eine Nanometerentfernung in die Wasserumgebung, wo sie lokalisieren. Die Elektronen sind über die Erniedrigung des Brechungsindex der Flüssigkeit nachweisbar (Punkte). Zum Vergleich zeigen die durchgezogenen Linien den Realteil $Re(n)$ und Imaginärteil $Im(n)$ des Brechungsindex von nicht angeregtem Wasser.



derart starken Feldern kann ein Elektron im H_2O -Molekül sich aus seiner Bindung lösen und dank des quantenmechanischen Tunneleffekts in die umgebende Flüssigkeit gelangen. Zurück bleibt ein positiv geladenes H_2O^+ -Ion. Im thermischen Gleichgewicht finden das Ion und das Elektron schnell wieder zusammen, da das fluktuierende äußere Feld keine dauerhafte räumliche Ladungstrennung erlaubt. In einem äußeren elektrischen Feld ausreichender Stärke lässt sich das Elektron allerdings vom Ionisationsort entfernen und die Ladungsrekombination weitgehend unterdrücken.

Dies zeigen Experimente, bei denen Impulse im fernen Infrarot, dem sogenannten Terahertz-(THz)-Frequenzbereich, das äußere Feld bereitstellen. Bei einer Wellenlänge von 300 μm beträgt die Impulsdauer ca. eine Pikosekunde. Die Amplitude des elektrischen Felds ist wesentlich kleiner als das ionisierende Feld der Flüssigkeit und löst damit selbst keine Ionisation aus. Jedoch werden durch spontane Ionisation freigesetzte Elektronen in Richtung des THz-Felds über viele Nanometer von ihrem Erzeugungsort wegbewegt und finden sich nach einer Neuorientierung der Wassermoleküle in ei-

ner energetisch stabilen Zustand ein. Dieser Ablösungsprozess erfolgt innerhalb einiger Zehntel Pikosekunden. Die Ladungstrennung und die Lokalisierung der Elektronen lassen sich mit ultrakurzen Abtastimpulsen nachweisen: entweder über die optische Absorption der lokalisierten Elektronen im nahen Infrarot oder die Veränderung des Brechungsindex der Flüssigkeit für THz-Wellen. Für eine irreversible Trennung von Elektron und Mutterion muss das äußere THz-Feld so stark sein, dass das Elektron die Ionisationsenergie eines Wassermoleküls erreicht.

Die ultraschnelle Lokalisierung der Elektronen stößt kollektive Schwingungen der gelösten Elektronen und ihrer Wasserhüllen an. Dies führt zur Emission von THz-Wellen, die sich messen lassen. Detaillierte Experimente zeigen, dass die Frequenz vom lokalen elektrischen Feld und damit von der Elektronenkonzentration abhängt. Überraschend ist die sehr geringe Dämpfung dieser **Polaronen** genannten Schwingungen. Das liegt daran, dass die Schwingungsbewegung longitudinal ist: Sie koppelt schwach an die fluktuierenden Kräfte in der Umgebung und wird deshalb nur wenig gedämpft. Die

drei Lichtimpulsen zum Einsatz kommt. Diese Methode kann Einblick in zeitabhängige optische Polarisierungen geben.

Experimente mit intensiven Lichtimpulsen erschließen Bereiche der Licht-Materie-Wechselwirkung, die sich nicht mit anderen Methoden erfassen lassen. Hierbei wird die Kopplung an das optische Feld deutlich stärker als die Kopplungen elementarer Anregungen innerhalb des Probenmaterials. Für die Erzeugung von ultrakurzen Lichtimpulsen erhielten **Anne L'Huillier, Pierre Agostini** und **Ferenc Krausz** 2023 den **Nobelpreis für Physik**. Bei der ausgezeichneten Methode erzeugt ein Lichtimpuls in einem Edelgas freie Elektronen. Kehrt das Elektron zum ionisierten Atom zurück, so kann durch Rekombination Licht bei hohen Vielfachen der ursprünglichen optischen Frequenz mit einer Attosekunden-Zeitstruktur erzeugt werden – also kürzer als alles vorher Dagewesene.

Während die optische Ultrakurzzeitspektroskopie nichtlineare Veränderungen der dielektrischen Funktion ausnutzt, liefern Methoden der zeitaufgelösten Röntgen- und Elektronenstreuung einen direkten Zugang zu vorübergehenden Strukturen auf atomaren Längenskalen. Hierbei werden optisch induzierte Änderungen der atomaren Anordnung und/oder des elektronischen Systems durch Streuung eines Röntgen- oder Elektronen-Abtastimpulses an der angeregten Probe sichtbar gemacht. Die Sequenz der Streu- oder Beugungsmuster erlaubt die unmittelbare Rekonstruktion zeitabhängiger atomarer Abstände und/oder Ladungsverteilungen, etwa bei Phasenübergängen oder chemischen Reaktionen.

Ultraschnelles Transmissions-Elektronenmikroskop (UTEM): Ein Laserimpuls (rot) induziert eine elektronische Anregung in der untersuchten Probe, und die in einer Photokathode erzeugten Elektronenimpulse bilden die resultierende strukturelle Änderung in Transmissions-Beugung oder Mikroskopie ab.

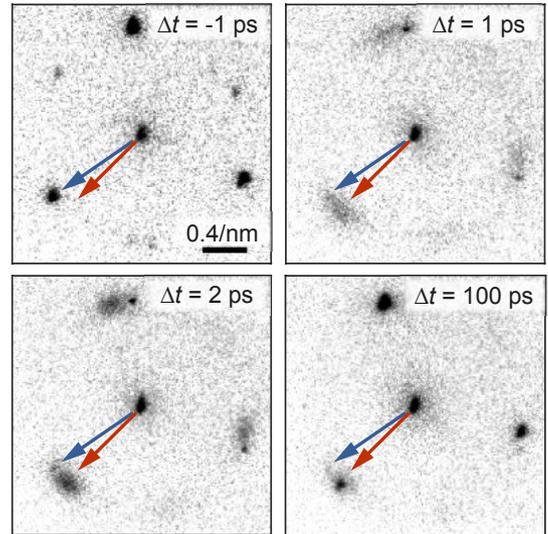
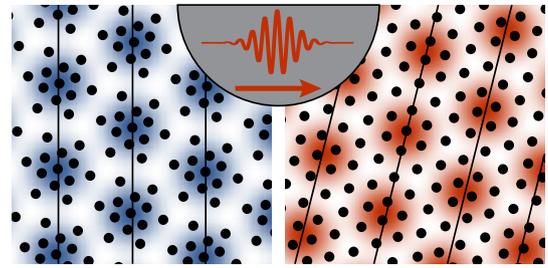
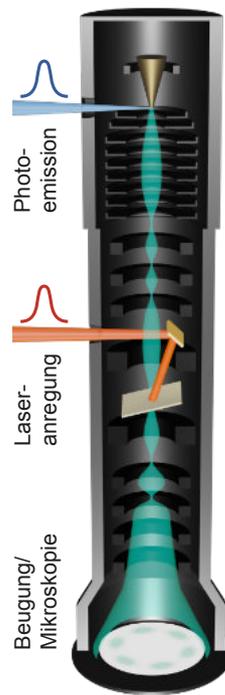
Schwingung beeinflusst auch die Ladungsverteilung des beteiligten Kollektivs, was zur Abstrahlung von THz-Wellen führt. Eine theoretische Analyse stimmt mit den gemessenen Frequenzen überein.

Diese Ergebnisse geben Einblick in bisher unbekannte feldgetriebene Prozesse in Flüssigkeiten – nicht nur in Wasser, sondern beispielsweise auch in Alkoholen. Die zeitaufgelöste nichtlineare THz-Spektroskopie hat ein großes Potenzial für die Aufklärung kollektiver schwacher Wechselwirkungen in ungeordneten Systemen. Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen, wie sich die elektrischen Eigenschaften von Flüssigkeiten dank maßgeschneiderter starker THz-Felder manipulieren lassen.

Ultraschnelle Elektronenmikroskopie und -beugung

Ein weiteres faszinierendes Beispiel für einen ultraschnellen Prozess ist der Wechsel eines Materials vom metallischen in den isolierenden Zustand – und umgekehrt. Dabei verändern sich nicht nur die atomare Struktur des Materials, sondern auch seine elektronischen Eigenschaften. Im thermischen Gleichgewicht lassen sich diese Änderungen durch eine Variation der Temperatur auslösen: Unterhalb einer kritischen Temperatur erfahren viele Materialien mit richtungsabhängigen Eigenschaften (Anisotropie) einen spontanen Symmetriebruch in ihrem Kristallgitter. Dadurch entsteht eine wellenförmige Verzerrung des Gitters, eine sogenannte Ladungsdichtewelle. Diese Struktur entsteht, weil sich die Energieniveaus der Elektronen verändern, Bandlücken entstehen und dies die Gesamtenergie des Systems absenkt. Als Folge der Bandlücken sinkt die elektrische Leitfähigkeit teils um viele Größenordnungen.

Mit den Methoden der Ultrakurzzeitphysik ist es möglich, solche Materialien aus ihrem Gleichgewichtszustand herauszubringen und die genauen Wechselwirkungen zwischen Gitter und Elektronen zu untersuchen. Beispielsweise kann ein kurzer Laserimpuls Elektronen in energetisch höhere Zustände oberhalb der Bandlücken anheben. Dies verringert die ursprüngliche energetische Stabilisierung der Ladungsdichtewelle, wodurch gleichmäßige Schwingungen der Welle und der dazugehörigen Gitterverzerrung ausgelöst werden. Wird die Anregung durch den Laser stark genug, bricht die Bandlücke komplett zusammen, und das Material wechselt in einen metallischen Zustand – ein laserinduzierter Phasenübergang.



Die ultraschnellen Änderungen in der Kristallstruktur von Tantal-Disulfid durch einen Laserimpuls werden im UTEM sichtbar. Im oberen Bild ist die schematische Umordnung in der Größe überzeichnet. Die unteren vier Abbildungen zeigen das Beugungsbild zu vier verschiedenen Zeitpunkten: Unmittelbar vor dem Laserblitz (-1 ps) sind die Positionen klar erkennbar, unmittelbar danach (1 ps bzw. 2 ps) verschwimmen die Beugungsbilder, was auf den Umordnungsprozess selbst hindeutet. Nach 100 ps hat die Struktur ihre neue Form eingenommen, was am Drehwinkel und den wieder scharfen Beugungsbildern erkennbar ist.

Ein derzeit intensiv untersuchtes Material, bei dem solche laserinduzierten Übergänge auftreten, ist Tantal-Disulfid. Dieses Schichtmaterial zeigt bei unterschiedlichen Temperaturen verschiedene ladungsgeordnete Phasen. Bei Raumtemperatur bildet sich eine hexagonale Überstruktur mit 13 Tantal-Atomen pro Einheitszelle, wobei das Gitter zu einem zentralen Atom hin kontrahiert ist. Wird das Material auf über 80 Grad Celsius erhitzt, dreht sich die Überstruktur leicht, und die Atome verschieben sich gegenüber dem ursprünglichen Gitter. Diese unterschiedlichen Kristallstrukturen lassen sich mit zeitaufgelösten Elektronenbeugungsexperimenten sichtbar machen. Neben der Analyse anhand von Beugungstechniken ermöglicht die ultraschnelle Elektronenmikroskopie heute auch direkte Abbildungen dieser rasanten Strukturveränderungen im Realraum, etwa mithilfe von Dunkelfeldkontrast. Insgesamt stehen mittlerweile vielfältige hochentwickelte Elektronen- und Röntgenmethoden zur Verfügung, um ultraschnelle Strukturänderungen präzise zu untersuchen.

Thomas Elsaesser und Claus Ropers



WEICHE UND AKTIVE MATERIE

Weiche Materie zeichnet sich durch eine Reihe faszinierender Eigenschaften aus. Der Aufwand, den man zu ihrer Untersuchung betreiben muss, zahlt sich aus: Mit weicher Materie könnten sich in Zukunft intelligente und selbstanpassende Materialien herstellen lassen.

Diamant, Stahl und Eis sind hart: Ein Materialblock lässt sich nicht einfach mit bloßen Händen deformieren. Es gibt aber auch eine Fülle von Materialien, die man ohne großen Kraftaufwand verformen kann – etwa Ketchup, Zahnpasta, Wandfarbe und Wachs. Solche Materialien fasst man unter dem Begriff **weiche Materie** zusammen. Die genaue Definition bezieht sich auf die charakteristischen Größen ihrer bestimmenden Strukturen: Mindestens eine von ihnen muss im mittleren – also mesoskopischen – Bereich zwischen einem Nanometer und ein paar Mikrometern liegen. Nach einer anderen Definition charakterisiert sich weiche Materie dadurch, dass eine typische Bindungsenergie zwischen den Bausteinen etwa so groß ist wie ihre Wärmeenergie. Das ist relativ klein im Vergleich zu molekularen Systemen. Dies führt zusammen mit der mesoskopischen Größe der Bausteine dazu, dass sich das Objekt kaum noch einer Scherung widersetzt – es ist weich.

Lange Zeit galten solche weichen Materialien als kompliziert, nicht reproduzierbar, unkontrollierbar und von daher unerforschbar. Dies hat sich vor rund vier Jahrzehnten deutlich geändert. Saubere Probenpräparation ermöglichte wiederholbare Untersuchungen an gut charakterisierten Proben. Damit hat sich das Forschungsgebiet weicher Materialien zu einem wichtigen Gebiet der Physik der kondensierten Materie entwickelt. Die weiche Materie in diesem Sinne enthält verschiedene Materialklassen, wobei insbesondere **kolloidale Dispersionen** (kurz: **Kolloide**), **Flüssigkristalle**, **Polymere** und **Mikroemulsionen** zu nennen sind.

Arten klassischer weicher Materie

Kolloidale Dispersionen bestehen aus festen Partikeln, die in einer Trägerflüssigkeit schweben – so wie Tinte, bei der Farbpartikel in einem wässrigen Lösungsmittel schwimmen. Heutzutage kann man mikrometergroße Kügelchen aus Plastik herstellen, die sich untereinander genau gleichen. Saugt man das Lösungsmittel ab, so kristallisieren die Kügelchen zu einem periodischen Gitter, wobei der Abstand zwischen benachbarten Kügelchen etwa dem Kugeldurchmesser entspricht. Ein solcher Kolloidkristall ist sehr weich, er reagiert empfindlich auf Scherkräfte. Ein wichtiger Vorteil von Kolloiden ist, dass die Teilchen durch vielfache Stöße immer auf der Temperatur des Lösungsmittels bleiben. Das macht sie zu sehr guten Gleichgewichtssystemen, die sich daher mithilfe der statistischen Physik beschreiben lassen. Kolloide dienen deshalb als klassische Modellsysteme von wechselwirkenden Teilchen und damit zur Untersuchung von Phasenübergängen

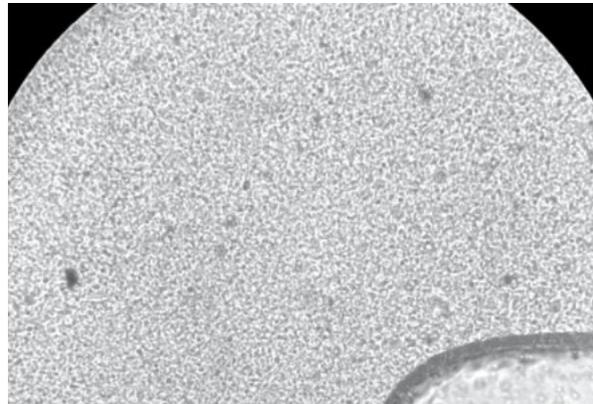
im Gleichgewicht, wie etwa des Gefrier- oder Schmelzübergangs.

Auch im Gleichgewicht bewegen sich die einzelnen Kolloide auf mikroskopischer Skala fortlaufend (**Brownsche Bewegung**). Durch die vielen Stöße mit dem Lösungsmittel ergeben sich gezackte und zufällige Teilchenbahnen. Die Bewegung der Kolloide ist sehr viel langsamer als die der Lösungsmittelmoleküle. Sind Hindernisse wie zum Beispiel benachbarte Teilchen im Spiel, dann ist die Dynamik hingegen sehr viel komplizierter. Die Bewegung eines Teilchens setzt nämlich auch das Lösungsmittel in Bewegung. Das dadurch entstehende Strömungsfeld spüren wiederum die benachbarten Teilchen.

Obwohl die einzelnen Kolloidteilchen so klein sind, dass man sie nicht mit dem bloßen Auge sieht, kann man sie mit verschiedenen Methoden orten und so ganze Teilchenbahnen nachmessen. Mit Laserfeldern gelingt es, sie wie mit einer Pinzette festzuhalten oder an einen bestimmten Ort zu bringen, was eine vielseitige Einflussnahme erlaubt (optische Pinzette, Physik-Nobelpreis 2018).

Etwas anders ist die Situation, wenn nicht kugelförmige Teilchen, sondern zum Beispiel stäbchenförmige oder kegelförmige Kolloidteilchen vorliegen. Hier können nicht nur die Zentren der Teilchen geordnet sein, sondern die Orientierung der Teilchen im Raum kann eine Ordnung haben. Eine Substanz mit einer solchen partiellen Ordnung besitzt sowohl flüssige als auch kristalline Eigenschaften, wofür der Begriff Flüssigkristall geprägt wurde. Ein wichtiges Beispiel dafür ist die polare Phase: Hier zeigen die Orientierungen aller Teilchen im Mittel in die gleiche Richtung. Hat man apolare Teilchenformen (das sind Teilchenformen, die man um 180 Grad spiegeln kann, ohne dass sie sich ändern, wie Zylinder) dann tritt keine polare Phase auf, aber es gibt eine orientierungsgeordnete **nematische Phase**. Hier zeigen die Stäbchen im Mittel alle in die gleiche Richtung („nema“ ist Griechisch und heißt Faden). Es gibt noch viele weitere solcher flüssigkristallinen Mesophasen, die teilweise geordnet, teilweise ungeordnet sind.

Ein Polymer besteht aus einer langen Aneinanderreihung von vielen Bausteinen, die durch starke chemische Bindungen verkettet sind. Das einfachste Beispiel ist eine lange Kohlenwasserstoffkette (etwa in Wachs oder Paraffin). Viele solcher Ketten können in der Schmelze oder im Lösungsmittel enthalten sein. Dadurch, dass sie sich verhaken, zu Schlaufen formen und gegenseitig behindern, ist eine theoretische Be-



Wandfarbe (Dispersionsfarbe) ist eine kolloidale Suspension, also eine Mischung von kleinen Festkörperteilchen in einer Trägerflüssigkeit (links oben). In einem Flüssigkristalldisplay (LCD) wird durch eine elektrische Spannung zwischen der ungeordneten durchsichtigen Flüssigphase und der geordneten kristallinen Phase umgeschaltet (rechts oben). Langkettige Polymere können sich zu dauerhaft flexiblen Festkörpern anordnen, wie etwa die Kautschukmoleküle in Gummi (links unten). Eine Emulsion wie im Beispiel der Milch schließlich ist eine Mischung aus verschiedenen, nicht ineinander löslichen Flüssigkeiten, sodass Mikrotröpfchen erhalten bleiben (hier Fetttröpfchen in Kaffeesahne unter dem Mikroskop, rechts unten).

schreibung nicht einfach, gelingt aber mit moderner Skalentheorie.

Emulsionen sind Mischungen von zwei Flüssigkeiten, wie die Fetttröpfchen, die in der wässrigen Milch schwimmen. Bei geringer Oberflächenspannung zwischen den beiden koexistierenden flüssigen Phasen können die Grenzflächen dabei sehr viel komplizierter sein als die reine Kugelform. Solche geringen Oberflächenspannungen können durch den Zusatz von Molekülen erreicht werden, die sich an der Grenzfläche festsetzen. Thermische Schwankungen lassen die Grenzfläche dann stark fluktuieren und es können neue Strukturen entstehen. Ein Beispiel ist eine Mikroemulsion, die aus Öl, Wasser und Tensidmolekülen besteht und hochkomplizierte Grenzflächenstrukturen auf der Mikrometerskala ausbildet.

All diese Materialklassen sind Beispiele von Gleichgewichtssystemen, d. h. makroskopische Messgrößen wie die Temperatur sind zeitlich konstant. Diese makroskopischen Eigenschaften sind dann bestimmt durch statistische Mittelwerte der klassischen Boltzmannverteilung. Sie enthält neben der (konstanten und vorgegebenen) Systemtemperatur die Hamiltonfunktion, also die Gesamtenergie als Funktion der Orte

und Impulse aller Bestandteile. Insbesondere ist auch die Gesamtentropie zeitlich konstant, in Übereinstimmung mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Auf mikroskopischer Ebene gibt es zwar zeitliche Fluktuationen, aber es herrscht ein sogenanntes detailliertes Gleichgewicht: Alle Prozesse sind zeitlich reversibel.

Durch externe Felder oder Einflüsse kann man weiche Materie gezielt aus dem Gleichgewicht bringen. Die globale Entropie ist dann nicht mehr zeitlich konstant. Ein Beispiel dafür ist ein System in einer Lösungsmittelströmung. Einerseits eignet sich weiche Materie dafür sehr gut, weil man keine großen Störungen aufbringen muss, um die Gleichgewichtsstrukturen aufzubrechen. Andererseits kann man viele Vorteile von mesoskopischen Längenskalen und den relativ langsamen Zeitskalen nutzen: Die Teilchenbahnen von Kolloiden können verfolgt und die Störung kann maßgeschneidert werden. In komplexeren Fluiden kann man zur Sichtbarmachung der Dynamik einzelner Prozesse Techniken wie die ultrahochoflösende **Fluoreszenzspektroskopie** (Nobelpreis für Chemie 2014) nutzen. Unter einem externen Feldeinfluss entstehen oft neue Strukturen und Muster, die im Gleichgewicht nicht vorkommen.

Aktive weiche Materie

In all den bislang beschriebenen Situationen sind die Kolloidteilchen passiv, d. h. sie werden höchstens von dem äußeren Feld angetrieben. Man spricht deshalb auch von passiver weicher Materie. In den vergangenen beiden Jahrzehnten gelang es, Kolloidteilchen künstlich mit einem eigenen Antrieb – gewissermaßen einem Motor – auszustatten. Solch ein aktives Teilchen bewegt sich typischerweise sehr viel schneller und dynamischer als ein passives, welches der rein diffusiven Brownschen Dynamik folgt. Im Mittel bewegt sich ein selbstgetriebenes Teilchen mit einer konstanten Geschwindigkeit. Es wandelt also ständig Energie in mechanische Bewegung um und wird dabei durch das Lösungsmittel gedämpft. Bei diesen irreversiblen (zeitlich nicht umkehrbaren) Prozessen wird fortwährend Entropie erzeugt, das Kennzeichen des Nichtgleichgewichts. Erst auf großen Zeitskalen betrachtet erscheint die Bewegung wieder diffusiv, allerdings mit einem sehr viel größeren Diffusionskoeffizienten. Ein solches dynamisches Verhalten wird als aktive Brownsche Bewegung bezeichnet. Immer wenn solche selbstgetriebenen Teilchen im Spiel sind, bezeichnet man das resultierende System als aktive weiche Materie. Dazu gehören auch lebende Systeme wie Bakterien oder Spermien.

Solch ein künstlich aufgeprägter Selbstantrieb kann zum Beispiel durch die periodische Bewegung von Körpergliedern realisiert werden. Das Muschel-Theorem besagt, dass man in zähen Fluiden nur vorankommt, wenn man ein Bewegungsmuster benutzt, das nicht spiegelbar in der Zeit ist. Bei vielen Bakterien wird dies mechanisch durch die Drehung angebrachter Flagellen realisiert. Eine Spiegelung in der Zeit –

also der Rückwärtsbetrieb – verändert die Drehrichtung von rechts- auf linksdrehend (oder umgekehrt), sodass der Vortrieb nach dem Muschel-Theorem möglich ist.

Ein wichtiger Mechanismus, der ohne mechanische Bewegung auskommt, besteht darin, dass das Teilchen ein Gefälle einer physikalischen Eigenschaft (Temperatur, Konzentration eines Zusatzstoffs oder ähnliches) selbst erzeugt und sich in diesem Gefälle von selbst bewegt. Dieses Phänomen wird auch als **Phorese** bezeichnet. Ein wichtiges Beispiel dafür ist ein mit Wasserstoffperoxid angereichertes Lösungsmittel. Wasserstoffperoxid zerfällt in Wasser und Sauerstoff. Benutzt man ein Teilchen aus zwei verschiedenen Stoffen (**Janusteilchen**) – etwa ein Plastikteilchen mit einer Metallkappe –, dann katalysiert das Metall die Zersetzungsreaktion des Lösungsmittels. Damit entsteht entlang des Teilchens ein Gefälle der Wasserstoffperoxidkonzentration, in welchem sich wiederum das Teilchen selbst fortbewegt. Außerdem kann die Aktivität auch durch externe Felder erzeugt werden: Ein Beispiel hierfür sind nichtleitende Partikel, die unter der Einwirkung eines elektrischen Felds zu rotieren beginnen, und zwar in zufällige Richtungen senkrecht zum Feld. In großen Ensembles können solche rotierenden Mikrokugeln einen geordneten Partikelstrom bilden. Auch magnetische Felder lassen sich nutzen, um (anisotrope) Teilchen in Bewegung mit zufälligen Richtungen zu versetzen.

Einblick in die Biologie, Inspiration für die Materialwissenschaften

Neben den biologischen Beispielen lassen sich auch synthetische aktive Polymere durch das Zusammenfügen aktiver

KOLLEKTIVES VERHALTEN AKTIVER MATERIE

Das Zusammenspiel von vielen aktiven Teilchen birgt neue Phänomene, die kein Gegenstück in der Welt der passiven Teilchen besitzen – auch nicht, wenn diese durch externe Felder ins Nichtgleichgewicht getrieben werden.

Schwarmbildung: Die Entstehung kollektiver gerichteter Bewegung in aktiven Systemen ist ein Selbstorganisationsprozess mit vielen bekannten Beispielen, von der kohärenten Bewegung von Zellen, Bakterien und bestimmten selbstgetriebenen Kolloiden bis hin zur Schwarmbildung von Vögeln („Von Schwärmen und Schleimpilzen“ auf Seite 239). Ein minimales (aber gerade deshalb breit anwendbares) Modell, das diesen Effekt erklärt, beschreibt die Fortbewegungsrichtungen von Teilchen im fluktuierenden Geschwindigkeitsfeld der Nachbarpartikel, an dem sie sich ausrichten versuchen. Es zeigt einen Phasenübergang von zufälligem zu geordnetem Verhalten. Das System bildet aufgrund der ausrichtenden mikroskopischen Wechselwirkungen eine lokale (bei Schwärmen) oder langreichweitige polare Ordnung der Geschwindigkeiten, und zwar bereits dann, wenn die Teilchenbewegung räumlich auf eine Ebene begrenzt ist.

Aktive Turbulenz: Aktive Flüssigkeiten können spontan chaotische Strömungen und irreguläre größere Wirbel ausbilden. Innerhalb der Wirbel bewegen sich benachbarte Teilchen in geordneter Weise. Dieses als aktive Turbulenz bezeichnete Phänomen tritt, im Unterschied zur klassischen Turbulenz, bereits in viskosen Systemen mit starker Dämpfung durch das Lösungsmittel, also bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten auf. Aktive Turbulenz wurde inzwischen, experimentell und in Simulationen, in einer ganzen Reihe von Systemen beobachtet, von Bakterienflüssigkeiten bis hin zu Systemen aus Janusteilchen (Teilchen mit einer Kappe aus einem anderen Material).

Monomere herstellen. Schließlich gibt es auch Beispiele aktiver Mikroemulsionen, z. B. Flüssigkristalltröpfchen, die sich – ausgelöst durch Oberflächenspannungen – in einer Tensidlösung bewegen und ein sehr gut kontrollierbares Modell großer aktiver Teilchen darstellen. Ein genaueres Verständnis solcher komplexer aktiver Fluide liefert Einsichten in Selbstorganisationsprozesse in der Biologie und damit vielleicht sogar in die Entstehung von Krankheiten.

In all den genannten Systemen treibt die Aktivität bereits die einzelnen Konstituenten aus dem Gleichgewicht. Weitere faszinierende Eigenschaften ergeben sich, wenn man kollektive Phänomene wechselwirkender aktiver Teilchen betrachtet, wie etwa Phasenübergänge im Nichtgleichgewicht und dynamische Musterbildung. Ein weiterer auch im Hinblick auf Anwendungen interessanter Aspekt sind die neuartigen Materialeigenschaften aktiver Systeme. So können aktive Fluide nicht nur spontan, sondern auch komplett reibungsfrei oder senkrecht zu einem Druckgradienten fließen. Generell vermutet man, dass aktive weiche Systeme ein größeres Potenzial als Bestandteile adaptiver intelligenter Materialien haben, die ihre Eigenschaften spontan im Hinblick auf geänderte Außenbedingungen anpassen können.

Eine grundsätzliche, gerade auch im Hinblick auf die Biologie wichtige Frage ist, wie sich aktive Teilchen in viskoelastischen Umgebungen wie etwa Polymersubstanzen oder Flüssigkristallen fortbewegen. Solche komplexen Umgebungen sind typisch für das Innere von Zellen und erzeugen Gedächtniseffekte. Sie können aber auch die Kräfte der Teilchen untereinander beeinflussen. Aufgrund solcher exotischen Effekte sind Hybridsysteme von aktiven und komple-

xen passiven Bestandteilen hochinteressante Kandidaten für innovative Materialien.

Eine weitere zukunftsweisende Forschungsrichtung betrifft die Suche nach Möglichkeiten, einzelne aktive Teilchen oder ganze aktive Systeme zu kontrollieren. Methoden aus der künstlichen Intelligenz, der Optimalsteuerung und der Rückkopplungskontrolle könnten helfen, aktive Teilchen bzw. Materialien mit autonomer Funktion (und damit einer Art Intelligenz) auf nano- bis mesoskopischer Längenskala zu designen. Einzelne aktive Teilchen könnten sich dann wie kleine Mikroroboter selbstständig durch Blutgefäße bewegen, um Medikamente zu transportieren oder sogar kleine Eingriffe vorzunehmen. Eine solche Vision zeichnete Richard Feynman bereits 1959 in einem Vortrag, der als Geburtsstunde der **Nanotechnologie** gilt. Nun ist sie zwar noch nicht Realität geworden, aber in greifbare Nähe gerückt.

Sabine Klapp und Hartmut Löwen



Schwarmbildung: Fischeschwärme bilden große, sich fortbewegende Strukturen, wobei einzelne Fische andere Bewegungsmuster zeigen können als der gesamte Schwarm.



Janusteilchen: Durch die unterschiedliche Lichtabsorption der hellen und dunklen Seite lässt sich Bewegung der Teilchen mit Lichteinstrahlung induzieren.

UNSERE ERDE

Noch vor wenigen Jahrhunderten hielten unsere Vorfahren die Erde für den Mittelpunkt des Universums. Heute wissen wir: Sie ist ein Planet unter Milliarden in unserer Galaxis, die wiederum eine Galaxie unter Milliarden anderer ist – ein Gesteinsplanet, der einen durchschnittlich großen und alten Stern, die Sonne, umkreist. Durch ihre passende Umlaufbahn um die Sonne herrschen auf der Erde Temperaturen, bei denen flüssiges Wasser vorkommen kann.

In diesem kosmischen Umfeld ist der Erdkörper ein dynamisches System, das sich in extremem Zeitraffer betrachtet ständig wandelt. Das Erdinnere kühlt seit der Entstehung des Planeten ab. Schwere Elemente reichern sich kontinuierlich im Erdkern und leichtere an der Oberfläche an. Die durch diese Energie- und Stoffströme getriebene Dynamik erhält beispielsweise das Erdmagnetfeld, welches uns vor der (vornehmlich von der Sonne kommenden) Partikelstrahlung schützt (Seite 109). Sie führt außerdem zur Plattentektonik (Seite 103), aufgrund derer sich die Kontinente auf der Erdoberfläche bewegen.

Erdbeben und Vulkanismus sind Konsequenzen dieser Bewegung, die das Leben der Menschen beeinflussen.

Der Lebensraum des Menschen an der Erdoberfläche – die Troposphäre – wird jedoch vornehmlich vom Energieaustausch mit der Sonne und dem Weltall geprägt (Seite 120). Während die langzeitliche Entwicklung des Sterns Sonne sich gut astrophysikalisch beschreiben und vorhersagen lässt, ist die Absorption von Sonnenlicht an der Erdoberfläche und die Abstrahlung von deren Wärme ins kalte Weltall stark von Details abhängig. Insbesondere die Atmosphäre (Seite 115), eine im Vergleich zum Erdradius sehr dünne Gashölle, die die Erde umgibt, beeinflusst die Energieströme zwischen der Erde und ihrer kosmischen Umgebung. Das beginnt schon beim blau-weiß marmorierten Erscheinungsbild der Erde. Es zeigt klar, dass das Vermögen der Erdoberfläche, Sonnenlicht zurückzustrahlen, zwischen den dunklen Ozeanen (die Son-

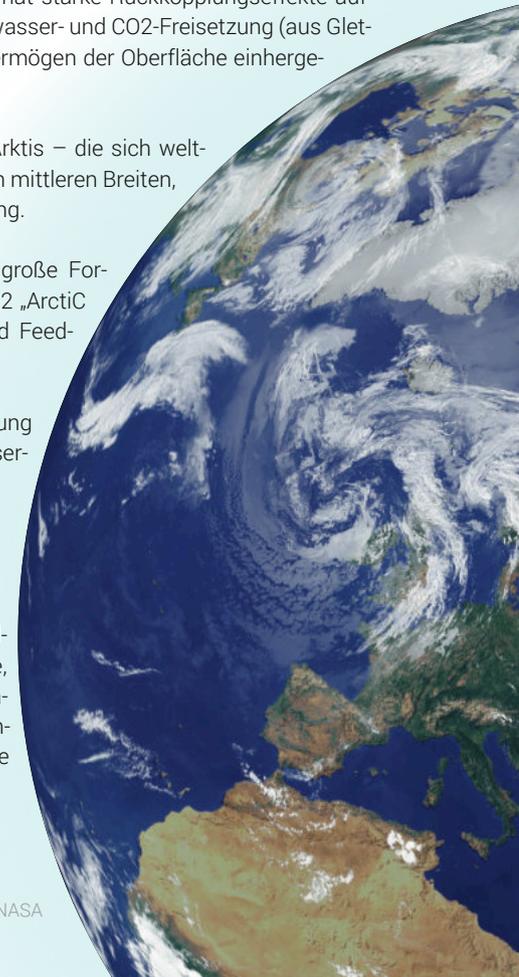
Die gefrorenen Bereiche der Erdoberfläche heißen **Kryosphäre** (Seite 113). Sie befinden sich vornehmlich in Arktis und Antarktis, doch auch Inlandgletscher und Permafrostböden werden der Kryosphäre zugeordnet. Mit steigender Erdtemperatur ändert sich die Kryosphäre dramatisch, wenn immer größere Anteile von ihr dauerhaft über dem Gefrierpunkt bleiben. Das wiederum hat starke Rückkopplungseffekte auf das gesamte Erdsystem, da mit dem Auftauen Schmelzwasser- und CO₂-Freisetzung (aus Gletschern bzw. Permafrost) und ein verringertes Rückstrahlvermögen der Oberfläche einhergehen.

Bisher betrifft die **Erwärmung der Kryosphäre** überwiegend die Arktis – die sich weltweit am stärksten erwärmt (arktische Verstärkung) bzw. Gletscher in mittleren Breiten, aber auch in der Antarktis gibt es deutliche Anzeichen einer Erwärmung.

Zur Untersuchung der Ursachen der **arktischen Verstärkung** gibt es große Forschungsprogramme, etwa MOSAiC (Seite 129) und der Transregio TR 172 „Arctic Amplification: Climate Relevant Atmospheric and Surface Processes, and Feedback Mechanisms (AC)³“.

Zudem birgt die **Rückkopplung** zwischen Meereis und Klima – über Rückstreuung der Sonneneinstrahlung und Behinderung der Ozeanzirkulation durch Süßwasser eintrag – eine wesentliche Gefahr für **Kippdynamiken** (Seite 123) im Erdsystem.

Die Ozeane – oder besser **der Ozean** – ist das offensichtlich flächenmäßig größte Teilsystem der Erdoberfläche. Während er schon früh von Schiffen aus erforscht wurde, sind heute Tausende Messbojen unterwegs, die Temperatur, Salzgehalt und weitere Parameter im Ozean messen. Zudem messen eine Reihe von Satelliten kontinuierlich Temperatur, Salzgehalt und Wellenhöhe an der Ozeanoberfläche. Auch der Ozean ist eine wichtige Komponente des globalen Wandels (Seite 111).



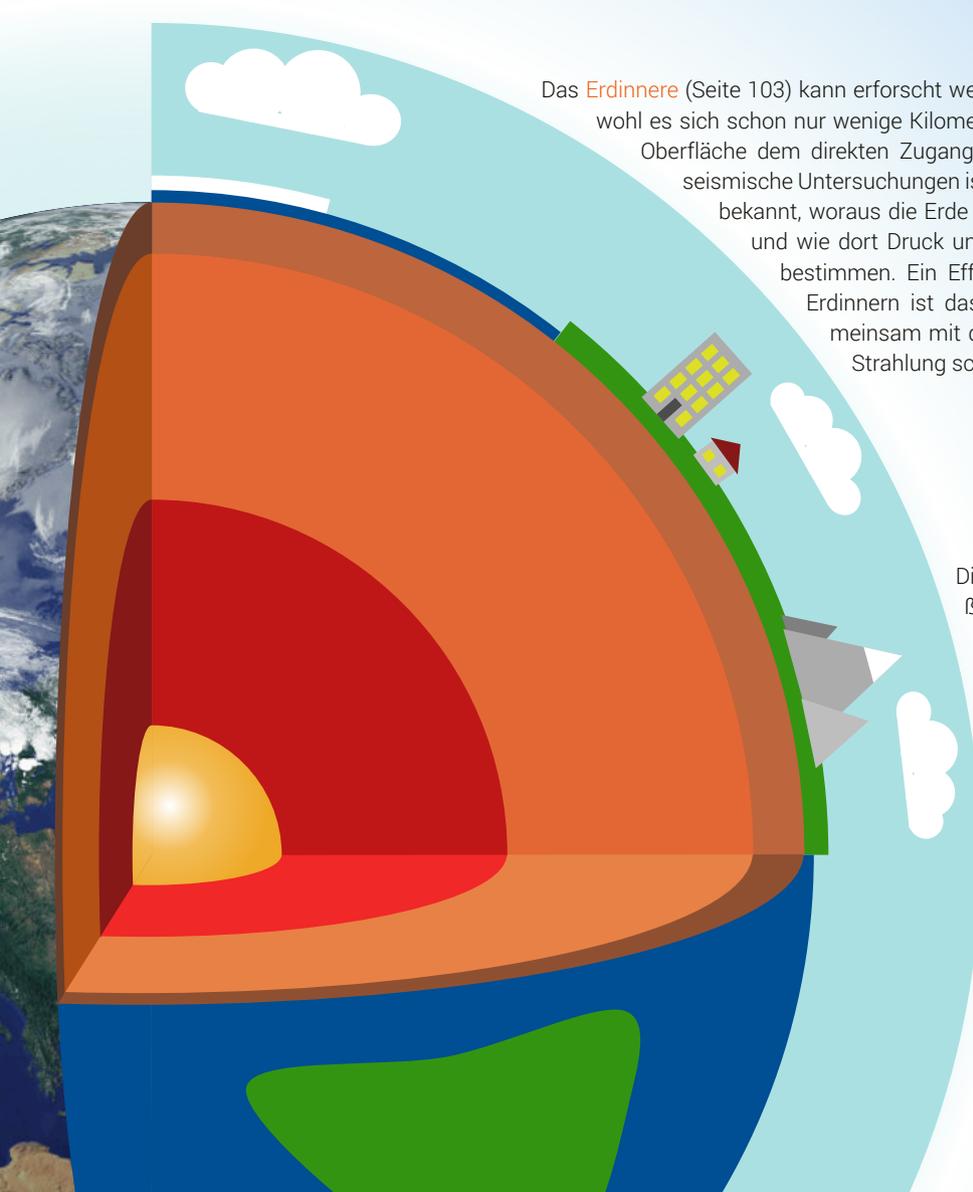
nenlicht aufnehmen) und den hellen Wolken (die Sonnenlicht reflektieren) ganz unterschiedlich ausfällt.

Die Oberflächentemperatur der Erde wird durch die Strahlungseigenschaften der Atmosphäre im Mittel um etwa 33 Grad Celsius gegenüber dem atmosphärenlosen Mond erhöht. Erstaunlicherweise tragen dazu nicht die Hauptbestandteile Stickstoff und Sauerstoff bei, sondern überwiegend Spurengase wie Wasserdampf (Anteil in der Atmosphäre kleiner als ein Prozent), CO_2 (ca. 0,04%) und Methan (ca. 0,0002%). Vor allem die Spurengase CO_2 und Methan sind es, die durch menschliche Aktivitäten, wie die Verbrennung von Kohle, Erdgas und Erdöl, im Übermaß entstehen. Dadurch haben sich die Atmosphärenanteile dieser klimawirksamen Gase seit Beginn der Industrialisierung um über 50 Prozent erhöht. Die physikalisch unausweichliche Konsequenz, eine Erhöhung der Oberflächentemperatur, erleben wir im Laufe der letzten Jahrzehnte immer deutlicher (anthropogener Treibhauseffekt). Mittlerweile ist der Einfluss des Menschen auf die Erde so prägend, dass Geowissenschaftler:innen mitunter von einem komplett neuen Zeitalter sprechen: dem Anthropozän (Seite 118).

Dass unser „Raumschiff Erde“ ohne Gebrauchsanweisung kam, war kein großes Problem, solange es nur wenige Menschen gab. Heute bringen mehr als acht Milliarden Menschen in Verbindung mit einem ungebremsten Wirtschaftswachstum das System Erde an seine Grenzen und darüber hinaus. Diese Grenzen zu verstehen und zu beziffern sowie die Gefahren vorherzusagen, die aus der Verletzung dieser Grenzen entstehen, sind einige wenige der Aufgaben der Erdsystemwissenschaften.

Die Physik beschreibt die Randbedingungen, unter welchen sich das System Erde entwickelt und wie die verschiedenen Teilbereiche Energie, Impuls und Materie austauschen. Für eine bestmögliche Vorhersage der Entwicklung der lebenswichtigen Randbedingungen ist sie jedoch auf eine enge Interaktion mit der Biologie, aber auch zunehmend den Gesellschaftswissenschaften angewiesen.

Thomas Leisner und Ulrich Platt



Das **Erdinnere** (Seite 103) kann erforscht werden, obwohl es sich schon nur wenige Kilometer unter der Oberfläche dem direkten Zugang entzieht. Durch seismische Untersuchungen ist heute recht genau bekannt, woraus die Erde in ihren Tiefen besteht und wie dort Druck und Temperatur die Physik bestimmen. Ein Effekt des teilweise flüssigen Erdinnern ist das **Erdmagnetfeld**, das uns gemeinsam mit der Atmosphäre vor kosmischer Strahlung schützt (Seite 109).

Die **Atmosphäre** (Seite 115) ist das zweite große fluide System der Erde, sie erhält das Leben auf der Erde indem sie den größten Teil der Erdoberfläche am Einfrieren hindert (durch den natürlichen Treibhauseffekt), gefährliche Strahlung abschirmt (UV- und kosmische Strahlung) sowie für die Verteilung von Wasser und Sauerstoff sorgt.

UNSERE ERDE: INNEN GANZ UNRUHIG

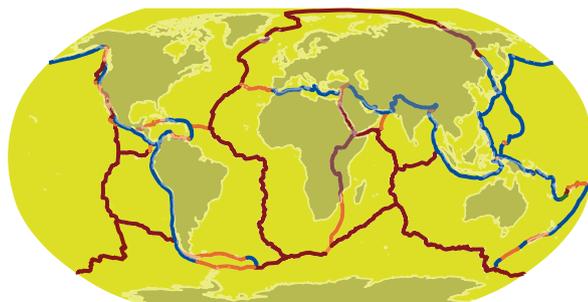
Die Erforschung des Erdsystems mit physikalischen Verfahren erlaubt uns Einblicke in Aufbau, Struktur und Dynamik unseres Heimatplaneten. Dabei konnten dank Seismologie, Geodäsie und anderer Methoden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte im Verständnis des Erdaufbaus gemacht werden.

Eine Reise zum Mittelpunkt der Erde, wie von Jules Verne im Jahr 1864 beschrieben, ist zumindest für eine autonome Sonde theoretisch möglich, wie David Stevenson 2003 gezeigt hat. Jedoch gibt es bislang keine Versuche, dies in der Praxis umzusetzen. Immerhin ermöglichen physikalische Methoden eine virtuelle Reise in diese verborgenen Gefilde: Seismologische Untersuchungen, die Erforschung des Gravitations- und Magnetfelds der Erde und geodätische Analysen liefern einen indirekten Zugang zum Erdinneren und den dort ablaufenden Prozessen, die auch Phänomene auf der Oberfläche beeinflussen.

Aus dem ursprünglich homogenen Material, aus dem die Erde vor 4,5 Milliarden Jahren entstand, bildete sich über viele Hundert Millionen Jahre eine zwiebelähnliche Struktur heraus. Die oberste Schicht ist die **Erdkruste**: Sie reicht von der Oberfläche bis in Tiefen von 20 km bis maximal 80 km und ist uns für die Nutzung von Wasser, Wärme, Bodenschätzen und anderen Ressourcen nur teilweise zugänglich. Die bisher tiefste Bohrung in die Erdkruste erreichte eine Tiefe von 12,2 km.

Unter der Kruste liegt der **Erdmantel** aus plastisch verformbarem Silikatgestein bis zu einer Tiefe von 2900 km. Mit weit über 80 Prozent stellt er den volumenmäßig umfangreichsten Teil unseres Planeten dar.

Unter dem Mantel liegt der **Erdkern**. Dessen äußerer Bereich besteht hauptsächlich aus einer Eisen-Nickel-Schmelze. Der innere Kern ab 5150 km Tiefe besteht aus ähnlichem Material, ist aber aufgrund des hohen Drucks von über 300 GPa (das Dreimillionenfache des Atmosphärendrucks) auch bei seiner Temperatur um 5100 °C fest. Der innere Erdkern verfestigt sich durch Abkühlung und damit verbundenes „Ausfrieren“ im Laufe der Zeit immer weiter. Auch die Trennung in schwere und leichte Stoffe sowie der Zerfall von Radioisotopen erzeugen im Erdinneren Wärme. Trotzdem kühlt die Erde, wie auch andere planetare Körper, insgesamt ab.



— konvergent — divergent — konservativ

Tektonische Großplatten und Plattengrenzen. Rücken entstehen an den divergenten Plattengrenzen, Gräben an den konvergenten Grenzen, Verwerfungen dort, wo die Platten konservativ aneinander vorbeigleiten.

Ständig in Bewegung

Wir wissen heute durch ein Bündel von geophysikalischen Untersuchungsmethoden, dass alle Schichten der Erde in ständiger, langsamer Bewegung sind. Ein Temperaturgefälle im äußeren Kern treibt den Erddynamo, also das innere Magnetfeld der Erde, an (Seite 109). Temperaturunterschiede im Erdmantel von mehreren Tausend Grad Celsius sorgen auch für gigantische Umwälzbewegungen: Warmes Material steigt nach

oben, erkaltetes sinkt nach unten – auf einer typischen Zeitskala von rund 30 Millionen Jahren.

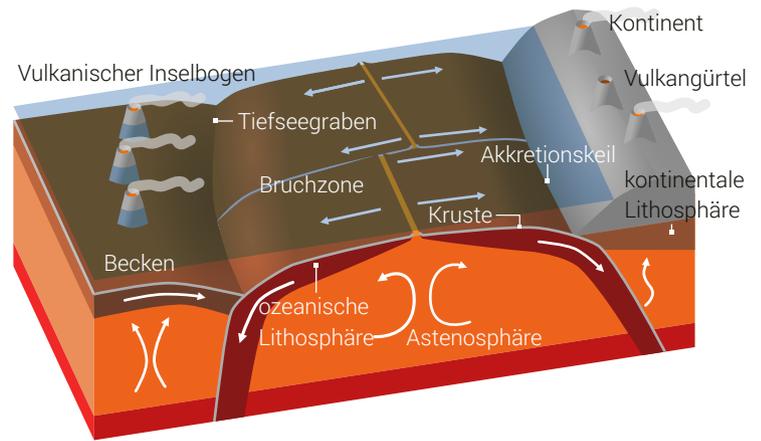
Diese **Konvektion** ist auch verantwortlich für die Bewegungen der mehr oder weniger starren Platten im oberen Erdmantel und der Kruste. Diese driften mit Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Jahr über den zähflüssigen Bereich des Mantels. Wie sich die Platten zueinander bewegen, lässt sich mit Methoden der Satellitengeodäsie heute genauestens beobachten und verfolgen. In unserem Sonnensystem ist die Erde nach heutigem Wissen der einzige Planet, der derzeit eine solche **Plattentektonik** aufweist, allerdings gibt es Hinweise auf mögliche tektonische Aktivität auf dem Jupitermond Europa und dem Saturnmond Titan.

An den Grenzen der Platten treten verschiedene tektonische Phänomene auf: So bilden sich Gebirge an den Orten, wo sich Platten aufeinander zubewegen oder untereinander abtauchen, wie zum Beispiel unter den Alpen in Europa oder unter den Anden in Südamerika. Auch starke Erdbeben entstehen an Plattengrenzen, wenn sich Platten gegeneinander bewegen. Reiben sich zwei Platten im obersten Bereich der Kruste und die elastischen Spannungen werden zu groß, so entsteht ein plötzlicher Bruch und die Gesteinsschollen verschieben sich gegeneinander.

Wenn die Erde bebt

Die freigesetzte Spannungsenergie breitet sich zum Großteil in Form von seismischen (elastischen) Wellen aus, die in der Nähe der Bruchstellen so stark sein können, dass beträchtliche Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen entstehen

Schematisches Modell der Plattentektonik: Auseinanderstrebende Plattengrenzen lassen die mittelozeanischen Rücken entstehen, senkrecht dazu entstehen Verwerfungen. Dort, wo die Lithosphäre absinkt, sind die Subduktionszonen, die zu tiefen Ozeangraben führen. Hinter den Gräben entsteht verstärkt vulkanische Aktivität, entweder als vulkanischer Inselbogen oder in Gebirgsketten mit Vulkanen. An der Kontinent-Ozean-Kollision bildet sich außerdem ein Akkretionskeil aus Sedimenten und einer Sedimenterhebung vor dem vulkanischen Gürtel.



und viele Menschen verletzt oder getötet werden können, wie zum Beispiel infolge der verheerenden Erdbeben im syrisch-türkischen Grenzgebiet im Februar 2023. Befindet sich der Bruch an der Grenze zwischen einer ozeanischen und einer kontinentalen Platte nahe dem Meeresboden, dann werden mitunter Schwerewellen im Meer angeregt. Diese können sich in Küstennähe zu gefährlichen Tsunamis aufbauen, wie zum Beispiel 2004 nach dem Sumatra-Andamanen-Erdbeben mit den Verwüstungen und 230 000 Toten an den Küsten des Indischen Ozeans oder 2011 nach dem Tohoku-Beben, wo ein Tsunami zum Nuklearunfall in Fukushima führte.

Um die Folgen von Erdbeben für Menschen und Infrastruktur zu mindern, arbeitet die Forschung seit vielen Jahren an besseren Modellen zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für extreme Bodenbewegungen durch Starkbeben und wie diesen durch Baunormen begegnet werden kann. Erdbeben- und Tsunami-Frühwarnsysteme konnten in jüngster Zeit als operative Systeme etabliert werden (siehe Seite 258).

Die Vorhersage von Erdbeben bleibt allerdings nach wie vor schwierig. Zwar gab es wichtige Fortschritte, etwa die großflächige Erfassung der Relativbewegung an Plattengrenzen mithilfe von Satelliten oder Erfolge beim Verständnis der Nukleationsprozesse von Erdbeben. Nur leider sind die erwarteten Signale so klein, dass man Sensoren nahe dem zukünftigen Epizentrum des Bebens installieren müsste – dessen Lage ist aber in der Regel unbekannt. Die Erdbebenforschung wird heutzutage auch in anderer Richtung genutzt. So können Mikrobeben verlässliche Auskunft über Prozesse im Untergrund geben – unter anderem auch bei Vulkanen.

Flüssiges Gestein

Vulkanismus ist ein spektakuläres Beispiel für die komplexe Art und Weise, in der Energie und Materie zwischen Hauptkompartments unseres Planeten – der festen Erde, dem Ozean und der Atmosphäre – ausgetauscht werden. Vulkane sind Stellen an der Erdoberfläche, an denen Materie aus dem Erdinneren – sogenanntes **Magma** – an die Oberfläche bricht. Praktisch alle derzeit auf der Erde ausbrechenden Magmen, die **Lava** genannt werden, sobald sie die Erdoberfläche durchbrechen, sind silikatische Flüssigkeiten (mit Ausnahme der Karbonatschmelze am Ol Doinyo Lengai, Afrika), deren Zusammensetzung, Viskosität und Temperatur erheblich variieren kann. Magmen sind ein Gemisch aus Schmelze (Flüssigkeit), suspendierten Kristallen (Festkörper) und Gasblasen,

wenn sie sich der Oberfläche nähern (Gasphase) oder in größerer Tiefe als superkritische Flüssigkeit. Das Ausgangsgestein kann durch Erhöhung der Temperatur, Verringerung des Drucks oder eine Änderung der Zusammensetzung schmelzen. Obwohl das Schmelzen durch einen Temperaturanstieg in einer Region des Erdinneren am plausibelsten erscheinen mag, spielen die beiden letzten Möglichkeiten tatsächlich eine viel größere Rolle. So können sich durch die Druckentlastung beim konvektiven Aufstieg von Mantelgestein partielle Gesteinsschmelzen im oberen Erdmantel bilden. Diese verbinden sich nach und nach und steigen durch Auftriebskräfte, welche durch den Dichteunterschied zwischen der Schmelze und dem Ausgangsgestein verursacht werden, häufig an Plattengrenzen oder anderen Schwachstellen in der Erdkruste auf. Es bilden sich über viele Tausende von Jahren magmatische Reservoirs.

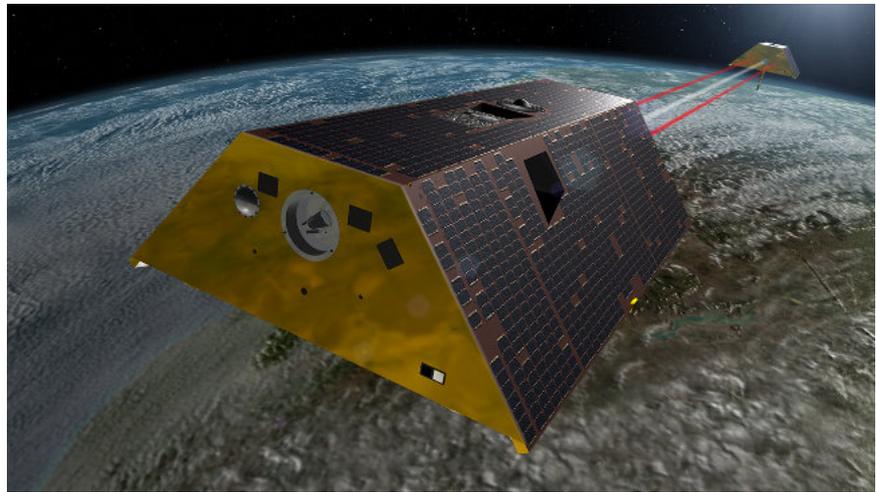
Nahe der Kruste-Mantel-Grenze lösen sich auch erstmals flüchtige Anteile aus den Magmen, wie zum Beispiel Kohlendioxid. Diese können entweder separat weiter nach oben bis an die Erdoberfläche dringen, oder zur Vergrößerung des Dichteunterschieds zwischen magmatischem Gestein und Umgebung führen und so dessen Auftriebskraft vergrößern. Ein verändertes Entgasungsverhalten ist daher oft der erste Vorbote für einen Vulkanausbruch.

Vulkanausbrüche und die Folgen

Vulkanausbrüche werden auch häufig von einer Vielzahl von schwachen Erdbeben begleitet, wie zum Beispiel 2021 auf der atlantischen Ferieninsel La Palma. Nur mithilfe aller verfügbaren Informationen (Erdbeben, Oberflächenverformung, Temperatur, Gasemissionen und vieles mehr) lassen sich vulkanische Aktivitäten möglicherweise vorhersagen. Bei einem Ausbruch kann es zu effusiver und explosiver Aktivität kommen. Die erste bezeichnet das Herausfließen oft bereits entgaster Lava. Dies kann erhebliche Sachschäden zur Folge haben, wenn zum Beispiel ganze Ortschaften unter dem herausfließenden Gestein begraben werden. Explosive Aktivität kann im Extremfall Materie bis in die oberen Atmosphärenschichten schleudern und den globalen Temperaturhaushalt beeinflussen.

Neben **Wasserdampf** ist **Kohlendioxid** (CO₂) noch vor den **Schwefelkomponenten** das von Vulkanen am meisten ausgestoßene Gas. Zwar stoßen Vulkane um zwei Größenordnungen weniger CO₂ aus als menschliche Aktivitäten, dennoch

Die zwei Satelliten der GRACE-Follow-On-Mission befinden sich auf identischen Bahnen um die Erde. Ihr Abstand wird fortlaufend genau vermessen und lässt auf das Gravitationspotenzial schließen – und damit auf die Massenverteilung der Erde darunter.



spielt der Ausstoß durch magmatische Prozesse für den globalen Kohlenstoffkreislauf langfristig eine wichtige Rolle: Kämen magmatische Prozesse zum Erliegen, so würde den Oberflächenreservoirs wie Ozean, Biosphäre und Atmosphäre schon nach rund 200 000 Jahren der Kohlenstoff ausgehen.

Die dritthäufigste Komponente von Vulkangasen, der Schwefel, ändert das globale Klima kurzfristig. So kühlte der Ausbruch des Tambora im Jahr 1815 die Erde im darauffolgenden „Jahr ohne Sommer“: Durch den Schwefel bilden sich in der Atmosphäre Schwebeteilchen, die das Sonnenlicht zurückstreuen und einen kühlenden Effekt haben – ein Phänomen, über dessen technisches Potenzial bereits im Rahmen des Climate Engineering („Kein Ersatz für Klimaschutz“ auf Seite 271) nachgedacht wird.

Einzigartig im Sonnensystem

Die feste Erde besteht aber nicht nur aus Gestein. Die Erdkruste beherbergt auch ein rares, überlebenswichtiges Gut: **Süßwasser**. Diese Grundwasservorräte und ihre Variationen lassen sich mithilfe von Satelliten genau kartieren. Die Satellitenpaare GRACE (steht für Gravity Recovery And Climate Experiment) und GRACE Follow-On vermessen aus dem All das Schwerefeld der Erde – was wiederum Schlüsse auf die Verteilung von Grundwasser in der Erde zulässt (siehe auch der Folgeartikel). Sie nutzen dazu eine Präzisionstechnologie, die für Gravitationswellendetektoren entwickelt wurde, die sogenannte Laserinterferometrie.

Dies ist bei Weitem nicht die einzige Verbindung zwischen der Erforschung der Erde und der Erforschung des Weltraums. So ermöglicht uns die Raumfahrt, die Struktur und Dynamik der Erde mit der anderer Planeten zu vergleichen: Die Mission InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) setzte im November 2018 erstmalig ein Seismometer auf dem Mars ab, um die seismische Aktivität unseres Nachbarplaneten zu erfassen und zu charakterisieren und so die innere Struktur und Dynamik des Mars weiter einzugrenzen.

Auch die vulkanische Aktivität an der Oberfläche des Galileischen Mondes Io des Jupiters lässt sich mithilfe von Raumsonden beobachten. Eruptionen schleudern dort Schwefel bis 300 km Höhe. Zum Vergleich: Die höchste bekannte Eruption auf der Erde war die des Unterseevulkans Hunga Tonga-Hunga Ha’pai im Pazifik im Januar 2022 und erreichte Höhen bis etwa 60 km.

Vergleiche wie diese können wir für viele Planeten durchführen. So zeigt sich, dass Merkur zwar ein globales Magnetfeld besitzt wie die Erde, aber keine Atmosphäre. Venus zeigt Hinweise auf junge vulkanische Aktivität, aber keine ausgeprägte Plattentektonik. Unsere Erde ist einzigartig: Nur sie weist im Sonnensystem alle für Leben erforderlichen Bedingungen auf.

Für das Verständnis und die Erforschung der komplexen Zusammenhänge des Systems Erde gilt es, alle Daten und Informationsquellen integrativ zu nutzen. Die zunehmend großen Datenmengen können heute durch Methoden der Künstlichen Intelligenz analysiert und ausgewertet werden. Dies hat in vielen Bereichen bereits erstaunliche Erkenntnisse hervorgebracht und dürfte in Zukunft weiter zum Verständnis der komplexen Beziehungen und Wechselwirkungen im Erdsystem beitragen.

Nicole Bobrowski, Torsten Dahm, Karl-Heinz Glaßmeier, Christian von Savigny und Monika Sester

DIE VERMESSUNG DER WELT

Wie lange genau ein Tag dauert oder wie Grundwasser, Eis und Landmassen auf der Erde verteilt sind, sind wichtige Informationen für die Geologie, die Kartografie und beispielsweise auch für das Bauwesen und die Klimaforschung. Die Geodäsie hat sich die genaue Vermessung der Erde für all diese Anwendungen zur Aufgabe gemacht.

Die Masse der Erde ist ungleich verteilt: Einerseits finden sich auf ihr die Kontinente mit teils massiven **Gebirgen**, **Gletschern** oder reichen **Grundwasservorkommen**. Andererseits gibt es das Meer mit seinen teils tiefen Gräben und Schluchten. Auch im Erdinnern ist die Massenverteilung ungleichmäßig. Das Schwerfeld der Erde, also die Gravitationskraft in ihrem räumlichen Umfeld, entspricht darum nicht exakt dem einer Kugel, sondern weicht davon ab. Ändern sich die Massenverhältnisse aufgrund von Bewegungen der Erdplatten, dem Abschmelzen großer Eismassen, dem Absinken des Grundwassers oder wegen klimatischer Änderungen, so ändert sich auch das Schwerfeld. Sogar bei der **Tageslänge** und der Richtung der **Erdrotationsachse** lassen sich Veränderungen feststellen. Das Ziel der Geodäsie ist es, den Aufbau der Erde sowie dessen zeitliche Änderungen zu verstehen.

Um das Schwerfeld, d. h. die Gravitation an unterschiedlichen Orten auf der Erde, zu vermessen, benutzt man Gravimeter und Gradiometer. Mit Gravimetern misst man den Betrag der Erdbeschleunigung und mit Gradiometern, wie stark

sie sich mit der Höhe verändert, also den Gravitationsgradienten. Als Gravimeter lassen sich z. B. Pendel verwenden: Ihre Schwingungsfrequenz ergibt sich aus Pendellänge und Erdbeschleunigung, weshalb man sie zu deren Vermessung nutzen kann. Auch Fallexperimente werden eingesetzt: Dazu werden Objekte mit Reflektoren versehen, und ihr freier Fall wird dann mithilfe von Lasern vermessen. Supraleitende Gravimeter erzeugen in einer Spule ein Magnetfeld, in dem eine Masse an einem Federpendel im Schwebezustand gehalten wird. Ändert sich die Beschleunigung, die die Masse erfährt, so muss dies durch eine Änderung des Stroms kompensiert werden. Die Stromstärke gibt demnach Aufschluss über die Erdbeschleunigung. Mit supraleitenden Gravimetern lässt sich eine Auflösung von 1 nm/s^2 erreichen.

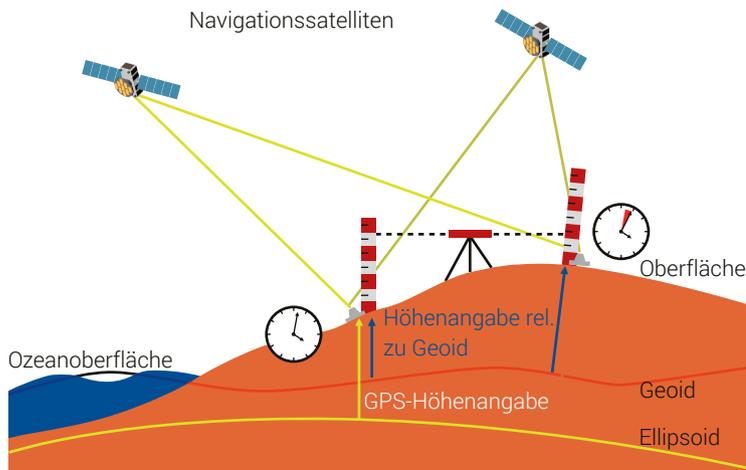
Hochgenaue Messungen der Erdbeschleunigung lassen sich auch mithilfe von Materiewellen realisieren: Dabei werden frei fallende Atome mit Lasern angestrahlt, um sie zu trennen und nachher wieder zu vereinen. Indem man die Überlagerung ihrer Materiewellen auswertet, erhält man Informatio-

Die Rotation der Erde lässt sich astronomisch messen, indem ein weltweites Netzwerk aus Teleskopen die gleichen, Milliarden von Lichtjahren entfernten Referenzquellen am Himmel beobachtet (Very Long Baseline Interferometry, VLBI). Die erfassten Radiosignale treffen je nach Position der Teleskope auf der Erde zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein, woraus sich der Abstand zwischen zwei Teleskopen berechnen lässt. Aus dessen zeitlicher Änderung lassen sich nicht nur Aufschlüsse über Plattenbewegungen, sondern auch über die Erdrotation gewinnen. So löst die VLBI Tageslängenschwankungen von weniger als 0,1 Tausendstel Sekunden auf.

Darüber hinaus gibt es seit einigen Jahren im geodätischen Observatorium Wettzell einen hochgenauen **Ringlaser** von vier Metern Seitenlänge (Bild). In ihm verkehren zwei Laserstrahlen auf gegenläufigen Bahnen im Kreis. Dreht sich die Apparatur, so ändert sich die Laufzeit des Laserlichts je nach Umlaufrichtung aufgrund von relativistischen Effekten. Aus der entstehenden Phasenverschiebung der Laserwellen lässt sich die Rotationsbewegung der Apparatur bestimmen – und damit auch die Rotation des ganzen Labors und der Erde.

Seit 2016 gibt es in Fürstentfeldbruck einen weltweit einmaligen Aufbau mit effektiv sogar vier Ringlasern mit einer Seitenlänge von ca. zwölf Metern. Mit diesem Aufbau konnte zum ersten Mal der Vektor der Rotation (also Rotationsgeschwindigkeit und Richtung der Achse) mit einer Genauigkeit von ca. 10^{-10} Hz gemessen werden. Auch die Verkippung des Untergrundes ist dabei wichtig. Sie kann mit Neigungsmessern mit einer Genauigkeit von Billionstel Winkelgraden gemessen werden.



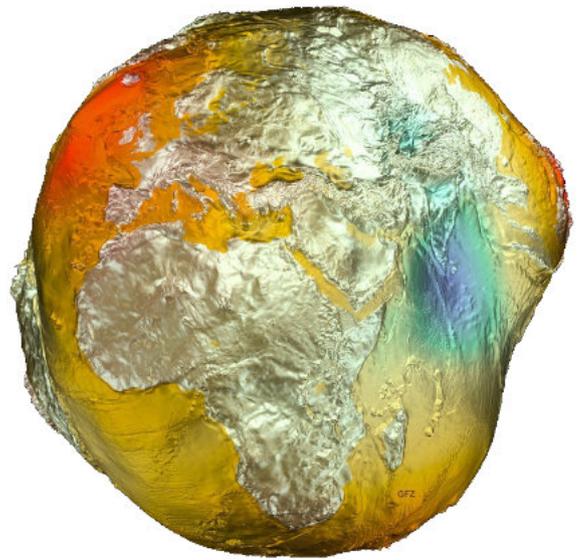


Höhenangaben zu verschiedenen Bezugssystemen. Die „GPS-Höhe“ bezieht sich auf ein idealisiertes Ellipsoid. Doch auch relativ zum Geoid lässt sich die Höhe angeben, und mithilfe von Atomuhren ist eine globale zentimetergenaue Höhenreferenz zumindest im Prinzip realisierbar.

nen über die Erdbeschleunigung an einem Ort. Der Vorteil dieser Atominterferometer besteht darin, dass keine aufwendige Kalibrierung notwendig ist, weil alle Messgrößen auf charakteristische atomare Größen zurückgeführt werden können.

Auch Uhren liefern dank eines relativistischen Effekts – der gravitativen Rotverschiebung – Informationen über die Gravitation: Uhren im stärkeren Schwerfeld gehen gegenüber solchen im weniger starken Feld etwas langsamer. Heutige optische Atomuhren sind so genau, dass man mit ihnen auf der Erde einen Höhenunterschied von einem Zentimeter und teils noch darunter feststellen kann.

Bleibt für einen Höhenvergleich noch, die Information über den Gangunterschied zwischen zwei Orten zu übertragen. Es konnte gezeigt werden, dass die Höhengenaugigkeit bei einer Übertragung der Information mit optischen Fasern zwischen zwei 1000 Kilometer voneinander entfernten Uhren erhalten bleibt. Damit kann man im Prinzip auf einem Kontinent eine



Die als „Potsdamer Kartoffel“ bekannt gewordene überhöhte Darstellung der Schwereanomalien der Erde. Diese Form beschreibt das Geoid, welches nicht gleichbedeutend mit der Erdoberfläche ist.

zentimetergenaue Höhenreferenz realisieren. Wenn man bedenkt, dass innerhalb Europas die Unsicherheit der Höhenreferenz derzeit bei einem Meter liegt, wäre das ein gewaltiger Fortschritt. Was fehlt, ist allerdings das Verbindungsnetz: In Europa gibt es dieses nur zwischen einigen Laboren. Daher wird überlegt, wie man diesen Uhrenvergleich in die Fläche bringen kann. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt hat z. B. eine transportable optische Uhr auf einem Lastwagen für Feldmessungen gebaut. Auch wird überlegt, solche Uhren auf Satelliten zu bringen und damit vom Weltraum aus Uhrengedäsie zu betreiben.

Claus Lämmerzahl

Einen globalen **Überblick über das Schwerfeld** liefern Satellitenmessungen, welche lokal durch erdgebundene Systeme verfeinert werden. Bei der Geodäsieemission CHAMP von 2000 bis 2010 wurde die Bahn des Satelliten ausgemessen und daraus wurden Schwankungen des Gravitationsfelds bestimmt. GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer, 2009–2013) trug ein Gradiometer aus sechs frei fallenden Testmassen mit sich, deren Abstände zueinander in allen drei Raumrichtungen vermessen wurden.

GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment seit 2002) und die Nachfolgemission **GRACE Follow-On** (seit 2018) bestehen jeweils aus zwei Satelliten, die in einem Abstand von rund 220 Kilometern auf der gleichen Bahn um die Erde kreisen. Der Abstand variiert je nach Schwerfeld: Fliegt der erste Satellit über eine große Massenansammlung, so wird er beschleunigt, und der Abstand vergrößert sich minimal, bis auch der hintere Satellit die Masse überquert hat. Diese Abstandsänderungen lassen sich durch Mikrowellen bzw. in der Nachfolgemission durch Laserinterferometrie auf den Nanometer genau erfassen und damit das Schwerfeld der Erde rekonstruieren. GRACE zeigt deutlich das Abschmelzen von Eismassen, die Variation der jahreszeitlichen Niederschläge in tropischen Regionen sowie das Absinken des Grundwasserspiegels etwa in Nordindien und im Südwesten der USA. Man kann damit auf der Erde eine Regenmenge von 0,1 mm mit einer räumlichen Auflösung von 100 km am Boden nachweisen. Da die Laserinterferometrie auf GRACE Follow-On so perfekt funktioniert, sind weltweit ähnliche Missionen in Planung: GRACE-C, Next Generation Gravity Mission (NGGM) und MAGIC als Kombination dieser beiden, jeweils mit anderen Umlaufbahnen oder auch mit mehr als zwei Satelliten.

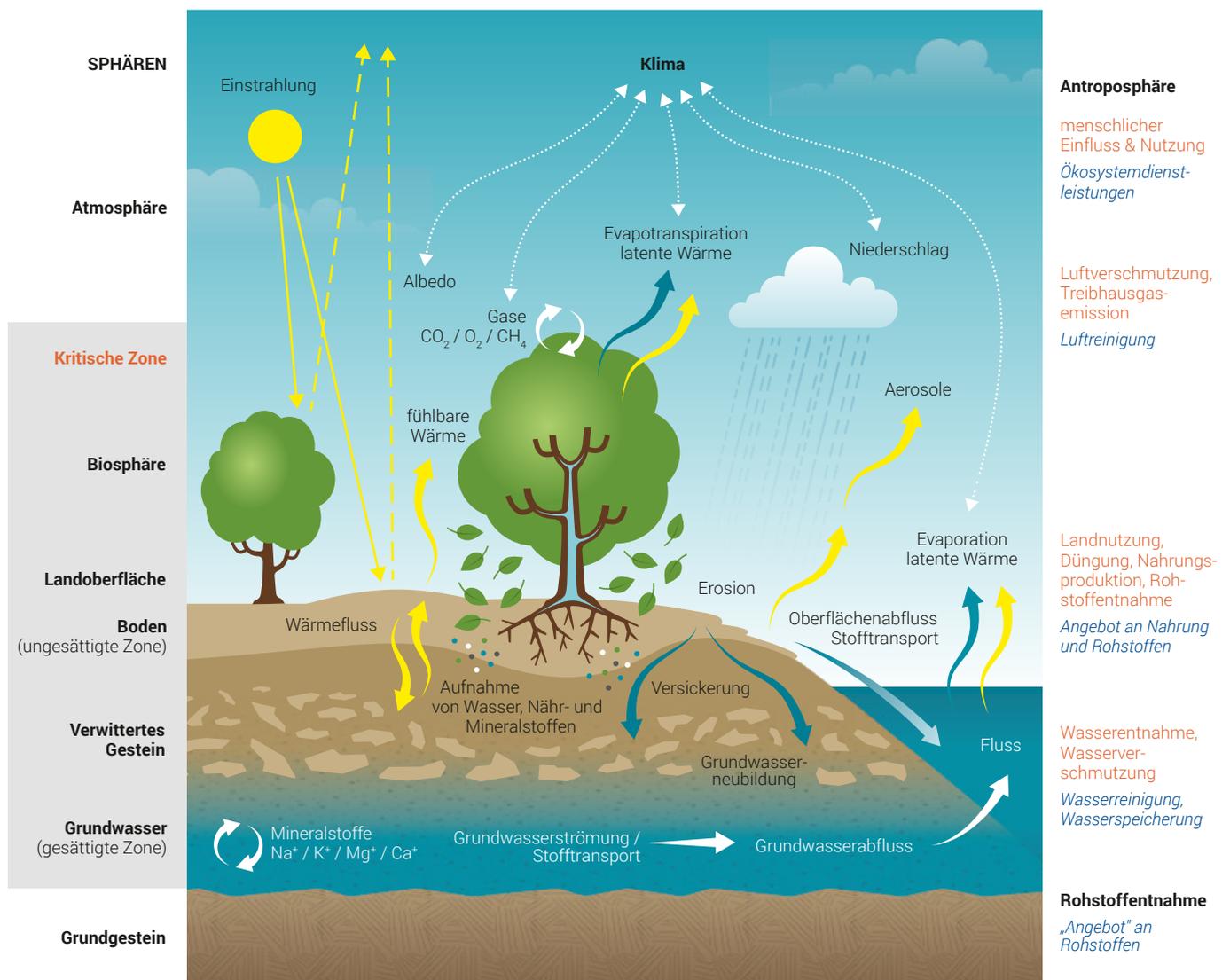
LANDOBERFLÄCHE UND BIOSPHÄRE

Auf der Landoberfläche spielt sich menschliches Leben ab. Auf ihr ist ein Großteil der irdischen Biosphäre angesiedelt, zu der Pflanzen und Tiere gehören. In dieser komplex strukturierten und von Leben geprägten Grenzschicht zwischen der obersten Lithosphäre und der untersten Atmosphäre findet eine Vielzahl von dynamischen Prozessen statt, die für das Erd- und Klimasystem eine zentrale Rolle spielen. Dieser schmale Grenzbereich wird daher auch als „kritische Zone“ bezeichnet. Sie reicht von der Oberkante des Grundgesteins bis hinauf zu den Baumwipfeln und umfasst die wassergesättigten Grundwasserleiter, die ungesättigte Bodenzone und die Vegetation. Hier wirken Atmosphäre (Luft), Hydrosphäre (Wasser), Biosphäre (Leben), Pedosphäre (Böden) und oberste Lithosphäre (Gestein) zusammen, durchdringen und überschneiden sich teilweise. Wasser, Gase, Nährstoffe und Energie werden zwischen den verschiedenen Sphären

ausgetauscht, oft aktiv beeinflusst durch das Wirken von Organismen. Diese Prozesse haben eine entscheidende Bedeutung für das Klima, die Biodiversität und die Lebensbedingungen auf unserem Planeten.

Die positiven Effekte der Biosphäre für den Menschen werden als Ökosystemdienstleistungen bezeichnet. Andererseits greift der Mensch durch eine Vielzahl von Aktivitäten in die Prozesse und Kreisläufe der kritischen Zone ein, oft mit negativen Folgen. Beispiele sind die Luft- und Wasserverschmutzung, die Wasserentnahme, aber auch Bewässerung, Düngung und die Entnahme von Nahrung sowie generell die Landnutzung und damit verbundene Änderung der Oberflächeneigenschaften.

Werner Aeschbach



PLANETARE MAGNETFELDER: ORIENTIERUNGSHILFE UND SCHUTZ

Magnetfelder von Planeten drehen nicht nur die Kompassnadel, sondern sie eröffnen uns einen Blick in die Dynamik des Inneren der Erde und anderer Planeten. Neben der Atmosphäre bilden sie außerdem einen Teil des Schutzschields gegen hochenergetische Teilchen aus dem Weltall.

Auch wenn Navigation heute in der Regel satellitengestützt funktioniert, ist der Magnetkompass noch immer ein faszinierendes Instrument, das überall auf der Welt die Richtung weist. Das funktioniert, weil die Erde ein Magnetfeld besitzt, in dem sich die Nadel ausrichtet. Das würde längst nicht überall im Sonnensystem gelingen: Während die Planeten Merkur, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun sowie der Jupitermond Ganymed Magnetfelder aufweisen, die den ganzen Himmelskörper umfassen, haben unser Erdmond, die Venus und der Mars keine solchen globalen Felder. Auch auf kleinen Kometen und Asteroiden würde man mit einem Kompass richtungslos bleiben.

Wie das Erdmagnetfeld und die Felder auf anderen Planeten entstehen, wissen wir erst seit etwa einhundert Jahren. Die Erklärung liefert die **Dynamotheorie**: In einem flüssigen, sich bewegendem und elektrisch leitfähigen Medium werden elektrische Ströme angeregt. Diese erzeugen magnetische Felder, die ein zunächst schwaches Feld verstärken können. Durch diesen Dynamoprozess wird die Bewegungsenergie der Ladungsträger in magnetische Energie umgewandelt.

Mit einer belastbaren Theorie zur Entstehung des Erdmagnetfelds kann man von dessen Beschaffenheit zurückschließen auf das uns verborgene Erdinnere: Die Existenz des Magnetfelds deutet darauf hin, dass im Erdinneren flüssige, elektrisch leitende Materie vorhanden ist. Tatsächlich belegen seismologische Untersuchungen, dass es im äußeren Erdkern metallische Schmelzen gibt. Diese gelten heute als das Medium, in dem der Erddynamoprozess abläuft. Angetrieben wird dieses Medium durch Temperaturunterschiede: Aufgrund des Bestrebens, solche Unterschiede auszugleichen, setzt sich das Material in Bewegung – man spricht von turbulenter Konvektion. Aufgrund der Erdrotation werden diese Konvektionsströme abgelenkt und auf schraubenförmige Bahnen gezwungen. Durch die Bewegung der leitfähigen Materie in einem schwachen Magnetfeld entstehen die zuvor genannten Induktionsströme, die das Magnetfeld verstärken. Da die Eisen-Nickel-Schmelze einen elektrischen Widerstand besitzt, wird ein Teil des Stroms – ganz wie in einem elektrischen Kabel – in Wärme umgewandelt. Der Leistungsbedarf dieser komplexen planetaren Maschine liegt bei etwa 500 Gigawatt, was etwa dem Achtfachen der Stromerzeugung in

Deutschland entspricht. Die Energie erhält der Dynamo aus der Wärme des Erdinneren, das sich dadurch abkühlt, und aus der Kristallisationswärme des wachsenden festen Erdkerns.

Das Erdmagnetfeld ist zeitlich und räumlich veränderlich. Seine größte Komponente ist ein **Dipol**, den wir als magnetischen Nord- und Südpol kennen. Dieser Dipol ist gegenüber der Erdachse leicht geneigt. Deshalb liegen der geografische Nordpol und der magnetische Südpol (!) auch mehrere Hundert Kilometer auseinander. Die Lage der magnetischen Pole ändert sich allerdings mit der Zeit. Diese Polwanderungen sind ein deutlicher Hinweis auf zeitliche Schwankungen im Erddynamo. Gegenwärtig wird sogar eine Abnahme der Magnetfeldstärke an der Erdoberfläche beobachtet, was als Hinweis auf eine kommende Umpolung des Erdmagnetfelds gedeutet wird. Bei einer solchen Umpolung wechseln die erdmagnetischen Pole ihre Position: Der Nord- wird zum Südpol und umgekehrt. Im Laufe der Erdgeschichte ist das tatsächlich schon häufig vorgekommen, wie wir anhand gesteinsmagnetischer Untersuchungen nachweisen können.

Umpolungen sind allerdings keine strikt regelmäßig wiederkehrenden Vorgänge. Eher sind sie Hinweise auf den turbulenten Charakter der Dynamoprozesse im äußeren Kern. Das Umklappen selbst dauert etwa fünf- bis zehntausend Jahre. Die letzte Umpolung fand vor 780 000 Jahren statt. Neueste Untersuchungen, die paläomagnetische Erkenntnisse und datenadaptive Methoden nutzen, lassen vermuten, dass eine Umkehr in den kommenden 5000 Jahren unwahrscheinlich ist.

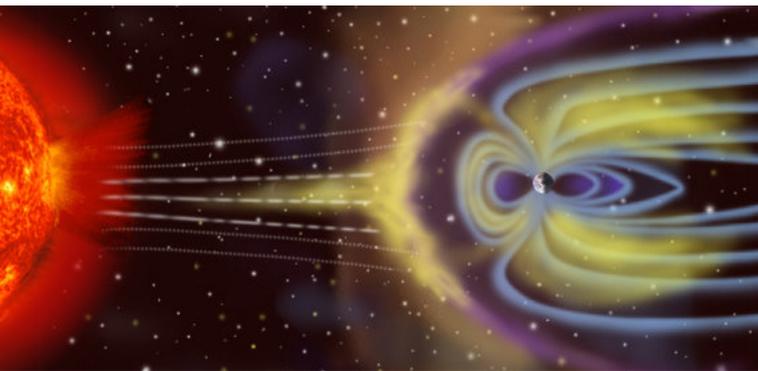
Wie genau die Umpolung abläuft, ist nicht vollständig verstanden. Wir nehmen an, dass es in der Dynamoregion immer wieder kleinere Regionen gibt, die gerade umgekehrt zur dominierenden Hauptfeldrichtung gepolt sind. Solche Regionen tauchen auf und verschwinden wieder. Es kann aber auch vorkommen, dass sich diese Regionen zusammenschließen, große Teile des Dynamogebiets einnehmen und dann ein Übergang der ganzen Dynamoregion in den umgekehrten Zustand stattfindet. Vorhersagen lässt sich dieser Umkehrprozess nicht, er ist eher chaotisch.

vor Millionen Jahren

170 160 150 140 130 120 110 100 90

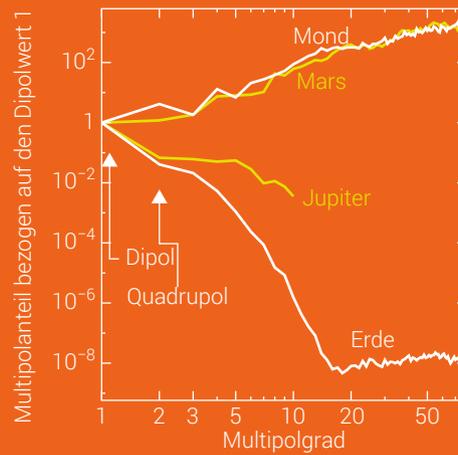
Während einer Umkehr nimmt die Feldstärke an der Oberfläche ab. Dies bedeutet aber nicht, dass der ganze Dynamoprozess schwächer wird. Die Umwandlung von Bewegungsenergie in magnetische Energie erfolgt lediglich in kleineren Strukturen. Diese sind an der Oberfläche deutlich schwächer als der für gewöhnlich dominierende Dipolanteil.

Dass die Erde ein Magnetfeld hat, ist für uns ein Glücksfall: Unsere Sonne ist ein sehr aktiver Stern, und ständig strömen große Mengen von dort in den Weltraum. Dieser Sonnenwind besteht überwiegend aus Protonen und Elektronen und strömt mit Geschwindigkeiten von einigen Hundert Kilometern pro Sekunde. Für das Leben sind solche elektrisch geladenen hochenergetischen Teilchen problematisch, da sie die Zellen und das Erbgut zerstören können. Aufgrund des Magnetfelds der Erde bildet sich als Wechselwirkungsregion zwischen Sonnenwind und Magnetfeld die Magnetosphäre aus, in die der Sonnenwind nur bedingt eindringen kann. Die Magnetosphäre ist somit die erste Schutzregion unserer Erde gegen hochenergetische Teilchen von der Sonne. Der Erdmond, ein Körper ohne globales Magnetfeld und ohne Atmosphäre, wird ständig von diesem Sonnenwind bombardiert.



Die Magnetosphäre ist ein sehr dynamisches Gebilde, in das solares Material und Energie gelegentlich doch eindringen können: **Magnetische Rekonnexion**, eine Art Anti-Dynamoprozess, durch den magnetische Energie in Bewegungsenergie umgewandelt werden kann, spielt hierbei eine große Rolle. Diese Rekonnexion tritt sowohl am oberen Rand der Magnetosphäre als auch in deren Schweif auf.

Rasche Änderungen des äußeren Anteils des Erdmagnetfelds, Beschleunigung von Elektronen und Protonen auf hohe Geschwindigkeiten und der Einfall hochenergetischer Teilchen in die Atmosphäre sind letztlich Folge dieser Rekonnexionsprozesse. Man spricht dann auch von magnetischen Stürmen und Teilstürmen. Die Gesamtheit der dynamischen Phänomene in der Magnetosphäre und ihrer solaren Ursachen fasst man unter dem Begriff Weltraumwetter zusammen. Für die zunehmende Präsenz des Menschen und technischer Einrichtungen im Weltall, Kommunikationssatelliten



So wie ein Ton in Anteile unterschiedlicher Frequenz spektral zerlegt werden kann, lässt sich auch die räumliche Anordnung eines Magnetfelds in unterschiedliche räumliche Frequenzen, Multipole, zerlegen. Die großräumigen Feldkomponenten sind Dipol und Quadrupol, die folgenden Multipole stehen für immer kleinere räumliche Anordnungen. Bei Planeten mit globalen Magnetfeldern dominieren daher Dipol- und Quadrupolanteile, während bei Mond und Mars viele kleinräumige hohe Pole einen weit wichtigeren Anteil am Magnetfeld besitzen.

oder die Satelliten der globalen Navigationssysteme spielen ein besseres Verständnis des Weltraumwetters und dessen Vorhersage eine wichtige Rolle, denn die magnetosphärische Dynamik kann Mensch und Technik im erdnahen Orbit und an der Erdoberfläche sehr beeinträchtigen oder schädigen.

Auch für die Astrophysik ist der von Magnetfeldern durchsetzte erdnahe Raum von großem Interesse. Er ist gewissermaßen ein Plasmalabor vor der Haustür, in dem Prozesse untersucht werden können, die sonst in entfernten und exotischen Regionen des Universums auftreten. So beschleunigen magnetische Stoßwellen um Sternexplosionen Teilchen auf extrem hohe Energien – ein Prozess, der im Labormaßstab auf der Erde nicht nachgebaut werden kann, in der Magnetosphäre aber mindestens angenähert wird.

Magnetosphärische Plasmaumgebungen lassen sich auch bei den Planeten Merkur, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun nachweisen und studieren. Bei Merkurs Magnetosphäre ist besonders interessant, dass ihre innere Berandung die Planetenoberfläche selbst ist. Die Magnetosphären von Jupiter und Saturn sind durch die rasche Rotation der Planeten und interne Plasmaquellen wesentlich geprägt. Auch andere Teilchenquellen als die Sonne treten in Erscheinung: Aufgrund seiner starken vulkanischen Aktivität stößt beispielsweise der Mond Io mehrere Tonnen Material pro Sekunden in die Magnetosphäre des Jupiters aus.

Die Magnetosphären von Uranus und Neptun sind wenig erforscht, aber werfen weitere Fragen auf: Die Ausrichtung der Dipolmomente ihrer Magnetfelder weicht stark von der ihrer Rotationsachsen ab. Hier dürfte die Forschung in Zukunft noch vielfältige Erkenntnisse gewinnen, die auch dem Verständnis des Erdmagnetfelds zugutekommen.

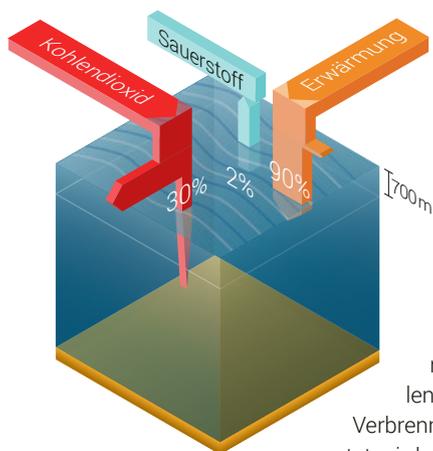
Karl-Heinz Glaßmeier und Ulrich Hansen



DER OZEAN IM KLIMASYSTEM

Der Ozean spielt eine entscheidende Rolle für das Klima: Jahrzehntelange Megadürren, jahrhundertelange Kälteperioden und jahrtausendelange globale Eiszeitzyklen hängen mit seinem Einfluss zusammen. Dabei ist er das Zuhause der größten vernetzten Biosphäre auf dem Planeten mit einer noch zu entdeckenden Artenvielfalt – und in seinen Tiefen ist er einer der letzten noch unerforschten Bereiche unseres Planeten.

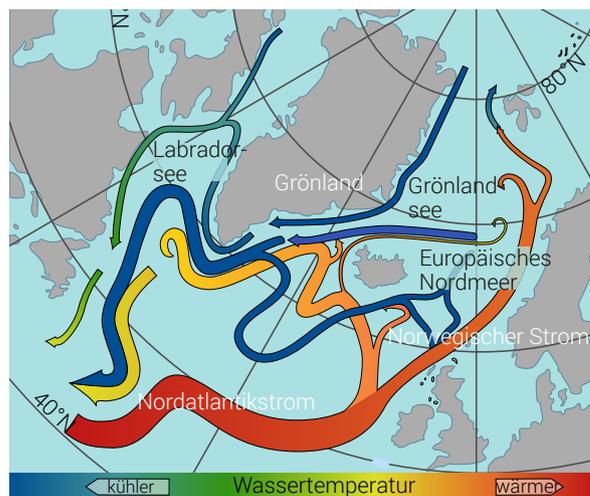
Der Ozean steht unter Stress – nicht nur durch Verschmutzung und Übernutzung, sondern auch durch den menschengemachten Klimawandel. Dieser macht sich in allen Winkeln der Erde bemerkbar: An Land und im Wasser steigen die Temperaturen, während die schneebedeckten Flächen und das Eisvolumen der Erde schrumpfen. In vielen Regionen werden Niederschläge seltener und weniger, in anderen Regionen nehmen sie zu. **Der Meeresspiegel steigt.** Hitzewellen im Meer führen zur Korallenbleiche, und Sauerstoffminimumzonen breiten sich in tieferen Ozeanschichten aus. Die globale Umwälzbewegung des Ozeans, die thermohaline Zirkulation, wird sich in Zukunft verlangsamen.



Dabei wäre die globale Erwärmung ohne die Weltmeere noch viel deutlicher, denn aktuell nehmen sie mehr als 90 Prozent der zusätzlichen Wärme auf, die durch den von uns Menschen verstärkten Treibhauseffekt entsteht. Und nicht nur das: Der Ozean absorbiert bislang auch bis zu einem Drittel des gesamten Kohlendioxids, das durch die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas freigesetzt wird. Die Aufnahme und Speicherung geschieht durch die physikalische Pumpe: An der Oberfläche kühlt das Wasser ab und wird dadurch dichter, sinkt in das Ozeaninnere und nimmt die in ihm gelösten Substanzen mit. Das zusätzliche Kohlendioxid darin lässt das Ozeanwasser chemisch sauer werden – ein Problem vor allem für Meeresbewohner wie Korallen, Muscheln oder einige Planktonarten, deren Kalkschalen von der Säure angegriffen werden.

Auch die zusätzliche Wärme bleibt nicht ohne Folgen: Zum einen sind die steigenden Wassertemperaturen selbst ein Stressfaktor für viele marine Lebewesen. Zum anderen dehnt sich wärmeres Meerwasser aus und erhöht somit den globalen Meeresspiegel. Seit dem Beginn der Industrialisierung ist dieser global bereits um mehr als 20 Zentimeter gestiegen, wobei der regionale Anstieg je nach den geophysikalischen Gegebenheiten schwächer oder stärker ausfallen kann. Lange Zeit war die thermische Ausdehnung des Ozeans die Hauptursache für den Anstieg des Meeresspiegels. Mittlerweile lässt der Klimawandel allerdings die Eisschilde von Grönland und der Antarktis sowie global die Gletscher schmelzen, und zwar nicht nur an der Oberfläche durch die

Erwärmung der Atmosphäre, sondern auch durch erwärmtes Wasser an der Unterseite der Schelfeise und der Gletscher, die im Meer enden. Der Beitrag des Schmelzwassers dominiert mittlerweile den globalen Meeresspiegelanstieg.



Die AMOC besitzt ein komplexes System aus verschiedenen Strömungsgebieten. Warmes Oberflächenwasser wird dabei aus den subtropischen Gewässern nach Nordeuropa transportiert.

Das zusätzliche Schmelzwasser beeinflusst auch die Meeresströmungen. Diese verbinden alle Ozeanbecken und sorgen für den Austausch mit den Randmeeren und Küstenregionen. Sie transportieren Energie, Gase, Nährstoffe und viele andere Substanzen rund um den Globus. Ein Beispiel ist die Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC, engl. „Atlantic meridional overturn circulation“): Sie bringt im Atlantik warmes, salzreiches Wasser nach Norden und transportiert kaltes, salzärmeres Wasser in der Tiefe zurück nach Süden. Klimamodelle zeigen, dass diese hochgradig klimarelevante Strömung bis zum Ende des Jahrhunderts um mehr als ein Drittel abnehmen könnte, abhängig davon, wie sich die Treibhausgasemissionen entwickeln. In Afrika und Südamerika sind dadurch je nach Region eine Zunahme von Dürreperioden oder Starkregen zu erwarten. In West- und Nordeuropa würde die Klimaerwärmung hingegen abgeschwächt. Der Meeresspiegel in der Nordsee würde allerdings stärker steigen, und wir hätten mehr Stürme zu erwarten als ohne Änderung der AMOC.

Die kontinuierliche Vermessung der AMOC ist erst seit rund 30 Jahren möglich – zu kurz, um sicher sagen zu können, ob sie sich verändert hat. Doch wenn diese Strömung zusam-

menbrüche, könnte das unumkehrbar sein. Die AMOC gilt unter Klimawissenschaftler:innen deshalb als potentieller Kippunkt, dessen Eintreten dem Sonderbericht des Weltklimarats über Ozean und Kryosphäre aus dem Jahr 2019 zufolge unwahrscheinlich, aber physikalisch möglich ist.

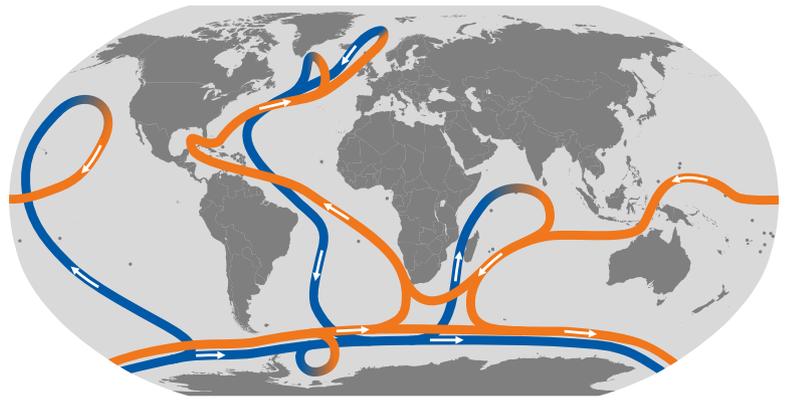
Infolge der zahlreichen Veränderungen im Ozean haben einige marine Arten ihre geografischen Verbreitungsgebiete und saisonalen Aktivitäten verlagert – meist in Richtung der Pole – und sich damit schon teilweise an die Ozeanerwärmung, die Verringerung der Meereisbedeckung und biogeochemische Veränderungen ihrer Lebensräume (wie Versauerung und Sauerstoffverlust) angepasst. In den neuen Lebensräumen konkurrieren sie mit den eingesessenen Arten, was kaskadenartige **Auswirkungen auf Nahrungsnetze** und die Struktur und Funktionsweise der Ökosysteme hat. Die Veränderungen, die die kombinierten Belastungen durch Klimawandel, Übernutzung, Zerstörung von Lebensräumen sowie die Verschmutzung nach sich ziehen, sind noch nicht gut dokumentiert – sie könnten aber dramatisch sein und schwerwiegende Folgen auch für uns Menschen haben.

Integriertes Beobachtungs- und Modellierungssystem

Um den Ozean besser zu verstehen und Entscheidungsträger:innen gut zu beraten, benötigen wir ein fortschrittliches Beobachtungssystem, das Echtzeitdaten aus Atmosphäre, Ozean und Kryosphäre umfassend integriert. Solch ein globales In-Situ-Beobachtungssystem würde die weltraumgestützten Ozeanbeobachtungen ergänzen und an aktuelle Methoden anknüpfen: Autonome Roboterplattformen wie passive Schwimmsonden („Floater“ und „Drifter“) und aktive Gleiter ergänzen bereits zunehmend die hochpräzisen Messungen von Forschungsschiffen, und müssten zukünftig den vollständigen Tiefenbereich des gesamten Ozeans abdecken. Bei der Analyse der entstehenden großen Beobachtungsdatensätze könnten Deep-Learning-Techniken helfen, ganz neue Zusammenhänge aufzudecken. Ein solches Beobachtungssystem würde die Datengrundlagen schaffen, die für das Verständnis und die Bewertung der Prozesse im Erdsystem sowie für die Entwicklung von belastbaren Vorhersagen erforderlich sind.

Darüber hinaus werden Beobachtungsdaten zum Erdsystem und Ozean in Rechenmodelle überführt, um die vielfältigen Prozesse und Wechselwirkungen in der Natur abbilden und entschlüsseln zu können. Modelle der Atmosphäre, des Ozeans und der Kryosphäre, also des gefrorenen Wassers auf der Erde, in eigenständiger und gekoppelter Form, sind in den vergangenen Jahrzehnten deutlich besser geworden. Um jedoch das volle Potenzial dieser Modelle ausschöpfen zu kön-

Floater, Drifter und Gleiter sind autonome Sonden, die über mehrere Jahre hinweg Messdaten aus dem Ozean liefern. Sie werden von den Meeresströmungen transportiert und können aus eigenem Antrieb teilweise bis zu mehreren Tausend Metern tief abtauchen und wieder aufsteigen. Im Bild: Ein Arvor-Floater, der im weltweiten ARGO-Projekt mit tausenden solcher und ähnlicher Sonden verwendet wird.



Der Ozean ist ein miteinander durch Strömungen verknüpftes System – hier stark vereinfacht dargestellt. Das globale Förderband zieht sich durch alle Weltmeere und stellt so einen wichtigen Faktor zur Verteilung von Energie und Materialien dar. Je genauer die verschlungenen Strömungen und die Auswirkungen von Veränderungen auf das Gesamtsystem bekannt sind, desto präziser und langfristiger sind Vorhersagen der Ozeanforschung – und können so Entscheidungsträger:innen helfen, Maßnahmen gegen unerwünschte Veränderungen zu etablieren.

nen, müssen sie möglichst sämtliche Teilsysteme der Erde umfassen, einschließlich des menschlichen Einflusses und seiner Veränderung. Für das Design und die Architektur dieser Computermodelle werden konzeptuelle, statistische und innovative numerische Ansätze genutzt. Damit diese Modelle ein echter „digitaler Zwilling“ der Erde werden können, sind noch deutliche Verbesserungen erforderlich, etwa in der Darstellung komplexer nicht-linearer physikalischer Prozesse wie der Wolkenbildung in der Atmosphäre, des Ozeanwetters einschließlich der Extreme oder der dynamischen und thermodynamischen Prozesse an der Schnittstelle zwischen Eisschild und Ozean. Derzeit übersteigt der Rechenaufwand für solche umfassenden Modelle bei hoher Auflösung die Kapazitäten der derzeitigen Großrechenanlagen noch deutlich – auch hier sind Fortschritte notwendig und möglich.

Wir brauchen also kombinierte Überwachungs- und Modellierungsanstrengungen in der Erdsystemwissenschaft, um potentielle Überraschungen im Klimasystem einschätzen zu können, aber auch, um Interventionsmöglichkeiten zu erkunden. Ein Beispiel ist der Meeresspiegelanstieg: Für politische und technische Entscheidungen zu Schutz-, Rückzugs- und Umsiedlungsmöglichkeiten für bewohnte Regionen und Infrastruktur sind genaue Prognosen zum regionalen und lokalen Anstieg in den nächsten 50 bis 100 Jahren erforderlich. Auch naturbasierte Lösungen für den CO₂-Entzug aus der Atmosphäre sind weiterhin Gegenstand der Forschung und Teil einer möglichen Lösung des Klimaproblems. Klar ist an erster Stelle aber, dass unabhängig davon entschiedene Maßnahmen ergriffen werden müssen, um den Ausstoß von Treibhausgasen innerhalb weniger Jahre auf null zu reduzieren.

Monika Rhein und Martin Visbeck

DIE KRYOSPHÄRE

Die gefrorenen Komponenten des Klimasystems spielen eine wesentliche Rolle für die Energiebilanz an der Erdoberfläche, den Gasaustausch zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre sowie den Wasserkreislauf – mit zurzeit drastischen Konsequenzen für die Verfügbarkeit von Wasser und den Anstieg des Meeresspiegels.

Eis und Schnee haben eine Vielzahl von Erscheinungsformen: Sie bilden Gletscher, Eisschilde und Schelfeis, Meereis, Schnee, Fluss- und Seeeis sowie dauerhaft gefrorenen Boden, den Permafrost. Größtenteils findet man diese kalten Komponenten unseres Erdsystems in den Polarregionen und in Höhenlagen der mittleren und niederen Breiten. Diese Kryosphäre reagiert empfindlich auf Veränderungen des Klimas, was sie zu einem natürlichen Sensor für Klimaschwankungen und zu einem sichtbaren Ausdruck des Klimawandels macht. In der Vergangenheit unterlag die Kryosphäre großen Schwankungen, die mit Eiszeiten und kurzfristigeren Klimaänderungen wie der Jüngerer Dryaszeit (ca. 10 000 v. Chr.) oder der Kleinen Eiszeit (ca. 1400–1900 n. Chr.) verbunden waren. Gegenwärtig gehen Schnee, Eis und Permafrost aufgrund des menschengemachten Klimawandels und

den damit verbundenen steigenden Luft- und Ozeantemperaturen zurück.

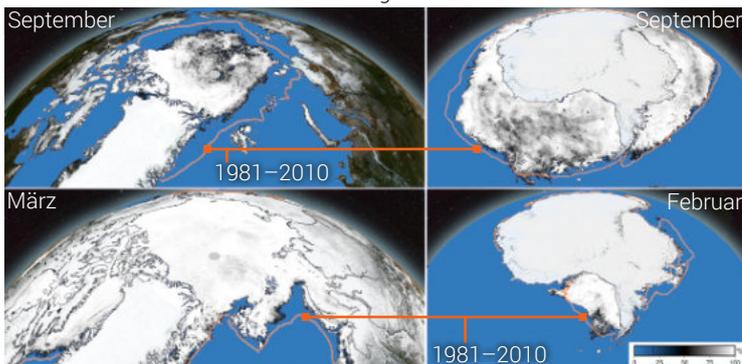
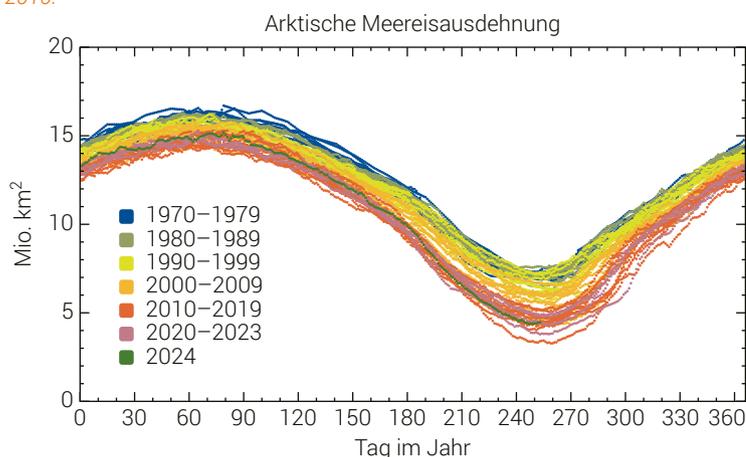
Meereis in Arktis und Antarktis

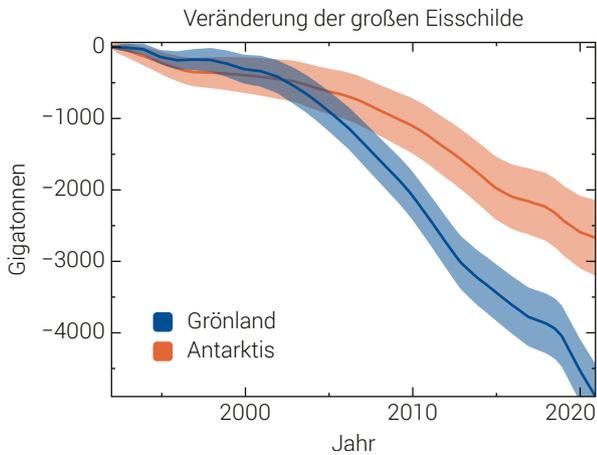
Das Eis auf dem Ozean wird als **Meereis** bezeichnet. Im Gegensatz zu Süßwassereis, das man auf Seen findet, ist Meerereis, angetrieben von Wind und Meeresströmungen, immer in Bewegung. Dadurch entstehen Risse im Eis und es bilden sich Verwerfungen, wenn Schollen gegeneinander gedrückt werden. So entsteht eine faszinierende Eislandschaft, die auch vielen Tieren als Lebensraum dient. Meerereis unterscheidet sich nicht nur in seiner äußeren Form, sondern auch physikalisch vom Süßwassereis: Das im Ozeanwasser enthaltene Salz wird beim Gefrieren zum größten Teil in den Ozean abgegeben oder als Salzlake in Taschen und Kanälen im Eis eingelagert, was zu unterschiedlicher Lichtbrechung und Festigkeit des Eises führt. Auch wie das Eis gefriert, ist unterschiedlich: Süßwasser hat bei 4 °C die höchste Dichte. Deshalb kann kälteres Wasser darüber liegen, und Seen frieren von oben nach unten zu. Salzhaltiges Meerwasser hat diese Dichteanomalie nicht: Die gesamte obere durchmischte Schicht des Ozeans muss, abhängig vom Salzgehalt, auf etwa –1,8 °C abkühlen, bevor Meerereis wachsen kann.

Meereis und der darauf liegende Schnee werfen die Sonnenstrahlung viel stärker zurück als der umgebende dunkle Ozean. Das beeinflusst die Energiebilanz an der Erdoberfläche sowie auch die Schichtung und das Temperaturprofil in der Atmosphäre. Daraus ergeben sich Rückkopplungseffekte, die die Temperaturzunahme in den Polarregionen verstärken können: Fehlt z. B. das stark reflektierende Eis, dann erwärmt sich im Sommer das Wasser durch Einstrahlung noch stärker. So sind die Temperaturen nördlich von 60 °N in den letzten Jahrzehnten mehr als doppelt so stark gestiegen wie im globalen Durchschnitt (siehe Seite 127).

Innerhalb eines Winters wächst Meerereis auf ein bis zwei Meter Dicke an. Übersteht es den Sommer und wächst noch mehrere Jahre weiter, so kann es mehrere Meter dick werden. In der Arktis ist dieses dickere mehrjährige Eis in den letzten Jahrzehnten **deutlich zurückgegangen** (etwa 13% Flächenabnahme pro Jahrzehnt). Verglichen mit den 1970er- und 1980er-Jahren übersteht heute nur noch etwa die Hälfte der Meerereisfläche in der Arktis den Sommer nach seiner Entstehung. Auch im Winter nimmt die Meerereisfläche ab, wenn auch nicht ganz so stark. Im gleichen Zeitraum ist auch die Eisdicke zurückgegangen. Klimaprojektionen sagen voraus, dass die Arktis vor 2050 im Sommer mindestens einmal

Zeitliche Entwicklung des Meerereises in der Arktis aus Satellitendaten. Die Daten aller Jahre sind übereinander dargestellt. Die Abnahme von Dekade zu Dekade ist aus den Farben zu erkennen. Unten: Die minimale und maximale Meerereisausdehnung im Jahr 2024 für die Arktis (links) und Antarktis (rechts). Die orange Linie zeigt zum Vergleich die mittlere Meerereisausdehnung der Jahre 1981 bis 2010.





Massenbilanz des Grönländischen und Antarktischen Inlandeises der vergangenen Jahrzehnte: deutlicher Massenverlust.

praktisch eisfrei sein wird (Fläche kleiner 1 Mio. km²) – selbst wenn die Treibhausgasemissionen drastisch sinken.

In der Antarktis ist bisher keine so umfassende Meereisabnahme zu beobachten. Die Meereisbedeckung schwankt hier sehr stark von Jahr zu Jahr und es gibt große regionale Unterschiede. Trotz eines negativen Trends in den vergangenen zehn Jahren kann man noch nicht klar sagen, dass das Eis hier weniger wird – und das, obwohl auch die Ozean- und Lufttemperaturen in der Antarktis steigen. Dies ist auf regionale atmosphärische und ozeanische Zirkulationsmuster zurückzuführen.

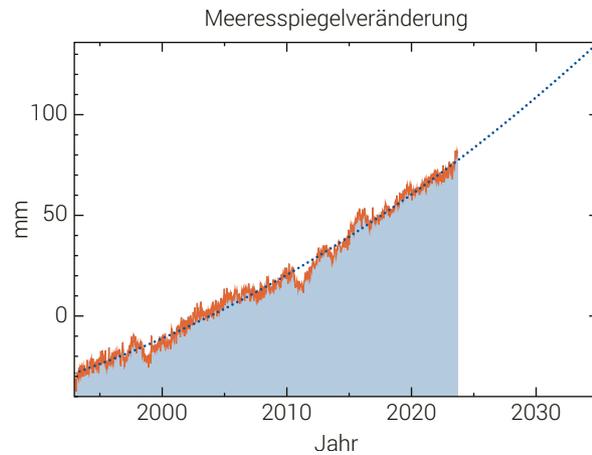
Gletscher und Eisschilde gehen zurück

Ein weiteres weltweit sichtbares Zeichen der globalen Erwärmung ist der Rückgang der Gebirgsgletscher. Insbesondere seit 1990 hat die Schmelzrate stark zugenommen. Konsequenzen des Gletscherschwunds sind ein Anstieg des Meeresspiegels und die im Frühjahr und Sommer beobachtete Abnahme an Schmelzwasser in den Flüssen. Letzteres wirkt sich negativ auf die Landwirtschaft und die Wasserkraft in den Tälern der Anden, der Alpen und des Himalajas aus.

Einen etwa gleich großen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg wie die Gebirgsgletscher liefert derzeit der schrumpfende Grönländische Eisschild. Dieser verliert jeweils zur Hälfte durch Schmelzwasser und durch Transport des Eises ins Meer an Masse. Der Massenverlust des Antarktischen Eisschildes erfolgt im Wesentlichen durch den zweiten Prozess – am deutlichsten in der Westantarktis. Der Grund dafür sind regional stark steigende Temperaturen und Veränderungen der ozeanischen Zirkulation über dem kontinentalen Schelf, die zu beschleunigtem Ausfluss von Eis führen.

Der Meeresspiegel steigt

Das Abschmelzen der Gletscher lässt den Meeresspiegel ansteigen. Neben dem Zufluss von Schmelzwasser von den Kontinenten spielt auch die Erwärmung des Meerwassers eine wichtige Rolle, weil sie dazu führt, dass sich das Wasser ausdehnt.



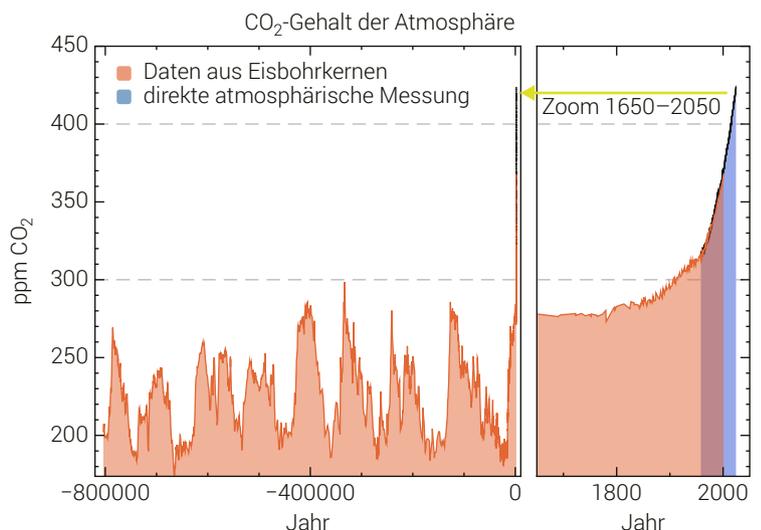
Anstieg des Meeresspiegels aus Satellitenmessungen. Der Anstieg beschleunigt sich.

Zwar sind Schwankungen des Meeresspiegels auf großen Zeitskalen normal: Seit dem Ende der letzten Eiszeit vor etwa 20 000 Jahren ist der Meeresspiegel um rund 120 Meter gestiegen! Allerdings stabilisierte er sich vor 2000 bis 3000 Jahren und blieb vom Beginn unserer Zeitrechnung bis 1900 nahezu konstant. In dieser Zeit konnten an den Küsten Siedlungen entstehen. Aus ihnen haben sich viele Großstädte entwickelt, die jetzt durch den aktuellen Anstieg des Meeresspiegels bedroht sind.

Seit 1900 ist der Meeresspiegel global um etwa 20 cm gestiegen. Pegelmessungen und Satellitenbeobachtungen zeigen allerdings für die Jahre 2006 bis 2018 einen deutlich gestiegenen Anstieg von 3,7 mm pro Jahr. Bis 2100 dürfte sich der Meeresspiegel noch einmal um 25 bis 100 cm erhöhen – abhängig von den künftigen CO₂-Emissionen und dem daraus folgenden Erwärmungstrend.

Peter Lemke, Heinrich Miller und Gunnar Spreen

Zeitliche Entwicklung des CO₂-Gehalts der Luft seit 800 000 Jahren, ermittelt aus Luftpfeilschlüssen im Eiskern von EPICA Dome C in der Antarktis (orange) und direkten Messungen von Luftproben (blau). Das rechte Bild zeigt den vergrößerten Ausschnitt der letzten rund 400 Jahre.



oben links: awk/jk, Daten von Sheperd et al. (2021), oben rechts: awk/jk mit Daten von sealevel.colorado.edu, unten: awk/jk mit Daten von 10.25921/n8y4-bp27 und gml.noaa.gov/ccgg/trends/

ATMOSPHÄRE: HAUT AUS GAS

Hätte die Erde die Größe eines Fußballs, so wäre die Atmosphäre gerade mal rund einen Millimeter dick. Trotzdem sorgt diese hauchdünne Hülle auf vielfältige Weise für lebensfreundliche Bedingungen auf der Erde.

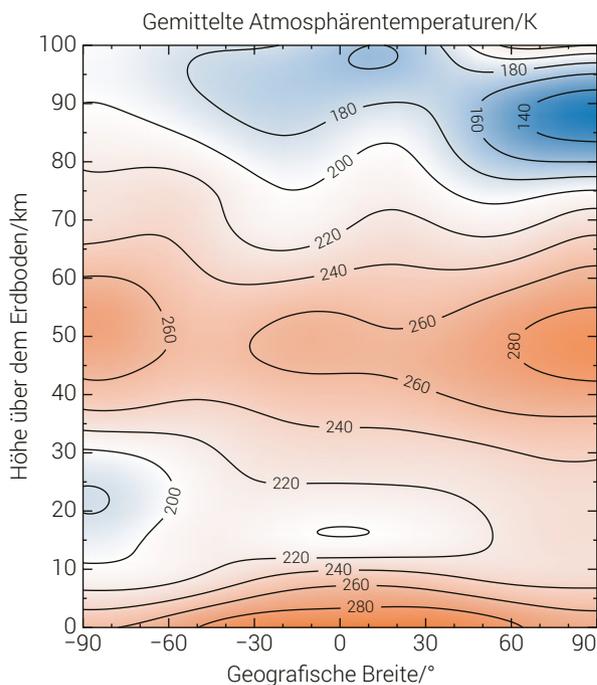
Nur neun Gase machen 99,9999 Prozent des Volumens der Atmosphäre aus: Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid (CO₂) und die Edelgase Argon, Neon, Helium und Krypton sowie Methan. Das restliche Millionstel besteht aus Hunderten bis Tausenden von Spurengasen. Etwa 99 Prozent der gesamten atmosphärischen Luftmasse ist in den untersten 30 Kilometern über dem Erdboden konzentriert. Der Atmosphärendruck fällt mit der Höhe exponentiell ab, daher hat die Atmosphäre keine scharfe Obergrenze.

Aus Erfahrung wissen wir, dass die Atmosphäre mit zunehmender Höhe kälter wird. Diese Beobachtung lässt sich physikalisch begründen: Hebt man ein Luftvolumen an, ohne dass es Energie mit der Umgebung austauscht – eine gute Näherung bei der großen Ausdehnung der Atmosphäre –, so

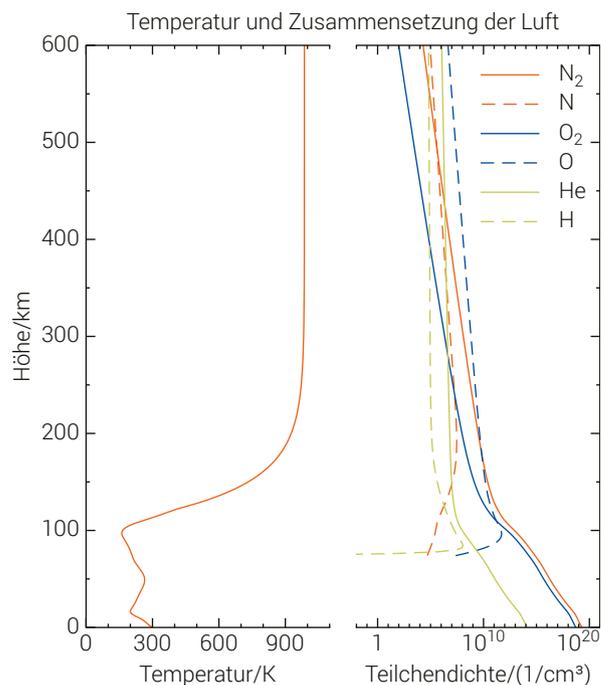
sinkt sein Umgebungsdruck: Das Volumen dehnt sich aus und kühlt – entsprechend der Poissonschen Zustandsgleichung – dadurch ab, alle hundert Meter um etwa ein Kelvin. Dies wird als der trockene adiabatische Temperaturgradient bezeichnet.

Schicht um Schicht

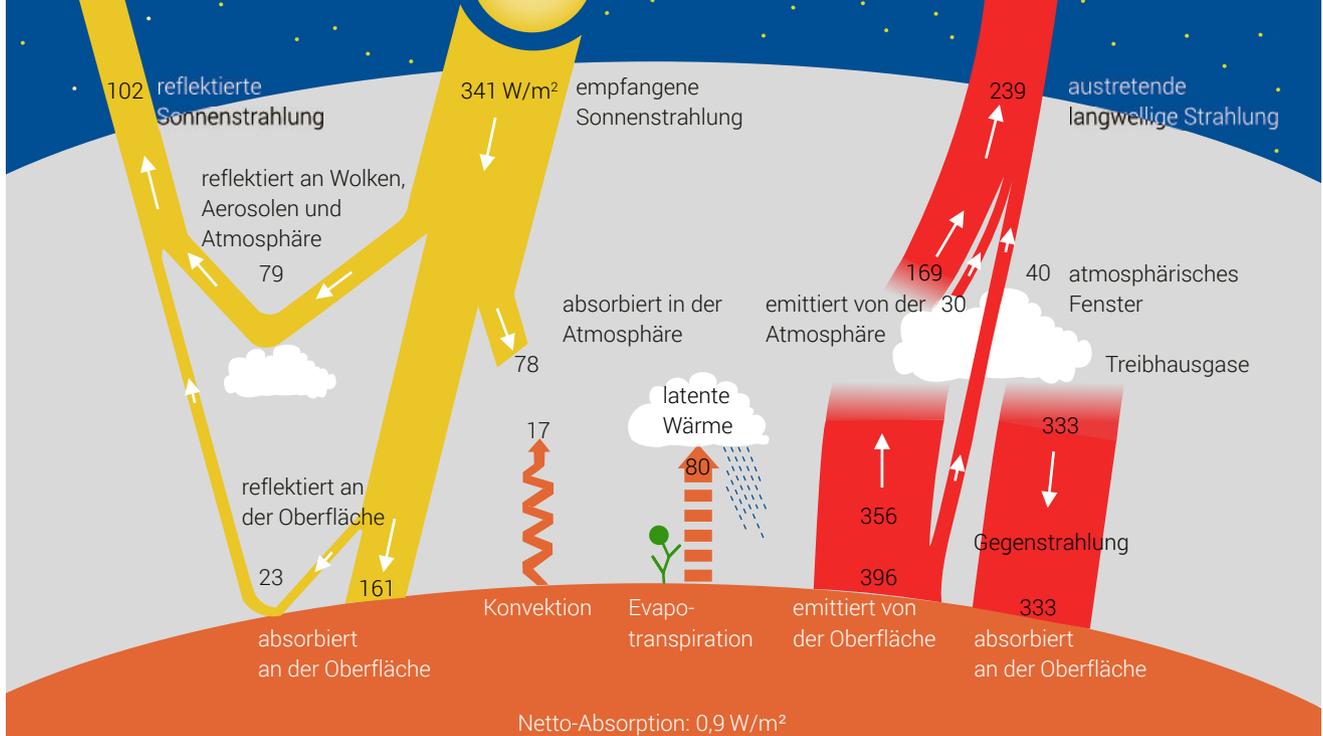
Messungen mit Wetterballons, Flugzeugen, Satelliten und bodengebundenen Instrumenten zeigen allerdings, dass das vertikale Temperaturgefälle in der realen Atmosphäre mit nur etwa 0,6 Kelvin pro 100 Meter etwas kleiner ist. Das liegt hauptsächlich daran, dass Wasserdampf kondensiert, wodurch Wärme freigesetzt wird. Allerdings finden wir dieses Temperaturgefälle nur in der untersten Atmosphärenschicht,



Variation der entlang der Breitenkreise gemittelten Atmosphärentemperatur (in Kelvin). Norden ist rechts, Süden links, die Höhe ist nach oben aufgetragen. Temperaturminima finden sich in der unteren Stratosphäre des Winterpols (hier der Südpol) in etwa 22 km Höhe, in der tropischen Tropopause bei rund 14 km Höhe und an der sommerlichen polaren Mesopause in 90 km Höhe. Dort findet man die niedrigsten Temperaturen (unter 140 K) der Atmosphäre.



Temperaturverlauf in der Atmosphäre (links). Mit zunehmender Höhe verändert sich die Zusammensetzung der Luft (rechts) hin zu leichteren Molekülen. Die turbulente Durchmischung der Atmosphäre unterhalb von 100 km wird durch die molekulare Diffusion abgelöst. Leichtere Moleküle und Atome wie Wasserstoff (gelb gestrichelt) oder Helium (gelb) gelangen weiter nach oben als verhältnismäßig schwerer Sauerstoff oder Stickstoff (blau und orange).



Schematische Darstellung der strahlungs- und strahlungsfreien Energieflüsse (Konvektion und latente Wärme) im System Atmosphäre-Erdoberfläche. Die Werte sind über die gesamte Erdoberfläche gemittelt.

der **Troposphäre**, die je nach geografischer Breite bis in eine Höhe von etwa acht Kilometern in den Polgebieten bzw. 16 bis 18 Kilometern am Äquator reicht. Die Tropopause markiert einen Umkehrpunkt: In der darüber liegenden **Stratosphäre** steigt die Temperatur wieder an, bis sie in rund 50 Kilometer Höhe an der Stratopause fast Zimmertemperatur erreicht. Die Ursache dafür liegt in der Erwärmung durch die Absorption der ultravioletten (UV-)Strahlung der Sonne durch das dort vorkommende Ozon – die bekannte Ozonschicht, welche die Landlebewesen vor diesen schädlichen Strahlen schützt (siehe Seite 275).

Oberhalb der Stratosphäre schließt sich mit der **Mesosphäre** bis in etwa 90 Kilometer Höhe eine Schicht an, die sich nach oben hin wieder abkühlt. Darüber steigt die Temperatur erneut an – diesmal bis auf über 1000 Kelvin in 400 Kilometer Höhe. Daher rührt der Name „Thermosphäre“. Verantwortlich für diese starke Temperaturzunahme ist die Absorption von Sonnenstrahlung durch Sauerstoff bei noch kürzeren Wellenlängen von unter 200 Nanometern.

Analog zur Schichtung nach ihrem Temperaturprofil lässt sich die Atmosphäre aber auch anhand ihrer Durchmischung einteilen, denn die untere (Troposphäre) und mittleren Atmosphäre (Stratosphäre und Mesosphäre) sind turbulent durchmischt. Der Einfluss der molekularen Diffusion wächst exponentiell mit der Höhe und bestimmt ab rund 100 Kilometer Höhe über dem Erdboden wesentlich die Mischung. Man spricht deshalb auch von der „Homosphäre“ (0 bis 100 km), der „Heterosphäre“ (ab 100 km) und einer „Turbopause“ bei 100 km.

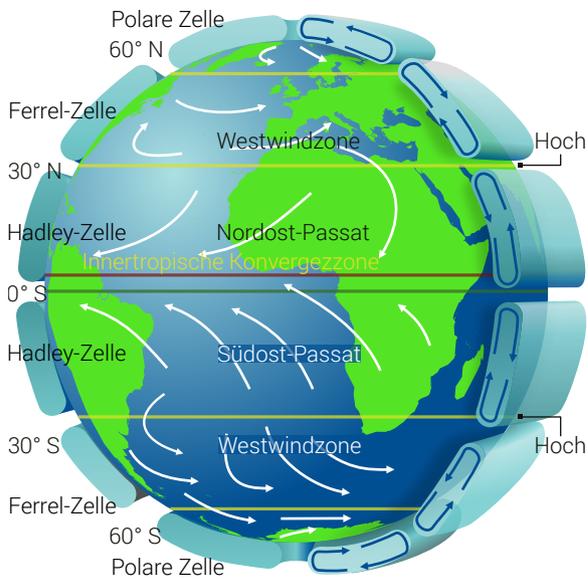
Die Strahlungsbilanz der Atmosphäre

Die elektromagnetische Strahlung der Sonne stellt die bei Weitem größte Energiequelle für die Erdoberfläche und die Atmosphäre dar – der Energiefluss ist über 3000-mal größer

als der Wärmefluss aus dem Erdinneren an die Oberfläche. Die Strahlungsenergie der Sonne kommt aber keinesfalls ungefiltert am Erdboden an. Knapp ein Drittel wird von den Wolken oder der Erdoberfläche zurück ins All gestreut. Die Atmosphäre absorbiert einen weiteren Teil, sodass nur knapp die Hälfte der einfallenden solaren Strahlung von der Erdoberfläche aufgenommen wird. Diese sendet entsprechend ihrer Temperatur Wärmestrahlung aus.

Bemerkenswert ist dabei, dass der von der Atmosphäre zur Erdoberfläche emittierte thermische Strahlungsfluss größer ist als der von der Sonne empfangene Strahlungsfluss. Dies kommt durch folgenden Prozess zustande: Die atmosphärischen Treibhausgase, insbesondere H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 und N_2O , absorbieren die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung und strahlen sie teilweise wieder zurück zum Erdboden. Diese Gegenstrahlung stellt den zentralen Aspekt des Treibhauseffekts dar, der die globale Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche um 30 bis 33 Grad im Vergleich zu einem treibhausgaslosen Planeten auf behagliche $+15\text{ }^\circ\text{C}$ anhebt und so das Vorkommen von flüssigem Wasser – und damit von Leben – auf der Erdoberfläche ermöglicht.

Die zunehmenden atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen verursachen eine erhöhte Gegenstrahlung und damit eine Erwärmung der Erdoberfläche. Sie sorgen aber auch gleichzeitig dafür, dass weniger Wärmestrahlung die Stratosphäre und Mesosphäre erreicht, wodurch diese sich abkühlen. Insgesamt können nur etwa zwölf Prozent der vom Erdboden emittierten Strahlung ungehindert ins All entweichen. Dies geschieht vor allem im „atmosphärischen Fenster“ bei Wellenlängen um $10\text{ }\mu\text{m}$. In der Troposphäre tragen auch strahlungsfreie Prozesse durch den Transport fühlbarer (oder sensibler) und latenter Wärme beträchtlich zum globalen Energiehaushalt bei. Letztere hängt eng mit dem Wasserkreislauf zusammen und spielt eine wichtige Rolle im Klima-



Die globale atmosphärische Zirkulation wird durch den Temperaturgradienten zwischen Äquator und Polen angetrieben. Die durch die Erddrehung verursachte Corioliskraft sorgt jedoch dafür dass die Luft nicht von der heißesten Region (Äquator) direkt zu den kältesten Punkten strömen kann. Es bilden sich daher in jeder Hemisphäre drei Zirkulationszellen (Hadley-, Ferrel-, Polare Zelle). Während in der Hadley-Zelle die Strömung recht beständig ist, beschreibt die schematische Darstellung in den Ferrel- und Polaren Zellen nur die mittlere Strömung. Tatsächlich bildet die Grenze zwischen Ferrel- und Polarer Zelle eine mäandrierende und zeitlich stark veränderliche Struktur aus, die sich durch das wechselnde Wetter in den mittleren Breiten bemerkbar macht.

Es gibt nicht „den einen“ **Jetstream**, sondern mehrere jeweils an den polwärtigen Grenzen der Zirkulationszellen: Die sehr schnellen „Subtropenjets“ in Höhen von etwa 14 Kilometern entstehen am polwärtigen Ende der Hadley-Zellen durch die Drehimpulserhaltung. Der Polarfront-Jetstream hingegen ist ein überwiegend durch Temperaturunterschiede getriebenes Starkwindband in rund zehn Kilometern Höhe, das in den mittleren Breiten auftritt und von Wirbeln geprägt ist, die ihm eine typische Wellenform verleihen. Wenn in deutschen Medien von „dem Jetstream“ die Rede ist, ist in der Regel der polare Jetstream auf der Nordhalbkugel gemeint. Er hat einen wichtigen Einfluss, auch auf unser Wetter in Europa.

Den Passatwinden entgegengerichtet sind die westlichen Winde der mittleren Breiten. Sie kommen durch die Temperaturunterschiede zwischen den warmen Tropen und den kalten Polregionen zustande. In den warmen Tropen fällt der Luftdruck mit der Höhe langsamer ab als in kälteren Regionen. Die Luftdruckunterschiede zwischen den Tropen und den Polarregionen wachsen demnach mit der Höhe an. Luftmassen werden darum zu den Polen hin beschleunigt (Druckgradientenkraft) und aufgrund der Erdrotation abgelenkt (Corioliskraft). Sind diese beiden Kräfte im Gleichgewicht, so ist die Rede von einem geostrophischen Wind. Dieser Zustand ist erreicht, wenn Winde aus westlicher Richtung wehen.

system. Die Energieumsätze in der Atmosphäre sind daher nicht auf die Strahlungskomponenten zu reduzieren.

Dynamik der Atmosphäre

Die Verteilung der Energie in der Erdatmosphäre erfolgt durch die atmosphärische Zirkulation. Sie ist am Boden geprägt durch die Passatwinde der Tropen und Subtropen, sowie durch die Westwinddriftzonen der mittleren Breiten. Die physikalischen Ursachen der relativ stetigen Passatwinde waren über Jahrhunderte hinweg Gegenstand diverser Erklärungsansätze. Heute verstehen wir sie als bodennahen Zweig der **Hadley-Zirkulation**: Dort wo die Sonne am höchsten steht – also je nach Jahreszeit zwischen dem nördlichen und südlichen Wendekreis –, heizen sich Luftmassen stark auf und steigen nach oben. Die so entstehende Bodentiefdruckrinne bildet die innertropische Konvergenzzone. Die aufgestiegene Luft kühlt mit zunehmender Höhe ab – wodurch in diesem Bereich starke Bewölkung entsteht – und strömt in großer Höhe polwärts. Im Bereich der Subtropen sinkt sie schließlich ab und folgt anschließend dem Luftdruckgefälle zurück in das Tiefdruckgebiet der innertropischen Konvergenzzone. Durch die Erddrehung wird dieser Luftstrom abgelenkt – die Passatwinde entstehen. Sie wehen auf der Nordhalbkugel aus Nordost und auf der Südhalbkugel aus Südost.

In Bodennähe ist das nicht so einfach, vor allem auf der Nordhalbkugel: Kontinentale Erhebungen wie die Rocky Mountains oder Grönland sorgen für zusätzliche Reibungskräfte und stören den geostrophischen Wind. Es entstehen planetare Wellen (Rossby-Wellen), die in der realen Atmosphäre instabil werden und zur Bildung von wandernden Tiefdruckgebieten führen. Das ist die Ursache dafür, dass das Wetter in den nördlichen mittleren Breiten so wechselhaft ist. Auf der Südhalbkugel, wo es in mittleren Breiten deutlich weniger Landmassen gibt, wehen die Westwinde relativ ungestört. Das schlägt sich unter anderem in deutlich höheren Windgeschwindigkeiten nieder: Je nach geografischer Breite spricht man von den Donnernden Vierzigern („Roaring Forties“), den Wilden Fünfzigern („Furious Fifties“) und den Heulenden Sechzigern („Screaming Sixties“).

Aktuelle Themen der Atmosphärenforschung umfassen die Messung essentieller Klimavariablen und ihrer Veränderung sowie den Einfluss der Erderwärmung auf die Erholung der stratosphärischen Ozonschicht. Weitere Forschungen betreffen lokale Ereignisse wie Starkwinde und den Einfluss von Vulkanausbrüchen auf Atmosphäre und Klima, sowie vielfältige Teilaspekte der Klimaveränderung und Klimamodellierung.

Justus Notholt, Ulrich Platt und Christian von Savigny

DAS ANTHROPOZÄN

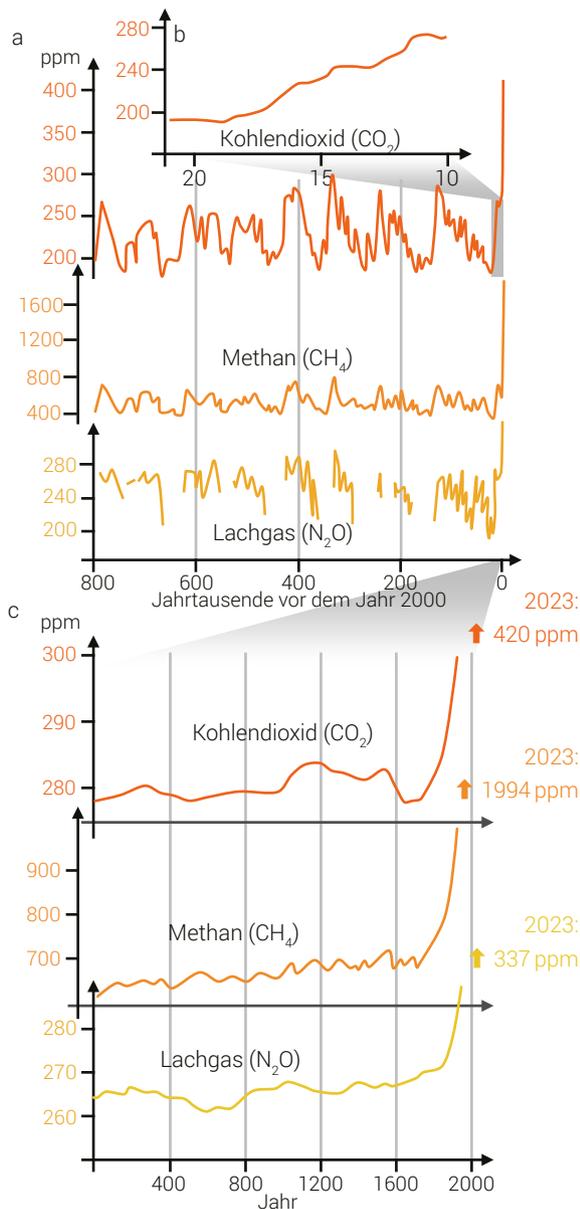
Die aktuelle Entwicklung der Erde ist gekennzeichnet von einem weltweit durchdringenden und rasch zunehmenden Einfluss menschlicher Aktivitäten auf den Planeten – vom Äquator bis zu den Polkappen und von der Landoberfläche über die Atmosphäre und Biosphäre bis hin zu den Ozeanen.

In der geologischen Epoche des Holozäns, die vor etwa 11 000 Jahren begann, lag die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre weitgehend stabil bei etwa 260–280 ppm, und auch die Temperaturen an der Erdoberfläche und die Höhe des Meeresspiegels zeigten im globalen Mittel relativ geringe Schwankungen. Unter diesen günstigen und stabilen Bedingungen entwickelte sich die menschliche Zivilisation von der Jungsteinzeit bis zur Neuzeit.

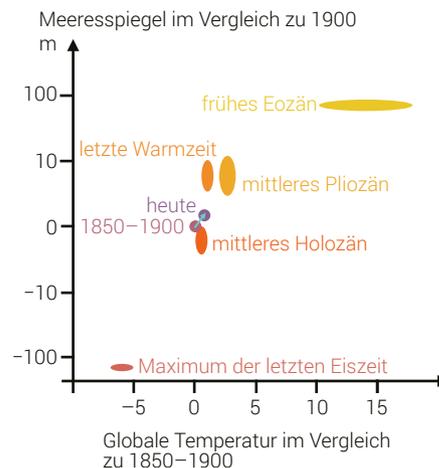
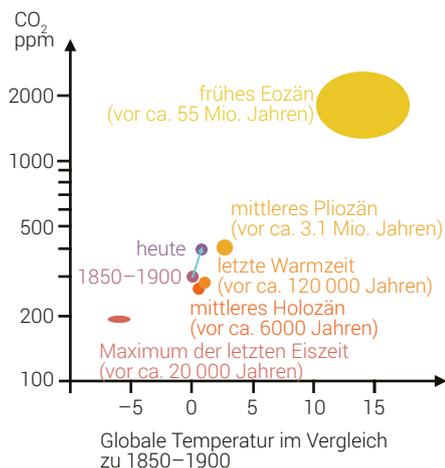
Seit der Industrialisierung im 19. Jahrhundert erfolgte jedoch eine starke Zunahme von Kohlendioxid (CO₂) und weiteren Treibhausgasen wie Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) in der Atmosphäre. Die aktuellen Treibhausgaskonzentrationen liegen nun nicht nur weit über den stabilen Werten des Holozäns, sondern auch weit außerhalb der natürlichen Schwankungsbreite der Eiszeiten und Warmzeiten des Pleistozäns über einen Zeitraum von etwa einer Million Jahren, welcher die gesamte Entwicklung des modernen Menschen (*Homo sapiens*) umfasst.

Die massiven Konzentrationsveränderungen von Treibhausgasen und anderen Spurengasen in der Atmosphäre zeigen, wie stark der Mensch in die globalen Stoffkreisläufe eingreift: in den Kohlenstoffkreislauf durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe sowie in den Stickstoffkreislauf durch die Erzeugung und Verwendung von Stickstoffdünger und die Freisetzung von Stickstoffoxiden. Die steile Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen außerhalb der natürlichen Schwankungsbreite lässt sich eindeutig auf anthropogene Emissionen zurückführen. Es gibt keine plausible alternative Erklärung dafür. Dasselbe gilt für die rapide globale Erwärmung unserer Zeit, also für die Zunahme der mittleren globalen Oberflächentemperatur um etwa 1,5°C in den knapp zwei Jahrhunderten von 1850 bis heute.

Im Jahr 2000 stellte der Atmosphärenforscher Paul Crutzen fest, dass das Erdsystem vom Holozän mit seinen stabilen Umweltbedingungen in eine neue, vom Menschen geprägte geologische Epoche übergegangen war. Er prägte den Begriff Anthropozän für dieses neue Erdzeitalter. In der Folge gab es verschiedene Vorschläge für den formalen Beginn des Anthropozäns. Neben der globalen Industrialisierung im 18./19. Jahrhundert wurde auch der Beginn des Ackerbaus in der Jungsteinzeit vorgeschlagen, welcher zwar zu regionalen Veränderungen führte, im globalen Maßstab jedoch kaum nachweisbar ist und mit dem Beginn des klimatisch sehr stabilen Holozäns zusammenfällt. Eine Gleichsetzung des Beginns von Anthropozän und Holozän wäre naturwissenschaftlich weder naheliegend noch nutzbringend, und eine



Veränderungen atmosphärischer Treibhausgaskonzentrationen in der jüngeren Erdgeschichte bestimmt durch die Analyse von Luftpfeilschlüssen in Eisbohrkernen: (a) Eiszeitzyklen der letzten 800 000 Jahre mit Zusatzfenster (b) zum Übergang von der letzten Eiszeit ins Holozän; (c) Entwicklung in 2000 Jahren aktueller Zeitrechnung mit steiler Zunahme und Übergang vom Holozän ins Anthropozän in den letzten Jahrhunderten bzw. Jahrzehnten. Atmosphärische Messdaten aus dem Jahr 2023 sind in (c) – außerhalb der Skala – an den vertikalen Pfeilen angegeben.



Charakteristische Klimaindikatoren für ausgewählte Vergleichszeiträume im Laufe der Erdgeschichte seit etwa 50 Millionen Jahren (vereinfacht nach IPCC 2021). Links: mittlere atmosphärische CO₂-Konzentration und mittlere globale Oberflächentemperatur relativ zum Vergleichszeitraum 1850–1900, rechts: globaler mittlerer Meeresspiegel relativ zum Jahr 1900. Der Übergang vom Holozän zum Anthropozän zeigt sich im steilen Anstieg der Werte binnen kurzer Zeit (ca. 200 Jahre zwischen prä-industriellen und aktuellen Bedingungen, Pfeile) verglichen mit relativ geringen Unterschieden bzw. viel längeren Zeiträumen zwischen den anderen Referenzperioden (Tausende bis Millionen Jahre).

Gleichsetzung mit dem Beginn der Industrialisierung wäre zwar anhand der Zunahme von Treibhausgaskonzentrationen in Eisbohrkernen und ähnlichen Parametern möglich, würde aber nicht den formalen Anforderungen für die offizielle Definition einer geologischen Epoche entsprechen, die in Sedimenten weltweit nachvollziehbar sein sollte.

Dementsprechend schlug die Anthropozän-Arbeitsgruppe (AWG) der Internationalen Kommission für Stratigraphie (ICS/IUGS) im Frühjahr 2024 vor, den Beginn des Anthropozäns anhand von Plutonium-Konzentrationspitzen festzulegen, die aus radioaktiven Niederschlägen von Atomwaffentests in der Mitte des 20. Jahrhunderts stammen und weltweit nachweisbar sind (siehe auch „Die Büchse der Pandora“, Seite 323). In diese Zeit der „großen Beschleunigung“ menschlicher Aktivitäten und Einflussnahme auf das Erdsystem fallen auch besonders hohe Wachstumsraten und Wendepunkte in den Wachstumskurven für die Weltbevölkerung und den weltweiten Primärenergieverbrauch.

Der Vorschlag der AWG zur Definition der geologischen Epoche enthielt als Vergleichsstandard einen sogenannten „Golden Spike“ in den Sedimentschichten eines stratigrafisch geeigneten Sees in Kanada (Crawford Lake). In einer inhaltlich und formal umstrittenen Abstimmung einer ICS-Subkommission wurde der AWG-Vorschlag vorerst abgelehnt. Führende AWG-Mitglieder, Geolog:innen und Erdsystemforscher:innen arbeiten jedoch weiter daran, die genannte oder eine ähnliche geologische Definition für den Beginn des Anthropozäns zu etablieren.

Ob nun geologisch definiert oder nicht – der Anthropozän-Begriff hilft kognitiv und emotional zu erkennen und zu kommunizieren: Wir sind in der Lage und haben bereits damit begonnen, den Planeten und unsere Umwelt tiefgreifend zu verändern. Also sollten wir versuchen, dabei in die richtige Richtung zu gehen und die Grundlagen unserer Zivilisation nicht zu gefährden.

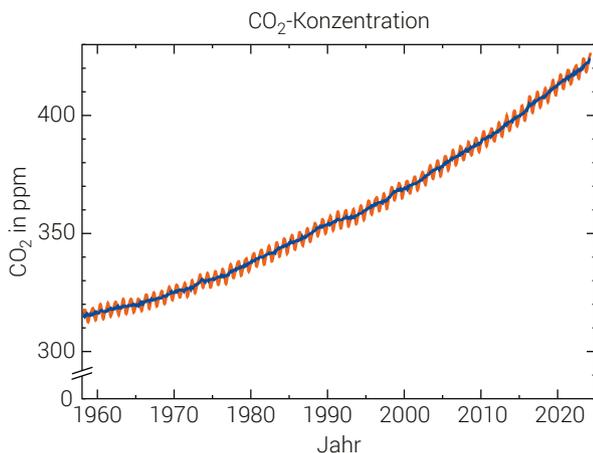
Ulrich Pöschl

Globale Klimaentwicklung

Die Erdoberfläche hat sich schon um fast 1,5 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit erwärmt. 2024 war das bis zur Veröffentlichung dieses Buchs heißeste Jahr seit Beginn der flächendeckenden Messungen. Es dürfte sehr bald von noch heißeren Jahren abgelöst werden. Die verbindlichen Ziele des Pariser Klimaabkommens sind kaum noch zu erreichen.

Schon vor über einem halben Jahrhundert hatte der Geochemiker Roger Revelle zusammen mit seinem Kollegen Hans Suess die ungeheure Dimension der menschlichen Klimabeeinflussung beschrieben, indem er von einem „großangelegten geophysikalischen Experiment“ gesprochen hatte, das die Menschen anstellten. Er bezog sich dabei auf die **menschengemachten Einträge von Kohlendioxid (CO₂)** in die Atmosphäre. Dieses Treibhausgas reichert sich in der Luft an, wie die beiden Autoren vorhergesehen hatten, und seine Konzentration in der Atmosphäre ist heute so hoch wie seit Jahrmillionen nicht. Auch der Gehalt weiterer **langlebiger Treibhausgase wie Methan und Lachgas** ist stark angestiegen. Dass Treibhausgase die Erdoberfläche erwärmen, ist seit weit über 100 Jahren bekannt. Den größten Anteil an der globalen Erwärmung hat das CO₂. Es verweilt – einmal freigesetzt – über Jahrhunderte und länger in der Atmosphäre, weswegen es sich um den Erdball verteilen kann. Daher ist der Ort der Emissionen global gesehen irrelevant. So gibt es in den Polarregionen zwar so gut wie keine anthropogenen CO₂-Emissionen, trotzdem schmelzen dort die Eismassen.

Die Datenlage



Der atmosphärische CO₂-Gehalt seit 1958 an der Messstation Mauna Loa (Hawaii).

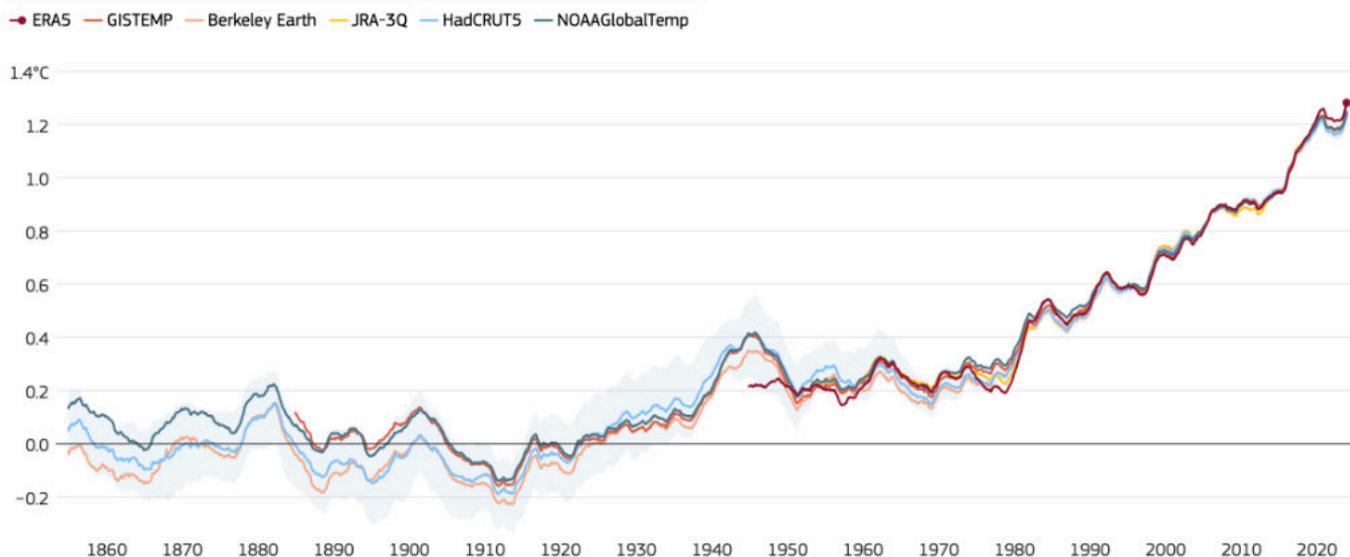
Der atmosphärische CO₂-Gehalt erreicht Jahr für Jahr neue Höchstwerte. Selbst während der Coronapandemie 2020 stieg er weiter an, obwohl die weltweiten Emissionen um etwa sieben Prozent gesunken waren, der stärkste Rückgang seit Ende des Zweiten Weltkriegs. Parallel zum CO₂-Anstieg hat sich die Erdoberfläche erwärmt – seit Beginn der Industrialisierung um deutlich mehr als ein Grad Celsius im globalen Durchschnitt.

Die **beobachtete rasante Erwärmung** ist seit Jahrtausenden beispiellos und lässt sich ohne den Einfluss der menschengemachten Treibhausgase nicht erklären. „Der menschliche Einfluss auf das Klima ist klar“: So lautet der Kernsatz aus dem vorletzten (fünften), 2014 veröffentlichten Synthesebericht des Weltklimarats IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Der globale Temperaturanstieg an der Erdoberfläche zwischen einer Eiszeit und einer Warmzeit (wie dem Holozän seit 11 700 Jahren) betrug während der letzten Jahrhunderttausende ungefähr 4 °C. Im Moment ist die Welt auf einem Kurs zu ungefähr weiteren 3 °C Erwärmung. Menschen haben eine Erwärmung in diesem Ausmaß und dieser Geschwindigkeit noch nicht erlebt.

Auf der 21. Weltklimakonferenz 2015 in Paris hatten sich die Länder darauf verständigt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit (1850–1900) zu begrenzen, besser auf 1,5 °C. Man hofft, dass sich dann das Überschreiten von Kipppunkten vermeiden lässt. Solche sind beispielsweise das unwiderrufliche Abschmelzen des grönländischen Eisschildes mit einem Meeresspiegelanstieg von global sieben Metern, drastische Veränderungen in den atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationssystemen oder auch tiefgreifende Umstellungen von Ökosystemen. Wann solche Kipppunkte erreicht werden, ist allerdings großen Unsicherheiten unterworfen: Wir wissen nicht, wie viel Erwärmung das Klimasystem verträgt. Aus diesem Grund ist immer die geringste noch mögliche Erwärmung anzustreben. Sollten die weltweiten CO₂-Emissionen auf dem heutigen Niveau verharren, wäre die 1,5-Grad-Marke schon in wenigen Jahren gerissen (oder ist es vielleicht schon mit Erscheinen dieser Publikation), die 2-Grad-Marke gegen Mitte des Jahrhunderts. 2023 betrug die durchschnittliche Erwärmung an der Erdoberfläche bereits 1,48 °C. Die Welt wird die Pariser Klimaziele verfehlen, falls sie es nicht schaffen sollte, die Treibhausgasemissionen in den kommenden Jahren in einem erheblichen Umfang zu senken.

Die Auswirkungen der globalen Erwärmung

Die globale Erwärmung hat bereits vielfältige Auswirkungen. So werden Wetterextreme wie **Hitzewellen, Dürren oder Starkniederschläge** weltweit häufiger und intensiver. Die Gebirgsgletscher ziehen sich in allen Regionen mit zunehmender Geschwindigkeit zurück. In der Arktis schwindet das Meereis mit einer atemberaubenden Geschwindigkeit: Die Eisausdehnung im September, dem Monat des arktischen Meereisminimums, zeigte zwischen 1979 und 2023 einen Rückgang von rund 12 Prozent pro Jahrzehnt. Die **Fläche des**



The light blue shaded area shows the min-max range for the HadCRUT5 values.

Data: ERA5 (C3S/ECMWF), JRA-3Q (JMA), GISTEMPv4 (NASA), HadCRUT5 (Met Office Hadley Centre), NOAA GlobalTempv6 (NOAA) and Berkeley Earth - Credit: C3S/ECMWF



Die global gemittelte Temperatur (°C) an der Erdoberfläche als Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 1850–1900, der die vorindustrielle Zeit repräsentiert.

Meereises in der Antarktis erreichte im September 2023 ein Rekordtief.

Zudem verlieren die **Eisschilde** in der Arktis und Antarktis an Masse, wobei der Eismassenverlust auf Grönland derzeit ungefähr doppelt so groß ist wie in der Antarktis. Eine Schlüsselrolle für den Eismassenverlust spielt die Erwärmung der Ozeane: Der **Anstieg der Meerestemperaturen** führt dazu, dass die schwimmenden Gletscherausläufer, die Schelfeise, abschmelzen. Die Schelfeise sind wichtig für die Regulierung der Eismenge, die in den Ozean abgegeben wird, da sie wie riesige gefrorene Staudämme wirken. Schmelzen diese Barrieren dahin, rutschen die dahinter liegenden Eismassen zügig ins Meer.

Die **Meeresspiegel steigen** infolge der Schmelze des kontinentalen Eises, aber auch aufgrund der Erwärmung der Ozeane, durch die sich das Meerwasser ausdehnt. Da dies aufgrund der Trägheit des Klimasystems zeitverzögert erfolgt, ist zu erwarten, dass sich der Meeresspiegelanstieg in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten erheblich beschleunigen wird. Der Anstieg hat sich seit Beginn der Satellitenmessungen 1993 schon mehr als verdoppelt und betrug während der zurückliegenden Dekade ungefähr 4,7 Millimeter pro Jahr.

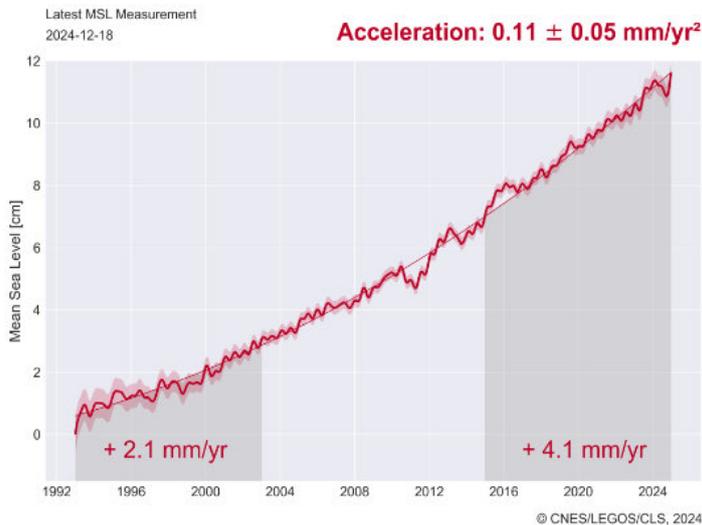
Die Meere haben bisher mehr als 90 Prozent der Wärme aufgenommen, die durch den Anstieg der atmosphärischen Treibhausgase im Klimasystem verblieben ist. Außerdem haben die Ozeane zwischen 30 und 40 Prozent des durch die Menschen emittierten CO₂ aufgenommen. Es droht eine übermäßige **Versauerung** der Weltmeere, weil sich das Meerwasser mit dem CO₂ zu Kohlensäure verbindet. Seit Beginn der Industrialisierung ist der pH-Wert des Meerwassers im Schnitt um 0,1 Einheiten zurückgegangen. Sowohl die Meeres-

erwärmung als auch die Meeresversauerung könnten un-absehbare Folgen für die Meeresökosysteme haben. So ist es in den vergangenen Jahren in den Tropen gehäuft zur der Korallenbleiche gekommen. Es steht zu befürchten, dass bei einer globalen Erwärmung von 2°C die allermeisten tropischen Korallen sterben würden, was verheerende Folgen für die marine Artenvielfalt hätte.

Wohin steuert die Welt?

Einen Mangel an Wissen über die Ursachen des Klimawandels und seine möglichen Folgen gibt es in keiner Weise. Dazu hat insbesondere der 1988 von der Staatengemeinschaft ins Leben gerufene Weltklimarat IPCC beigetragen. Der Erdgipfel der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro im Jahr 1992 sollte der Aufbruch in eine nachhaltige Entwicklung der Welt sein, wie er schon zwanzig Jahre zuvor auf der ersten Weltumweltkonferenz in Stockholm gefordert worden war. Die Kehrtwende in eine Zukunft ohne den Raubbau an der Natur war gewissermaßen eine Antwort auf den Bericht „Die Grenzen des Wachstums“ des Club of Rome aus dem Jahr 1972. In der Klimarahmenkonvention von Rio de Janeiro hatte sich die Weltgemeinschaft darauf geeinigt „... die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird.“

Zwanzig Jahre später auf der Nachfolgekonzferenz Rio+20 im Jahr 2012 war die Ernüchterung groß, denn es passierte genau das Gegenteil von dem, was hätte passieren müssen. So sind seit Beginn der 1990er-Jahre die weltweiten Treibhausgasemissionen förmlich explodiert. Der weltweite CO₂-Ausstoß ist um etwa 60 Prozent angestiegen und erreicht Jahr für Jahr einen historischen Höchststand. Physikalisch wäre es noch möglich, die globale Erwärmung auf unter 2°C zu be-



Global gemittelter Meeresspiegel (mm) seit Beginn der Satellitenmessungen. Die Geschwindigkeit des Anstiegs nimmt zu.

grenzen. Zehntausende Politiker:innen, Wissenschaftler:innen, Wirtschaftsvertreter:innen und Mitglieder der Zivilgesellschaft eilen jedes Jahr zu den Weltklimakonferenzen. Auf der 28. Weltklimakonferenz in Dubai im Jahr 2023 konnte man sich aber erneut nur auf unverbindliche Absichtserklärungen verständigen. Doch mit Naturgesetzen kann man nicht verhandeln und auch keine Kompromisse schließen: Mehr Treibhausgase in der Luft führen zwangsläufig zu höheren Temperaturen an der Erdoberfläche.

Wir leben in einer Zeit beschleunigter technologischer und gesellschaftlicher Entwicklung sowie einer zunehmenden globalen Vernetzung in Wirtschaft, Kommunikation, Politik und Kultur. Einfache Ursache-Wirkungs-Prinzipien gelten nicht mehr: Ein als harmlos eingeschätztes Ereignis kann selbst über große Entfernungen oder nach einer langen Zeit ungeahnte Schäden entfalten, die die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems gefährden. Ein Beispiel dafür ist das Ozonloch über der Antarktis, das Anfang der 1980er-Jahre entdeckt worden war (siehe auch „Der Kampf gegen das Ozonloch – eine Erfolgsgeschichte“ auf Seite 275). Keine Forschung hatte es vorhergesagt, obwohl die ozonzerstörerische Wirkung der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) schon lange bekannt gewesen war. Ein weiteres Beispiel aus der jüngeren Vergangenheit ist die letzte große Finanzkrise 2008, die – ausgelöst durch die Immobilienblase in den USA – zu einer weltweiten Rezession geführt hatte. Und auch die Coronapandemie hatte harmlos begonnen, und ihre Auswirkungen wurden lange unterschätzt. Genauso wenig kann die Wissenschaft die Folgen einer ungebremsten globalen Erwärmung in allen Details berechnen. Denn solche systemischen Risiken sind durch ein hohes Maß an Komplexität, Ungewissheit und Mehrdeutigkeit gekennzeichnet. Im Umgang damit kommt dem Vorsorgeprinzip eine große Bedeutung zu. Die-

ses Prinzip in praktische Maßnahmen umzusetzen, wäre die Aufgabe der Politik, an der sie bisher gescheitert ist.

Lösungen und Scheinlösungen

Wenn wir ein Problem mit dem CO₂ haben – und darüber besteht in der Wissenschaft kein Zweifel –, sollten wir es nicht in die Atmosphäre emittieren. Wir sollten uns nicht dazu verleiten lassen, unsichere Pfade zu beschreiten. So ist Atomkraft keine nachhaltige Energieversorgung, und das Festhalten an ihr bremsst die Innovation. Auch technische Lösungen zur Bewältigung des Klimaproblems („Climate Engineering“, Seite 271) scheinen vordergründig attraktiv zu sein, würden sie doch ein „Weiter so“ erlauben. Die vorgeschlagenen Techniken – etwa das Einbringen von Schwefelsubstanzen in die Atmosphäre zur Kühlung des Planeten – sind jedoch nicht nur teuer, sondern bergen auch enorme ökologische Risiken. Sie müssten über Jahrhunderte, vielleicht sogar Jahrtausende, fortgesetzt werden. Denn weil die Treibhausgase immer noch vorhanden wären, würde sich die Erde bei dem Stopp der Maßnahme erneut erwärmen. Auch die Abscheidung und Speicherung von CO₂ („Carbon Capture and Storage“, CCS) birgt ökologische Risiken, die nicht hinreichend erforscht sind, und ließe den Wirkungsgrad der Kraftwerke sinken. Außerdem ist völlig unklar, ob man mit der Methode ausreichend große Mengen CO₂ speichern könnte, um die globale Erwärmung nennenswert zu begrenzen.

Wir müssen die weltweiten Energiesysteme umbauen: Sonnen- und Windenergie sowie Erdwärme stehen der Menschheit praktisch unbegrenzt zur Verfügung. Dieser Weg ist nicht nur der vernünftigste, sondern auch der sicherste. Die Techniken zur Nutzung der erneuerbaren Energien funktionieren problemlos, sind kostengünstig und können systematisch weiterentwickelt werden. Die volkswirtschaftlichen Kosten sind eher gering, wenn man einen Zeithorizont von einigen Jahrzehnten betrachtet. (Siehe dazu auch „Die große Transformation“ auf Seite 265)

Das Klimaproblem kann nur von der Staatengemeinschaft gemeinsam gelöst werden. National ist das Klima nicht zu schützen. Internationale Zusammenarbeit ist allerdings auf dem Rückzug, was eine denkbar schlechte Voraussetzung für die Begrenzung des Klimawandels ist. Die Zeit läuft uns davon, es besteht ein dringender Handlungsbedarf. Noch ist es aber nicht zu spät, um eine Klimakatastrophe zu verhindern.

Mojib Latif

KIPPDYNAMIKEN IM ERDSYSTEM

Verändern sich komplex miteinander verknüpfte physikalische Systeme, dann ist ihr Verhalten in der Regel nichtlinear. Kleine Schritte können dann eine dramatische Veränderung des Gesamtsystems bewirken – ein Kippen. Auch das Klimasystem der Erde besitzt solche Kippunkte.

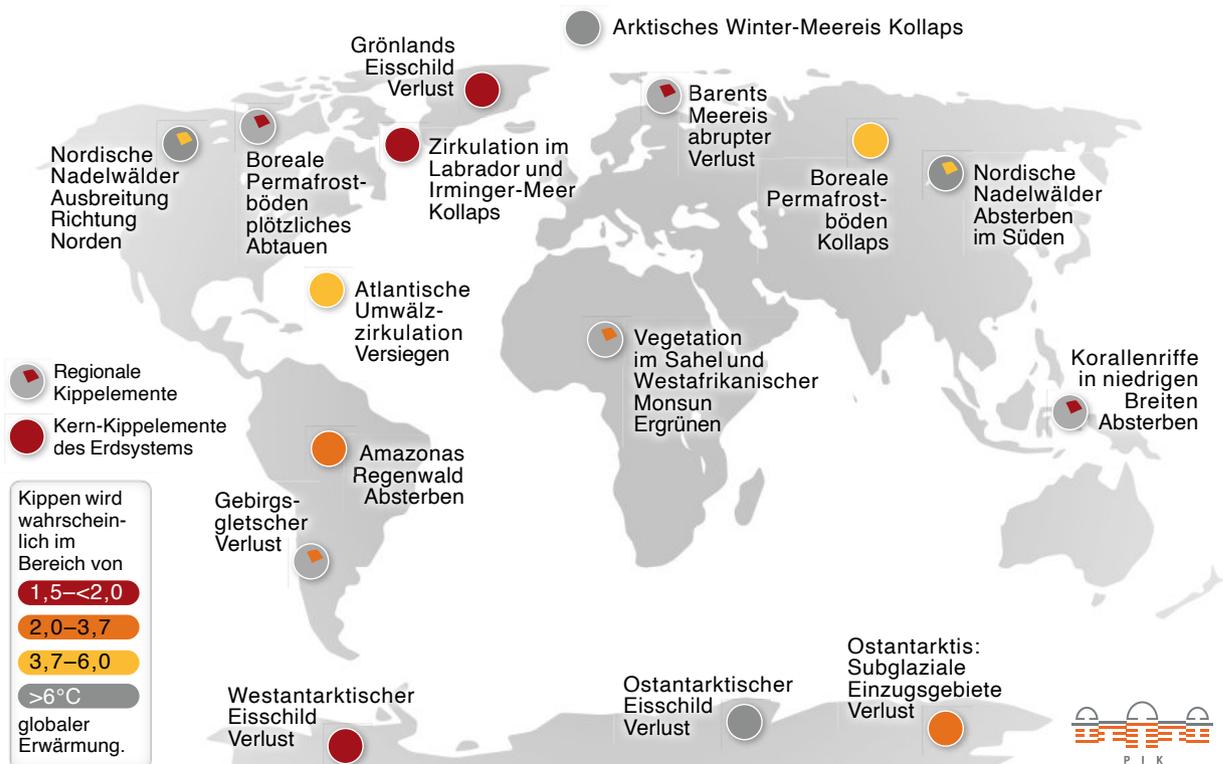
Wie ein „gefährlicher Klimawandel“ zu definieren wäre und welche Temperaturleitplanke am ehesten weitreichende Klimafolgen verhindern könnte, wird seit Mitte der 1990er-Jahre intensiv und mit zunehmender Dringlichkeit diskutiert. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU) zeigte in diesem Zusammenhang, dass es notwendig ist, die menschengemachte Erderwärmung auf 2 °C zu begrenzen. Diesen Vorschlag setzte das Pariser Klimaabkommen von 2015 völkerrechtlich um. Zunächst wurde die 2-Grad-Leitplanke hauptsächlich anhand der Klimavergangenheit der Erde begründet. Im Zusammenhang mit dem 3. Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC) entstand eine wesentlich tiefergehende wissenschaftliche Basis, die sich aus der Physik komplexer Systeme mit nichtlinearem Verhalten untermauern ließ. Damals wurde das Konzept der „großskaligen Diskontinuitäten“ im Klimasystem der Erde eingeführt. Gemeint waren disruptive und möglicherweise irreversible Veränderungen wesentlicher Komponenten

der globalen Umwelt, die beim Überschreiten kritischer Parameterwerte durch menschliche Störungen ausgelöst werden dürften. Heute werden solche Veränderungen oft als Kippdynamiken bezeichnet. Eine geordnete Anpassung der Wirtschafts- und Sozialsysteme an solche disruptiven und oft abrupten oder irreversiblen Klimaveränderungen wäre nur mit großen Anstrengungen und hohen Kosten möglich. Möglicherweise könnten solche katastrophalen Veränderungen sogar globale Sicherheitsrisiken zur Folge haben.

Wenn das Klima kippt

Kippdynamiken können bei mehreren großskaligen Bestandteilen des Erdsystems auftreten. Sie haben gemeinsam, dass sie bei zunehmender globaler Erwärmung oder zunehmenden anderen menschlichen Einflüssen (z. B. Entwaldung) zunächst im Wesentlichen stabil bleiben. Ab einem bestimmten Schwellenwert, dem Kippunkt, können sie allerdings bereits durch kleine zusätzliche Störungen in einen qualitativ neuen Zustand versetzt werden, den sie nicht ohne Weiteres wieder verlassen können: Sie „kippen“. Das ist wie bei einer wertvollen Vase, die zunächst stehen bleibt, wenn die Tischplatte im-

Seit 2005 eine Ikone der Klimafolgenforschung: Globale Karte der Kippelemente im Klimasystem.



WICHTIGE FORSCHUNGSFRAGEN

FÜR DIE KLIMAPHYSIK ALS TEIL DER INTEGRIERTEN ERDSYSTEMWISSENSCHAFT

Welche kritischen Schwellwerte oder Kippunkte können für zentrale Teile des Klimasystems identifiziert werden? Mit welchen Folgen für menschliche Gesellschaften und die Gesamtstabilität des Erdsystems wäre eine Überschreitung solcher Schwellwerte verbunden?

Wie stabil sind die Kippelemente hinsichtlich einer zunehmend realistisch erscheinenden, vorübergehenden Überschreitung der Pariser Klimaleitplanken (Overshoot-Szenarien der globalen Erwärmung)?

Können Kippereignisse durch besonders rasch voranschreitende globale Erwärmung und andere schnell veränderliche menschliche Störungen, wie z. B. die Entwaldung im Amazonasgebiet, ausgelöst werden (sog. raten-induzierte Kippdynamik)?

Was ist das Risiko der Entstehung von Kippkaskaden durch dominoartige Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Komponenten des Erdsystems?

mer schiefer gestellt wird. Erst passiert nichts – dann reicht die kleinste Erschütterung und sie kippt. Im Erdsystem können solche Kippereignisse in verschiedenen Teilsystemen auftreten. Zu diesen Kippelementen von planetarer Bedeutung gehören unter anderem die polaren Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis, der Amazonasregenwald, boreale, also in höheren Breiten vorzufindende, Nadelwälder und die von Salz- und Temperaturunterschieden getriebene Umwälzbewegung im Atlantik.

Mit fortschreitender globaler Erwärmung nimmt das Risiko, Kippunkte zu überschreiten, immer weiter zu. Daraus – eingedenk der Auswirkungen für das Mensch-Erde-System – resultieren entscheidende rote Linien für die internationale Klimapolitik – insbesondere die 2 °C-Grenze, die in der hohen Nichtlinearität des Klimasystems wissenschaftlich begründet ist. Auf diese Art kann die Forschung helfen, den immensen und unübersichtlichen Folgenraum der anthropogenen Umweltstörungen zu strukturieren, um damit das gesellschaftlich Gefährliche vom einigermaßen Beherrschbaren zu unterscheiden. Durch die sehr anschauliche Begrifflichkeit, die sich insbesondere an dem populären Buch „The Tipping Point“ des kanadischen Journalisten Malcom Gladwell aus dem Jahr 2000 orientierte, gelang es zudem, den klimawissenschaftlichen Diskurs in die breite Öffentlichkeit zu tragen. Die deutschen Termini Kippunkt, Kippelement und Kippereignis sind dadurch inzwischen in den allgemeinen Wortschatz eingegangen.

Bereits 2009 veröffentlichte die wissenschaftliche Zeitschrift Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) eine umfangreiche Sonderausgabe zur Thematik, welche versuchte, das zugehörige Forschungsfeld systematisch zu ordnen. Schon damals wurde die Problematik der großskaligen zerstörerischen Folgewirkungen der Erderwärmung auf Wirtschaftssysteme und Gesellschaften im Sinne einer negativen Kippdynamik angesprochen. Allerdings gab es damals kaum belastbare Studien. Seit einigen Jahren entwickelt sich zudem ein neues

Forschungsgebiet, das insbesondere sogenannte positive Kippunkte in sozio-ökonomischen Systemen untersucht, durch die eine rasche Dekarbonisierung zur Stabilisierung des Klimasystems eingeleitet werden könnte.

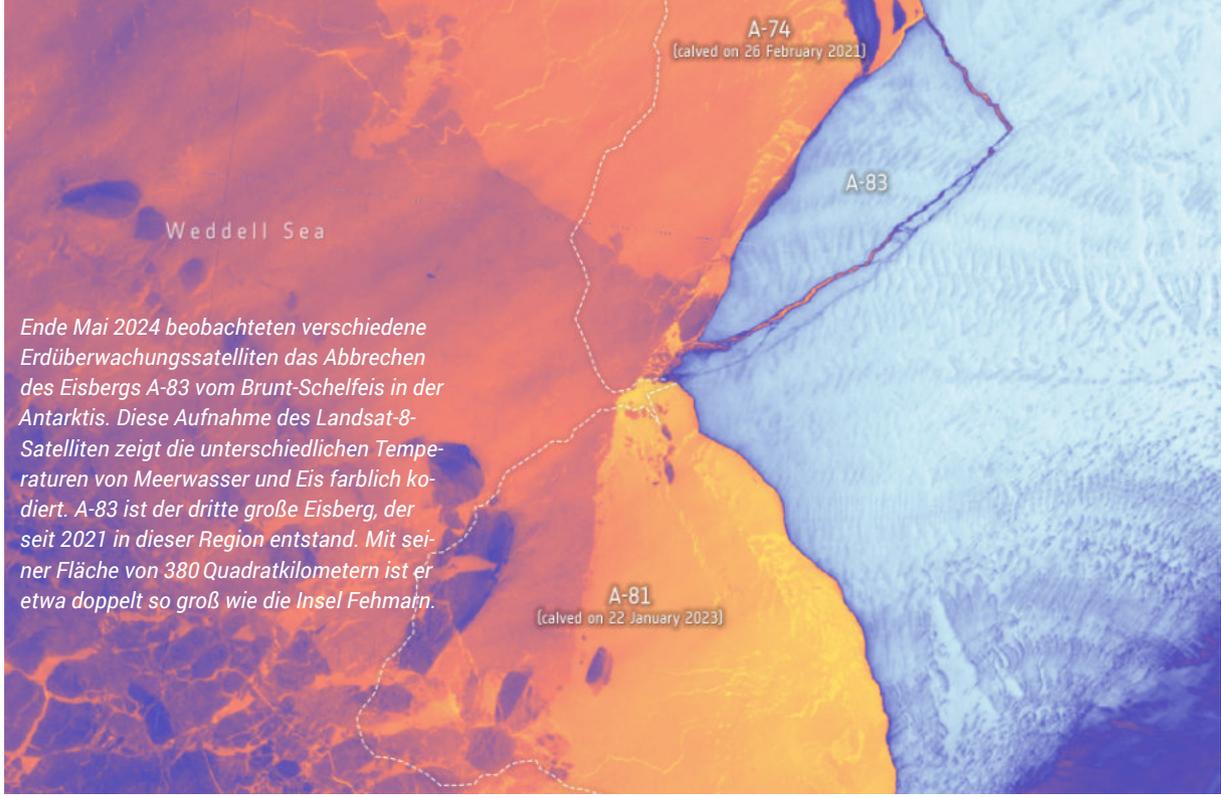
Metapher versus Mathematik

Auch wenn die Grundmetapher der Klimakippunkte und -dynamiken einfach ist, stehen dahinter höchst komplexe physikalische und systemdynamische Zusammenhänge: Allgemein geht es darum, Systeme und Prozesse zu erforschen, die kritisches Verhalten zeigen. Das bedeutet, dass sie an einem bestimmten Punkt auf kleine Veränderungen hochgradig nichtlinear reagieren, also die Steigerung etwa der Temperatur um nur ein Prozent eine Auswirkung von weit mehr als einem Prozent hat. Darüber gibt es auf dem weiten Feld der dynamischen Systeme, wozu auch die Physik der Phasenübergänge gehört, zahlreiche wichtige Befunde. Beispielsweise kann ein System, das vorher einem bestimmten Wert zustrebte, nach einer geringen Änderung der Ausgangsparameter plötzlich zwischen zwei Werten hin- und herspringen. Solche Verzweigungen oder Bifurkationen lassen sich mathematisch untersuchen und beschreiben.

In kaum einem anderen System haben Kippdynamiken jedoch so weitreichende Folgen wie im Erdsystem, denn letztlich geht es um die Lebensgrundlagen der Menschheit. Daher ist es nicht verwunderlich, dass in den vergangenen Jahren die Forschung und die Publikationen zu Kippdynamiken rasant zugenommen und inzwischen auch einen festen Platz im öffentlichen Diskurs gefunden haben. Mit dem raschen Heranrücken der globalen Oberflächenmitteltemperatur an die 2 °C-Linie in den vergangenen Jahren ist die Sorge um das Überschreiten von Kippunkten erheblich gewachsen.

Aktueller Sachstand

Zahlreiche Befunde lassen annehmen, dass verschiedenartige Kippereignisse in der fernen Vergangenheit des Erdsys-



Ende Mai 2024 beobachteten verschiedene Erdüberwachungssatelliten das Abbrechen des Eisbergs A-83 vom Brunt-Schelfeis in der Antarktis. Diese Aufnahme des Landsat-8-Satelliten zeigt die unterschiedlichen Temperaturen von Meerwasser und Eis farblich kodiert. A-83 ist der dritte große Eisberg, der seit 2021 in dieser Region entstand. Mit seiner Fläche von 380 Quadratkilometern ist er etwa doppelt so groß wie die Insel Fehmarn.

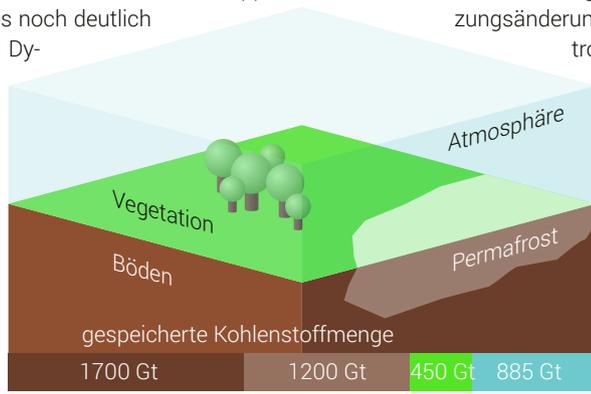
tems tatsächlich mehrfach aufgetreten sind. Heute sind zentrale Kippelemente im Erdsystem von menschlichen Aktivitäten betroffen. Begrenzte Hinweise deuten sogar darauf hin, dass sich Teile von ihnen bereits einer kritischen Schwelle nähern könnten – allerdings sind diese mit großen Unsicherheiten behaftet. Im Folgenden beschreiben wir den aktuellen Sachstand und wichtige offene Forschungsfragen für einige für die Menschheit besonders kritische Kippelemente.

Grönland und die Antarktis könnten, wenn sie komplett abschmelzen, den Meeresspiegel massiv ansteigen lassen. Sie speichern derzeit so viel Eis, das ein vollständiges Abschmelzen den globalen Meeresspiegel um sieben Meter (Grönland) bzw. 58 Meter (Antarktis) anheben würde. Der beobachtete Massenverlust der polaren Eisschilde liegt derzeit am oberen Ende der langjährigen Vorhersagen. Dies ist auf das verstärkte Abbrechen und Schmelzen an der Oberfläche in Grönland und ein stärkeres Schmelzen an der Unterseite der Schelfeise in der Antarktis zurückzuführen. Bei fortschreitender Erwärmung wird sich der Beitrag der Eisschilde zum globalen Meeresspiegelanstieg weiter beschleunigen. Jüngsten Schätzungen zufolge könnte er bis zum Ende dieses Jahrhunderts bis zu einem Meter betragen. Aufgrund der langen Reaktionszeiten der Eisschilde ist jedoch klar, dass der größte Teil des Eises nach 2100 verloren gehen wird. Bestimmte Rückkopplungsmechanismen können dies noch deutlich verschärfen und zu komplexen Dynamiken, unter anderem zu Kippdynamiken, führen.

Die **atlantische meridionale Umwälzzirkulation** (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) ist durch eine nordwärts gerichtete Strömung von warmem, salzhaltigem Wasser in den oberen Schichten des Atlantiks und

eine südwärts gerichtete Strömung von kälterem, tieferem Wasser gekennzeichnet. Als eines der wichtigsten Ozeanzirkulationssysteme der Erde beeinflusst sie auch das Klima. Sie hat in der Erdgeschichte mehrere bedeutende Umstrukturierungen durchlaufen, wobei die Zirkulation mal stärker war und mal ganz zum Erliegen kam. Rückkopplungen spielen auch hier eine wichtige Rolle. So kommt mit der warmen, nordwärts gerichteten Strömung Salz in hohe Breiten. Salz erhöht die Dichte des sich abkühlenden Wassers, sodass dies absinkt und als Tiefenwasser zurück Richtung Süden strömt. Bei einer beginnenden Abschwächung der Zirkulation wird weniger Salz nach Norden transportiert, wodurch weniger Tiefenwasser gebildet wird, was die Zirkulation weiter schwächt. Auch das Abschmelzen des Meereises, Änderungen des Wärmeflusses an der Oberfläche oder Änderungen der Konvektion in der Labrador- und Irminger See beeinflussen die AMOC. Aufgrund begrenzter direkter Beobachtungen der AMOC-Stärke (siehe Seite 111) sind die aktuellen Trends unsicher, aber es gibt einige Anzeichen für eine anhaltende Abschwächung.

In **tropischen und borealen Wäldern** ist Kohlenstoff in lebender und sich zersetzender Biomasse sowie im Boden gespeichert. Sie spielen deshalb eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Aufgrund von Klima- und Landnutzungsänderungen sind Teile der borealen und tropischen Wälder bereits mit Kohlenstoff gesättigt. Beobachtungen deuten zum Beispiel darauf hin, dass das südöstliche Amazonasgebiet in jüngerer Zeit keinen Kohlenstoff



In den vergangenen Jahrzehnten hat die globale Landfläche rund 29 Prozent der menschlichen Kohlendioxidemissionen gebunden.

mehr aufgenommen, sondern sogar welchen abgegeben hat. Der prognostizierte Rückgang der Niederschläge und eine Verlängerung der Trockenzeit könnten sogar ein Absterben des Amazonas-Regenwaldes einleiten. Ebenfalls bedroht durch Klima- und Landnutzungsänderungen ist das kaum erforschte riesige tropische Torfgebiet im Kongobecken – was massive zusätzliche CO₂-Emissionen nach sich zöge.

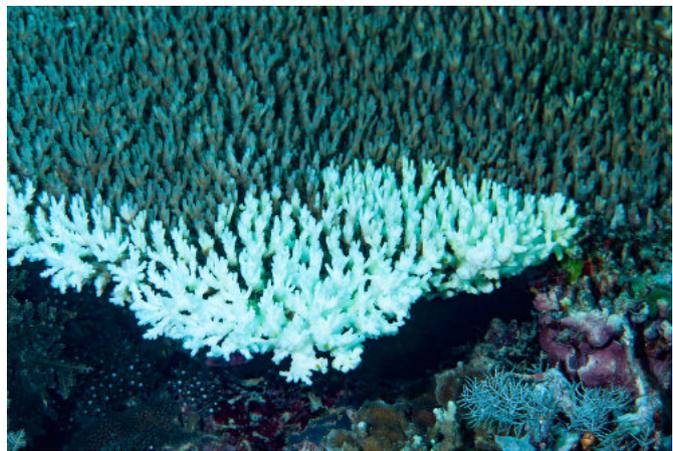
Ausblick

Trotz der enormen Bedeutung dieser Phänomene für die Zukunft unseres Planeten und seiner Bewohner:innen bleiben erhebliche Unsicherheiten in unserem Verständnis der Kippdynamiken. Kippelemente im Klimasystem sind durch unterschiedliche und miteinander wechselwirkende Dynamiken und Zeitskalen gekennzeichnet, was ihre Erforschung besonders komplex macht. Die Physik spielt dabei eine Schlüsselrolle, insbesondere die Bereiche der Klimaphysik, der nichtlinearen Dynamik und der statistischen Physik. Diese Disziplinen liefern die Werkzeuge, um die Mechanismen zu verstehen, die diesen kritischen Phänomenen zugrunde liegen, und mögliche Zukunftsszenarien und -projektionen zu liefern.

Bereits in wenigen Jahren bis Jahrzehnten könnten die Pariser Klimaleitplanken von 1,5 bis 2,0 °C (Erwärmung der globalen Mitteltemperatur im Vergleich zum vorindustriellen Klima) überschritten werden. Außerdem ist die aktuelle, menschengemachte globale Erwärmung schneller als die historisch und erdgeschichtlich dokumentierten Klimaveränderungen der Vergangenheit. Die aktuelle Erwärmung erfolgt bis zu hundertmal schneller als die am Ende der letzten Eiszeit. Ein besonders dringender Forschungsbedarf besteht also hinsichtlich der Fragen, wie lange dieser kritische Eingriff in das Erdsystem anhalten oder wie schnell sich Störungen entfalten können, bevor das Klimasystem nachhaltig destabilisiert wird oder einige solcher Destabilisierungen bereits unabwendbar auf den Weg gebracht sind.

Ebenso wichtig ist das bessere Verständnis der Reaktion der Klimakippelemente auf vorübergehende Überschreitungen von kritischen Schwellenwerten, sogenannte **Overshoot-Szenarien**. Erste Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass bei kurzen und niedrigen Überschreitungen von Kippunkten eine langfristige, irreversible Destabilisierung der betroffenen Klimasysteme vermieden werden kann. Länger anhaltende und ausgeprägtere Überschreitungen, wie sie auf Grundlage der aktuellen Klimapolitik zu erwarten sind, würden allerdings mit größerer Wahrscheinlichkeit riskante Kippdynamiken auslösen.

Bei sogenannten Kippkaskaden können Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Komponenten des Erdsystems auftreten, wie z. B. zwischen dem Grönländischen Eisschild und der atlantischen Umwälzzirkulation: Einerseits gelangt durch das Abschmelzen des Eises mehr Süßwasser in den Nordatlantik, was die Zirkulation abschwächen könnte. Andererseits könnte sich Grönland durch eine Verlangsamung der AMOC abkühlen. Studien mit konzeptionellen Modellen zeigen, dass das Risiko von Kippkaskaden für eine globale Erwärmung im



Wenn das Wasser zu warm wird, bleichen Korallen aus und sterben ab. Dieser Prozess ist ab einer bestimmten Wassertemperatur nicht mehr reversibel und damit ein ganz offensichtlicher Kippunkt: Oberhalb einer Temperaturerhöhung von noch nicht einmal 2 °C verändert sich das Ökosystem der Korallenriffe schnell und dauerhaft.

Bereich zwischen 1 und 2 °C besonders stark zunimmt. Allerdings sind diese dominoartigen Wechselwirkungen mit großen Unsicherheiten behaftet und einige zentrale Interaktionen noch wenig erforscht. Aktuelle Modell-Vergleichsstudien beziehen die neuesten Beobachtungen potenzieller Klimakippelemente ein, um die möglichen Risiken abschätzen zu können.

Die Forschung zu Kippunkten vereint die Physik komplexer Systeme und die Umweltsystemanalyse, die durch Klima- und Umweltphysik sowie verwandte Disziplinen wie Ökologie und Ökonomie vorangetrieben wird. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit hin zu einer integrierten Erdsystemwissenschaft ist daher entscheidend für ein umfassendes Verständnis von Kippelementen und ihren möglichen Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft. Diese Forschung muss in der Zukunft politikrelevante Beiträge dazu leisten, wie katastrophale Auswirkungen von Kippereignissen vermieden werden können, etwa indem sie die Eigenschaften sogenannter „sicherer“ Overshoot-Szenarien der globalen Erwärmung herausarbeitet. Weiterhin gilt es, eine umfassende Analyse der Dynamik wechselwirkender Klimakippelemente in einen neuen Politikrahmen der planetaren Gemeinschaftsgüter einzubinden. Durch internationale Kooperation lassen sich so gesellschaftliche Risiken begrenzen und kritische Lebenserhaltungsfunktionen unseres Planeten Erde schützen.

*Jonathan F. Donges, Hans Joachim Schellnhuber
und Ricarda Winkelmann*



DIE ARKTISCHE VERSTÄRKUNG

Die Region rund um den Nordpol – die Arktis – ist geprägt durch Kälte, Eis und Schnee. Erstaunlicherweise stellt ausgerechnet sie einen der Hot Spots des globalen Klimawandels dar. Warum das so ist, dafür gibt es zwar bereits schlüssige Erklärungen – viele Details liegen aber noch im Dunkeln.

Die Arktis hat sich in den vergangenen 30 Jahren erheblich schneller erwärmt als unser Planet als Ganzes. Durch diesen **rasanten Temperaturanstieg** verändert sich das Antlitz der Region: Das arktische Meereis schmilzt mindestens seit dem Beginn der Satellitenaufzeichnungen vor mehr als 50 Jahren schneller als erwartet, insbesondere im Spätsommer. Bis tief in den Untergrund gefrorener Boden, sogenannter Permafrost, taut zunehmend auf. Diese Veränderungen haben teilweise dramatische Konsequenzen für die Lebensbedingungen der arktischen Bevölkerung und für die Wildtiere und Pflanzenwelt der Arktis. Außerdem werden weitreichende ökonomische Folgen unter anderem für die Fischerei in arktischen Gewässern, die transozeanischen Schifffahrtsrouten, den Tourismus und die Gewinnung von Ressourcen immer deutlicher.

Diese Klimaveränderungen sind sowohl Folgen als auch Triebkräfte einer Vielzahl von miteinander verknüpften, lokalen und aus der Ferne wirkenden **Rückkopplungsmechanismen**. Die kombinierten Auswirkungen dieser Rückkopplungen treten in der Arktis stärker zutage als in anderen Regionen, was als arktische Verstärkung bezeichnet wird.

Fernwirkungen zwischen Arktis und mittleren Breiten

Zusätzlich zu den lokalen Mechanismen spielen Fernrückkopplungen eine Rolle für die arktische Verstärkung. So gilt ein Starkwindband in rund zehn Kilometern Höhe, der polare Jetstream, als ein wesentliches Bindeglied zwischen Arktis und mittleren Breiten. Der Jetstream hat einen wellenförmigen Verlauf und ist verantwortlich für die Entwicklung und Verlagerung von Hoch- und Tiefdruckgebieten, die das bekannte wechselhafte Wetter unserer mittleren Breiten verursachen. Umgekehrt bestimmen diese Luftmassenbewegungen den Energiehaushalt der arktischen Atmosphäre stark mit. Besonders ausgeprägt ist dieser Einfluss während der Polarnacht im Winter, wenn die Sonneneinstrahlung – sonst Hauptenergiequelle für das arktische Klimageschehen – wegfällt.

Der Luftmassentransport umfasst sowohl nach Norden in die Arktis hinein gerichtete Warmlufteinschübe (WAI, Warm Air Intrusions) als auch nach Süden verlaufende Kaltluftausbrüche (CAOs, Cold Air Outbreaks).

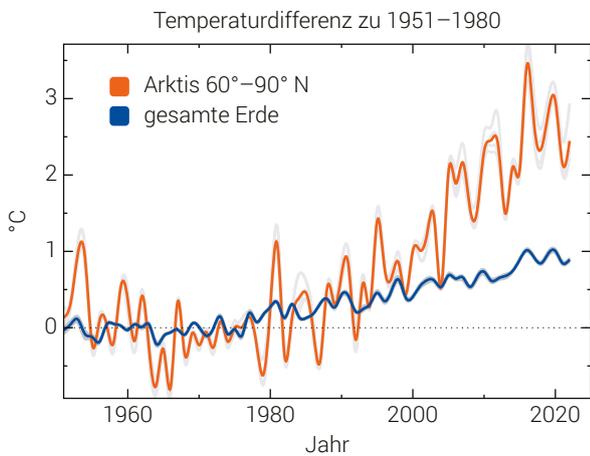
WAI entstehen typischerweise durch eine starke Nordströmung am Westrand eines hochreichenden Hochdruckgebiets bzw. an der Ostseite eines ausgeprägten Tiefs. Von „atmosphärischen Flüssen“ (engl. „atmospheric rivers“) spricht

Ein Beispiel für eine **klimatische Rückkopplung** ist der Meereis-Albedo-Effekt: Eis reflektiert das Sonnenlicht und trägt damit maßgeblich zur planetaren Albedo, also dem Rückstrahlvermögen der Erde, bei. Da ein immer größerer Anteil des Meereises in der Arktis aufgrund der globalen Erwärmung schmilzt und damit der Anteil meereisfreier Ozeanflächen zunimmt, wird ein kleinerer Anteil der einfallenden Sonnenstrahlung zurückgeworfen und stattdessen vom dunklen Ozean absorbiert, wodurch sich die obere Ozeanschicht erwärmt – was die Erwärmung der unteren Luftschicht weiter verstärkt. Mit der Eisbedeckung fehlt die wichtige thermische Isolierung zwischen dem wärmeren Ozean und der im Winter sehr kalten Atmosphäre, die sich dadurch weiter erwärmen kann. Darüber hinaus bilden sich über kleineren Eis- und größeren Ozeanflächen verstärkt langlebige tiefliegende Wolken, die oft sowohl flüssige Wassertröpfchen als auch Eiskristalle enthalten. Diese Wolken können sich erwärmend auswirken, da sie die aufwärtsgerichtete Wärmestrahlung absorbieren und ihrer relativ warmen Temperatur entsprechend Richtung Meeresoberfläche emittieren.

man, wenn der Warmlufteinschub schlauchförmig und im Durchmesser begrenzt ist. Dadurch gelangen oft in aufeinanderfolgenden Pulsen konzentriert warme und feuchte Luftmassen in die Arktis hinein. Viele WAI reichen im Winter oder zu Beginn des Frühjahrs über den Atlantik in die Arktis. WAI erwärmen die Atmosphäre in Oberflächennähe hauptsächlich durch den reichlich darin enthaltenen Wasserdampf, der als effizientes Treibhausgas wirkt und somit die abwärtsgerichtete Wärmerückstrahlung aus der Atmosphäre erhöht.

WAI begünstigen außerdem die Bildung von tiefen Wolken in der atmosphärischen Grenzschicht, welche die Gegenstrahlung weiter verstärken. Diese Wasserdampf- und Wolkeneffekte sind bei der Erwärmung der oberflächennahen arktischen Luft oftmals effizienter als der während WAI durch die atmosphärische Strömung verursachte direkte Wärmetransport von Süden nach Norden. Schätzungsweise erhöhen die WAI die oberflächennahen Lufttemperaturen in der Arktis im Winter um bis zu 5° C. Dies kann dazu führen, dass die Meer-eisschmelze früher beginnt und sich Schmelztümpel intensiver ausbilden. Beides verringert die Fähigkeit des Meereises, Sonnenstrahlung zu reflektieren.

Die Kaltluftausbrüche (CAOs) hingegen können polare Tiefdrucksysteme (Polartiefs) über dem Arktischen Ozean verursachen und die Kontinente der mittleren Breiten führen und die subpolaren Ozeane abkühlen. Dies kann zu extremen



Die Temperatur in der Arktis steigt deutlich stärker als global. Das zeigen die Daten von vier Zeitreihen der oberflächennahen Lufttemperaturen, hier aufgetragen als Unterschied zum Mittelwert 1951–1980. Die Daten stammen von GISTEMP (NASA) <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>, Berkeley Earth <http://berkeleyearth.org/data/>, HadCRUT5 <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/data/current/download.html> und NOAA <https://www.ncei.noaa.gov/data/>. In grau sind die vier einzelnen Datenreihen übereinander aufgetragen, farblich ihre Mittelwerte. Global sind die Unterschiede zwischen den Datenreihen so gering, dass sie hier nicht erkennbar sind.

Wetterlagen in den mittleren Breiten führen. Arktische CAOs treten im Mittel ungefähr 30-mal im Jahr auf, am häufigsten im Winter. Die während der CAOs nach Süden strömenden Luftmassen verändern ihre Eigenschaften massiv, hauptsächlich aufgrund der großen Temperaturunterschiede über dem Meereis im Vergleich zum offenen Ozean, die mehr als 30 Grad betragen können: Der eisfreie Ozean (ca. -1 °C) gibt Wärme an die viel kältere Luft (-20 °C bis -30 °C) ab. Wie groß diese Wärmemenge ist, hängt von der freigelegten Wasseroberfläche ab. Kaltluftausbrüche können in der Arktis für 60–80 Prozent der vom Ozean in die Atmosphäre übertragenen Wärme verantwortlich sein. Diese Übertragungen erwärmen und befeuchten die sich nach Süden bewegendenden Luftmassen rasch. Das löst eine vertikale atmosphärische Instabilität aus, welche die Durchmischung des Ozeans und die Meereisbildung beeinflussen kann. Wolken entwickeln sich während mariner CAOs zunächst als Wolkenstraßen (Rollzirkulation) und später zu offenen Zellen. Diese Prozesse sind in Modellen schwierig abzubilden. Eine realistischere Darstellung könnte deutlich bessere Wettervorhersagen und Klimamodelle für die Arktis und die mittleren Breiten ermöglichen.

Grenzen und Erfolge der Modelle

Es gibt Hinweise darauf, dass der polare Jetstream sich aufgrund des Klimawandels verlangsamt und seine Wellen stärker nach Norden und Süden mäandrieren. Damit würde sich der Transport von Luftmassen in und aus der Arktis verändern. Wie genau das geschieht, ist aber noch nicht abschließend geklärt.

Allgemeine globale Zirkulationsmodelle (GCMs), die zur Simulation des zukünftigen Klimas verwendet werden, liefern zwar Aussagen über den Einfluss der arktischen Erwärmung auf das Wetter und das Klima in den mittleren Breiten. Allerdings sagen die Modelle des internationalen Klimamodell-Vergleichsprojekts CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) den Feuchtigkeitsfluss aus dem Atlantik in die Arktis systematisch zu niedrig voraus, wie ein Vergleich mit meteorologischen Datensätzen ergab. Darüber hinaus zeigen GCMs Schwächen darin, die Entwicklung von Wolken der atmosphärischen Grenzschicht während der Luftmassenumwandlungsprozesse im Zusammenhang mit WAIs

und CAOs realistisch zu simulieren. Problematisch sind dabei Modellparametrisierungen, welche beispielsweise die Eiskristallbildung in Mischphasenwolken überbewerten. Es gibt jedoch auch Modelle, die tiefliegende, flüssiges Wasser enthaltende Wolken in der Arktis überschätzen. Die Unstimmigkeiten zwischen den Modellen deuten darauf hin, dass die zugrundeliegenden Ursachen bei der Darstellung von Strahlungs- und Turbulenzprozessen, die von der Eisbildung beeinflusst werden, unsicher sind. Um mögliche Gründe für Diskrepanzen zwischen und innerhalb einzelner Modelle zu klären, braucht es detaillierte Untersuchungen der Fähigkeiten der Modelle, in der Natur beobachtete Schlüsselprozesse im Computer zu reproduzieren.

Unverzichtbar für eine bessere Repräsentation der arktischen Klimaveränderungen in numerischen Modellen sind Messdaten aus dieser abgelegenen Region. Polarforscher:innen sind deswegen regelmäßig vor Ort, um Messungen und Beobachtungen durchzuführen. Zu einer ganz besonderen Expedition brachen sie 2019 auf (siehe MOSAiC-Expedition auf der nächsten Doppelseite): Angedockt an eine Eisscholle, driftete der Forschungsseisbrecher Polarstern ein ganzes Jahr lang mit dem Eis. Die Wissenschaftler:innen erhoben währenddessen Daten zu Austauschprozessen zwischen Ozean, Eis und Atmosphäre sowie zum Ökosystem, erstmals auch im polaren Winter. Diesen reichen Schatz an Daten auszuwerten, dürfte noch einige Jahre in Anspruch nehmen – am Ende winken aber detaillierte neue Einblicke in die Dynamik der Arktis und ihre Reaktion auf die Folgen des Klimawandels.

*Christian Haas, Markus Rex,
Gunnar Spreen und Manfred Wendisch*

EIN JAHR IM ARKTISCHEN EIS

1 Die Erforschung des arktischen Klimasystems hat in den Jahren 2019/2020 einen großen Schritt nach vorne gemacht: Der Forschungseisbrecher **Polarstern** wurde für ein Jahr im arktischen Meereis eingefroren und driftete in dieser Zeit mit dem Eis von den russischen Randmeeren knapp am Nordpol vorbei bis nach Grönland. Diese bisher größte internationale Polarexpedition mit dem Namen Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (**MOSAIC**) wurde von Wissenschaftler:innen des Alfred-Wegener-Instituts geleitet und zusammen mit 80 Instituten aus 20 Ländern durchgeführt. MOSAIC folgte der Idee von Fridtjof Nansen von vor mehr als 100 Jahren, welcher durch die natürliche Eisdrift mit dem eingefrorenen Schiff Fram als Forschungsstation große Teile der Arktis über einen langen Zeitraum beobachten konnte. Während Nansens Expedition von 1893 bis 1896 mit der Fram noch mehr als drei Jahre brauchte, um mit der Transpolardrift den arktischen Ozean zu überqueren, wurde die Polarstern schon nach weniger als einem Jahr wieder aus dem Eis entlassen.

Polarstern

- Biologie- und Geochemie-Labore
- atmosphärische Radare, Radiometer und Laser
- Luft- und Wasserproben
- Eislabore
- Helikopter und Drohnen



Motorschlitten



Eisbohrkerne



Fernerkundung

- Satelliteninstrumente auf der Eisscholle
- Radare, Mikrowellenradiometer, Altimeter, GPS/GNSS
- Verbesserte Satellitendaten und Klimazeitserien

Schmelztümpel-messungen



Riss im Eis



2 Dies ist hauptsächlich auf den Klimawandel in der Arktis zurückzuführen, der durch die arktische Verstärkung (vorige Seite) besonders groß ist: Das Eis ist mittlerweile dünner und hat vermehrt Risse, Schmelztümpel und offene Wasserstellen. Dadurch driftet es bei gleichem Wind- und Ozeantrieb schneller, als das noch zu Nansens Zeiten der Fall war. Zusätzlich waren die Wetterbedingungen während MOSAIC sehr besonders: Im Frühjahr 2020 wurde ein extrem großer Luftdruckunterschied zwischen der zentralen Arktis und den mittleren Breiten wie bei uns in Europa beobachtet. Dies führte zu Rekordgeschwindigkeiten der Höhen- und Bodenwinde und damit der Eisdrift, sodass das Forschungsschiff schon im Juli 2020, und damit eher als erwartet, die Eiskante erreichte. Die Polarstern fuhr dann aus eigenem Antrieb wieder über den Nordpol ins Eis und setzte die Drift für den Rest des Jahres bis September 2020 fort.

Das MOSAIC-Projekt hat einen sehr stark interdisziplinären Ansatz: Neben der Physik des Meeres, des Eises und der Atmosphäre und ihren gegenseitigen Wechselwirkungen wurden auch Fragen aus der Biogeochemie und Biologie untersucht. Weitere Forschungsfragen widmeten sich der Verbesserung von Satellitenbeobachtungen und Klimazeitserien. Die Ergebnisse fließen über verbesserte Prozessbeschreibungen und Parametrisierungen in numerische Klima- und Vorhersagemodelle ein, die in den Polarregionen noch immer große Unzulänglichkeiten zeigen.

3 Während der MOSAiC-Messungen war das Meereis sehr dünn und brach häufig auf. Die MOSAiC-Eisscholle wurde von Rissen durchzogen, und neue Eisrücken türmten sich auf. So konnte deren Entstehung, Konsolidierung und Besiedelung mit Kleinstlebewesen und Algen über einen ganzen Jahreszyklus untersucht werden. Gleichzeitig wurden detaillierte Messungen der Atmosphäre und des Ozeans durchgeführt, so dass Prozesse und Wechselwirkungen zwischen Eis, Atmosphäre und Ozean inklusive Biologie gleichzeitig beobachtet werden konnten. Daneben stellte die starke Eisdynamik häufig erhebliche logistische Herausforderungen: Teile des Forschungscamps mussten mehrfach umziehen und dabei Messinstrumente und Kabel aus Eisrücken und Rinnen geborgen werden. Dazu kamen mehr als 60 Besuche von Eisbären. Dies hielt die mehr als 300 Wissenschaftler:innen, die auf fünf Abschnitte verteilt über das Jahr an Bord waren, nicht davon ab, einen fantastischen Datensatz zu sammeln, der jetzt und in den kommenden Jahren ausgewertet wird. Alle Daten stehen Forschenden und der Allgemeinheit frei zur Verfügung.

Christian Haas, Markus Rex, Gunnar Spreen und Manfred Wendisch

ROV

- Unterwasserroboter
- Topografie der Eisunterseite
- Energietransport in den Ozean

Strahlungsmesstationen

Ballonsondierungen

- Fesselballon zur Beprobung der unteren Atmosphäre
- Ozonsonden

Ozeanmessungen

- Winde für Temperatur- und Salzgehaltmessungen bis 2000 m Tiefe
- Wasserproben aus verschiedenen Tiefen
- Turbulenzmessungen unter dem Eis

Meteorologie

- 10m-Mast mit meteorologischen Messgeräten
- Energiebilanz an der Eisoberfläche
- Turbulenzmessungen hinter Eisrücken
- Wind- und Schneefallmessungen
- Struktur der Atmosphäre

PHYSIK UND LEBEN

Physik galt für lange Zeit als die Erforschung der unbelebten Materie. Die Untersuchung von lebenden Systemen war daher zunächst die exklusive Domäne von Medizin und Biologie. Seit einigen Jahrzehnten beteiligt sich auch die Physik an der Erforschung des Lebens, und zwar nicht nur dadurch, dass sie immer bessere apparative Möglichkeiten zur Analyse von Zellen und Molekülen auf allerkleinster Skala zur Verfügung stellt. Mit interdisziplinären Ansätzen hat die Physik neue Erkenntnisse über das Leben auf molekularer, zellulärer und organischer Ebene beigesteuert. Diese Entwicklung wurde durch Fortschritte in den Bereichen der weichen Materie, der Biophysik, der aktiven Systeme, der Quantenphysik, der Statistik und der Simulationstechniken ermöglicht.

1 m

10 cm = 0,1 m

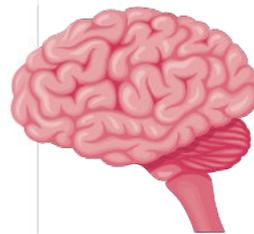
1 mm = 0,001 m

10 μ m = 0,000 010 m

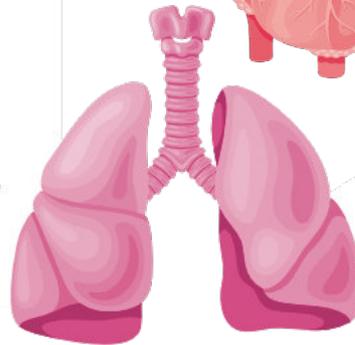
BIOPHYSIK AUF ALLEN SKALEN



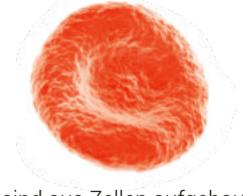
Menschen können erstaunliche Dinge mit ihrem Körper anstellen, etwa beim Sport. Er bietet aber auch Einfallstore für viele Krankheiten.



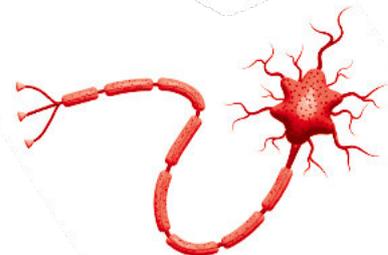
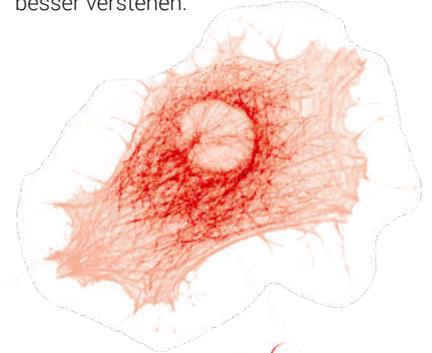
Gehirn, Herz und Lunge bestehen aus spezialisierten Zellen, die ihre Aufgaben im Kollektiv erfüllen.



Die roten Blutzellen sind die häufigste Zellenart des Menschen.



Die Organe sind aus Zellen aufgebaut, deren innere Mechanismen wir immer besser verstehen.



Nervenzellen sind mit sehr langen Verbindungsarmen zu anderen Zellen ausgestattet.

Aus Sicht der Biophysik ist der Mensch ein komplexes System aus 30 Billionen Zellen, wobei 200 verschiedenen Zellarten bekannt sind. Die häufigste Zellart mit 84 Prozent sind die roten Blutkörperchen. Menschen sind etwa ein bis zwei Meter groß.

Die Zellen finden sich zu Organen zusammen, die bestimmte Funktionen für den Organismus erfüllen. Ihr Zusammenspiel ist gut geregelt. Organe haben meist Größen um zehn Zentimeter, Blutbahnen liegen zwischen Bruchteilen von Millimetern (Kapillargefäße) und wenigen Zentimetern (Hauptarterien).

Auf Ebene der Zelle haben sich in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte in Verständnis und Forschung ergeben. Treiber dafür waren auch immer bessere physikalische Beobachtungs- und Messmethoden, um die Zellen mit ihrer Größe von meist zehn bis fünfzig Mikrometern erforschbar zu machen.

Mit großen Röntgenquellen und Elektronenmikroskopen können heute die Struktur und Funktion der Biomoleküle entschlüsselt werden (Seite 133). Auch in der Bildgebung und der Super-Auflösungsmikroskopie (Seite 135) wurden große Fortschritte gemacht. Dass Licht dabei nicht nur als Sensor sondern auch als Werkzeug genutzt wird (Seite 137), mag vielleicht überraschen. Die Erforschung der physikalischen Eigenschaften von Zellen (Seite 139) führt beispielsweise zu ganz neuen Einblicken in die Bewegung und die Teilung von Zellen, was für die Krebsforschung neue Impulse liefern kann. In der Neurobiophysik wird die netzartige Struktur des Gehirns untersucht, um so zu verstehen, wie das Gehirn im Einzelnen und als komplexes System funktioniert (Seite 143). Wie überhaupt Leben entstanden ist (Seite 145) und wie man es vielleicht sogar nachbauen kann (Seite 147), sind Fragestellungen, die bis hinunter auf die molekularen Ebene nach Antworten suchen.

1 μm = 0,000 001 m

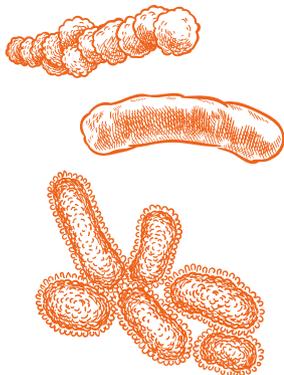
10 nm = 0,000 000 010 m

1 \AA = 0,000 000 000 1 m

Skala oder Größenordnung: der ungefähre Bereich, in dem sich eine typische Messgröße – hier die Länge oder „Größe“ – des untersuchten Objekts befindet

ca. 0,25 μm = 250 nm

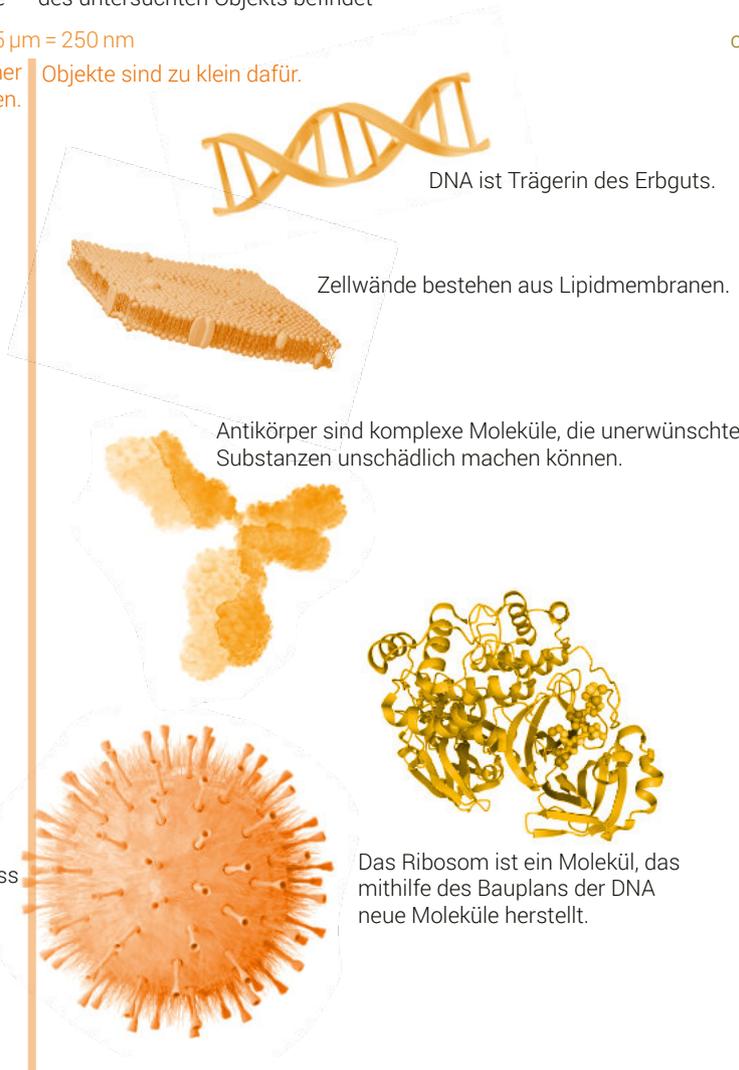
Objekte sind noch mit klassischer Lichtmikroskopie zu erkennen.



Bakterien kommen in sehr vielen Formen und Größen vor, manche schaden uns, andere sind nützlich.

Viren: Sie leben nicht selbst, verändern aber Zellen, sodass sie Viren herstellen.

Objekte sind zu klein dafür.



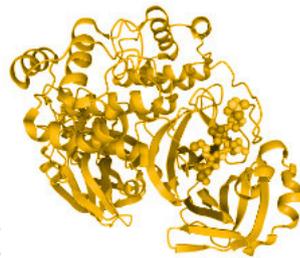
DNA ist Trägerin des Erbguts.



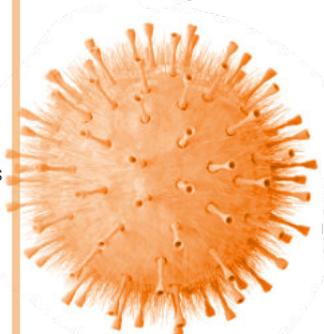
Zellwände bestehen aus Lipidmembranen.



Antikörper sind komplexe Moleküle, die unerwünschte Substanzen unschädlich machen können.



Das Ribosom ist ein Molekül, das mithilfe des Bauplans der DNA neue Moleküle herstellt.



ca. 1 \AA = 0,1 nm

heutige Auflösungsgrenze mikroskopischer Methoden

Das Wassermolekül ist ein wichtiger Baustein bei vielen chemischen Reaktionen des Lebens.



Bakterien und Zellorganellen sind gerade eben noch mit Lichtmikroskopen auszumachen. Erst mit der Entwicklung der Fluoreszenzmikroskopie konnte die klassische Auflösungsgrenze überwunden werden. Das hat das Tor zum Verständnis der Mechanismen im Innern dieser kleinen biologischen Komponenten mit Größen von einem Mikrometer oder kleiner geöffnet.

Noch kleiner als Bakterien sind Viren, die in ihrer ganzen Struktur in der Regel erst im Elektronenmikroskop oder mithilfe der Röntgenbeugung sichtbar gemacht werden können. Ebenso können ganz große Biomoleküle, wie etwa das Ribosom, in ihrer etwa zehn Nanometer großen Struktur und ihrer Funktion untersucht werden.

Die heutige Auflösungsgrenze bildgebender Verfahren wie etwa der Cryo-Elektronenmikroskopie oder der Röntgenstrukturanalyse liegt etwa in der Größenordnung eines Atoms, also bei einem Zehntel Nanometer oder – etwas veraltet, aber in der Forschung durchaus noch gebräuchlich – einem Angström (1 \AA).

EINBLICKE IN DIE WELT DER PROTEINE

Proteine sind die Arbeitspferde des Lebens. Welche Funktionen sie im Organismus ausführen, ergibt sich aus ihrer Struktur und ihrer Dynamik. Um zu verstehen, wie Leben auf molekularer Ebene funktioniert, muss daher die dreidimensionale Struktur der Biomoleküle und ihre Bewegung in Raum und Zeit entschlüsselt werden.

Ohne Proteine kein Leben: Die wichtigen Biomoleküle sind an vielen biologischen Vorgängen wie dem Stoffwechsel, der Bewegung von Muskeln und der Abwehr von Infektionen beteiligt. Sie bestehen aus einer Kette von Aminosäuren, deren Reihenfolge das Genom festlegt. Aber nicht nur die Zusammensetzung, sondern auch die Form eines Proteins bestimmt dessen Funktion. Der Heilige Gral der molekularen Biophysik und Strukturbiologie besteht deshalb darin, die dreidimensionale Struktur eines Proteins aus seiner Aminosäuresequenz vorherzusagen.

In den vergangenen hundert Jahren wurde eine Vielzahl von experimentellen Methoden entwickelt, um die räumliche Struktur von Proteinen zu analysieren. Die drei wichtigsten sind die **Röntgenstrukturanalyse**, die **Kernspinresonanzspektroskopie (NMR-Spektroskopie)** und die **Kryoelektronenmikroskopie**.

Drei Methoden, 230 000 Datensätze

Dank dieser modernen experimentellen Möglichkeiten ist die dreidimensionale Struktur vieler Proteine bereits bestens bekannt: Die internationale Proteindatenbank, in der all diese Ergebnisse abgelegt werden, enthielt Anfang 2025 über 230 000 Einträge. Trotzdem ist die Erzeugung dieser Daten mühsam und aufwendig. Daher wäre die computergestützte

Berechnung der räumlichen Struktur von Proteinen aus der aus der DNA ablesbaren Abfolge ihrer Aminosäuren der Königsweg, der weitere Experimente zur Strukturerkundung im Prinzip unnötig machen würde.

Proteinstrukturen aus Computersimulationen

In **Molekulardynamik-Computersimulationen** formulieren Wissenschaftler:innen mathematisch die Kräfte, die zwischen allen Atomen eines Proteins wirken. Mit Supercomputern lässt sich aus Newtons zweitem Gesetz zu Kraft und Beschleunigung dann die Bewegung dieser Moleküle vorhersagen. Die dafür verwendeten Rechnerverbünde haben oft die Rechenleistung von vielen Millionen PCs, wie man sie aus dem Alltag kennt. Sie benötigen für ihren Betrieb etwa so viel Energie wie eine Kleinstadt mit mehreren Tausend Einwohner:innen. Ergebnisse dieser Simulationen zeigen, wie sich Moleküle spontan organisieren. Die daraus erstellten Videos mit einer extrem hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung sind visuell sehr eindrücklich, beruhen aber auf Modellannahmen und Näherungen. Deren Genauigkeit bestimmt, wie gut sie die physikalischen Realität beschreiben.

Auf experimenteller Seite wurden innovative Spektroskopiemethoden (siehe Seite 137) entwickelt, die eine Kombination aus fluoreszierenden Molekülen, Lasern und Detektoren ver-

Bei der **Röntgenstrukturanalyse** wird ein Röntgenstrahl auf eine Probe geschickt, dort an den Atomen abgelenkt und von einem Detektor aufgezeichnet. Das resultierende Beugungsbild gibt dann Aufschluss über die Position der einzelnen Atome. Allerdings muss die Probe bei dieser Methode in regelmäßiger Form, also als Kristall, vorliegen. Anders als bei Festkörpern ist das bei Proteinen in der Regel nicht der Fall. Die benötigten Proteinkristalle müssen deshalb aufwendig gezüchtet werden. Das braucht oft viel Geduld, manchmal über mehrere Jahre hinweg.

Bei der **NMR-Spektroskopie** werden die quantenmechanischen Eigenschaften der Molekülbestandteile in einem Magnetfeld vermessen – ähnlich wie bei einem Magnetresonanztomografen (MRT), nur eben auf viel kleinerer Skala. Diese Methode funktioniert aber nur bei relativ kleinen Molekülen zuverlässig.

Lässt sich die Struktur weder durch die Röntgenstrukturanalyse noch durch NMR-Messungen bestimmen, so bietet die **Kryoelektronenmikroskopie** einen revolutionären neuen Weg: Proteine, größere Komplexe und auch molekulare Maschinen können „schockgefroren“ und zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Orientierungen schnapp-

schussartig aufgenommen werden. Die zugrundeliegende Transmissions-Elektronenmikroskopie (EM) wurde bereits in den 1930er-Jahren entwickelt. Die zur Strukturanalyse verwendeten schnellen Elektronen lassen sich quantenmechanisch als Materiewellen mit einer ihrer Energie entsprechenden Wellenlänge beschreiben. Diese kann wesentlich kleiner sein als bei sichtbarem Licht, weshalb mit den Elektronenmikroskopen Auflösungen von Strukturen kleiner als einem Nanometer möglich sind. Das entspricht zwar der Größenordnung der Biomoleküle, trotzdem gab es hierbei lange ein Problem: Im Vakuum des Elektronenmikroskops trocknen Biomoleküle aus und ihre Struktur verändert sich.

Durch Einfrieren und einige weitere Tricks gelang es aber schließlich Richard Henderson, Joachim Frank und Jacques Dubochet, die Struktur von Proteinen und anderen Biomolekülen mit einer Auflösung kleiner als einen Nanometer zu erhalten (Nobelpreis 2017). Die Kryoelektronenmikroskopie erlaubte beispielsweise 2015, ein atomgenaueres 3D-Modell des Zika-Virus zu erstellen, das damals in Lateinamerika zu einer Erkrankungswelle geführt hatte. Solche detaillierten Modelle sind die Grundlage für die Entwicklung von Impfstoffen und Medikamenten.

← *Computersimulation der Verankerung des SARS-CoV-2-Spikes in der Virenhülle. Das vollständige Bild finden Sie auf Seite 141.*

Detaillierte Strukturansicht der mitochondrialen ATP-Synthase, die als Protonenpumpe arbeitet und für die Herstellung von ATP, dem Energieträger in allen Zellen, zuständig ist. Die Abfolge der Aminosäuren, die das Protein bilden, ist ein eindimensionaler Bauplan einer dreidimensionalen Struktur. Diese zu verstehen ist ein großes Ziel der Strukturbiologie.

wenden, und mit denen die Bewegung einzelner Moleküle verfolgt werden kann. Diese Methoden tragen dazu bei, wichtige Aspekte der Dynamik von Biomolekülen experimentell zu überprüfen.

Mit den Molekulardynamiksimulationen lässt sich auch die Faltung eines Proteins nachvollziehen: Bei diesem zentralen Prozess organisieren sich Biomoleküle wie Proteine und einige Nucleinsäuren aus einer linearen Anordnung spontan in eine immer gleiche 3D-Struktur, die für ihre Funktion entscheidend ist. Einige neurodegenerative Erkrankungen wie Alzheimer oder Parkinson beruhen auf einer Fehlfaltung bestimmter Proteine. Diesen Prozess zu verstehen ist darum ungemein wichtig.

Im Idealfall sollten Informationen zur Faltung aus einer ausreichend langen Simulation zu gewinnen sein. Es war jedoch lange unklar, ob die Molekulardynamikrechnungen präzise genug sind, um die Einzelschritte zu reproduzieren. Das änderte sich 2010, als Fortschritte in der Computerhardware die ersten Simulationen der Proteinfaltung mit atomarer Auflösung ermöglichten. Im Jahr 2013 erhielten Martin Karplus, Michael Levitt und Arieh Warshel den Chemie-Nobelpreis für ihre Pionierarbeit bei der Entwicklung physikalisch basierter Computersimulationen zur Untersuchung von Molekülen. Diese Auszeichnung war ein Beweis für die Reife des Fachgebiets und betont den interdisziplinären Charakter der Biophysik.

Praktische Anwendung in der Coronapandemie

Laufende Entwicklungen zielen darauf ab, Simulationen von immer komplexeren Systemen auf umfangreicheren Zeit- und Raumskalen zu ermöglichen. Die statistische Physik bietet die Grundlage für die Entwicklung effizienter Methoden zur Beschleunigung von Simulationen, indem man sich auf wichtige Ereignisse konzentriert oder eine geringere räumliche Auflösung gegen die Möglichkeit eintauscht, längere Zeitskalen zu erfassen. Auch die Modellierung der Kräfte, die zwischen verschiedenen molekularen Bausteinen wirken, wird immer besser und ermöglicht Simulationen komplexer heterogener Systeme. Innerhalb der nächsten zehn Jahre könnten realistische Simulationen ganzer Zellen möglich werden.

Bei der SARS-CoV-2-Krise wurden die neuen Möglichkeiten und der enorme Nutzen der molekularen Biophysik auf eindrucksvollste Weise sichtbar: Nur wenige Monate nach Ausbruch der Pandemie lieferte eine Kombination von Elektronenmikroskopie und molekulardynamischer Simulation atomgenaue Modelle des Spike-Proteins, das es dem Virus ermöglicht, menschliche Zellen zu infizieren. Die dabei verwendeten digitalen Modelle des Virus sind sehr komplex und enthalten das Spike-Protein, die Lipiddoppelschicht, in die es

eingebaut ist, und die Glykane, komplexe Zucker, die seine Oberfläche bedecken und vor dem Immunsystem schützen.

Künstliche Intelligenz treibt die Strukturforschung weiter

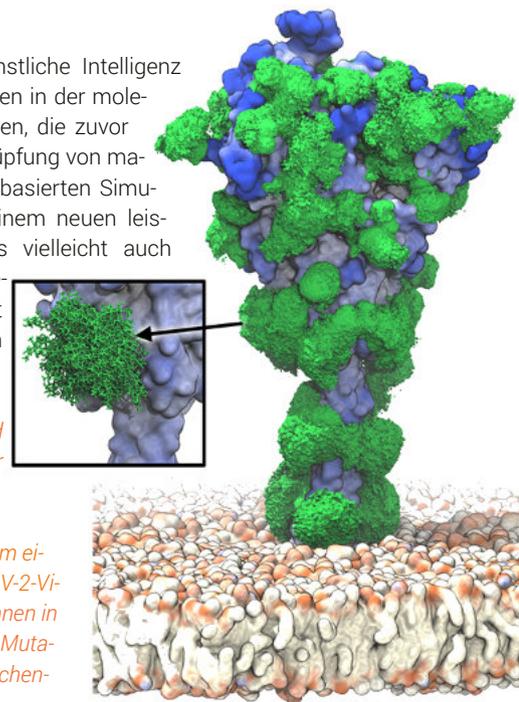
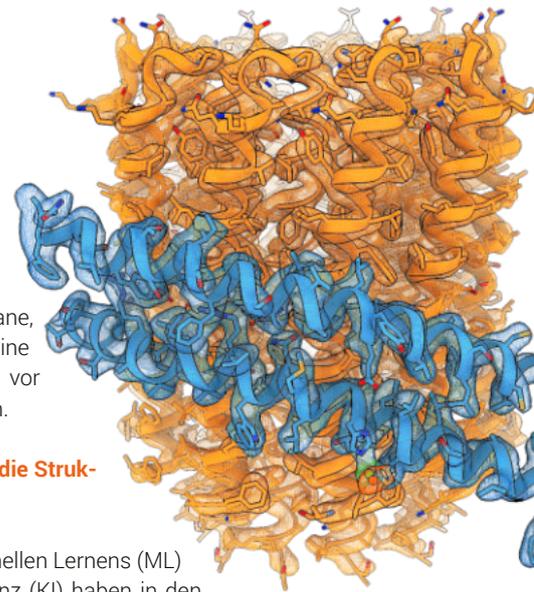
Neue Methoden des maschinellen Lernens (ML) und der künstlichen Intelligenz (KI) haben in den letzten Jahren die molekulare Biophysik und Strukturbiologie revolutioniert. Im Jahr 2018 hat AlphaFold zum ersten Mal einen Wettbewerb für Strukturvorhersagen gewonnen, ein KI-Algorithmus, der dafür neuronale Netze verwendet, die auf die bekannten Strukturen für Proteine trainiert wurden. AlphaFold wurde von einigen Fachleuten als die wichtigste Errungenschaft der KI überhaupt bezeichnet, auch weil damit die Entwicklung von neuen Medikamenten deutlich einfacher wird. 2024 wurden John Jumper und Demis Hassabis von der Firma DeepMind für diese Entwicklung mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet, zusammen mit David Baker für seine Arbeiten im Bereich des computergestützten Protein-Designs.

AlphaFold basiert wie viele KI-Methoden auf einem komplexen neuronalen Netzwerk, das zum Trainieren große Datenmengen benötigt. Das System wurde anhand von 170 000 Proteinstrukturen trainiert, die in der internationalen Proteindatenbank verfügbar sind. Ohne die Arbeit von Generationen von experimentellen Biophysiker:innen wäre AlphaFold deshalb nicht möglich gewesen.

Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz helfen dabei, Herausforderungen in der molekularen Biophysik zu bewältigen, die zuvor als unlösbar galten. Die Verknüpfung von maschinellem Lernen und physikbasierten Simulationen entwickelt sich zu einem neuen leistungsstarken Paradigma, das vielleicht auch unser Verständnis, aber auf jeden Fall die Vorhersagbarkeit von biologischen Systemen dramatisch erhöhen wird.

Roberto Covino und Markus Sauer

Darstellung der berechneten Form eines Spike-Proteins des SARS-CoV-2-Virus. Solche Untersuchungen können in Zukunft auch dabei helfen, neue Mutationen zu verstehen und entsprechende Impfstoffe zu entwickeln.



MIKROSKOPIE FÜR KLEINSTE STRUKTUREN

Die molekularen Prozesse in einer biologischen Zelle sind für uns schwer vorstellbar, da sie vollkommen anders verlaufen als die physikalischen Prozesse in unserem Alltag. Um Einblicke in diese Abläufe zu ermöglichen, braucht es extrem hochauflösende Mikroskope. In den letzten Jahrzehnten ist es erstmals gelungen, damit selbst molekulare Details von biologischen Zellen und ihren Unterstrukturen sichtbar zu machen.

Als Robert Hooke 1665 die rechteckigen Kompartimente von Kork unter einem selbstgebauten Mikroskop entdeckte, nannte er sie **Zellen**, weil sie ihn an die Mönchszellen im Kloster erinnerten. Zur gleichen Zeit konnte Antoni van Leeuwenhoek zum ersten Mal **Bakterien** und **rote Blutkörperchen** mit einem Lichtmikroskop sehen. Im 19. Jahrhundert identifizierten Robert Koch und Louis Pasteur mit dem optischen Mikroskop die Bakterien, die Tuberkulose und Cholera auslösen. Seither ist die Mikroskopie aus der biomedizinischen Forschung nicht mehr wegzudenken.

Unsere Körperzellen sind typischerweise zehn bis 50 Mikrometer (0,01–0,05 mm) groß. Ein rotes Blutkörperchen bringt es nur auf acht Mikrometer, und das Darmbakterium E. Coli auf vier. Das kann man mit Lichtmikroskopen zwar gut auflösen, aber bei den molekularen Details, die für die Zellen wichtig sind, stoßen diese Mikroskope an ihre Grenzen, denn die **Auflösung** ist aufgrund der **Beugung** begrenzt: An Hindernissen werden die elektromagnetischen Wellen des Lichts abgelenkt. Stehen Strukturen näher zusammen als die halbe Wellenlänge des zur Beobachtung verwendeten Lichts, so breitet sich dies in den Raum dahinter aus und die Strukturen verschwimmen. Bei sichtbarem Licht mit einer Wellenlänge von 500 Nanometern liegt die Auflösungsgrenze demnach bei 250 Nanometern – das sind 0,25 Mikrometer.

Viele interessante Strukturen sind jedoch kleiner: Moleküle kommen nur auf wenige Nanometer Länge und sind demnach unter dem Lichtmikroskop nicht erkennbar. Auch Viren mit einer Größe von um die 100 Nanometer können erst seit den 1930er-Jahren mithilfe der Elektronenmikroskopie abgebildet werden. Dafür muss das Untersuchungsobjekt allerdings manipuliert werden: Wasser wird entfernt und durch Kunststoff ersetzt. Erst die in den 1980er-Jahren entwickelte **Kryoelektronenmikroskopie** erlaubte durch schnelles Einfrieren, solch winzige Proben im natürlichen Zustand zu untersu-

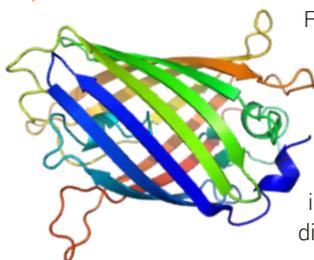
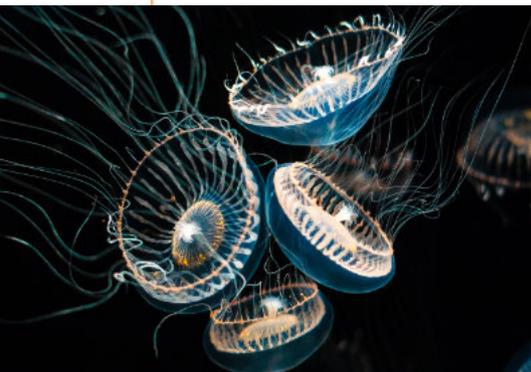
chen. Heute liegt die Auflösung von Elektronenmikroskopen aufgrund der sehr kleinen Wellenlänge der beschleunigten Elektronen im Bereich von zehntel Nanometern. So können inzwischen einzelne Atome und sogar die darin vorhandenen Elektronenzustände, die Atomorbitale, sichtbar gemacht werden („Einblicke in die Welt der Proteine“ auf Seite 133).

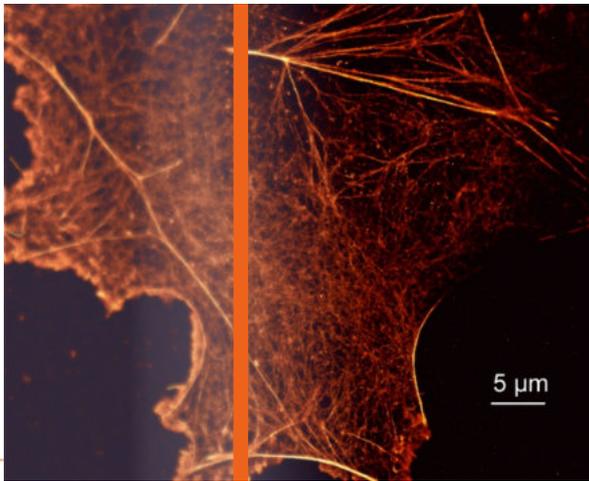
Fluoreszenzmikroskopie: Jenseits der Auflösungsgrenze

Für lange Zeit dachte man, dass die Auflösungsgrenze der optischen Mikroskopie in jedem Fall bei der halben Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegt. Doch mit trickreichen Weiterentwicklungen ist diese Grenze überwindbar – etwa dank des Einsatzes von fluoreszierenden Molekülen. Diese können Licht einer bestimmten Wellenlänge (Farbe) aufnehmen und anschließend Licht geringerer Energie, d.h. mit einer etwas größeren Wellenlänge, abstrahlen. Die Fähigkeit zur **Fluoreszenz** erhalten sie durch synthetische organische Farbstoffe oder durch fluoreszierende Proteine, welche sich beispielsweise aus **Quallen** gewinnen lassen. Durch genetische Manipulation können Zellen so programmiert werden, dass ganz bestimmte Proteine fluoreszierend werden. Diese können dann auch in lebenden Zellen und Organismen und über längere Zeiträume beobachtet werden. Dafür muss aber die eingestrahlte Lichtmenge so gering sein, dass das für die Fluoreszenz verantwortliche Elektronensystem nicht zerstört wird. Sorgt man außerdem dafür, dass in einem bestimmten Raumbereich im Mittel nur ein einzelnes fluoreszierendes Molekül (Farbstoff oder fluoreszierendes Protein) leuchtet, und der Abstand zu anderen leuchtenden Moleküle größer als die Auflösungsgrenze ist, dann kann man den Aufenthaltsort jedes fluoreszierenden Moleküls mit fast beliebiger Genauigkeit bestimmen: Er liegt genau in der Mitte des Auflösungsbedingten verwaschenen Lichtflecks. Indem man diese Lokalisierungsprozedur für möglichst viele verschiedene fluoreszierende Moleküle wiederholt, kann damit Stück für Stück ein Abbild der entsprechenden Struktur aufgebaut werden – mit nahezu molekularer Auflösung von wenigen Nanometern. **STORM** (STochastic Optical Reconstruction Microscopy) baut genau auf diese Weise höchstauflösende Bilder auf.

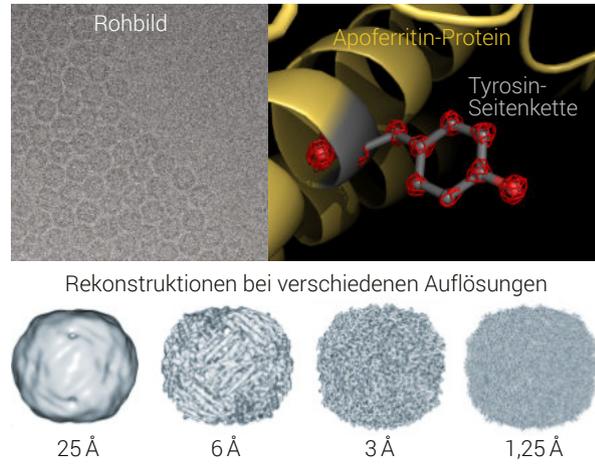
Für diese Einsicht und den Bau entsprechender Mikroskope bekamen die Amerikaner William E. Moerner und Eric Betzig sowie der deutsche Physiker Stefan W. Hell 2014 den Chemie-Nobelpreis für **Superresolution-Mikroskopie**: Moerner für die Detektion einzelner fluoreszierender Moleküle, Betzig für eine Methode, bei der fluoreszierende Proteine zufällig angeschaltet wurden, und Hell für eine Methode, die diese mithilfe eines Quanteneffekts deterministisch aus-

Fluoreszierende Quallen und die Struktur des aus ihnen gewonnenen grünen Fluoreszenzproteins GFP.





Vergleich von regulärer Weitfeld-Fluoreszenz-Mikroskopie (links) und STORM (rechts) an der Aktinstruktur einer Zelle.



Mit einem Kryoelektronenmikroskop können einzelne Atome in Aminosäuren abgebildet werden.

schaltet. Diese Superresolution-Mikroskopie-Methoden werden stetig weiter verbessert und sind jetzt schon den Bereich molekularer Auflösung vorgedrungen.

tronenmikroskopie lässt sich für drei Dimensionen verwenden, indem man die Probe in viele dünne Schichten zerschneidet.

Für jede Fragestellung ein passendes Mikroskop

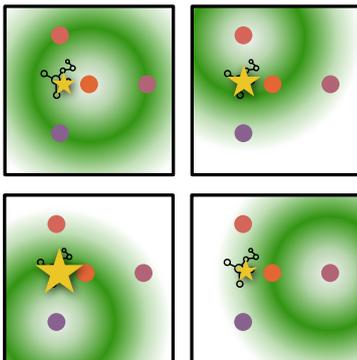
Quo vadis, Mikroskopie?

Neben Elektronenmikroskopie und Superresolution-Mikroskopie können Lebenswissenschaftler:innen sich aber noch weitere Methoden aus der Physik zunutze machen. Verschiedenste physikalische Prinzipien erlauben in bestimmten Situationen hohe Auflösungen zu erzeugen. Ein Beispiel dafür ist die Rasterkraftmikroskopie. Während eine Probe der harten kondensierten Materie oft im Vakuum abgetastet wird, muss dies bei biologischen Proben im Wasser geschehen. Damit lässt sich nicht nur ein Höhenprofil der Probe erzeugen, sondern gleichzeitig lassen sich auch ihre mechanischen Eigenschaften, zum Beispiel ihre Steifigkeit, vermessen, was beispielsweise Hinweise auf Funktionsstörungen einer Zelle geben kann.

Angesichts der rasanten und extrem erfolgreichen Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte ist es schwierig vorherzusagen, ob diese in nächster Zeit zu einem Stillstand kommen oder ungebremst weitergehen wird. Bis vor einigen Jahren dachte man, dass optische Mikroskopie durch die Beugungsgrenze des sichtbaren Lichts limitiert ist, dass sich beim Einfrieren von biologischer Materie immer zerstörerische Eiskristalle bilden und dass man für die Lokalisation von Biomolekülen eine große Anzahl von Photonen benötigt. All das gilt heute nicht mehr, denn durch die Entwicklung neuer physikalischer Verfahren konnten diese Einschränkungen überwunden werden. Die derzeit größte Herausforderung ist die Abbildung der molekularen Vorgänge in lebenden Zellen und über einen längeren Zeitraum, weil diese nur geringe Lichtmengen vertragen. Angesichts der Kreativität und Innovationsfreude in diesem Bereich ist aber auch hier davon auszugehen, dass wir in nicht allzu ferner Zukunft fast alle derartigen Prozesse abbilden und damit eine vollständige physikalische Beschreibung des Systems Leben erreichen können.

Viele der beschriebenen Mikroskope funktionieren am besten in zwei Dimensionen, also für Oberflächen oder sehr flache Zellen. Biologische Systeme sind aber immer dreidimensional. Auch hier gibt es entsprechende Entwicklungen: etwa das Konfokalmikroskop, mit dem man eine dreidimensionale Probe Punkt für Punkt und dann Ebene für Ebene abtastet, oder das Lichtscheibenmikroskop, mit dem gleich zweidimensionale Schnitte abgebildet werden. Und auch die Elek-

Sarah Köster, Markus Sauer und Ulrich Schwarz



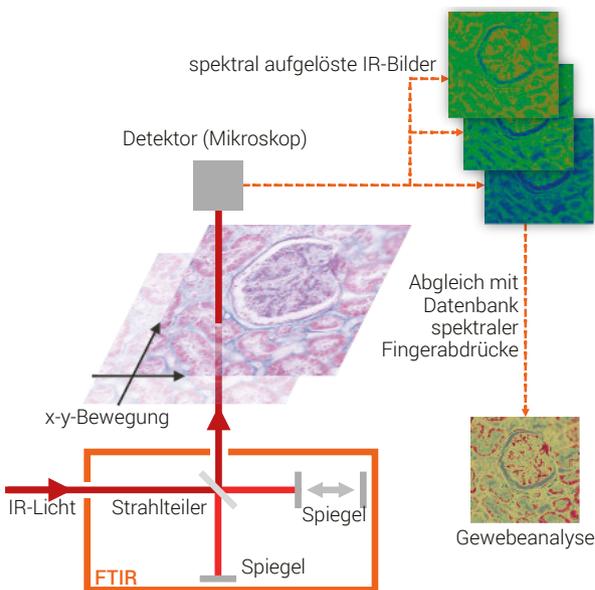
Im Jahr 2017 veröffentlichte die Arbeitsgruppe von Stefan Hell die Mikroskopiemethode MINIFLUX, bei der Nanometer-Auflösung mit sehr wenigen Photonen erreicht werden kann. Bei MINIFLUX wird ein grüner Laserstrahl so gestaltet, dass sein Strahlquerschnitt eine Ringform hat. Der Mittelpunkt des Laserrings wird jetzt nacheinander an vier verschiedenen Stellen positioniert (Orange-Lila-Töne). Je nachdem, wie intensiv das Laserlicht am Ort des Moleküls ist, strahlt es mehr oder weniger Photonen pro Zeit ab, angedeutet durch die Größe des gelben Sterns. Daraus lässt sich die Position des Moleküls rekonstruieren. Die Detektoren können einzelne Photonen erkennen, die Positionierung des Lasers erfolgt mit höchster Genauigkeit, sodass sich die Position des Moleküls mit Nanometerauflösung und geringst möglicher Einstrahlung bestimmen lässt.

ALLESKÖNNER LICHT

Die Rolle des Lichts bei der Untersuchung des Lebens geht weit über die Bildgebung hinaus. Mit Licht lassen sich sowohl Biomoleküle als auch ganze Zellen bewegen und verformen. Im Inneren der Zelle kann man Strömungen erzeugen oder lichtempfindliche Prozesse ansteuern. Dabei kommen verschiedene physikalische Effekte zum Tragen.

Licht ist eine elektromagnetische Welle, die sowohl Energie als auch Impuls übertragen kann. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts wissen wir, dass dies mithilfe kleiner Pakete – den Lichtquanten oder Photonen – geschieht. Die Energie der einzelnen Photonen ist an ihre Wellenlänge bzw. Frequenz geknüpft und lässt sich daher über einen weiten Bereich einstellen. Die Tatsache, dass Licht Energie und Impuls besitzt, führt zu vielfältigen Anwendungen in der Physik des Lebens.

Unterschiedliche Zelltypen absorbieren Licht auf unterschiedliche Weise. Krebszellen etwa absorbieren andere Energiepakete – damit Licht anderer Wellenlängen – als gesunde Zellen, weil sie unterschiedliche Biomoleküle enthalten, die bei jeweils unterschiedlichen Energien zu schwingen beginnen. Mit der Raman- oder **Infrarotspektroskopie** lassen sich solche Unterschiede sichtbar machen. Mit einer anderen Art der Spektroskopie, der Brillouin-Spektroskopie, werden nicht Schwingungen der Moleküle, sondern des Molekülgitters (Phononen) angeregt. Sie geben Unterschiede in der



In einem Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR) wird ein Lichtstrahl über eine Probe gerastert, z. B. über einen Gewebeschnitt von einem Patienten. Wenn man Wellenlängen im Infrarot wählt, dann werden viele Molekülschwingungen angeregt. An jedem Punkt wird durch Interferometrie ein Spektrum bestimmt, das Aufschlüsse über die chemische Zusammensetzung der Probe gibt. Damit kann beispielsweise ermittelt werden, ob das Gewebe sich verändert und ein Patient Krebs hat. Die Analyse wird immer öfter durch künstliche Intelligenz erledigt.

Elastizität von Gewebe preis – ein wichtiger Hinweis auf Tumoren im lebenden Organismus, da diese härter sind als das umgebende Gewebe.

Optische Pinzetten und der optische Strecker

Neben solchen diagnostischen Zwecken kann Licht auch Materie manipulieren und steuern helfen. Mikroskopisch feine Partikel, sogenannte Kolloide, lassen sich mit Licht bewegen. Wenn die Kolloide – also zum Beispiel Kügelchen aus Kunststoff oder auch ganze biologische Zellen – einen höheren Brechungsindex als die umgebende wässrige Lösung haben und man sie mit einem Laser anstrahlt, so wird das Licht beim Übergang zum optisch dichteren Material gebrochen. Dabei gibt es einen Impulsübertrag mit einer Kraft, die zum Laserfokus zeigt – das Kolloid wandert also in dessen Mitte und kann durch den Laser festgehalten und geführt werden. Diese sogenannten optischen Pinzetten erlauben es, auch Einzelmoleküle zu untersuchen. Dafür werden diese an langkettige Moleküle (Polymere) gebunden, die wiederum auf der Oberfläche von Kunststoffkügelchen verankert sind. Durch **optische Pinzetten** lassen sich Kräfte erzeugen, die ausreichen, um das Protein vollständig zu entfalten. Durch solche Experimente lässt sich viel über die Beziehung zwischen Aufbau und 3D-Struktur lernen (Seite 133).

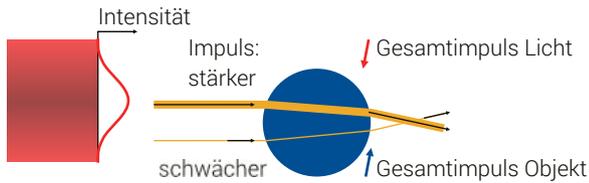
Ein unerwünschter Nebeneffekt bei optischen Pinzetten ist, dass Zellen dabei überhitzen können – denn Licht überträgt schließlich Energie. Doch was hier stört, kann anderswo nützlich sein. So lassen sich mithilfe von Temperaturgradienten z. B. Biomoleküle trennen und Zellbestandteile bewegen. Eine besonders pfiffige Anwendung ist die wiederholende Erwärmung der Spitze eines Rasterkraftmikroskops, wodurch mechanische Resonanzen verringert werden und deshalb weniger Energie auf die Biomoleküle übertragen wird. Die Absorption und Abstrahlung von Licht in biologischen Systemen kann auch durch Metalloberflächen verstärkt werden, was für die Sensorik oder zur gesteuerten Kontraktion von Gelen verwendet wird.

Der Impulsübertrag zwischen Licht und Materie kann auch dazu verwendet werden, einzelne Zellen auseinanderzuziehen und damit ihre Elastizität zu vermessen. Statt fokussiertem Laserlicht richtet ein optischer Strecker zwei auseinanderlaufende Laserstrahlen auf eine Zelle, um diese in Richtung der Laserstrahlen auseinanderzuziehen. Damit konnten Wissenschaftler:innen unter anderem zeigen, dass einzelne Krebszellen weicher sind als gesunde Zellen.

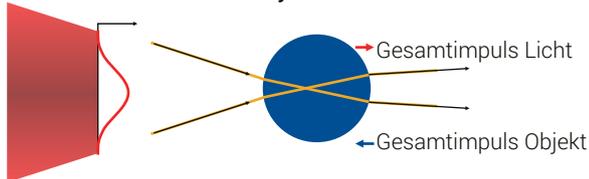
← *Biologische Zellen, die auf 3D-gedruckten Mikrostrukturen wachsen und diese zusammenziehen. Das Elektronenmikroskopiebild wurde nachträglich koloriert.*

Der Impuls in einer optischen Falle wird durch die Lichtbrechung übertragen. Dadurch wird das Kügelchen immer wieder in den Laserfokus „zurückgezogen“ und kann daher festgehalten werden. Unten: Schematische Darstellung eines optischen Streckers mit zwei auseinanderlaufenden Laserstrahlen, die die Zelle auseinanderziehen.

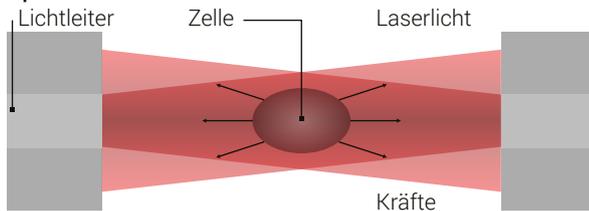
Intensitätsprofil zieht Objekt zum Intensitätsmaximum



Fokussiertes Licht zieht Objekt zum Fokus



Optischer Strecker mit auseinanderlaufenden Strahlen



Modernste Anwendungen: 3D-Laserdruck und Optogenetik

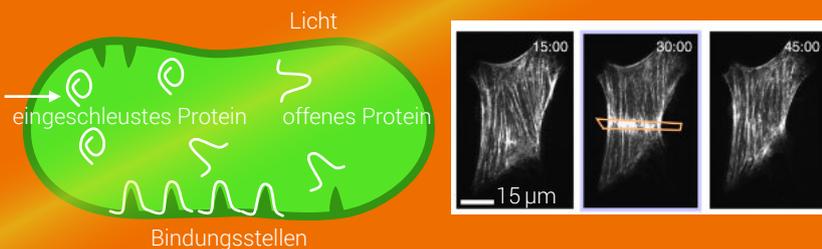
Durch den Energieübertrag mit Licht lassen sich gezielt bestimmte Prozesse in Gang setzen. Ein sehr modernes Anwendungsgebiet dafür ist der Zwei-Photonen-Laserdruck. Hierbei absorbiert ein lichtempfindliches Molekül gleichzeitig zwei Photonen und kann sich dann mit seinem Nachbarn verbinden. Durch viele solcher Prozesse entsteht ein langkettiges Polymer. Wie in einem 3D-Drucker, der eine Düse verwendet, entsteht dann im sich bewegenden Laserfokus ein festes Material. Dank der hohen Präzision der fokussierten Laser lassen sich Strukturen mit Abmessungen unter einem Mikrometer drucken. Mit dieser Technologie entstehen beispielsweise winzige Gerüste, in denen dann biologische Zellen wachsen können – ähnlich zu ihrer natürlichen Umgebung im Bindegewebe des Körpers. In Zukunft könnte man mit solchen Gerüsten Zellverbände kontrollieren, die dann ganz spezielle Funktionen ausführen, wie z. B. synchronisierte Kontraktion wie im Herzen oder die Weiterleitung von Nervenimpulsen in Neuronen. Der 3D-Druck von Teilen von Organen rückt damit in greifbare Nähe.

Und auch in lebenden Systemen lassen sich mithilfe von Licht Prozesse anstoßen: Durch genetische Veränderungen kann eine Zelle lichtempfindliche Proteine produzieren, die ihre Funktion genau dann ändern, wenn sie Photonen mit der

OPTOGENETIK

In eine Zelle wird durch Gentechnologie ein Protein (weiß) eingeschleust, das durch Licht (gelb) mit hoher räumlicher und zeitlicher Präzision in einen anderen Zustand geschaltet werden kann. In diesem Beispiel wird das Protein von geschlossen nach offen geschaltet und kann dann an Bindungsstellen auf der Zellmembran (grün) andocken. Rechts: Genau dieses Prinzip wurde hier verwendet, um einen biochemischen Signalweg zu stimulieren, der zur Kontraktion von Zellen führt. Die Akkumulation der molekularen Motoren wurde durch Fluoreszenzmikroskopie nachgewiesen; die darauf folgende Kräfteerzeugung wurde mit Zellkraftmikroskopie gemessen.

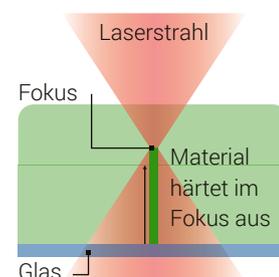
Da Zellkräfte für die Zellbewegung entscheidend sind (Seite 139), kann man mit diesem Ansatz z. B. die Bewegung von Zellen kontrollieren. Eine weitere Anwendung von Optogenetik ist die Kontrolle von Ionenkanälen. Wenn so ein Konstrukt in Neuronen eingebaut wird, dann lässt sich sogar das Verhalten dieser Zellen steuern.



richtigen Wellenlänge absorbieren. Das Licht wirkt dann wie ein Schalter für einen bestimmten Zellprozess. So lassen sich beispielsweise Neuronen dazu bringen, auf Lichtkommando hin Signale zu übertragen, oder Körperzellen, sich nach Einstrahlung zu bewegen. Eine optogenetische Kontrolle ist heutzutage für fast alle relevanten Zellprozesse möglich und hat eine raumzeitliche Präzision, an die keine biochemische Methode herankommt. Sogar in der Anwendung ist die Optogenetik mittlerweile angekommen: Mit ihrer Hilfe soll in Zukunft das Seh- oder Hörvermögen von entsprechend eingeschränkten Patient:innen wieder hergestellt werden können.

Sarah Köster, Markus Sauer und Ulrich Schwarz

Das Prinzip des optischen Polymer-3D-Drucks: Im Fokus des Lasers entsteht ein Kunststoff, durch die Bewegung des Lasers wird daraus ein räumliches Objekt.



PHYSIK DER ZELLE

Biologische Zellen sind klein und komplex. Trotzdem können sie quantitativ vermessen werden: mit Mikrofluidik, Zellkraftmikroskopie und optischer Mikroskopie. Der Schlüssel zum physikalischen Verständnis zellulärer Prozesse ist die Physik der weichen Materie.

Der menschliche Körper besteht aus der unvorstellbaren Zahl von 3×10^{13} Zellen, die sich in 200 verschiedene Zelltypen unterteilen lassen. Jeder Zelltyp erfüllt bestimmte Aufgaben und hat dazu passende physikalische Eigenschaften. So können Muskelzellen Kräfte erzeugen und sich zusammenziehen, Immunzellen sind sehr beweglich und wandern durch den Körper, um Infektionen zu bekämpfen, während Zellen in der Haut oder der Lunge große stabile Verbände bilden und stark aneinanderhaften. Die meisten Zellen eines Menschen – 84 Prozent – sind Erythrozyten („rote Blutkörperchen“). Sie haben durch ihre abgeplattete Form eine große Oberfläche, was ihnen erlaubt, Sauerstoff effektiv aufzunehmen. Diesen transportieren sie von der Lunge ins Gewebe. Während ihrer Lebenszeit von 120 Tagen durchqueren sie in jeder Minute einmal den gesamten Körper und müssen dabei extreme mechanische Belastungen aushalten.

Menschliche Zellen sind etwa zehn bis 50 Mikrometer groß, daher mit optischen Mikroskopen sehr gut zu betrachten. Obwohl einzelne Biomoleküle nur Piconewton-Kräfte erzeugen können, ist die Gesamtkraft einer Zelle rund eine Million Mal größer und damit gut messbar, z. B. als Verformung einer elastischen Umgebung. Die Zellkräfte sind aber nicht gleichmäßig über die Zelloberfläche verteilt, sondern treten in mikrometergroßen Bereichen auf, in denen Biochemie und Mechanik besser miteinander gekoppelt werden können. Hier liegen die Kräfte in der Größenordnung von Nanonewton, also etwa tausendmal höher als die eines einzelnen Biomoleküls.

Menschliche Zellen sind von einer nur vier Nanometer dünnen Membran umgeben. Solche Membranen umgeben auch Strukturen innerhalb der Zelle – die Organellen – und außerdem viele humanmedizinisch relevante Viren, wie etwa das Grippevirus oder SARS-CoV-2. Große Moleküle, *Biopolymere*, bilden das innere Skelett der Zelle, welches ihr mechanische Stabilität und die Fähigkeit zur Bewegung und Teilung verleiht. Das Anhaften, Bewegen und Teilen von Zellen sind die Hauptprozesse auf Zellebene, die physikalische Kräfte benötigen. Das Hauptziel der zellulären Biophysik besteht demnach darin, diese Prozesse sowie das Zusammenspiel von Zellen im Gewebe zu verstehen.

Physikalische Eigenschaften von Zellen vermessen

Der Erfolg der zellulären Biophysik ist eng verbunden mit den Konzepten und Methoden der Physik der weichen Materie (siehe auch Seite 97). Weiche Materie ist ein Teil der kondensierten Materie, die sich wiederum in Festkörper und Flüssigkeiten aufteilen lässt. Festkörper wie Kristalle oder Plastik kehren nach einer Deformation wieder in ihre ursprüngliche

Form zurück, weil die Atome, aus denen sie bestehen, feste Nachbarschaftsbeziehungen unterhalten. Flüssigkeiten wie Wasser oder Honig haben diese stabilen Verbände nicht und fließen unter äußeren Kräften in eine neue Form – sie sind **viskos**.

Weiche Materie zeichnet sich dadurch aus, dass sie durch schwache Wechselwirkungen wie Van-der-Waals- oder hydrophobe Kräfte zusammengehalten wird. Die niedrigen Energien dieser Wechselwirkungen führen dazu, dass diese Materialien sehr weich sind: Gewebe ist ähnlich elastisch wie Weichkäse. Zur weichen Materie gehören **Polymere** (sehr große, oft langkettige Moleküle), **Kolloide** (Fest-Flüssig-Mischungen) und eben auch die **Membranen**, die alle Zellen und ihre Organellen umgeben.

Eine Besonderheit von biologischen Zellen und Geweben ist, dass sie elastisch und viskos zugleich sind. Die viskoelastischen Eigenschaften von Zellen passen zu ihrer biologischen Funktion: Sie müssen verformbar sein, um sich in der Zellbewegung durch kleinste Verengungen quetschen zu können, und gleichzeitig ausreichend stabil, um große Kräfte auszuhalten und dabei nicht kaputtzugehen. Eine weitere besondere Eigenschaft von biologischen Zellen ist, dass sie ihre Viskoelastizität durch kontinuierlichen Umbau erreichen: Sie verwenden lokale Energiequellen, um ihr mechanisches System ständig neu aufzubauen und an neue Anforderungen anzupassen. Diese Energie benötigen sie auch für die elementaren Prozesse Teilung, Bewegung und Haftung. Welche physikalischen Kräfte die Zellen dabei aufbringen können, und wie sie diese aufbringen, können wir mithilfe der Zellkraftmikroskopie untersuchen.

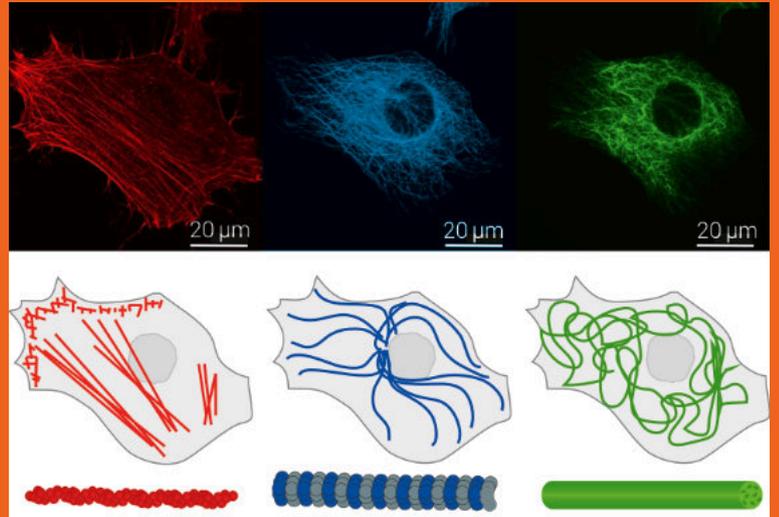
Bei der **Zellkraftmikroskopie** lassen wir die Zelle auf weichen Substraten aus Polymermaterialien wachsen, in die kleine Kunststoffpartikel eingegossen sind. Wenn nun die Zelle sich zusammenzieht oder sich bewegt, verformt sie dabei das Substrat, und wir können die Verformung anhand der Bewegung dieser Partikel bestimmen. Mit der bekannten Elastizität des Substrats berechnen wir aus der Verformung das Kraftfeld mit einer Auflösung von weniger als einem Mikrometer!

Die weichen Substrate bringen noch einen weiteren Effekt zutage: Sie sind der natürlichen Umgebung der Zellen viel ähnlicher als harte Zellkulturschalen aus Glas oder Kunststoff. Und tatsächlich haben erste vergleichende Experimente mit verschiedenen Unterlagen gezeigt, dass Zellen die Steifigkeit ihrer Umgebung erfühlen und sich an diese anpassen.

ZELLBEWEGUNG- UND TEILUNG IM LICHT DER MODERNEN PHYSIK

Die Entwicklung der Zellkultur (also der Möglichkeit, Zellen im Reagenzglas am Leben zu halten und außerhalb des Körpers zu beobachten) ermöglichte erstmals, die wichtigsten Prozesse in Zellen quantitativ zu vermessen. Mithilfe der Fluoreszenzmikroskopie lassen sich dabei ganz gezielt Bestandteile wie die verschiedenen Komponenten des Zytoskeletts sichtbar machen. In den 1990er-Jahren wurde dieses Gebiet durch die Einführung von elastischen Substraten und Mikrostrukturierung weiter revolutioniert, die es jetzt auch erlauben, die Rolle von Steifigkeit und Geometrie auf die Zellen umgebenden Gewebes zu untersuchen.

Heute ist klar, dass die permanente Erneuerung im Zytoskelett den Zellen erlaubt, sich zu bewegen und zu teilen. Diese ständige Erneuerung wird durch lokale Energiequellen getrieben und erzeugt einen stetigen Materialfluss. Diesen kann die Zelle nach Bedarf an die Umgebung koppeln und damit Bewegung erzeugen. Die Physik der weichen Materie stellt dabei mit der Theorie der aktiven Gele ein Konzept zur Verfügung, um diese Prozesse auf der mesoskopischen Ebene der Zelle – also dem Bereich zwischen wenigen Nanometern und ein paar Mikrometern – zu analysieren.



Die verschiedenen Biopolymere des Zytoskeletts, sichtbar gemacht mit der Fluoreszenzmikroskopie: Aktinfilamenten (rot), Mikrotubuli (blau) und Intermediärfilamente (grün). In der Zelle übernehmen sie unterschiedliche Rollen: Mithilfe von Aktinfilamenten kann die Zelle sich zusammenziehen, entlang von Mikrotubuli werden Stoffe durch die Zelle transportiert und Intermediärfilamente bestimmen, wie leicht die Zelle sich verformen lässt.

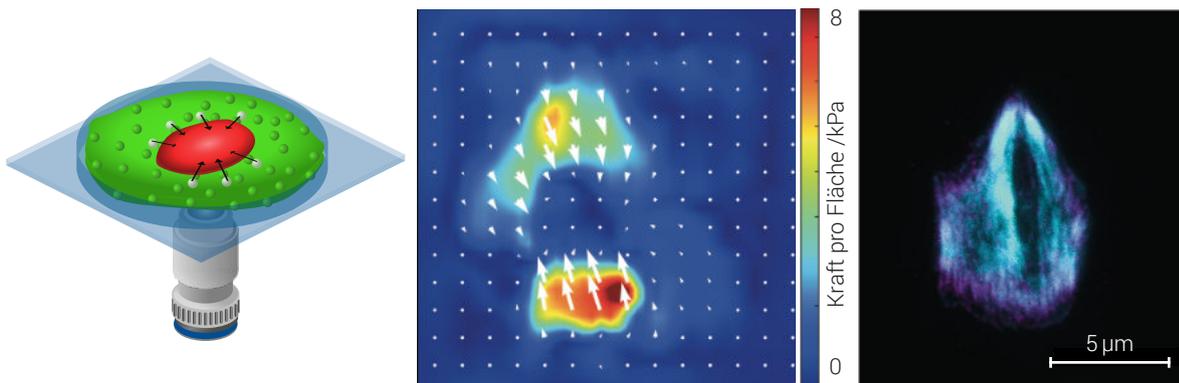
Um Zellen zu vermessen, die nicht auf Oberflächen vorliegen, sondern in Flüssigkeiten, werden häufig mikrofluidische Methoden verwendet. Dabei wird die mit Zellen angereicherte Flüssigkeit durch kleinste Kanäle geleitet. Nur einzelne Zellen nacheinander können diese Kanäle passieren. Diese Kanäle sind durchsichtig, sodass sich die Zellen mikroskopisch beobachten lassen, während biophysikalische Experimente mit ihnen durchgeführt werden: Das können beispielsweise Verformungstests sein, die dann mithilfe der Rückverformung Aufschluss über Elastizität und Viskosität einer Zelle geben.

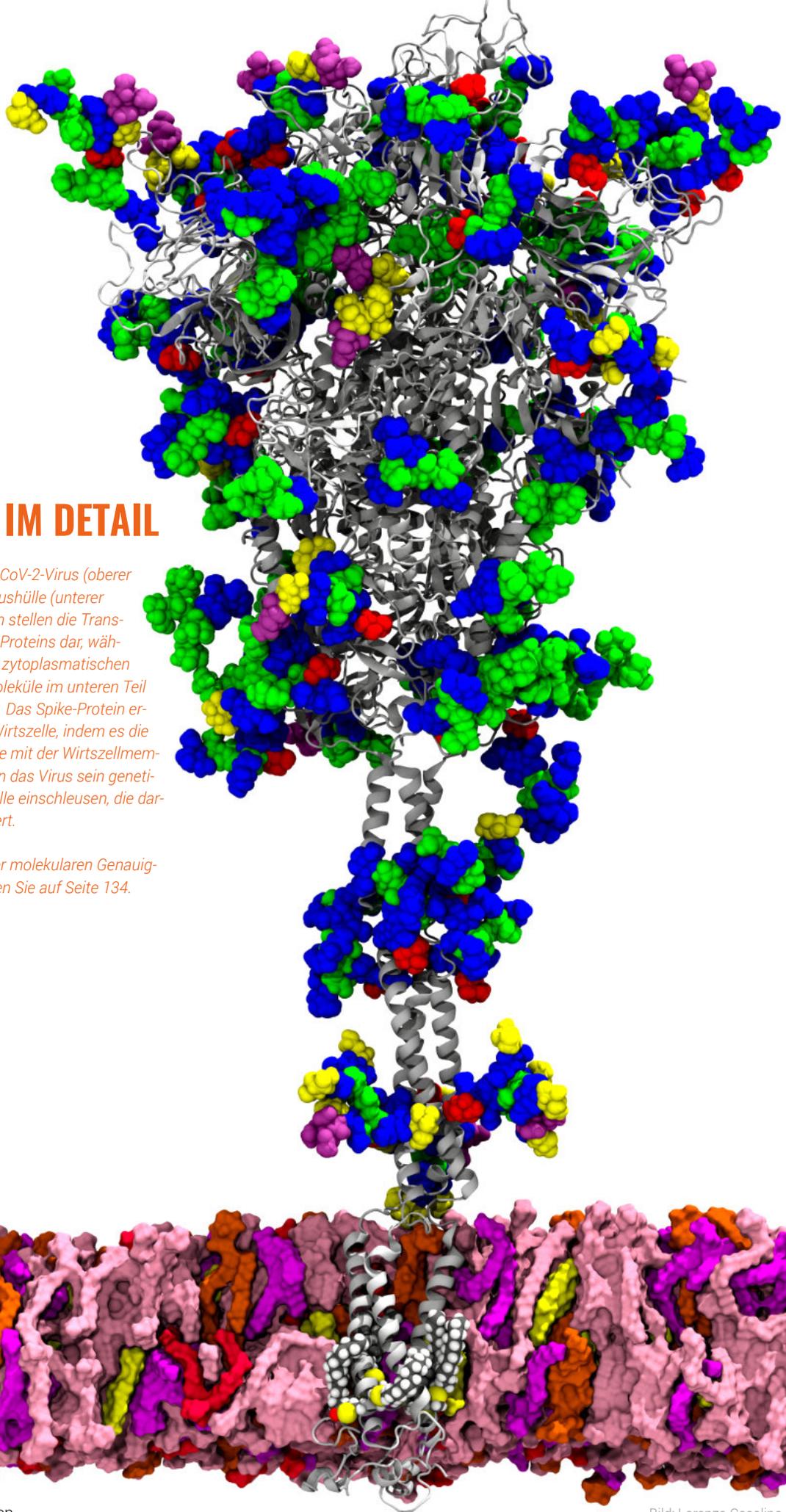
in ihrer Gesamtheit makroskopisch hart sind – sie lassen sich ertasten –, sind die darin enthaltenen Krebszellen eher weicher als die gesunden Zellen. Diese Eigenschaft erlaubt ihnen nämlich, durch das menschliche Gewebe zu wandern. Indem man die mechanischen Eigenschaften von Zellen vermisst, kann man demnach Krebszellen, etwa in einer Blutprobe, identifizieren. Dies eröffnet neue Möglichkeiten in der medizinischen Diagnostik. Und auch in den Materialwissenschaften könnten die Erkenntnisse der zellulären Biophysik Anwendung finden, etwa bei der Entwicklung selbstheilender Materialien.

Diese physikalischen Eigenschaften der Zellen können auch konkrete medizinische Bedeutung haben: Obwohl Tumoren

Sarah Köster und Ulrich Schwarz

Mit einem Mikroskop beobachten wir in der Zellkraftmikroskopie die Verschiebung der Kunststoffpartikel im Substrat (links). Das lässt sich in die Kraft umrechnen, die die Zelle – hier ein Blutplättchen – auf den Untergrund ausübt (Mitte). Zusätzlich sieht man im Mikroskopbild (rechts) die Aktinstruktur (cyan) und die „Haftproteine“ (magenta)..





VIRUSSPIKE IM DETAIL

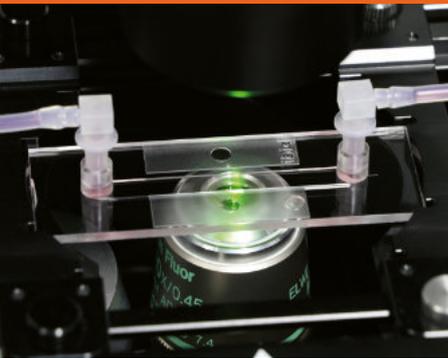
Das Spike-Protein des SARS-CoV-2-Virus (oberer Teil) ragt deutlich aus der Virushülle (unterer Teil) hervor. Die grauen Fäden stellen die Transmembrandomäne des Spike-Proteins dar, während die grauen Spiralen den zytoplasmatischen Schwanz zeigen. Die rosa Moleküle im unteren Teil sind die Lipide der Virushülle. Das Spike-Protein erleichtert den Eintritt in die Wirtszelle, indem es die Verschmelzung der Virushülle mit der Wirtszellmembran vermittelt. Dadurch kann das Virus sein genetisches Material in die Wirtszelle einschleusen, die daraufhin weitere Viren produziert.

Wie die Virusstruktur in dieser molekularen Genauigkeit aufgeklärt wurde, erfahren Sie auf Seite 134.

IM PORTRAIT: IBIDI GMBH, MÜNCHEN

Firmengründung

Für meine Doktorarbeit an der TU München habe ich 1999 mikrofluidische Kammern gebaut, die im Wesentlichen aus Glas bestanden und aufwendig verklebt wurden. Allerdings kamen in dieser ersten optischen Hochleistungspolymeren aus der Flachbildschirmindustrie auf den Markt, welche fast die gleiche optische Qualität wie ein Deckglas hatten. Dadurch motiviert haben Roman Zantl, Joachim Rädler, Ulf Rädler und ich 2001 die Firma ibidi als GmbH gegründet. Unterstützt wurden wir durch das Gründerzentrum der LMU München, an der Joachim Rädler tätig war.



Produkte

Wir stellen Trägersysteme für die optische Mikroskopie sowie anwendungsbezogene Geräte wie Inkubations- und Pumpsysteme her, mit denen biologische Zellen unter ähnlichen Bedingungen wie im Körper untersucht werden können. Bei den Trägersystemen passen wir alle physikalischen Materialei-

genschaften (wie Materialdicke, Brechungsindex, geringe Eigenfluoreszenz) optimal an die Untersuchungsoptik unserer Kunden an. Bei der Mikrofluidik geht es vor allem darum, dass das System nicht toxisch für die untersuchten Zellen ist und der hydrodynamische Fluss den Verhältnissen im Körper entspricht. Die Werte für die hydrodynamischen Kräfte in den von uns entwickelten Systemen entsprechen recht exakt denen in einem lebenden Organismus. Da es in gesunden Gefäßen zumeist laminare Strömungen gibt (Reynoldszahl deutlich unter 1), werden unsere Systeme in der Regel mit entsprechend kleinen Abmessungen konstruiert, um ebenfalls im laminaren Bereich zu bleiben. Im Körper werden Reynoldszahlen > 2000 nur in den großen Arterien und für kurze Zeiten erreicht. Doch auch krankhaft verengte Blutgefäße („Arterienverkalkung“) besitzen Stellen mit dauerhaft turbulentem Blutfluss. Dort wirken andere physikalische Kräfte auf die Gefäßwand als bei einem laminaren Fluss, was zu weiteren Veränderungen der Gefäßwand als auch zur Blutgerin-



nung führen kann. Auch für die Nachbildung solcher Situationen haben wir entsprechende Träger im Sortiment, mit denen medizinisch relevante Erkenntnisse gewonnen werden können.

Struktur

Wir haben heute etwa 110 Mitarbeitende an zwei Standorten, in Gräfelfing bei München und in Wisconsin in den USA. Im Bereich Forschung und Entwicklung haben wir über 30 Mitarbeitende, von denen über 20 in den Naturwissenschaften promoviert haben. Auch in den Abteilungen Vertrieb und Marketing arbeiten hauptsächlich promovierte Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen. Alle wertschöpfenden Schritte sowohl in der Produktion als auch in der Entwicklung werden bei uns realisiert. In einigen Ländern wie Deutschland und USA haben wir unseren eigenen Vertrieb, ansonsten arbeiten wir mit Partnern zusammen.

Ratschläge für Nachwuchsforschende

Bei ibidi ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung notwendig, da hier Fragestellungen aus der Biologie mit physikalischen Konzepten beantwortet werden. Außerdem müssen viele technische und ingenieurwissenschaftliche Herausforderungen gelöst werden. Somit sind neben fachlicher Kompetenz auch ein Interesse an benachbarten Disziplinen und eine gute Kommunikationsfähigkeit immens wichtig. Bei einer Firmengründung sollte man immer bedenken, dass im Mittelpunkt der Planungen die Profitabilität stehen muss. Dies widerspricht nicht dem Ansatz, sinnvolle Produkte herzustellen und ein langfristig nachhaltiges Geschäftsmodell zu verfolgen, aber wenn die Firma kein Geld verdient, dann wird sie nicht dauerhaft bestehen.

Valentin Kahl

Wenn man Zellen in einem Mikrofluidik-Kanal wachsen lässt, führt die unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit je nach Abstand von der Kanalwand zu Scherkräften, ähnlich wie in einem verengten Blutgefäß.

DAS DENKEN VERSTEHEN

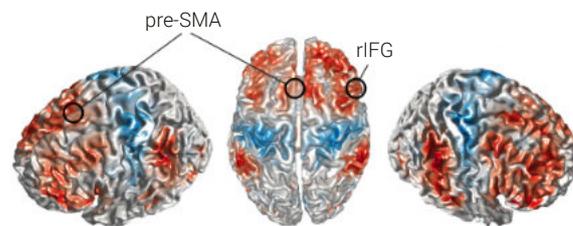
Das Gehirn ist der Ort unseres Bewusstseins und definiert den Menschen wie kein anderes Organ. Seine beeindruckenden Fähigkeiten basieren auf dem feinen Zusammenspiel von 80 Milliarden Neuronen. Für dessen Verständnis spielen experimentelle und theoretische Ansätze der Physik eine entscheidende Rolle – und auch bei der Frage, ob sich das Gehirn nachahmen lässt.

Die Basiseinheiten lebender Informationsverarbeitung sind die **Neuronen** – elektrisch erregbare Zellen in unserem Gehirn, die ganz unterschiedliche Größen, Formen und Eigenschaften haben können. Ein Neuron besteht aus einem Zellkörper, der mithilfe von sehr langen biologischen „Kabeln“ (**Dendriten und Axonen**) elektrische Impulse von Tausenden anderen Neuronen empfängt und an andere Neuronen weitersendet. Dabei kann ein Neuron nicht nur mit seinen direkten Nachbarn interagieren, sondern seine Signale gezielt weiterleiten – über viele Zentimeter oder sogar Meter hinweg!

Aufgrund der Pionierarbeit der Biophysiker Alan Lloyd Hodgkin und Andrew Fielding Huxley sowie des Neurowissenschaftlers John Carew Eccles haben wir heute ein gutes physikalisches Verständnis davon, wie diese Neuronen elektrische Signale generieren und weiterleiten: Sie gleichen einem elektronischen Schaltkreis mit einem Widerstand und einem Kondensator, der elektrische Signale weiterleitet, sobald diese einen bestimmten Schwellenwert überschreiten. Im letzten Jahrhundert wurde viel Wissen über die Biophysik der Neuronen und Synapsen gewonnen. Dennoch bleiben viele Fragen offen, insbesondere zu den Prinzipien, die bestimmen, wie Neurone sich koordinieren und verbinden, wie das Netzwerk als Ganzes lernt, und wie dadurch kohärente Gedanken oder gar Bewusstsein entsteht.

Neuronen haben weit verzweigte Dendriten (grün) und Axone (orange), mit denen sie elektrische Impulse („spikes“) über weite Distanzen senden können.

Um dieser Frage mit Mitteln der Elektronik näher zu kommen, werden heute neuartige Computer gebaut, die **neuromorphe Chips** verwenden. In diesen Chips sind lebende Neuronen und deren Verbindungen

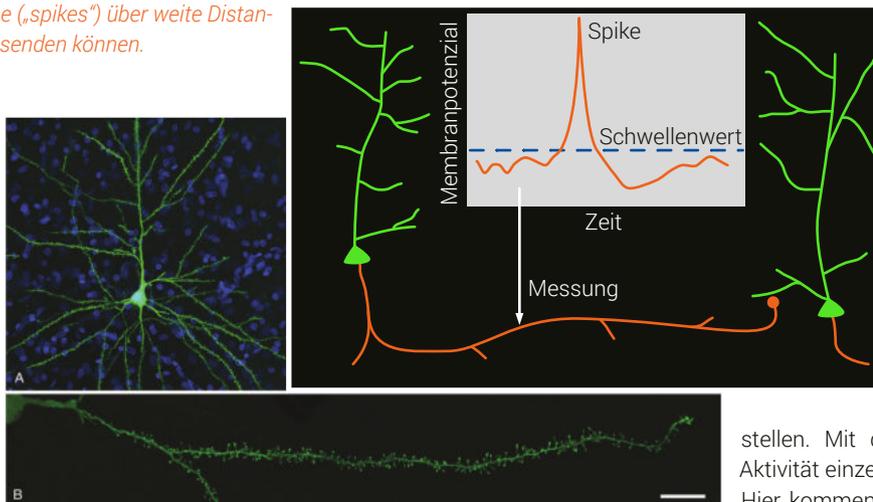


Das menschliche Gehirn zeichnet sich durch seine dicht gefaltete Hirnrinde an der Oberfläche aus. Seine raumzeitliche Aktivität kann man mit nicht-invasiven Methoden, wie funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT, Abbildung), EEG und MEG, messen. Mit statistischen Methoden kann analysiert werden, ob unter bestimmten kognitiven Bedingungen Hirnareale aktiver (rot) oder weniger aktiv (blau) sind; rIFG und pre-SMA sind zwei bestimmte Hirnareale, die hier untersucht wurden.

und Lernprinzipien als miniaturisierte elektrische Schaltkreise nachgebaut. So können wir unter kontrollierten Bedingungen erforschen, wie lebende neuronale Netze ihre Informationsverarbeitung entwickeln, und somit die Funktionsweise unseres Gehirns besser verstehen. Möglicherweise werden in Zukunft auch spezielle Computer solche Prinzipien benutzen.

Neuronale Netzwerkaktivität messen

Die Aktivität eines einzelnen Neurons lässt sich auf verschiedene Weisen relativ genau vermessen. Wir sind aber weit davon entfernt, die Aktivität aller Neuronen eines Gehirns gleichzeitig beobachten zu können. Um trotzdem Einblicke in die Arbeitsweise des Gehirns zu erlangen, entwickeln Physiker:innen neuartige Messtechniken auf allen Längenskalen. Viele kennen die bunten Bilder, die durch Hirnscanner aufgenommen werden: vor allem die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) ermöglicht Einblicke, welche Hirnregionen an speziellen Funktionen oder Tätigkeiten beteiligt sind. Mit Magnet- und Elektroenzephalografie (MEG, EEG) lassen sich die zeitlichen Abläufe von Hirnaktivierung sehr genau darstellen. Mit diesen Methoden kann man aber nicht die Aktivität einzelner Neuronen voneinander getrennt darstellen. Hier kommen Elektroden oder auch optogenetische Methoden (Seite 137) ins Spiel, mit denen man die Aktivität von Tau-



← 8000 Neuronen verbinden das visuelle System einer Fliege mit ihrem zentralen Nervensystem.

senden Neuronen gleichzeitig messen und sogar gezielt Neuronen aktivieren kann. Solche groß angelegten Messungen ergaben, dass die Aktivität einzelner Neuronen zwar zufällig wirkt, das Zusammenspiel der Neuronen aber klare, großskalige Muster und Strukturen entwickelt. Um zu beantworten, was zwischen diesen Skalen passiert, werden weiterhin Theorien benötigt, die die verfügbaren Puzzleteile zu einem großen Ganzen zusammenfügen.

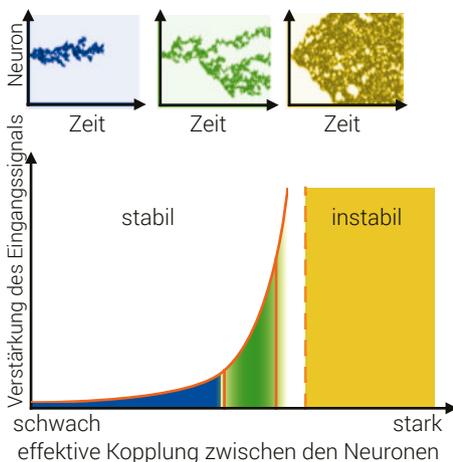
Kollektive Zusammenarbeit der Neuronen

Die Zusammenarbeit der Neuronen, und insbesondere die kollektive Dynamik neuronaler Netze, lässt sich mit Ansätzen der statistischen Physik und der Informationstheorie untersuchen. So findet man mit diesen Mitteln zum Beispiel Hinweise auf stabile Zustände, zu denen ein System sich auch nach einer Störung zurückbewegt. Sie erlauben dem Netzwerk, eine Gedächtnisspur vorheriger Inputs (z. B. Bilder) aufrechtzuerhalten.

Damit eine Information zügig und zuverlässig im Netzwerk weitergeleitet wird, muss dieses sehr schnell und sensitiv auf äußere Einflüsse reagieren. Gleichzeitig soll es aber nicht überaktiv werden: In solchen überaktiven „Gewitterzuständen“ liegt beispielsweise die Ursache epileptischer Anfälle. Eine Balance zwischen Sensitivität und Stabilität findet man in der Nähe von Phasenübergängen. Im Bereich dieser Übergänge reichen kleine Änderungen in der Kopplung der Neuronen aus, um das Netzwerk je nach Aufgabe sensitiver oder ruhiger zu machen.

Künstliche neuronale Netze

Die Idee, biologische neuronale Netze nachzuahmen – nicht um das Gehirn zu untersuchen, sondern um Künstliche Intelligenz zu schaffen – ist etwa 80 Jahre alt. Damals hoffte man auf künstliche Systeme, die beispielsweise abgefangene Nachrichten von gegnerischen Kriegsparteien automatisch übersetzen könnten. Diese Hoffnung wurde zwar enttäuscht, trotzdem stellt das damals geschaffene sogenannte Perzeptron-Modell auch heute noch die Grundlage künstlicher neu-



Neuronale Netze müssen sensitiv auf den Input reagieren, dürfen jedoch nicht instabil werden. In der Nähe eines Phasenübergangs sind die Bedingungen ideal, denn hier können kleine Änderungen in der Kopplung die Sensitivität sogar je nach Aufgabe recht einfach verändern (grüner Bereich). Die obere Reihe illustriert, wie viele Neurone in den drei verschiedenen Kopplungsstärkezonen im Laufe der Zeit beteiligt sind.

Viola Priesemann und Johannes Zierenberg

LERNEN ALS SELBSTORGANISATION

Unser Gehirn lernt, indem es die Verbindungen, die Synapsen, zwischen Neuronen verstärkt oder abschwächt. Synaptische Verbindungen können auch neu erzeugt und wieder vernichtet werden. Dadurch wird das komplexe Netzwerk in unseren Köpfen ständig umgebaut. Trotzdem funktioniert es meist zuverlässig. Wie genau es seine Funktion entwickelt und erhält, steht im Fokus aktueller Forschung, sowohl in der quantitativen Neurowissenschaft, als auch in der theoretischen Physik. Zum Beispiel wissen wir, dass die externe Welt sehr geordnet in bestimmten Hirnarealen abgebildet wird. So gibt es eine Karte unserer Körperoberfläche im somatosensorischen Cortex: Neuronen, die die Finger abbilden, liegen wohlgeordnet neben denen der Handfläche. Auch ein Bild unserer Welt ist in einer Landkarte im visuellen Cortex hinterlegt. Wie solche Karten selbstorganisiert entstehen, konnte in Modellen nachvollzogen werden. Allerdings ist das nur ein kleiner Baustein der Informationsverarbeitung. Die meisten Fragen des emergenten Lernens warten noch auf ihre Lösungen, die in Zukunft das Design neuartiger Computer bestimmen könnten.

ronaler Netze dar. Für die Entwicklung solcher Modelle wurden 2024 John Hopfield und Geoffrey Hinton mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Das Herzstück dieser Modelle sind künstliche Neuronen, die Information immer dann weiterleiten, wenn die Eingabe einen gewissen Schwellenwert überschreitet. In einem Netzwerk zusammengeschaltet, können die künstlichen Neuronen komplexe Aufgaben lösen. Sie erhalten eine Lernregel und passen mithilfe von Trainingsdaten die Verbindungen untereinander so lange an, bis sie die gestellten Aufgaben zufriedenstellend erfüllen. So wurden tiefe neuronale Netze entwickelt, die Bilder klassifizieren oder Eingaben transformieren. Letztere können beispielsweise aus einer Aminosäuresequenz eine passende Proteinstruktur vorhersagen (Seite 133) oder Texte und Bilder aus wenigen Anweisungen generieren. Für die Physik ist besonders spannend, dass neue Entwicklungen es ermöglichen, neuronale Netze so zu trainieren, dass sie physikalische Zustände statistisch korrekt generieren können. Dies eröffnet die Möglichkeit, künstliche Netze in der Zukunft für digitale Experimente zu nutzen.

Trotzdem sind die künstlichen Netze in vielen Aspekten „Black Boxes“, und was genau beim Lernen passiert, ist nach wie vor unklar. Es ist auch Aufgabe der Physik, die Funktionsprinzipien zu entschlüsseln und zu verbessern. Zum Beispiel wissen wir, dass rekurrente, also rückgekoppelte, Netzwerke lernen können, Muster zu vervollständigen oder sogar deren zeitlichen Verlauf vorherzusagen. Obwohl wir die Funktionsweise der Netze noch nicht vollständig verstanden haben, sind ihre Leistungen in manchen Aspekten deutlich besser als die des menschlichen Gehirns – und es gibt noch viel Entwicklungspotenzial.

URSPRÜNGE DES LEBENS

Bevor sich Lebewesen entwickeln konnten, mussten chemische Moleküle eine Evolution durchmachen, um zu ausreichend komplexen Objekten zu werden. Eine wesentliche Rolle spielte dabei die Ribonukleinsäure oder RNA. Keine Messung reicht weit genug zurück, um uns direkt über den Ursprung des Lebens zu informieren. Trotzdem liefern Physik und Biochemie Anhaltspunkte, um die Anfänge der biologischen Evolution im Labor nachzustellen.

Wie sich das Leben entwickelt, hat der Naturforscher Charles Darwin bereits im 19. Jahrhundert in seiner Evolutionstheorie beschrieben. Aber wie hat das Leben begonnen? Wie konnten die ersten, einfachen Moleküle der frühen Erde diese Evolution von Mikroorganismen bis hin zu Tieren und Menschen in Gang setzen?

Die Trägerin der Erbinformation in allen Lebewesen ist heute die **Desoxyribonukleinsäure (DNA)**. Aus diesem Molekül werden mithilfe der **Ribonukleinsäure (RNA)** Baupläne für Proteine ausgelesen. Ohne Proteine wiederum wäre kein biologisches Leben möglich. Doch RNA hat auch noch weitere Funktionen: Sie kann beispielsweise biochemische Reaktionen beschleunigen. In Viren ist die RNA sogar selbst Trägerin der Erbinformation.

Die RNA besteht aus vier elementaren Bausteinen, den Basen Guanin, Cytosin, Adenin und Uracil oder kurz G, C, A und U, entlang einer Ribose-Zucker-Phosphat-Kette. Sie ist relativ stabil gegen UV-Strahlung, zerfällt aber bei hohen Salzkonzentrationen und Temperaturen leicht wieder in die einzelnen Bestandteile. In Zellen verwenden große Moleküle – die Ribosomen – die RNA dazu, Aminosäuren in der richtigen Reihenfolge zu Proteinen zusammenzusetzen. Der genetische Code hierzu wird auch durch RNA definiert.

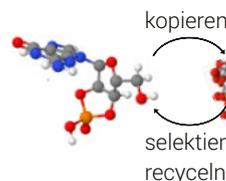
Einer mittlerweile stark vertretenen Hypothese zufolge ist die RNA nicht irgendein wichtiges Biomolekül, sondern das älteste Molekül überhaupt, das genetische Information tragen kann und gleichzeitig biochemische Reaktionen antreibt. In der RNA liegt demzufolge der Ursprung des Lebens. Wie aber konnten die RNA-Sequenzen sich erhalten und weiterentwickeln? Erst wenn wir diese molekulare Evolution der RNA verstehen, werden wir auch begreifen, wie das Leben auf der frühen Erde entstanden ist – und dabei hilft uns Physik.

Die Entstehung von Leben im Labor

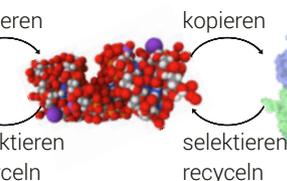
Bemerkenswert ist, dass RNA viel instabiler ist als ihre Nachfolgerin DNA. Doch genau dieser Umstand könnte zu ihrer Evolution beigetragen haben: Anfangs fügten sich die vier RNA-Bausteine zu zufälligen Sequenzen zusammen. Durch wiederholtes Auftrennen und Wiederverketten könnten dann komplexere Moleküle wie das **Ribosom** – die Proteinbaumaschine – entstanden sein.

Solche wiederholten Kreisläufe von Auf- und Abbau der RNA kommen nicht im thermodynamischen Gleichgewicht zustande. Wissenschaftler:innen suchen also nach Orten auf der frühen Erde, in denen ein thermodynamisches Ungleich-

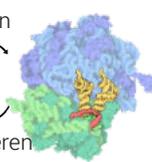
Molekülkette mit einer RNA-Base



Evolution von RNA



Proteinsynthese durch RNA



RNA ist die Basis frühen Lebens. Anfangs polymerisierten die vier RNA Basen zu zufälligen Sequenzen. Wiederholte Zyklen aus Kopieren, Selektieren und Recyclen ließen immer komplexere Sequenzen entstehen. Auf der Erde entwickelte sich so das Ribosom, ein RNA-Molekül, welches noch heute RNA-Sequenzen in Proteine übersetzt.

gewicht aus geologischer Sicht aufgetreten sein konnten: Sie könnten die Ursprungsorte des Lebens gewesen sein. Der Fantasie sind hier kaum Grenzen gesetzt: Um die ersten Schritte hin zum Leben im Labor nachzustellen, erzeugen Forschende mikroskopisch kleine Trocken-Nass-Kreisläufe.

Viele biologische Moleküle zerfallen im Wasser. Erst durch dessen Entzug werden aus einzelnen RNA-Bausteinen RNA-Sequenzen und aus einzelnen Aminosäuren die Ketten der Proteine. Demnach lässt sich in einem Wasser-Dampf-Kreislauf wiederholt RNA akkumulieren und wieder auftrennen. Auch die Oberflächenspannung des Wassers, die vielfältigen Bindungsmöglichkeiten zwischen RNA und die Bewegung der Moleküle in Temperaturgefällen werden ausgenutzt, um Nichtgleichgewichtssituationen im Labor zu schaffen, die die Evolution von RNA in Gang setzen.

Auf diese Weise wachsen aktivierte RNA-Basen schon innerhalb von 24 Stunden zu Ketten zufälliger Sequenzen an. Die frühe molekulare Evolution könnte demnach anfangs sehr schnell abgelaufen sein – möglicherweise innerhalb von Wochen oder Monaten. Dadurch besteht eine realistische Chance, diese ersten Schritte im Labor in Echtzeit zu beobachten.

Um die Evolution in Gang zu halten, müssen passende Bedingungen geschaffen und Synergien ausgenutzt werden. Da die Funktion der RNA in biologischen Zellen darin besteht, aus Aminosäuren Proteine herzustellen, liegt es nahe, beide Molekülklassen von Anfang an miteinander zu kombinieren. Läuft die RNA-Polymerisation beispielsweise viel besser ab, wenn die Bausteine der Proteine, die Aminosäuren, dabei sind? Oder unterstützt RNA die Polymerisation von Amino-

← Komplexe Nichtgleichgewichte für frühes Leben sind auf Island zu finden, etwa wie hier in einer Heißwasserquelle.

GEOLOGISCHE VORAUSSETZUNGEN

Lebewesen bauen Strukturen auf – und zerfallen in tote Systeme, wenn sie dem thermodynamischen Gleichgewicht zustreben. Damit Leben entstehen kann, muss es weit weg vom Gleichgewicht gehalten und permanent angetrieben werden. Bei der Frage nach dem Ursprung des Lebens steht daher das Nichtgleichgewicht im Mittelpunkt des physikalischen Interesses. Solche Nichtgleichgewichtssituationen können sehr vielfältig sein. Beispiele sind Gefrier- und Auftauprozesse, Feuchtigkeitsschwankungen im Tag-Nacht-Zyklus, Wärmeflüsse, welche Moleküle durch Temperaturunterschiede anreichern, oder Kapillarströmungen an lokal verdampfenden Luft-Wasser-Grenzflächen. Es sollte sich aber um Bedingungen handeln, die für die Geologie eines frühen Planeten prinzipiell möglich sind – und gleichzeitig ihre molekulare Information erhalten lassen.

Die Bedingungen erfordern ein ausgewogenes Zusammenspiel molekularer Kräfte. Die Moleküle müssen so konzentriert sein, dass sie schnell miteinander reagieren und polymerisieren können. Dabei müssen Abfallmoleküle abgegeben und neue Moleküle aufgenommen werden. Zum Beispiel muss ein mehrfacher Zyklus möglich sein, der die einzelnen Stränge der RNA erst zusammenfügt, und sie dann wieder in einzelne Stränge trennt, damit neue Kopien hergestellt werden können.

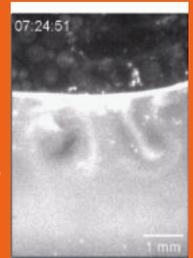
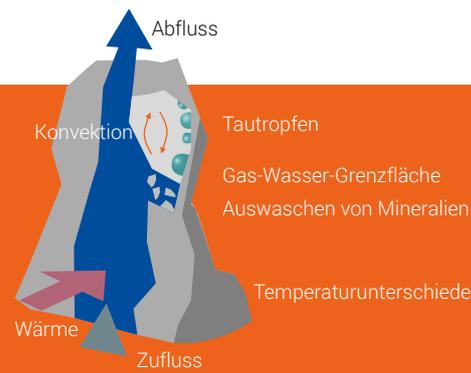
säuren? Hinweise auf solche Synergieeffekte wurden kürzlich gefunden.

Theoretische Untersuchungen und weitere Perspektiven

Auch theoretische Untersuchungen haben auf diesem Gebiet eine sehr erfolgreiche Tradition – unter anderem kommen kinetische Ratengleichungen, Spieltheorie und stochastische Simulationen zum Einsatz. Allerdings sind molekulardynamische Berechnungen für RNA sehr aufwendig. Die Möglichkeiten, eine RNA-Sequenz zu bauen, wächst nämlich exponentiell mit ihrer Länge. Das macht die Simulation der chemischen Evolution mit Computern herausfordernd. Dennoch hat der Aufbau von komplexen Nanostrukturen durch Faltung von DNA („DNA-Origami“ auf Seite 150) gezeigt, dass sich auch solche Prozesse und Selbstorganisation verstehen lassen.

Weitere Fortschritte auf diesem Gebiet würden uns nicht nur Aufschluss über den Ursprung des Lebens auf der Erde geben, sondern auch erlauben, die Wahrscheinlichkeit von **Leben auf anderen Planeten** abzuschätzen. Dazu sind komplexe und vielfältige Experimente notwendig, um alle möglichen Hypothesen über die Entstehung des Lebens zu testen und

Die grundsätzlichen Voraussetzungen für Leben könnten bei einigen Exoplaneten – wie hier dem künstlerisch dargestellten Proxima b – gegeben sein. Ist Leben dort aber auch wirklich möglich? Um diese Frage zu beantworten, wird es wichtig sein, astrophysikalische Beobachtungen mit Laborexperimente eng zu verstricken.



Geologische Nichtgleichgewichtssysteme ermöglichen es, die Entropie lokal zu senken, um die ersten RNA-Sequenzen entstehen zu lassen. Die Bedingungen werden in Laborexperimenten (rechts) nachgebildet und erlauben so eine detaillierte theoretische Beschreibung.

DNA kann mit einer Polymerase-Kettenreaktion (PCR), wie sie auch in Virentests eingesetzt werden, vervielfältigt werden. Dies erfolgt durch eine mikroskopische thermische Konvektion zwischen 60° und 95° Celsius, da die DNA dann zwischen Einzel- und Doppelsträngen hin- und herpendelt. Allerdings funktioniert die Vervielfältigung nur mithilfe eines Proteins – also eines Moleküls, das erst viel später in der Evolution entstanden ist. Ohne Proteine wird die Vervielfältigung schwierig. RNA benötigt für den, zumal sehr langsamen, Kopiervorgang hohe Salzkonzentrationen. Zusammen mit hohen Temperaturen führt dies dazu, dass die Moleküle in RNA-Basen zerfallen, anstatt sich in einzelne Stränge aufzuspalten. Die präbiotische Replikation muss zum Beispiel schon bei kleineren Salzkonzentrationen ablaufen, damit die Stränge getrennt werden können.

zu kombinieren. Im besten Fall passen diese Untersuchungen zu astrophysikalischen Beobachtungen der Atmosphären von Exoplaneten – auch wenn Leben oft Milliarden von Jahren braucht, um eine Atmosphäre zu verändern.

Laborexperimente zum Ursprung des Lebens werden uns noch lange neue Erkenntnisse darüber liefern, wie Leben mit minimalen Mitteln entstehen konnte – bis hin zu der Aussicht, durch Rekonstruktion der Evolution wesentlich effizientere Moleküle zu züchten. Ein vielversprechender Kandidat dafür ist nicht zuletzt das RNA-Molekül Ribosom, das seit Milliarden von Jahren Proteine herstellt.

Dieter Braun



LEBENDE SYSTEME BAUEN

Lässt sich Leben künstlich herstellen? Was lange Gegenstand philosophischer Spekulationen war, liegt nun im Bereich des Möglichen. Eine synthetische Zelle würde helfen, Leben besser zu verstehen und lebende Systeme nutzbar zu machen.

Die amerikanische Weltraumbehörde NASA definiert Leben als ein sich reproduzierendes chemisches System mit der Fähigkeit zur Evolution. Reproduktion allein ist kein ausreichendes Kriterium, denn nur durch die Evolution entstand in dreieinhalb Milliarden Jahren das komplexe Zusammenspiel von Tausenden von Biomolekülen, das für biologische Systeme charakteristisch ist. Wie genau dieses Zusammenspiel funktioniert, gibt uns nach wie vor Rätsel auf – selbst bei der kleinsten Einheit des Lebens, der Zelle (Seite 139).

Physikalische Modelle sind bei der Beschreibung der unbelebten Welt sehr erfolgreich. Etwas Ähnliches erhofft man sich auch für lebende Systeme: Eine künstliche Modellzelle könnte die Wissenschaft und unser Verständnis vom Leben revolutionieren. Dieser Wunsch ist zunächst von Neugier getrieben: zu verstehen, was Leben ausmacht, was es braucht, um zu entstehen, und welche anderen Formen es annehmen könnte. Darüber hinaus ließe sich mit einer künstlichen Zelle womöglich die Produktion von Wirkstoffen und Materialien grundlegend verändern, und zwar dank der einzigartigen Fähigkeit zur Evolution, die eine synthetische Zelle besitzen müsste. Künstliche Zellen könnten als Mikroroboter agieren, kranke Zellen ersetzen oder als programmierbare Arzneistoffträger dienen.

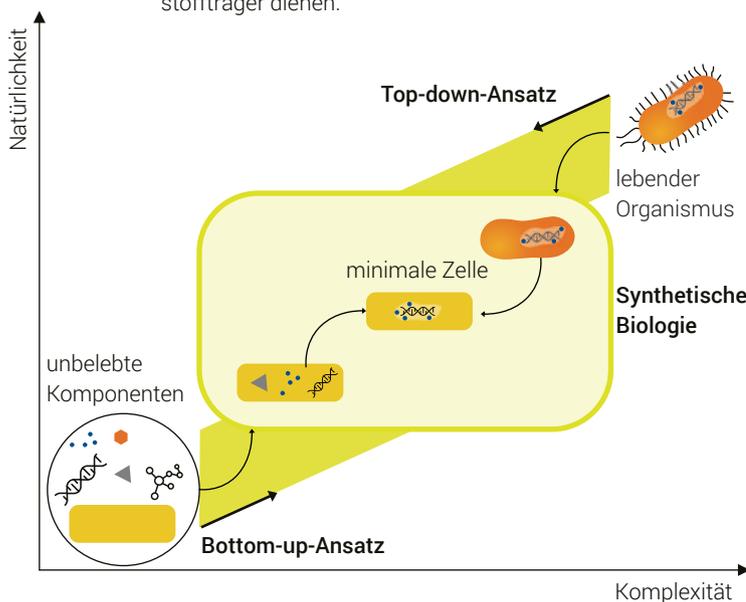
Konstruktionsprinzipien zum Bau einer Zelle

Bei der Herstellung synthetischer Zellen haben sich zwei gegensätzliche Prinzipien etabliert. Der sogenannte Top-down-Ansatz sieht vor, natürliche Zellen zu verändern, beispielsweise durch genetische Manipulation. So werden bereits heute Zellen mit neuen gewünschten Eigenschaften erzeugt. Ein Beispiel für den Top-down-Ansatz sind die „Minimal Genome Projects“. Diese wollen diejenigen Gene identifizieren, die ein Organismus mindestens besitzen muss, um leben zu können. Mittlerweile ist es gelungen, lebende Zellen mit solchen künstlichen Minimalgenomen zu erschaffen: Das Genom des Bakteriums *Mycoplasma mycoides* ließ sich von 985 auf 473 Gene reduzieren. In eine leere Bakterienhülle eingefügt, ergab sich mithilfe des künstlich erzeugten Genoms ein funktionierender Organismus.

Beim Bottom-up-Ansatz hingegen geht es um die Erschaffung einer Modellzelle aus wenigen molekularen Bauteilen. Tatsächlich steht der Beweis, dass sich eine Zelle auf diese Art nachbauen lässt, bislang noch aus. Prinzipiell müsste es jedoch möglich sein – wie sonst wäre die Entstehung des Lebens auf der Erde möglich gewesen?

Die Wahl der Bauteile

Es gibt verschiedene Ideen, wie der Nachbau einer Zelle im Labor gelingen könnte. Der Bausatz der Natur – das Inventar einer Zelle – enthält unterschiedlichste Arten von Fetten (Lipiden), Zuckern (Sacchariden), Eiweißen (Proteinen), DNA und RNA. Aus diesen Bestandteilen müssen Wissenschaftler:innen die Bauteile identifizieren, die sie für eine gewünschte Funktion benötigen. Aus Lipiden lässt sich zum Beispiel eine künstliche Zellhülle formen; auch die Teilung dieser Lipidvesikel ist schon gelungen. Wenn man Proteine in deren Inneres einbringt, können die einzelnen räumlich abgegrenzten Teile einer solchen Protozelle mit zusätzlichen lebensähnlichen Funktionen ausgestattet werden. So ermöglichen Zellskelettproteine die Anpassung der Form, andere Proteine erlauben die Fortbewegung oder die Produktion von chemischer Energie aus Licht. Allerdings müssen in diesem Ansatz fertige Proteine zur Verfügung stehen – selbst herstellen können die Protozellen sie noch nicht. Alternativ könnte man deshalb auch mit den Genen arbeiten, die die Information für die gewünschten Proteine enthalten. Dann bräuchte es aber auch die zelluläre Maschinerie, die es der künstlichen Zelle ermöglicht, daraus ihre Proteine selbst herzustellen. Diese besteht



Beim Bau synthetischer Zellen kommen zwei Ansätze zum Einsatz: entweder wird „bottom-up“ aus unbelebten Komponenten eine simple Zelle aufgebaut, oder es werden „top-down“ von einer echten lebenden Zelle so lange Komponenten entfernt, bis sie gerade noch lebensfähig ist.

weiter auf Seite 149

„WIR VERSUCHEN EINE MINIMALE ZELLE ZU BAUEN, DIE SICH TEILEN KANN.“ – PETRA SCHWILLE



Petra Schwille studierte Physik und Philosophie an der Universität Göttingen. Ihre Doktorarbeit verfasste sie am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie (Göttingen) bei Nobelpreisträger Manfred Eigen. Schwille promovierte 1996 an der TU Braunschweig. Nach Stationen in den USA, in Göttingen und Dresden ist sie seit 2011 Direktorin am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried bei München. Dort beschäftigt sie sich damit, Zellen künstlich zu erschaffen.

„Die Zelle ist die kleinste Einheit des Lebens. Eine Zelle ist aber trotzdem ein unglaublich komplexes System. Wenn Sie den kleinsten Mikroorganismus nehmen, den wir bislang kennen, dann hat er immer noch um die tausend Gene. Es gab aber sicher einmal eine Zelle, die war sehr viel einfacher als die, die wir heute vorfinden. Das ist naheliegend, denn die Evolution hat dafür gesorgt, dass die Komplexität immer weiter zugenommen hat. Die einfachen Zellen gibt es nicht mehr, die finden wir auch nicht als fossile Abdrücke. Diese ersten Zellen müssen sehr primitiv gewesen sein und haben nur ganz wenige Moleküle beinhaltet. Wir überlegen uns, wie wir solche Zellen im Labor neu zusammenbauen könnten.“

Ein wichtiger Schritt ist ihr bereits gelungen: Die Konstruktion einer Lipidhülle, die Moleküle im Innern umschließt und so ein abgeschlossenes System entstehen lässt. Wann sich dieses Vorstufe einer biologischen Zelle mithilfe von Strukturproteinen durch Kontraktion teilen kann, ist jedoch noch offen.

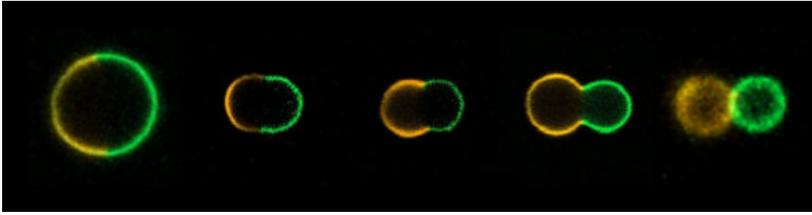
„Ich denke schon, das wir das erste sich teilende System in den nächsten fünf bis maximal zehn Jahren haben. Das lebt dann aber noch nicht. Bis wir etwas haben, von dem wir denken, dass es tatsächlich ein minimales lebendes System ist, da sind wir bei einem Zeitfenster von 20 bis 50 Jahren. Man kann das allerdings nie genau sagen. Manchmal gehen Dinge ja wahnsinnig schnell, und es gibt sprunghafte Entwicklungen, die sich nicht vorhersagen lassen. Also möglich ist alles.“

Ausdauer ist also erforderlich, von den Forschenden ebenso wie von der Gesellschaft, die die Forschung finanziert: „Große Projekte brauchen eben auch vielleicht mal fünf oder zehn Jahre Finanzierung, von denen man noch nicht weiß, ob das wirklich ein Erfolg sein wird, sondern wo man eben sozusagen einen Scheck auf die Zukunft ausstellt.“

Das vollständige Video mit Petra Schwille gibt es hier:

<https://physik-erkenntnisse-perspektiven.de/schwille>





Teilung eines Lipidvesikels. Das aus verschiedenen Fetten bestehende Vesikel stellt das Kompartiment einer synthetischen Zelle dar. Unter Umwelteinflüssen (hier die Veränderung der äußeren Salzkonzentration) lässt sich das Vesikel zur Teilung bringen.

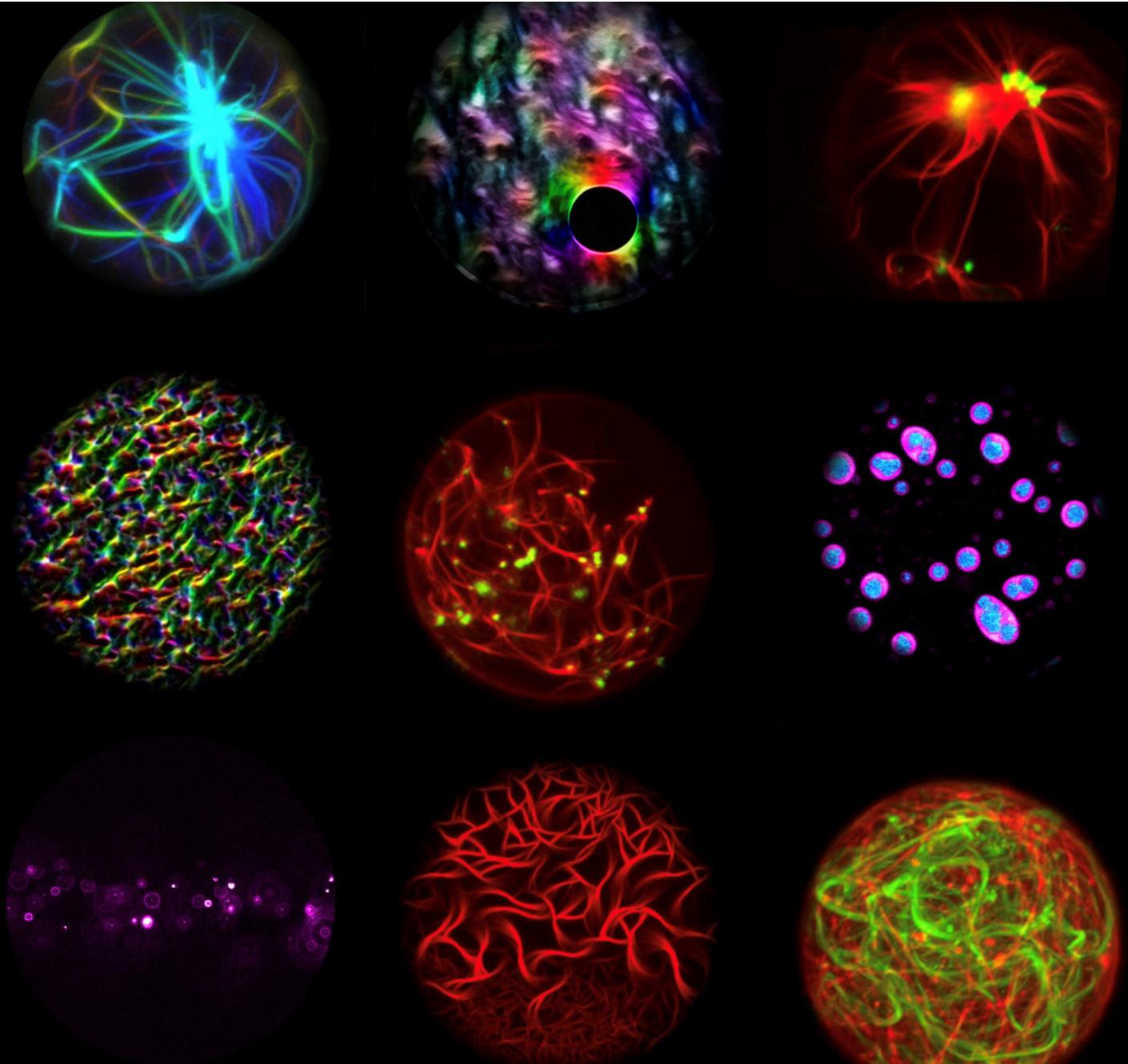
zum Teil auch aus Proteinen, und um dieses scheinbare Henne-Ei-Problem zu umgehen, werden viele Komponenten benötigt. Die Natur hat dieses System im Laufe der Evolution erzeugt. Es jetzt einfach nachzubauen, ist eine große Herausforderung.

Sind die heutigen komplexen Zellen überhaupt die richtigen Vorbilder für das Erschaffen synthetischer Zellen? Die Frage ist berechtigt, denn schließlich ist eine lebende Zelle mehr als die Summe ihrer Teile. Einfachere Varianten, die trotzdem die essenziellen Funktionen einer Zelle hervorbringen, im We-

sentlichen Selbst-Replikation und Evolution, sind durchaus denkbar (Seite 139).

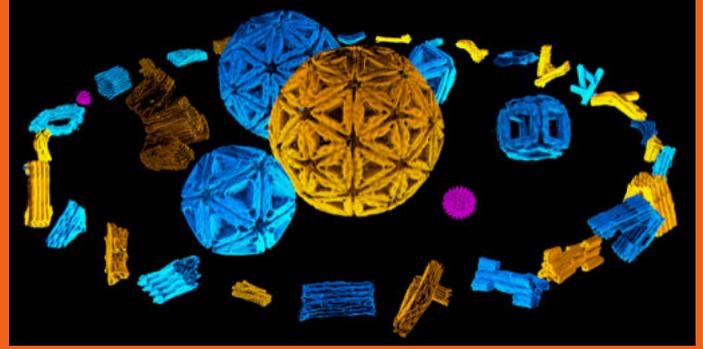
Neue Molekülbaukästen

Das motiviert einen radikaleren Ansatz: Anstatt eine Zelle exakt aus den Komponenten zu bauen, die in heutigen Zellen vorliegen, entwerfen Vertreter:innen dieser Forschungsrichtung einen eigenen einfacheren Bausatz an molekularer Hardware. Als das Leben auf der Erde entstand, standen schließlich zunächst auch nur verhältnismäßig einfache Mo-



DNA-ORIGAMI

DNA-Origami verwendet DNA nicht als Bauplan oder Erbinformation, sondern direkt als Baumaterial für Nanostrukturen. DNA besteht aus einer Abfolge von Nukleotiden, die wiederum aus einer Base, einem Zucker und einem Phosphatrest bestehen. Das Genom einer Zelle besteht meist aus einer DNA, die in einem Doppelstrang vorliegt, in dem Basen paarweise zusammengefügt sind. Basis der nanotechnologischen Faltekunst ist hingegen ein mehrere Tausend Basen langer Einzelstrang von DNA. Dieser wird durch Hunderte kurze, am Computer entworfene und dann synthetisch hergestellte DNA-Schnipsel in die gewünschte Form gebracht. Dazu müssen die kurzen Schnipsel an fest definierten Stellen an den Einzelstrang binden und ihn so in Form falten. Die gewünschte Struktur entsteht am Ende durch Energieminimierung: Die DNA findet sich so zusammen, dass sich die maximale Anzahl an Basenpaarungen ausbilden kann. So können beliebige Nanostrukturen aus DNA hergestellt werden. DNA-Origami ist nutzbar zum Bau von Komponenten für synthetische Zellen, Träger für Medikamente oder ganz allgemein als molekulares Steckbrett, um an definierten Positionen andere Komponenten anzubringen. Auch Nanokapseln oder Virenfänger wurden aus DNA hergestellt.



DNA-Origami-Strukturen wurden mit dem Elektronenmikroskop abgebildet und nachträglich koloriert (gelb, blau). Zum Größenvergleich sind ein Membranprotein mit 800 kDa Molekulargewicht (magenta, oben links) und ein Hepatitis-B-Virus Kernkapsid (magenta, unten rechts, 35 Nanometer Durchmesser) gezeigt.

leküle zur Verfügung. Trotzdem ermöglichten sie die grundlegenden Eigenschaften des Lebens wie Zellteilung, Wachstum und Evolution. Ein Eigenbau kann sich an dem orientieren, was wir über den Ursprung des Lebens wissen (Seite 145) – muss es aber nicht. Jede Art von molekularer Hardware, die Information in Funktion übersetzt, kommt grundsätzlich infrage. So gibt es Ansätze, molekulare Hardware für synthetische Zellen mit Methoden der Nanotechnologie zu entwickeln, genauer mit **DNA- oder RNA-Origami**. Wie bei Papier-Origami werden dazu die kettenförmigen Nukleinsäuren DNA oder RNA im Nanometer-Maßstab zu zwei- und dreidimensionalen Strukturen umgeformt. Sie verschlüsseln kopierbare Informationen, können aber gleichzeitig selbst Funktionen ausführen – sodass die komplexen Übersetzungsmechanismen der Zelle umgangen werden können. Die dafür erforderlichen Faltungen lassen sich durch Simulationen vorhersagen (Seite 133), sodass ein computergestütztes Design molekularer Nanostrukturen machbar ist. Auch gänzlich synthetische Moleküle werden für ihren Einsatz in synthetischen Zellen erprobt. Zum Beispiel lässt sich aus diesen Polymeren eine künstliche Zellhülle herstellen.

Wenn künstliche Zellen erst einmal ein Eigenleben führen, ist die **Ethik** gefragt. Zu überlegen ist spätestens dann, ob Gentechnikkgesetze auch auf diese Zellen anwendbar sind oder ob es neue Gesetze dafür braucht. Schon heute wird die Forschung aktiv von Expert:innen aus Theologie, Philosophie und Soziologie begleitet. Siehe dazu auch „Ethik in der Forschung“ auf Seite 327.

Wichtig bei der Wahl des Baustoffs ist es, das Endziel nicht aus den Augen zu verlieren: den Bau einer synthetischen Modellzelle, die Eigenschaften von Leben aufweist, also vor allem eine Evolution durchlaufen kann. Anstatt Eigenschaften von Leben einzeln nachzubauen, sollte der Fokus deshalb auf der Ermöglichung der Evolution liegen. Evolution kann dann die Eigenschaften, die wir Leben zuschreiben, im Laufe von Generationen selbst hervorbringen. Bisher gibt es noch kein Beispiel für einen offenen Evolutionsprozess in künstlichen Systemen, also einen Prozess, der stetig komplexere Weiterentwicklungen hervorbringt, die bei der Konstruktion des

Systems nicht absehbar waren.

Doch gelänge es, dann könnten synthetische Zellen die industrielle Produktion revolutionieren:

So könnten Materialien mit der Fähigkeit entstehen, sich selbst zu regenerieren, an veränderte Bedingungen anzupassen und eigenständig weiterzuentwickeln. Ob der Übergang zwischen Materie und Leben im Labor gelingen wird, ist deshalb eine der spannendsten Fragen unserer Zeit.

Kerstin Göpfrich

◀ Beispiele für die Konstruktion synthetischer Zellen mit natürlichen proteinbasierten Bausteinen, DNA-Nanotechnologie und synthetischer Chemie

GRENZEN ERKENNEN UND

PERSPEKTIVEN IN DER GRUNDLAGENFORSCHUNG

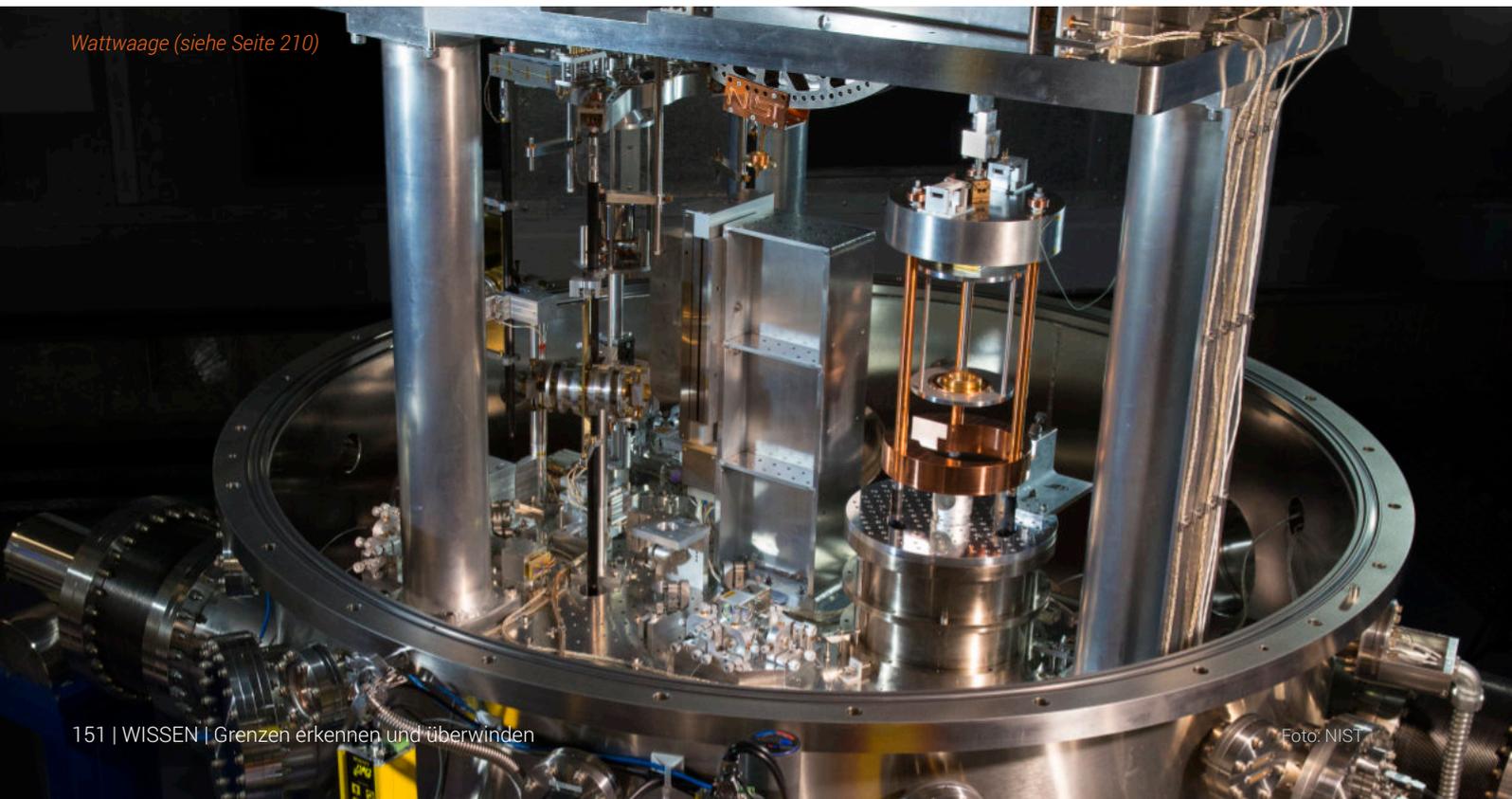
In der Physik wird immer wieder Unerwartetes und Neues entdeckt. Steht ein besseres Mikroskop oder Teleskop zur Verfügung, kann man damit noch kleinere Strukturen erkennen oder in noch größere Entfernungen schauen und sieht dann plötzlich Objekte und Phänomene, die noch nie beobachtet wurden. Verbesserte Messverfahren, spezielle Materialien oder die Präparation neuer komplexer Systeme eröffnen Fenster zur physikalischen Welt, die vorher geschlossen waren. Zum Beispiel haben Gravitationswellendetektoren uns vor zehn Jahren ein zwar von Einstein vorausgesagtes, jedoch bis dato technisch nicht realisierbares, gravitatives Auge ins Universum geöffnet. Neue Horizonte eröffnen sich auch, wenn man ein weitreichendes Theorem zum ersten Mal beweist, eine noch bessere Computersimulation durchführt oder bislang nicht bekannte Methoden der Datenanalyse, wie in der künstlichen Intelligenz oder dem neuromorphen (dem Gehirn abgeschauten) Rechnen anwendet, die vollkommen neue Strukturen und Einsichten liefern. Neues und Unerwartetes ergibt sich praktisch täglich auf allen Ebenen der Physik und macht sie so spannend!

Wenn es darum geht, die physikalische Terra Incognita zu betreten, etwas substanziiell Neues in der Natur zu finden, neue

Phänomene, neue Zusammenhänge, neue Gesetze, dann gibt es viele Möglichkeiten:

- Originelle **Ideen** für Experimente oder theoretische Untersuchungen;
- das Ausmessen bekannter Phänomene mit **höherer Präzision** oder das Vordringen in Bereiche, die uns bisher verschlossen waren, wie z. B. die Untersuchung von Systemen auf kleinsten Distanzen, bei höchsten Drücken und Dichten oder bei tiefsten Temperaturen; dorthin zu gelangen, wo noch niemand war, zu anderen Planeten, Asteroiden oder Kometen oder sogar in den interstellaren Raum; oder Teleskope in den Weltraum zu bringen, um die Strahlung, die uns Informationen liefert, unbeeinträchtigt von der Atmosphäre zu empfangen;
- Entwicklung **neuer oder verbesserter** (z. B. mathematischer oder numerischer) **Methoden**, die Anwendung besserer Algorithmen, von KI und der Einsatz von immer leistungsfähigeren Computern: Die Physik komplexer Systeme, die Gitter-Eichtheorie (die exakte Quantenchromodynamik) oder die Datenanalyse von Messungen am

Wattwaage (siehe Seite 210)



ÜBERWINDEN

Ohne die erkenntnisorientierten theoretischen und experimentellen Arbeiten in den 20er-Jahren des letzten Jahrhunderts wären Produkte wie Laser, medizintechnische Anlagen, LEDs und vieles mehr nicht möglich geworden. Dabei hätte zu der Zeit niemand an so weitreichende Anwendungen gedacht oder sich diese auch nur vorstellen können. Heute aber beruhen ganze Wirtschaftszweige auf den damaligen Arbeiten. Ähnliches sehen wir jetzt in der beginnenden Anwendung verstrahlter Photonen oder künstlicher Intelligenz – mit noch unabsehbaren weiteren zukünftigen Entwicklungen.

CERN oder von astronomischen Beobachtungen profitieren davon. Die Entwicklung von Quantenalgorithmen für zukünftige Quantencomputer verspricht die Bearbeitung komplexer Probleme aus der Chemie, den Materialwissenschaften, der Physik der kondensierten Materie und anderer Bereiche.

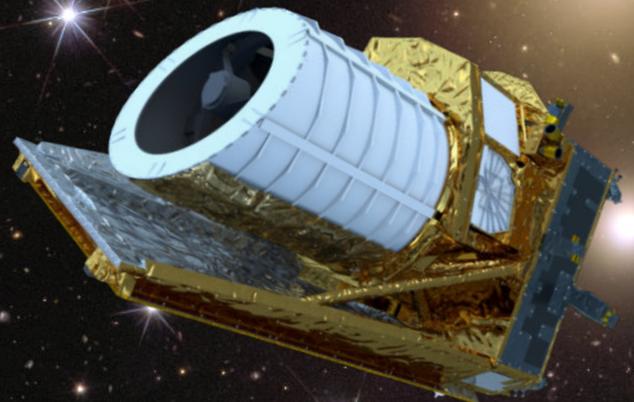
Neben dieser generellen Strategie, Neues zu finden, gibt es offene, ungelöste Fragen oder Unstimmigkeiten im Gesamtgebäude aus physikalischer Theorie und Experiment, die andeuten, dass wir bisher eben noch nicht alles richtig verstanden haben. Solche Fragen zielen dabei in eine bestimmte Richtung, denn es ist im Rahmen unserer Modelle schon bekannt, wonach wir suchen. Zu den großen offenen Fragen gehören:

- Die Frage nach der **Dunklen Materie**, Materie, die aufgrund beobachteter Phänomene eigentlich da sein muss, die wir aber nicht „sehen“. Da geht es einerseits um großräumige Phänomene im Universum, aber auch um die Suche nach neuen Teilchen, die diese Dunkle Materie ausmachen könnten. Trotz einer fast hundertjährigen Suche haben wir leider immer noch keinen einzigen Hinweis darauf, was es mit dieser Dunklen Materie auf sich hat. Sind es wirklich

neue Teilchen, oder ist es doch eine modifizierte Gravitationstheorie, oder beides kombiniert? Diese Frage ist vollkommen offen.

- Die Frage nach der **Dunklen Energie**, die sich schon Einstein gestellt hat und sich aus theoretischen Überlegungen zur Dynamik des Universums ergibt, ist ebenfalls völlig ungelöst. Was treibt das Universum zur beobachteten (beschleunigten) Expansion?
- Eine große Frage aus der allgemeinen Relativitätstheorie ist die sogenannte **kosmische Zensur**. Obwohl aus einem Kollaps von Neutronensternen sowohl **Schwarze** als auch sogenannte **Weißer Löcher** (sozusagen das Gegenteil eines Schwarzen Lochs) entstehen können, wurden bisher keine Weißen Löcher gesehen. Wir kennen das Naturgesetz nicht, welches einen kollabierenden Stern zwingt, ausschließlich in einem Schwarzen Loch zu enden.
- Die **Baryonen-Asymmetrie**: Die Quantenmechanik sagt, dass nach dem Urknall Materie und Antimaterie, beides bestehend aus Baryonen, in gleicher Weise erzeugt sein

Zwei miteinander wechselwirkende Galaxien, beobachtet mit dem Euclid-Teleskop



sollten. Die Frage ist nun, warum wir aber im Universum nur Materie und kaum **Antimaterie** sehen.

- Wie entsteht die **Masse der Neutrinos**?
- Besitzt die **Quantenmechanik fundamentale Grenzen**? Dabei können Grenzen z. B. die Masse oder Energie der Quantensysteme sein oder die Distanz, über die Systeme verschränkt werden können. Damit hängt die Frage zusammen, wie der klassische Grenzfall der Quantenmechanik streng formuliert werden kann.
- Gibt es neben unserer Erde **Leben auf anderen Planeten**? Und wie kann man Leben dort überhaupt nachweisen?

Neben diesen Fragen gibt es noch offene Fragen innerhalb unseres theoretischen Gebäudes:

- Gravitation sollte wie alle anderen physikalischen Felder quantisiert, d. h. aus kleinsten Entitäten, den **Gravitonen**, „zusammengesetzt“, sein. Die Theorie der Gravitation lässt sich aber mit den bekannten Methoden nicht quantisieren – auch hat man diese Gravitonen experimentell noch nicht gefunden. Obwohl es verschiedene Ansätze zur Quantengravitation wie die Stringtheorie, die Schleifenquantengravitation, die kanonische Quantengravitation

on und weitere gibt, konnte noch kein Ansatz überzeugend ausformuliert werden. Alle Ansätze modifizieren aber die etablierten physikalischen Theorien derart, dass es eine winzige Verletzung des fundamentalen Einsteinschen Äquivalenzprinzips geben sollte – eine wesentliche Motivation für viele einschlägige Experimente.

- Daran schließen sich Fragen an, wie denn die mathematischen **Singularitäten im Zentrum von Schwarzen Löchern** zu verstehen sind, also die theoretische Aussage, dass sich die gesamte Masse eines Schwarzen Lochs (oft Milliarden von Sonnenmassen) in einem „mathematischen Punkt ohne Ausdehnung“ konzentriert. Die Allgemeine Relativitätstheorie ist zwar „clever“ genug, diese Singularitäten in uns nicht zugängliche Bereiche zu legen, aber befriedigend ist das nicht. Außerdem stehen Singularitäten im Widerspruch zur Quantentheorie.
- Damit hängt auch das **Informationsparadoxon** zusammen. Da Schwarze Löcher nur durch drei Parameter (Masse, Spin und Ladung) bestimmt sind, muss jede darüber hinausgehende Information von Objekten, die in das Schwarze Loch fallen, vernichtet werden. Das steht im Widerspruch zur Quantenmechanik. Man erhofft sich eine Lösung dessen im Rahmen einer Quantengravitationstheorie.

Beobachtung, Simulation und mit Beobachtungsunschärfe versehene Simulation des Schwarzen Lochs in der Galaxie M87 zu zwei Zeitpunkten.

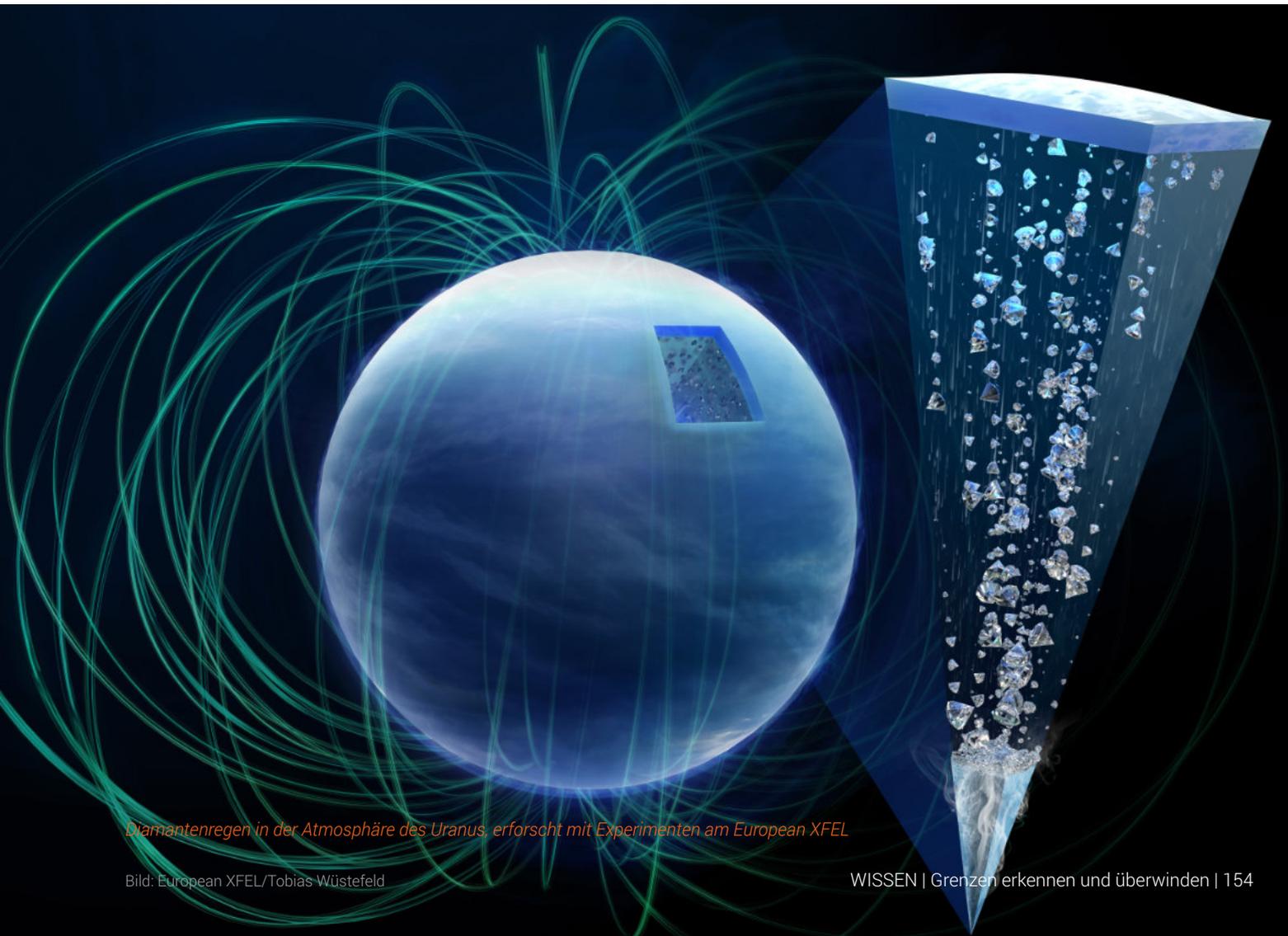
- Was wird uns die Quantenmechanik in Zukunft noch alles bieten? Diese Frage kann hier nur allgemein und vage gestellt und beantwortet werden, weil die Quantenmechanik unsere Intuition auf eine harte Probe stellt. Während die Postulate der Quantentheorie alle Experimente perfekt beschreiben, sind diese doch sehr abstrakt und wenig an unsere Anschauung angelehnt. Es gibt so merkwürdige Zustände wie die „Verschränkung“ – wir wissen über ein System mehr als über seine Einzelteile! Gerade diese Verschränkung ist aber der Stoff, mit dem Quantencomputer arbeiten werden. Es kann sein, dass noch weitere **Strukturen der Quantenmechanik** gefunden werden, von denen wir uns heute noch gar keine Vorstellung machen. Das ganze **Potenzial der Quantenmechanik** auf begrifflicher wie auch auf technischer Ebene ist heute noch nicht absehbar.
- Wie beschreibt man **Vielteilchen-Nichtgleichgewichtssysteme**? Welche Strukturen bilden sich auf welchen Skalen? Können wir irgendwann komplexe biologische Systeme vollständig physikalisch beschreiben?

Zusammengefasst stellen sich grundlegende Fragen nach einer gemeinsamen Zukunft von Gravitationsphysik und Standardmodell (SM) der Elementarteilchenphysik. Auch die Fragen, welche Überraschungen die Quantenwelt noch zu bieten

hat und wie man komplexe Systeme im Nichtgleichgewicht bis hin zum Leben modelliert, werden uns noch lange beschäftigen.

Wahrscheinlich wird die Physik nie abgeschlossen sein. Vielleicht werden wir auch neue, kreativere Methoden der Erkenntnisgewinnung finden, vielleicht werden neue Rechenmethoden mit Quantencomputern oder KI-Simulationen und -Modellierungen ganz neue Konzepte hervorbringen. Ganz sicher ist, dass Physik immer spannend bleibt und die Natur uns immer neue Fragen stellt – und wir der Natur. Und es ist sicher eine der schönsten Herausforderungen dabei mitzuwirken, diese Fragen nach den Regeln der Natur zu beantworten.

Claus Lämmerzahl, Dieter Meschede und Joachim Ullrich



Diamantenregen in der Atmosphäre des Uranus, erforscht mit Experimenten am European XFEL

KI UND BIG DATA VERÄNDERN DIE PHYSIKALISCHE FORSCHUNG

Künstliche Intelligenz – besonders im Zusammenhang mit großen Datenmengen – verändert unser tägliches Leben. Auch die Physik befindet sich im Umbruch in eine neue Ära, in der der Umgang mit Daten und die Möglichkeiten, diese vielfältig zu verwenden, eine enorme Rolle spielen werden. Datenzentrierte Forschung ist ein neues Standbein, das unsere konventionelle Forschung nicht ersetzen, aber sinnvoll ergänzen wird.

Die physikalische Forschung ist seit jeher mit einer Menge an Daten konfrontiert. Nur eine detaillierte Analyse der Forschungsdaten führt zu einem grundlegenden Verständnis der in der Natur ablaufenden Prozesse und ist die Voraussetzung für jeglichen Erkenntnisgewinn. Waren bisher Experiment, Theorie und computergestützte Wissenschaft die drei Säulen – Paradigmen – der physikalischen Forschung, so werden diese gerade um ein Standbein – die datenzentrierte Forschung – erweitert. Sie hat zwei entscheidende Voraussetzungen: Erstens braucht es große Datenmengen, die über einzelne Studien hinausgehen – auch Big Data genannt. Dies wird durch das Zusammenführen und die Zugänglichkeit von Forschungsergebnissen in Dateninfrastrukturen nach den [FAIR-Prinzipien](#) ermöglicht.

Zweitens braucht es neuartige Analysemethoden, die es erlauben, Trends zu finden, die nur in solch großen Datenmen-

gen ersichtlich werden. Dies ist ein Bereich, in dem die rasante Entwicklung von Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) hilft.

Das vierte Paradigma der Materialwissenschaften

Die Zahl der aus verschiedenen Atomen zusammensetzbaren Materialien ist praktisch unendlich, und es besteht kein Zweifel daran, dass es Formen der kondensierten Materie gibt oder geben könnte, die bessere Eigenschaften und Funktionen aufweisen als die bereits bekannten. Doch selbst die bisher bekannten Materialien sind nicht ausreichend erforscht, und unser Wissen über ihre Eigenschaften und ihre Synthese ist für bahnbrechende Neuerungen oft nicht detailliert genug. Durch Hochdurchsatzscreening – sei es experimentell oder computergestützt – können wichtige Informationen über Eigenschaften zahlreicher Materialien gesammelt werden, die grundsätzlich zu neuen Entdeckungen führen können. Die unermessliche Zahl möglicher Materialien kann durch eine solche explizite Suche aber nicht abgedeckt werden. Neuartiges kann allerdings mit datenzentrierter Forschung gefunden werden.

Die Materialwissenschaften sind stark von allen vier der „4V“ von Big Data betroffen. Welcher dieser Aspekte – Volume, Variety, Velocity oder Veracity – am stärksten zutrifft, hängt von der jeweiligen fachlichen Ausrichtung und von den Untersuchungsmethoden ab. Die enorme Vielfalt an Eigenschaften und Materialien macht die Datenprozessierung und -analyse spannend, stellt aber eine große Herausforderung für jede Dateninfrastruktur dar. Den [FAIR-Prinzipien](#) zu genügen, erfordert eine eingehende Beschreibung der Art und Weise, was die Daten bedeuten und wie sie gewonnen wurden. Diese muss von den Wissenschaftler:innen zur Verfügung gestellt werden, und zwar über die in den Fachpublikationen hinaus enthaltenen Abbildungen und Daten.

Eine umfangreiche Dateninfrastruktur, die nicht nur all das leistet, sondern auch mit einfach zu bedienenden Up-/Download- und Suchfunktionen ausgestattet ist, ist Voraussetzung dafür, dass datenzentrierte Forschung in diesem extrem breiten Forschungsfeld überhaupt erfolgreich sein kann. Die Nationale Forschungsdateninfrastruktur (NFDI, nfdi.de/), deren Ziel es ist, Forschungsdaten aus allen Bereichen der Forschung, auch über die Naturwissenschaften hinaus, FAIR zu machen, ist gerade im Aufbau. Dabei entwickelt das Konsortium FAIRmat die webbasierte Software NOMAD ([NOMAD-lab.eu](https://nomad-lab.eu/)), um dieses ambitionierte Ziel für das Feld der kondensierten Materie/der Materialwissenschaften in in-

FAIR-Prinzipien:

Daten sollen auffindbar (**F**indable), zugänglich (**A**ccessible), miteinander austauschbar (**I**nteroperable) und wiederverwendbar (**R**eusable) sein.

Die Herausforderungen der großen Datenmengen lassen sich mit vier englischen Schlagworten, den **4V**, zusammenfassen:

Volume – die schiere Menge der Daten

Variety – die Vielfalt und Heterogenität der Daten in Form und Bedeutung

Velocity – die Geschwindigkeit, mit der Daten hinzukommen

Veracity – die Unsicherheit in der Datenqualität

Diese Herausforderungen von Big Data wirken sich auf die verschiedenen Fachgebiete innerhalb der Physik sehr unterschiedlich aus. Während man es zum Beispiel bei Signalen aus dem Universum mit enormen Datenmengen im Prinzip desselben Datentyps zu tun hat, sind die Messergebnisse aus der Quantenoptik nicht umfangreich, aber für jedes Experiment individuell. Hier kommen die Metadaten ins Spiel, also die Beschreibung der Daten. Ohne eine detaillierte Beschreibung, die uns erst ermöglicht, Zusammenhänge zu erkennen und den Grund für unterschiedliche Messergebnisse zu finden, sind unsere Daten nämlich so gut wie wertlos. Letztlich liegt es aber auch maßgeblich an der Qualität der Methoden der KI, ob wir Neuartiges finden können. Hier wird es von entscheidender Bedeutung sein, Algorithmen zu entwickeln, die genügend Vorhersagekraft haben, um über Bekanntes hinauszugehen.

ternationaler Kollaboration umzusetzen. NOMAD unterstützt die Forschenden auch dabei, aus den Daten Wissen zu generieren.

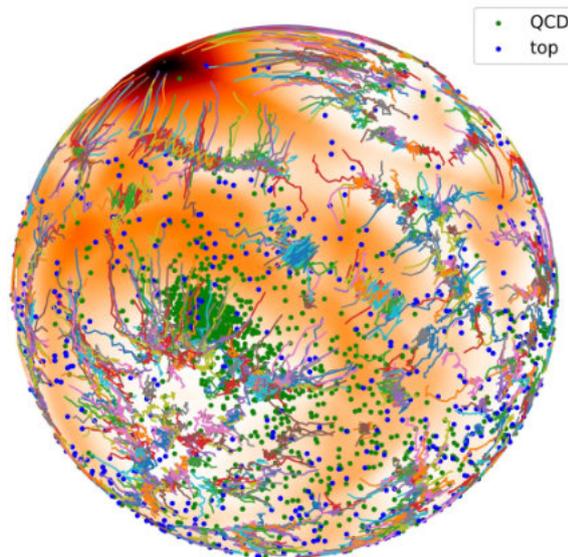
In den Materialwissenschaften geht es nicht nur darum, bekannte Materialien zu charakterisieren, sondern auch darum, neue zu finden. Diese könnten in diversen Anwendungen eingesetzt werden – von der Elektronik in unzähligen Geräten, über Solarzellen, Beleuchtung, Werkzeug, Transportmittel, bis hin zu Implantaten. Hier wiederum sind die unterschiedlichsten Eigenschaften entscheidend, seien es die atomare Struktur, elektronische, thermische, elastische Eigenschaften oder die Wechselwirkung von Materie mit Licht. KI kann helfen, neue Materialien oder Funktionen schneller zu finden. Eine besondere Bedeutung kommt hier den sogenannten Deskriptoren zu. Das sind Parameter, die eine Eigenschaft, eine Funktion, ein Material oder eine ganze Materialklasse wesentlich prägen. Darauf basierend lassen sich wiederum vielversprechende Materialien identifizieren oder vorhersagen. Lässt sich die Suche nach erfolgversprechenden Kandidaten dadurch eingrenzen, können damit auch Hochdurchsatzstudien effizienter gemacht werden. Big Data und KI werden damit das Forschungsfeld in Zukunft ergänzen und enorm bereichern. Sie werden auch dazu beitragen, einzelne, vor allem manuelle Arbeitsschritte zu vereinfachen oder gar überflüssig zu machen. Unsere Labore und etablierten wissenschaftlichen Methoden werden sie aber nicht ersetzen.

Big Data und KI am LHC

Die Detektoren am weltgrößten Teilchenbeschleuniger, dem Large Hadron Collider (LHC) am Forschungszentrum CERN in Genf, produzieren pro Sekunde mehrere Petabyte Rohdaten. Das sind Tausende Festplatten pro Sekunde, und das 24 Stunden am Tag. Um solche Datenmengen zu analysieren, hilft die Simulation: Das Standardmodell (SM) der Teilchenphysik sagt voraus, welche Teilchen mit welchen Energien und Impulsen wie oft und wo im Detektor erzeugt werden. Spannend sind die Daten, die Abweichungen von diesen Vorhersagen zeigen. Diese werden – teils in Echtzeit – aus den Rohdaten herausgepickt. Sowohl die Simulationen als auch die nachfolgenden Datenanalysen laufen verteilt auf Rechenzentren rund um die Welt.

Beantwortet werden sollen Fragen wie die nach der Entstehung des Higgs-Felds im leeren Raum, das den Elementarteilchen ihre Masse gibt. Auch die Tatsache, dass es im Universum sehr viel mehr Teilchen als Antiteilchen gibt, verlangt noch nach einer Erklärung. Und was sind der Ursprung und das Wesen Dunkler Materie und Dunkler Energie im Universum? Motiviert von diesen und anderen Fragen wird das LHC-Programm in den kommenden 15 Jahren die aktuelle Datenmenge mehr als verzehnfachen. Wie können wir damit umgehen?

KI-Methoden in der Teilchenphysik können drei strukturelle Ziele erreichen. Erstens können sie wichtige Bausteine einer Analyse besser, genauer und schneller machen. Als 2015 gezeigt wurde, dass Bildverarbeitungsnetzwerke die klassischen Analysemethoden für Hadronen im Detektor in allen



Latenter Raum eines Normalized Autoencoders, eines neuronalen Netzes, trainiert zur Identifikation verschiedener hadronischer Jets (QCD vs Top-Quark-Zerfall). Autoencoder werden in den kommenden Experimentalläufen zur Suche nach Anomalien in LHC-Kollisionen eingesetzt.

Aspekten übertreffen, war die Richtung klar. Dasselbe gilt für KI-Simulationen in der Theorie.

Zweitens kann KI den Vergleich zwischen Simulationen und Messungen verbessern. Wenn wir klassisch experimentelle und simulierte Daten vergleichen, dann nutzen wir oft einzelne Messgrößen, deren Abweichung sich schon grafisch leicht erschließen lässt. Neuronale Netze können hingegen Datensätze komplett in beliebig vielen Dimensionen vergleichen und Abhängigkeiten entdecken, die sich rein menschlicher Analyse nicht oder nicht so leicht erschließen. Außerdem können wir wenig interessante Detektoreffekte schon vor der detaillierten Analyse eliminieren. Diese inversen Simulationen revolutionieren gerade auch die Astrophysik und die Gravitationswellenphysik.

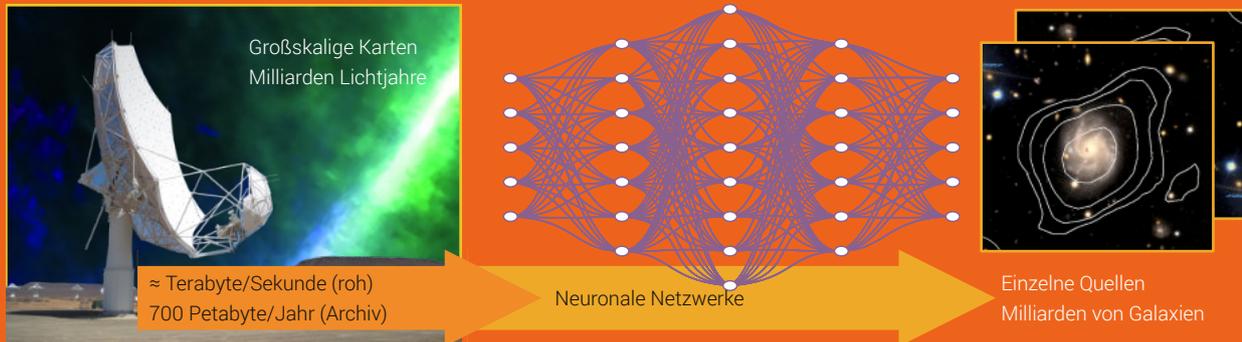
Drittens zeichnet sich durch unsere fundamentalen Fragen eine ganz neue Richtung ab. Wenn wir neue Teilchen und Wechselwirkungen in LHC-Daten suchen, kann ein neuronales Netzwerk die LHC-Kollisionen entsprechend auswählen. Auch die vielen Symmetrien, die die Teilchenphysik prägen, können von der KI genutzt werden – und möglicherweise könnten KI-Methoden in Zukunft eine ganz neue fundamentale Symmetrie entdecken.

Eine Datenrevolution in der Astronomie

Auch die Rätsel der Astronomie können mithilfe von Big Data und KI angegangen werden: Wie sah unser Universum vor mehr als zwölf Milliarden Jahren aus, als sich die ersten Galaxien gerade erst gebildet hatten? Wie haben sich Sterne, Galaxien und die Strukturen des intergalaktischen Mediums seitdem entwickelt? Um mehr über diese Fragestellungen zu lernen, werden in der Astronomie große Himmelsdurchmusterungen durchgeführt. Dabei vermessen Instrumente mehrere Milliarden Objekte am Nachthimmel durch Bildaufnahmen und die Messung der Energieverteilung der von ihnen

SQUARE KILOMETRE ARRAY (SKA)

Das Square Kilometre Array (SKA) Radio-Interferometer und seine Vorläuferexperimente vermessen einen Großteil des beobachtbaren Universums im Zentimeter- bis Meter-Wellenlängenbereich. Das Ziel ist, mehr über Radioquellen wie Galaxien, aktive Galaxienkerne und Pulsare zu lernen. Außerdem soll die großskalige Struktur von neutralem Wasserstoff, dem häufigsten Element im Universum, von heute bis zurück zur Zeit etwa 200–300 Millionen Jahre nach dem Urknall kartiert werden – der Zeit, als sich die allererste Generation von Sternen und Galaxien gebildet hat. Das SKA wird seit 2022 gebaut und soll ab 2029 wissenschaftliche Himmelsdurchmusterungen in 3D durchführen. Die Datenraten werden etwa 0,5–1 Terabyte pro Sekunde betragen, und einzelne tomografische 3D-Bilder werden typischerweise aus 2^{15} Bildpunkten und 2^{16} Frequenzkanälen bestehen. Für die ersten 15 Jahre sind insgesamt etwa 8,5 Exabyte, also eine Million Terabyte, an Daten geplant. Diese Daten zu filtern, zu sortieren und zu analysieren, überschreitet die Möglichkeiten langsamerer, traditionell genutzter Computeralgorithmen oder gar der menschlichen Betrachtung von Daten durch Astronom:innen. Für neue Entdeckungen, beispielsweise im frühen Universum, als Galaxien anders aussahen als Galaxien heute, brauchen wir daher Algorithmen, die sowohl schnell große Datenmengen bearbeiten können, als auch in der Lage sind, anhand neuer Daten zu lernen, d.h. ihre Modelle anzupassen. Genau das wird KI leisten können.



Tomografie von kosmischen Strukturen mit dem Square Kilometre Array Observatory (SKAO). Das Instrument misst im Radiobereich mittels dem Signal von neutralem Wasserstoff die Dichte und Temperatur von großskalig verteiltem Gas im Universum, bis zur Zeit der Entstehung der ersten Sterne und Galaxien. Diese Tomografie erzeugt Datenraten von Exabytes pro Tag, was die Anwendung neuartiger Methoden des maschinellen Lernens notwendig macht.

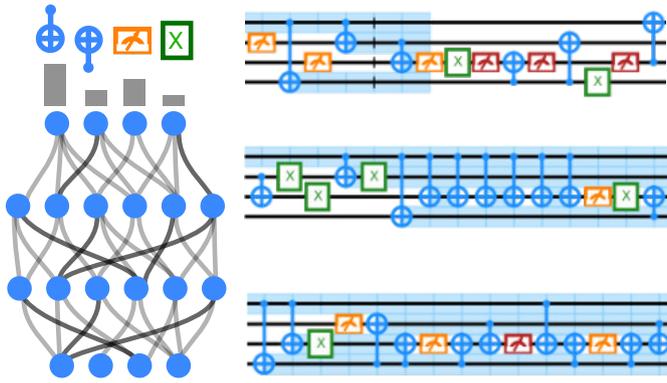
ausgesendeten Strahlung. Für die Analyse dieser Milliarden von Karten und Spektren werden Algorithmen des maschinellen Lernens benutzt, die häufig ursprünglich für die Bilderkennung und Textanalyse entwickelt wurden. Modelle wie neuronale Netzwerke, auf denen KI aufbaut, sind zudem in der Lage, vielfältigere Informationen zu lernen als bisherige vereinfachte Modelle. So wurden zum Beispiel Formen und Helligkeitsverläufe von Galaxien in der Vergangenheit unter der Annahme einer Ellipsenform und einfachen Profilen analysiert, während Netzwerke auch Helligkeitsverläufe und Eigenschaften von sehr unregelmäßigen Galaxien zuverlässig vermessen können. Gleichzeitig liefert die Astrophysik als wissenschaftliche Anwendung Anreize für Entwicklungen, die in der Bildanalyse keine Priorität hatten, wie eine robuste Fehlerbestimmung und die Bestimmung hochdimensionaler Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Modellparameter. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis mithilfe von Netzwerkmodellen und KI in den riesigen zur Verfügung stehenden Datenmengen neue Entdeckungen gemacht werden, die zuvor nicht oder nur schwer möglich gewesen wären.

Bessere Quantencomputer

Quantencomputer und andere vielversprechende Quantentechnologien sind gegenwärtig noch in der Entwicklung. Die Anzahl der Recheneinheiten, also Quantenbits, die in einem Quantencomputer realisiert werden, steigt ständig.

Die Messung an einem einzelnen Quantenbit ergibt ein verrauschtes Signal, aus welchem der eigentliche Quantenzustand erst ermittelt werden muss. Dies ist eine Aufgabe, auf die neuronale Netze schon erfolgreich in Experimenten trainiert werden. Die Herausforderung steigt erheblich, wenn wir uns für den Quantenzustand von vielen Quantenbits interessieren, eben bei einem Quantencomputer. Die Beschreibung eines solchen Quantenzustands erfordert eine enorme Menge an Informationen, die exponentiell mit der Zahl der Quantenbits ansteigt. Zur Charakterisierung eines derartigen Quantenzustands kann man viele Messungen durchführen, von denen jede einzelne die Quantenbits zufällig in der einen oder anderen Konfiguration zeigt. Es ist möglich, ein neuronales Netz mit dieser sehr großen Menge an Messdaten zu trainieren, damit es später in der Lage ist, die Statistik der Messungen zu reproduzieren. Auch zur genauen und effizienten Charakterisierung eines experimentellen Aufbaus kann die KI in Zukunft herangezogen werden, z. B. um zu bestimmen, welche Kopplungen zwischen den Hunderten von Quantenbits vorliegen.

Die mit Abstand größte Herausforderung für zukünftige Quantencomputer ist der Zerfall der gespeicherten Quanteninformation. Dieser Zerfall wird durch das Rauschen der Umgebung bewirkt, z. B. durch Schwankungen in elektrischen und magnetischen Feldern, sowie dadurch, dass der Quantencomputer Energie abgibt. Um Quanteninformation den-



Ein neuronales Netzwerk schlägt vor, welche Quantenoperationen angewendet werden sollen, wenn ein gewisser Quantenzustand vorliegt (links). Dadurch entstehen Strategien zur Fehlerkorrektur in einem Quantencomputer, welche im Laufe des Trainings immer besser werden (rechts, von oben nach unten).

noch zu schützen, wird die Quantenfehlerkorrektur angewendet. Dabei muss aus dem Ergebnis von Messungen abgelesen werden, welche Fehler passiert sind. Gerade bei der Quantenfehlerkorrektur ist die Interpretation dieser Messergebnisse aber sehr knifflig. Hier können neuronale Netze helfen, indem sie zu einem beobachteten Messresultat vorschlagen, welche Fehler möglicherweise dahinter stecken könnten.

Man kann aber noch einen Schritt weiter gehen: Anstatt von einem bekannten Ansatz zur Quantenfehlerkorrektur auszugehen und ihn durch neuronale Netze zu verbessern, gelingt es inzwischen auch, Fehlerkorrekturansätze komplett neu zu entdecken und zu optimieren. Der Schlüssel dazu liegt im verstärkenden Lernen. Dabei handelt es sich um einen Satz von KI-Methoden, welche dazu geeignet sind, optimierte Strategien von selbst zu entdecken. Damit lassen sich zum Beispiel menschliche Leistungen in Brettspielen wie Go oder Schach weit übertreffen. Dabei wird eine Belohnungsfunktion definiert (zum Beispiel ergibt der Gewinn eines Spiels eine hohe Belohnung) und auf diese wird dann automatisch optimiert, um zu einer möglichst guten Strategie zu gelangen. Diese Art von Verfahren wird inzwischen auch erfolgreich in der Quantenphysik angewendet, insbesondere auf solche komplexen Fragestellungen wie die Entdeckung neuer Fehlerkorrekturstrategien. Ganz allgemein können mit ähnlichen Methoden auch Kontrollsequenzen für Quantencomputer optimiert werden oder besonders sensitive Quantensensoren entwickelt werden.

Eine wichtige Herausforderung in der Anwendung solcher KI-Methoden in Quantenexperimenten ist oft die Geschwindigkeit. In manchen Szenarien muss das neuronale Netz aus den Messergebnissen rasch eine geeignete Kontrollsequenz für die Quantenbits generieren, und zwar schneller, als das Rauschen die Quanteninformation zerstört. Je nach physikalischer Plattform kann es sich dabei um Zeitskalen bis hinunter zu einzelnen Mikrosekunden handeln. Das erfordert dann die hochoptimierte Implementation neuronaler Netze auf der Hardware-Ebene nahe am Experiment, zum Beispiel in speziell dafür konstruierten Mikrochips.

Eine weitere attraktive Herausforderung in dem Bereich der Quantentechnologien ist das Design komplett neuer Quantenexperimente. In dem Fall gibt man ein Ziel vor, z. B. die Erzeugung eines besonderen, verschränkten Quantenzustandes vieler Photonen. Der Computer betrachtet dann viele

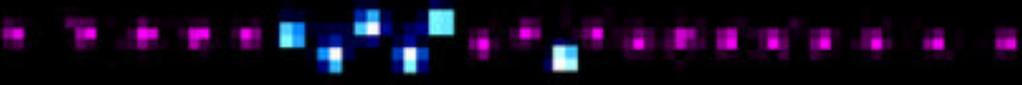
verschiedene mögliche experimentelle Aufbauten, in diesem Falle bestehend aus einzelnen Komponenten wie Strahlteilern und Photonenquellen, und entscheidet, welche dieser Aufbauten besonders geeignet sind, um das Ziel zu erreichen. KI hilft, diesen hochgradig komplexen Optimierungsprozess effizient zu gestalten.

In Zukunft wird die Anwendung der KI auf Quantentechnologien eine Änderung der Denkweise erlauben, indem nicht detaillierte Strategien sondern eher übergeordnete Ziele definiert werden, welche dann von der KI erreicht werden.

Bessere KI dank Physik

Maschinelles Lernen und KI sind in vielen Bereichen der Physik sehr hilfreich. Umgekehrt kann aber auch die Physik zu diesen Gebieten beitragen. Auf der theoretischen Seite geschieht das schon seit Langem durch die Anwendung von Methoden der statistischen Physik, um zum Beispiel den Lernprozess in neuronalen Netzen besser zu verstehen. Auf der experimentellen Seite hat sich das Feld des neuromorphen Computing entwickelt. Dabei geht es darum, die üblichen künstlichen neuronalen Netzwerke, welche auf digitalen Computern implementiert sind, durch neuartige physikalische Systeme abzulösen. Die Motivation dafür ist das rasante Wachstum des maschinellen Lernens und der inzwischen enorm gestiegene Energieverbrauch der neuronalen Netze, insbesondere von solchen Anwendungen wie den großen Sprachmodellen, die Grundlage für Chatbots wie ChatGPT sind. Um dem zu begegnen, sollen neue hardwarenahe Lösungen entwickelt werden, die analog und hochgradig parallel sowie energieeffizient arbeiten. Beispiele dafür sind speziell entwickelte optische Systeme auf dem Chip sowie besondere elektrische Schaltkreise, jeweils mit vielen veränderlichen Parametern, die während des Trainings geändert werden. Hier hat sich für die Physik ein großer Bereich mit zahlreichen komplexen Herausforderungen (z. B. dem effizienten Training solcher Systeme, basierend auf physikalischen Prinzipien) eröffnet, aber auch potentiell sehr großer Auswirkung auf die Anwendungen der KI in allen anderen Bereichen von Technologie, Wissenschaft und Gesellschaft.

Claudia Draxl, Caroline Heneka, Florian Marquardt und Tilman Plehn



MIT PRÄZISIONSMESSUNGEN AUF DER SUCHE NACH NEUER PHYSIK

Bisher lassen sich alle Experimente mittels der heutigen Kenntnisse über die Physik genau vorhersagen oder beschreiben. Die Suche nach neuer Physik geht jedoch weiter. Diese Suche erfordert extrem genaue Messungen, um neue Effekte sichtbar werden zu lassen.

Das Weltbild der Physik basiert auf der Überzeugung, dass allen Naturphänomenen allgemeingültige Regeln – die Naturgesetze – zugrunde liegen. Dabei gab es im Laufe der Geschichte allerdings manche Überraschungen – die im 20. Jahrhundert etwa zur Formulierung der Quantenmechanik und der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie führten. Ein weiteres eindrucksvolles Beispiel ist die **Paritätssymmetrie**. Sie besagt, dass sich ein physikalisches System nach einer räumlichen Spiegelung immer noch genauso verhält wie vorher. Nach derzeitigem Wissen gilt diese Symmetrie für die Schwerkraft und die starke und elektromagnetische Wechselwirkung. Von der schwachen Wechselwirkung wird sie aber verletzt. Das zeigte sich erstmalig im Jahre 1956 in dem von Chien-Shiung Wu nach ihr benannten beeindruckenden und eleganten Wu-Experiment. Für viele Theoretiker:innen war diese Entdeckung ein Schock, fiel es doch schwer zu glauben, dass es tatsächlich einen intrinsischen Unterschied zwischen links und rechts geben sollte.

Kurzzeitig fanden manche Trost in der Idee, dass sich die Symmetrie wiederherstellen lässt, wenn man die räumliche Spiegelung (P) mit der Ladungskonjugation (C) kombiniert – also die Teilchen durch ihre Antiteilchen ersetzt (**CP-Symmetrie**). Das schien zunächst eine gute Idee zu sein – bis auch diese 1964 durch Experimente widerlegt wurde.

Solcherlei unerwartete Beobachtungen treiben die Physik vor sich her und werfen immer wieder große Fragen auf. Es ist daher bedeutsam, grundlegende Gesetze mit immer höherer Präzision und Empfindlichkeit zu erforschen. Einerseits verfestigen solche Tests unser objektives Wissen über die Natur. Andererseits bieten sie die Möglichkeit, nach „**neuer Physik**“ zu suchen, die uns vielleicht dazu zwingt, unsere Annahmen zu überdenken.

Es gibt zwei grundsätzliche Ansätze für solche Tests. Erstens gehen wir, bildlich gesprochen, an Orte, an denen wir noch nie waren. Das kann bedeuten, das Universum mit radikal neuen Instrumenten wie Gravitationswellendetektoren zu beobachten oder Teilchenbeschleuniger mit immer höherer Energie zu bauen. Tatsächlich waren über viele Jahre Experimente mit immer größeren Beschleunigern eine ergiebige Quelle für neue Erkenntnisse über die Grundlagen der Physik. Zu einigen Fragen, etwa zu den Symmetriebrechungen, konnten sie aber bisher keine Antworten liefern. Möglicherweise sind die benötigten Energien, um diese Effekte zu erzeugen und messbar zu machen, praktisch nicht erreichbar.

Beim zweiten Ansatz bleiben wir in den Grenzen kleiner Labore. Photonen sowie einzelne geladene Teilchen, Atome und Moleküle sind sehr gut geeignete Testobjekte. Der innere Aufbau letzterer aus fundamentalen Teilchen kann mit relativ einfachen Prinzipien mit sehr hoher Genauigkeit theoretisch beschrieben werden. Viele ihrer Eigenschaften können extrem präzise gemessen werden – was nicht nur das Potenzial birgt, „neue Physik“ in Abweichungen zwischen Vorhersage und Messung zu entdecken, sondern auch zu einigen wichtigen Anwendungen führt.

Experimente an Großforschungsgeräten

Inspiziert durch die auf kosmologischen Skalen beobachtete **Materie-/Antimaterie-Assymmetrie**, vergleichen Experimente mit präzisionsphysikalischen Techniken die fundamentalen Eigenschaften von Protonen und Antiprotonen oder von Wasserstoff und Antiwasserstoff. Das Antimaterieprogramm am Forschungszentrum CERN machte in den vergangenen Jahren signifikante Fortschritte: Beispielsweise wurden von der BASE-Kollaboration die **magnetischen Momente** von Protonen und Antiprotonen mit einer relativen Präzision von eins zu einer Milliarde verglichen und mit dieser Genauigkeit für gleich befunden – mehr als 3000-mal genauer als der beste vorhergehende Test. Auch die Verhältnisse von Ladung zu Masse bei Protonen und Antiprotonen ließen sich mit milliardstel Präzision vergleichen, was den präzisesten Test der Materie/Antimaterie-Symmetrie im Baryon-Sektor darstellt.

Die ALPHA-Kollaboration am CERN verwirklichte außerdem die erste Messung des freien Falls von Antiwasserstoff im Gravitationsfeld der Erde. Die gemessene Erdbeschleunigung ergibt, dass sich innerhalb der Messunsicherheit Materie und Antimaterie unter **Gravitation** identisch verhalten, entsprechend den Voraussagen der allgemeinen Relativitätstheorie. Alles andere hätte tiefgreifende Konsequenzen für unser Verständnis von Raum und Zeit – gerade deshalb muss dieses Resultat aber weiteren Präzisionsmessungen standhalten.

Eine weitere Klasse von Experimenten mit höchster Empfindlichkeit für neue Physik besteht in Messungen **elektrischer Dipolmomente** (EDM) von Elementarteilchen. Beispielsweise wurden einige Szenarien der Supersymmetrie bereits vor dem Start des LHC durch präzise Messungen des EDM des Neutrons ausgeschlossen. Beim EDM des Elektrons wurden durch Messungen mit polaren Molekülen deutliche Verbesserungen der Empfindlichkeit erreicht. Aus diesen Messungen wird neue Physik durch bisher unbekannte Austauschquan-

← gemischter Ionenkristall mit ionisierten Atomen von Indium und Ytterbium zum Einsatz in einer Atomuhr

ten im gleichen Massenbereich ausgeschlossen, den auch der LHC am CERN testet.

Leptonen – die unteilbaren Elementarquanten des **Standardmodells** (SM, Seite 35) – sind besonders empfindliche Testobjekte zur Überprüfung des SM oder zur Suche nach neuer Physik. Beispielsweise besteht in der Messung des magnetischen Moments des Elektrons Übereinstimmung mit theoretischen Voraussagen auf dem Niveau von eins zu zehn Milliarden. Hier existieren allerdings Inkonsistenzen mit unabhängigen Messungen der Feinstrukturkonstante. Interessanterweise zeigt die Messung des magnetischen Moments eines anderen Leptons, des Muons, eine Abweichung von den Voraussagen des SM mit hoher statistischer Signifikanz. Ob es sich hier jedoch um grundsätzlich neue Phänomene handelt oder ob es einer Korrektur der theoretischen Voraussagen bedarf, wird derzeit in Fachkreisen intensiv debattiert.

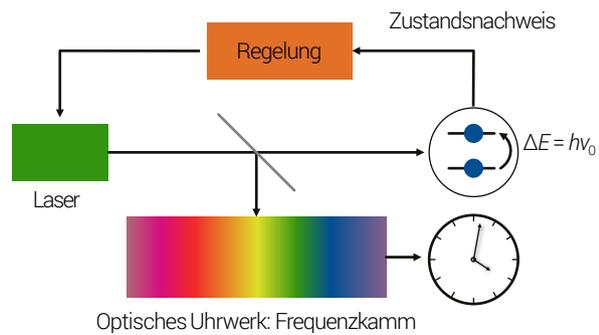
Viele der genannten Messungen lassen sich durch neue messtechnische Entwicklungen weiter verbessern. Hier spielt insbesondere die Quantenlogik eine Rolle. Dazu werden Ionen an besonders präparierte Quantensysteme gekoppelt und spektroskopiert. Ihre Spektren sind sehr genau zu vermessen und könnten bei geeigneter Wahl der Quantensysteme Abweichungen vom SM zeigen. Dies könnte z. B. CPT-Tests (T für Zeit, engl. time) zum Elektron/Positron-Proton/Antiproton-Massenverhältnis mit relativen Unsicherheiten im 10^{-17} -Bereich ermöglichen, die komplementär zu bisher durchgeführten Messungen sind.

Die genauesten Uhren der Welt

Bei welchen Wellenlängen Atome oder Moleküle Licht absorbieren oder aussenden, verrät viel über die innere Struktur dieser Teilchen und die auftretenden Wechselwirkungen. So veranlasste das Spektrum des Wasserstoffatoms Niels Bohr zur Entwicklung seines Atommodells. Willis Eugene Lamb und Robert C. Retherford entdeckten darin quantenphysikalische Feinheiten der Energiestruktur, die zur Entwicklung und zu hochgenauen Tests der Quantenelektrodynamik führten. Neben den tiefen Einblicken in die Struktur der Atome und den daraus abgeleiteten Erkenntnissen erlaubt diese Präzisionsspektroskopie auch, genaue **Atomuhren** zu bauen.

Dabei wird ein elektromagnetisches Feld erzeugt, das bei einer bestimmten Resonanzfrequenz ein Elektron des Atoms auf ein höheres Energieniveau anregt. Da der Abstand zwischen den beiden Energiezuständen durch die Quantenphysik festgelegt ist, dient die Resonanzfrequenz als zuverlässiger, auf Naturkonstanten beruhender Bezugspunkt: eine Schwingung, von der man ganz genau weiß, wie viel Mal pro Sekunde sie auftritt. Umgekehrt bedeutet das: Ist eine genau bekannte Anzahl an Schwingungen erfolgt, so ist eine Sekunde verstrichen. Dieses Konzept einer Atomuhr funktioniert so präzise und reproduzierbar, dass die Basiseinheit Sekunde genau so aus dem 9,2-GHz-Mikrowellenübergang des Cäsiumatoms abgeleitet wird.

Atomuhren sind immer genauer geworden. Dabei galt es zum einen, den Doppler-Effekt, also Frequenzverschiebungen

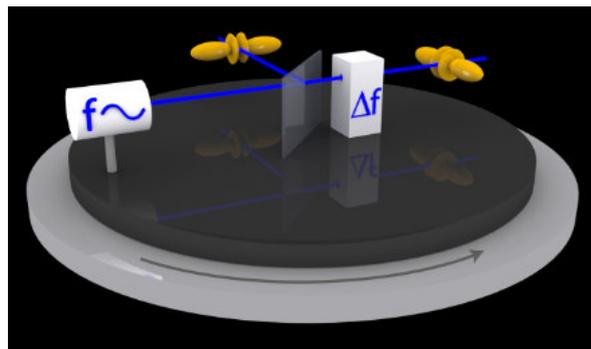


Schema einer optischen Atomuhr: Ein schmalbandiger Laser wird benutzt, um ein möglichst ungestörtes quantenmechanisches 2-Niveau-System (in einem Atom, Molekül oder im Atomkern) resonant anzuregen. Das Ergebnis des Anregungsversuchs wird von einem Zustandsnachweis erfasst und als Signal zur Stabilisierung der Laserfrequenz auf die Resonanz benutzt. Für Frequenzmessungen oder zur Realisierung einer Zeitanzeige wird ein optisches Uhrwerk in Form eines Femtosekundenlaser-Frequenzkamms genutzt, um die Laserfrequenz in den direkt elektronisch zählbaren Bereich von Mikrowellen herunterzuteilen.

durch die Bewegung der Atome, zu unterdrücken. Ein entscheidender Durchbruch hierbei war die Entwicklung der Laserkühlung von Atomen, mit der sich deren Geschwindigkeit um Größenordnungen reduzieren lässt. Für lasergekühlte Atome lässt sich in modernen Cäsium-Atomuhren die Dopplerverschiebung auf ca. 10^{-16} der Übergangsfrequenz kontrollieren. Gleichzeitig können alle anderen Störungen der atomaren Niveaus des Referenzübergangs in diesen Atomuhren mit ähnlicher Genauigkeit kontrolliert werden.

Zweitens lässt sich die Genauigkeit von Atomuhren verbessern, indem man höhere Übergangsfrequenzen nutzt. Bei diesen „optischen Uhren“ werden anstelle von Mikrowellenübergängen durch einen Laser angeregte Übergänge im optischen Spektralbereich verwendet – beispielsweise in Strontiumatomen. Weil viele Störungen der Übergangsfrequenz unabhängig vom energetischen Abstand der verwen-

Test der Lorentz-Invarianz mit optischen Uhren. Das Experiment überprüft die Symmetrie des Raums gegenüber Drehungen. Zwei einzelne Yb^+ -Ionen, hier gelb gezeigt mit der ausgerichteten Wellenfunktion ihres angeregten Zustands, bestimmen die Frequenzen zweier Uhren und würden bei unterschiedlichen Frequenzen schwingen, wenn die Symmetrie gebrochen würde. Im Experiment rotiert das gesamte System mit der Erde relativ zu den Fixsternen. Diese Messungen mit Yb^+ Ionen halten aktuell den Weltrekord und schließen eine Verletzung der Lorentz-Symmetrie mit einer Empfindlichkeit im Bereich von einigen 10^{-21} aus.



deten Niveaus sind, wird der relative Einfluss solcher Störungen also kleiner.

Bei Dopplerverschiebungen, die proportional zur Frequenz sind, hilft dieser Ansatz allerdings nicht. Um hier die Genauigkeit zu verbessern, müssen die **Atome in Fallen** gespeichert werden. So lassen sie sich in Ruhe vermessen und ein störender Einfluss ihrer Bewegung kann minimiert werden.

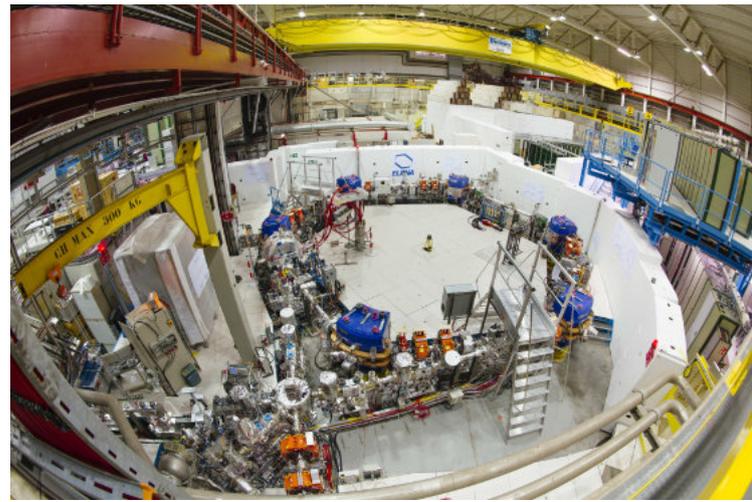
Als erster Fallentyp für optische Uhren wurden Fallen für einzelne Ionen verwirklicht (Physik-Nobelpreis 1989). Dabei wird das geladene Teilchen mithilfe elektrischer und magnetischer Felder festgehalten. Für neutrale Atome wurden später Fallen mithilfe von Lasergittern realisiert. Diese optischen Gitteruhren bieten derzeit die beste statistische Genauigkeit. Der kürzlich demonstrierte Ansatz der Multi-Ionen-Uhr bietet hier das Potenzial, auch die statistische Empfindlichkeit von Ionenuhren signifikant zu erhöhen und Synergien aus der Quanteninformation mit Ionen-Qubits zu nutzen.

Dank dieser sich ergänzenden Ansätze können optische Uhren mit sehr unterschiedlichen Elementen betrieben werden und erreichen relative Unsicherheiten im Bereich von 10^{-18} . Sie eignen sich für verschiedene fundamentale Tests, etwa der für die Wechselwirkung zwischen Quantenteilchen wichtigen Feinstrukturkonstanten oder von Aussagen der Relativitätstheorie. Im Bereich der höchsten Genauigkeiten werden Atomuhren zu relativistischen Sensoren ihrer Umgebung: Ein relativer Frequenzunterschied von $1 \cdot 10^{-18}$ wird hervorgerufen durch die relativistische Zeitdilatation bei einer langsamen Fußgängergeschwindigkeit von 0,4 m/s oder durch eine Änderung der Höhe der Uhr um 1 cm im Gravitationspotenzial an der Erdoberfläche. Eine viel diskutierte Anwendung solcher genauer Uhren ist daher die **relativistische Geodäsie**, die zur Verbesserung der Genauigkeit des terrestrischen Höhensystems beitragen könnte (siehe auch „Die Vermessung der Welt“ auf Seite 106).

Natürlich soll die Erfolgsgeschichte weitergehen. Beispielsweise lassen sich mehrere Uhren miteinander verschalten, um ihre positiven Eigenschaften zu kombinieren. Gleichzeitig untersucht man die Frage, ob sich quantenmechanische

VON DER ATOMUHR ZUR KERNUHR

Die Frequenz einer genauen Uhr soll möglichst wenig von außen beeinflusst werden. In dieser Hinsicht eignet sich der Kern eines Atoms besser als seine Elektronenhülle, weil er viel kleiner ist und seine Bestandteile stärker aneinander gebunden sind. Lässt sich also eine Resonanzfrequenz eines Kerns als Taktgeber nutzen? Geeignet ist das Isotop Thorium-229, da es eine solche Resonanzfrequenz besitzt, die sich mit Laserlicht anregen lässt. Die meisten Kernresonanzen liegen im Bereich von Röntgenstrahlung, für die es keine Laser im Labormaßstab gibt. Bis vor Kurzem war die Resonanzfrequenz des Thorium-Kerns nicht genau bekannt – bis diese doch mit einer großen Zahl von in einem Kristall eingebetteten Thorium-229-Kernen gefunden wurde. Damit öffnet sich der Weg hin zu einer präzisen Kernuhr, die eine sehr hohe Stabilität erreichen kann und neue Möglichkeiten für Uhrenexperimente auch im Bereich der Kernphysik eröffnet.



Extra Low Energy Antiproton Synchrotron ELENA, an der Antimateriefabrik des CERN. Dieser Ring entschleunigt Antiprotonen von 5,6 MeV auf 100 keV und stellt die Teilchen Hochpräzisionsexperimenten zur Verfügung, welche Materie-Antimaterie-Symmetrie und das Äquivalenzprinzip mit Antimaterie testen.

Rauschprozesse durch Verschränkung mehrerer Atome unterdrücken lassen. Ein weiterer attraktiver Ansatz liegt in der Entwicklung einer Atomuhr, die ihre Resonanzfrequenz nicht aus der Elektronenhülle, sondern aus dem Atomkern bezieht. Wegen der starken Bindung der Teilchen im Kern verspricht eine solche Uhr eine noch höhere Immunität gegen äußere Störungen und würde gleichzeitig den Bereich der beschriebenen fundamentalen Tests von der elektromagnetischen Wechselwirkung auf die Kernkräfte ausweiten.

Damit ist die Atomuhr ein gutes Beispiel dafür, wie sich Grundlagenforschung und angewandte Forschung gegenseitig beflügeln. So erfordert der Betrieb von Kommunikationsnetzwerken bei höheren Datenraten für mobile Empfänger (wie in 5G) auch eine bessere Synchronisation innerhalb des Netzwerks und damit eine hohe Zahl von möglichst robusten, langlebigen und preiswerten Atomuhren.

Die reine wissenschaftliche Neugier kann demnach ein starker Antrieb für erfolgreiche und innovative Forschung sein, auch wenn dieser Punkt von manchen politischen Entscheidungsträgern möglicherweise unterschätzt wird. Neben der Atomuhr erstrecken sich weitere Beispiele von der Quantensensorik über die Entwicklung des Internets bis hin zu sicheren Kommunikationsprotokollen, die aus der Arbeit an den Grundlagen der Quantenmechanik hervorgegangen sind.

Bei den Präzisionsmessungen für die Suche nach „neuer Physik“ handelt es sich immer um den Vorstoß in unbekanntes Gebiet, und der Erfolg solcher Experimente ist prinzipiell nicht vorhersagbar. Umso befriedigender ist es daher, dass mit der Verbesserung der Messgeräte oft auch ganz praktische Anwendungen mit Auswirkungen auf das tägliche Leben erschlossen werden können.

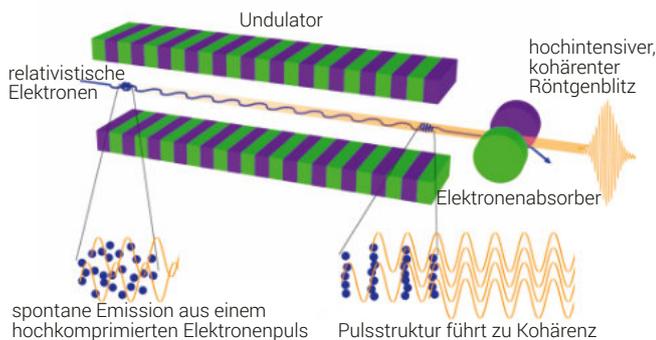
Dmitry Budker, Christian Lisdat, Tanja E. Mehlstäubler, Ekkehard Peik und Stefan Ulmer

NEUE ANSÄTZE FÜR MIKROSKOPIE UND SPEKTROSKOPIE IN RAUM UND ZEIT

Neuartige Lichtquellen lassen uns mehr und genauer „sehen“. Sie eröffnen neue experimentelle Ansätze, die eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung kombinieren.

Dynamik auf atomaren Skalen ist unfassbar schnell: Während die **Bewegung von Atomen** in Molekülen auf Zeitskalen von einigen zehn Femtosekunden ($1 \text{ Femtosekunde} = 10^{-15} \text{ s}$) geschieht, können elektronische Vorgänge in Atomen oder in kondensierter Materie nochmals um etwa zwei bis drei Größenordnungen schneller sein. Um sie zu erforschen, sind neuartige Lichtquellen mit extremen Eigenschaften nötig, deren Entwicklung und Verbesserung ein eigenes Forschungsfeld darstellt. Neue Methoden mit kurzen (Röntgen-)Lichtpulsen lassen höchstauflösende Mikroskope und Spektroskope zu **High-Speed-Kameras** werden, sodass wir erstmals extrem schnelle Prozesse in kleinsten Strukturen, wie die Bewegung von Atomen, Molekülen und Elektronen fotografieren und filmen können.

Entscheidende Fortschritte gelangen etwa bei Lasersystemen, die ultrakurze Lichtpulse mit präzise einstellbarer Wellenform erzeugen. Darauf aufbauend können nach dem Prinzip der Erzeugung sogenannter „höherer Harmonischer“ (High Harmonic Generation, HHG) beispielsweise kurzweilige extrem-ultraviolette Lichtblitze mit extrem kurzen Dauern im Bereich von 100 Attosekunden ($1 \text{ Attosekunde} = 10^{-18} \text{ s}$) gewonnen werden (siehe auch „Nobelpreis 2023“ auf Seite 167). Intensivere Pulse werden von **Röntgen-Freie-Elektronen-Lasern (X-FELs)** erzeugt. In diesen kilometerlangen Großgeräten werden stark komprimierte Elektronenpakete auf beinahe Lichtgeschwindigkeit gebracht und durch einen Slalomparcours aus periodisch angeordneten Magneten geschossen. Das bringt die Elektronen zur Emission von sehr intensiver und kohärenter Strahlung – hier im Röntgenbereich.



Funktionsprinzip eines Röntgen-Freie-Elektronen-Lasers (X-FELs).

Auch die modernsten **Synchrotronanlagen** der sogenannten vierten Generation beliefern viele Experimentierstationen gleichzeitig mit Röntgenlicht – mit einer hundertmal höheren Leuchtdichte als ihre Vorgänger. Dies ist möglich, weil der Elektronenstrahl auf einen wesentlich kleineren Querschnitt

konzentriert wird. So wird Analytik auf kleinsten Längenskalen möglich.

In vielfältigen Ansätzen werden solche Lichtpulse mit unterschiedlichsten Mikroskopie- und Beugungsmethoden kombiniert, um deren räumliches Auflösungsvermögen entscheidend zu verbessern oder die Methoden um ultraschnelle Zeitauflösung zu erweitern. In angewandteren Forschungsfeldern dienen die Innovationen eher dazu, Prozesse unter realistischen, extremen Bedingungen wie niedrigen Temperaturen in der Tiefe des Alls oder hohen Dichten in einem industriellen Herstellungsverfahren untersuchen zu können.

Lichtwellengetriebene Rastersondenmethoden

Eine dieser Methoden ist die lichtwellengetriebene Rastersondenmikroskopie. Hierbei wird eine scharfe Metallspitze bis auf wenige Ångström (10^{-10} m , also ähnlich nahe wie die Atome in einem Festkörper) an die zu untersuchende Probe herangeführt. Beim Anlegen einer elektrischen Vorspannung können Elektronen durch die verbleibende Lücke tunneln. Da der Tunnelstrom empfindlich vom Überlapp der Elektronenorbitale in der Probe und der Spitze abhängt, lässt sich durch systematisches Abrastern bei gleichzeitiger Messung des Tunnelstroms ein statisches, atomgenaues Abbild der Probenoberfläche gewinnen. Da eine Aufnahme typischerweise einige Minuten dauert, ermöglicht die konventionelle Rastersondenmikroskopie allerdings keinen Einblick in die Dynamik von Materie.

Ein Lichtpuls trifft die atomar scharfe Spitze eines Rastertunnelmikroskops und kontrolliert die mikroskopische Dynamik eines einzelnen Atoms in einem Molekül (künstlerische Darstellung).

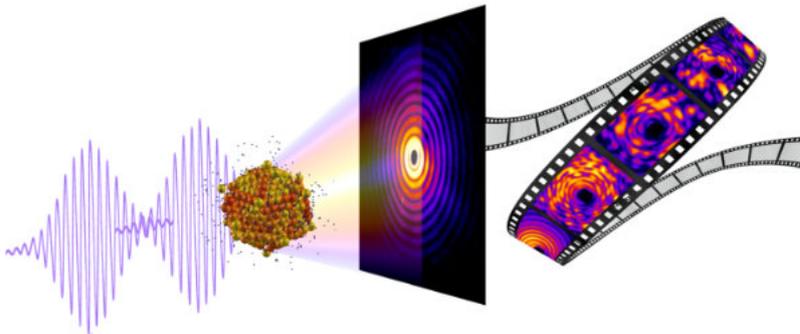
Vor einigen Jahren ist es jedoch gelungen, die Konzepte der ultraschnellen Lichtquellen mit unterschiedlichen Rastersondenvarianten zu kombinieren: Statt der konstanten Spannung, welche für den Tunnelstrom sorgt, lässt bei der ultraschnellen Rastertunnelmikroskopie das elektrische Trägerfeld der Laserpulse für kurze Dauer einen Strom fließen. Bei geeigneten, maßgeschneiderten Laserpulsen geschieht dies nur während eines Femtosekunden-Zeitfensters. Ähnlich wie ein Stroboskop liefert dies Momentaufnahmen, die zusammen ein Bild der Dynamik ergeben.

Die Anwendungsmöglichkeiten erstrecken sich (fast) über den gesamten Bereich, der



bereits durch statische Rastersondenmikroskopie abgedeckt wird: von einzelnen Atomen und einfachen oder komplexen Molekülen auf Oberflächen – inklusive deren Reaktionen über einzelne Defekte auf Halbleiteroberflächen – bis hin zu zweidimensionalen Materialien und deren Heterostrukturen. Das direkte Abtasten erlaubt es zudem, atomare Strukturen lokal zu manipulieren und Reaktionen auf Oberflächen gezielt zu steuern. Lichtgetriebene Rastersondenmikroskopie schließt auch diesen Aspekt der atomaren Manipulation mit ein und macht sie ultraschnell: eine revolutionäre Methode, die gerade erst am Anfang steht.

Filme von Elektronendynamiken mit intensiven Attosekundenblitzen



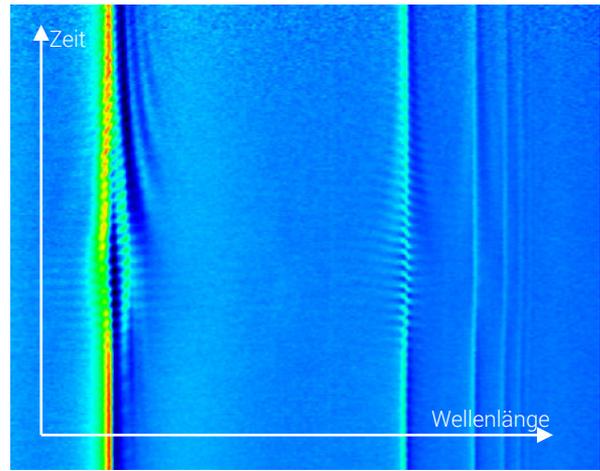
Während Rastersondenmethoden Proben direkt abbilden, bietet eine andere Methode die ergänzende Möglichkeit, Beugungsbilder aufzuzeichnen: „Coherent Diffraction Imaging“ (CDI) nutzt die kurzwelligen Lichtpulse von FELs und HHG-Quellen, um durch Röntgenbeugung Schnappschüsse von einzelnen Nanoteilchen im freien Flug aufzunehmen und so **schnelle Prozesse zu filmen**.

Etabliert ist die CDI-Methode schon mit Röntgenpulsen im Bereich von Hunderten von Femtosekunden. Allerdings sind diese Pulse zu lang, um die Bewegung von Elektronen, das Verschieben von Ladung, den Aufbau und das Aufbrechen von Bindungen aufzulösen.

Wir lernen zurzeit, Elektronendynamiken mit CDI direkt sichtbar zu machen, denn wir haben erstmalig die dafür nötigen hochintensiven Attosekunden-Lichtpulse zur Verfügung. Erste Messungen zeigen, dass diese extrem kurzen Röntgenblitze wirklich etwas anderes „sehen“. Die CDI-Bilder von einzelnen Nanoteilchen mit Attosekundenpulsen sind bei bestimmten Photonenenergien deutlich heller als solche, die mit längeren Pulsen derselben eingehenden Gesamtintensität aufgezeichnet wurden. Verantwortlich dafür sind vermutlich Resonanzen, die nur bei so extremen Pulsdauern relevant werden. Nützen könnte diese Verstärkung vor allem der Strukturbilogie, falls nun auch einzelne Proteine ausreichend helle CDI-Bilder liefern können.

Intensive Laser steuern Elektronen im Atom und Molekül

Mithilfe der Attosekundenpulse können wir außerdem lernen, die Eigenschaften von Materie mit Laserlicht zu verändern und zu steuern. Die in Atomen und Molekülen gebundenen Elektronen werden in einem Laserfeld zu einer Bewegung an-



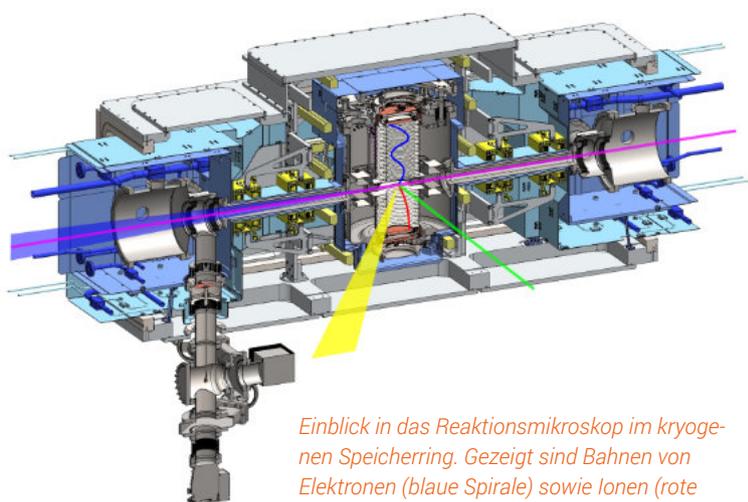
Das Absorptionsspektrum von Atomen ändert sich bei der Bestrahlung mit zwei Atto-/Femtosekunden-Lichtblitzen als Funktion ihres Zeitabstands. Wenn sich beide Blitze treffen, entsteht eine spannende, ultraschnelle Quantendynamik, die wir als gepirpte Struktur sehen.

geregt. Um diese zu messen, werden die Atome und Moleküle erneut mit Laserstrahlen beleuchtet. Man erhält ein charakteristisches Spektrum mit Absorptionslinien. Diese Linien entstehen durch die Absorption ganz bestimmter Lichtfrequenzen durch die Elektronen.

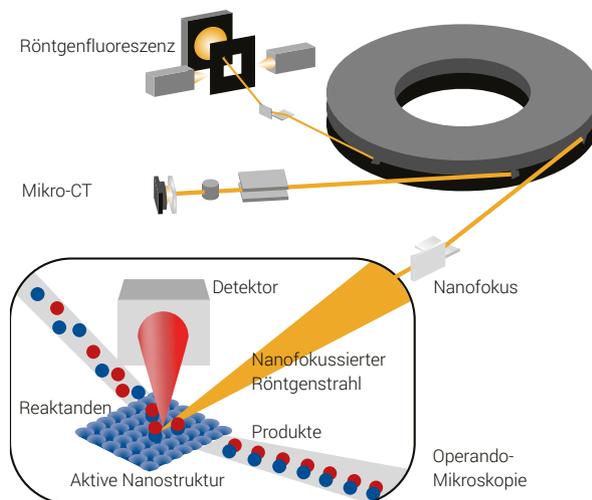
Durch das Einstrahlen sehr intensiver Laserfelder lässt sich die Form dieser Linien nicht nur bestimmen, sondern sogar aktiv verändern! Aus dem zeitlichen Ablauf der Veränderung können wir erkennen, wie etwa zwei Elektronen sowohl miteinander als auch mit dem intensiven Laserfeld interagieren. Damit ermöglicht diese Methode, neue Bewegungsabläufe in der Quantenwelt anzustoßen und sichtbar zu machen. Dies wird viele Forschungsfelder voranbringen, von der Ultrakurzzeitphysik über die Femtochemie bis hin zur Nanooptoelektronik. Für die Zukunft rücken auf diese Weise Anwendungen wie die optische Steuerung chemischer Reaktionen oder

Intensives Laserlicht wird durch Reflektion an speziellen „gechirpten“ Spiegeln auf eine Dauer von wenigen Femtosekunden verkürzt.





Einblick in das Reaktionsmikroskop im kryogenen Speicherring. Gezeigt sind Bahnen von Elektronen (blaue Spirale) sowie Ionen (rote Kurve) vor dem Nachweis auf den Detektoren, sowie Laser (gelb) und Atomstrahl (grün).



Operando-Röntgenphotoelektronenmikroskopie an einer Synchrotronanlage.

auch das ultraschnelle Quantenrechnen mit Licht näher an die Realität.

Kalte Weltraumchemie auf der Erde

Chemische Reaktionen laufen nicht nur auf Himmelskörpern wie Planeten oder Sternen ab: Selbst bei den extrem kalten Temperaturen und sehr niedrigen Dichten in den Weiten des Alls können sich Moleküle bilden. Besonders interessant sind dabei die chemischen Reaktionen in Molekülwolken, die etwa die Hälfte der sichtbaren Masse von Galaxien ausmachen.

Moleküle im Weltall lassen sich durch spektroskopische Beobachtungen mit modernen Teleskopen anhand ihrer charakteristischen Spektren ausfindig machen. Aufgrund der großen Entfernung sind uns die Reaktionswege, die zur Bildung oder Zerstörung dieser Moleküle führen, aber weitgehend unzugänglich. Es ist davon auszugehen, dass bei den extremen Bedingungen, die im interstellaren Medium vorliegen, diese anders aussehen als die uns auf der Erde bekannten Abläufe.

In einem **kryogenen Speicherring**, welcher Ionen bei Temperaturen von wenigen Kelvin auf einer Kreisbahn hält, können Molekülreaktionen durch Stöße ausgelöst werden. Ein Reaktionsmikroskop kann die dabei entstandenen Reaktionsprodukte erfassen: Elektronen, Ionen und neutrale Teilchen. Damit lassen sich deren Geschwindigkeiten und Winkelverteilung nach der Reaktion messen und somit Rückschlüsse über die Reaktionspartner, die Wahrscheinlichkeit und den Ablauf der Reaktionen ziehen. So können wir einen Einblick in chemische Reaktionen im Weltall gewinnen, der uns auf der Suche nach dem Beginn des Lebens im Universum weiterbringen kann.

Materialien bei der Arbeit zugeschaut

Um funktionale Materialien maßzuschneidern und zu kontrollieren, muss man ihre elektronische Struktur verstehen. Für viele Fragestellungen ist es deshalb unerlässlich, Experimente unter realistischen Betriebsbedingungen (operando)

durchzuführen: Beispielsweise unterscheiden sich bei Katalysatormaterialien die gemessenen Eigenschaften unter Reaktionsbedingungen von denen unter idealisierten Bedingungen. Modernste Spektroskopie- und Mikroskopiemethoden mit Röntgenstrahlung im weichen bis mittleren Röntgenbereich (wenige keV Photonenenergie, typische Bindungsenergien innerer Elektronen), wie sie durch die neueste Generation beschleunigerbasierter Speicherringquellen bereitgestellt werden, sind hierfür unerlässlich.

In der Tat hat sich erwiesen, dass die ex-situ oder unter Ultra-hochvakuumbedingungen gemessenen Eigenschaften sich nicht auf die dynamischen Bedingungen des tatsächlichen katalytischen Prozesses übertragen lassen, da die Oberflächeneigenschaften und aktiven Zustände unter Reaktionsbedingungen deutlich verändert sind. Zum Teil konnte dieses Problem durch die Entwicklung des NAP-Ansatzes (Near Ambient Pressure, im mbar-Bereich) umgangen werden. Bei diesem integralen Ansatz fehlt jedoch der wichtige Aspekt der Heterogenität und der unterschiedlichen Reaktion auf der Oberfläche. Die Elementverteilung unter realistischeren Reaktionsbedingungen ist jedoch entscheidend für das Verständnis der katalytischen Leistung. Neueste Instrumente kombinieren daher den NAP-Ansatz mit hochauflösender **Röntgenphotoelektronenmikroskopie**, sodass z. B. Hydrierungsreaktionen mit chemischem Kontrast direkt verfolgt und damit bisher unverstandene Prozesse entschlüsselt werden können.

Die strukturelle Komplexität moderner Materialien, die oft Strukturelemente im Nanometermaßstab enthalten, erfordern Operando-Fähigkeiten, die zunehmend über die Möglichkeiten der heutigen Speicherringquellen hinausgehen. Ihr volles Potenzial werden die neuen Methoden der Operando-Spektroskopie und -Mikroskopie erst an den Speicherringen der vierten Generation ausschöpfen.

Rupert Huber, Thomas Pfeifer, Jascha Repp, Daniela Rupp und Olaf Schwarzkopf

SPEKTROSKOPIE UND QUANTENCHEMIE: VOM MIKROKOSMOS ZUR ANWENDUNG

Die Vorgänge im Mikrokosmos zu beobachten, ist herausfordernd. Spektroskopische Verfahren geben einzigartige Einblicke in das Verhalten von Atomen und Molekülen. Die erreichten zeitlichen Auflösungen und die Details des molekularen Aufbaus, die sich erkennen lassen, werden dabei immer besser.

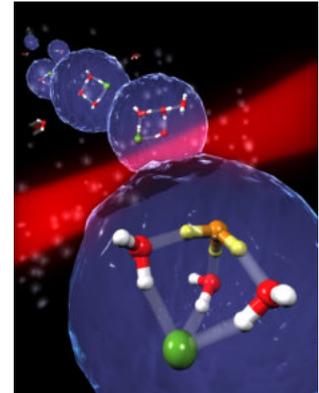
Ein sehr früher Erfolg der Quantenmechanik war die korrekte Beschreibung des Wasserstoffatoms. Es besteht aus einem einfachen Proton als Kern und aus einem einzelnen, sich darum bewegenden und daran gebundenen Elektron. Laut Quantenmechanik kann die Energie dieses Elektrons nicht alle möglichen, sondern nur ganz bestimmte Werte annehmen. Diese lassen sich mithilfe der Schrödingergleichung, welche das Elektron als Welle beschreibt, genau berechnen. Die **Übergänge zwischen den Energieniveaus** lassen sich zudem experimentell beobachten – in Form von absorbiertem oder ausgesendetem Licht bestimmter Wellenlängen, die sich hervorragend mit den quantenmechanischen Vorhersagen decken. Mit zunehmend verbesserten Lasertechnologien liefern solche Spektroskopieexperimente immer genauere Ergebnisse. Stand 2024 liegt die relative Genauigkeit für die Energie der Übergänge und damit auch für die daraus abgeleitete Bindungsenergie in Bereich von 10^{-10} – 10^{-15} und in Einzelfällen noch besser. Zudem „sieht“ das gebundene Elektron, wie schwer der Kern ist, an den es gebunden ist. Mit zunehmendem Gewicht des Kerns (von leichtem Wasserstoff über das doppelt so schwere Isotop Deuterium hin zum dreimal so schweren Tritium) steigt die spektroskopisch bestimmte Bindungsenergie des Elektrons um ein Viertel Promill. Das sagt das quantenmechanische Modell für das Wasserstoffatom ebenfalls vorher – aber aufgrund eines klassischen Effekts. Das quantenmechanische Elektron sieht die Zitterbewegung seines Kerns im Wasserstoffatom, und damit auch dessen Masse. Es verschieben sich dadurch je nach Masse des Atomkerns Energieniveaus, Übergänge und Bindungsenergie ein klein wenig. Das Elektron ist also gebundene Welle und gebundenes Teilchen gleichermaßen – ein Zustand, der weit jenseits unserer Vorstellungskraft liegt.

Den Tunneleffekt beobachten

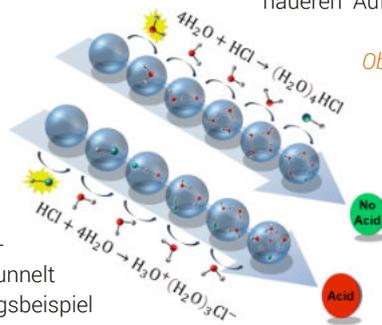
Dieses duale Verhalten – Welle und Teilchen – gilt für alle Atome, für Moleküle und sogar für Festkörper. Teilchenwellen können Energiebarrieren durchtunneln – je leichter die Teilchen, desto effektiver. Der Wasserstoffkern – ein Ion ohne eigene Elektronen – tunnelt demnach besonders effektiv, wie ein Alltagsbeispiel zeigt: So geht der saure Geschmack der Zitrone und anderer Säuren auf genau dieses Wasserstoffion zurück, das scheinbar ungehindert und schnell durch die wässrige Lösung hin zu unserer empfindlichen Zunge wandern kann. Genau hier setzt die **Terahertz-/Ferninfrarot-Spektroskopie** an und charakterisiert kollektive und molekülübergreifende Bewegun-

gen. Präzisionsmessungen bei Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt an isolierten Wassertröpfchen, die so klein sind, dass wir die Wassermoleküle einzeln zählen können, zeigen: Es bedarf einer minimalen Anzahl von Wassermolekülen, bevor es zu einer Ladungstrennung von z. B. Salzsäure-(HCl)-Molekülen in bzw. an solchen Wasserclustern kommen und sich eine Säure ausbilden kann. Dabei verbindet sich der Wasserstoffkern H^+ – also ein Proton – mit einem Wassermolekül (H_2O) zu einem Hydroniumion H_3O^+ , und drei weitere Wassermoleküle schirmen die negative Ladung des Chloridions und die positive Ladung des Hydroniumions voneinander ab. Auf ein HCl-Molekül kommen somit vier Wassermoleküle, um den kleinsten Tropfen Säure der Welt zu bilden – und dies geschieht erstaunlicherweise sogar spontan bei Temperaturen von $-273^\circ C$, wie sie u. a. im interstellaren Raum vorkommen.

In flüssigem Wasser ist es die thermische Zitterbewegung der Wassermoleküle, die die Diffusion der sauren Protonen zwischen benachbarten Bindungsplätzen ermöglicht. Zur genaueren Aufklärung dieser Mechanismen können hier



HCl ist das Molekül, aus dem sich Salzsäure bildet, und zwar Chlorid Ionen (grün) und hydratisierte Protonen (H_3O^+ , orange-gelb) in wässriger Lösung. Dafür braucht es mindestens vier Wassermoleküle



Ob das Salzsäuremolekül HCl beim Kontakt mit Wassermolekülen intakt und ladungsneutral bleibt, oder ob sich Dissoziation und Ladungstrennung einstellt, hängt von der Reihenfolge ab: Wird zunächst ein kleiner Wassercluster gebildet, dann adsorbiert ein HCl-Molekül und bleibt intakt, bis weiterer Wasserdampf das HCl-Molekül umschließt. Wenn allerdings einzelne Wassermoleküle nacheinander auf ein HCl-Molekül treffen, wie z. B. unter Bedingungen wie im interstellaren Raum (niedrige Moleküldichten bei tiefen Temperaturen), dann kommt es zur direkten Bildung des kleinstmöglichen Tropfens Säure, und zwar durch Protonentransfer vom HCl zu einem Wassermolekül (untere Reihe).

MIKROWELLENSPEKTROSKOPIE

Die Entwicklung der chirped-pulse Fourier-Transform-Mikrowellenspektroskopie macht die Rotationsspektroskopie interessant für Anwendungen in der analytischen Chemie. Rotationsspektren sind charakteristisch für Moleküle wie ein Fingerabdruck. Außerdem erlaubt die Methode die gleichzeitige Messung eines großen Frequenzbereichs. So können auch komplexe Mischungen bestehend aus mehreren Molekülverbindungen untersucht und nach ihren Komponenten aufgeschlüsselt werden, wie z. B. im Verlauf und nach chemischen Reaktionen zur Reaktionskontrolle. Die molekularen Informationen aus diesen Rotationsspektren können in Datenbanken gespeichert werden, womit sie sich schnell und verlässlich auch in zukünftigen Messungen nachweisen lassen. Das öffnet die Tür in Richtung industrieller Anwendungen, wie etwa einer Online-Prozessanalytik, die sich in Synthese- und Produktionsprozesse integrieren lässt.

Mit empfindlichen Messmethoden im Mikrowellenbereich können auch chirale Molekülverbindungen genau charakterisiert werden. Das gelingt mit der sogenannten **Chiral-Tag-Spektroskopie**, die auf der Breitbandigkeit der modernen Mikrowellenspektroskopie basiert. Hierbei bilden die chiralen Molekülverbindungen, die es zu analysieren und nachzuweisen gilt, im Experiment in der Gasphase chemische Komplexe mit einer wohlcharakterisierten weiteren chiralen Verbindung. Diese Komplexe bilden sogenannte Diastereomere, die sich in ihrer Struktur unterscheiden und damit auch in ihren physikalischen Eigenschaften. So lassen sie sich in Rotationsspektren direkt unterscheiden. Ein anderer Ansatz zur Unterscheidung chiraler Moleküle basiert auf einem Mikrowellen-drei-Wellen-Mischansatz, der es zudem ermöglicht, die Populationen der Enantiomere in ausgewählten Rotationszuständen gezielt zu verändern, sodass die beiden Enantiomere in ihrer Energie getrennt werden können – eine wichtige Grundvoraussetzung für neuartige Experimente an chiralen Molekülen.

*Moleküle, die aus den gleichen Bausteinen bestehen, können trotzdem räumlich unterschiedlich angeordnet sein. Dieser Umstand heißt Isomerie. Sind zwei Moleküle quasi bau- aber nicht deckungsgleich, verhalten sie sich also wie Spiegelbilder zueinander – so wie die linke und die rechte Hand –, so spricht man von Enantiomeren. Die Eigenschaft, die sie unterscheidet, ist die **Chiralität**. Enantiomere haben nahezu identische physikalische Eigenschaften, können sich aber in ihrer (bio-)chemischen Funktionalität dramatisch unterscheiden.*

mit neuen Spektroskopien weitere Erkenntnisse gewonnen werden.

Auch schwerere Atome wie Kohlenstoff und Sauerstoff können tunneln. Um das zu untersuchen, können reaktive Moleküle, die als Zwischenprodukt in einer Reaktion entstehen, bei extrem niedrigen Temperaturen in einer Edelgas-Umgebung stabilisiert werden. Umwandlungen lassen sich spektroskopisch nachverfolgen, oft im Infraroten. Das erlaubt Vergleiche mit quantenchemischen Modellen. Die experimentellen Reaktionsgeschwindigkeiten sind gegenüber den Vorhersagen von Standardmodell um bis zu mehrere Größenordnungen beschleunigt. Diese Beschleunigung ist wahrscheinlich auf das Tunneln der schweren Atome durch Umwandlungsbarrieren zurückzuführen – auch wenn das im Mittel Stunden oder Tage dauern kann.

Das ständige Öffnen und Schließen von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wassermolekülen lässt sich sehr gut im Terahertz-Frequenzbereich (THz, zwischen Infrarot- und Mikrowellenbereich) nachverfolgen. Durch die Entwicklung von neuen starken THz-Laserquellen kann man „live“ mit einer Auflösung von Pikosekunden verfolgen, wie das Ablösen eines Protons aus einem Molekül ein mikroskopisches Beben erzeugt und sich dieses als Wellenpaket im umgebenden Wasser fortsetzt.

Mit solchen und vielen weiteren Experimenten zeigt sich, dass es ein eng verwobenes Wechselspiel zwischen Theorie (Quantenchemie) und Experiment (Spektroskopie) erfordert, um Atome und Moleküle zu beschreiben. Dabei gelingt es durch genau dieses Wechselspiel, die Grenzen des Beschreibbaren, Verstandenen und Beherrschbaren langsam, aber stetig hinauszuschieben. Wurden anfangs nur einfache,

kleine Moleküle als Modellsysteme beschrieben, so werden heute zunehmend größere molekulare Systeme mit steigender Komplexität behandelt, und auch die Wechselwirkungen zwischen den Molekülen lassen sich immer besser verstehen. Dadurch öffnet sich der Weg hin zu einer Beschreibung auf mikroskopischer Basis und mit einem molekularen Verständnis von Grenz- und Oberflächen, von Aggregaten und Clustern bis hin zu Flüssigkeitströpfchen und Aerosolen.

Essenziell für die Erweiterung der spektroskopischen Anwendungsbereiche ist die mittlerweile routinemäßige Steigerung der experimentellen Genauigkeit und parallel dazu die Interpretation gewonnener Spektren im Vergleich mit ebenfalls zunehmend präziseren quantenmechanischen Beschreibungen und quantenchemischen Berechnungen.

Vielseitig einsetzbar

Die physikalisch korrekte Beschreibung des Mikrokosmos strahlt aus auf andere Disziplinen und Anwendungen, wie etwa die **Chemie** und die **Molekularbiologie** bis hin zur Verfahrenstechnik und den **Chemieingenieurwesen**. Auch in der **Medizin** kommen optisch-spektroskopische Verfahren vermehrt zum Einsatz. Der Fingerclip zur optischen Messung der Sauerstoffsättigung im menschlichen Blut ist eines der einfachsten Beispiele. Auch die Erforschung der Materie im Weltall profitiert enorm von der spektroskopischen Charakterisierung selbst flüchtiger oder nur in Isolation stabiler Moleküle und Ionen in Laborexperimenten. Oft geschieht dies unter ultrakalten Bedingungen wie in isolierten Heliumtröpfchen knapp über dem absoluten Temperaturnullpunkt bei 0,37 K oder in kalten Überschallstrahlen bei 1–2 K. Der Nachweis von Molekülverbindungen, die im Weltall vorkommen und Zeugen einer reichhaltigen Chemie sind, erfolgt häufig durch

NOBELPREIS 2023

Mit dem Nobelpreis für Physik 2023 wurden **Pierre Agostini, Anne L'Huillier** und **Ferenc Krausz** gemeinsam für Arbeiten geehrt, die zusammen genommen eine neue **Ultrakurzzeitspektroskopie mit Attosekundenpulsen** ermöglicht.

Zu ihren Leistungen gehören die Entwicklung von Ultrakurzpulslasern und den Werkzeugen zu deren Charakterisierung sowie das theoretische Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse. Dabei steht die gegenwärtige Attosekundentechnologie in der Tradition vorheriger Arbeiten und benutzt diese Techniken, wie etwa **Frequenzkämme** (Physik-Nobelpreis 2005) und der **Chirped-Pulse-Amplification** (CPA) in Titan-Saphir Materialien (Physik-Nobelpreis 2018). Es wurde dadurch möglich, mit den immer intensiveren Femtosekundenlasern eine Ionisationsdynamik in atomarer Materie so zu steuern, dass eine anschließende elektronische Rekombination der anfangs emittierten Elektronen zur kohärenten Emission von höheren Harmonischen (high harmonic generation, HHG) in Form von Attosekunden-Pulszügen und schließlich sogar von einzelnen Attosekundenpulsen führt.

Diese aufwendigen Lasertechniken zusammengenommen ermöglichen es, nachgeschaltete Untersuchungen auf bisher unerreichbaren Zeitskalen von wenigen Attosekunden (bis zu $60 \cdot 10^{-18}$ Sekunden) durchzuführen. Auf diese Weise lassen sich Elektronen in Atomen und Molekülen lokalisieren und deren Verschiebungen in Echtzeit kontrollieren, aber auch Ladungsströme in Festkörpern steuern. Es wird prinzipiell möglich, Elektronen beim Brechen und Bilden von Molekülbindungen zu beobachten, wenn auch zunächst bei sehr hohen Anregungsenergien. In Zukunft können Forschende vielleicht weitere Einblicke in Reaktionsmechanismen gewinnen. Dass damit chemische Prozesse optimiert werden, die in Bereichen wie der Katalyse und der Arzneimittelforschung Anwendung finden, ist gegenwärtig jedoch noch weitgehend Zukunftsmusik.

Erstaunlicherweise hat sich allerdings bereits recht konkret gezeigt, dass Attosekundenpulse durch ihre sehr hohen Feldstärken möglicherweise Fortschritte in der medizinischen Bildgebung erzielen können, indem sie z. B. die spektroskopische Charakterisierung einzelner lebender Zellen in Echtzeit und im Vorbeiströmen ermöglichen. Von dieser eindrucksvollen Leistungssteigerung in der Bioanalytik ist es jedenfalls noch ein weiter Weg bis hin zu einer in Aussicht gestellten einzelzellbasierten Krebsdiagnostik.

radioastronomische Beobachtungen. Diese Forschungsrichtung profitiert unter anderem von einer experimentellen Neuerung: Die sogenannte **chirped-pulse Fourier-Transform-Mikrowellenspektroskopie** erlaubt die schnelle Aufnahme von spektroskopischen Fingerabdrücken auch von komplexen oder kurzlebigen Molekülen. Diese lassen sich direkt mit radioastronomischen Beobachtungen vergleichen und erlauben, Molekülverbindungen oder Bausteine des Lebens – wie Aminosäuren – im Weltall eindeutig zu identifizieren. Erst kürzlich wurde 2-Methyloxiran im interstellaren Raum nachgewiesen, was für Untersuchungen zum Ursprung des Lebens von Interesse ist.

Eine Herausforderung bei der Detektion von Molekülen im Weltall ist, dass diese teilweise auch in ionisierter Form vorliegen. Das bedeutet, dass sie spektroskopisch schwer zu untersuchen sind. Hierfür wurde aber kürzlich ein neues Nachweiskonzept entwickelt, bei dem die quantisierte Absorption von einzelnen Photonen über den nachfolgenden Verlust der angeregten Ionen aus einer Ionenspeicher-Falle detektiert wird, eine sogenannte „leak out spectroscopy“. Dieses neue Konzept erlaubt die sehr empfindliche Untersuchung von molekularen Ionen ohne Wechselwirkung mit der Umgebung und mit hoher Auflösung, was für andere spektroskopische Ansätze eine kaum lösbare Herausforderung darstellt.

Schließlich ist die optische Spektroskopie auch ein unentbehrliches Werkzeug zur Messung kinetischer und dynamischer Prozesse. Gerade hier zeigen sich besonders umwälzende Fortschritte, die sich durch konsequente Verkürzung der „Belichtungszeit“ von Nanosekunden durch kurze Laserpulse hin zu Pico- und Femtosekunden-Pulsen bis hin zu rekordverdächtig kurzen Laserpulsen im Attosekundenbereich ergeben. Es ist bemerkenswert, dass durch solch eine Attosekundenspektroskopie nun nicht nur die **Bewegung der einzelnen Atome** (auf der Femtosekunden-Zeitskala), sondern sogar die **Dynamik der Elektronen** in Echtzeit auf der Attosekunden-Zeitskala nachverfolgt werden kann. Das geht allerdings nur mit sehr hohen Anregungsenergien. Dass mit Attosekundenpulsen und den damit verbundenen neuen Technologien tatsächlich eine künstliche Photosynthese oder neue Halbleitermaterialien ermöglicht werden, ist in absehbarer Zeit zwar kaum zu erwarten. Richtig ist aber auch, dass jede technologische Entwicklung auf lange Sicht zu neuen, oft unvorhersehbaren Anwendungen und Verfahren geführt hat, die anfangs überhaupt nicht erkennbar waren.

*Martina Havenith, Melanie Schnell
und Gereon Niedner-Schatteburg*

HINAUS INS ALL!

Zahlreiche Satellitenmissionen erkunden unser Sonnensystem, Weltraumteleskope erblicken Planeten um andere Sterne, und die astronautische Raumfahrt steht vor einer Renaissance. Dabei reicht die Rolle der Weltraumexploration von der wissenschaftlichen Grundlagenforschung über Technologiedemonstrationen unter extremen Umweltbedingungen bis hin zu Plänen für die kommerzielle Nutzung, z. B. der Ressourcengewinnung auf anderen Himmelskörpern.

Die Erde ist der einzige bislang bekannte Planet, auf dem sich Leben entwickelt hat. Ob dies die Erde wirklich einzigartig macht oder ob wir (vergangenes oder aktuelles) Leben auch anderswo nachweisen können, gehört zu den grundlegendsten Fragen der Erforschung des Weltraums. Für ihre Beantwortung gilt es, die Entwicklung geeigneter Umweltbedingungen nicht nur auf der Erde zu verstehen, sondern auch für andere Planeten. Dazu müssen verschiedenste physikalische Prozesse untersucht werden, von der Entstehung der Planeten und ihrer Entwicklung über die Wechselwirkung einer möglichen Biosphäre mit der Planetenoberfläche und -atmosphäre bis hin zur Identifizierung von Signalen, die als Zeichen von Leben interpretiert werden können.

Verschiedene Marsmissionen haben gezeigt, dass der frühe Mars zumindest zeitweise flüssiges Oberflächenwasser besaß – heute hat er nur eine dünne CO₂-Atmosphäre und eine trockene Oberfläche. Warum diese günstigen Umweltbedingungen verschwunden sind und ob damals Leben entstanden sein könnte, sind zentrale Fragen der Marsforschung. Im anderen Extrem ist die Venus mit einem 90-mal so hohem Oberflächendruck wie an der Erdoberfläche, einer fast reinen CO₂-Atmosphäre und Temperaturen von über 700 K zu heiß und zu unwirtlich für Leben. Ob dies aber schon immer so war, kann nur mit weiteren Untersuchungen ihrer geologischen und thermischen Entwicklung geklärt werden. Auch im äußeren Sonnensystem gibt es potenzielle Lebensräume. Zu den überraschendsten Entdeckungen der *Galileo-Mission* (NASA, 1989–2003) gehörten Hinweise auf große Mengen flüssigen Wassers unter den kilometerdicken Eiskrusten auf den Jupitermonden Europa und Kallisto. Heute geht man davon aus, dass mehrere der großen Monde im äußeren Sonnensystem solche Ozeane unter ihren Eiskrusten beherbergen. Die genaue physikalische Beschreibung von Eismonden ist daher ein weiteres zentrales Thema der Planetenforschung.

Die kleinen Körper im Sonnensystem – Kometen und Asteroiden – geben Auskunft über die Prozesse der Planetenbildung. Sie bestehen noch heute weitgehend aus dem Material, aus dem die Planeten und Monde entstanden sind. Kometen sind wegen ihres hohen Gehalts an flüchtigen Stoffen (vor allem Wasser) besonders interessant. Asteroiden werden als mögliche Rohstoffquellen diskutiert. Darüber hinaus stellen Asteroiden, die die Erdumlaufbahn kreuzen, eine latente Bedrohung für die Erde dar, für die Abwehrmaßnahmen erforscht werden.

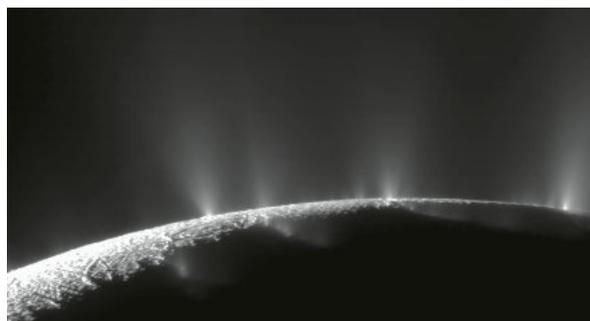
↑ Die *JUICE-Mission* der ESA wurde im April 2023 gestartet und wird im Juli 2031 ihr Ziel Jupiter erreichen.

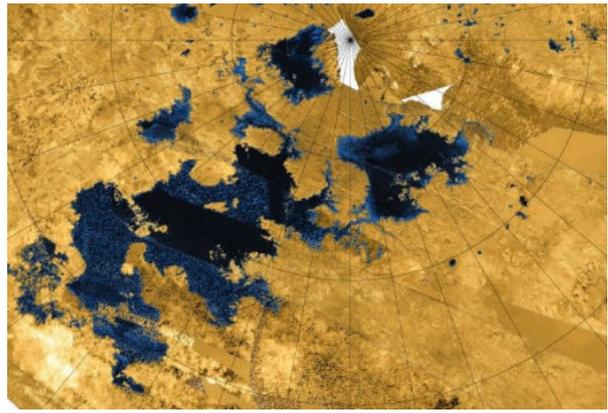
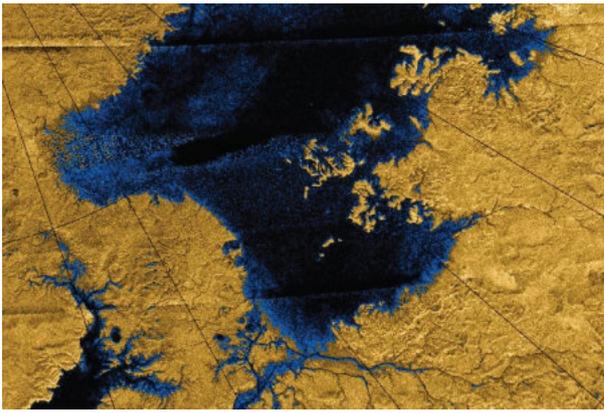
↓ Die *Eiskappe am Mars-Südpol* bei Frühlingsbeginn, aufgenommen von *Mars Express*



Seit der Entdeckung von Planeten um andere sonnenähnliche Sterne Mitte der 1990er-Jahre wissen wir, dass unser Sonnensystem nur eines unter vielen ist. Unter den ca. 5000 bis heute bekannten Exoplaneten (siehe auch „Allein im Universum“ auf Seite 281) befinden sich viele mit unerwarteten Eigenschaften, aber kein Planetensystem, das unserem gleicht. Unser Wissen ist jedoch durch die derzeit möglichen Messmethoden prinzipiell stark eingeschränkt. Das erste Weltraumteleskop für die Suche nach Exoplaneten (CoRoT, CNES/ESA, 2006–2014) entdeckte den ersten terrestrischen Planeten außerhalb des Sonnensystems (CoRoT-7b). Dieser ist mit Temperaturen über 1000 °C aber zu heiß für Leben. Die Suche nach potenziell Leben tragenden Planeten ist ein zentrales Thema heutiger und künftiger Weltraumteleskope, wie z. B. der *PLATO-Mission* der ESA (Start für 2026 geplant). Um Spuren von Leben auf einem fremden Planeten außer-

An vielen Stellen entlang der sogenannten Tigerstreifen in der Nähe des Südpols des Saturnmonds Enceladus schießen große und kleine Wasserfahnen aus Eis und Dampf aus der Oberfläche. Bei den Tigerstreifen handelt es sich um vier markante, etwa 135 Kilometer lange Risse, die das Südpolgebiet des Saturnmonds durchziehen.





Die Methanseen auf dem Saturnmond Titan wurden mit der Raumsonde Cassini genau kartografiert.

halb des Sonnensystems zu entdecken, werden über das James-Webb-Teleskop (seit 2023) und die zukünftige ESA Mission ARIEL (geplant 2029) hinaus weitere große **Welt- raumteleskope** in den folgenden Dekaden benötigt.

Raumsonden

Ein Großteil des Wissens, das wir heute über die Planeten des Sonnensystems, ihre Monde und alle anderen Objekte haben, basiert auf den Daten, die Raumsonden vor Ort gewonnen haben. Die Erforschung des Sonnensystems mit unbemannten Weltraummissionen begann bereits in den 1960er-Jahren mit den Ranger- und Luna-Missionen zum Mond und setzte sich dann mit den Marsmissionen Mariner und Mars Express fort. Bis heute haben Raumsonden jeden Planeten im Sonnensystem mindestens einmal besucht. Waren die ersten Missionen noch stark von der Rivalität des Kalten Krieges zwischen den USA und der Sowjetunion getrieben, traten nach und nach mehr Nationen als Raumfahrtnationen in Erscheinung. Heute kann man auf eine Vielzahl erfolgreicher Missionen zahlreicher Raumfahrtagenturen aus Europa (z. B. Giotto, Mars Express, Rosetta, BepiColombo, Solar Orbiter), Japan (z. B. Muses, Hayabusa-1/2 mit europäischem Beitrag MASOCOT), Indien (z. B. Chandrayaan-Programm) oder China

(z. B. Chang'e-Programm) zurückblicken. Ein langfristiges Ziel der meisten Erkundungsmissionen ist seit jeher die **Rückführung von Boden- oder Gesteinsproben** von anderen Himmelskörpern zur genauen Analyse in irdischen Laboren. Bisher ist dies für den Mond (Apollo, Luna, Chang'e) sowie für Asteroiden (Hayabusa-1/2, OSIRIS-REX) und Kometen (Stardust) gelungen. Der nächste große Meilenstein in der Exploration wird die Rückführung von Proben vom Mars sein. Die NASA und die ESA entwickeln derzeit eine solche Mission, die in den 2030er-Jahren vom NASA-Rover Mars2020 gesammelte Proben zur Erde zurückbringen soll.

Im kommenden Jahrzehnt erwarten wir nicht nur mehrere **Missionen zum Mars** (ExoMars Rover, Mars Sample Return), sondern auch Flüge zum **Jupiter** mit seinen vielen Monden. Dorthin ist die europäische Mission JUICE im Jahr 2023 gestartet, und die NASA-Mission Europa Clipper folgte im Oktober 2024. Auch Missionen zur Venus sind in der Entwicklung (EnVision der ESA, sowie die Missionen VERITAS und DAVINCI der NASA). Athena und PLATO stehen auf der Liste der zukünftigen Missionen, die unseren Blick über das Sonnensystem hinaus erweitern. Bei den erwähnten Missionen handelt

Die Mission **PLATO** (PLANetary Transits and Oscillations of stars) der europäischen Weltraumagentur ESA soll Ende 2026 starten. Ihr Ziel ist es, Gesteinsplaneten in der bewohnbaren Zone um sonnenähnliche Sterne aufzuspüren und deren Größe, mittlere Dichte und Alter genau zu bestimmen. Das PLATO-Instrument besteht aus 26 Einzelkameras, die jeweils über mindestens zwei Jahre zwei große Bereiche des Himmels nach Planeten absuchen. Es misst winzige Schwankungen in der Helligkeit von Sternen, die durch Planeten verursacht werden, die sie umkreisen und dabei regelmäßig bedecken.



Der Komet 67P/Churyumov-Gerasimenko wurde 2014–2016 von der Rosetta-Mission besucht, die 2014 dort auch ihren Lander Philae absetzte.



oben: NASA/JPL-Caltech/ASI/USGS, unten links: ESA/ATG medialab, unten rechts: ESA/Rosetta/OSIRIS/MPI für Sonnensystemforschung

es sich nur um eine Auswahl vergangener und laufender wissenschaftlicher Erkundungsbemühungen.

Modernste Technologien, harte Bedingungen

Technologisch ist jede Mission äußerst anspruchsvoll: Raum- und Landesonden müssen auf Planetenoberflächen und in den Strahlungsgürteln ihrer Zielobjekte extremen Temperaturen und Drücken standhalten. Jede Mission in den tiefen Weltraum muss über Jahre oder Jahrzehnte in einer außerordentlich schwierigen Umgebung zuverlässig funktionieren. Darüber hinaus stellen die zum Teil extremen Distanzen, die Raumsonden auf dem Weg zu ihrem Ziel zurücklegen müssen, größte Herausforderungen dar. Die Missionsplanung, mehrjährige Transfers zum Zielobjekt, die Notwendigkeit hochpräziser **Navigation**, komplexe Bahnmanöver und die Nutzung des Gravitationsfeldes von Himmelskörpern zur Einsparung von Treibstoff haben maßgeblichen Einfluss auf das Design der Raumsonden. Signallaufzeiten von vielen Minuten (Mars) bis hin zu mehreren Stunden (Pluto) stellen hohe Anforderungen an Kommunikationssysteme und an die **Autonomie** der Satelliten, da eine Steuerung in Echtzeit von der Erde aus nicht mehr möglich ist. Auch die **Datenübertragung** erfordert aufgrund großer Distanzen und anwachsender Datenmengen neue Kommunikationstechnologien – etwa die Übertragung von Informationen mit Laserlicht. Bei Missionen zu den äußeren Planeten unseres Sonnensystems oder darüber hinaus wird aufgrund des immer schwächer werdenden Sonnenlichts zudem die **Energieversorgung** zur Herausforderung, die die Entwicklung neuer Solarzellen oder alternativer, radionuklidbasierter Technologien erfordert. Die Königsdisziplin der Raumfahrt ist nach wie vor die Landung auf anderen Himmelskörpern. Auch heute sind längst nicht alle Landeversuche erfolgreich. Insbesondere die Landung auf Objekten mit Atmosphäre stellt die Sensorik, die Navigation, die Flugregelung, das Wär-

meschutzsystem sowie Brems- und Landesysteme vor besondere Herausforderungen.

Noch schwieriger sind Missionen, bei denen sich Menschen an Bord befinden. Bei Langzeitmissionen muss die Besatzung über viele Monate vor schädlichen Umwelteinflüssen, etwa vor der **Weltraumstrahlung**, geschützt werden. Eine weitere Herausforderung ist die **Versorgung** der Besatzung. Während bei erdnahen Missionen Versorgungsflüge stattfinden können, ist dies bei Missionen in die Tiefen des Weltalls nicht mehr möglich. Hier sind geschlossene Lebenserhaltung- und Versorgungssysteme erforderlich.

Für den uns am nächsten gelegenen Himmelskörper, den **Mond**, stehen zahlreiche Missionen in den Startlöchern, wie z. B. das Artemis-Programm (NASA) oder der Argonaut Lander (ESA), die sich darauf vorbereiten, Astronaut:innen schon 2026 auf die Mondoberfläche zurückzubringen, vor Ort Forschung zu betreiben und Proben zur Untersuchung in Labore auf der Erde zu bringen. Die Entwicklung wissenschaftlicher und infrastruktureller Ressourcen auf dem Mond soll dessen nachhaltige Erforschung gewährleisten. Die Marsoberfläche sollen die ersten Menschen voraussichtlich in den 2040er-Jahren betreten.

Die Erforschung der Planeten und Monde im äußeren Sonnensystem, bis hin zu Uranus und Neptun, sind ein zentraler Teil der Zukunftsstrategien von ESA und NASA. Dabei geht es nicht nur um die Planeten selbst, sondern auch um ihre Monde als mögliche Orte für Leben.

Pia Bausch, Tra-Mi Ho, Rolf Janovsky, Claus Lämmerzahl, Heike Rauer und Marco Scharringhausen



OHB SYSTEM AG

Der Systemanbieter OHB System AG mit Standorten in Bremen und Oberpfaffenhofen gehört zum Hightechkonzern OHB SE, in dem über 3000 Mitarbeiter:innen an zentralen europäischen Raumfahrtprogrammen arbeiten. Dazu zählen kleine und mittelgroße Satelliten für Erdbeobachtung, Navigation, Telekommunikation, Wissenschaft und Exploration des Weltraums ebenso wie Systeme für die astronautische Raumfahrt. Das Unternehmen arbeitet unter anderem mit der Europäischen Weltraumorganisation (ESA), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Bundesministerium der Verteidigung sowie mit weiteren öffentlichen und privaten Auftraggebern zusammen. Zu den von OHB umgesetzten wissenschaftlichen Missionen gehört auch PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars) der ESA. Das OHB-Zentrum für Optik und Wissenschaft in Oberpfaffenhofen integriert derzeit den ersten Satz von Kameras in die sogenannte optische Bank (Bild links). Auch die Mission LISA (Laser Interferometer Space Antenna) zum genauen Ausmessen niederfrequenter Gravitationswellen wird von OHB gebaut.

Die Vorstandsvorsitzende des Unternehmens ist Chiara Pedersoli. Nach Stationen beim DLR, EUMETSAT (Europäische Organisation für die Nutzung meteorologischer Satelliten), der ESA und Airbus Defence and Space kam die Luft- und Raumfahrt-Ingenieurin 2010 zu OHB. Dort arbeitete sie unter anderem am Design von Instrumenten für die dritte Generation des Wettersatellitenprogramms Meteosat und als Direktorin im Bereich Systems Engineering und Assembly, Integration & Test. Seit 2020 ist sie Vorstandsmitglied, 2024 wurde sie zur Vorstandsvorsitzenden ernannt.



WIRKUNG

Welchen Nutzen und welche Auswirkungen haben die Erkenntnisse, die physikalische Forschung fortwährend neu gewinnt? Tatsächlich haben – wie Sie im folgenden Kapitel sehen werden – sehr viele der Erkenntnisse konkrete Wirkungen, sei es in der Produktion immer leistungsfähigerer Computer oder bei der Anwendung immer besserer Diagnose- und Therapiemöglichkeiten in der Medizin. Die Technologie der Menschheit hat aber auch Nebenwirkungen, die die Stabilität des Ökosystems der Erde gefährden.

Einen Beleg für die Nützlichkeit der Physik haben Sie jeden Tag in der Hand: Im Smartphone sind Mikrochips und Sensoren eingebaut, die physikalische Effekte in hochtechnisierten Bauteilen ausnutzen. Ganz allgemein ist die Sensorik in beeindruckende Präzisionsbereiche vorgedrungen, und das oft bei industrieller Fertigung der Komponenten in großem Maßstab. So können Quantensensoren für medizinische Zwecke Ströme im Inneren des Gehirns vermessen, und Smartphones oder Autos enthalten mehrere hochgenaue mikrostrukturierte Lagesensoren.

Die Methoden der Mikrochipherstellung werden durch immer neuere physikalische Erkenntnisse kontinuierlich verbessert und weiter miniaturisiert. In der Folge nimmt die Rechenleistung von Computern seit über 50 Jahren kontinuierlich zu, während der Energiebedarf pro Rechnung erheblich sinkt. Ein Beispiel, das den immensen Fortschritt anschaulich macht: Die gleiche Anzahl an digitalen Schaltelementen (Transistoren), die zusammen in den CPUs aller jemals gebauten 30 Millionen Commodore-64-Heimcomputern der 1980-Jahre gefertigt wurden, findet sich heute in einem einzigen System-on-a-Chip eines leistungsfähigen PCs. Mit der Erhöhung der Verarbeitungsleistung gehen auch der Bedarf und die Möglichkeit einher, Daten zu speichern. Dazu werden vor allem magnetische Effekte genutzt, die den Anforderungen an schnellem und zuverlässigerem Zugriff auf gigantische Datenmengen nachkommen können.

Neben dem „Immer schneller“ klassischer Computer sind vollkommen andere Konzepte Gegenstand intensiver Forschung. So hat die Entwicklung von Quantencomputern enorm an Fahrt aufgenommen. Dabei gibt es verschiedene Ansätze, die Recheneinheiten der Quantencomputer, die Qubits, physikalisch herzustellen. In einer weiteren Anwendung der Quantenphysik sind erste Pilotprojekte für absolut abhörsichere Kommunikation mit Quantenverschlüsselung bereits realisiert.

Wo selbst die schnellsten klassischen Computer für die Berechnung quantenphysikalischer Phänomene nicht ausreichen und auch in Zukunft aus prinzipiellen Gründen nicht ausreichen werden, setzt die Forschung zunehmend auf die Realisierung von analogen Modellquantensystemen. Hier werden Systeme aus einzelnen Atomen so manipuliert, dass sich mit ihrem Verhalten die gewünschten physikalischen Fragestellungen beispielsweise aus der Festkörperforschung beantworten lassen.

Ein wichtiger Erfolg wurde 2019 mit der Neudefinition des internationalen Einheitensystems erzielt: Alle physikalischen Einheiten sind nun dadurch definiert, dass die Zahlenwerte von sieben fundamentalen Konstanten exakt festgelegt wurden. Was auf den ersten Blick nur bedeutet, dass kein Rückgriff mehr auf das bis dahin benötigte Urkilogramm in Paris notwendig ist, hat ganz praktische Auswirkungen: Alle Einheiten können nun an jedem Ort mittels entsprechender Experimente realisiert werden – prinzipiell im gesamten physikalisch beschreibbaren Universum! Darüber hinaus hängt die Genauigkeit der Realisierung nicht mehr von Ungenauigkeiten der Definition selbst ab, sondern lediglich von den jeweiligen technischen Möglichkeiten bei deren praktischer Umsetzung.

Viele medizinische Diagnosemethoden basieren heute auf digitaler Datenerfassung und -verarbeitung. In Computertomografen werden Röntgenaufnahmen digital in Schnittbil-



der und Volumendarstellung des Körperinneren umgewandelt. Das gleiche passiert – basierend auf einem anderen physikalischen Phänomen – bei der Kernspintomografie. In der Therapie von schwerwiegenden Krebserkrankungen werden nukleare Methoden eingesetzt, also etwa radioaktive Substanzen gezielt in den Körper eingebracht oder mit Ionenstrahlen die Tumoren angegriffen. Auch die Nanotechnologie kann genutzt werden, um schädliche Zellen zu vernichten und gleichzeitig das gesunde Gewebe möglichst zu schonen. Laser sind bei bestimmten Augenoperationen unersetzlich, Ultraschallbildgebungsgeräte werden bei vielen Untersuchungen routinemäßig eingesetzt.

Welche Auswirkungen es hat, wenn in komplexen Systemen eine große Zahl von Komponenten miteinander in Wechselwirkung treten, zeigt sich in vielen Bereichen. Eine Wettervorhersage etwa – so präzise wie sie heute auch ist – kann prinzipiell nicht über einen Zeitraum von einigen Tagen hinaus funktionieren. Doch die scheinbar zufälligen Verläufe des Wetters münden trotzdem in ein vorhersagbares Klima und gehorchen dabei typischen Veränderungsmustern, die in verschiedenen komplexen Systemen ähnlich auftreten. Dass Komplexität auch zu Stabilität in Systemen führen kann, mag auf den ersten Blick überraschen, doch wenn man das im Ganzen gezielt wirkende Bewegungsmuster von Schwärmen betrachtet, zeigt sich, dass in der Komplexität auch Struktur zu finden ist. In unserer Welt mit Kommunikations- und Transportnetzen, die sich über den ganzen Globus spannen, ist es daher wichtig zu wissen, welche Effekte etwa bei der Verbreitung von Krankheitserregern, im Verkehr oder bei der Energieversorgung allein aus Gründen der Vernetzung zu erwarten sind und wie man sie kontrollieren oder beherrschen kann.

Auch die Beobachtungssysteme der Erderkundung operieren global. Fernerkundungssysteme auf Satelliten, Flugzeugen oder Schiffen erlauben es, fortwährend die Auswirkungen menschlichen Handelns auf den Planeten zu

überwachen. Besonders bei schwerwiegenden Extremwetterereignissen und Erdbeben kommt dabei auch der Warnung vor und Unterstützung bei Katastrophenfällen eine wichtige Rolle zu. Auch die Überwachung außerhalb solcher punktueller Ereignisse ist eine wichtige Aufgabe, etwa bei der Frage, ob Luftschadstoffe zu Gesundheitsgefahren führen können.

Ob wir den von uns Menschen verursachten Klimawandel in den Griff bekommen, entscheidet sich vor allem daran, ob es gelingt, die Verbrennung fossiler Ressourcen durch alternative und effizientere Formen der Energienutzung zu ersetzen. Hier kann physikalische Forschung wesentliche Beiträge liefern, wie man an der Entwicklung immer effizienterer und kostengünstigerer Solarmodule und Batterien, zum Beispiel LEDs für die Beleuchtung, und vielem mehr erkennen kann. Auch aktive Klimainterventionen, also die Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre oder die Veränderungen der Energieeinstrahlung, werden erforscht und könnten Bausteine für die Milderung der Erderwärmung sein. Ob all diese Entwicklungen greifen und die Maßnahmen rechtzeitig umgesetzt werden, um eine ausreichende Wirkung zu erzielen, wird sich in den nächsten Jahren entscheiden.

Die Suche nach anderen bewohnten oder bewohnbaren Planeten kann dabei keine Alternative zum Schutz der Erde sein. Zwar gibt es zuhauf Planeten um andere Sterne, doch alle sind zu weit entfernt, als dass sie eine neue Heimat für die Menschheit werden könnten. Welche Wirkung hätte aber wohl der Nachweis von Leben auf einem fremden Planeten für uns als Menschheit?

TECHNOLOGIEN FÜR DAS 21. JAHRHUNDERT

Die Anwendung von Physik hat in den vergangenen Jahrzehnten viele neue Technologien hervorgebracht. Viele davon hängen mit Sensorik, mit der Weiterentwicklung der Computertechnologie oder neuen Fertigungstechniken zusammen. Eine beispielhafte Zusammenstellung von Wirkungen, die die physikalische Forschung in Industrie und Alltag erzielt hat, finden Sie in diesem Abschnitt.

SENSOREN PRÄGEN DIE ALLTAGSTECHNIK



1 GNSS (GPS): Ermöglicht Navigation und Standortverfolgung.

2 Optische Sensoren: Erfassen Bilder, die zur Objekterkennung, Spurführung und Verkehrszeichenerkennung verwendet werden, sowie zur Gestensteuerung im Innenraum. Sie dienen der Innen- und Außenspiegelabblendung und der automatischen Abblendung von Matrixscheinwerfern.

3 Infrarotsensoren: Können Nachts Fußgänger oder Wild erkennen.

4 Magnetfeldsensoren: Hallsonden dienen zur Motor- diagnostik und -steuerung.

5 Lidar-Sensoren: Nutzen Laserpulse zur genauen Abstandsmessung und Objekterkennung, besonders wichtig für autonomes Fahren.

6 Radar-Sensoren: Erfassen die Entfernung und Geschwindigkeit anderer Fahrzeuge, verwendet für Adaptive Cruise Control (ACC), Notbremsassistent, Totwinkelassistent und Spurwechselassistent.

7 Drucksensoren: Sie dienen der Motordiagnostik und Sitzbelegungserkennung.

8 Inertialsensoren (IMU): Integrieren Gyroskop und Beschleunigungssensoren, die die Fahrzeugbewegung und Neigung messen, können Unfälle erkennen.

9 Reifensensoren (Druck- und Temperatur): Überwachen den Reifenzustand und verhindern damit Reifenschäden.

10 Kapazitive Sensoren: Können Annäherung (keyless entry), Lenkradgriff und Füllstände messen.

11 Lenkwinkelsensor: Magnetoresistiver Effekt dient der Fahrwerk- und Fahrzeugsteuerung und zur Müdigkeitserkennung.

12 Ultraschallsensoren: Nutzen Schallwellen zur Messung der Entfernung, ideal im Nahbereich (z. B. beim Parken) und zur Innenraumüberwachung (Alarmanlage).

1

Brems- und Lichtsensoren: Schalten Bremslichter und Scheinwerfer ein und aus und erhöhen damit die Sicherheit.

2

Batteriesensoren (Temperatur, Spannung): Überwachen die Batterie-zustände, um Überhitzung zu verhindern und die Reichweite anzuzeigen.

3

Trittfrequenzsensor: Misst die Pedalumdrehungen pro Minute und reguliert die Motorunterstützung.

4

Gyroskop und Beschleunigungssensoren: Unterstützen die Stabilität und ermöglichen bei manchen Modellen das Sperren des Rads bei Diebstahl.

5

Drehmomentsensor: Erfasst die Kraft, die auf die Pedale ausgeübt wird, und passt die Motorleistung entsprechend an.

6

Geschwindigkeitssensor: Bestimmt die Geschwindigkeit des Fahrrads, um die Motorunterstützung bei Erreichen einer Maximalgeschwindigkeit zu drosseln.



1

Lichtsensoren: Regelt die Helligkeit des Bildschirms entsprechend dem Umgebungslicht.

2

Gesichtserkennungssensoren (Infrarot, 3D-Scanner): Erlaubt biometrische Authentifizierung durch Gesichtserkennung.

3

Barometer: Schätzt die Höhe und verbessert die Ortsgenauigkeit.

4

Gyroskop: Erfasst Rotationen und Bewegungen des Geräts.

5

GNSS (GPS): Liefert den genauen Standort.

6

Nähe- oder Proximity-Sensor: Deaktiviert den Bildschirm, wenn das Smartphone ans Ohr gehalten wird.

7

Kapazitive Sensoren: Fingererkennung auf dem Touchscreen.

8

Fingerabdrucksensor: Erlaubt die biometrische Identifizierung.



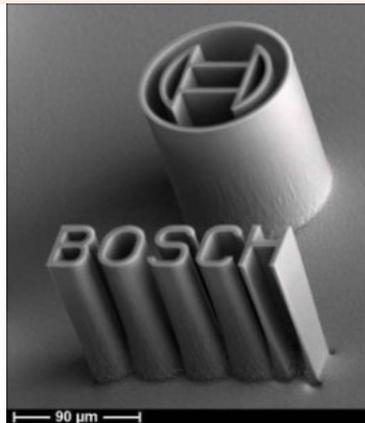
WIE IST DIE LAGE?

In unseren Alltagsgeräten sind zahlreiche Sensoren verbaut – oft mehr, als man auf den ersten Blick ahnt. Diese werden nicht nur immer kleiner und kostengünstiger, sondern auch immer genauer und ausgefeilter.

Wir erfassen unsere Umgebung mit den Sinnen – durch Riechen, Schmecken, Tasten, Sehen und Hören. Zu diesem Zweck ist unser Körper mit Millionen von Sensoren ausgestattet, die uns in die Lage versetzen, uns zurechtzufinden, Gefahren zu erkennen und mit anderen zu kommunizieren.

Mit der Automatisierung vieler Lebensbereiche stellte sich bereits früh die Frage, wie Maschinen ihre Umgebung wahrnehmen können: Wie kann ein Flugzeug seine Position in der Luft bestimmen? Wie stellt ein Pkw einen kritischen Fahrzustand fest? Woher weiß ein Roboter, wenn er sich einem Menschen nähert? Wie erkennt ein Smartphone die Orientierung des Bildschirms? Für diese und viele andere Fragestellungen existieren heute unzählige Sensoren, die den Maschinen die Fähigkeit verleihen, ihre Umgebung zu erfassen.

Es war zunächst die Automobilindustrie, die die Entwicklung neuer Sensortechnologien mit hohen Sensorstückzahlen in den vergangenen 50 Jahren geprägt hat – angetrieben vom Wunsch nach mehr Sicherheit im Verkehr. Beispielsweise sorgt das Antiblockiersystem (ABS) integriert in ein elektronisches Stabilitätsprogramm für eine hohe Fahrstabilität und verkürzte Bremswege. Entscheidend für die korrekte Funktion sind dabei Sensordaten: In modernen Pkw befinden sich heute viele Sensoren, die Teil von Sicherheits-, Antriebs- und Komfortfunktionen sind. Die Massenfertigung der dafür erforderlichen robusten, leistungsfähigen und zugleich kosteneffizienten Bauteile war nur auf der Basis mikroelektronischer und mikromechanischer Technologien möglich. Diese nutzen häufig bewegliche Strukturen im Mikrometerbereich, welche aus Silizium hergestellt werden. In den vergangenen rund 20 Jahren wurden die Sensoren, getrieben durch die Anforderungen von Smartphones, Smartwatches und Kopfhörern, weiter miniaturisiert und digitalisiert. Ein Beschleunigungssensor für eine Smartwatch hat heute eine Größe von zwei mal



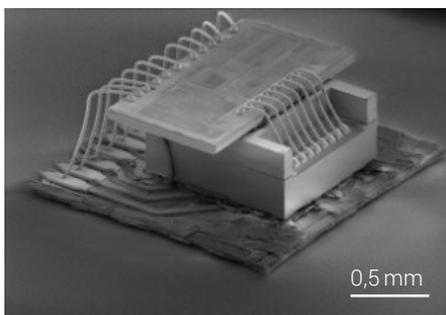
Mittels reaktivem Ionentiefenätzen („Bosch-Prozess“) hergestellte Mikrostruktur.

zwei Millimetern, ist weniger als ein Millimeter hoch und ermöglicht im Zusammenspiel mit weiteren Sensoren eine zuverlässige Navigation.

Der Trend zur Miniaturisierung hält weiterhin an und wird für Anwendungen im Bereich vernetzter Objekte mit darin enthaltenen KI-Komponenten erweitert. Anwendungen in der Automobil-, Gebrauchs- und Unterhaltungselektronik benötigen heute mehr als zehn Milliarden mikromechanische Sensoren pro Jahr. Typische Sensoren, wie sie heute in Smartphones verbaut sind, umfassen einen mechanisch-elektrischen Teil (micro electromechanical system, MEMS), mit dem das zu messende Signal in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Dieses wird im elektronischen Teil mithilfe analoger und digitaler Schaltungen aufbereitet, umgewandelt und als standardisiertes Signal ausgegeben. Mit dem in den 1990er-Jahren entwickelten reaktiven Ionentiefenätzen (auch bekannt als „Bosch-Prozess“) war es erstmals möglich, zuverlässig feinste Strukturen mit großer räumlicher Tiefe im Vergleich zur Breite der Strukturen herzustellen. Er liefert bis heute eine Basis für den Erfolg von MEMS-Sensoren.

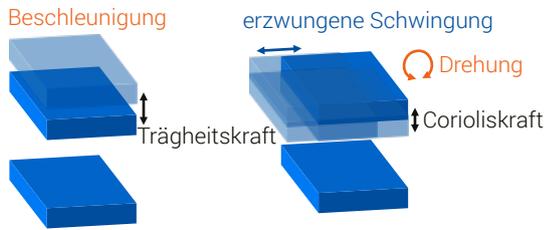
Für die Gebrauchselektronik sind MEMS-Sensoren eine Schlüsseltechnologie. Mit einem geschätzten Volumen von etwa acht Milliarden Euro pro Jahr stellt die Konsumelektronik derzeit den größten Markt für MEMS-Sensoren dar. Die Einführung des Smartphones stieß einen Trend zur Individualisierung und Vernetzung von elektronischen Geräten an. So haben diese eine große Bandbreite von Komfortfunktionen (Bildstabilisierung, Navigation) sowie Funktionen mit Bezug zu Fitness und Gesundheit (Schrittzähler, Fitnesstracker).

Ein besonders interessanter Anwendungsfall für MEMS-Sensoren ist die dreidimensionale Navigation in Innenräumen, welche im Vergleich zur Satellitennavigation ohne externe Signale auskommen muss. Dies kann durch Kombination eines Beschleunigungssensors in x-, y- und z-Richtung mit einem Drehratensensor für die Messung der Drehung um die drei Achsen in einem inertialen Messsystem realisiert werden. Die Position und relative Orientierung im Raum kann durch zweimalige Integration der Beschleunigungen und einfache Integration der Winkelgeschwindigkeiten bestimmt werden. In beiden Sensoren ändert sich bei Beschleunigung bzw. Rotation die elektrische Kapazität, da ihre mikromechanische Elek-



MEMS-Sensor mit Leiterplatte (unten), MEMS (Mitte) und ASIC (oben) verbunden mit Bond-drähten.

← Passen durch ein Nadelöhr: Lagesensoren mit Ausleseelektronik als integrierte Module für die Massenanwendung

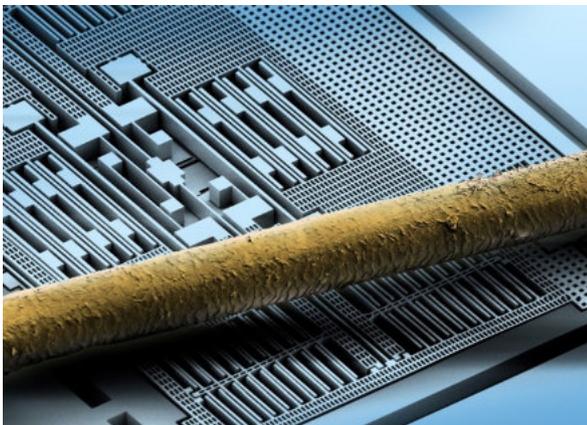


Beschleunigungssensor (links) und Gyroskop (rechts). Die Plattenauslenkung führt zu einer Ladungsverschiebung in den Platten.

troden zum einen fixiert, zum anderen Teil einer beweglichen seismischen Masse sind. Im Falle des Beschleunigungssensors erfolgt die mit der Auslenkung verbundene Kapazitätsänderung aufgrund der Trägheit. Im Falle des Drehratensensors muss die seismische Masse elektrostatisch angetrieben in Schwingung versetzt werden. Durch die resultierende Geschwindigkeit erfährt die seismische Masse bei einer Drehung eine Coriolisbeschleunigung senkrecht zur Schwingungsrichtung und zur Drehachse. Dadurch kommt es zu einer oszillierenden Kapazitätsänderung zwischen den entsprechend orientierten Festelektroden und der seismischen Masse. Durch die starke Miniaturisierung sind die Änderungen sehr klein, sodass die Auswerteelektronik hohen Anforderungen genügen muss. Obwohl die Sensoren robust sind und Stöße von etwa 1000 g überstehen können, erreichen sie dennoch eine Auflösung im Bereich von ca. 0,001 g. Dies entspricht einer räumlichen Auslenkung der Elektrode von nur rund

1 g ist die Schwerebeschleunigung an der Erdoberfläche 30 pm, sodass zur Auswertung der geringen Kapazitätsänderungen die

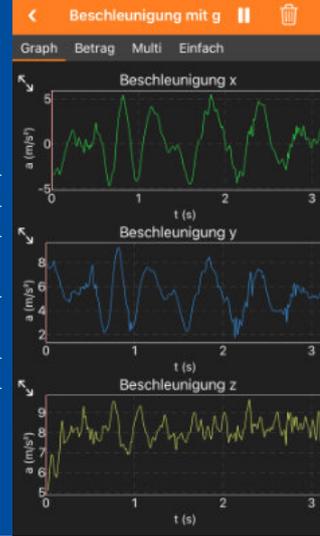
Ladungsverschiebung von nur wenigen Elektronen aufgelöst werden muss. Ein essenzieller Teil der Innovation von MEMS-Sensoren liegt daher in der Entwicklung von elektrisch und mechanisch robusten Designs, um zum einen die notwendige Alltagstauglichkeit in einem Fahrzeug oder Mobilfunkgerät zu ermöglichen und gleichzeitig eine hervorragende Empfindlichkeit bei minimalem Rauschen zu gewährleisten. Die konsequente Erforschung und Entwicklung neuer MEMS- und Halbleiterprozesse ist eine Grundvoraussetzung für den Erfolg von MEMS-Sensoren. So trägt beispielsweise ein neu entwickelter [Laser-Reseal-Prozess](#), mit dem das Vakuum in



PHYPHOX



An der RWTH Aachen wurde eine Software entwickelt, die die zahlreichen Sensoren von Smartphones und Tablets auslesen und für Experimente nutzen kann. So lassen sich etwa die Fahrhöhe eines Aufzugs allein aus der Luftdruckänderung bestimmen, akustische Spektren im Wasserfalldiagramm darstellen oder – wie abgebildet – die Beschleunigung der drei Lagesensoren direkt auslesen. Die Einsatzmöglichkeiten der kostenlosen und quelloffenen App vor allem im Schulexperiment sind gewaltig.



Kavernen sehr exakt und lokal eingestellt wird, wesentlich zur Leistungsfähigkeit neuer inertialer Messsysteme bei.

Die Kontrolle quantenphysikalischer Effekte wird die MEMS-Sensorik in naher Zukunft weiter voranbringen. So lässt sich im zuvor beschriebenen Anwendungsfall der Navigation auch die absolute Orientierung im Raum (relativ zum Erdmagnetfeld) mithilfe des [magnetischen Tunnelwiderstands](#) (Englisch: Tunneling MagnetoResistance, TMR) messen. Dabei hängt der Tunnelwiderstand zwischen zwei durch einen dünnen Isolator getrennte ferromagnetische Schichten vom äußeren Magnetfeld ab.

Dies wird erreicht, indem die Polarisation einer der beiden Schichten fixiert wird, z. B. durch eine zusätzliche antiferromagnetische Schicht. Die zweite freie Schicht kann sich entsprechend dem äußeren Feld ausrichten. Stehen die beiden Polarisationen antiparallel zueinander, steigt der Widerstand stark an, im parallelen Fall sinkt er ab. Die Widerstandsänderung kann dabei je nach konkretem Aufbau selbst bei Raumtemperatur 100% übersteigen. Mit entsprechender Brückenschaltung eignet sich diese Widerstandsänderung hervorragend zur Messung der Orientierung gegenüber äußeren Magnetfeldern wie dem Erdmagnetfeld. Eine besondere Herausforderung bei der Fertigung von TMR-Sensoren besteht darin, die beiden magnetischen Schichten durch die Isolationsschicht sehr dünn und homogen zu trennen. Mit einer Dicke von wenigen Nanometern besteht die Schicht nur aus wenigen Atomlagen. Solche Strukturen lassen sich daher nur mit sehr fortschrittlichen Fertigungsmethoden kommerziell nutzbar erzeugen.

Die Anforderungen an MEMS-Sensoren bezüglich Funktionsumfang, Größe, Genauigkeit und Energieeffizienz werden mit fortschreitender technischer Entwicklung immer weiter steigen. Neben den vorgestellten etablierten Verfahren werden in Zukunft Quantensensoren mit hoher Empfindlichkeit und Genauigkeit eine wichtige Rolle spielen. Hier ist zu erwarten, dass die enge Kooperation zwischen akademischer und industrieller Forschung sowie zwischen Entwicklungs- und Fertigungsbereichen kommerzieller Unternehmen auch in Zukunft große technologische Fortschritte hervorbringt.

Fabian Bleier, Stefan Finkbeiner und Markus Ulm

Struktur eines Inertialsensors im Vergleich mit einem menschlichen Haar (Durchmesser $\approx 100 \mu\text{m}$)

MIKROCHIPS: IMMER KLEINERE STRUKTUREN

Die optische Lithografie hat Computerchips immer kleiner, energieeffizienter und preiswerter werden lassen und der Halbleiterindustrie zu einem beachtlichen Wachstum verholfen. Mit dem nächsten Schritt – der EUV-Lithografie – wurde das Tor zu noch weiterer Miniaturisierung aufgestoßen. Eine Grenze ist dabei noch nicht absehbar.

Halbleiterchips sind aus der heutigen Welt nicht mehr wegzudenken. Sie sind mittlerweile in allen Arten moderner Geräte von der Waschmaschine über das Mobiltelefon bis hin zum Auto enthalten. Dadurch ist unser Leben stark von ihnen abhängig geworden. Wenn wir einen Blick in das Innere der Architektur von Halbleiterchips werfen, finden wir eine große Anzahl von Schichtstrukturen aus miniaturisierten Transistoren, Kondensatoren und Widerständen und den komplizierten elektrischen Verbindungen zwischen ihnen. Wie bei einem Gebäude hat jede Schicht ihren eigenen Grundriss und muss genau auf die vorhergehenden Schichten gelegt werden.

Hergestellt werden die Chips mit der optischen **Lithografie**. Dabei wird eine Siliziumscheibe, der **Wafer**, mit einer lichtempfindlichen Oberfläche (Fotolack) versehen und dann nur an bestimmten Stellen belichtet. Das führt dazu, dass der Fotolack nur an den vorgesehenen Stellen aushärtet und somit die Strukturierung der Maske auf das Bauteil übertragen wird. Der unbelichtete Lack wird durch ein Lösungsmittel entfernt, das Ätzen entfernt dann die Bereiche des Halbleiters, die nicht durch den Lack geschützt sind.

Das Mooresche Gesetz besagt, dass sich die Leistung (alternativ die Transistorendichte) eines wirtschaftlich optimalen Mikrochips alle 18–20 Monate verdoppelt. Dieses Gesetz, 1965 mit einer etwas anderen Zeitkonstante vorhergesagt, hat sich in den 50 Jahren der Halbleiterindustrie bewährt und wird vermutlich noch bis etwa 2030 gültig bleiben.

Die Lithografie selbst wird heute mit Scannern durchgeführt. Sie tasten die Belichtungsmaske ab und übertragen dabei immer einen kleinen Teil der Maske in höchster optischer Qualität auf den beschichteten

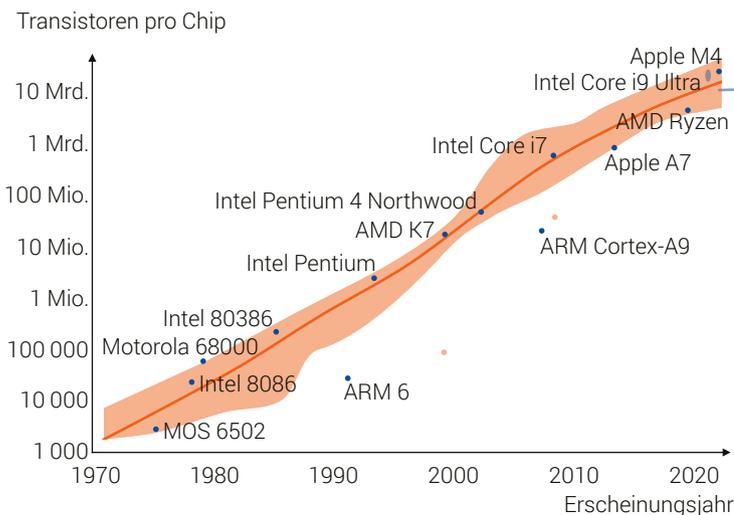
Wafer. Jede Ungenauigkeit bei der Positionierung des Scanprozesses geht zu Lasten der elektronischen Eigenschaften und der Effizienz des Chips. Die Qualität des Lithografiescanners und des eingesetzten Verfahrens hat also direkten Einfluss auf die Leistung des produzierten Mikrochips. In der Praxis bedeutet dies, dass die Grenzen des verfügbaren Lithografiescanners bestimmen, welche Art von Chips man zu einem bestimmten Zeitpunkt herstellen kann.

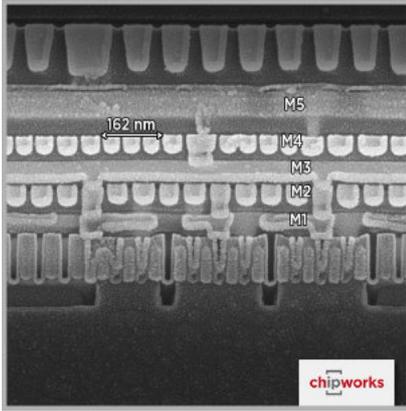
Das Mooresche Gesetz und die Lithografie

Mehr als 50 Jahre lang wurde der Fortschritt der Halbleiterindustrie bei der Herstellung von Chips und damit auch der Lithografie durch ein Gesetz bestimmt, das nach dem späteren Mitbegründer der Firma Intel, Gordon Moore, benannt ist: In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1965 stellte Moore fest, dass „die Komplexität für minimale Komponentenkosten etwa um den Faktor zwei pro Jahr zugenommen hat“. Er sagte voraus, dass dieser Trend noch ein Jahrzehnt anhalten würde. Dieses **Mooresche Gesetz** ist auch heute noch gültig, wobei es natürlich kein Naturgesetz ist, sondern eine historische Beobachtung und eine damit verbundene Projektion, dass die Leistungsfähigkeit von Computerchips weiter exponentiell wachsen würde. Diese Aussage beruht auf dem wirtschaftlichen Gewinn jeder neuen Generation von Halbleiterbauelementen und resultiert in einer höheren erreichten Funktionalität. Heutzutage ist neben der Anzahl der Chips auf einer Fläche auch die **Energieeffizienz** ein wichtiger Faktor, der das exponentielle Wachstum der Funktionalität vorantreibt.

Die Entwicklung der optischen Lithografie ist ein ständiges Streben nach einer verbesserten Auflösung und damit nach der Abbildung immer kleinerer Strukturen. Wie erstmals von Ernst Abbe beschrieben, gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten, die Auflösung zu verbessern: Entweder verkürzt man die Wellenlänge oder man vergrößert die Winkelöffnung der Projektionsoptik, die numerische Apertur.

In den vergangenen Jahren hat vor allem der erste Ansatz zum Erfolg geführt: Scanner für extremes Ultraviolettlicht (EUV) mit 13,5 Nanometern ebneten den Weg für die Erweiterung des Mooreschen Gesetzes. Ermöglicht wurde dies durch mehrere bahnbrechende Erfindungen der modernen Physik, Materialwissenschaft und Technik.





Die Strukturen, die auf die Silizium-Wafer (links, im Querschnitt) aufgebracht werden, sind mit einem Hochhaus vergleichbar: In jedem Stockwerk gibt es eine eigene Architektur, um die Funktion der Halbleiterelemente herzustellen. Der Prozess aus Belichtung und Ätzen ist daher mehrstufig, was eine erhebliche Herausforderung an die Präzision der Positionierung der jeweils nächsten Ebene auf die schon bearbeitete erfordert.

Komplexe neue Fertigungstechnologie

Ein EUV-Scanner besteht – wie jeder lithografische Apparat – aus einer Maske, die das auf die Wafer zu übertragende Muster enthält, mit Maskenhandhabungseinheit. Für den Belichtungsprozess zuständig sind dann das optische System mit Pikometergenauigkeit sowie die Positionier- und Abtasteinheiten für den Wafer und die Maske mit einer Positionsgenauigkeit im Sub-Nanometerbereich. Außerdem benötigt man eine Lichtquelle, die Hunderte von Watt an EUV-Leistung erzeugt. Dies erreicht man mithilfe eines gepulsten Kilowattlasers, der auf einen sich schnell bewegenden Strom von Zinn-Teilchen mit einer Größe von weniger als 30 Mikrometern geschossen wird, die dadurch zum Plasma werden und dabei das gewünschte EUV-Licht abstrahlen.

Eine Besonderheit besteht darin, dass das EUV-System unter Vakuumbedingungen läuft und nicht bei Normaldruck wie herkömmliche optische Lithographiesysteme. Das ist notwendig, damit die EUV-Strahlung das System durchdringen kann und nicht durch Bestandteile der Luft absorbiert wird.

Auch Linsensystemen sind wegen der hohen Absorption aller Materialien im EUV-Bereich hier nicht geeignet, sodass man eine reflektierende Optik mit speziellen mehrschichtigen Spiegeln, sogenannten Bragg-Spiegeln, verwenden muss. All diese Innovationen erforderten großen Erfindungsgeist und viele Jahre Arbeit.

Mit hunderttausend Einzelteilen, die zur Sub-Nanometer-Positionsgenauigkeit nötig sind, ist ein aktuelles EUV-System

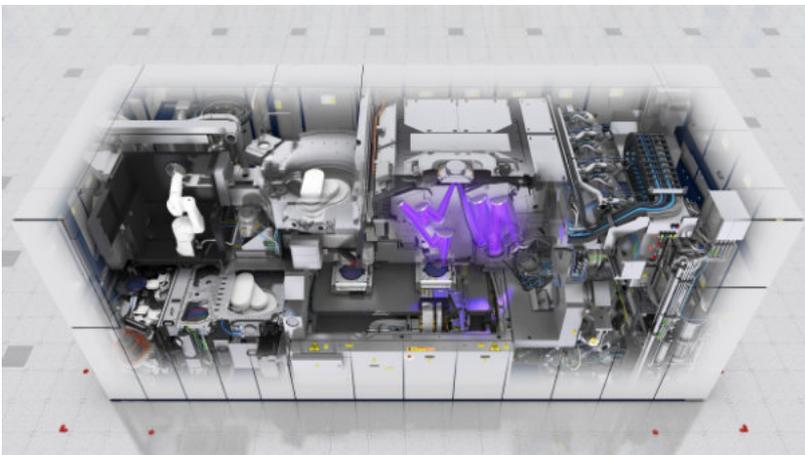
eine der komplexesten Maschinen, die von Menschenhand geschaffen wurden. Für den Transport und die Installation eines solchen Systems werden 40 Überseecontainer benötigt.

Neben dem EUV-Scanner selbst mussten auch die lichtempfindliche Oberflächenschicht des Wafers und die Maske neu erfunden und speziell für EUV optimiert werden, um die Abbildungsfähigkeiten des Scanners bestmöglich zu nutzen.

Die erhöhte Prozesskomplexität wird durch eine vorteilhafte Kostenentwicklung sowie eine höhere Leistungsdichte und Energieeffizienz der Chips mehr als ausgeglichen. Diese wiederum werden immer mehr intelligente Geräte und Anwendungen ermöglichen, etwa in den Bereichen autonomes Fahren, künstliche Intelligenz und Energiewende.

Um die EUV-Lithografie weiter zu verbessern, wird nun auch an der zweiten Stellschraube der Auflösung gedreht: der numerischen Apertur, also der Winkelöffnung der Projektionsoptik. Die niederländische Firma ASML hat Ende 2023 ein neues EUV-System mit hoher numerischer Apertur auf den Markt gebracht. Damit lassen sich nicht nur nanometergroße Strukturen effizient auf den Wafer übertragen, sondern auch mehr als 200 Wafer pro Stunde bearbeiten. Auch ein weiterer Zyklus der Auflösungsverbesserung mit erhöhter numerischer Apertur ist nach neuesten Überlegungen machbar. Das Mooresche Gesetz hat also noch lange nicht ausgedient.

Vadim Y. Banine und
Mark A. van de Kerkhof



Blick in das Innere eines modernen EUV-Scanners für den Lithografieprozess bei der Mikrochipherstellung. Nur wenige Unternehmen weltweit beherrschen die Technologie, um die notwendige Präzision für die Prozesse zu gewährleisten.

MAGNETISCHE DATENSPEICHERUNG

In Heimcomputern haben SSDs die klassischen Festplatten inzwischen weitgehend abgelöst. Doch für die effiziente und dauerhafte Speicherung wirklich großer Datenmengen geht an den magnetischen Speichern noch kein Weg vorbei. Und auch für den Arbeitsspeicher bieten magnetische Phänomene interessante Möglichkeiten.

Traditionelle ferromagnetische Speicher

Festplattenlaufwerke waren bis zur Verfügbarkeit von Solid-State-Drives (SSDs) eines der am häufigsten verwendeten Speichermedien für private, öffentliche und firmeninterne Daten.

Ein SSD ist ein halbleiterbasierte Speicher, der den quantenmechanischen Tunneleffekt ausnutzt. Er kommt ohne bewegte Teile aus.

Während Festplatten im privaten Bereich an Bedeutung verlieren, sind sie noch immer das Speichermedium der Wahl in Rechenzentren und damit auch in der Daten-Cloud. Das Schreiben und Lesen von Daten erfolgt darin auf sich drehenden Festplatten (engl. hard disk drives, HDD) über einen mechanischen Arm mit integriertem Schreib-Lese-Kopf, ähnlich wie Musik über Plattenspieler abgespielt wird. Festplattenlaufwerke haben eine hohe Speicherkapazität, sind sehr kostengünstig pro gespeicherter Informationsmenge und erlauben ausreichend schnelle Datenzugriffe für den täglichen Betrieb. Für die langfristige Datenspeicherung kommen häufig die weniger bekannten Bandlaufwerke zum Einsatz, weil sie langlebig sind und niedrige Kosten pro Terabyte verursachen, allerdings mit dem Nachteil, dass sie beim Zugriff auf bestimmte Daten erst einmal an die richtige Position gespult werden müssen, was nur im Archivbetrieb akzeptabel ist. Das Speicherprinzip von Festplatten und Bandlaufwerken ist dabei sehr ähnlich: Es basiert auf magnetischen Effekten im Material.

Die magnetische Speicherung besteht aus einem Schreib- und einem Lesevorgang. Selbst bei den rotierenden Festplatten ist die Zugriffsgeschwindigkeit auf die Daten aufgrund der mechanischen Bewegung der Platte und des Arms begrenzt: Nicht jeder Ort der Festplatte ist sofort erreichbar, um gelesen oder beschrieben zu werden. Das ist ein großes Hindernis, das mit voll integrierten magnetischen Aufzeichnungstechnologien ohne bewegliche Teile überwunden werden kann.

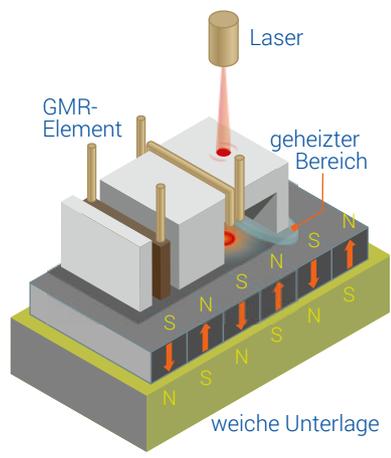
Zum Schreiben werden in ferromagnetischen Medien magnetisch entkoppelte, kleine kristalline Körner mithilfe eines Elektromagneten magnetisiert. Bei modernen Festplatten steht diese Magnetisierung senkrecht zur Plattenebene, und die Korngröße liegt im Bereich von sieben bis zehn Nanometern im Durchmesser. Wenige Körner bilden zusammen eine Informationseinheit, ein magnetisches Bit, mit einer Breite von zehn bis 20 nm. Je kleiner die Körner, desto mehr Bits können in einen bestimmten Bereich der Plattenoberfläche gepackt werden und desto höher ist die Speicherdichte. Diese lässt sich weiter steigern, wenn

man die Daten teilweise überlappend schreibt, ähnlich wie die Anordnung von Dachziegeln.

Die Körner können ihre Magnetisierung prinzipiell spontan umkehren, was einem Datenverlust gleichkommt. Um das zu verhindern, muss die sogenannte magnetische Anisotropie, also die Richtungsabhängigkeit der Magnetisierung, groß sein. Dies führt zu dem sogenannten Trilemma der magnetischen Speicherung: Das vom Miniaturelektromagneten erzeugte Magnetfeld ist durch das für den Schreibkopf verwendete Material begrenzt. Um ein großes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen, muss eine möglichst große Anzahl kleiner Körner in einem Bit enthalten sein. Damit diese kleinen Körner thermisch stabil sind, muss die magnetische Anisotropie groß werden. Das Magnetfeld, das für die Umkehrung der Körner erforderlich ist, hängt wiederum von der magnetischen Anisotropie des Materials ab, sodass es widersprüchliche Anforderungen an die thermische Stabilität und die Schreibfähigkeit gibt.

Um dieses Problem zu umgehen, kann man zum Beispiel durch einen Laserpuls lokal die magnetische Festplatte erhitzen, um auf diese Weise die benötigte Magnetfeldstärke für das Schreiben des Speicherinhalts zu verringern. Dazu wird der integrierte Schreib-Lese-Kopf durch einen plasmonischen Wellenleiter ergänzt, der im Nahfeld Laserlicht auf einen Fokus von weniger als 100 nm unter dem Schreib-Lese-Kopf fokussiert. Nach dem durch die Erwärmung erleichterten Schreibvorgang kühlt die magnetische Schicht mit der

Prinzip eines thermisch assistierten Schreib-Lesekopfs. Der Schreibkopf besteht aus einem miniaturisierten Hufeisenmagneten, dessen magnetischer Fluss durch das magnetische Medium und die darunter liegende weichmagnetische Schicht geschlossen wird. Mit einem Laser wird das magnetische Medium erhitzt, um das notwendige Schreibfeld zu reduzieren. Auf der linken Seite befindet sich das Leseelement (GMR- oder TMR-Sensor). Das Medium bewegt sich wie die Schallplatte bei einem Schallplattenspieler unter dem Arm des Schreib-Lesekopfs.



gewünschten Orientierung des Speicherinhalts wieder ab und ist danach stabil auslesbar. Erste Festplatten, die mit diesem Prinzip arbeiten, wurden im Jahr 2018 auf den Markt gebracht.

Eine weitere Möglichkeit ist es, die magnetische Festplatte lokal mit Mikrowellen im Frequenzbereich von 20-40 GHz zu bestrahlen, um auf diese Weise die benötigte Energie bereitzustellen, die für die Senkung der Schreibfeldstärke benötigt wird.

Um die Daten wieder auszulesen, wird ein magnetischer Sensor verwendet, der in den Lesekopf integriert ist. Die ersten integrierten Leseköpfe basierten auf dem Prinzip des anisotropen Magnetwiderstands (AMR-Effekt): Bei einem stromdurchflossenen Sensor variiert der elektrische Widerstand in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Magnetisierungsrichtung und Stromfluss: Er ist am größten, wenn das Magnetfeld in oder gegen die Stromrichtung ausgerichtet ist, und am kleinsten, wenn das Magnetfeld senkrecht zur Stromrichtung liegt. Mit einem weichmagnetischen Sensormaterial lassen sich die kleinen Magnetfeldänderungen zwischen den Bits über die Änderung des elektrischen Widerstands messen.

Riesenmagnetowiderstand

Weniger als zehn Jahre nach der Entdeckung des **Riesenmagnetowiderstands** (Giant MagnetoResistance, GMR) 1988 durch Peter Grünberg und Albert Fert (Nobelpreis 2007) wurden AMR-Sensoren durch GMR-Sensoren ersetzt, die aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften bestehen. Weitere zehn Jahre später wurde diese Technologie durch die noch empfindlicheren **Tunnelmagnetwiderstandssensoren** (engl. Tunneling MagnetoResistance, TMR) abgelöst.

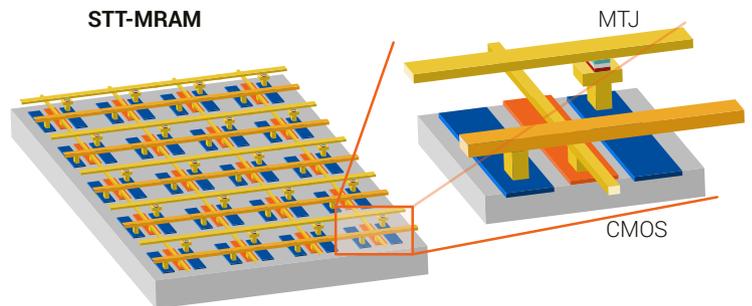
Elektronen besitzen neben ihrer negativen elektrischen Elementarladung auch ein winziges elementares magnetisches Dipolmoment, das so genannte Spin-Dipolmoment. Fließt ein elektrischer Strom durch einen Ferromagneten, so bewegen sich Elektronen durch ihn hindurch. Bei den meisten von ihnen sind die Spin-Dipolmomente entlang der Magnetisierungsrichtung des Ferromagneten ausgerichtet. Man spricht von einem spinpolarisierten Strom, der sogar dann spinpolarisiert bleibt, wenn er den Ferromagneten verlässt und z. B. durch eine dünne nichtmagnetische Schicht in einen benachbarten Ferromagneten fließt. Sind die Magnetisierungsrichtungen beider Ferromagneten parallel ausgerichtet, können die spinpolarisierten Elektronen ungehindert auch in den zweiten Ferromagneten fließen. Der elektrische Widerstand ist dann gering. Sind die Magnetisierungsrichtungen hingegen antiparallel ausgerichtet, werden die spinpolarisierten Elektronen an den ferromagnetischen Grenzflächen stark gestreut, was zu einem hohen elektrischen Widerstand führt.

Dieses spinabhängige Streuen der Elektronen und die damit verbundene Widerstandsänderung ist umso größer, je besser die Spinpolarisation des Elektronenstroms beim Durchgang durch die nichtmagnetische Schicht erhalten bleibt. Sie kann durch eine sehr dünne einkristalline Magnesiumoxidschicht

sogar noch verstärkt werden, etwa beim quantenmechanischen Tunneltransport. Dabei werden einige Elektronen unterdrückt, während andere nahezu ungehindert tunneln können. Die Elektronen, die passieren können, haben eine besonders hohe Spinpolarisation. Die entsprechenden Widerstandsänderungen beim spinabhängigen Tunneln können dann mehr als 100% betragen. Handelt es sich bei der Zwischenschicht um ein nichtmagnetisches Metall, spricht man vom Riesenmagnetowiderstand oder GMR-Effekt, bei dem die Widerstandsänderung immerhin noch bis zu 100% betragen kann.

Sensoren, die auf dem TMR-Effekt beruhen, bilden auch das Herzstück von nichtflüchtigen Magnetspeichern – also Speichern, auf denen Daten lange bewahrt werden und nicht verloren gehen. In einem Dreilagensystem aus einer ferromagnetischen Sensorschicht, einer ultradünnen Tunnelbarriere und einer zweiten ferromagnetischen Referenzschicht lesen diese Sensoren die Magnetisierung aus. Andererseits lässt sich in diesem Schichtsystem die Magnetisierungsrichtung in der Sensorschicht durch einen ausreichend starken Strompuls schalten. Erste nichtflüchtige magnetische Speicher dieser Art – MRAMs – sind seit wenigen Jahren auf dem Markt.

Beispiel für einen magnetischen Speicher, der ohne bewegliche Teile auskommt. Die einzelnen Bits werden durch magnetische Tunnelelemente (magnetic tunnel junctions, MTJ) realisiert. Die Magnetisierung der sog. freien Schicht kann durch einen starken Strompuls geschaltet werden. Je nach Vorzeichen des Strompulses ergibt sich eine „Null“ oder eine „Eins“. Ausgelesen wird das Element mittels eines schwachen Lesestroms durch das Element auf Basis des TMR.



Schalten mit Strompulsen

Besonders große Fortschritte hinsichtlich Energieeffizienz und Miniaturisierung magnetischer Speicher wurden erzielt, indem die magnetische Ordnung mit spinpolarisierten elektrischen Strömen oder sogar mit Spinströmen geschaltet wird. Bei Spinströmen werden im Gegensatz zu elektrischen Strömen nicht die elektrischen Ladungen, sondern nur die spinmagnetischen Momente der Elektronen transportiert, was zu deutlich geringeren thermischen Verlusten führt. Solche neuartigen Magnetspeicher, die auf dem Transfer spinmagnetischer Momente basieren, werden seit 2013 kommerziell für deutlich beschleunigte Computerarchitekturen eingesetzt und könnten auch die Grundlage für Memristor-Magnetspeicherbauelemente in zukünftigen „Brain-inspired Computing“-Anwendungen bilden.

Exchange-Bias-Effekt

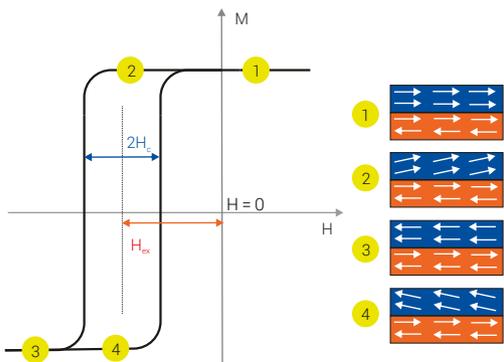
Magnetische Ordnung entsteht grundsätzlich durch die Austauschwechselwirkung. Dabei tauschen Atome untereinander Elektronen aus, weil es energetisch vorteilhaft ist. Diese Wechselwirkung kann auch zwischen Atomen an Grenzflächen stattfinden, z. B. am Übergang zwischen einer ferromagnetischen und einer antiferromagnetischen Schicht. In diesem Fall kann die gegen äußere Magnetfelder resistente antiferromagnetische Ordnung die Magnetisierung der angrenzenden ferromagnetischen Schicht an sich binden. Erst bei starken Magnetfeldern, die diese Bindung brechen, lassen sie eine Ausrichtung der Magnetisierung entsprechend des angelegten Felds zu.

Antiferromagnete sind am ehesten in der Nähe der kritischen Néel-Temperatur magnetisierbar. Das ist die Temperatur, oberhalb derer ein Antiferromagnet seine magnetische Ordnung verliert und paramagnetisch wird. Erwärmt man nun einen Antiferromagneten bis nahe der Néel-Temperatur und kühlt ihn anschließend unter gleichzeitigem Anlegen eines starken Magnetfelds ab, so kann man dem Antiferromagneten eine Vorzugsrichtung der antiferromagnetischen Ordnung aufprägen. In einem bestimmten Temperaturbereich bleibt diese Vorzugsrichtung erhalten. Bringt man den Antiferromagneten dann mit einem Ferromagneten in Kontakt, so gibt der Antiferromagnet eine Vorzugsrichtung der magnetischen Momente vor. Dieser „Exchange-Bias-Effekt“ ermöglicht die Realisierung von Magnetfeldsensoren und magnetischen Speicherelementen auf Basis des GMR- und TMR-Effekts, wie sie zum Beispiel in Festplatten verwendet werden. Dies ist die derzeit einzige Anwendung von Antiferromagneten in heutigen Magnetfeldsensoren und Speicherbauelementen und wird zur Stabilisierung der Referenzmagnetisierungsrichtung genutzt.

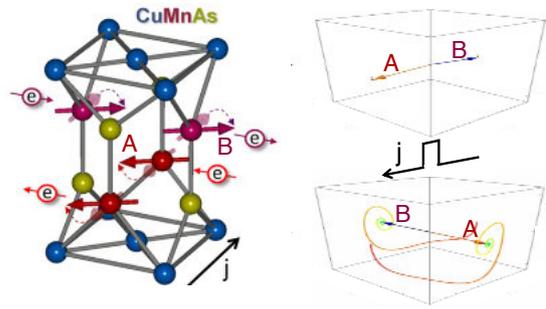
Antiferromagnete als potenzielle Speicher

Im Gegensatz zu der seit Jahrtausenden bestehenden Faszination für Ferromagnete und deren vielfältige Verwendungen

(a) Hysteresekurve der Ummagnetisierung einer ferromagnetischen Schicht, verschoben um das „Exchange-Bias“-Feld „Hex“ nach dem Meiklejohn-Bean-Modell. Die Punkte 1 bis 4 entsprechen der Hysteresekurve der Ummagnetisierung eines Ferromagneten, der durch die gemeinsame Grenzfläche mit einem Antiferromagneten „exchange-gebiased“ ist. Für einen einfachen Ferromagneten ohne „exchange bias“ liegt das Zentrum der Hysterese bei $H = 0$. Die magnetischen Momente an der FM/AFM-Grenzfläche während des Ummagnetisierungsprozesses sind in (b) schematisch dargestellt.



„exchange bias“ liegt das Zentrum der Hysterese bei $H = 0$. Die magnetischen Momente an der FM/AFM-Grenzfläche während des Ummagnetisierungsprozesses sind in (b) schematisch dargestellt.



Links: Kristallstruktur von CuMnAs, einem pt -symmetrischen Antiferromagneten, in dem die lokale Inversionssymmetriebrechung ein auf atomarer Skala alternierendes relativistisches Spin-Bahn-Wechselwirkungsfeld erzeugt, das das Schalten der antiferromagnetischen Ordnung ermöglicht. Rechts: symbolische Darstellung des durch einen Strompuls hervorgerufenen Schaltvorgangs, bei dem das durch das relativistische Spin-Bahn-Wechselwirkungsfeld erzeugte Drehmoment die durch die Pfeile symbolisierten Magnetisierungen der beiden Untergitter gegeneinander verkippt. Die vor dem Strompuls bestehende Gleichgewichtslage der Gittermagnetisierungen (oben) geht dann durch gedämpfte Präzession in eine neue, um 90° gedrehte Gleichgewichtslage über (unten).

wurden antiferromagnetische Materialien, die erst seit etwa 100 Jahren bekannt sind, bisher kaum für praktische Anwendungen in Betracht gezogen. Der Grund dafür liegt in der alternierenden Anordnung der mikroskopischen magnetischen Momente, die zu keiner makroskopischen Magnetisierung führt und deren magnetische Ordnung sich deshalb nur schwer nachweisen und durch äußere Magnetfelder kaum beeinflussen lässt. Selbst der Entdecker des Antiferromagnetismus, Louis Néel, fand diese Materialien „interessant, aber nutzlos für praktische Anwendungen.“ Grundsätzlich erfüllen aber auch Antiferromagnete die Voraussetzung für eine gerichtete magnetische Ordnung, die man für nichtflüchtige Datenspeicherung nutzen kann.

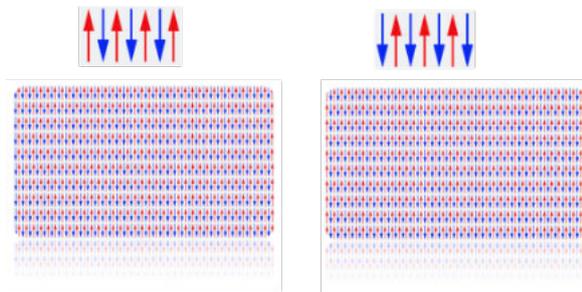
Elektrisches Schalten von Antiferromagneten

Wie lässt sich die mikroskopische Ordnung in einem Antiferromagneten also am besten beeinflussen? Erste Experimente zeigen, dass ein Schalten durch Strompulse möglich ist. Dahinter steckt ein Effekt der speziellen Relativitätstheorie: Ein statisches elektrisches Feld wandelt sich in einem relativ dazu bewegten Bezugssystem in ein magnetisches Feld um. In einigen antiferromagnetischen Kristallen existiert am Ort der magnetischen Atome lokal ein elektrisches Feld, das als Kristallfeld bezeichnet wird.

Besitzt der Kristall außerdem eine sogenannte p (arity)- t (ime-reversal)-Symmetrie, so ist die Ausrichtung des elektrischen Kristallfelds bei magnetischen Atomen, die zu unterschiedlichen magnetischen Untergittern gehören, genau entgegengesetzt. Fließt durch einen solchen pt -symmetrischen Antiferromagneten ein Strom, so „spüren“ die Elektronen, die sich im Kristall bewegen, an den Positionen der magnetischen

Atome, die zu verschiedenen magnetischen Untergittern gehören, ein entgegengesetzt gerichtetes Magnetfeld. Entsprechend richten sich dort die magnetischen Spinmomente der Elektronen entgegengesetzt aus. Ähnlich wie beim Spintransfer bei Ferromagneten können die dann atomar alternierenden Elektronenspins auf die ebenfalls atomar alternierende antiferromagnetische Ordnung übertragen werden. Durch die Übertragung der lokal alternierenden Spinpolarisation kann die antiferromagnetische Ordnung durch einen Strompuls umgekehrt werden.

Dabei könnten Antiferromagnete im Vergleich zu Ferromagneten um Größenordnungen schneller schalten. Betrachtet man z. B. die Dynamik der Magnetisierung eines Ferromagneten, so bleiben die einzelnen atomaren magnetischen Momente während der Anregung untereinander parallel gekoppelt. Die Schaltgeschwindigkeit wird dann nur durch das interne magnetische Anisotropiefeld und eventuell noch durch ein von außen angelegtes Magnetfeld bestimmt. Typischerweise erreicht man hier **Schaltzeiten im Bereich von einer Nanosekunde** (10^{-9} s). Bei Antiferromagneten, die aus mindestens zwei magnetischen Untergittern bestehen, verkippen während der Anregung die magnetischen Momente verschiedener Untergitter gegeneinander, sodass dann die antiferromagnetische Ordnung sich nicht nur – wie beim Ferromagneten – in der Richtung, sondern auch im Betrag zeitlich ändert. Das dadurch dann auf die magnetischen Momente wirkende antiferromagnetische Austauschfeld ist verantwortlich für die sehr schnelle Dynamik von Antiferroma-



Ausrichtung von Spin-Momenten in kollinearen Antiferromagneten. Schaltet man sämtliche magnetische Momente um, so scheint sich der makroskopische Zustand beim Antiferromagneten nicht geändert zu haben. Bei pt-symmetrischen Antiferromagneten lassen sich die beiden Zustände, z. B. durch elektrische Widerstandsmessungen unterscheiden.

gneten und kann **Umschaltzeiten innerhalb von Pikosekunden** (10^{-12} s) ermöglichen.

Lange Zeit ging man aber davon aus, dass eine 180° -Umschaltung der antiferromagnetischen Ordnung auf makroskopischer Ebene keinen Unterschied macht, da sich die magnetischen Momente immer noch gegenseitig aufheben. Eine Kodierung und Speicherung von Information galt daher lange Zeit als ausgeschlossen.

Vor einigen Jahren ist es neben dem stromabhängigen Umschalten der antiferromagnetischen Ordnung aber auch ge-

tragen sollen. Das ist eigentlich ein typisches Kennzeichen von Antiferromagneten, bei denen die Elementarmagnete jeweils gegensätzlich ausgerichtet sind, sodass kein inneres Magnetfeld besteht.

Andererseits sind aber Magnete gewünscht, die über den Strom von Spins geschrieben und ausgelesen werden können. Das bedeutet, dass sie eine Spin-Polarisation des Stroms ermöglichen müssen, was eine typische Eigenschaft von Ferromagneten ist.

Dieser scheinbare Widerspruch hat sich durch die Entdeckung der **Altermagnete** aufgelöst. Diese Materialien weisen eine magnetische Ordnung auf, bei der benachbarte magnetische Momente antiparallel, also entgegengesetzt, angeordnet sind. Somit wird wie in einem Antiferromagneten kein netto magnetisches Moment erzeugt. Das Besondere ist aber: Betrachtet man in solch einem Material nur Elektronen, die sich in eine bestimmte Richtung bewegen, so haben diese dann eben doch den gleichen Spin – es entsteht ein spinpolarisierter Elektronenstrom, der für Speicher und Datentransfer nutzbar sein dürfte.

Altermagnete verbinden somit die Vorteile von Antiferromagneten und Ferromagneten. Eine Reihe von Forschungsaktivitäten zielt nun darauf ab, sich mit der grundlegenden Physik der unkonventionellen Magneten, experimentellen Signaturen und Perspektiven für die Nutzung in zukünftigen Informationstechnologien zu befassen.

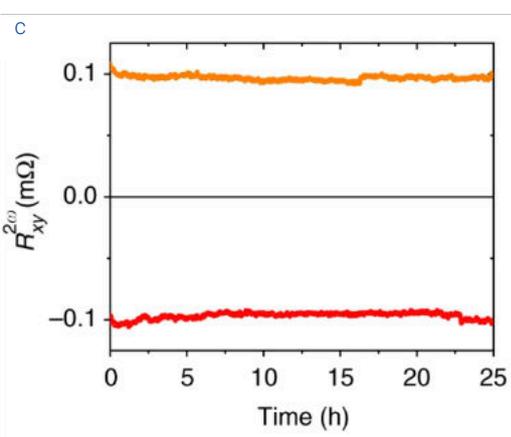
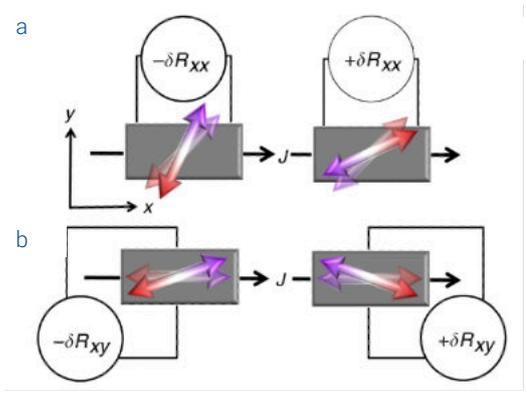
Tomáš Jungwirth und Mathias Kläui

DAS BESTE AUS ZWEI WELTEN

Dass Magnete über ihre Magnetfelder miteinander in Wechselwirkung treten können, ist die Grundlage für viele technische Geräte, vom Kompass über analoge magnetische Datenspeicher im 19. Jahrhundert bis zu aktuellen digitalen Datenspeichern z. B. in Festplatten. Hier werden vor allem Ferromagneten eingesetzt, bei denen ein äußeres Magnetfeld dazu führt, dass sich die Elementarmagneten des Materials alle parallel ausrichten, was die Magnetisierung im Inneren verstärkt. Wird das äußere Magnetfeld abgeschaltet, so bleibt die magnetische Ordnung im Material bestehen – damit lassen sich Informationen speichern.

Die neueste Technologie für ferromagnetische Bits in modernen Chips nutzt zum Lesen und Schreiben statt Magnetfeldern den Transport von magnetischen Momenten: Elektronen übertragen ihre Spinausrichtung auf das Material, weil benachbarte Elektronen miteinander in Wechselwirkung treten und dabei ihren Spin gleich ausrichten. Hierbei stören allerdings äußere Magnetfelder, und auch die Magnetfelder benachbarter Bits können sich gegenseitig beeinflussen. Daher lassen sich Speicher aus Ferromagneten nicht zu eng stapeln, sodass sie ab einem bestimmten Punkt nicht mehr kompakter gebaut werden können.

Deshalb sucht man nach neuen Magneten, die sich nicht von Magnetfeldern beeinflussen lassen und nicht über Felder miteinander koppeln. Das bedeutet, dass sie netto kein magnetisches Moment



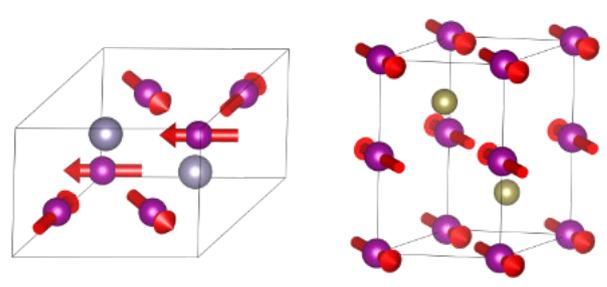
(a) Schematische Darstellung des Prinzips nichtlinearer Magnetotransportmessungen: Fließt ein Strom durch einen symmetrischen Antiferromagneten, so kann sich die antiferromagnetische Ordnung geringfügig ändern. In der Abbildung ist die antiferromagnetische Ordnung als Doppelpfeil dargestellt, der je nach magnetischer Polarisation geringfügig nach oben oder unten ausgelenkt wird. Diese stromflussabhängigen Auslenkungen

beeinflussen wiederum den durch den Antiferromagneten fließenden Strom, d. h. es kommt zu einer stromabhängigen Widerstandsänderung, aus der die antiferromagnetische Ordnung ermittelt werden kann.

(b) Stromabhängige Widerstandsänderung bei zwei entgegengesetzten antiferromagnetischen Spinzuständen. Das Umschalten zwischen den beiden antiferromagnetischen Zuständen erfolgt durch einen kurzen Strompuls. Wie die Messungen des nichtlinearen Widerstands zeigen, bleiben die antiferromagnetischen Zustände nach dem Umschalten erhalten. So wurden die Messungen des nichtlinearen Widerstands jeweils über 25 Stunden bei Raumtemperatur durchgeführt (c), ohne dass sich ein Verlust der in den Antiferromagneten eingeschriebenen Information abzeichnete.

Ausblick: Nichtkollineare Antiferromagnete und Altermagnete

Auch Antiferromagnete besitzen Anwendungspotenzial im Bereich **energiesparender Speicherbauelemente**. Allerdings werden nur bei ganz bestimmten antiferromagnetisch geordneten Systemen größere magnetische Transporteffekte wie GMR und TMR erwartet, die in magnetischen Speichern zum Detektieren des antiferromagnetischen Zustands benötigt werden. Zu diesen Systemen gehören die nichtkollinearen Antiferromagnete und Altermagnete. Wie bei konventionellen Antiferromagneten kompensieren sich auch hier die atomaren magnetischen Momente, auch sie besitzen keine makroskopische Magnetisierung. Die spezielle Kristallstruktur und die Anordnung der atomaren magnetischen Momente im Kristall erlauben jedoch bei diesen Systemen, ähnlich wie bei Ferromagneten, eine Spinpolarisation der elektrischen Ströme. Unter bestimmten Bedingungen können sogar ausschließlich magnetische Spinmomente transportiert werden, ohne dass dabei gleichzeitig elektrische Ladungen fließen. Auch kann ein Temperaturgefälle in diesen Systemen zum Spintransport führen. Umgekehrt ist zu erwarten, dass mit Spinströmen auch die makroskopische antiferromagnetische Ordnung manipuliert werden kann. Im Gegensatz zu Ferromagneten sollte dies bei Systemen mit antiferromagnetischer Ordnung im ultraschnellen Pikosekundenbereich möglich sein.



links: Magnetische Kristallstruktur von Mn_3Sn , einem nichtkollinearen Antiferromagneten mit drei magnetischen Untergittern. Die magnetischen Mn-Atome sind magenta, die Sn-Atome silbern gefärbt.

rechts: magnetische Kristallstruktur von $MnTe$, einem Altermagneten

Christian Back und Jörg Wunderlich

RECHENLEISTUNG RAUF, ENERGIEBEDARF RUNTER

Hochleistungsrechner und künstliche Intelligenz gewinnen immer mehr an Bedeutung, drohen allerdings auch einige grundsätzliche Grenzen zu sprengen. Um sowohl den Energieverbrauch dieser Technologien zu zügeln als auch um letztlich Grundrechte zu wahren, braucht es ein Umdenken bei der genutzten Hardware.

Immer größer werdende Datenmengen schnell verarbeiten zu können gewinnt mehr und mehr an Bedeutung – egal ob bei der Klima- oder Wettervorhersage, in der Astrophysik, Genetik oder Strömungssimulation. Wo herkömmliche Computer an ihre Grenzen stoßen, kommen Hochleistungsrechner zum Einsatz – man spricht auch von „High Performance Computing“ (HPC). Zudem erlauben Methoden der **künstlichen Intelligenz (KI)**, Maschinen mit Aufgaben zu betrauen, die ursprünglich nur Menschen lösen konnten: Beispielsweise mit der Erkennung von Mustern oder dem Lernen anhand von Beispielen. Die Art, wie KI mit großen Datenmengen umgeht, ist dabei völlig anders als bei klassischer Datenanalyse großer Datenmengen (siehe „KI und Big Data verändern die physikalische Forschung“ auf Seite 155)

HPC und KI haben sich in den vergangenen Jahren enorm weiterentwickelt und sind in unserer modernen Welt eng miteinander verknüpft beziehungsweise bedingen einander sogar: Einerseits wird zur Erforschung und Ausführung von KI in vielen kritischen Anwendungen HPC als Computing-Plattform benötigt. KI ist im technischen Sinne nämlich zunächst einmal ein Algorithmus, der auf Großrechnern, also auf HPC-Plattformen, abgearbeitet wird. Andererseits kann KI die Performance des HPC bei bestimmten Anwendungen wesentlich erhöhen – zukünftig voraussichtlich noch viel stärker als heute.

Die Kombination aus KI und HPC soll in Zukunft in bedeutenden Anwendungsfeldern eingesetzt werden, darunter im Bereich der Kommunikation, der Energieversorgung, in Indus-

trie, Robotik und Medizin. Ihr Einsatzgebiet umfasst dabei unter anderem

- den Aufbau und die Optimierung zukünftiger Kommunikationssysteme wie z. B. 6G,
- die Optimierung von Energie- und Versorgungsnetzen,
- das Finden und Optimieren von neuen Medikamenten, das Diagnostizieren von Krankheiten und ihre Behandlung durch Erforschung entsprechender Wirkstoffe,
- das Finden und Erforschen von neuen Materialien und Rohstoffen,
- das Design und die Optimierung der Industrieproduktion.

Man sieht aus dieser Auflistung schon, dass KI besonders in den Bereichen eingesetzt wird, wo eine bessere Nutzung vorhandener Ressourcen als bisher das Ziel ist: in der Optimierung.

Vorbehalte und rechtliche Erwägungen

Es gibt jedoch auch einige Vorbehalte beim HPC und bei der KI. Insbesondere im Fall von KI ging die rasante Entwicklung auch auf Kosten der Vertrauenswürdigkeit. Ein aktuelles Beispiel dafür ist das „Halluzinieren“ von generativen Modellen. So macht der Chatbot ChatGPT manchmal falsche oder widersprüchliche Aussagen und bildgenerierende KIs wie Dall-E lassen zuweilen Körperteile sprießen, wo keine hingehören.



Notwendige Entwicklung der Computing-Theorien und entsprechender Hardware-Plattformen bei gleichzeitiger Unterstützung von weiter steigender Computing-Leistung und Reduktion des Energieverbrauchs.

HARDWARE IN VIER VARIANTEN

Digitale Hardware: Information ist binär. Berechnungen werden in Schritte aufgeteilt und nacheinander durchgeführt.

Analoge Hardware: Information ist kontinuierlich (z. B. die Amplitude einer Schwingung). Ein wissenschaftliches Problem wird mithilfe eines analogen Modells nachgebaut und simuliert.

Neuromorphe Hardware: Neuromorphe Chips spiegeln die Vernetzung in unserem Gehirn wider. Berechnungen laufen parallel und vernetzt ab.

Quantenhardware: In Quantencomputern sind die einzelnen Informationseinheiten nicht binär, sondern können alle Zustände gleichzeitig annehmen. Damit sind für bestimmte Aufgaben schnellere Rechnungen möglich.

Nun muss eine Schwachstelle einer Technologie nicht grundsätzlich ihren Einsatz verhindern. Viele der zuvor genannten Einsatzgebiete greifen allerdings in die kritische Infrastruktur der modernen Gesellschaft ein (Energie und Infrastruktur) und/oder beeinflussen zentrale, individuelle menschliche Anliegen (Medizin). Daher kann man argumentieren, dass diese Anwendungen vertrauenswürdige und verlässlich arbeitende Werkzeuge benötigen, die technischen und gesetzlichen Regelungen unterliegen.

In der Tat wird dieser Ansatz auch auf europäischer Ebene mit der Verabschiedung des [EU AI Act](#) im Jahr 2024 verfolgt, in dem Richtlinien für den Einsatz von KI-Techniken ausformuliert sind. Die technischen Details der Richtlinien werden weiterhin intensiv diskutiert, man könnte ihre Zielsetzung in Hinblick auf Vertrauenswürdigkeit und zum Schutz von (Grund)rechten jedoch grob unter den folgenden Gesichtspunkten zusammenfassen:

- **Algorithmische Transparenz (AT):** Die Faktoren, die das Ergebnis des Algorithmus bestimmen, müssen für die Gesetzgebung und Nutzende sichtbar sein.

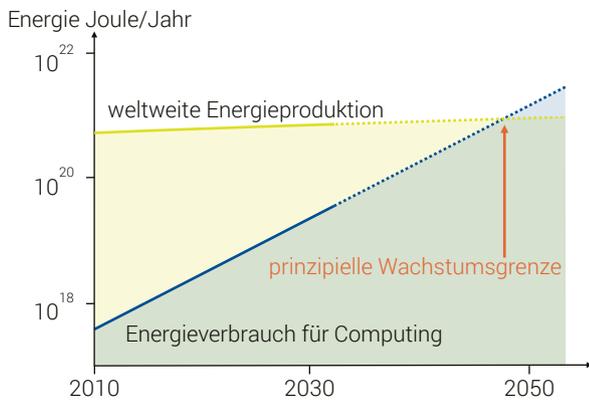
- **Recht auf Erklärung (RE):** Personen, die von einer automatisierten Entscheidungsfindung betroffen sind, können eine eindeutige Erklärung der Gründe für die Entscheidung verlangen.
- **Algorithmische Verantwortlichkeit (AV):** Die Betreiber:innen von automatisierten Entscheidungsprozessen können für die getroffenen Entscheidungen verantwortlich gemacht werden.

Es ist nun eine wesentliche Aufgabe, diese rechtlichen und juristischen Richtlinien in mathematischer Weise zu formalisieren, um exakte technische Anforderungen erstellen und gewährleisten zu können. Im Fall von HPC und KI spielt die Hardwareplattform eine entscheidende Rolle. Die Computing-Theorie untersucht deshalb präzise die Performance von Hardwareplattformen mithilfe mathematischer Beschreibungen. Dabei ist eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen digitaler, analoger, neuromorpher und Quanten-Hardware sinnvoll, aber es sei angemerkt, dass die einzelnen Kategorien auch überlappen können.

LANDAUER-GRENZE

In den vergangenen Jahrzehnten stand einem exponentiellen Anstieg der Datenmengen in der Informationsverarbeitung ein ebensolcher Anstieg der Rechenleistung entgegen. Bekannt ist in diesem Zusammenhang das Mooresche Gesetz, das ein exponentielles Wachstum der Leistungsfähigkeit von Computerchips basierend auf der Erhöhung der Transistorendichte prognostiziert (Seite 177). Ein Ende dieser Entwicklung scheint sich abzuzeichnen, jedoch ist die Nachfrage nach immer größerer Rechenleistung ungebrochen. Eine Problematik in diesem Zusammenhang ist der mit der zunehmenden Leistung verknüpfte stetige **Anstieg des Energieverbrauchs** von Mikrochips. Ist eine Trennung dieser beiden Komponenten, d. h. Leistung und Energieverbrauch, prinzipiell möglich? 1961 formulierte Rolf

Landauer eine Hypothese, die die nötige Energie für das Löschen eines Bits an Information aus der Thermodynamik ableitet. Sollte die Landauer-Hypothese zutreffen, die allgemein anerkannt wird, führt sie eine **theoretische Untergrenze** bei digitalen Computern für die Verlustleistung pro Rechenschritt ein, die, soviel sei angemerkt, mehrere Größenordnungen unter der momentan erreichten praktischen Verlustleistung liegt. Jedoch stellt sie eine prinzipiell untrennbare Kopplung von digitaler Rechenleistung und Energieverbrauch her, die auch mit zukünftigen digitalen Technologien nicht zu umgehen ist. Weiterhin beschreibt die Landauer-Grenze aber auch eine **Schranke für die Verkleinerung** von Bauelementen in der digitalen Mikroelektronik. Diese Verkleinerung der Bauelemente war bis zum heutigen Tag eine treibende Kraft zur Verlängerung des Mooreschen Gesetzes.



Nach gegenwärtiger Einschätzung auf Basis des Decadal Plan for Semiconductors der Semiconductor Research Corporation (SRC) wird die Lücke zwischen weltweiter Energieproduktion und Energieverbrauch von Computing kontinuierlich schrumpfen. Die stetige Weiterentwicklung der gegenwärtigen Computing-Technologien führt zwar zu einem Sinken des Energieverbrauchs pro Rechenschritt, doch zugleich verhindert der Anstieg der Anzahl der durchgeführten Rechenoperationen eine bedeutende Abflachung des Gesamtenergieverbrauchs. Um eine Wachstumsgrenze aufgrund von Energiemangel zu vermeiden, müssen deshalb neuartige Computing-Technologien entwickelt und implementiert werden.

Prinzipielle Leistungsgrenzen

HPC-Simulationen und KI-Systeme werden gegenwärtig fast ausschließlich auf digitaler Hardware durchgeführt. Diese wird durch das mathematische Modell der Turing-Maschine exakt erfasst. Trotz seines allgegenwärtigen Einsatzes und unbestreitbaren Erfolges hat digitales Computing eine prinzipielle Problematik: Nahezu alle physikalischen Prozesse können auf digitaler Hardware nicht exakt, sondern nur durch Näherung berechnet werden (siehe auch „Big Data, Simulation und Numerik“ auf Seite 19). Das verlangt nach einer Kontrolle des Fehlers der durchgeführten Rechnung zur tatsächlichen, physikalisch exakten Lösung – so könnte man beispielsweise verlangen, dass eine fest vorgegebene maximal zulässige Abweichung nicht überschritten wird.

In jüngster Zeit hat die Computing-Theorie sowohl für zentrale Anwendungsfelder in für KI-Einsätze gut geeigneten Sektoren als auch für physikalische Simulationen gezeigt, dass die geforderte Fehlerkontrolle mit digitaler Hardware prinzipiell nicht möglich ist. Mathematisch ausgedrückt ist die gestellte Aufgabe nicht Turing-berechenbar. Ohne Turing-Berechenbarkeit können aber weder Performance-Garantien noch die bereits genannten rechtlichen Anforderungen wie AT, RE und AV (in vollem Umfang) erfüllt werden.

Und selbst wenn ein Problem Turing-berechenbar ist, heißt das noch nicht, dass es mit digitaler Hardware auch tatsächlich praktisch lösbar ist. Bei einigen Problemen, wie beispielsweise die Simulation von Diffusionsprozessen und das Lösen von Differentialgleichungen, wächst in Abhängigkeit von der gewünschten Präzision die Anzahl der notwendigen Rechenschritte zu stark an, um praktisch akzeptabel zu sein: Selbst auf den schnellsten Computern dauert die Rechnung zu lang.

Energiebedarf

Mit der Anzahl der notwendigen Rechenschritte steigt auch der Gesamtenergieverbrauch des Berechnungsprozesses enorm an. Das unterstreicht eine zweite grundlegende Problematik des digitalen Computings: Rechenleistung und Energieverbrauch können nicht voneinander entkoppelt werden, da die minimal aufzuwendende Energie pro Rechen-

schritt eine untere physikalische Grenze besitzt – die sogenannte [Landauer-Grenze](#). Will man den Gesamtenergieverbrauch reduzieren, so muss man andere Informationsverarbeitungstechniken heranziehen.

Solche Techniken sind analoges und neuromorphes Computing sowie voraussichtlich Quantencomputing. Sie dürften als Hardwareplattformen zukünftig wesentlich an Bedeutung gewinnen, denn sie bieten einerseits einen potenziellen Ausweg aus der prinzipiellen Nicht-Lösbarkeit einer Aufgabenstellung auf digitaler Hardware (Nicht-Turing-Berechenbarkeit). Zudem ermöglichen neuromorphes Computing, analoges Computing und Quantencomputing den enormen Energieverbrauch, der durch KI und Computing verursacht wird, viel besser zu kontrollieren. Der zur Zeit beobachtete Anstieg des Energieaufwands könnte durch diese Techniken gebremst und langfristig reduziert werden. Aufgrund der physikalischen Landauer-Schranke für den minimalen Energieverbrauch pro digitalen Rechenschritt lässt sich das nur dadurch erreichen, dass der Anteil der digitalen Hardware an HPC und KI sinkt. Damit das Potenzial und die damit verbundenen Versprechen der alternativen, nicht-digitalen Hardwareplattformen realisiert werden können, braucht es jedoch zuerst beträchtliche theoretische Fortschritte. Dazu gehören insbesondere Weiterentwicklungen bei der Computing-Theorie für verschiedene Hardwaresysteme und bei geeigneten Maschinensystemen für neuromorphes Computing, analoges Computing (auch in Form von biologischem Computing) und Quantencomputing. Zudem sind auch die physikalischen Grundlagen der Computing-Theorie weiter zu erforschen und auszubauen.

Holger Boche, Adalbert Fono, Gitta Kutyniok

QUANTENCOMPUTER – ANWENDUNGEN UND REALISIERUNGEN

Quantencomputing verspricht eine ganze Reihe von heutzutage auf herkömmlichen, „klassischen“ Computern nicht lösbaren Rechenaufgaben zugänglich zu machen. Die Faszination ist gerechtfertigt, der aktuelle Hype ist es nicht.

Ein Schlüsselkonzept zum Verständnis von Quantencomputern ist das der quantenmechanische Überlagerung (*Superposition*). Klassische Computer speichern Informationen als Folgen der Ziffern 0 und 1 in sogenannten *Bits*. Ein Quantencomputer startet und endet ebenfalls mit solchen Binärwerten. Dazwischen – während der Berechnung – kann er aber mit mehreren Binärwerten in Überlagerung gleichzeitig arbeiten. Dies nennt man *Quantenparallelismus* – es werden mithilfe von Wahrscheinlichkeitswellen mehrere Rechenwege abgetastet. Würden wir in einem solchen Moment das Ergebnis abfragen, käme ein zufälliges Ergebnis aus einem der Rechenwege heraus. Demzufolge besteht die Herausforderung darin, den Computer mit den Überlagerungen so rechnen zu lassen, dass am Ende das Ergebnis eindeutig – oder wenigstens auf eine aussagekräftige Wahrscheinlichkeitsverteilung reduziert – herauskommt. Quantenalgorithmus setzen das über die geschickte Auslöschung (destruktive Interferenz) von Wahrscheinlichkeitswellen um. Dass diese Algorithmen funktionieren, wurde schon für verschiedene Aufgaben mathematisch gezeigt: für den *Grover-Algorithmus* (formuliert als schnelle Datenbankabfrage – allgemeiner das quantenparallele Testen von unbekannt Funktionen), für Auswertungen der schnellen Fourieranalyse wie z. B. bei der *Primfaktorzerlegung* von Ganzzahlen, für lineare Algebra und für verschiedene Optimierungsaufgaben. Diese Algorithmen sind dabei zunächst sehr abstrakt. Dies ist allerdings vergleichbar damit, dass die Programme in klassischen Computern auch oft auf abstrakten Algorithmen basieren, etwa zum Sortieren, zum Addieren oder Vergleichen. Fragestellungen mit relevanten Anwendungen aus den Algorithmen zusammenzubauen macht einen großen Teil der Entwicklung von Quantensoftware aus.

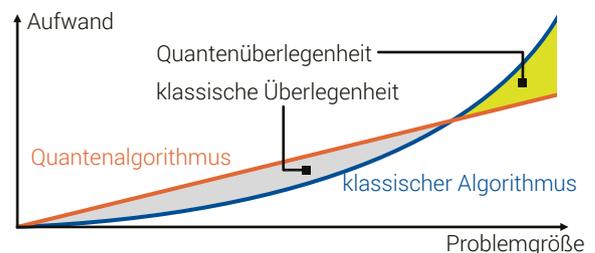
Obwohl sich das Rechnen für bestimmte Fragestellungen durch die quantenphysikalische Überlagerung deutlich beschleunigen lässt, profitieren die heute üblichsten Computeranwendungen davon nicht. Grafische Benutzeroberflächen, Chats, Textverarbeitung und Spiele werden in absehbarer Zukunft kein typischer Anwendungsfall von Quantencomputern werden.

Der Quantenvorteil

Klassische und Quantencomputer lösen prinzipiell dieselben Probleme – auf die Effizienz kommt es an. Diese wird in der Informatik damit gemessen, wie sehr der Rechenaufwand (Zahl der notwendigen Rechenoperationen oder Platz) mit der Problemgröße wächst – ob exponentiell oder als Potenzgesetz (und wenn ja, mit welchem Exponenten). Das Rechnen auf einem Quantencomputer kann dann überlegen sein, wenn dort der Rechenaufwand weniger stark mit der Problemgröße wächst als auf einem klassischen Computer. Das typische Beispiel hierfür ist die Zerlegung großer Zahlen in ihre Primfaktoren, was für das Knacken von Verschlüsselungsverfahren eine zentrale Rolle spielt. Für klassische Computer ist keine Methode bekannt, deren Aufwand bei steigenden Zahlen „nur“ mit einem Potenzgesetz steigt. Der *Shor-Algorithmus* für Quantencomputer jedoch folgt einem solchen Potenzgesetz, was für die Aufgabe der Faktorisierung einen Quantenvorteil ergibt, sobald ausreichend große Quantencomputer existieren.

Fundamental und akademisch wurde ein Quantenvorteil gegenüber aktuellen Hochleistungsrechnern durch die Präparation eines Zustands bereits gezeigt, der so umfangreich ist, dass er nicht mehr im klassischen Arbeitsspeicher aktueller Supercomputer gehalten werden kann. Um 50 *Qubits* in einem klassischen Arbeitsspeicher abzubilden, wären 2^{50} komplexe Fließkommazahlen notwendig. Eine Arbeitsgruppe von Google hat all dies 2019 in einem Test an einem 53-Qubit Chip verifiziert, die Ergebnisse wurden jedoch kontrovers diskutiert. Größere Chips auch in anderen Laboren folgten. Die Aufgabe war das Abarbeiten eines geeigneten zufälligen Algorithmus, der durch eine Fragestellung aus der Quantenphysik chaotischer Systeme motiviert war.

Quantenbeschleunigung: Der Rechenaufwand in Quantencomputern steigt bei einigen Problemstellungen langsamer als in klassischen. Bei großen Problemen ist der Quantenalgorithmus hier deutlich überlegen.



Tiefertemperaufbau zum Betrieb von Quantencomputern (OpenSuperQ).

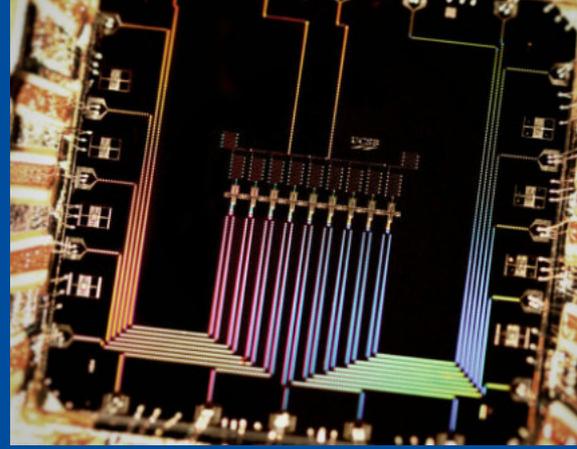
QUANTENBITS UND RESONANZ

Qubits werden mit dem physikalischen Prinzip der Resonanz gesteuert, also der Beobachtung, dass wir physikalische Systeme dann besonders gut antreiben können, wenn die Antriebsfrequenz der natürlichen Frequenz entspricht. In der Quantenphysik können wir die Energie und die Frequenz mittels $E = hf$ übersetzen, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist.

Bei supraleitenden Stromkreisen kommt uns da zunächst mal der einfache LC-Schwingkreis in den Sinn, der eine einzige Resonanzfrequenz hat. Das wird aber zum Problem: Wir wollen ja genau zwei Zustände 0 und 1 aus dem Energiespektrum des Quantensystems herauschneiden. Beim harmonischen Quanten-Oszillator gibt es aber unendlich viele Energieniveaus, und diese haben alle den gleichen Abstand. Wenn wir also per Resonanz von 0 nach 1 anregen wollen, dann geht es gleich weiter nach 2 und nach 3. Wir benötigen also einen Oszillator, dessen Energieabstand nicht konstant ist.

Hier kommt der Josephson-Kontakt zu Hilfe, der in supraleitenden Quantencomputern eine ähnliche Rolle hat wie der Transistor in klassischen Computern. Er wirkt wie eine nichtlineare Induktivität, was zur Folge hat, dass die Übergangsfrequenzen immer kleiner werden – d. h. $0 \leftrightarrow 1$ hat eine höhere Resonanzfrequenz als $1 \leftrightarrow 2$ usw. Damit kann mit Resonanzmethoden das Qubit angetrieben und Quantenlogik implementiert werden.

Generell bestimmen sich die Energien eines Qubits, die für die Steuerung genutzte Strahlung und die Betriebstemperatur $T = E/k_B$ gegenseitig (mit der Boltzmann-Konstante k_B). Optisch adressierte Qubits können, anders als supraleitende Qubits, auch bei Zimmertemperatur betrieben werden.



Ein Quantenprozessor mit Josephson-Kontakten

Dies ist – bei aller Diskussion in der Fachgemeinschaft – eine technologische Meisterleistung. Es ist aber noch sehr weit von gesellschaftlichem Quantenvorteil entfernt: Quantenalgorithmen mit relevanten Anwendungen benötigen viele und vor allen Dingen fehlerarme **Qubits**. Denn die Überlagerungen können durch Wechselwirkungen mit der Umgebung zusammenbrechen. Man bezeichnet daher die aktuelle Phase der Entwicklung von Quantencomputern als NISQ-Ära (Noisy Intermediate-Scale Quantum Technologies, auf Deutsch etwa: fehlerbehaftete, mittelgroße Quantentechnologien). Quantenrechner in dieser NISQ-Ära sind im besten Sinn wissenschaftliche Großgeräte: Weil sie nicht mehr simulierbar sind, sind sie wichtige Zutaten des Forschungsprozesses, und weil sie noch nicht ausgefeilte Geräte für die Endnutzung sind, ist ihre Heimat in wissenschaftlichen Einrichtungen und Rechenzentren.

Plattformen für Quantencomputer

Qubits können durch Quantensysteme physikalisch realisiert werden. Dazu zählen Atome, Moleküle und Elementarteilchen. Gerade weil sie klein sind und gut isoliert werden können, versprechen sie exzellente Quantenkohärenz – also die Fähigkeit, ihren Quantenzustand zuverlässig beizubehalten. Sie zu fangen, zu steuern und in großer Zahl aneinanderzukoppeln, sind die hauptsächlichen Herausforderungen. Ein viel beschrittener Weg ist es, **atomare Ionen** in elektrischen Feldern zu fangen und sie mit Lasern oder Mikrowellensignalen zu steuern. Über gemeinsame Vibrationen können die gefangenen Ionen miteinander in Wechselwirkung treten. In den letzten Jahren haben sich auch **neutrale Atome** als starke

Plattform herauskristallisiert, zunächst in der Quantensimulation, jetzt auch im Quantencomputing.

Ein anderer Ansatz startet bei integrierten Schaltkreisen – im weiteren Sinne also mit Computerchips – und versucht, sie so zu konstruieren, dass die Bauelemente Quanteneigenschaften haben. Ein gängiger Weg nutzt supraleitende Bauelemente, die sich im Schaltkreis so verhalten, als wären sie ein einziges großes Quantenteilchen. Damit können durch Nutzung von Induktivitäten, Kapazitäten und einem nichtlinearen Bauelement – dem **Josephson-Kontakt** – Quantenschaltkreise gebaut werden.

Eine Zwischenrolle zwischen diesen beiden Arten von Plattformen sind die **Spin-Qubits** in Halbleitern und die Störstellen in Diamanten. Sie nutzen mikroskopische Freiheitsgrade (einzelne Elektronen oder Ionen), die aber in einer Festkörpermatrix eingefangen sind – was ihre Skalierung praktischer machen sollte und neue Methoden der Steuerung eröffnet.

Quantencomputing kombiniert eine möglicherweise disruptive Technologie mit der faszinierenden Aufgabe, eine komplexe und doch kohärente Quantenmaschine zu bauen und den Übergang zwischen Quanten- und klassischer Physik zu verstehen. Erste Prototypen existieren und im akademischen Sinn wurde ein Quantenvorteil erzielt. Kommerziell disruptive Maschinen sind jedoch noch Zukunftsmusik. Es bedarf weiterhin der Grundlagenforschung in breiter Kooperation, um Quantencomputer weiterzuentwickeln.

Frank K. Wilhelm und Daniel Zeuch

METALLE IN FREIER FORM

Metall-3D-Druck ist zum festen Bestandteil der modernen Fertigung geworden. Er wird zukünftige Produkte in Technik und Alltag nachhaltig verändern – nicht nur bei Spezialanwendungen wie der Raumfahrt.

Um Gegenstände mit einer bestimmten Form und festgelegten Eigenschaften herzustellen, kann man entweder ein Objekt auf die richtige Form zurechtstutzen (subtraktive Fertigung) oder gleich in der richtigen Form zusammensetzen (additive Fertigung). Beim 3D-Druck wird ein Bauteil aus **dünnen Schichten flüssigen, festen oder pulverförmigen Materials** aufgebaut, die sich während des Aufbaus miteinander verbinden. Neben Kunststoffen lässt sich dies auch mit Metallen erreichen.

Dazu trägt der 3D-Drucker feines Metallpulver schichtweise auf. Dort wo massives Metall benötigt wird, verschweißt der Laserstrahl das Metallpulver. So entsteht zunächst eine einige zehn Mikrometer dicke Schicht des Bauteils. Wieder und wieder trägt die Maschine eine weitere Schicht Pulver auf, die der Laser verschweißt. So wächst das Bauteil im 3D-Drucker Schicht um Schicht in die Höhe. In vorgesehenen Hohlräumen innerhalb der Bauteilhülle verschmelzt der Laser das Pulver nicht. Es lässt sich von diesen Stellen nach dem Drucken einfach entfernen. Der Vorteil: Das Bauteil entsteht nahe an der endgültigen Geometrie. Dadurch braucht es nur wenig Material, besonders im Vergleich zur zerspanenden (subtraktiven) Herstellung, in der das Bauteil aus einem massiven Metallklotz herausgefräst wird. Das nicht verschweißte Pulver kann weiterverwendet werden, was besonders bei den in der Raumfahrt verwendeten teils exotischen Werkstoffen nicht nur viel Geld spart, sondern auch Energie.

Eine Designsoftware übersetzt das zu druckende Objekt schichtweise in die Schmelzbahnen, die später vom Laserstrahl abgefahren werden. Der 3D-Drucker setzt diese Bahnen über die vorhandenen optischen Scan- und Sensorsysteme hochpräzise um. Die gefertigten Teile genügen höchsten Anforderungen mit Auflösungen und Genauigkeiten von wenigen hundertstel Millimetern.

Legierungen neuer Art entstehen im 3D-Drucker

Während Anwender:innen in der Anfangszeit des 3D-Drucks vor allem gut schweißbare Stahl- und Aluminiumlegierungen verarbeitet haben, sind heute Prozesse für eine Vielzahl verschiedener Metalllegierungen etabliert. Superleichtes und hochfestes **Titan** eignet sich beispielsweise für topologieoptimierte und bionische Leichtbauteile in der Luftfahrt, nickelbasierte Hochtemperaturlegierungen für Turbinen- und Triebwerkskomponenten. Inzwischen ist die Bandbreite der verwendeten Metalllegierungen immens groß und umfasst darüber hinaus **Werkzeugstähle, Kupferlegierungen und Edelmetalle**. Eine besondere Legierungsklasse profitiert besonders von dem laserinduzierten Schmelzen und der darauffolgenden, rapiden Abkühlung: Bei solch hohen Abkühlraten können die Atome in einer ungeordneten Struktur erstarren – anders als bei normalen Abkühlvorgängen, die lange genug dauern, damit sich die Atome in einer Gitterstruktur anordnen können. Auf diese Weise bilden diese speziellen metallischen

BRENNERTEST BEI 1700 K

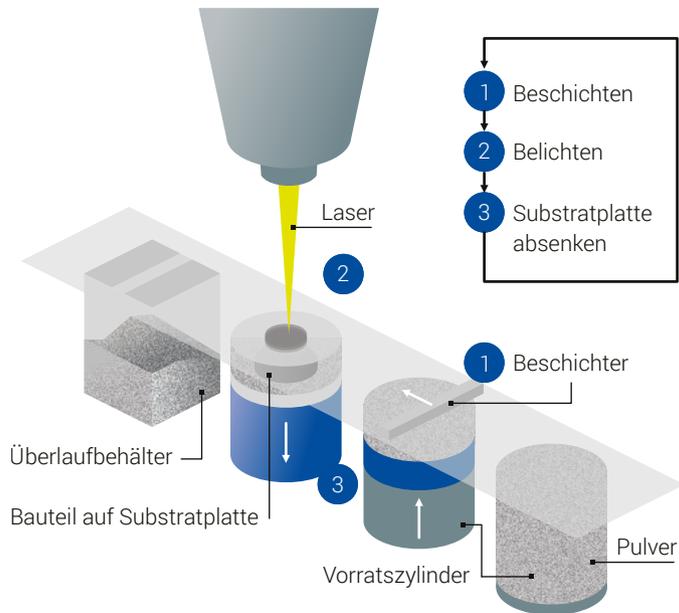
Beim ersten Zünden des A110-RCS-Steuerantriebs einer Griffin-Mondfähre entfacht das Brennstoffgemisch innerhalb von wenigen Millisekunden den vollen Schub von 110 Newton. Die kleine Brennkammer aus einer Niob-Legierung heizt sich dabei auf Temperaturen bis fast 1500 °C auf. Das Triebwerk sorgt dafür, dass sich die **Mondlandefähre** dynamisch und präzise manövrieren lässt, um sanft auf dem Erdtrabanten aufzusetzen. Die Ingenieur:innen des amerikanischen Raumfahrtunternehmens Agile Space Industries nutzen den Metall-3D-Druck, um ihre Raumfahrttriebwerke nach der Entwicklung schnell in die Produktion zu überführen. Die additive Fertigung schafft nahezu unendliche Designfreiheitsgrade für leichtere und funktional integrierte Baugruppen. Das Pulverbettverfahren macht kleinere Brenner mehr als je zuvor wirtschaftlich einsetzbar. Es lassen sich Materialien mit hochwertigen Eigenschaften verwenden, die konventionell schwierig zu bearbeiten sind – etwa das Metall Niob, das erst bei sehr hohen Temperaturen schmilzt, oder ebenfalls stark hitzebeständige nickelbasierte Superlegierungen. Solche Materialien können dort eingesetzt werden, wo andere Legierungen schmelzen und Keramiken brechen würden. Bauteile lassen sich ohne die Einschränkungen anderer Fertigungsverfahren in nahezu beliebigen Formen in kürzester Zeit ressourcenschonend aufbauen und optimieren. Der Gestaltungsfreiraum und die Agilität des 3D-Drucks ermöglichen es, Komponenten schnell zu verbessern und neue Produkte innerhalb nur eines Monats in den Test zu bringen.

3D-gedruckter Thruster (Schubdüse) für die Lageregelung bei einer Mondlandefähre



17 cm

Ablauf der schichtweisen Fertigung von Objekten im Pulverbettverfahren: Ein Raker trägt eine dünne Pulverschicht auf die Substratplatte auf (1), die danach vom Laserstrahl an den benötigten Stellen aufgeschmolzen wird (2). Das Objekt wird abgesenkt (3) und der Vorgang Schicht um Schicht wiederholt, bis das vollständige Objekt aufgebaut ist und entnommen werden kann.



Legierungen **amorphe Metalle**, auch **metallische Gläser** genannt, die hochelastisch und dennoch sehr hart sind. Damit eröffnen sich völlig neuartige Anwendungsfelder für Federung, Schwingungsdämpfung oder hohe mechanische Wechselbelastungen. Ein unerwartetes Beispiel hierfür sind akustisch hochwertige Geräte, etwa im Ohr getragene Kopfhörer. Erst über den 3D-Druck lassen sich aus solchen Materialien auch Serienprodukte fertigen, die mittlerweile auch das gehobene Consumer-Marktsegment der Unterhaltungselektronik bedienen.

Hohe Erwartungen – realistische Szenarien

Nahezu alle Unternehmen der fertigenden Industrien haben in den vergangenen zehn Jahren die additive Fertigung als revolutionäres Verfahren als Teil der sogenannten vierten industriellen Revolution oder Industrie 4.0 in den Blick genommen, bei der es um die umfassende Digitalisierung der Industrie geht. Das Ergebnis dieser explorativen Phase: Die Möglichkeiten der additiven Fertigung, insbesondere bei der Funktionsintegration, sind erheblich und universell. Doch die Kosten bei Volumenprodukten sind teilweise weit höher als in den auf Massenfertigung optimierten Fertigungsverfahren der vergangenen Jahrzehnte. Wirtschaftlich sinnvoll sind 3D-Metalldrucke zurzeit deshalb in einem Bereich der Anwendungen mit mittleren Seriengrößen bis zu etwa 100 000 Stück. Diese Tatsache verhindert den industriellen Einsatz des 3D-Drucks in vielen Bereichen – etwa in der Automobilindustrie – bis heute. Oft dient der 3D-Druck von Metall vorerst weiterhin vornehmlich der beschleunigten Produktentwicklung, etwa durch die schnelle Herstellung von Prototypen.

Doch die zunehmende Individualisierung und Prototypisierung von Industriegütern geht einher mit der Weiterentwicklung der additiven Fertigungsprozesse und -anlagen. Metall-3D-Druck ist mittlerweile zu einem etablierten Verfahren für die Herstellung von Bauteilen mit höchsten Anforderungen

geworden. Die Akzeptanz steigt, da in vielen Bereichen Weiterentwicklungen stattfinden: Bei der Konstruktion erleichtert die nahtlose Einbindung der Datenvorbereitung in die Designsoftware die Arbeit. Die Prozessführung verbessert sich durch die wissenschaftliche Erforschung und das dadurch tiefergehende Verständnis der Schweißprozesse, was mit einer verbesserten Bauteilqualität einhergeht. Die Aufbauraten des 3D-Drucks steigen durch Parallelisierung mit mehreren Lasern gleichzeitig und durch den Einsatz innovativer Strahlquellen. Immer größere Maschinen verschieben die Grenzen der Bauteilgrößen und Stückzahlen je Fertigungsverfahren.

All das führt dazu, dass uns in allen Lebensbereichen – in Forschung und Entwicklung, in der industriellen Produktion und schließlich auch in der Anwendung im Alltag – immer häufiger 3D-gedruckte Teile begegnen. Medizintechnikunternehmen drucken **Knochenimplantate** tausendfach in Titan und Edelstahl individuell auf die zu behandelnde Person angepasst. Ein weiteres Beispiel sind metallische **Zahnkronen**, welche Dentalunternehmen in Millionenstückzahlen individuell passend herstellen. Sie sorgen dafür, dass immer mehr Patient:innen einen erschwinglichen Zahnersatz erhalten. In Konsumprodukten der Unterhaltungselektronik und Sportgeräten begegnen sie uns als funktionelle, bionische und topologieoptimierte Bauteile immer häufiger, z. B. als **Armbanduhr**, **individualisiertes Fahrradteil** oder im **Mobiltelefon**.

Durch die absehbare zunehmende Digitalisierung und Individualisierung, einhergehend mit der Verkürzung von Produktzyklen und ermöglicht durch Weiterentwicklungen bei Prozessen und Anlagen vor allem hinsichtlich der Produktivität, wird sich ein Massensegment im 3D-Druck Schritt für Schritt etablieren.

Philipp Wagenblast

PLASMEN IN TECHNIK UND MEDIZIN

Im Universum liegt Materie meistens in einem Zustand vor, der uns auf der Erde eher exotisch erscheint: als Plasma. Doch längst erobern Plasmen auch die irdischen Labore – mit neuen Anwendungen in der Materialbearbeitung, Medizin und Energieversorgung.

Plasma ist ein Gas, in dem ein wesentlicher Teil der Bestandteile in ionisierter Form vorliegen: Hier sind die Atome, bestehend aus einem Kern und einer Elektronenhülle, in Teilen oder vollständig ihrer Elektronen beraubt. Sie werden zu Ionen, die mit den nun freien Elektronen das Plasma bilden. 99 Prozent der bekannten sichtbaren Materie des Kosmos liegen im

Plasma wird oft als der vierte Aggregatzustand neben Feststoff, Flüssigkeit und Gas bezeichnet.

Plasmazustand vor und werden durch einheitliche Gesetze beschrieben. Beispiele natürlicher Plasmen sind Sterne wie unsere Sonne, das interstellare Medium oder Polarlichter und Blitze auf der Erde. Auch das Leuchten von Kerzenflammen oder

Leuchtstoffröhren kommt aus Plasmen. Plasmen spielen eine wichtige Rolle in der Astrophysik, da sie die Sternentstehung, die Lichtabstrahlung und den Transport von Teilchen von den Sternen bis zur Erde dominieren. Deshalb ist die Plasmaphysik traditionell mit der Astro-, Atom- und Molekülphysik verknüpft.

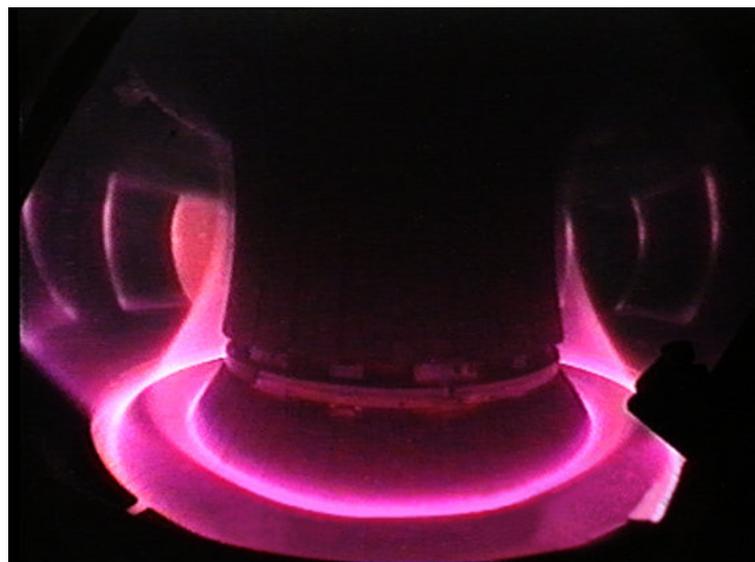
Forschung in Theorie und Experiment

Die Untersuchung und das Verständnis von Plasmen ist eine Herausforderung für das Fachgebiet der Vielteilchenphysik. Energie wird in diese Plasmen aus elektrischen Feldern oder durch Kernprozesse eingebracht. Magnetfelder führen die

elektrisch geladenen Plasmateilchen und schließen sie ein. Die Heizung der Plasmen wirkt sich auf die Energieverteilungsfunktionen der Plasmateilchen aus, die sich in Raum und Zeit verändern und das Verhalten dieser Plasmen bestimmen. Durch solche Wechselwirkungen werden zum Beispiel Teilchen aus dem Kosmos auf sehr hohe Energien beschleunigt. Die Beschreibung solcher Transportprozesse erfordert Modelle und Simulationen auf sehr unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen – angefangen von der makroskopischen Magnetfeldanordnung bis zur Turbulenz auf kleinsten Skalen. Inzwischen ist es möglich, eine Vielzahl der Plasmaphänomene mit leistungsstarken Computern digital nachzubilden.

Plasmen lassen sich durch hochenergetische Laser erzeugen, um extreme Prozesse in Sternen zu simulieren oder um Teilchen zu beschleunigen. Plasmen werden zur Stoffumwandlung und Materialsynthese in reaktiven Gasen erzeugt. Sie könnten in der Zukunft als nahezu unerschöpfliche Energiequelle dienen, wenn es gelingt, effiziente Kernfusionsreaktoren zu bauen. In diesen sollen Wasserstoffatomkerne mit unterschiedlicher Neutronenanzahl (Proton, Deuterium, Tritium) in sehr heißen Plasmen zu neuen Atomkernen verschmelzen.

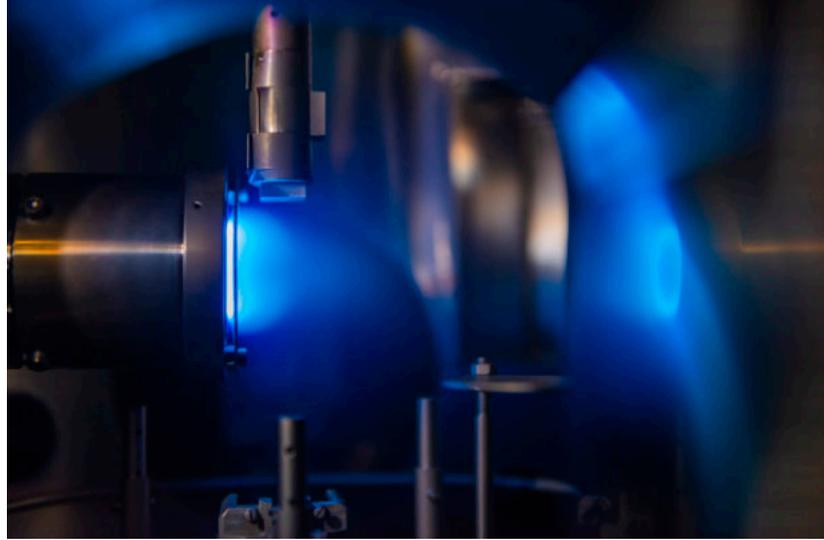
Links: Wartung einer Plasmakammer, wie sie zur Erzeugung der Kernfusion benutzt wird, hier am ASDEX-Upgrade-Experiment in Garching. Die gleiche Plasmakamera leuchtet rechts im Betrieb im rosafarbenen Licht der H-Alpha-Emission, die hier aus dem kältesten Bereich des Fusionsplasmas kommt. Die heißeren Bereiche bleiben unsichtbar. Ziel dieses Experiments ist es, Grundlagen zur Kontrolle des Plasmas und der Energiezu- und -abfuhr von und nach außen zu erforschen.



Technischer Einsatz von Niedertemperaturplasmen

Plasmen lassen sich einteilen in **Hochtemperaturplasmen**, bei denen die Elektronen und Ionen Temperaturen von vielen Millionen Grad annehmen, bis hin zu **Niedertemperaturplasmen**, in denen nur die Elektronen sehr heiß sind, die schweren Atomkerne aber Raumtemperatur haben. Insbesondere Niedertemperaturplasmen finden bereits heute vielfältigen Einsatz in zahlreichen modernen Technologien. Zum Beispiel lassen sich mit solchen Plasmen temperaturempfindliche Materialien ätzen oder beschichten, was sie zu einem besonderen Werkzeug der Materialforschung macht. Beispiele sind die Erzeugung von Hartstoffschichten auf Schneidwerkzeugen, die Beschichtung von Fensterscheiben mit Metalloxiden für den Wärmeschutz, die Strukturierung von mikroelektronischen Bauteilen oder die Beschichtung von Kunststoffen, um sie gasdicht zu machen. Die Herausforderung besteht in diesen Fällen darin, ein Plasma so anzupassen, dass sich eine definierte Qualität der Oberflächen eines Bauteils garantieren lässt. Dies gelingt hervorragend und ist ein wesentlicher Baustein für unzählige Fertigungstechnologien unserer Zeit. Die plasmaphysikalischen Grundlagen dieser Prozesse sind aktueller Forschungsgegenstand. Es gilt, die Energieeinkopplung in das Plasma durch von außen angelegte elektrische Felder oder eingestrahlt Licht, die Atom- und Molekülphysik der Plasmachemie oder die Wechselwirkung der Plasmateilchen mit den Oberflächen aufzuklären, zu verstehen und zu kontrollieren.

Neben dem Einsatz von Plasmen in der Materialforschung und Technik profitiert auch die Medizin von diesem Werkzeug. Plasmen können so maßgeschneidert werden, dass sie als Quellen für reaktive Sauerstoff- und Stickstoffspezies dienen, die vielfältige biologische Prozesse auslösen. Mit Plasmen in Flüssigkeiten lässt sich Wasser reinigen und so von schwer abbaubaren Substanzen wie Medikamenten befreien. Mit Plasmen gelingt das Abtöten von Keimen durch das gleichzeitige Einwirken der reaktiven Teilchen und der Ultraviolettstrahlung aus dem Plasma. Dabei wirken die Plasmen immer nur auf die obersten Grenzschichten und eignen sich deshalb zur Sterilisierung von zahlreichen empfindlichen



Magnetisiertes Hochleistungsplasma zur Synthese von keramischen Werkstoffen.

Kunststoffprodukten der Medizintechnik aber auch direkt zur schonenden Behandlung von lebendem Gewebe. So lassen sich Keime direkt auf der Haut mit Plasmen sehr gezielt behandeln und gleichzeitig die Wundheilung verbessern. Die Plasmamedizin könnte auch gegen Keime wirken, die gegen Antibiotika resistent sind – ein wichtiges Thema für die Zukunft.

Plasmen für chemische Prozesse

Darüber hinaus werden Plasmen zur Stoffwandlung entwickelt, bei denen Ausgangsmoleküle in gezielter Weise zu neuen Substanzen synthetisiert werden. Dieses Thema ist von besonderer Bedeutung, da zahlreiche chemische Prozesse, die aktuell noch thermische Energie aus fossilen Brennstoffen benötigen, in Zukunft elektrifiziert werden müssen, um klimaneutral zu werden. Hierbei sind Plasmen, die durch elektrische Felder erzeugt werden, eine ausgezeichnete Methode – wenn es gelingt, chemische Reaktionen sehr gezielt mit diesen Plasmen zu steuern.

Gerade die Möglichkeit, Plasmen zu regeln, ist von großem Interesse bei einer dezentralen Energieerzeugung und erlaubt es, auf schwankende Stoffströme zu reagieren. Für die Umsetzung dieser Methoden in der Zukunft muss allerdings die Fähigkeit der Plasmen verbessert werden, ein bestimmtes Reaktionsergebnis statt eines anderen zu erzielen. Dieses kann durch die Kombination von Plasmen mit der Katalyse gelingen, also der technischen Beschleunigung von chemischen Reaktionen. Beispiele für die Zukunft sind die plasmagestützte Umwandlung von Kohlendioxid, die plasmakatalytische Umsetzung von Stickstoff in Ammoniak oder die Luftreinigung von flüchtigen Kohlenwasserstoffverbindungen mit minimalem Energieaufwand. In all diesen Fällen gibt es viele Grundlagenprozesse aufzuklären, um letztlich massen- und energieeffiziente Prozesse bereitstellen zu können.

Achim von Keudell und Ulrich Stroth

Mehrfachaufnahme eines Plasmas, das an einer untergetauchten Elektrode in Wasser gezündet wird.

ENERGIE AUS KERNFUSION

In Fusionslaboren weltweit werden Plasmen erforscht, die heißer sind als die Sonne. Sie sollen künftig als ergiebige Energiequellen dienen. Die Fusionsforschung zielt auf ein grundlegendes Verständnis und die Optimierung des Fusionsplasmas.

Neben Sonne und Wind könnten zukünftig auch Fusionskraftwerke ein Baustein einer sicheren Energieversorgung sein. Die Energie wird dabei aus der Verschmelzung (Fusion) von Deuterium (D) und Tritium (T) – zwei Varianten des Wasserstoffs – zu Helium gewonnen. Ein einziges Gramm dieses Brennstoffs kann potenziell so viel Energie erzeugen wie elf Tonnen Braunkohle! Der Haken: Diese Reaktion läuft in Hochtemperaturplasmen bei Temperaturen von 100 Millionen Grad Celsius ab – das Plasma muss also unter entsprechendem Energieaufwand erst mal geheizt und die Energie aus diesem heißen Plasma abgeführt werden.

Mit einer Gesamthöhe von 30 Metern und einem Plasmaradius von 6,2 Metern wird der Tokamak ITER in Südfrankreich die erste Magnetfusionsanlage sein, die mehr Fusionsleistung erzeugen kann, als an Heizleistung investiert werden muss.

Die zweite Herausforderung ist der Einschluss des Plasmas. Es darf möglichst nicht mit den Gefäßwänden in Kontakt kommen, da es sonst schnell abkühlen oder gar die Gefäßwand schmelzen würde. Für den Einschluss gibt es zwei grundlegende Konzepte: In der **Laser- oder Trägheitsfusion** werden gefrorene D-T-Kügelchen durch Laserpulse zu einem dichten, heißen Plasma komprimiert. Ein solches Plasma setzte im Jahr 2022 in einem Kügelchen erstmals mehr Fusionsenergie frei, als Heizenergie in das Kügelchen deponiert wurde. Dem Ziel eines Kraftwerks näher ist die **Magnetfusion**, bei der das Plasma in einem donutförmigen Magnetfeld eingeschlossen wird. Die entsprechenden Anlagen heißen Stellaratoren (in Anlehnung an die Fusion in Sternen) und Tokamaks.

Tokamak

Die beiden Konzepte unterscheiden sich darin, wie die spiralförmig verdrehten Magnetfeldlinien erzeugt werden, die das Plasma einschließen. Im Tokamak induziert ein Transformator einen hohen Plasmastrom, der die Windungen im Feld erzeugt, was nur bei gepulstem Plasmabetrieb funktioniert. Durch ihren relativ einfachen Aufbau sind Tokamaks im Vergleich zu anderen

Konzepten am weitesten entwickelt. Die derzeit größte Fusionsanlage ist der europäische Tokamak **JET** in Culham (Großbritannien). Dort wurde 2021 ein Weltrekord für erzeugte Fusionsenergie erzielt. Als nächsten Entwicklungsschritt baut ein internationales Konsortium seit 2007 den Tokamak **ITER** in Cadarache (Frankreich). ITER soll zehnmal so viel Fusionsleistung erzeugen, wie an Heizleistung investiert werden muss. Dazu soll sich das Plasma erstmals durch bei der Reaktion erzeugte Heliumkerne (α -Teilchen) im Wesentlichen selbst heizen.

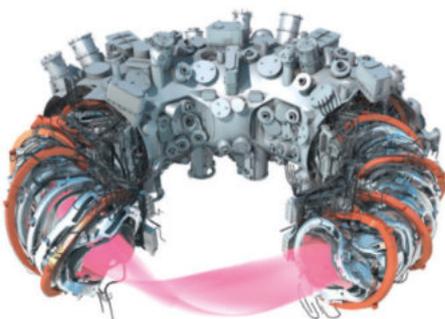
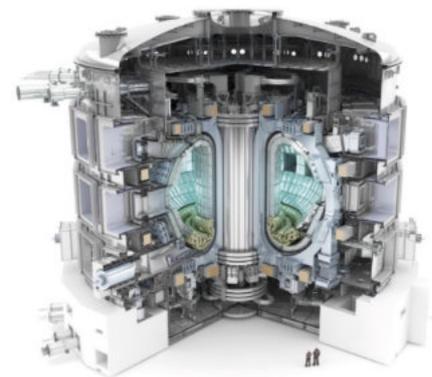
Solch ein brennendes Plasma entsteht nach Überschreitung eines Schwellenwerts für das Produkt aus Plasmadichte, -temperatur und der Energieeinschlusszeit – also der Zeit, in der der Energieinhalt aufrechterhalten werden kann. Ausreichend hohe Dichten und Temperaturen werden schon heute erreicht, sodass die Energieeinschlusszeit die letzte zu optimierende Größe der Magnetfusion ist. Die Einschlusszeit hängt von Transportprozessen ab, durch die das Plasma Energie verliert. Aufgrund seiner Rotationsymmetrie schließt das Magnetfeld eines Tokamaks die Plasmateilchen ideal ein.

Das MPI für Plasmaphysik (IPP) in Garching betreibt **ASDEX Upgrade** (AUG), dessen Plasma und andere wichtige Komponenten denen in den größeren Anlagen JET und ITER gleichen. So können in AUG und JET Untersuchungen auf kleinerer Größenskala, aber mit gleicher Geometrie, vorgenommen werden (Stufenleiterexperimente), die den Betrieb von ITER vorbereiten.

Stellarator

Beim Stellarator erzeugen Spulen, die deutlich komplexer als beim Tokamak geformt sind, die geeignete Magnetfeldkonfiguration ohne einen zusätzlichen Stromfluss durch das Plasma. Bahnbrechende Experimente am **Wendelstein 7-AS** und seinem Nachfolger **Wendelstein 7-X** (seit 2015) haben gezeigt, dass modulare Stellaratoren durch Optimierung auch Reaktorplasmen einschließen können. Der Aufbau von Wendelstein 7-X am IPP-Standort Greifswald war eines der komplexesten und faszinierendsten Wissenschaftsprojekte der jüngeren Zeit. Die erfolgreiche Demonstration der Optimierung und die erreichten Höchstwerte in den Plasmaparametern für Stellaratoren sind Meilensteine der Fusionsforschung.

Die ungewöhnliche Geometrie der Magnetfeldlinien im Stellarator führt allerdings zu Teilchenbahnen, die direkt vom Inne-



Wendelstein 7-X in Greifswald ist der modernste und leistungsfähigste Stellarator der Welt. Mit seinen supraleitenden Magnetspulen soll er mit einem 30-Minuten-Plasma den Dauerbetrieb simulieren.

← **Flussflächen-Diagnostik:** Das Foto kombiniert die Leuchtspur eines Elektronenstrahls auf seinem vielfachen Umlauf längs einer Feldlinie durch das Plasmagefäß mit den Bildpunkten, die er auf einem fluoreszierenden Stab hinterlässt, der durch die Bildebene geschwenkt wird. Der schnell bewegte Stab ist wegen der langen Belichtungszeit nicht zu sehen.

ren des Plasmas bis zur Wand führen. Experimente am Wendelstein 7-X zeigten, dass daraus resultierende Teilchenverluste in Übereinstimmung mit der Theorie weitgehend unterdrückt werden können. Ein Stellaratorreaktor benötigt allerdings einen weiteren Optimierungsschritt, um Verluste an stoßfreien α -Teilchen weiter zu reduzieren.

Plasmaturbulenz

Wie lange die Energie im Plasma aufrechterhalten werden kann, hängt auch vom turbulenten Transport in dem Medium ab. 1982 konnte Plasma durch ein zusätzliches Magnetfeld in einen dafür günstigeren Modus gebracht werden – die **H-Mode** (H steht für High Confinement). Dies gelang, weil das Plasma in eine besondere geometrische Form überführt wurde, die unten nicht rund, sondern spitz war. Der Kontakt zwischen Plasma und Wand wurde auf einen speziellen Bereich, nämlich den Divertor, eingeschränkt. Dabei verschwanden die Turbulenzen am Plasmarand. Durch die neue Form entstand eine Transportbarriere, und die mögliche Einschlusszeit verdoppelte sich. Die Entwicklung gelang an ASDEX, dem Vorgänger von ASDEX Upgrade, in Garching.

Die H-Mode gehört zu den wichtigsten Entdeckungen der Fusionsforschung und ist bis heute Grundlage von Szenarien für ITER- und Reaktorplasmen. Die Transportbarriere entsteht, weil Turbulenzen durch Scherströmungen am Plasmarand unterdrückt werden. Hochauflösende Messungen offenbarten in den vergangenen Jahren, dass diffusive Transportverluste durch Stöße von Teilchen untereinander indirekt zur Bildung der H-Mode beitragen: Um zu verhindern, dass Ionen schneller als Elektronen aus dem Plasma diffundieren, entsteht ein elektrisches Feld und damit eine die Turbulenz unterdrückende Plasmaströmung. Dies ist ein faszinierendes Beispiel für die Kopplung von diffusivem und turbulentem Transport.

Erst mit ausreichend leistungsfähigen Computern, wurde es möglich, den turbulenten Transport auch theoretisch zu erfassen. Die Herausforderung dabei ist, dass zwischen den Zeitbereichen, auf denen die Prozesse der Elektronen, der Ionen und der Mikroinstabilitäten ablaufen, viele Größenordnungen liegen. In einer Vergleichsstudie wurden kürzlich Höchstleistungssimulationen anhand detaillierter Messungen der Turbulenzparameter an ASDEX Upgrade auf ihre Anwendbarkeit überprüft. Dies war ein wichtiger Schritt für die zuverlässige Vorhersage der Einschlusszeit von Fusionsplasmen. Die mit den Simulationen erreichte quantitative Beschreibung des turbulenten Transports gehört zu den Erfolgsgeschichten der Fusionsforschung.

Leistungsabfuhr und Plasmawandwechselwirkung

Nicht nur die Form, sondern auch die Beschaffenheit der äußeren Gefäßwand beeinflusst das Plasma: Günstig scheinen Materialien aus Elementen mit wenigen Protonen im Kern zu

Am Rand des Fusionsplasmas bilden sich periodisch wiederkehrende Eruptionen aus. Diese „ELMs“ treten auf, wenn das Plasma in der H-Mode betrieben wird. Sie können mit modernen Programmen simuliert werden. Da ELMs die Wand stark belasten, zielen aktuelle Experimente auf ihre Unterdrückung unter Beibehaltung des guten Einschlusses der H-Mode ab.

sein. Deshalb sind viele Fusionsanlagen mit einer Wand aus Kohlenstoff (Grafit) mit seinen sechs Protonen ausgestattet. Kohlenstoff zeigt allerdings eine hohe Erosionsrate und lagert auch Tritium, also einen Bestandteil des Plasmas, ein. Es war ein mutiger und wegweisender Schritt, als in ASDEX Upgrade die Kohlenstoffwand sukzessive durch Wolfram mit beachtlichen 74 Protonen ersetzt wurde. Jetzt ist dieses Material sogar für die innere Wand von Fusionsreaktoren vorgesehen. Grundlage des erfolgreichen Plasmabetriebs mit Wolfram war die Entwicklung von Plasmaszenarien, in denen die Plasmatemperatur direkt vor der Wand stark absenkt werden konnte.

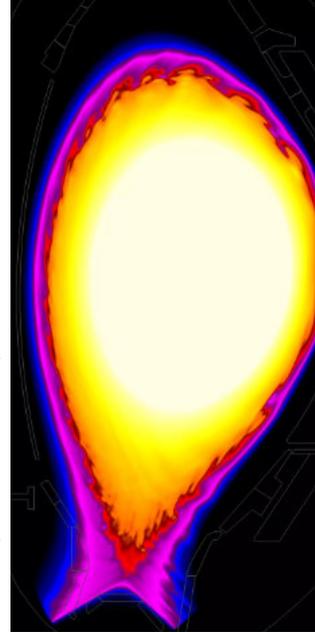
Ohne zusätzliche Maßnahmen würde ein Großteil der Fusionsleistung in einem schmalen Ring auf die Wolframoberfläche treffen und diese beschädigen. Diese Gefahr lässt sich durch dosierte Zugabe von Verunreinigungen zum Plasma eindämmen. Gase wie Stickstoff oder Argon sind am Plasmarand nicht vollständig ionisiert und strahlen, nach Elektronenstoßanregung, ausreichend Energie als Licht ab. Sie kühlen das Plasma so auf harmlose Temperaturen ab, bevor es auf die Wand trifft. Parallel ließ sich der Divertor – also der hitzebeständigste Teil des Vakuumgefäßes, an dem überschüssige (bzw. in späteren Kraftwerken erwünschte) Energie kontrolliert abgeführt wird – so optimieren, dass die Verunreinigungen am Zurückströmen in das Plasma gehindert werden.

Ein neues, erst 2022 an ASDEX Upgrade entdecktes Phänomen kann sehr effektiv und kontrolliert weitere Kühlung bringen: Es handelt sich um einen intensiv strahlenden Ring im Bereich des sogenannten magnetischen X-Punkts. Dies ist der Punkt oberhalb des Divertors, wo sich die Grenzlinien des Magnetkäfigs am äußeren Plasmarand schneiden. Derzeit untersuchen Forschungsgruppen diesen X-Punkt-Strahler genannten Effekt sowohl experimentell als auch mit numerischen Simulationen. Setzt man ihn geschickt ein, könnte er den Bau kleinerer und technisch einfacherer Reaktoren ermöglichen.

Ausblick

Nach Jahren der Forschung ist das Verständnis des Fusionsplasmas so weit fortgeschritten, dass die Errichtung eines ersten Fusionskraftwerks in greifbare Nähe gerückt ist. Ein europäisches Team hat mit Planungen für den **Tokamak-Reaktor DEMO** begonnen. Parallel dazu optimieren Wissenschaftler:innen die Eigenschaften für Stellaratoren, damit auch dieses Bauprinzip für Kraftwerke infrage kommen könnte. In Kooperationen unterstützen Forschungsinstitute zudem private Start-ups, die bereits aktiv den Bau von Kraftwerken planen.

Frank Fleschner und Ulrich Stroth



DIE QUANTENWELT ERSCHLIEßEN

Am Eingang zur Quantenwelt stand im Jahr 1900 Max Plancks berühmte Formel $E = h \cdot \nu$. Sie gibt den Energieinhalt eines Lichtquants oder Photons bei der Frequenz ν an. Die **Planck-Konstante** $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ J s (vormals der Einheit wegen Plancksches Wirkungsquantum genannt) ist gemessen an unseren menschlichen Größen winzig: Die Quantenphysik und h regieren die mikroskopische Welt! Experimentelle Einsichten in die Welt der Atome und unerwartete Entdeckungen wie die des **halbzahliger Spins** hatten junge Physiker der 1920er-Jahre angeregt, mit der Quantenmechanik eine ganz neue Art von physikalischer Theorie zu erfinden. Die Propagation von **Wahrscheinlichkeitswellen** und eine statistische Interpretation der Vorhersageleistung dieser Theorie traten an die Stelle von klassischen Bahnbeschreibungen mit Ort und Impuls wie bei der Planetenbewegung. Die Physik musste zur Kenntnis nehmen, dass mikroskopische physikalische Systeme sowohl wellenartige als auch teilchenartige Eigenschaften zeigen, je nachdem, wie die Beobachtung eingerichtet ist. Das berühmte Doppelspaltexperiment von Young, dessen Interferenzmuster Atom für Atom oder Elektron für Elektron in statistischer Weise aufgebaut wird, mag als Schlüsselexperiment gelten (siehe Seite 24).

Einerseits waren und sind unsere – makroskopischen – Sinne auf derartige Konzepte gar nicht vorbereitet. Deshalb stellt die Quantenwelt unser Denken, insbesondere unser Verlangen nach **Anschauung**, bis heute auf eine harte Probe. Andererseits ist die Quantenphysik die am intensivsten getestete Theorie der Welt. Sie hat bisher ausnahmslos allen Bemühungen widerstanden, Widersprüche oder Schwächen zu identifizieren. Zahlreiche herausfordernde Gedankenexperimente – Youngs Doppelspalt mit Elektronen und Atomen, die Speicherung einzelner Ionen und Atome, die Beobachtung von **Quantensprüngen** und mehr – sind im Laufe der Jahrzehnte im Labor realisiert worden, und haben die oft verblüffenden

Quantenphänomene immer wieder bestätigt und zugleich eindrucksvoll illustriert.

Die wellenartige Bewegung mikroskopischer Teilchen führt beim Einsperren zu diskreten (stufenhaften) Energiezuständen ähnlich den Naturtönen eines Jagdhorns. Die Überlagerung (**Superposition**) von Quantenzuständen ist die Grundlage von Atomuhren, der Magnetresonanztomografie (MRT) und vielen neuartigen Quantensensoren. Schrödingers berühmte Katze fragt als Karikatur der Quantenwelt danach, unter welchen Bedingungen wir Überlagerungen beobachten können. **Verschränkung** treibt die Überlagerungszustände ins Extrem: Zwei oder mehr Teilchen können eine gemeinsame Wellenfunktion besitzen, die ihren Gesamtzustand, aber nicht ihre individuellen Eigenschaften festlegt. Die Messung an einem von zwei miteinander verschränkten Teilchen legt auch die Eigenschaften seines möglicherweise weit entfernten Partners bei der dortigen Messung fest. Die Teilcheneigenschaften sind dabei strenger als in der klassischen Physik miteinander korreliert – als ob es eine Fernwirkung gäbe! Glücklicherweise wird die Kausalität durch solche Messungen nicht infrage gestellt – die einzelnen Messergebnisse sind statistisch verteilt und können keine Information übertragen.

Zur Quantenwelt gehören übrigens nicht nur die winzigen Bausteine der Materie, auch kollektive Phänomene wie **Supraleitung** und **Laserstrahlung** benötigen zur Erklärung die Quantenphysik. Solche Systeme bestehen aus extrem vielen Teilchen und heißen auch makroskopische Quantenzustände. Diese Zustände können wir nämlich direkt wahrnehmen.

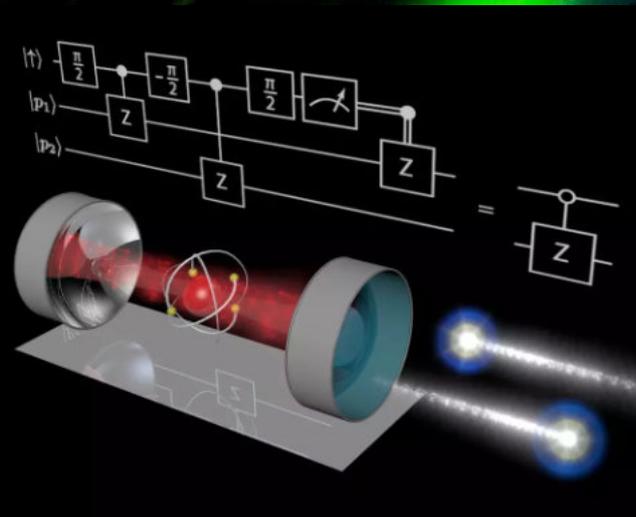
Wir verdanken den langjährigen experimentellen Anstrengungen zur Aufklärung und Illustration faszinierender Quantenphänomene eine derart präzise experimentelle Kontrolle zahlreicher Quantensysteme von einzelnen Atomen bis zu

„QM ist dann, wenn Systeme interferieren können. Das ist der Fall, wenn die Dichtematrix Nichtdiagonalterme hat. Mir ist nicht klar, wie man das alltags-sprachlich formulieren kann.“

aus dem E-Mail-Austausch bei der Diskussion über diesen Text

supraleitenden Schwingkreisen (Transmonen), dass wir die Quantenwelt nicht nur als Ideengebäude, sondern immer mehr auch für technologische Anwendungen erschließen, die wir in den folgenden Artikeln vorstellen. Atome, Ionen, Photonen oder supraleitende Schwingkreise und andere Strukturen speichern Qubits, die elementaren Einheiten der Information in der Quantenwelt. Aus den Überlagerungszuständen dieser Qubits (die es in der klassischen Welt der Bits „0“ und „1“ nicht gibt) der klassischen Bitwerte „0“ und „1“ gewinnen wir Informationen über externe physikalische Größen wie Magnetfelder, oder wir nutzen sie als Rechenregister in Quantenalgorithmen. Photonen transportieren Qubits und können verschiedene Quantensysteme miteinander verschränken. Die Aussicht auf technologische Anwendungen profitiert deshalb stark von experimentellen Fortschritten in der Photonik und der Quantenoptik. Quantensensoren wie Atominterferometer oder quantensichere Verschlüsselungsgeräte sind als Prototypen schon breit verfügbar, und auch die Arbeit am Quantencomputer und Quantensimulator kommt dem Anspruch von Richard Feynmans Verdikt immer näher: „Die Natur ist nicht klassisch, verdammt noch mal, und wenn wir die Natur simulieren wollen, sollten wir es besser quantenmechanisch versuchen.“ (engl. „Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical“).

Dieter Meschede



Ein quantenmechanisches Logikgatter sorgt dafür, dass zwei Photonen miteinander in Wechselwirkung treten können – eigentlich durchdringen sie sich nämlich ungestört. Die Photonen (blau) treffen nacheinander von rechts auf den teildurchlässigen Spiegel eines Resonators, in dem ein einzelnes Rubidiumatom (symbolisiert durch ein rotes Kügelchen mit gelben Elektronenorbitalen) gespeichert ist. Das Atom im Resonator spielt die Rolle eines Mediators, der zwischen den zwei Photonen eine deterministische Wechselwirkung vermittelt. Das Schema im Hintergrund fasst das vollständige Gatterprotokoll zusammen.

INFORMATION

Wir leben im Informationszeitalter. Die Aufgabe der Informationstechnik ist es, Technologien zur Verfügung zu stellen, in denen Information sicher und schnell verarbeitet und übertragen werden können. Jedoch ist es immer noch ein Gegenstand aktueller Forschung, die physikalischen Ressourcen zu verstehen, die für das Verarbeiten der Information notwendig sind.

Dass Information nichts Abstraktes ist, sondern eine physikalische Grundlage haben muss, erkannte vor dreißig Jahren der deutsch-amerikanische Physiker Rolf Landauer: „Information is physical“ („Information ist physikalisch“). Tatsächlich ist Information in physikalischen Systemen wie Festplatten gespeichert, wird mittels physikalischer Signale, etwa durch elektrische und optische Wellen, übertragen und in physikalischen Geräten – Computern – verarbeitet.

Betrachten wir den einfachsten möglichen Informationsspeicher: ein System mit zwei unterschiedlichen Zuständen – etwa eine Münze, die entweder mit Kopf oder Zahl nach oben auf einem Tisch liegt. Wenn wir mit Sicherheit wissen, wie herum die Münze liegt, können wir durch die Beobachtung keine neue Information gewinnen. Wenn hingegen beide Zustände mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten können, etwa nach dem Wurf der Münze, ist der tatsächliche Zustand zunächst unbestimmt und erst der Blick auf die Münze liefert Information.

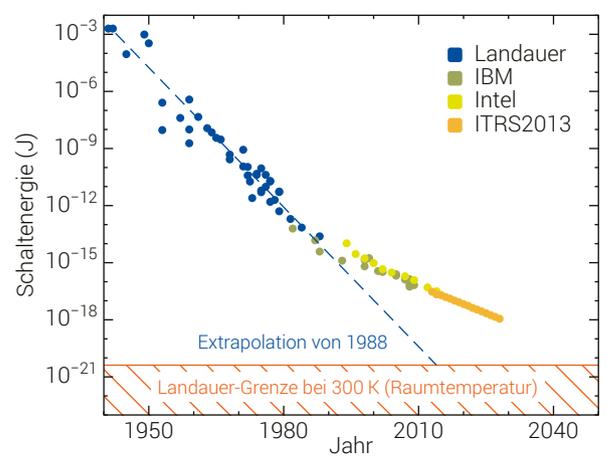
Information und Entropie

Mathematisch lässt sich der Informationsgehalt eines Systems durch die sogenannte **Informationsentropie** quantifizieren, die 1948 von Claude Shannon eingeführt wurde. Je größer die Informationsentropie ist, desto größer ist der Informationsgehalt. Im ersten Fall, in dem der Zustand des Systems bekannt ist, ist die Informationsentropie gleich Null. Im zweiten Fall der binären Zufallsentscheidung ist die Informationsentropie gleich dem natürlichen Logarithmus von 2. Dies ist der Shannonsche Informationsgehalt eines Bits. Ein System mit zwei Zuständen in der klassischen Physik kann also bis zu einem Bit an Information speichern.

Die Informationsentropie quantifiziert beispielsweise die Information, die in einer gespeicherten Bild- oder Musikdatei oder in einer gesendeten Textnachricht enthalten ist. Sie spielt daher sowohl in der Kommunikationstheorie als auch in der Informatik eine zentrale Rolle.

Die Shannon-Entropie hat denselben mathematischen Ausdruck wie die statistische thermodynamische Entropie, die Josiah Willard Gibbs 1878 eingeführt hat. Dies ist kein Zufall: Die **thermodynamische Entropie** gibt die Menge an Informationen an, die verloren geht, wenn ein System anhand seiner makroskopischen Variablen wie Druck, Volumen und Temperatur anstatt der vollständigen mikroskopischen Positionen und Geschwindigkeiten seiner Teilchen beschrieben wird. Dies deutet auf eine enge Verbindung zwischen Informati-

onstheorie und Thermodynamik hin, die durch das Landauer-Prinzip quantifiziert ist. Landauer wies 1961 nach, dass die Löschung eines Bits an Information zwangsläufig mit der Freisetzung einer Wärmemenge einhergeht, die proportional zur Temperatur und zum Informationsgehalt ist. Dieses Ergebnis gilt allgemein für die meisten logischen Operationen in einem modernen Computer – und zeigt bei deren Weiterentwicklung gleichzeitig eine physikalische Grenze auf: Die unvermeidliche Wärmeabgabe stellt ein Haupthindernis für die weitere Miniaturisierung von Computerchips und die Erhöhung der Transistordichte dar. Die Existenz einer fundamentalen physikalischen Grenze wurde erst 2012 in einem klassischen Speicher und 2018 in einem Quantenspeicher aus einem molekularen Nanomagnet experimentell nach-



Die Schaltenergie nähert sich immer mehr dem theoretischen Grenzwert von ca. $4,2 \cdot 10^{-21}$ J bei Raumtemperatur an.

gewiesen und dürfte in den kommenden Jahrzehnten in der Praxis erreicht werden.

Information und Quantenphysik

Quantencomputer besitzen das Potenzial, manche Rechenaufgaben mit exponentiell weniger „Ressourcen“ zu bewerkstelligen als klassische Computer. Mit Ressourcen meint man hierbei typischerweise einzelne **Qubits**. Diese können dabei nicht nur zwei, sondern alle möglichen Zustände auf einer Einheitskugel annehmen und damit potenziell viel mehr Information enthalten. In der Quantenmechanik tritt daher die von-Neumann-Entropie (bereits 1927 von John von Neumann definiert) an die Stelle der Shannon-Entropie.

WAS IST INFORMATION?

Eine einfache und intuitive Antwort auf diese Frage lautet: „Das, was Sie noch nicht wissen.“ Wenn Ihnen jemand sagt, dass die Erde kugelförmig ist, wäre dies vermutlich nichts Neues für Sie. Diese Nachricht hat demnach für Sie einen geringen Informationsgehalt. Wenn man Ihnen jedoch sagt, dass es morgen regnen wird, dann würden Sie – vorausgesetzt, die Aussage ist wahr – viel lernen. Diese Nachricht hat daher einen hohen Informationsgehalt. Das Verarbeiten, Kommunizieren und Sammeln von Information sind zu einem der größten Wirtschaftsfaktoren geworden.

Ursprung

Der Begriff Information leitet sich vom lateinischen „informatio“ ab, was so viel wie Idee oder Konzept bedeutet. Als abstraktes Konzept wurde die Information zum ersten Mal im 14. Jahrhundert beschrieben. Als Ursprung der mathematisch exakten Beschreibung können die Arbeiten von Claude Shannon gelten (1948).

Einheiten der Information

Das Bit ist eine binäre Einheit, wobei ein Bit der Menge der Information entspricht, die in einer Auswahl aus zwei gleich wahrscheinlichen Möglichkeiten enthalten ist. Das Bit wurde im 18. Jahrhundert von Basile Bouchon und Jean-Baptiste Falcon erfunden.

Das Qubit ist die quantenmechanische Variante des klassischen Bits. Der Begriff wurde in den frühen 1990er-Jahren in einem Gespräch zwischen Ben Schumacher und Bill Wootters geprägt.

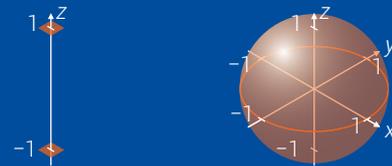
Verwandte Begriffe:

Die Nachricht ist der „Träger von Information“, nicht die Information selbst.

Kommunikation ist die Übertragung von Information. Die Kommunizierbarkeit gilt als eine wesentliche Eigenschaft von Information, und jegliche Kommunikation setzt Information voraus.

Daten sind Angaben über Sachverhalte und Vorgänge, die in der Form bestimmter Zeichen/Symbole auf Datenträgern existieren. Aus ihnen kann zweckbezogenes Wissen und in diesem Sinne „Information“ werden.

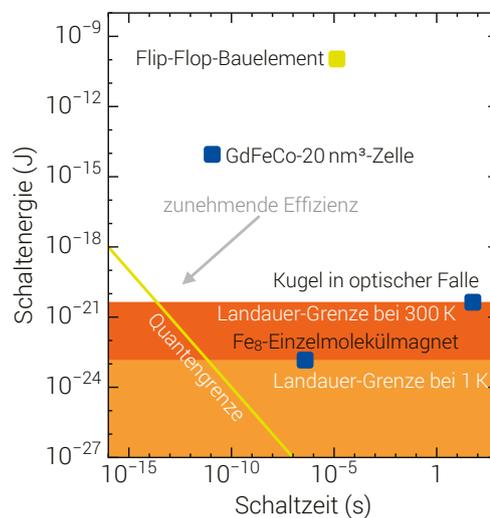
Wissen ist ein für Personen oder Gruppen verfügbarer Bestand von Fakten, Theorien und Regeln, von deren Gültigkeit bzw. Wahrheit ausgegangen wird.



Ein klassisches Bit (links) hat zwei mögliche Zustände: oben und unten, +1 und -1 usw., ein Qubit (rechts, sogenannte Bloch-Kugel) kann in Superpositionen von klassischen Zuständen existieren.

Dieser grundlegende Unterschied zwischen einem Bit und einem Qubit (und der daraus resultierende Unterschied zwischen den entsprechenden Informationsentropien) hat in den letzten drei Jahrzehnten zur Entwicklung neuartiger Quanteninformationstechniken geführt, die in der klassischen Physik nicht möglich sind. Beispiele hierfür sind die **Quantenkryptografie**, eine Methode zur geheimen Kommunikation über große Entfernungen, die superdichte Codierung, die es ermöglicht, bis zur doppelten Menge an klassischer Information zu kommunizieren, und der Shor-Algorithmus, mit dem sich Zahlen exponentiell schneller in ihre Primzahlfaktoren zerlegen lassen.

Allerdings sind auch Quantencomputer nicht vor der Landauer-Grenze gefeit: Die Quanteninformationsverarbeitung basiert oft auf supraleitenden Materialien, und damit spielen auch hier fundamentale thermodynamische Grenzen eine Rolle. Allerdings stellt sich die Frage, wie genau das Landauer-Prinzip auf Quantencomputer anzuwen-



Experimente mit schnelleren Schaltvorgängen bei unterschiedlichen Schaltzeiten kommen der Quantengrenze der Schaltenergie näher. Einzelne Realisierungen von Qubits (blau) zeigen schon jetzt eine höhere Effizienz als klassische Bits (gelb).

den ist. Ein Quantencomputer hat Zugriff auf exponentiell mehr Zustände und kann daher exponentiell mehr Information verarbeiten. Heißt das dann aber auch, dass exponentiell mehr Energie verbraucht werden muss? Erste Ergebnisse aus der Quantenthermodynamik scheinen darauf hinzuweisen, dass das nicht der Fall ist. Zum Beispiel gibt es interessante Anwendungen, die es erlauben, mehr Arbeit aus einer Quantenmaschine zu gewinnen als klassisch möglich wäre. Daher ist weitere Forschung dringend nötig, um dieser Frage sicher auf den Grund zu gehen.

Sebastian Deffner und Eric Lutz

QUANTENBITS ERZEUGEN UND KONTROLLIEREN

In der Quantenwelt übernehmen Quantenbits, kurz Qubits, die Aufgabe der kleinsten Informationseinheit. Je nach Anwendung lassen sie sich mit unterschiedlichen physikalischen Systemen realisieren. Ihre Erzeugung und Kontrolle haben in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte gemacht.

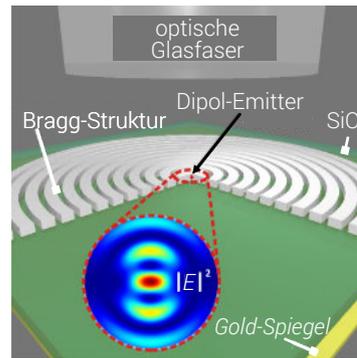
Die kleinste klassische Informationseinheit ist das Bit. Es kann zwei Werte annehmen: 0 oder 1. Im Unterschied dazu ist bei einem Qubit auch jede Überlagerung dieser beiden Zustände möglich. Erst durch eine Messung wird der finale Zustand festgelegt, wobei die Quanteninformation (die Überlagerung) in klassische Information (0 oder 1) umgewandelt wird. Diese Eigenschaft der Qubits bildet die Basis unterschiedlicher Anwendungen von der Quantenmetrologie über die Quantenkommunikation bis hin zum Quantencomputing.

Qubits lassen sich auf vielfältige Art und Weise realisieren. Es braucht dazu ein quantenmechanisches System, das sich durch solch einen Überlagerungszustand beschreiben lässt. Das können einzelne Elektronen- oder Kernspins sein, bestimmte Zustände von Atomen und Ionen oder die Polarisation einzelner Photonen. Darüber hinaus können Qubits jedoch auch in Form maßgeschneiderter Quantensysteme in Festkörpern realisiert werden.

Die Anforderungen an Qubits variieren je nach Anwendung stark. Während die Durchführung lokaler Rechenoperationen häufig **stationäre Qubits** erfordert, deren Wechselwirkung sich sowohl untereinander als auch mit ihrer Umgebung einstellen lässt, erfordert der Transfer von Quanteninformation über große Distanzen sogenannte **fliegende Qubits** in Form von Photonen.

Stationäre Qubits

Stationäre Qubits lassen sich auf verschiedene Arten realisieren: Es können einzeln adressierbare Quantensysteme, wie gefangene Atome oder Ionen, sowie einzelne Spinsysteme in Festkörpern, wie Elektronen- oder Kernspins verwendet werden. Dabei können atomare Energieniveaus oder zwei ausgewählte Spinzustände genutzt und gezielt durch Laser- oder Mikrowellenpulse kontrolliert werden. Andere Qubits basieren auf elektronischen Schwingungszuständen in supraleitenden Quantenschaltkreisen: Man nutzt dafür supraleitende Elektroden, zwischen denen Elektronenpaare sich mithilfe des quantenmechanischen Tunneleffekts bewegen können (**Josephson-Kontakte**). Diese Qubits werden bei sehr tiefen Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt betrieben und können durch Mikrowellenpulse präzise angesteuert und gemessen werden. Um mit diesen stationären Qubits rechnen zu können, werden mehrere Qubits zu verschränkten Zuständen verbunden. Typischerweise wird dabei die Kopplung zwischen zwei oder mehreren Qubits durch Anpassung ihrer Übergangsfrequenzen aktiviert.



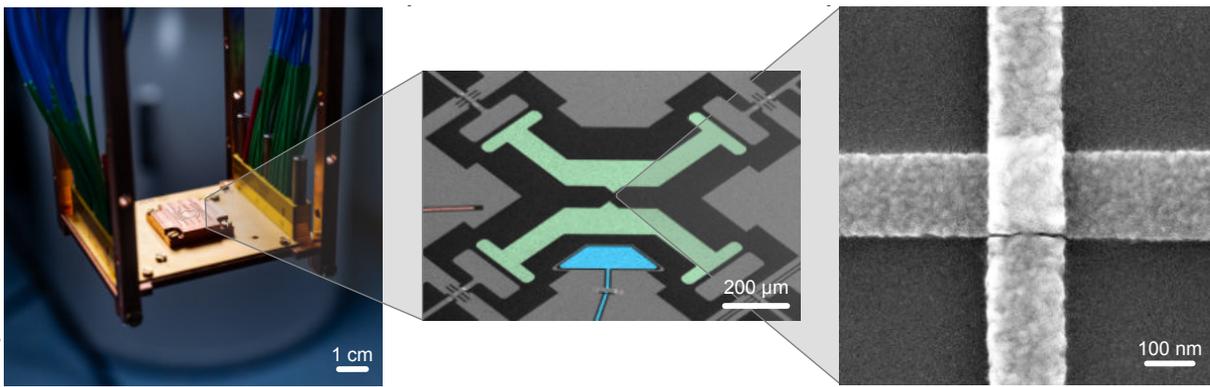
Quantenlichtquellen basierend auf Halbleiter-Quantenpunkten können fliegende Qubits auf Knopfdruck erzeugen. Gezeigt ist ein Mikroresonator mit skalierbar integriertem Quantenemitter. Die nanophotonische Struktur in Form zirkularer Bragg-Ringe kann für die Maximierung der Koppleffizienz in optische Glasfasern maßgeschneidert werden.

Eine Herausforderung dabei ist, dass Quantenzustände sehr empfindlich sind: Eine winzige Störung genügt, und der Quantenzustand ist zerstört. Mit Algorithmen zur **Quantenfehlerkorrektur** können derartige Fehler prinzipiell erkannt und korrigiert werden. Das gelingt mithilfe von sogenannten **logischen Qubits**, die aus vielen einzelnen physikalischen Qubits gebildet werden. Dazu muss jedoch die Fehlerrate pro Operation auf ein sehr niedriges Niveau im Promillebereich gebracht und es müssen erst hinreichend große Quantensysteme gebaut werden.

Qubits aus einzelnen Photonen

Für den Transfer von Quanteninformation über große Strecken, also für fliegende Qubits, sind Photonen prädestiniert. Klassische Lichtfeldzustände lassen sich durch eine große Anzahl von Emittlern generieren – beispielsweise kann man ein Gas so anregen, dass die Atome später Licht abgeben, etwa in einer Leuchtstoffröhre. Will man mit Photonen Qubits realisieren, ist die Sache jedoch komplizierter: Es braucht kontrolliert erzeugte Einzel- oder Mehrphotonenzustände.

Eine Möglichkeit, einzelne Photonen zu erzeugen, ist es, nichtlineare Kristalle zu nutzen. Dabei wird ein energiereiches Laserphoton in dem Kristall in zwei Photonen mit jeweils geringerer Energie umgewandelt – ein Prozess, der spontane parametrische Fluoreszenz genannt wird. Die Eigenschaften der beiden erzeugten Photonen sind stark miteinander korreliert. Die Photonen können sogar miteinander verschränkt sein. Werden sie räumlich getrennt, kann durch Detektion eines der beiden Photonen die Anwesenheit des Zweiten vorhergesagt und so eine Einzelphotonenquelle realisiert werden. Solche Quantenlichtquellen haben heute ei-



Mitte: Ein supraleitendes Transmon-Qubit (grün) mit Mikrowellenkontrollleitung (blau, unten) und Leitung zur Kontrolle des magnetischen Flusses (rot). Im Zentrum des Elements befindet sich der Josephson-Kontakt (rechtes Bild) als nichtlineares und widerstandsloses Bauelement zur Realisierung von supraleitenden Qubits. Links: Makroskopischer Aufbau des Elements.

nen Technologiereifegrad erreicht, der kommerzielle verschränkungsbasierte Quantenverschlüsselungssysteme ebenso ermöglicht wie Demonstrationsexperimente zur satellitengestützten Quantenkommunikation. Allerdings lässt sich der Zeitpunkt der Umwandlungsprozesse nicht kontrollieren: Sie erfolgen spontan, weshalb der Effizienz dieser Art von Quantenlichtquellen von Natur aus Grenzen gesetzt sind.

Ein anderer Ansatz ist es, Quantenlicht mithilfe von einzelnen Quantensystemen zu erzeugen, die diskrete Energieniveaus aufweisen. Im Jahre 1977 gelang dies erstmals mit einem einzelnen Atom. In der Folge rückten rasch auch Quantenemitter in Festkörpern in den Fokus der Forschung. Beim Übergang von einem Energieniveau ins andere sendet solch ein Quantensystem ein einzelnes Photon aus. Demzufolge ist hiermit prinzipiell die Erzeugung von Quantenlicht „auf Knopfdruck“ möglich. Derartige deterministische Quantenlichtquellen beruhen auf einzelnen Atomen oder Ionen, Molekülen, atomaren Fehlstellen in Festkörperkristallen oder zweidimensionalen Materialien, aber auch auf supraleitenden Schaltkreisen und nanoskaligen Strukturen in Halbleitern, sogenannten **Quantenpunkten**. Letztere verhalten sich zwar ähnlich wie ein einzelnes Atom, lassen sich jedoch einfacher isolieren, kontrollieren und in funktionale Halbleiterbauelemente integrieren. Je nach Materialsystem und Beschaffenheit der Quantensysteme können so Photonen (und damit photonische Qubits) bei unterschiedlichen Wellenlängen vom ultravioletten Spektralbereich bis hin zu Mikrowellenfrequenzen erzeugt werden.

Deterministische Quantenlichtquellen haben enorme Fortschritte in Richtung funktionaler Quantennetzwerke ermöglicht. Basis für diese Entwicklungen bilden Quantenemitter, die gezielt in nanophotonische Strukturen integriert werden, um die Photonen-Einsamelleffizienz zu optimieren. Gerade mit Quantenpunkten können so komplexe Bauteile realisiert werden, die neben Mikroresonatoren auch elektrische Kontakte zur präzisen Kontrolle der elektronischen Eigenschaften erlauben. So lassen sich heute fliegende Qubits mit hoher Effizienz und nahezu idealen Eigenschaften erzeugen. Die Wahrscheinlichkeit, genau ein Photon oder ein verschränktes Photonenpaar pro Knopfdruck zu erzeugen, erreicht bereits Werte nahe 100%. Darüber hinaus gleichen sich die von einer Quantenlichtquelle erzeugten Photonen nicht nur wie ein Ei dem anderen. Sie sind nahezu vollkommen ununterscheidbar

und es können fast perfekte Verschränkungsgrade erreicht werden. Diese Eigenschaften ermöglichen es, Quantenschlüssel für die sichere Datenkommunikation zu erzeugen, quantenmechanische Verschränkung über große Distanzen zu übertragen und Quantenteleportation zu demonstrieren – Anwendungen, die früher wie Science-Fiction wirkten, sind jetzt Realität.

Qubit-Schnittstellen für das Quanten-Internet

Ein zukünftiges Quanten-Internet wird auch den Transfer von Quanteninformation von fliegenden auf stationäre Qubits und umgekehrt erfordern. So müssen räumlich entfernte Quantenprozessoren, die aus vielen wechselwirkenden stationären Qubits bestehen, für das verteilte Quantenrechnen miteinander verbunden werden, ohne dabei die Quanteneigenschaft der Information zu verlieren. Entsprechende Schnittstellen müssen also einzelne stationäre Qubits effizient in Photonen umwandeln, bzw. die Quanteninformation einzelner Photonen in den Zustand eines stationären Qubits überführen. Die Entwicklung solcher Qubit-Schnittstellen erfordert noch besondere Anstrengungen der Forschenden weltweit, da fliegende und stationäre Qubits aufgrund ihrer unterschiedlichen Anforderungen ja bislang noch in unterschiedlichen Quantensystemen realisiert werden, was ihre Wechselwirkung erschwert.

Ein Blick nach vorne

Künftig gilt es insbesondere, die Robustheit und Skalierbarkeit von Qubit-Systemen weiter zu verbessern. In einem Quanteninternet müssen identische fliegende Qubits auch von vielen räumlich getrennten Quantensystemen erzeugt sowie komplexe Zustände aus einer Vielzahl verschränkter Photonen generiert werden können. Im Bereich des Quantencomputings mit stationären Qubits müssen Fehlervermeidungs- und Fehlerkorrekturalgorithmen implementiert werden, um nützliche Quantenalgorithmen auf großen Systemen mit kleinen intrinsischen Fehlern zu ermöglichen. Herausforderungen sind hier insbesondere die Abschirmung der Quantenzustände gegenüber Störeinflüssen, um Quantenoperationen auch mit Tausenden von Qubits oder mehr mit höchster Güte durchführen zu können.

Stefan Filipp, Stephan Götzinger und Tobias Heindel

QUANTENCOMPUTER

Bei besonders anspruchsvollen Rechenaufgaben stoßen auch Supercomputer an ihre Kapazitätsgrenzen. Hier könnte die Quantencomputing-Technologie eine Revolution auslösen. Anstatt nur digitale Werte in Form von Bits zu verarbeiten, nutzt der Quantencomputer die speziellen Eigenschaften der Quantenmechanik, wie Superposition und Verschränkung, um Berechnungen auf eine völlig neue Weise durchzuführen.

Will man die Rechenleistung eines herkömmlichen Computers verdoppeln, so muss man – etwas vereinfacht – die Anzahl der Recheneinheiten verdoppeln. Moderne Rechner besitzen daher viele Rechenkerne und Großrechenanlagen bringen es dabei auf etliche Millionen von parallel arbeitenden Kernen. Der Rekord im Juni 2024 liegt bei knapp zehn Millionen Kernen, die dann die exorbitante Rechenleistung von 10^{18} Operationen pro Sekunde erlauben. Sie benötigen dazu aber auch ca. 20 Megawatt an elektrischer Leistung, die von etwa zehn Windrädern erbracht werden kann. Schon jetzt führen diese erheblichen Ressourcen an Hardware und Betriebskosten dazu, dass die Rechenleistung nicht mehr so ansteigt wie es komplexe Probleme eigentlich verlangen: Zum Beispiel möchte man die chemischen Reaktionen zwischen Molekülen simulieren können, um neue Katalysatoren mit effizienteren Reaktionen zu entwickeln. Könnte man sogar biologisch oder pharmazeutisch interessante Reaktionen im Computer ablaufen lassen, wäre das ein Durchbruch bei der Herstellung von medizinischen Wirkstoffen. Allerdings sind selbst die schnellsten aktuellen Großrechner dazu bei Weitem nicht in der Lage.

Die grundsätzlich unterschiedliche Art der Informationsspeicherung und Verarbeitung in einem [Quantenrechner](#) könnte diese Situation komplett ändern. Statt wie in einem herkömmlichen Rechner, der digitale Werte des Bits von entweder Null oder Eins benutzt, verwendet ein Quantenrechner alle [Superpositionszustände](#) von Null und Eins für ein Quantenbit (siehe auch „Quantenbits erzeugen und kontrollieren“ auf Seite 199). Durch die Verwendung der nur quantenphysikalisch erklärbaren Eigenschaften – Superpositionen, Interferenz und Verschränkung – ergeben sich neuartige Rechenmöglichkeiten, die eine effiziente Bearbeitung möglich machen, wo klassische Rechenverfahren an ihre Grenze stoßen. Mit jedem hinzugefügten Quantenbit (Qubit) verdoppelt sich dabei die verfügbare Rechenleistung, während die Komplexität der Maschine nur wenig ansteigt. Solch ein mit der Anzahl der Qubits exponentiell ansteigender Zuwachs an Rechenleistung wird daher ohne wesentliche Vergrößerung der verwendeten Ressourcen oder der benötigten Energie erreicht.

Jeder Rechenprozess auf einem Quantencomputer verwendet Qubits. Deren Kontrolle geschieht nach ähnlichen Prinzipen wie bei einem herkömmlichen klassischen Rechner durch logische Gatteroperationen. Der komplette Rechenvorgang, also der [Algorithmus](#) zur Lösung des Problems, wird in einer Schaltkreissequenz von Operationen an einzelnen oder mehreren Qubits ausgeführt. In der letzten Dekade haben

sich eine Reihe von vorteilhaften technischen Plattformen für die Realisierung eines Quantencomputers herauskristallisiert. Alle verfügen grundsätzlich über einen ähnlichen Aufbau, der der klassischen Eingabe–Verarbeitung–Ausgabe-Struktur herkömmlicher Computer folgt.

- Der Benutzende steuert die Rechenprozesse und gibt Daten oder Parameter ein.
- Die Eingabe wird von Compilern in einen ausführbaren Satz von Befehlen verarbeitet.
- Die zentrale Prozessoreinheit verfügt über eine skalierbare Anzahl miteinander verbundener Qubits, auf denen die Quantengatteroperationen ausgeführt werden. Je nach Implementierung unterscheiden sich die Qubits und auch deren Kontrolleinheiten.

Die aktuelle Forschung und technologische Entwicklung zielt darauf ab, eine immer größere Zahl von identischen und verknüpften Qubits zu realisieren. Aktuell erreichen alle Plattformen eine Verschränkung von etwa 50 Qubits. Ebenso wichtig ist es, die Gatteroperation zu verbessern. Diese Qualität liegt im Bereich von bis zu etwa 99,9%.

- Das Ergebnis eines Algorithmus wird durch die Auslese realisiert, die Messung der Qubits. Dieses Ergebnis wird von einem klassischen Rechner weiterverarbeitet, und dieser Rechner bereitet ebenfalls die Parameter für die nächste Ausführung des Algorithmus vor. Man spricht von einer hybriden quanten-klassischen Rechnerarchitektur.

Wie geht es weiter? Die Entwicklung ist hochdynamisch zwischen Interessen von Nationen, Universitäten, Forschungsinstituten, neu gegründeten und etablierten großen Firmen. Klar ist: Quantencomputer haben das Potenzial, zentrale Werkzeuge für die Bearbeitung wichtiger Fragen in Wissenschaft, Technologie und Wirtschaft zu werden. Aber obwohl keine fundamentalen physikalischen Gesetze den Bau eines Quantencomputers verbieten, ist es doch ein schwieriges Problem, eine ausreichend hohe Anzahl von Qubits ausreichend gut zu kontrollieren damit hochverschränkte Quantenzustände zu erzeugen. In gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsarbeit an Universitäten und Unternehmen werden diese unterschiedlichen Hürden genommen. Erste Quantencomputer-Prototypen regen schon jetzt dazu an, neuartige Software, neue Algorithmen zur Lösung weiterer Fragen und Anwendungsfälle im Industrieumfeld zu entwickeln und zu optimieren.

Ferdinand Schmidt-Kaler

← Ein von Intel im Jahr 2023 vorgestellter Chip, der 12 Qubits auf Basis von Elektronenspins enthält. Er dient zur weiteren Forschung auf dem Weg zu Quantencomputern. Die meisten Plattformen können 20 gut kontrollierte Qubits aufweisen, aber es gibt schon erheblich größere Systeme: IBM hat den supraleitenden Chip Condor mit 1121 Qubits vorgestellt und Google den Willow-Chip mit sehr genau kontrollierbaren 105 Qubits.

QUANTENALGORITHMEN

Beim Multiplizieren mit Papier und Bleistift Zahlen, folgt man einer Rechenvorschrift – also einem Algorithmus. Ein Algorithmus gibt einen Lösungsweg für eine Klasse von Problemen vor. Quantenalgorithmen liefern gewissermaßen die Rechenvorschriften und damit die Software für Quantencomputer.

Der historisch erste Quantenalgorithmus mit Überlegenheit gibt einen Lösungsweg für folgendes Problem vor: Man möchte wissen, ob eine Funktion konstant ist oder je nach Eingabewert unterschiedliche Ergebnisse ausgibt. Dazu ließe sich die Funktion natürlich einfach für unterschiedliche Werte auswerten. Wenn jedoch jede Auswertung sehr kostspielig wäre, so liegen die Vorteile klar auf der Hand, wenn man die Funktion nur ein einziges Mal auswerten müsste. Dieser sogenannte Deutsch-Jozsa-Algorithmus zeigt, dass sich das Problem dank der quantenphysikalischen Überlagerung von Zuständen mit einem einzigen Funktionsaufruf lösen lässt. Die technische Möglichkeit, Qubits in einem solchen Überlagerungszustand herzustellen, hat also erstaunliche rechnerische Implikationen.

Der Ansatz von David Deutsch inspirierte auch eine Reihe von fortschrittlichen Quantenalgorithmen. Darunter gibt es zum Beispiel ein effizientes Verfahren, Zahlen in ihre Primfaktoren zu zerlegen. Dieser

Shor-Algorithmus widmet sich damit einem praktisch wichtigen Problem, das bei Datenverschlüsselung eine Rolle spielt.

Andere mathematische Probleme, die sich mit Quantenalgorithmen lösen lassen, sind lineare Gleichungssysteme. Viele gängige Probleme in Wissenschaft und Technik lassen sich so formulieren. Der Harrow-Hassidim-Lloyd-Algorithmus liefert dafür nun einen Weg, der in Zukunft viel schneller Lösungen produzieren könnte, als das mit klassischen Computern möglich ist.

Es ist gut möglich, dass in der nahen Zukunft Anwendungen der Quantensimulation stark korrelierter Quantensysteme am naheliegendsten sind. Derzeit werden Anwendungen im kombinatorischen Optimieren und im Maschinenlernen viel diskutiert. Wohin die Reise geht, ist nicht ganz klar, allerdings ist nun schon offensichtlich, dass sich das Jahrhundertprojekt Quantenrechner nur dann lohnt, wenn man auch zeitgleich Algorithmen entwickelt – und auch deren Grenzen kennt –, um dieses erhebliche rechnerische Potenzial konzeptuell, wissenschaftlich und wirtschaftlich relevant anzuwenden.

Jens Eisert

QUANTENCOMPUTER UND SCHWARZE LÖCHER

In der theoretischen Physik gibt es neue Verbindungen zwischen Teilgebieten, die auf den ersten Blick nicht verwandt sind. Insbesondere können Schwarze Löcher mit Methoden aus der Quantenphysik beschrieben werden, die für das Verständnis von Quantencomputern entwickelt wurden.

Schwarze Löcher haben eine Reihe von faszinierenden Eigenschaften (siehe „Schwarze Löcher und Pulsare“ auf Seite 61). Vor wenigen Jahren wurden sie zum ersten Mal direkt im Universum nachgewiesen und beobachtet. Sie haben eine so hohe Anziehungskraft, dass Licht und Materie, die sich einem schwarzen Loch über eine bestimmte Grenze hinaus nähern, von diesem verschluckt werden. Die Grenze, bei der dies geschieht, heißt Schwarzschild-Horizont. Darüber hinaus sagt die theoretische Physik weitere ungewöhnliche Eigenschaften der schwarzen Löcher voraus. Schon der berühmte Physiker Stephen Hawking schrieb ihnen interessante Quanteneigenschaften zu: Die verschluckte Materie wird demnach als Wärmestrahlung, die sogenannte Hawking-Strahlung, wieder abgestrahlt. Ein ungeklärte Frage ist, was mit der in der verschluckten Materie enthaltenen Information passiert, denn diese findet sich in der gleichförmigen Strahlung nicht mehr wieder. Dies ist das **Informationsparadoxon**.

Hier gibt es nun einen unerwarteten Zusammenhang mit Quantencomputern: Neue Forschungsideen nutzen Methoden aus der Quan-

teninformationstheorie, um damit die Quanteneigenschaften Schwarzer Löcher zu verstehen. Insbesondere spielt die Quantenverschränkung eine große Rolle, also Überlagerungen von sich eigentlich ausschließenden Zuständen wie bei Schrödingers Katze. Dazu nutzen Forscherinnen und Forscher sogenannte Dualitäten. Diese bilden Theorien aus unterschiedlichen Gebieten der Physik wie bei einem Lexikon aufeinander ab.

Bekanntestes Beispiel für eine Dualität zwischen Gravitation und Quantenphysik ist die **AdS-CFT-Dualität** des argentinischen Physikers Juan Maldacena, wobei AdS für eine bestimmte Gravitationstheorie und CFT für eine Quantentheorie steht. Diese Dualität wird auch in Fällen, in denen herkömmliche Methoden nicht anwendbar sind, für die Berechnung von Leitfähigkeiten oder Massen in Festkörper und Elementarteilchenphysik verwendet. Insbesondere wurde damit die Scher-Viskosität von besonders zähen Flüssigkeiten vorhergesagt und sowohl in teilchenphysikalischen Experimenten mit Schwerionen als auch in der Atomphysik experimentell überprüft. Dies unterstreicht die Tatsache, dass die gleichen physikalischen Phänomene in sehr unterschiedlichen Zusammenhängen vorkommen.

Johanna Erdmenger

ABHÖRSICHER DURCH QUANTENKOMMUNIKATION

Mithilfe von Quanteneigenschaften lässt sich Kommunikation im Prinzip absolut abhörsicher gestalten. Mit weiteren Anwendungen wie der Quantenteleportation können in Zukunft Quantencomputer in Netzwerken effizient verteilt rechnen.

Die Quantenkommunikation erweitert und ergänzt die herkömmlichen Methoden der klassischen Kommunikation. So ermöglicht sie zum Beispiel die Quantenschlüsselverteilung oder [Quantenkryptografie](#). Sie erzeugt einen geheimen Schlüssel zwischen zwei Kommunikationsstellen, den diese später zur Chiffrierung ihrer Nachricht verwenden können. Im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden, bei denen die Sicherheit oft von der angenommenen, mathematischen Komplexität zum Knacken des Verschlüsselungsalgorithmus abhängt, beruht sie bei der Quantenkryptografie auf fundamentalen Gesetzen der Physik.

Das BB84-Protokoll

1984 schlugen die Physiker Charles H. Bennett und Gilles Brassard das Prinzip der Quantenschlüsselverteilung vor (BB84-Protokoll). Zur Erzeugung einer zufälligen Bitfolge verwendet diese nur grundlegende, einfache Eigenschaften der Optik und Quantenmechanik, vor allem der Unmöglichkeit, nichtorthogonale Zustände mit einer einzigen Messung zu unterscheiden. Dies lässt sich gut mit polarisiertem Licht veranschaulichen: Ein einzelnes, [vertikal polarisiertes Photon](#) kann ungestört einen vertikal orientierten Polarisationsfilter durchqueren und dahinter detektiert werden, es wird aber durch einen horizontal orientierten Filter vollständig absorbiert – und umgekehrt. Ordnet man horizontaler Polarisation

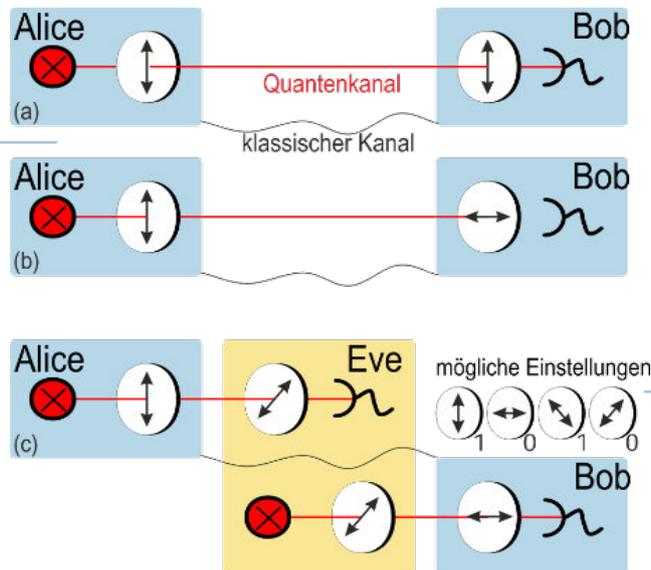
den Wert „0“ (a im Bild) und vertikaler Polarisation den Wert „1“ (b im Bild) zu, lässt sich so klassische, binäre Information übermitteln. Eine zufällige Bitfolge für einen geheimen Schlüssel könnten Sender und Empfänger erzeugen, indem sie die Einstellung der Filter jedes Mal zufällig wählen und nur die Fälle verwenden, in denen ein Photon detektiert wurde.

Allerdings ist diese Bitfolge nicht abhörsicher: Ein Abhörgerät könnte einfach die Polarisation messen und ein neues Signal entsprechend seiner Messung weiterschicken. Sender und Empfänger können das nicht bemerken. Hier wurden aber auch nur orthogonale, eindeutig unterscheidbare Zustände gewählt. Die Schlüsselerzeugung ist also noch nicht sicher, selbst wenn einzelne Photonen geschickt würden.

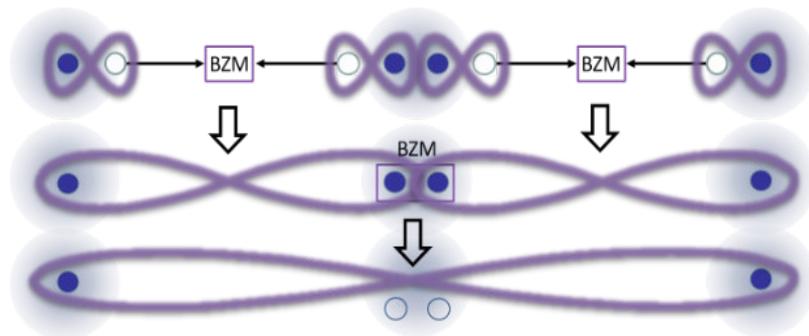
Dies ändert sich, wenn alternativ und zufällig [vier Polarisationsrichtungen](#), nämlich horizontal/vertikal und +45° und -45° für die Kodierung verwendet werden (c). Lineare Polarisation mit +45° Winkel kann als Überlagerung von horizontaler und vertikaler Polarisation dargestellt werden und ist offensichtlich nicht orthogonal zu vertikaler oder horizontaler Polarisation. Beim Abhören muss nun entschieden werden, ob mithilfe eines horizontal/vertikalen Polarisationsfilters oder mit einem 45° rotierten Filterpaar gemessen wird: Man muss sich auf eine sogenannte Basis festlegen, denn eine gleichzeitige Messung in beiden Basen ist nicht möglich. Ein eindeutiges Resultat erhält man, wenn man in der Basis misst, in der der Sender das Photon präpariert hat. Misst aber nun ein Abhörgerät ein vertikal polarisiertes Photon in der 45°-Basis, so wird die ursprüngliche Polarisation verändert und der Empfänger erhält mit einer fünfzigprozentigen Wahrscheinlichkeit einen falschen Messwert. So erkennen Sender und Empfänger sofort den Abhörversuch. Noch besser, der Anteil der falschen Werte in der Bitfolge ist sogar ein direktes Maß für die maximale Information, die durch den Angriff gewonnen werden konnte. Kennt man diese Informationsmenge, kann sie durch Kombination mehrerer Schlüsselbits zu einem neuen und einer entsprechenden Verkürzung des Schlüssels beliebig klein gemacht werden. So kann erstmals messbare Sicherheit für zufällige Schlüsselfolgen hergestellt werden.

Ursprünglich wurde das BB84-Protokoll für einzelne Photonen formuliert. Werden unterschiedlich helle Pulse gesendet, so kann auch der nun mögliche Angriff, bei dem sich das Abhörgerät ein Photon im Puls abzweigt und wartet, bis es die richtige Basis aus der Kommunikation zwischen Sender und Empfänger kennt, entdeckt werden. Neben der Polarisation können auch die Phase oder die Frequenz des Lichts, der

Erzeugung eines sicheren Schlüssels mit Photonen, polarisiert in unterschiedlichen Richtungen. Ein Abhörversuch führt unweigerlich zu Fehlern – und damit zu meßbarer Sicherheit – in der Bitfolge, sobald nichtorthogonale Einstellungen verwendet werden.



Prinzip des Quantenrepeaters: Eine Strecke wird in kürzere Abschnitte unterteilt, über die Verschränkung verteilt wird. Dabei werden Quantenspeicher und verschränkende Messungen (Bell-Zustandsmessungen, BZM) verwendet.



Zeitpunkt eines Pulses oder die Phase zwischen Pulsen zur Kodierung verwendet werden. So stehen heute, basierend auf moderner Lasertechnologie, kommerzielle Systeme für Kommunikationsanwendungen mit hohem Sicherheitsniveau zur Verfügung. Diese sollen auf kürzeren Strecken, z. B. zwischen Datenzentren, und zukünftig auch zwischen allen größeren Städten in Europa eingesetzt werden (European Quantum Communication Infrastructure).

Die Absorption von Licht begrenzt die Reichweite einer sicheren Verbindung. In herkömmlichen Glasfasern reduziert sich die Wahrscheinlichkeit, ein Photon zu detektieren, um einen Faktor 10 alle 50 Kilometer. Dadurch tragen zufällige Detektionsereignisse im Detektor oder Streulicht immer stärker zu falschen Ereignissen im Datenstrom bei, bis bei ca. zehn Prozent Fehler kein Schlüssel mehr erzeugt werden kann. Daher werden für größere Entfernungen Segmente von rund 70 Kilometern Länge aneinandergereiht. Die Verbindungsknoten müssen aber sicher sein („trusted nodes“), da an diesen Stellen der Schlüssel als klassische Bitfolge verfügbar – und damit angreifbar – ist. Alternativ kann ein Satellit als „trusted node“ Schlüssel mit unterschiedlichen Orten auf der Erde austauschen und daraus einen sicheren Schlüssel auf globaler Skala erzeugen.

Sicherheit dank Verschränkung

Neue Möglichkeiten für die Quantenkommunikation ergeben sich dank einer weiteren Quanteneigenschaft: der **Verschränkung**. Dabei sind die gemeinsamen Eigenschaften zweier Teilchen (z. B. Photonen) festgelegt, die Zustände der individuellen Teilchen aber unbestimmt. Bei einer Messung der einzelnen Teilchen sind die Ergebnisse für sich alleine zufällig, zusammen zeigen sie aber starke Korrelationen. Keine klassische Theorie kann diese starke Korrelation beschreiben, und auch in der Quantenphysik sind noch nicht alle Fragen geklärt – für die Quantenkommunikation eröffnen sie aber zahlreiche neue Möglichkeiten. Beobachten Sender und Empfänger diese nichtklassischen Korrelationen, so können sie sicher sein, dass die empfangenen Lichtteilchen nicht durch einen Angriff manipuliert wurden und können aus den Messergebnissen wieder einen sicheren, geheimen Schlüssel erzeugen.

Die Verteilung verschränkter Zustände bietet aber noch viele weitere Anwendungen: Sie ermöglicht Quantenteleportation – die Übertragung eines Quantenzustands von einem Quantensystem auf ein anderes, weit entferntes, oder die Kodierung von zwei klassischen Bits durch Manipulation nur eines Qubits. Die Möglichkeit, Quantenzustände zu übertragen,

lässt sich auch bestens von Quantencomputern nutzen: Das (Zwischen-)Ergebnis einer Quantenrechnung kann so zum Beispiel in einen Quantenspeicher geschrieben werden, aber auch als Eingangszustand für eine weitere Operation auf einen zweiten Rechner übertragen werden. Die Anzahl der nutzbaren Qubits verdoppelt sich (bei gleicher Größe der Quantencomputer), der verfügbare Rechenraum und die Leistungsfähigkeit der kombinierten Quantenrechner steigt aber quadratisch, vervierfacht sich also! Ebenso können durch die Übertragung von Zuständen Quantensensoren verknüpft und ihre Empfindlichkeit gesteigert werden.

Quantennetzwerke

Die Quantenteleportation kann sogar genutzt werden, um ein Netz von Quantencomputern aufzubauen, in dem effizient, also ohne Reichweitenprobleme, Quantenkommunikation möglich ist. Dazu benötigt man an den Knoten jeweils langlebige Quantensysteme, quasi Quantenspeicher. Zwei davon werden zur Emission eines Photons angeregt, das mit dem internen Zustand des Speichers verschränkt ist. Die beiden Photonen werden wie bei der Quantenteleportation in einer **Bell-Zustandsmessung** zusammengebracht. Bei dieser Projektion auf verschränkte Zustände erhält man keinerlei Information über die eingehenden Zustände. Das Ergebnis ermöglicht es aber nun, die Verschränkung zwischen Speicher und Photon auf die beiden Speicher zu übertragen. Ist ein Knoten mit mehreren Nachbarknoten verbunden, so kann wiederum durch eine Bell-Zustandsmessung an den Speichersystemen des Knotens die Verschränkung an die benachbarten Knoten weitergegeben werden. Mit einer zusätzlichen Fehlerkorrektur kann das Prinzip dieses **Quantenrepeaters** mit nur mehr polynomialem Aufwand effizient Verschränkung zwischen beliebigen Knotenpaaren im Netzwerk verteilen. Auf diese Weise werden die „trusted nodes“ obsolet und ein Quantenschlüssel kann auch über sehr große Entfernungen ohne Sicherheitsbedenken verteilt werden. Diese Ende-zu-Ende-Verschränkung kann so für alle Anwendungen der Quantenkommunikation und die Verknüpfung von Quantenrechnern und Quantensensoren genutzt werden. Der potenzielle Nutzen ist enorm, Quantenrepeater werden derzeit daher weltweit intensiv erforscht. Es gibt erste Erfolge bei der Verteilung der Verschränkung zwischen Knoten, dennoch ist es noch ein langer Weg, bis wir in der Praxis mittels Fehlerkorrektur lange Kohärenzzeiten an den Knoten und somit Verschränkung mit hoher Güte im ganzen Netzwerk erreichen.

Christoph Becher und Harald Weinfurter

MODELLSYSTEME FÜR DIE QUANTENWELT

Das Zusammenspiel vieler quantenmechanischer Teilchen bringt erstaunliche Phänomene hervor, die jenseits unserer alltäglichen Intuition liegen. Quantensimulationen erlauben es, diese schwer fassbare Welt zu erkunden.

Die Quantenwelt ist seltsam, paradox und faszinierend zugleich. Sie stellt uns vor Rätsel, die mit konventionellen klassischen Berechnungen nicht mehr zu lösen sind. Grund hierfür ist die Komplexität von Quantensystemen, insbesondere wenn viele quantenmechanische Teilchen zusammenwirken. Möchte man einen quantenmechanischen Zustand vieler Teilchen mithilfe klassischer Methoden exakt beschreiben, so steigt die Anzahl der Parameter, die dafür benötigt werden, exponentiell mit der Anzahl der Teilchen an. Benötigt man also für zwei Teilchen vier Parameter, so wären es bei drei Teilchen schon acht Parameter, für zehn Teilchen bereits 1024 und für nur 30 Teilchen über eine Milliarde. Klassische Rechner stoßen hier schnell an fundamentale Grenzen und das selbst beim Einsatz von Supercomputern. Demnach lässt sich eine Vielzahl an physikalischen Fragen in der Welt quantenmechanischer Teilchen einfach nicht beantworten.

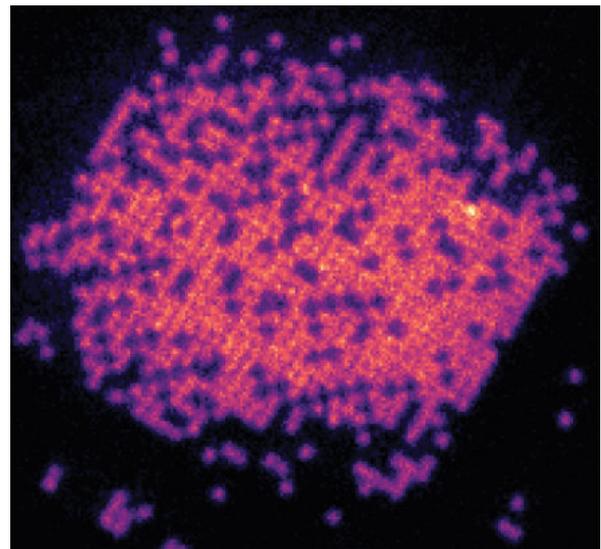
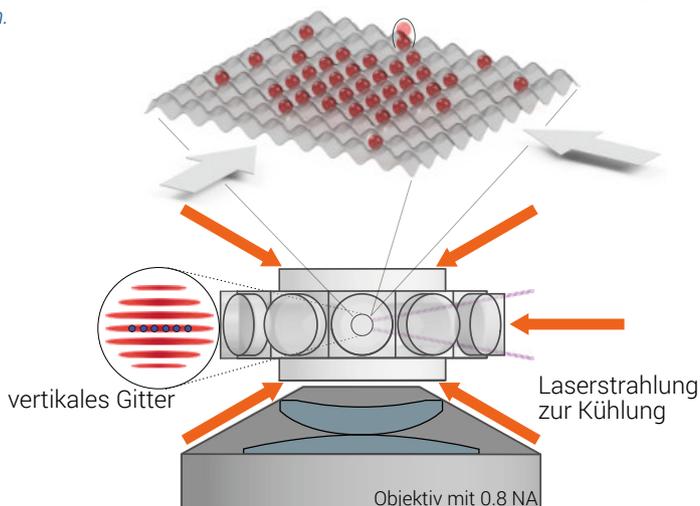
Quantensimulationen ermöglichen, in die Tiefen der Quantenwelt einzutauchen und deren Geheimnisse zu entschlüsseln. Hierbei versuchen Forschende nicht, komplexe Quantensysteme auszurechnen, sondern bilden sie in einer kontrollierten Laborumgebung nach. Die Idee hierbei ist es, die Eigenschaften einzelner quantenmechanischer Teilchen gezielt zu kontrollieren und darüber hinaus die Wechselwirkung zwischen einzelnen Teilchen zu steuern. Daraus lassen sich große quantenmechanische Systeme aus vielen Tausend Teilchen

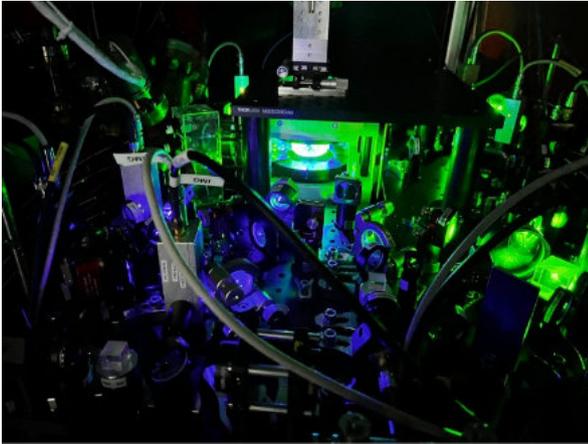
erzeugen und deren Eigenschaften untersuchen. Im Allgemeinen finden die Simulationen in Ultrahochvakuumapparaturen statt. Im Detail werden Quantensimulatoren dann auf verschiedene Arten realisiert und weiterentwickelt, die sich für unterschiedliche Forschungszwecke eignen.

Kalte Atome als Simulationsbausteine

Ein besonders vielversprechender Ansatz sind kalte Atome in optischen Gittern – regelmäßigen Strukturen aus Licht. Doch um das möglich zu machen, müssen die Atome erst einmal abgekühlt werden. Dazu richtet man Laserstrahlen aus allen drei Raumrichtungen auf die Atome. Die Parameter werden so gewählt, dass die Atome nur dann Photonen absorbieren können, wenn ihre Geschwindigkeit der der Photonen entgegengesetzt ist. Die Absorption eines Photons führt dann zu einem Rückstoß, der das Atom allmählich immer weiter abbremsst. Bildlich kann man sich das in etwa so vorstellen, dass die Atome von den Laserstrahlen wie durch einen starken Wind zurückgedrängt werden. Dadurch kommen die Atome fast zum Stillstand, sie sind dann (in der Sprache der Thermodynamik) „kalt“, werden also durch diesen Prozess abgekühlt. Man erreicht Temperaturen, die um ein Vielfaches unterhalb der Temperatur des Weltalls und nahe am absoluten Nullpunkt liegen. Diese kalten Atome werden dann in Interferenzmustern aus Licht gefangen.

Links: Schema eines Quantengasmikroskops. Im Zentrum ist eine Glaszelle, dort werden die Atome in einem optischen Gitter gefangen. Ein Mikroskop sammelt die Fluoreszenzphotonen auf, um ein Bild der Atome zu erzeugen. Rechts: Mikroskopbild von Caesiumatomen in einem quadratischen optischen Gittern. Jeder helle Punkt entspricht einem Atom. Der Abstand zwischen einzelnen Atomen beträgt 767 nm.





Experimenteller Aufbau mit Ytterbiumatomen. Der helle grüne Bereich in der Mitte ist die zentrale Vakuumkammer des Aufbaus. Die blauen und grünen Laserstrahlen werden zur Laserkühlung und Abbildung von Ytterbiumatomen verwendet. Sie werden mithilfe von Linsen und Spiegeln auf die Atome gelenkt.

Die Konfiguration aus Atomen in einem optischen Gitter dient z. B. als Analogie für Elektronen in einem Festkörper. Hierbei spielen die Atome die Rolle der Elektronen und das Lasergitter bildet den Festkörperkristall nach. Solche stark vereinfachten Modelle von realen Festkörpern erlauben, tiefere Einblicke in die zugrundeliegenden Bausteine und Mechanismen von komplexeren Systemen zu erhalten, da die Gesetze, wie sich die Atome im Modell verhalten, mit denen der Elektronen im Festkörper übereinstimmen. Im Modellsystem können die Atome außerdem mithilfe von hochauflösenden Objektiven einzeln manipuliert und beobachtet werden – eine Methode, die unter dem Namen [Quantengasmikroskopie](#) bekannt ist.

Um ein Bild der Atome im Quantensimulator aufzunehmen, wird die Position der Atome in besonders tiefen Fallen eingefroren – die Atome können sich nicht mehr bewegen. Das Bild wird erzeugt, indem jedes einzelne Atom viele Photonen streut, die dann über hochauflösende Mikroskope aufgesammelt und mithilfe einer Kamera abgebildet werden. Somit entstehen Bilder der Kristalle, auf denen jedes einzelne Atom abgebildet ist, was einen einzigartigen Einblick in die Eigenschaften von Quantenvielteilchensystemen liefert.

Rydberg-Atome: Riesen der Quantenwelt

Neben der Quantengasmikroskopie gibt es noch eine weitere experimentelle Plattform, die Quantensimulationen mit Atomen ermöglicht: sogenannte [Rydberg-Atome](#) in optischen Pinzetten. Jedes einzelne Atom ist hierbei in einer eigenen Falle gefangen, welche durch einen stark fokussierten Laserstrahl erzeugt wird. Der Hauptunterschied zur Quantengasmikroskopie ist, dass der Abstand zwischen benachbarten Atomen typischerweise einige Mikrometer beträgt – etwa zehnmal mehr als in optischen Gittern. Das hat zur Folge, dass sich die Atome auch bei thermischen Anregungen nicht zwischen den Fallen hin- und herbewegen können. Zentral für die Funktionsweise dieses Quantensimulators ist die besonders starke Anregung der Atome in sogenannte Rydberg-Niveaus – das sind sehr hoch angeregte Zustände. Bei diesen Energiezuständen hat das angeregte Elektron eine sehr große Entfernung vom Atomkern, weshalb diese Zustände extrem empfindlich auf elektromagnetische Felder reagieren. Das führt dazu, dass Rydberg-Atome trotz des großen Abstands starke Wechselwirkungen mit ihren Nachbarn haben. Somit eignet sich diese Plattform ideal für Quantensimulatio-

nen von Vielteilchensystemen. Da die Anregung zu Rydberg-Zuständen mithilfe von resonantem Laserlicht stattfindet, sind Rydberg-Atom-Anordnungen zudem besonders gut geeignet, um Quantengatter zu realisieren, die die Grundlage für die Funktionsweise von Quantencomputern bilden.

Blick in die Zukunft

Quantensimulatoren decken schon jetzt ein breites Anwendungsfeld ab. Ein Beispiel sind Experimente zur Erforschung der Hochtemperatursupraleitung, also dem Verschwinden des elektrischen Widerstands in bestimmten Materialien bei sehr niedrigen Temperaturen. Die Variation der mikroskopischen Parameter hilft, das zugrundeliegende Verhalten und die entscheidenden Mechanismen besser zu verstehen. Man hofft so, neue Materialien mit bisher unbekanntem oder gewünschten Eigenschaften zu entdecken und zu entwickeln. Neben Modellen für Phänomene aus der Festkörperphysik lassen sich auch solche zur Beantwortung von Fragen aus der Teilchenphysik oder der Quantenchemie realisieren.

Das Feld der Quantensimulationen mit neutralen Atomen entwickelt sich rasant. Auf technischer Seite gibt es regelmäßig neue Rekorde, was die Teilchenzahlen, die Kontrollierbarkeit und die erreichten Temperaturen angeht. Darüber hinaus arbeiten einige experimentelle Forschungsgruppen daran, gezielt präzise Uhrenübergänge für Quantensimulationen auszunutzen, Anwendungen in der Quantenmetrologie zu entwickeln oder offene Quantensysteme zu realisieren. Die Verbindung von Quantensimulatoren und -computern ermöglicht außerdem die Realisierung von Mess- und Feedbackprotokollen. Die Qualität von Quantensimulatoren bringt uns schon jetzt an die Grenze des klassisch Beschreibbaren. Es wird wohl noch einige Zeit dauern, bis wir einen digitalen fehlerkorrigierten Quantencomputer haben. Dafür birgt dieser jedoch enorme Vorteile, da universelle Algorithmen implementiert werden können und somit ein viel breiteres Anwendungsspektrum abgedeckt werden kann. Spannend ist auch die Kombination von beiden Anwendungen für die Implementierung von hybriden Protokollen, die Simulationen mit digitalen Operationen verknüpfen.

Eine enge Zusammenarbeit mit der [Photonik](#) dürfte es außerdem in Zukunft erlauben, die Modellsysteme weiter zu vergrößern und so noch tiefere Einblicke in die komplexen Mechanismen der Quantenwelt zu erhalten.

Monika Aidelsburger

WINZIG KLEIN UND HOCHGENAU

Das Forschungsgebiet der Quantensensorik analysiert die Grenzen der Messpräzision und führt sie auf grundlegende quantenphysikalische Prinzipien zurück. Auf der anderen Seite werden diese Erkenntnisse genutzt, um immer genauere Messungen zu ermöglichen.

Präzise Messungen sind die Grundlage für zahllose technische Errungenschaften und wissenschaftliche Fortschritte von der Elementarteilchenphysik bis hin zur Astrophysik. Beispielsweise sind autonome Fahrzeuge ohne genaue Lagebestimmung durch Trägheitssensoren oder Satellitennavigation undenkbar. Ein gutes Beispiel aus der Forschung sind die jüngsten Erkenntnisse in der Gravitationswellenstromie (Seite 64), die ohne die hochempfindlichen [Gravitationswelleninterferometer](#) nicht denkbar gewesen wären. Doch können Messungen immer genauer werden oder ist irgendwo Schluss? Und wie klein lassen sich Quantensensoren realisieren?

Gequetschtes Licht und gekühlte Atome

Optische Interferometer werden für die präzise Vermessung von Längenänderungen eingesetzt. Dabei wird ein Laserstrahl aufgespalten, durchläuft zwei verschiedene Strecken („Arme“) und wird am Ende dieser Strecken jeweils von einem Spiegel reflektiert. Die beiden zurücklaufenden Strahlen werden dann wieder zusammengeführt. Es ergibt sich ein typisches Überlagerungsmuster (Interferenz). Trifft eine Gravitationswelle auf ein solches Interferometer, so verändert sich die Länge eines Arms um den Bruchteil eines Atomkerndurchmessers gegenüber einem senkrecht dazu angebrachten zweiten Arm. Das Licht muss nun minimal unterschiedlich lange Strecken zurücklegen, was sich durch ein Flackern des Interferenzbilds bemerkbar macht. Die Präzision, mit der diese Intensitätsänderungen gemessen werden können, hängt besonders von der Stabilität der Intensität des Lasers ab. Dies ist eine fundamentale Eigenschaft des Quantenzustands des verwendeten Laserlichts. Die Präzision des Interferometers kann nur gesteigert werden, wenn man Lichtfelder benutzt, die bestimmte Quanteneigenschaften haben. Eine Möglichkeit ist es, sogenanntes gequetschtes Licht (Seite 25) zu benutzen. Bei diesem Lichtfeld gibt man etwas von der hohen Phasenstabilität des Laserfelds auf und verbessert damit die Intensitätsstabilität des Lasers. Aktuelle Gravitationswellendetektoren – konkret die Detektoren von LIGO in den USA – wurden schon mit dieser Art von Licht ausgestattet und so verbessert: Ihre Reichweite hat sich somit verdoppelt.

Eine andere Form von Interferometern wird für die Quantensensorik von Gravitationsfeldern benutzt, also in der Geodäsie (Seite 106). Die Vermessung des Gravitationsfeldes der Erde ist von erheblichem Interesse unter anderem für die Geo- und Erdwissenschaften und auch für die Kartografie. Um an einem Ort die Gravitationskraft zu ermitteln, nutzt

man Gravimeter. Klassische Gravimeter vermessen die Fallzeit einer genau definierten Masse und schließen daraus auf die Erdbeschleunigung. Quantengravimeter nutzen für solche Fallexperimente gekühlte Atome, deren physikalisches Verhalten durch die quantenphysikalischen Welleneigenschaften der Atome dominiert werden. Teilt man, ähnlich wie in einem optischen Interferometer, die Atomwolke und lässt sie eine Interferometeranordnung durchlaufen, so kann das Interferenzmuster dazu genutzt werden, die auf die Atome wirkende Gravitationskraft präzise zu vermessen. Die Geräte sind mittlerweile transportabel und werden für die Erdbebenvorhersage und den lokalen Nachweis von Bodenschätzen eingesetzt.

Hochgenaue Magnetfeldmessung

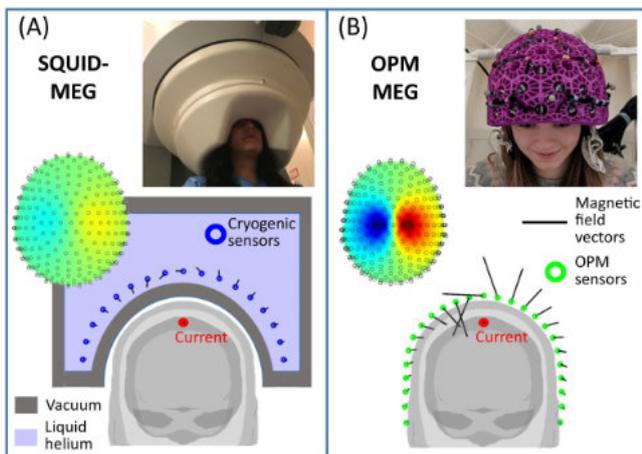
Hochgenaue Messungen von selbst schwachen Magnetfeldern lassen sich mit supraleitenden Quanteninterferometern (Superconducting Quantum Interference Devices, SQUIDs) realisieren. Sie finden schon seit einigen Jahrzehnten Anwendung in der medizinischen Messtechnik. SQUIDs basieren ebenfalls auf einem Interferometerprinzip. Allerdings nutzt man hier kein Licht und auch keine atomaren Materiewellen, sondern Elektronenpaare. In einem Supraleiter schließen sich Elektronen zu sogenannten Cooper-Paaren zusammen. Diese Paare haben völlig andere quantenphysikalische Eigenschaften als einzelne Elektronen und sind viel unempfindlicher gegenüber Störungen, weshalb sie die widerstandsfreie Leitung im Supraleiter ermöglichen.

Ein SQUID besteht aus zwei Supraleitern, die zusammen einen Ring bilden und jeweils durch eine normalleitende Lücke getrennt sind. Die Cooper-Paare können durch diese Lücke hindurchtunneln. Dabei kommt es zu Interferenz, und zwar abhängig vom Magnetfeld. Deshalb liefert die Messung des Tunnelstroms Auf-



schluss über das magnetische Feld. Die Technik ist äußerst empfindlich, erfordert aber, dass die Sensoren in ihren supraleitenden Zustand gebracht werden, d. h. in der Regel auf unter zehn Kelvin abgekühlt werden müssen. SQUIDs werden beispielsweise in der medizinischen Dia-

Kommerziell erhältliche optisch gepumpte Magnetometer (OPMs) sind nicht größer als eine AAA-Batterie.



Vergleich SQUID und OPM bei der Vermessung von Magnetfeldern des Gehirns (MEG: Magnetenzephalografie). Die OPMs können durch ihre geringe Baugröße und Gewicht auf dem Kopf getragen werden, während die SQUID-Apparatur zusätzlich noch Kühlung benötigt.

agnostik zur Visualisierung von neuronalen Magnetfeldern eingesetzt.

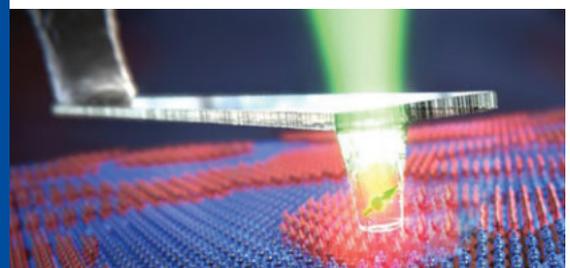
Auch mit atomaren Gasen, z. B. Rubidium, lassen sich Magnetfelder mit vergleichbarer Empfindlichkeit nachweisen – und das, ohne dass eine Kühlung des Gases notwendig ist. Die Quantensensoren weisen äußere Magnetfelder durch deren Wechselwirkung mit den Elektronenspins der Gasatome nach. Diese zeigen, wenn sie in ein Magnetfeld gebracht werden, eine für quantenmechanische Systeme charakteristische Trudelbewegung – ähnlich wie bei einem Kreisel, dessen Achse während der Drehung ausgelenkt wird. Die Frequenz dieser Präzession ist proportional zur Stärke des Magnetfelds und lässt sich mit Laserspektroskopie nachwei-

sen: Indem die Laserphotonen zunächst einen Impuls auf die Atome übertragen, werden die Spins ausgerichtet. Anschließend wird der Laser ein weiteres Mal auf die Atome gerichtet. Diese emittieren daraufhin Licht, dessen Frequenz Aufschluss über die Frequenz der Präzession und damit über das Magnetfeld gibt. Diese sogenannten optisch gepumpten Magnetometer (OPMs) sind seit geraumer Zeit als miniaturisierte Module verfügbar. Aufgrund ihrer kompakten Bauform lassen sie sich z. B. in Helme integrieren, die Proband:innen auf dem Kopf tragen können. Gegenüber den stationären SQUID-Systemen lassen sich so Bewegungsartefakte verringern und die Anwendungsbereiche erheblich erweitern.

Fedor Jelezko und Jörg Wrachtrup

ATOME UND MOLEKÜLE ALS SENSOREN

Benutzt man einzelne Atome als Sensoren, so kann man die Vorteile der Quantensensorik mit hoher räumlicher Auflösung verbinden. In ersten Experimenten kamen einzelne Moleküle als nahezu punktförmige Sensoren für elektromagnetische Felder zum Einsatz. Entscheidenden Schub hat das Feld durch die Verwendung von Farbzentren in Diamanten erfahren. Dabei handelt es sich um atomare Fehlstellen im Kristallgitter, die optisch interessante Eigenschaften haben – zum Beispiel können sie einzelne Photonen emittieren. Mit solchen Farbzentren lassen sich mit hoher Empfindlichkeit magnetische und elektrische Felder sowie Temperatur und Druck mit einer räumlichen Auflösung von wenigen Nanometern nachweisen und abbilden. Das Funktionsprinzip ähnelt dabei den OPMs, nur handelt es sich nicht um Gasatome, sondern um Diamanten oder andere Festkörper, in die gezielt Fehlstellen eingebracht werden. Diese Festkörper lassen sich z. B. an den Spitzen von Rastersondenmikroskopen unterbringen, mit denen Oberflächen abgetastet werden können. Die Entfernung dieser Dotierungen in den Spitzen zur Oberfläche beträgt nur wenige Nanometer und erlaubt es, verschiedene Größen, wie z.B. magnetische und elektrische Felder oder Temperatur mit einer räumlichen Auflösung von besser als zehn Nanometern zu vermessen. Die Technik hat sich besonders für die Vermessung von nanomagnetischen Strukturen bewährt. Durch die Kombination von räumlicher Auflösung, geringer Wechselwirkung zwischen Atom und zu vermessender Probe und der nahezu kalibrationsfreien Vermessung von Magnetfeldern gelingt eine quantitative Vermessung bzw. Abbildung neuartiger magnetischer Materialien.

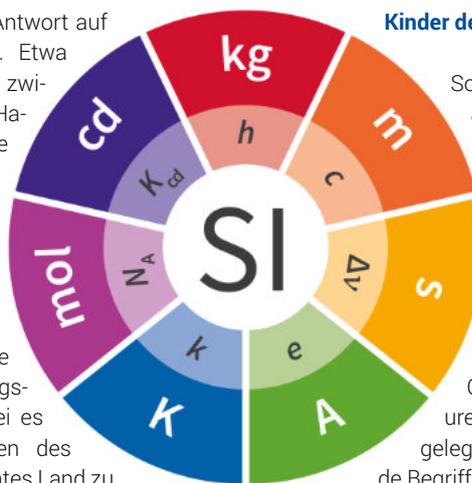


DIE UNIVERSELLE DEFINITION DER PHYSIKALISCHEN EINHEITEN

Seit dem 20. Mai 2019 haben die physikalischen Einheiten das beste Fundament erhalten, das sich denken lässt: An die Stelle wankelmütiger Artefakte und idealisierter Vorschriften sind Naturkonstanten als Grundlage der Einheitsdefinitionen getreten.

„Von hier bis zum Mond“ kann eine Antwort auf ganz unterschiedliche Fragen sein. Etwa wenn in einem Frage-Antwort-Spiel zwischen dem kleinen und dem großen Hasen die Größe der gegenseitigen Liebe benannt werden möchte. Es kann aber auch die Antwort darauf sein, welche Strecke das Licht während einer einzigen Sekunde zurücklegen kann. Zur Physik, die in der Sphäre des Konkreten, des Dinglichen, des objektiv Messbaren spielt, gehört die zweite Antwort. Denn ihr Forschungsgegenstand ist das Messbare, wobei es durchaus statthaft ist, die Grenzen des Messbaren immer weiter in unbekanntes Land zu verschieben.

Ein Beispiel für eine Erweiterung des Messbereichs ist die Messung des Abstands von der Erde zum Mond: Dazu genügt ein starker Laser und eine gute Stoppuhr. Man peile lediglich mit dem Laser einen der Reflektoren an, die eine Apollo-Mission in den 1960er-/1970er-Jahren auf der Mondoberfläche hinterlassen hat, warte auf ein paar Photonen des reflektierten Lichts und stoppe die Zeit für diesen Weg hin und zurück. Die Stoppuhr wird jetzt etwas mehr als zwei Sekunden anzeigen. Da das Licht die vorteilhafte Eigenschaft hat, immer mit derselben Geschwindigkeit unterwegs zu sein (wenn wir nicht mittendrin das Medium ändern), lässt sich der Abstand Erde-Mond exakt berechnen.



Kinder der französischen Revolution

Solche Abstandsmessungen setzen voraus, dass wir uns einig sind, was unter der Länge **Meter** zu verstehen ist. Und hier kommt, seit der Meterdefinition aus den 1980er-Jahren, die **Lichtgeschwindigkeit** ins Spiel. Deren Wert wurde von der Weltgemeinschaft der Metrologie auf einer der alle vier Jahre stattfindenden Generalkonferenzen für Maße und Gewichte (CGPM, Conférence Générale des Poids et Mesures) auf exakt $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ festgelegt. Und „festgelegt“ ist hier der zutreffende Begriff, da die Natur selbst keine mit Einheiten

behafteten eindeutigen Zahlenwerte kennt. Diese Zahlenwerte sind menschengemacht und eine Folge dessen, wie wir unser Einheitensystem gebaut haben. Um eine Geschwindigkeit ausdrücken zu können, müssen also zuvor die Zeiteinheit **Sekunde** und die Längeneinheit Meter vorgegeben sein. Beides nimmt recht willkürlich Bezug auf die Gegebenheiten unseres Planeten: Eine Rotation unserer Erde um die eigene Achse soll, so die Übereinkunft, 24 Stunden dauern, die Stunde 60 Minuten und die Minute 60 Sekunden. Mithin ist die Sekunde der 86 400ste Teil der Tageslänge. Und auch der Meter ist der Erde abgerungen. Ende des 18. Jahrhunderts, im revolutionären Frankreich, sollten mit den Herrschenden auch die „herrschaftlichen Maße“ (Füße, Ellen usw.) abgeschafft werden. Stattdessen war eine Längeneinheit gefragt, der prinzipiell alle Menschen zustimmen konnten. So zogen denn zwei Astronomen los, den Umfang der Erde zu bestimmen. Nach mehreren Jahren geodätischer Vermessung der Strecke Barcelona-Dünkirchen, eines Abschnitts des durch Paris verlaufenden Längengrads, präsentierten die Revolutionäre der Menschheit ein neues, zustimmungsfähiges Längenmaß, nämlich den vierzigmillionsten Teil des Umfangs der (als Kugel gedachten) Erde als die neue Einheit **Meter**.

DIE METERKONVENTION

Die Idee, überall auf dem Globus mit einheitlichen Maßen zu messen, geht auf das Jahr 1875 zurück – die Geburtsstunde der Meterkonvention. 150 Jahre später sind über hundert Staaten mittlerweile Mitglieder oder assoziierte Staaten dieses großen Projekts, für eine einheitliche Sprache in der Welt des Messens zu sorgen. Auf den alle vier Jahre stattfindenden Generalkonferenzen für Maße und Gewichte (CGPM, Conférence Générale des Poids et Mesures) werden die Leitlinien hierzu festgelegt und, falls nötig, grundlegende Änderungen im Einheitensystem verabschiedet. So zu erleben in Versailles im November 2018, als die Delegierten aller Staaten einmütig mit „Ja“ auf die Frage antworteten, ob in Zukunft Naturkonstanten die Einheiten definieren sollen.



Der daraus resultierende Ur-Meter, als in einen Platin-Iridium-Stab gegossene Längeneinheit, trat dann seinen Siegeszug um die Welt an. Im Jahr 1875 verabredeten die ersten 17 Staaten (darunter das damalige Deutsche Reich), von nun an mit denselben Maßen zu messen. Sie unterzeichneten, quasi als Pioniere, die sogenannte Meterkonvention, die zunächst die Einrichtung und die Finanzierung des Büros für Maße und Gewichte in Paris regelte. Bis 2024 sind 64 Staaten der Meterkonvention beigetreten, weitere 37 sind assoziiert.

Problematische Verkörperungen

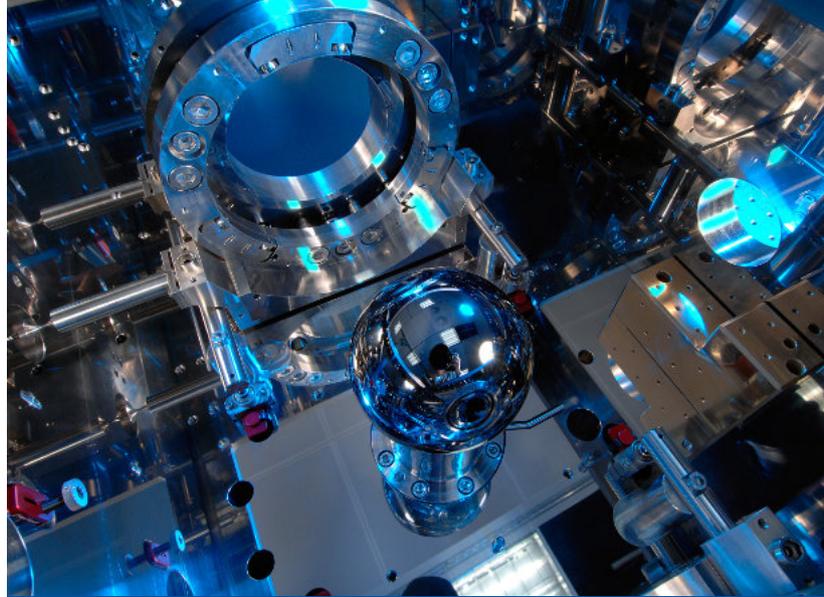
So schön und wertvoll und anschaulich ein verkörpertes Maß wie der Ur-Meter auch ist, hat er, bei genauem Hinsehen, doch eine Reihe von Problemen. Schon die Temperatur verändert seine Länge; die Gravitation zerrt, je nachdem, wie er festgehalten wird, an seiner Form; die Verwendung im Labor hinterlässt Gebrauchsspuren. Schließlich: Nur ein Objekt allein, auf das sich alles bezieht, genügt nicht. Es müssen möglichst identische Kopien hergestellt und verteilt werden. Und: Längenmaßstäbe werden nicht nur in der Größenordnung Meter gebraucht, sondern überall auf der Längenskala zwischen Mikro- und Makrokosmos. Ein Nano- oder Femtometer lässt sich ebenso wenig mit einem Ur-Meter ausmessen wie ein Kilometer oder gar astronomische Distanzen.

Überwinden lassen sich diese Probleme nur, wenn man die Verkörperung des Maßes aufgibt und an dessen Stelle etwas tritt, das per se unveränderlich und auf der ganzen Skala der Einheit gültig ist: Naturkonstanten, also unveränderliche Merkmale der Natur.

So wurde bereits im Jahr 1967 die sehr irdisch geprägte Sekundendefinition durch die Zeitmessung über Atomuhren ersetzt. Die Sekunde bezieht sich seitdem auf eine definierte Zahl von Schwingungen in der Elektronenhülle des Cäsiumatoms, den sogenannten Uhrenübergang. Eine der CGPM-Konferenzen für Maße und Gewichte legte die Frequenz dieses Uhrenübergangs auf $\Delta\nu = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$ fest. Der reine Zahlenwert selbst ist, ebenso wie bei der Lichtgeschwindigkeit, nicht naturgegeben, sondern spiegelt vielmehr die historische Definition der jeweiligen Einheit wider.

Während also die Sekunde und der Meter schon seit den 1960er- und 1980er-Jahren diesen erstrebenswerten Zustand der Anbindung an Naturkonstanten erreicht hatten, erforderte es die gesamte Messkunst der Metrologie, um auch die anderen (Basis-)Einheiten auf solch fundamentale Füße zu stellen. Welche Naturkonstanten dafür infrage kamen, lag teilweise auf der Hand: Für die elektrische Stromstärke als bewegte Ladung pro Zeit, gemessen in Ampere, gab es die Elementarladung e ; für die thermodynamische Temperatur, gemessen in Kelvin, bot sich die Boltzmann-Konstante k_B an; und für die Stoffmenge, gemessen in Mol, die Avogadro-Konstante N_A . Beim Kilogramm, der Einheit der Masse, gab es jedoch längere Diskussionen in der metrologischen Gemeinschaft. Während manche Expert:innen eine massereiche Naturkonstante, etwa die Masse des Elektrons, bevorzugten, argumentierten andere für die Planck-Konstante h , die schon bei allen Realisierungen der elektrischen Größen eine entscheidende Rolle gespielt hatte.

Für eine neue Kilogrammdefinition einigten sich die Wissenschaftler:innen schließlich auf die Planck-Konstante. Diese musste nun so gut wie nur irgend möglich gemessen werden, um einen möglichst nahtlosen Übergang von der alten zur neuen Masseinheit zu schaffen. Ein neues, auf der Basis von h definiertes Kilogramm sollte also die Masse des alten Ur-Kilogramms möglichst exakt reproduzieren. Zwei prinzipiell unterschiedliche Experimente sollten dem Kilogramm ein



GENAU EIN KILOGRAMM ATOME

Am meisten Sorgen im alten Einheitensystem bereitete das Kilogramm, das in einem wörtlichen Sinne in die Jahre gekommen war: Es beruhte auf der Masse eines Metallzylinders aus dem 19. Jahrhundert, der in einem Tresor im Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM) in der Nähe von Paris lag. Jedes Kilogrammstück auf der Welt bezog sich auf dieses Ur-Kilogramm. Und nicht nur das: Viele andere Einheiten, wie das Mol (für die Stoffmenge) oder das Ampere (für die Stromstärke), waren von ihm abhängig. Hatte das Kilogramm ein Problem, hatten es die anderen Einheiten automatisch auch. Und das Kilogramm hatte „Gewichtsprobleme“, was sich bei den Vergleichen mit den vielen nationalen Kopien zeigte. Seine Masse veränderte sich in der Größenordnung von Mikrogramm pro Jahr – metrologisch eine Katastrophe!

Ein Lösungsweg bot das Avogadro-Experiment. Die Idee: Man nehme Atome eines ausgewählten Isotops (Silizium-28), züchte einen perfekten Einkristall und forme daraus eine nahezu ideale Kugel. Anschließend nehme man alle nötigen Messungen vor, um die Abweichungen von diesen idealen Bedingungen festzustellen. Nach vielen forschungsintensiven Jahren und technologischen Fortschritten konnte die Zahl der Atome in einem solchen Einkristall aus Silizium-28 mit einer Genauigkeit von etwa 10^{-8} bestimmt werden. Gleich zwei der gesuchten Naturkonstanten waren das Ergebnis: die Avogadro-Konstante für die Definition der Einheit Mol ($N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$), sowie die Planck-Konstante für die des Kilogramms. Letztere wurde nach Abgleich mit den Wattwaagen-Ergebnissen festgelegt auf $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s}$.

zukünftig stabiles Dasein verschaffen: Bei der Wattwaage kompensiert eine elektromagnetische Kraft die Schwerkraft, die auf ein Massestück wirkt. Hierbei werden mehrere elektrische Quanteneffekte ausgenutzt, was dazu führt, dass dieses Experiment direkt einen Wert der Planck-Konstante h mitliefert. Die Protagonist:innen dieses Experiments arbeiteten in Kanada, in den USA und in England. Das dazu alternative und von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt favorisierte Avogadro-Experiment konnte in einem nahezu perfekten Einkristall, einer Siliziumkugel, die Zahl der Atome bestimmen und auch daraus den Wert der Planck-Konstante h ableiten. Die Ergebnisse aus beiden Experimenten waren un-

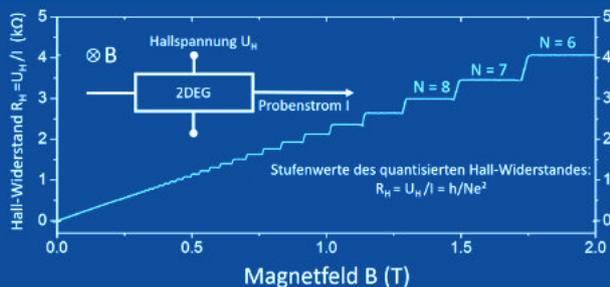
DER QUANTEN-HALL-EFFEKT

Edwin Hall beobachtete 1879, dass bei einem elektrischen Leiter im Magnetfeld eine Spannung auftritt, die proportional mit der Stärke des Stromes und des Magnetfeldes ansteigt. Mit diesem Hall-Effekt lässt sich beispielsweise die Konzentration von elektrischen Ladungsträgern bestimmen. Das ist besonders bei Halbleitern wichtig, bei denen die Ladungsträgerkonzentration und somit die Funktionsweise von Bauelementen durch Dotierstoffe verändert werden kann.

Grundlagenforschung an dem wichtigsten Bauelement der Mikroelektronik, dem Silizium-Feldeffekttransistor, führte 1980 zur Entdeckung des Quanten-Hall-Effekts. Anders als beim klassischen Hall-Effekt steigt hier die Hall-Spannung mit der Stärke des Magnetfeldes nicht geradlinig an, sondern zeigt Stufen. Der Widerstand dieser Stufen (die gemessene Hall-Spannung geteilt durch den Probenstrom) hängt neben der Quantenzahl N nur von den Fundamentalkonstanten h (Planck-Konstante) und e (Elementarladung) ab. Voraussetzung für die Beobachtung dieses Quantenphänomens ist das Zusammenspiel von zwei Quanteneffekten. Dafür muss der elektrische Leiter so dünn sein, dass sich die Elektronen nur in einer Ebene frei bewegen können. Das ist bei Feldeffekttransistoren, bei denen der Stromfluss in einer dünnen Oberflächenschicht geschieht, erfüllt. Zusätzlich muss senkrecht zu diesem Elektronensystem ein so starkes Magnetfeld angelegt werden, dass die Elektronen geschlossene Kreisbahnen durchlaufen. Durch diese zwei Quanteneffekte wird die ursprünglich freie Bewegung von Elektronen unterbunden und nur noch ganz bestimmte Elektronenenergien sind erlaubt, was zu den Quantensprüngen im Hall-Widerstand führt. Die quantisierten Widerstandswerte werden weder durch Verunreinigungen im Festkörper noch durch die für die Messung notwendigen elektrischen Kontakte beeinflusst, sodass sich der quantisierte Hall-Widerstand überall in der Welt mit einer Genauigkeit von mindestens zehn Ziffern reproduzieren lässt.

Da die Werte für e und h im internationalen Einheitensystem exakt definiert sind, hat auch die Von-Klitzing-Konstante h/e^2 einen international festgelegten Wert. Der Quanten-Hall-Effekt lässt sich also überall im Universum zur Eichung elektrischer Widerstände nutzen.

Klaus von Klitzing



Messergebnis für den Hall-Widerstand eines zweidimensionalen Elektronengases (2DEG). Die Stufenwerte sind mit einer experimentellen Genauigkeit von zehn Dezimalstellen unabhängig von Materialeigenschaften des 2DEG.

tereinander konsistent – und damit der Weg zu einem neuen Kilogramm offen.

Das Einheitensystem als universelle Sprache

Die meisten Menschen werden in ihrem Alltag nichts von der Revolution im Internationalen Einheitensystem (SI, *Système International d'unités*) bemerkt haben. Wäre es anders, hätte die metrologische Forschung auch schlecht gearbeitet. Für die Wissenschaft sind die Neudefinitionen ein enormer Fortschritt, da das Einheitensystem nunmehr eine universelle Sprache darstellt, die sich prinzipiell zu jeder Zeit und an jedem Ort im gesamten Universum verstehen lässt. Diese Idee, die Max Planck schon um 1900 mit seinen „natürlichen Einheiten“ hatte, konnte über ein Jahrhundert später praktische Realität werden. Und das neue SI besitzt nun eine sehr stringente innere Logik. So entfällt im neuen SI die Unterscheidung zwischen Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten. Vielmehr sind alle Einheiten jetzt aus Naturkonstanten „abgeleitet“ und in diesem Sinne gleichwertig.

Während sich in der Wissenschaft die Neudefinitionen sofort auswirken, wird die Technik eher eine positive Langzeitwirkung spüren. Denn ein Clou am neuen Einheitensystem ist, dass in ihm keinerlei technische Barrieren mehr eingebaut sind. Schwankte etwa im alten System die Masse des Ur-Kilogramms in einer gewissen Größenordnung, so war die beste erreichbare Genauigkeit einer Wägung eben durch diese Schwankungsbreite begrenzt. Im neuen SI dagegen gibt es keine Schwankungen mehr, da die Naturkonstanten verbindlich festgelegte Werte bekommen haben. So ist die Kilogramm-Definition jetzt unabhängig von möglichen Veränderungen von Vergleichskörpern. Alle elektrischen Einheiten inklusive des Ampere sind als Quantenrealisierungen (über den Josephson- und den Quanten-Hall-Effekt oder durch Zählen von Elektronen pro Zeit) Teil des Systems. Und nicht zuletzt ist das Mol nun auch definitorisch über eine festgelegte Anzahl von Teilchen (die Avogadro-Konstante) einer spezifizierten Substanz erfasst. Daher gilt im neuen SI: Kann genauer gemessen werden, können auch die Einheiten genauer realisiert werden – ohne erneute Änderung der zugrundeliegenden Definition. In einer hochtechnischen Welt, in der weder die Längenteilungen beim Nanometer aufhören werden noch die Zeiteilungen bei Femtosekunden, ist diese technische Offenheit des neuen Einheitensystems gegenüber allen zukünftigen Genauigkeitsfortschritten ein großer Gewinn. Und diese Offenheit gilt auf der gesamten Skala der jeweiligen Einheit, da die Naturkonstanten keinen speziellen Skalenabschnitt hervorheben.

Das auf Naturkonstanten basierende Einheitensystem ist ein Meilenstein der Wissenschafts- und Kulturgeschichte. Die technologischen Früchte, die daraus erwachsen, werden wir in den kommenden Jahren und Jahrzehnten ernten. Die Fragen des kleinen und des großen Hasen bleiben davon natürlich unberührt.

Jens Simon und Joachim Ullrich

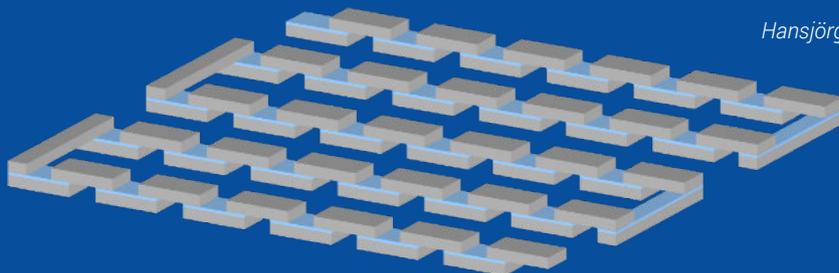
IMMER DIE GLEICHE SPANNUNG?

Ein Volt ist ein Volt ist ein Volt? In der Theorie vielleicht, aber in der Praxis ist die Einheit der Spannung stark davon abhängig, mit welchen technischen Mitteln man sie realisiert. Sehr genau lässt sich das Volt mithilfe eines Quanteneffekts bestimmen, den Brian D. Josephson 1962 entdeckte. Die nach ihm benannten Josephson-Spannungsnormale gehören zusammen mit Quanten-Hall-Widerstandsnormale zu den „Goldstandards“ der elektrischen Quantenmetrologie, also demjenigen Bereich der modernen Messtechnik, der Vergleichswerte und Messapparaturen auf universell gültige Quantenphänomene abstützt.

Josephson-Spannungsnormale basieren auf elektrischen Schaltungen, die aus Josephson-Kontakten aufgebaut sind. Ein Josephson-Kontakt wiederum besteht aus zwei supraleitenden metallischen Elektroden, die durch eine sehr dünne normalleitende (also nicht supraleitende) oder isolierende Barriere getrennt sind. Der Übergang von Ladungsträgern zwischen den beiden Elektroden ist damit durch quantenmechanisches „Tunneln“ von Cooper-Paaren (Elektronenpaare in Supraleitern) möglich. Bestrahlt man diesen Kontakt mit einer Mikrowelle, so treten zwischen den Elektroden konstante und genau definierte elektrische Spannungen auf (Josephson-Effekt). Diese quantisierten Spannungswerte sind proportional zur Frequenz der eingestrahlichten Mikrowellenfrequenz sowie zum Quotienten aus der Planck-Konstante h und der Elementarladung e .

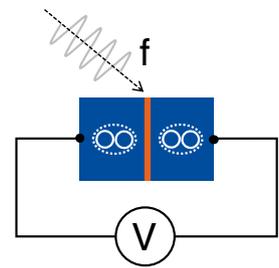
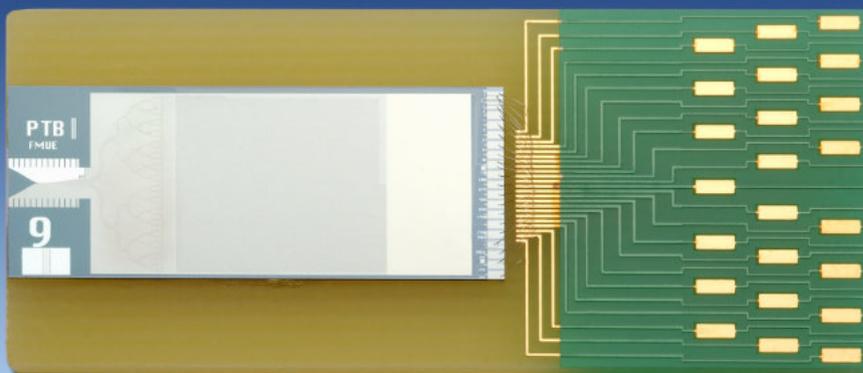
Da die Werte für e und h im internationalen Einheitensystem exakt definiert sind und die Mikrowellenfrequenz sich mit sehr hoher Genauigkeit bestimmen lässt, können Josephson-Kontakte als ideale Frequenz-zu-Spannungs-Wandler genutzt werden. Seit 1990 sind sie die weltweit verbindliche Grundlage für die Reproduktion und Realisierung der elektrischen Spannungseinheit „Volt“ mit höchster Genauigkeit und Präzision.

In der Praxis genutzte Mikrowellenfrequenzen liegen im Bereich einiger zehn Gigahertz, weshalb ein einzelner Josephson-Kontakt eine elektrische Spannung unterhalb eines Millivolts erzeugt. Zur Darstellung von Spannungen von einem Volt oder mehr benötigt man Serienschaltungen aus mehreren Tausenden bis zu Hunderttausenden Josephson-Kontakten. Durch Fortschritte bei der Herstellung hochintegrierter Serienschaltungen aus Josephson-Kontakten lassen sich Josephson-Spannungsnormale vor allem für die immer stärker zunehmenden Wechselstromanwendungen nutzen.



Hansjörg Scherer

Prinzip der Serienschaltung vieler Josephson-Kontakte in mäanderförmiger Anordnung.



Schema eines Josephson-Kontakts mit Tunnelbarriere (orange) zwischen zwei supraleitenden Elektroden. Die Cooper-Paare aus je zwei im Supraleiter gekoppelten Elektronen sind in den gestrichelten Ovalen dargestellt. Beim Einstrahlen einer Mikrowelle mit der Frequenz f bildet sich eine quantisierte Spannung zwischen den beiden Elektroden aus.

Spannungsnormale aus der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) mit rund 70 000 in Reihe geschalteten Tunnелеlementen, die zusammen 10 Volt erzeugen.

DIAGNOSE UND THERAPIE

Erste Röntgenbestrahlung
von Krebs durch Victor
Despeignes



Entdeckung der
Röntgenstrahlen
durch Wilhelm
Konrad Röntgen
(Nobelpreis 1901)

1895

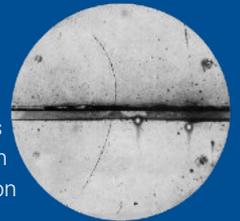
1896

Entdeckung der
Radioaktivität
durch Henri
Becquerel, Marie
und Pierre Curie
(Nobelpreis 1903)



1932

Entdeckung des
Positrons als erstes
Antimaterieteilchen
durch Carl Anderson
(Nobelpreis 1936)



1954

Erste Bestrahlung mit Protonen mit einem
für die physikalische Forschung gebauten
Teilchenbeschleuniger in Berkeley

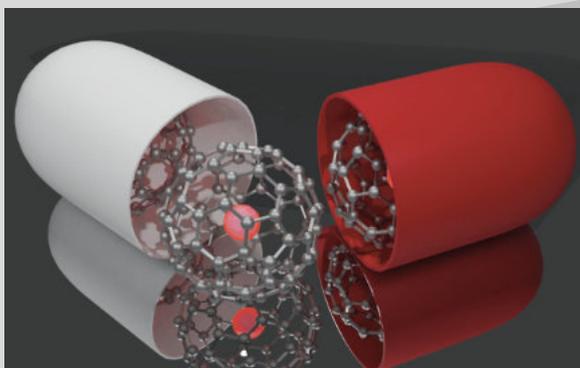
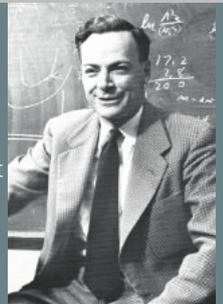
ab 1957

Entwicklung der
Computertomographie durch
Allan M. Cormack und Godfrey
Hounsfield (Nobelpreis 1976)



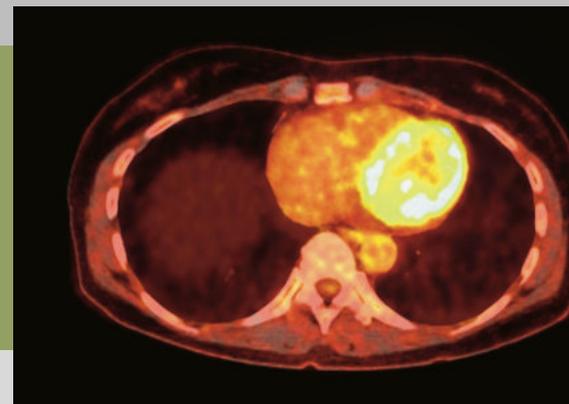
1959

Rede Richard
Feynmans markiert
den Beginn der
Forschung zur
Nanotechnologie



1995

Erstes zugelassenes
nanoskaliges Arzneimittel



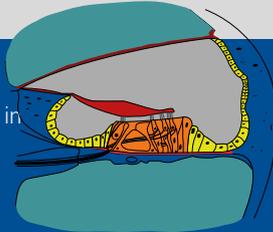
Viele der heute im medizinischen Alltag verwendeten Diagnose- und Therapiemethoden beruhen auf physikalischen Effekten, von denen die meisten erst in den letzten 130 Jahren entdeckt, verstanden und beherrscht wurden. So war es vor der Entdeckung der Röntgenstrahlung unmöglich, ohne Operation in das Innere von Menschen zu schauen. Heute ermöglichen es Röntgenaufnahmen, Bilder nicht nur von Knochen oder Zähnen schnell und mit geringer Strahlenexposition in hoher Qualität zu erstellen. Ebenso sind Bilduntersuchungen an inneren Organen mit Ultraschall oder der Magnetresonanz keine seltenen Ausnahmen mehr. Aber auch im Bereich der Therapie kann die Physik punkten: etwa durch Tumorbestrahlung, Nanomedizin oder Hörgeräte und Cochlea-Implantate. Die Fortschritte sind beachtlich und haben einen wichtigen Anteil daran, dass Lebensqualität und Lebenserwartung auf hohem Niveau liegen.

Beginn der Nuklearmedizin mit ersten Anwendungen radioaktiver Substanzen

1936

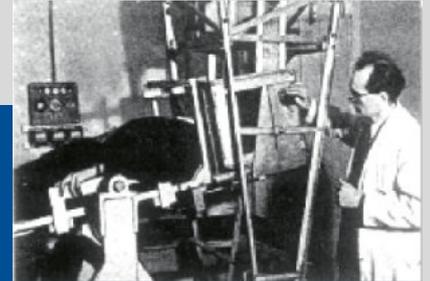
Erforschung der Schallverarbeitung in der Cochlea durch Georg von Bekesy (Nobelpreis 1961)

1940er

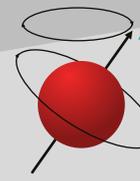


1942

Erste diagnostische Anwendung von Ultraschall am menschlichen Schädel durch die Gebrüder Dussik



1946

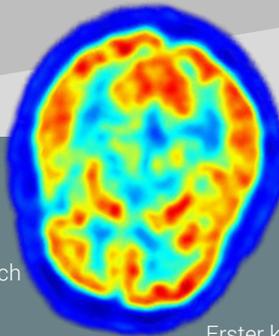


Entdeckung der magnetischen Kernspinresonanz durch Felix Bloch und Edward Purcell (Nobelpreis 1952)



1973

Erstes MRT-Bild durch Paul C. Lauterbur (Nobelpreis 2003)

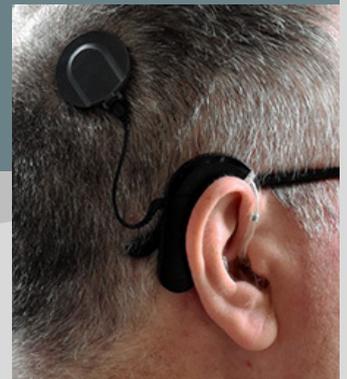


1978

Entwicklung des ersten mehrkanaligen Cochlea-Implantats durch NASA Ingenieur Adam Kissiah

1976

Erster klinischer tomographischer PET-Scanner in Los Angeles



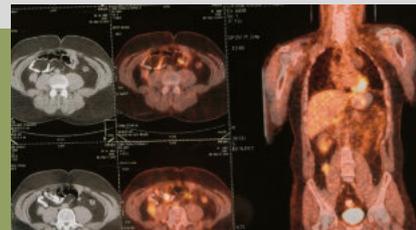
Entwicklung hybrider Bildgebung aus PET und CT durch David Townsend

2001



Erste ultra-hochdosierte Pulsbestrahlung (FLASH) eines Krebspatienten

2018



2019

Beginn des klinischen Total-Body PET-Scannings mit großem axialen Sichtfeld

IN SCHEIBEN GESCHNITTEN



Die Computertomografie hat die medizinische Bildgebung revolutioniert, indem sie erstmals detaillierte Schnittbilder vom Inneren des menschlichen Körpers erzeugt. Das hat nicht nur die Diagnose und Behandlung von Krankheiten verändert, sondern auch die weitere medizinische Forschung und Technologieentwicklung beeinflusst.

Im Grunde wurde die **Computertomografie (CT)** dreimal erfunden: Bereits 1917 entwickelte der österreichische Mathematiker Johan Radon mit der nach ihm benannten Transformation die mathematischen Grundlagen zur Berechnung von Schnittbildern aus Projektionsdaten.

In den 1960er-Jahren veröffentlichte der südafrikanische Physiker Allan M. Cormak zwei grundlegende Arbeiten zum Prinzip der Computertomografie. Da ihm Radons Veröffentlichung nicht bekannt war, entwickelte er dabei auch unabhängige Methoden zur Bildberechnung. Diese Arbeiten blieben weitgehend unbeachtet. Erst der dritte Anlauf führte in den frühen 1970er-Jahren zum Durchbruch: Der britische Ingenieur Sir Godfrey Hounsfield entwickelte den ersten funktionsfähigen CT-Scanner, den EMI Mark I. Auch Hounsfield kannte weder die Arbeiten von Radon noch die von Cormak und entwickelte deshalb eigene Methoden zur Bildberechnung.

Der EMI Mark I, der 1972 in Betrieb genommen wurde, erzeugte erstmals **Querschnittsbilder** des menschlichen Kopfes. Der Tomograf arbeitete auf Basis von **Röntgenstrahlen**, die den Körper aus verschiedenen Richtungen durchstrahlten und von Detektoren auf der gegenüberliegenden Seite aufgezeichnet wurden. Der Computer berechnete aus diesen multiplen Projektionsdaten detaillierte Schnittbilder. Die Erfindung war eine Sensation: Bereits 1979, also sieben Jahre nach dem ersten klinischen CT-Scan, erhielten Cormak und Hounsfield den Nobelpreis für Medizin.

Kontinuierliche Verbesserungen

Während der EMI Mark I noch fünf Minuten für zwei Schichten benötigte, kamen bereits 1975 Geräte auf den Markt, die dies in ca. 20 Sekunden schafften. Damit war auch der

Sprung vom reinen Kopf-CT zum Ganzkörper-CT erfolgt. Fortschritte in der Computertechnologie und Bildverarbeitung in den 1980er- und 1990er-Jahren verkürzten die Scanzeiten weiter und ermöglichten eine verbesserte Bildqualität. CT-Scanner wurden zunehmend auch breit in der klinischen Praxis eingesetzt, insbesondere für die Dia-

gnose von neurologischen Erkrankungen, Tumoren und Gefäßanomalien.

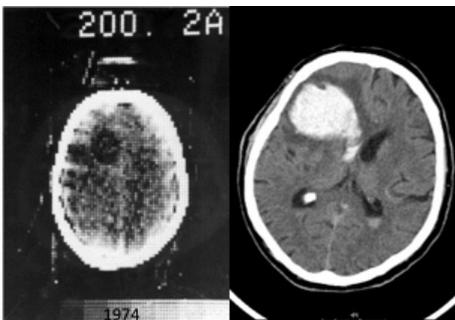
Es gab dabei aber ein Problem: Die beweglichen Komponenten waren über Kabel mit dem unbeweglichen Gehäuse verbunden. Dadurch musste man nach jeder untersuchten Schicht (also nach jeder Rotation) die Mechanik zurückstellen. Dies führte zu relativ langen Untersuchungszeiten und begrenzte die Auflösung entlang der Körperachse. Einen Durchbruch brachte die Einführung der Spiral-CT im Jahr 1989 durch den deutschen Physiker Willi A. Kalender. Sie führte zu deutlich schnelleren Untersuchungszeiten und einer verbesserten räumlichen Auflösung entlang der Körperachse. Gleichzeitig erweiterte der verstärkte Einsatz von **Kontrastmitteln** die diagnostische Aussagekraft der CT erheblich. Diese in der Regel auf Jod basierenden Kontrastmittel verteilen sich im Blut und schwächen dort die Röntgenstrahlung. So lassen sich größere Blutgefäße, aber auch verändert durchblutete Areale (wie z. B. nach einem Schlaganfall oder Tumore) im CT-Bild besser sichtbar machen.

In den 1990er-Jahren ermöglichte die Entwicklung von Festkörperdetektoren, mehrere Schichten gleichzeitig aufzunehmen. Diese Mehrschicht-CT (MSCT) führte zu einer weiteren Verbesserung der Bildqualität und kürzeren Untersuchungszeiten. Spätestens damit war der Zeitpunkt erreicht, zu dem die CT einen großen Teil der radiologischen Untersuchungen darstellte und von vielen als das „Arbeitspferd“ der Radiologie bezeichnet wurde.

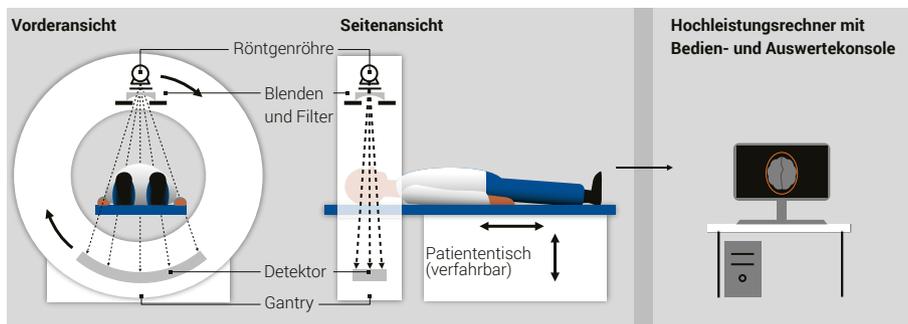
Der Sprung ins 21. Jahrhundert

Mit dem Eintritt ins 21. Jahrhundert erlebte die CT eine weitere Phase von Innovationen. Technologietreiber war dabei lange die Herz-CT. Das Herz stellt mit seiner schnellen Bewegung und seinen kleinen Strukturen, insbesondere der Herzkranzgefäße, hohe Anforderungen an die Bildgebung. Dies führte zu einem dazu, dass immer schneller rotierende CT-Geräte auf den Markt kamen. Zum anderen wurden immer breitere Detektoren entwickelt, um das Herz mit nur einer Rotation abbilden zu können. Die beste zeitliche Auflösung liefern aktuell Dual-Source-Systeme: Dabei werden zwei Röntgenröhren und zwei Detektorsysteme um 90° versetzt in den rotierenden Teil des Computertomografen verbaut.

Die Verwendung zweier Röntgenröhren ermöglichte es auch, eine alte Anwendungs Idee wiederzubeleben. Indem man bei einem Dual-Source-CT die Röntgenröhren bei unterschiedlichen Spannungen betreibt, erzeugt man unterschiedliche



Entwicklung der Bildqualität in der CT: Links eine Kopfaufnahme von 1974, rechts ein 50 Jahre später erzeugtes Bild.



Aufbau und Komponenten eines Computertomografen. Links und in der Mitte ist die schematische Darstellung des eigentlichen Geräts (Gantry und Patiententisch) zu sehen. Die Bedienkonsole (rechts) befindet sich im benachbarten Schalraum. In der CT-Gantry befinden sich die rotierenden Komponenten (Röhre und Detektor). Die kürzesten Rotationszeiten liegen momentan bei 0,25 s.

Röntgenspektren und ermöglicht damit ein sogenanntes Dual-Energy-CT, ohne die Untersuchung doppelt durchführen zu müssen. Da die im CT gemessenen Schwächungseigenschaften von Geweben und Kontrastmitteln abhängig von der verwendeten Röntgenenergie sind, erlaubt diese Technik eine bessere Unterscheidung von Geweben und Materialien, beispielsweise bei der Charakterisierung von Nierensteinen. Alternative Techniken zum Dual-Energy-CT sind das sogenannte Fast-KV-Switching, bei dem die Röhrenspannung in nur wenige Tausendstel Sekunden geändert wird, oder die Verwendung zweier gestapelter Detektoren.

Aktuell konzentriert sich die CT-Entwicklung vor allem auf die Detektoren. So hat die Firma Siemens im Jahr 2021 das erste CT mit Photon-Counting-Detektor herausgebracht, der jedes einzelne Photon zählt und dessen Energie grob bestimmt. Perspektivisch ermöglicht diese Technik zum Beispiel die Verwendung neuer Kontrastmittel. Der klinische Nutzen dieser Technik lässt sich noch nicht abschätzen, das Potenzial dürfte aber hoch sein.

Anwendungen und Herausforderungen

Die Computertomografie ermöglicht die detaillierte Untersuchung von Organen, Geweben und Knochen und spielt eine Schlüsselrolle bei der Diagnose von Schlaganfällen, Hirnverletzungen und Tumoren. CT-Scans werden zur Visualisierung der Herzkranzgefäße und zur Beurteilung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen genutzt. Sie sind unverzichtbar bei der Diagnose von Tumoren und der Planung entsprechender Therapien. Orthopädische Fragestellungen benötigen die detaillierte Darstellung von Knochenstrukturen, Gelenken und der Wirbelsäule.

Auch die Notfallmedizin profitiert von schnellen und präzisen CT-Scans, weshalb man heute in vielen Kliniken CT-Scanner in der Notaufnahme findet.

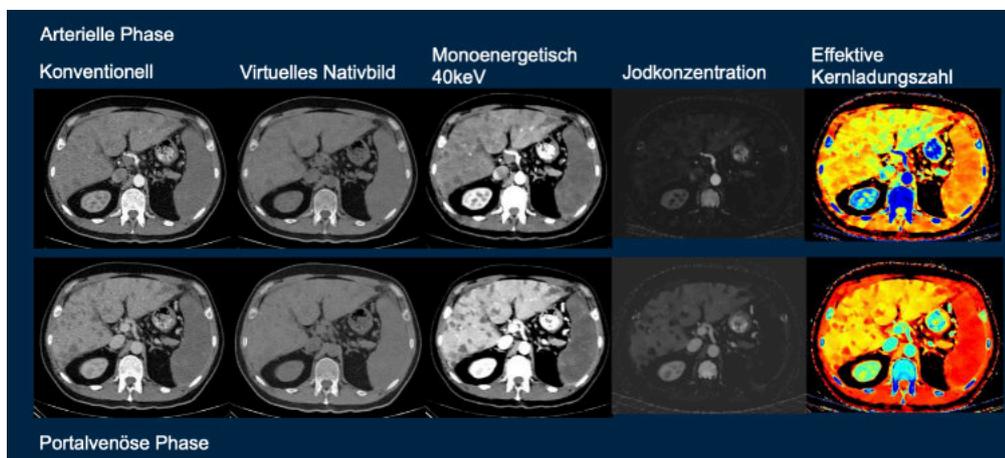
Im Zusammenspiel mit anderen bildgebenden Verfahren in der Nuklearmedizin (Seite 221) werden in Kombinationsgeräten (PET/CT und SPECT/CT) sowohl molekulare Bildgebung als auch anatomische Bildgebung zusammengeführt.

Die aktuelle Forschung zur CT widmet sich unter anderem der Reduzierung der Strahlenexposition bei CT-Untersuchungen. Neue Technologien sollen die Sicherheit für die Patient:innen verbessern – etwa Niedrigdosis-CT-Techniken, adaptive Dosisautomatiken und iterative Rekonstruktionsalgorithmen. Gleichzeitig sollen sie die Bildqualität trotz geringerer Strahlenexposition beibehalten oder sogar noch verbessern. Rekonstruktionsalgorithmen, die auf künstlicher Intelligenz (KI) basieren, werden bereits von einigen Herstellern eingesetzt und zeigen erstaunliche Ergebnisse. Die Integration von Augmented Reality (AR) in die CT-Visualisierung könnte die chirurgische Planung und Durchführung weiter optimieren.

Die CT liefert viele Daten, welche in weitergehenden medizinischen KI-Anwendungen genutzt werden können. Daher ist der Datenschutz bei CT-Daten, wie auch bei allen anderen medizinischen Daten, ein Aspekt, der großer Aufmerksamkeit bedarf.

Bernhard Renger

Mögliche Darstellungen bei der spektralen CT (Dual Energy). Oben ist die arterielle Kontrastmittelpphase dargestellt, unten die spätere portalvenöse Phase. Beim virtuellen Nativbild wird das Kontrastmittel aus dem Bild herausgerechnet. Dadurch kann eine CT-Untersuchung ohne Kontrastmittel eingespart werden. Die monoenergetischen (40 keV) Bilder verstärken das Kontrastmittel, die Bilder der Jodkonzentration stellen das Kontrastmittel dar. Die Bilder der effektiven Kernladungszahl dienen der Gewebecharakterisierung. Alle Bilder einer Reihe können aus einer Untersuchung (eine Strahlenexposition) berechnet werden.



KONTRASTREICHE EINBLICKE

Basierend auf einem quantenphysikalischen Effekt hat die Magnetresonanztomografie die medizinische Bildgebung revolutioniert. Heute ist sie aus der modernen Diagnostik kaum wegzudenken. Durch zahlreiche Innovationen wird die Methode immer genauer und ihre Anwendungen immer breiter.

Die **Magnetresonanztomografie (MRT)** ist eine faszinierende Möglichkeit, dreidimensionale Darstellungen der Struktur und der chemischen Zusammensetzung lebender Organismen und insbesondere des Menschen zu erlangen. Da sie Radiowellen verwendet, kommt sie im Gegensatz zur Röntgentechnik und der Computertomografie ohne ionisierende Strahlung aus. Anders als optische Verfahren ermöglicht sie, hochaufgelöste Bilder auch vom Inneren des Körpers zu erzeugen. Sie lässt sich sowohl beim Menschen als auch an Tieren und sogar an Zellkulturen anwenden. All dies hat die MRT zu einem der wichtigsten Werkzeuge der biomedizinischen Grundlagenforschung wie auch der auf die Übertragbarkeit auf den Menschen ausgerichteten medizinischen Forschung gemacht.

Physikalische Grundprinzipien

Die MRT, auch **Kernspintomografie** genannt, beruht auf dem Phänomen der Kern-Magnetresonanz. Deren Grundlagen wurden bereits in den 1920er-Jahren beschrieben; Felix Bloch und Edward Purcell erhielten 1952 für ihre Arbeiten dazu den Nobelpreis für Physik. Bei diesem Phänomen absorbieren Atomkerne, wenn sie in ein Magnetfeld verbracht werden, Radiowellen einer bestimmten Frequenz und strahlen solche auch wieder ab. Voraussetzung ist, dass die Atomkerne einen Gesamtdrehimpuls um ihren Schwerpunkt, einen Kernspin, haben, der ungleich Null ist. Das führt dazu, dass die Kerne in einem äußeren starken Magnetfeld unterschiedliche Energiezustände einnehmen können (Kern-Zeeman-Effekt).

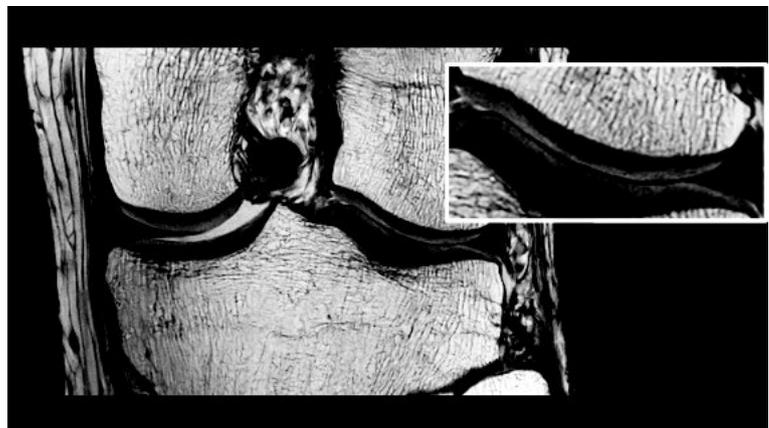
Besonders gut darstellbar in der MRT sind Wasserstoffkerne, da sie in biologischen Geweben in hohen Konzentrationen vorkommen. Die Kernspins von Wasserstoffatomen, sogenannte Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen, richten sich, ähnlich wie Kompassnadeln, parallel und antiparallel zu den Magnetfeldlinien aus, wobei die parallele Ausrichtung energetisch günstiger ist. Dies führt zu einer Nettomagnetisierung des Gewebes in Richtung des Magnetfeldes (z-Richtung). Wird nun Energie in Form von Radiowellen einer bestimmten Frequenz, der sogenannten Larmorfrequenz, eingestrahlt, wird die Nettomagnetisierung ausgelenkt und die

Hochauflösende Kniebildgebung durch Kombination der Aufnahmen eines 7-Tesla-MRT mit Deep-Learning-Rekonstruktionsalgorithmen.

Atomkerne beginnen um die Richtung des statischen Magnetfelds zu kreiseln. Dieser Vorgang induziert in speziell dafür entwickelten Empfangsspulen eine Spannung. Werden die Radiowellen abgeschaltet, kehren die Kerne in ihren Ausgangszustand zurück, wobei sie Energie abstrahlen. Diese Relaxation wird mit den Zeitkonstanten T1 (longitudinale Relaxation, Wiederherstellung der Nettomagnetisierung in z-Richtung) und T2 (transversale Relaxation, Verlust der Phasenkohärenz) beschrieben. Je nach Art des biologischen Gewebes unterscheiden sich die T1- und T2-Relaxationszeiten sowie die Dichte der Wasserstoffkerne. Durch gezielte Wahl der Messparameter können diese Eigenschaften unterschiedlich gewichtet werden, wodurch sich kontrastreiche Bilder anatomischer Strukturen oder krankhafter Veränderungen im Körper erzeugen lassen.

Zu immer höheren magnetischen Feldstärken

Die Stärke der Nettomagnetisierung und damit die theoretische Signalqualität des MR-Signals hängen linear von der Stärke des äußeren Magnetfelds ab. Als sogenannte Hochfeld-MRT standen ab den frühen 2000er-Jahren erstmals kommerziell erhältliche 3-Tesla-(T)-MRT-Systeme für die Anwendung am Menschen zur Verfügung. Diese Magnetfeldstärke entspricht ungefähr dem 60 000-fachen des Erdmagnetfeldes! In der tierexperimentellen Forschung sind inzwischen 7- und 9,4-T-Systeme nahezu Standard und erste 18-T-Geräte beeindruckend mit räumlich ultra-hochaufgelösten Bildern. Auch in der humanmedizinischen Forschung sind inzwischen 7-T-Geräte für die Diagnostik am Menschen zugelassen, und der erste 14-T-MR Scanner für Menschen ist in Planung (DYNAMIC, Radboud University, Nijmegen). Mit solchen Geräten lassen sich z. B. im Kleinhirn des Menschen Strukturen von 400 μm Größe dreidimensional abbilden. Ne-



ben dem Anstieg im MR-Signal profitieren einige MRT-Methoden zusätzlich von hohen Magnetfeldstärken – etwa die Magnetresonanzspektroskopie durch eine höhere spektrale Auflösung. Auch spezielle funktionelle Bildgebungsvarianten, die den Blutsauerstoffgehalt oder die Magnetisierbarkeit ausnutzen, profitieren von hohen magnetischen Feldstärken. Hohe Magnetfelder haben aber auch Nachteile: Sie erfordern höherfrequente Radiowellen, was zum einen deren Eindringtiefe mindert und zum anderen zu einer stärkeren Erwärmung des Gewebes führen kann. Die auf Supraleitung beruhenden Geräte stellen zudem spezielle Anforderungen an die Hardware verbunden mit hohen Anschaffungs- und Betriebskosten, was ihre breitere Anwendung auf reiche Industrieländer beschränkt.

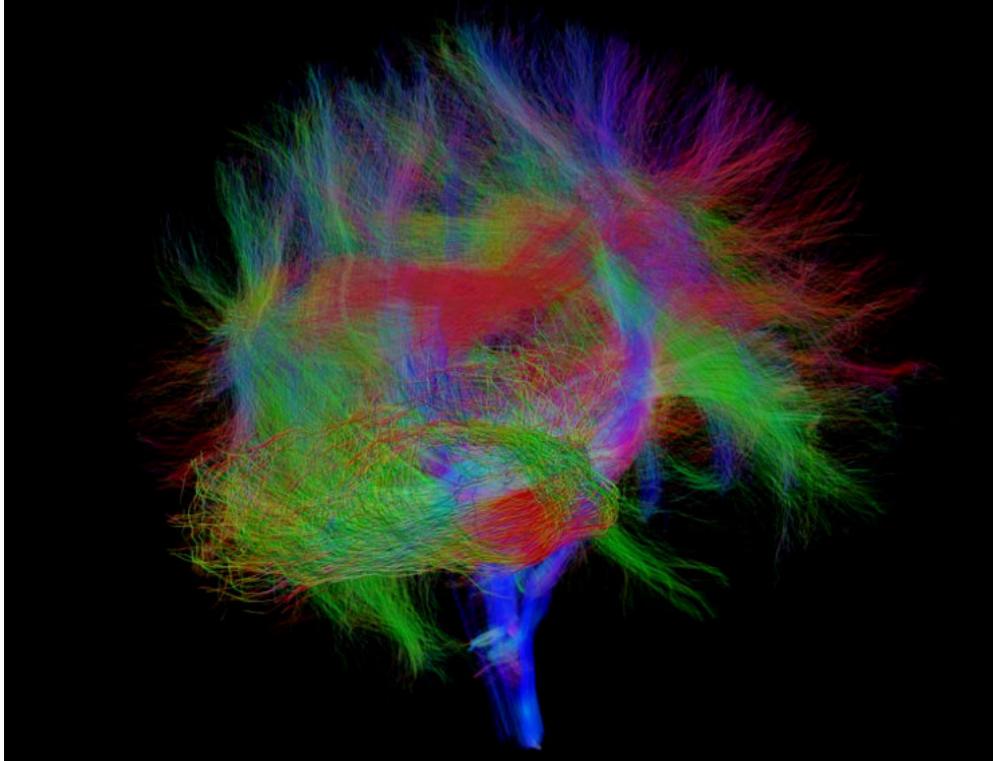
Die Renaissance der Niedrigfeld-MRT

Das Bestreben, die MRT auch in Bereichen mit geringeren finanziellen Möglichkeiten zugänglich zu machen, hat die Niedrigfeld- (< 1 T) und die Ultra-Niedrigfeld-MRT (< 0,5 T) in den vergangenen Jahren wieder mehr in den Fokus der Forschung gerückt. Ihren Erfolg verdankt sie auch zahlreichen beeindruckenden Entwicklungen, die jenseits höherer Feldstärken die räumliche und zeitliche Auflösung verbessern. Dazu gehören auch die für die Ortskodierung so wichtigen Gradientensysteme. Die Kodierung der Ortsinformation erfolgt in der MRT mit zusätzlich geschalteten Magnetfeldgradienten, also Variationen in der Magnetfeldstärke, wodurch das auf die Kerne wirkende Magnetfeld und damit ihre Larmorfrequenz ortsabhängig werden. Dabei lassen sich die Stärke und Richtung während des MRT-Experiments ändern. Je steiler der Gradient der Feldstärke im Raum, desto größer ist die mögliche räumliche Auflösung, und je schneller das Magnetfeld in seiner Stärke verändert werden kann, desto schneller gelingt die Aufnahme der notwendigen Datenpunkte und desto höher ist die zeitliche Auflösung der MRT.

Zahlreiche Innovationen

Ein weiterer Sprung in der Entwicklung der MRT war die Einführung der parallelen Bildgebung. Das Prinzip beruht darauf, dass mehrere Empfangsspulen entlang des Untersuchungsobjekts gleichzeitig das MRT-Signal erfassen. Auch innovative Bildrekonstruktionsverfahren wie das „Compressed Sensing“ haben die MRT beschleunigt. So werden z. B. Aufnahmen vom schlagenden Herzen in Echtzeit möglich.

Eine große Stärke der MRT ist ihre enorme Vielzahl von Kontrastmechanismen, die neben der groben anatomischen Darstellung auch wertvolle Informationen zum Beispiel über die



Traktografie des menschlichen Gehirns. Mit dieser Technik können die Verläufe von Nervenfasern nachgezeichnet werden, ganz ohne chirurgischen Eingriff. So lassen sich sowohl grundlegende Fragestellungen zur Funktionsweise des Gehirns erforschen als auch Operationen planen.

Gewebemikrostruktur, die Funktion von Organen oder deren Stoffwechsel liefern. Ein Beispiel ist die auf dem Sauerstoffgehalt des Bluts basierende funktionelle Bildgebung (fMRT), die die Darstellung der Gehirnaktivität in Echtzeit ermöglicht, und die neurowissenschaftliche Forschung sowie die Diagnose und Behandlung von Hirnerkrankungen revolutioniert hat. Die Diffusions-Bildgebung nutzt dagegen die Brownsche Molekularbewegung der Wassermoleküle, um beispielsweise Krebserkrankungen besser zu charakterisieren und Gewebeschäden frühzeitig zu erkennen, etwa in der Diagnostik von akuten Unterbrechungen in der Blutversorgung des Gehirns. Die Technik erlaubt zudem die nichtinvasive Darstellung von Nervenfaserverläufen, was sowohl für die neurowissenschaftliche Forschung als auch bei der Planung von neurochirurgischen Eingriffen von immenser Bedeutung ist. Durch MRT-Perfusionsbildgebung lässt sich die Durchblutung in verschiedenen Organen messen. Sie spielt z. B. eine wichtige Rolle bei der Diagnose von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schlaganfällen und Tumoren. Generell geht die Entwicklung hin zur Kombination mehrerer Kontraste (auch kombiniert mit grundsätzlich anderen Techniken wie z. B. beim PET-MRT Seite 221), um eine möglichst umfassende und genaue Charakterisierung des Gewebes zu ermöglichen. Außerdem wird untersucht, welchen Nutzen die Verwendung anderer Atomkerne außer Wasserstoff bietet und wie das Signal beispielsweise durch Hyperpolarisation verstärkt werden kann. Die Integration von künstlicher Intelligenz und speziell auch von maschinellem Lernen hat bereits jetzt zu beachtlichen Erfolgen geführt, und dies markiert erst den Anfang einer vielversprechenden Entwicklung.

Susann Boretius

BILDER AUS SCHALL

Die Bildgebung mit Ultraschall – die Sonografie – gehört zu den in der klinischen Routine am häufigsten eingesetzten Bildgebungsverfahren und wird in nahezu allen Fachdisziplinen genutzt.

Der **Ultraschall** findet Anwendung in der Geburtshilfe und Gynäkologie, der Diagnostik von Leber und Niere, des Herzens, der Schilddrüse, der Prostata und Blase sowie der Gefäße. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass nicht etwa ionisierende Strahlung (wie etwa Röntgenstrahlung), sondern ungefährliche akustische Wellen dafür genutzt werden. Hohe Bildraten und die Echtzeitdarstellung ermöglichen, Bewegungen von Organen, wie zum Beispiel dem schlagenden Herzen, direkt zu verfolgen.

Die Ultraschallbilder werden mit dem **Impuls-Echo-Verfahren** erzeugt, das auch bei der Unterwasserortung und der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung zum Einsatz kommt. Die Ultraschallimpulse entstehen durch den piezoelektrischen Effekt: Eine dünne Keramikplatte, deren gegenüberliegende Flächen metallisiert sind, wird mit einem kurzen Spannungsimpuls zu Schwingungen angeregt. Die Platte wirkt dann wie eine Lautsprechermembran – nur hier für Ultraschallfrequenzen im Bereich von einigen MHz – und erzeugt kurze Ultraschallwellenzüge von wenigen Mikrosekunden Länge, die gerichtet in den Körper eindringen. Diese Schallwellenpakete sind kürzer als ein Millimeter, was auch nötig ist, um eine räumliche Auflösung in der gleichen Größe zu erzielen.

Vom Schall zum Bild

Während der Ausbreitung im Körper entstehen durch Reflexion und Streuung an den verschiedenen anatomischen Struk-



3D-Ultraschallaufnahme eines Fötus in der zwölften Schwangerschaftswoche. Er ist etwa fünf Zentimeter lang, also hier praktisch in Originalgröße abgebildet.

turen charakteristische Echos, die zurück zum Piezowandler gelangen. Dort erzeugen diese über den direkten Piezoeffekt ein zeitlich veränderliches, hochfrequentes Spannungssignal, aus dem sich die Laufzeit und Amplitude einzelner Ultraschallechos ermitteln lassen. Aus der Laufzeit einzelner Echos ergibt sich mithilfe der Schallgeschwindigkeit im Ge-

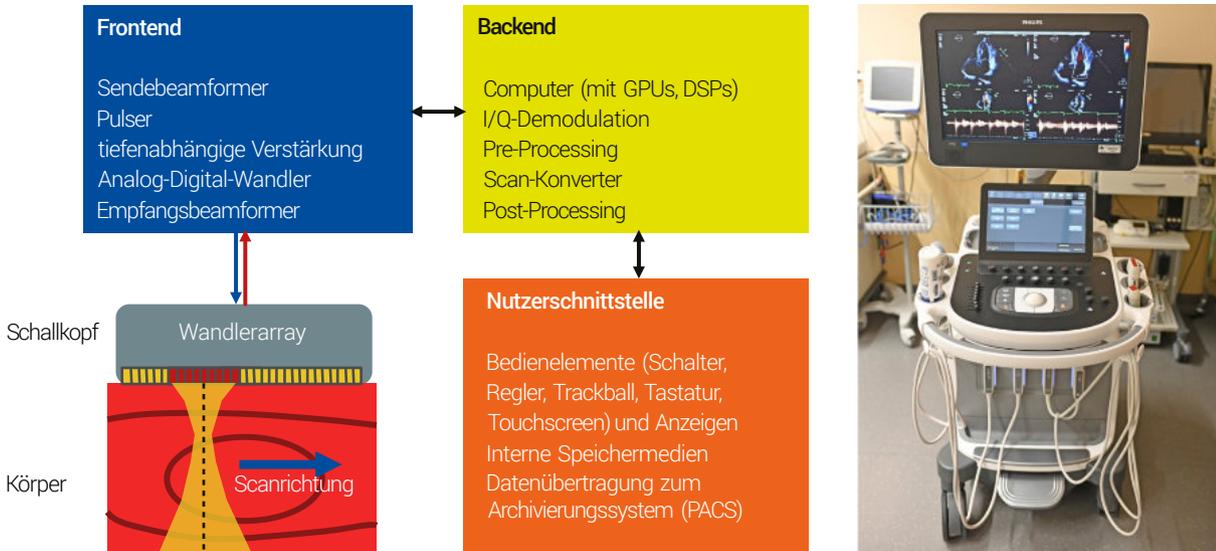
OPTISCHE KOHÄRENZTOMOGRAFIE (OCT)

Die optische Kohärenztomografie hat sich in den vergangenen 20 Jahren in der medizinischen Bildgebung rasch verbreitet und ist heute beinahe in jeder augenärztlichen Praxis zu finden. Das Verfahren arbeitet mit Licht in einem Bereich, der nicht ionisierend wirkt, und erzeugt so nichtinvasiv hochauflösende Querschnitts- und 3D-Bilder von biologischem Gewebe. Dazu wird kurzkohärentes Licht aufgespalten. Der eine Teil trifft auf die Probe, wird dort gestreut und an Strukturübergängen reflektiert und im Anschluss mit dem Referenzstrahl, der nur an einem Spiegel reflektiert wird, überlagert. Die Tiefeninformation erhält man über die Differenz der Laufzeit der beiden Teilstrahlen. Solch kurze Laufzeitunterschiede von Licht lassen sich schwer messen, weshalb man sich das Phänomen der Interferenz zunutze macht. Das Verfahren findet so ganz ähnlich in Gravitationswellendetektoren (siehe Seite 64) seine Anwendung.

Die Methode erlaubt detaillierte Einblicke in die Netzhautstruktur. Darauf basierend wird sie für die Verlaufskontrolle neurodegenerativer Erkrankungen eingesetzt. Es lassen sich beispielsweise Herzwandbewegungen präzise bewerten und Veränderungen der Haut tomografisch darstellen. OCT kann mit weiteren Technologien gekoppelt werden. Angio-OCT erlaubt eine kontrastmittelfreie Echtzeitvisualisierung des Blutflusses auch in kleinen Gefäßen. Die Kombination mit anderen bildgebenden Verfahren erweitert darüber hinaus die Diagnosemöglichkeiten.

Inge Beckers

Baugruppen und Komponenten eines modernen Ultraschall-Bildgebungssystems (links) und ein Gerät, das für seinen Einsatz vorbereitet ist (rechts)

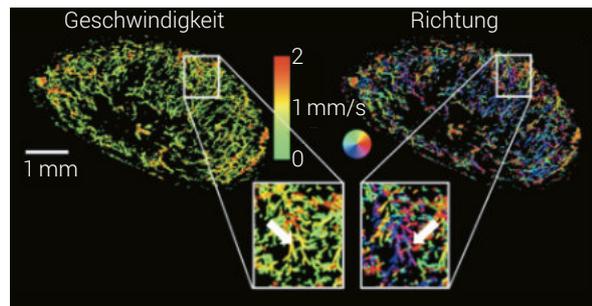


webe (im Mittel 1540 m/s) der Abstand vom Schallwandler bis zu der echogebenden Struktur.

Um ein Bild zu erhalten, werden die Amplituden zunächst in Grauwerte umgerechnet. Auf diese Weise wird aus der Amplitudenlinie (A-Linie) eine Helligkeitslinie (B(rightness)-Line). Durch seitliches Verschieben oder Schwenken der Schallrichtung wird dann eine Vielzahl von B-Linien auf einer Ebene erfasst, d. h. eine Schnittebene innerhalb des Körpers wird abgetastet. Anschließend werden die ermittelten Grauwerte exakt den Pixeln in der Bildmatrix zugeordnet.

Es gibt Schallköpfe mit nebeneinander auf einer Geraden (Linear Array) oder einem Kreisbogen (Curved Array) angeordneten, separat ansteuerbaren einzelnen Piezowandlern. Werden Elementgruppen zeitlich versetzt aktiviert, so können das Abtasten (Scannen) und die Fokussierung sehr schnell und rein elektronisch erfolgen. Je nach gewählter Bildtiefe können über Tausend Scanlinien pro Sekunde erfasst werden. Das dargestellte Schnittbild wird so 20- bis 100-mal pro Sekunde aktualisiert.

Seit den ersten diagnostischen Anwendungen in der 1940er- und 1950er-Jahren wurde die Sonografie kontinuierlich verbessert. Zu den Innovationen zählen unter anderem die farbkodierte Darstellung des Blutflusses und die 3D-Sonografie. Verfahren, die zweidimensionale Arrays von Piezowandlern



Superresolution-Ultraschallbild der mikrovaskulären Gefäßarchitektur eines Plattenepithelkarzinoms. Die Darstellung der Geschwindigkeit (links) und der Fließrichtung (rechts) der Mikrobläschen liefert diagnostisch wertvolle funktionale Informationen.

nutzen – auch in leichten, tragbaren Geräten für den Einsatz direkt am Krankenbett oder in der Notfallmedizin – werden zukünftig zum Standard, genauso wie die Bildgebung mit ebenen Wellen und die Bildgebung mit Hochofflösung.

Klaus Jenderka

RADIOAKTIVE SUBSTANZEN FÜR DIE GESUNDHEIT

Radioaktive Substanzen haben vor allem den Ruf, krankzumachen – was auch oft stimmt. Doch richtig und gezielt eingesetzt helfen sie. So dienen sie in der Nuklearmedizin seit Langem erfolgreich der Diagnostik und Therapie von vielen Krankheiten.

Als erste nuklearmedizinische Therapieform gilt die Behandlung von bestimmten Krankheiten der Schilddrüse mit radioaktivem Jod, wie sie erstmals Ende der 1930er- und Anfang der 1940er-Jahre angewendet wurde. Das Prinzip: Jod wird im Körper im Wesentlichen von Schilddrüsenzellen aufgenommen. Zerfällt es dort, so schädigt die dabei entstehende radioaktive Strahlung die Erbinformation in den Zellen – und beseitigt pathologische Vergrößerungen der Schilddrüse.

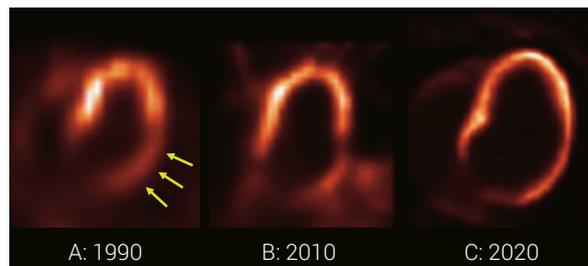
Seit der Verwendung von radioaktivem Jod wurden auch zahlreiche weitere Substanzen bewertet und in den klinischen Alltag integriert. Der Umgang mit offenen Radioisotopen erfordert höchste Aufmerksamkeit im Bereich des Strahlenschutzes für Patient:innen, Mitarbeitende und die Bevölkerung und ist daher entsprechend stark reguliert. Insbesondere waren und sind die Entwicklungen der Nuklearmedizin freilich nie sequentiell, sondern folgen parallelen (und manchmal etwas verschlungenen) Pfaden.

Bildgebung mit Radioisotopen

Um mithilfe von Radioisotopen Bilder zu erzeugen, bekommen Patient:innen Radiopharmazeutika verabreicht. Diese Medikamente sind mit Radioisotopen versetzt, also Atomen, deren Kerne mit einer Halbwertszeit von wenigen Minuten bis Stunden zerfallen. Sie senden dabei Gammastrahlung mit einer Energie zwischen 100 und 400 keV aus. Gewonnen werden die Mutterisotope dieser Substanzen in nuklearen Forschungsreaktoren. In Reaktoren wie dem HFR in Petten in den Niederlanden oder in Zukunft dem FRM II in Garching werden solche Isotope für Diagnostik aber auch therapeutische Isotope produziert.

Das Kiloelektronenvolt (keV) ist eine Energieeinheit, die besonders im Kontext Nuklearphysik, Röntgenphysik und Radioaktivität verwendet wird. Ein Kiloelektronenvolt ist die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es durch eine elektrische Spannung von 1000 Volt beschleunigt wird. Auch die Energie von Strahlungsquanten (Photonen) kann damit beschrieben werden: Sichtbares Licht hat pro Photon eine Energie von einigen Elektronenvolt, bei Röntgenstrahlung sind es zwischen 60 und 140 Kiloelektronenvolt, die Gammastrahlung hat meist mehr als 100 keV Energie.

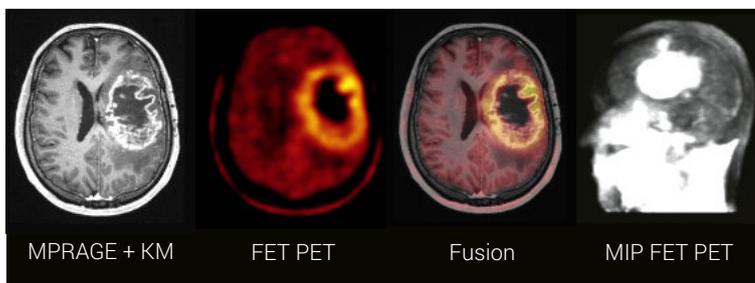
F-18-Ethyltyrosin-(FET)-PET/MR-Untersuchung. Die radioaktiv markierte Aminosäure Tyrosin zeigt mit hoher Spezifität Tumoren und erlaubt die Abgrenzung zu entzündlichen Prozessen mit hoher, isotroper Raumauflösung sowohl bei PET als auch bei MR.

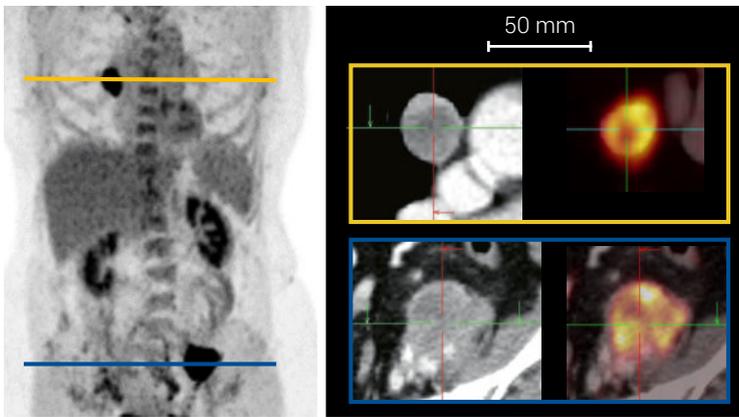


Vergleich nuklearmedizinischer Bildgebungsmethoden: A: Angerkamera (20 Minuten Messzeit), B: digitale SPECT (10 Minuten), C: digitales PET (10 Minuten). Die SPECT-Untersuchungen zeigen die Durchblutung des linken Herzmuskels, während die FDG PET den Glukosestoffwechsel abbildet. Die klinische Fragestellung war hier, ob die Minderdurchblutung (gelbe Pfeile links) im SPECT mit einer Reduktion des Metabolismus einhergeht (macht sie nicht).

Ende der 1950er-Jahre entwickelte der amerikanische Physiker Hal Anger eine Kamera speziell für Gammastrahlung, die sich sehr schnell im Bereich der bildgebenden Diagnostik etablierte. Diese besteht aus einem Einkristall, in dem die Gammaquanten in Licht umgewandelt werden, und einem Kollimator, der im Wesentlichen eine Bleiplatte mit kleinen Bohrungen ist. Es interessieren also nur solche Quanten, die ungehindert durch diese „Löcher“ den Kristall treffen, wodurch sich eine Blickrichtung des Detektors ergibt. Das letzte Element sind Lichtsignalverstärker, sogenannte Photomultiplier. Diese zunächst planare Szintigrafie (vergleichbar mit klassischen Röntgenaufnahmen) wurde mit um den oder die Patient:in rotierenden Kameraköpfen dann zum dreidimensionalen Bild wie bei der Computertomografie, dem **SPECT-Verfahren** (Single-Photon-Emissionscomputertomografie).

Parallel zur planaren Szintigrafie entwickelte sich in den 1980er-Jahren die Positronen-Emissions-Tomografie (PET) insbesondere im Forschungsbereich. Hierbei werden Sub-





Kontrastmittelunterstütztes FDG PET/CT in einer Patientin posttherapeutisch mit zwei Metastasen (Lunge und Lymphknoten). Links ist die Ganzkörperprojektion (MIP) mit der Lage der Schichten, und rechts jeweils die CT und PET/CT Daten dargestellt. Die Speicherung in den Nieren und im Knochenmark ist physiologisch und damit kein Zeichen für Krebs.

stanzen zur radioaktiven Markierung verwendet, die beim Zerfall ein Positron – das Antimaterieteilchen des Elektrons – aussenden. Nach der Emission des Positrons verliert dieses im Gewebe Energie, bis es sich mit einem Elektron gegenseitig vernichtet. Dabei werden zwei Gammaquanten mit einer Energie von jeweils 511 keV frei, die in entgegengesetzter Richtung austreten und sich detektieren lassen. Bei der PET handelt es sich also um eine praktische Anwendung von Antimaterie!

Die Substanzen, welche die Positronen aussenden, werden in Teilchenbeschleunigern – **Zyklotronen** – erzeugt, die sich meist im Keller größerer nuklearmedizinischer Einrichtungen befinden. Die darin hergestellten Nuklide zerfallen aber innerhalb von Minuten bis wenigen Stunden. Damit waren sie zunächst nicht in der gewünschten klinischen Breite einsetzbar, sondern nur dort, wo auch ein Zyklotron sie vor Ort produzieren konnte. Erschwerend kam hinzu, dass die Messtechnik eine andere als bei der SPECT ist: Die beiden Vernichtungsquanten müssen immer beide gleichzeitig gemessen werden, was dazu führt, dass der oder die Patient:in von einer Vielzahl von Detektoren umgeben ist, die permanent auf gleichzeitige Ereignisse untersucht werden müssen. Anfangs waren deswegen nur kleine Bereiche des Körpers untersuchbar, Herz und Hirn waren die primären Anwendungsgebiete.

Kombination verschiedener Technologien

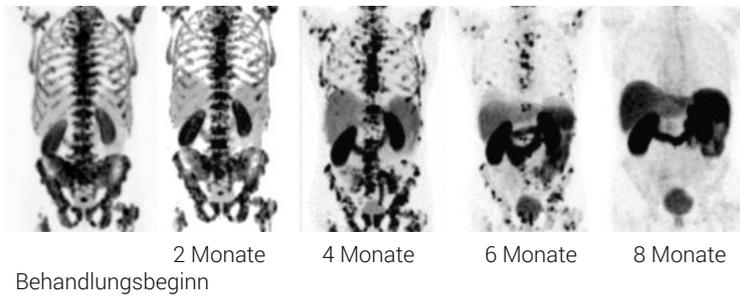
Mit Beginn der 2000er-Jahre integrierten sogenannte Hybridgeräte einen Computertomografen (Seite 215) und ein PET- beziehungsweise ein SPECT-Gerät. Damit wurde es möglich, das Beste aus beiden Welten – hoher funktioneller Informationsgehalt und hohe räumliche Auflösung – in einer (sequentiellen) Untersuchung abzubilden. Insbesondere die PET/CT-Kombination setzte sich in erstaunlicher Geschwindigkeit durch. Ein Schlüsselement war dabei die sogenannte Schwächungskorrektur: Da für die Messungen die Gammaquanten ungestreut den Körper verlassen müssen, nimmt das verwertbare Signal zur Körpermitte hin ab. Erst die Integration der Verteilung von schwächendem Gewebe in die Bildrekonstruktion machte PET-Systeme quantitativ nutzbar. Beim **PET/CT** wurde nun die CT-Information mit relativ niederenergetischen Quanten (100–140 keV) auf die PET-Quanten von 511 keV extrapoliert und erlaubte die Untersuchungszeit so weit zu reduzieren, dass klinische Untersuchungen

effizient möglich waren. Dies erlaubte im Zusammenspiel mit technischen Neuerungen (insbesondere im Bereich der statistischen Bildrekonstruktion von kostengünstigen Rechnersystemen) und der klinischen Zulassung eines mit radioaktivem Fluor markierten Zuckermoleküls Teil- und Ganzkörperuntersuchungen mithilfe der PET/CT, etwa in der Krebs- oder kardiovaskulären Medizin. Hierbei wird ausgenutzt, dass sich diese Zuckersubstanz in vielen Tumoren und bei entzündlichen Prozessen stark anreichert. So verzehnfachte sich die installierte Basis der PET/CT-Systeme binnen eines Jahrzehnts und stellt heute den klinischen Standard in der molekularen bildgebenden Diagnostik dar.

Die Integration von PET mit der **Magnetresonanztomografie** (MRT) hingegen war eine massive Herausforderung, da die Verwendung von konventionellen Lichtsignalverstärkern in Magnetfeldern unmöglich ist. Erst der Einsatz von sogenannten Avalanche-Photomultipliern mit ihrer geringen Bautiefe und ihrer Unabhängigkeit von Magnetfeldern führte zum Erfolg: 2010 wurde in München das erste System weltweit installiert und klinisch erprobt – 2024 waren bereits einige Hundert im Einsatz, was aber im Vergleich zu den Tausenden PET/CT-Geräten weltweit noch wenig ist. Die zweite Generation von PET/MR-Systemen nutzt digitale Silizium-Photomultiplier-Detektoren zum hochsensitiven Nachweis der 511-keV-Strahlung mit hoher zeitlicher Auflösung, zur Zeit nur 250 Pikosekunden. Damit lässt sich bei der Bildrekonstruktion der Ort, an dem sich Positron und Elektron vernichten, auf wenige Zentimeter genau eingrenzen. Im Verbund mit weiteren Innovationen zeigt sich heute im Vergleich zur ersten Generation der PET/MR eine Leistungssteigerung digitaler PET/CT-Systeme um einen Faktor 10 – der sich mit kürzeren Untersuchungszeiten, geringerer injizierter radioaktiver Dosis oder gesteigerter Ortsauflösung nutzen lässt. Seit ebenfalls gut einer Dekade stehen auch im Bereich der SPECT Alternativen zur zuvor beschriebenen Angerkamera zur Verfügung. Mit Halbleiterdetektoren wird die hochenergetische Strahlung direkt gemessen, was eine erheblich gesteigerte Effizienz und damit potenziell geringe Strahlendosen bedeutet.

Therapie mit radioaktiven Strahlen

Wir erleben seit wenigen Jahren eine erstaunliche Ausweitung des Konzepts, Diagnostik, Therapie und Messung des Therapieeffekts miteinander zu kombinieren („**Theranostik**“).



Anwendung eines mit Lu-177 markierten Radiotherapeutikums in einem Patienten mit fortgeschrittenen Prostatakarzinom: während am Anfang der Therapie die PSMA PET noch viele Metastasen insbesondere im Knochenmark zeigt, reduziert sich die Tumorlast mit jedem weiteren Zyklus.

Ein Beispiel dafür sind neuroendokrine Tumore, also Tumore, die aus hormonbildenden Zellen entstehen. Diese verfügen an ihrer Oberfläche über Bindungsstellen, an die Hormone andocken können. Verabreicht man den Patient:innen mit z. B. Gallium-68 versetzte Hormone, dann lässt sich der Tumor – an den diese Hormone schließlich andocken – radioaktiv markieren und im Detektor sichtbar machen. Auf die gleiche Weise lässt sich auch das Therapeutikum an den Tumor andocken: ein mit dem Betastrahler Lutetium-177 (Halbwertszeit: 6,6 Tage) versetztes Hormon. Die Betastrahlung schädigt dann die Tumorzelle und tötet sie im Idealfall ab. Lutetium-177 wird in Kernreaktoren durch die Bestrahlung von Ytterbium-176 erzeugt. Das ist kein triviales Verfahren, aber die Verfügbarkeit von Lutetium-177 hat das Interesse der pharmazeutischen Industrie geweckt.

Ein weiteres, prinzipiell schon länger bekanntes Radiopharmazeutikum wurde vor relativ kurzer Zeit am Deutschen Krebsforschungszentrum in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Heidelberg für die Diagnostik des Prostatakarzinoms entwickelt – einem weit verbreiteten Krankheitsbild. Dieser Tumor zeigt an seiner Zellmembran das sogenannte prostataspezifische Membranantigen, kurz PSMA. Analog zu den neuroendokrinen Tumoren wurde zunächst PSMA mit Ga-68 oder Fluor-18 markiert und dann mit Lu-177-markiertem PSMA behandelt. Das Medikament steht nun seit Kurzem kommerziell zur Verfügung und wird zur Therapie des fortgeschrittenen Prostatakarzinoms verwendet. Auch andere therapeutische Isotope rücken in den Fokus – insbesondere Actinium-225, das als Alphastrahler eine kürzere Reichweite mit hoher Energieabgabe und damit eine höhere Wirkung auf die Tumorzelle hat. Um die komplexe Abhängigkeit von Forschungsreaktoren zu reduzieren, wird aktuell viel Aufwand betrieben, um auch mit Zyklotronen Radioisotope für die Therapie erzeugen zu können.

Auch wenn die diagnostischen Substanzen mit ihrer kurzen Halbwertszeit viele Informationen liefern, können die Verteilung und insbesondere die Ausscheidung aus dem Körper nur abgeschätzt werden. In der Therapie mit Halbwertszeiten im Bereich von Tagen muss deswegen

auf die verabreichte radioaktive Dosis geachtet werden und zwar sowohl im Tumor als auch in Risikoorganen wie der Niere.

Die Erfassung der genauen Strahlendosis ist aber in der Nukleartherapie deutlich komplexer als in der klassischen, von außen erfolgenden Strahlentherapie. Denn bei letzterer lässt sich die Dosis aus den genau bekannten Bestrahlungsdaten und der bekannten Lokalisation des Tumors berechnen. In der Nuklearmedizin hingegen wird das Radiopharmazeutikum injiziert, woraufhin es sich im gesamten Körper verteilt und wieder ausgeschieden wird oder im Körper zerfällt. Alle Zerfallsereignisse im Körper tragen zur Gesamtdosis bei, müssen also für jedes Organ einzeln erfasst und zusammengetragen werden. Dies ist nur mit aufwendigen Messungen und nachfolgenden komplexen Berechnungen möglich. Hier spielen deshalb computerbasierte Methoden wie Monte-Carlo-Simulationen oder künstliche Intelligenz eine große Rolle.

Stephan Nekolla

Die Herstellung der Radioisotope und Radiotherapeutika ist ein komplexer und hoch regulierter Vorgang. Im Bild ist links ein geöffnetes Zyklotron zur Produktion von PET-Isotopen und rechts eine Serie von Hochleistungsflüssigkeitschromatografen zur Messung der radiochemischen Reinheit der Radiopharmazeutika zu sehen.



MIT STRAHLEN GEGEN KREBS

Die Strahlentherapie gehört derzeit zu den präzisesten und sichersten Methoden bei der Behandlung von Krebserkrankungen. Dabei kommen nicht nur Röntgenstrahlen, sondern auch Protonen und schwerere Ionen zum Einsatz. Das Ziel ist dabei immer, den Tumor maximal zu schädigen und das Normalgewebe so weit wie möglich zu schonen.

In Deutschland unterziehen sich pro Jahr etwa eine halbe Million Krebskranke einer Strahlentherapie – das sind nahezu zwei Drittel aller Tumorpatient:innen. Bei etwa drei Viertel ist das Ziel die Heilung, in den verbleibenden Fällen ist die Erkrankung so weit fortgeschritten, dass man lediglich von einer Linderung der Symptome ausgehen kann.

Die Strahlentherapie wirkt aufgrund der ionisierenden Eigenschaft hochenergetischer Strahlung: Beim Durchgang durch Gewebe werden Elektronen von den Atomen getrennt und auch Molekülbindungen aufgebrochen. Beides schädigt die Tumorzellen: entweder direkt oder indirekt durch die Entstehung von reaktionsfreudigen Radikalmolekülen, welche entsprechende Schäden hervorrufen. Die Schäden begrenzen die Zellteilung, welche bei Tumorzellen unkontrolliert geschieht. Das Wachstum des Tumors wird unterbrochen, und im Idealfall kann das Immunsystem des Körpers ihn wieder bekämpfen.

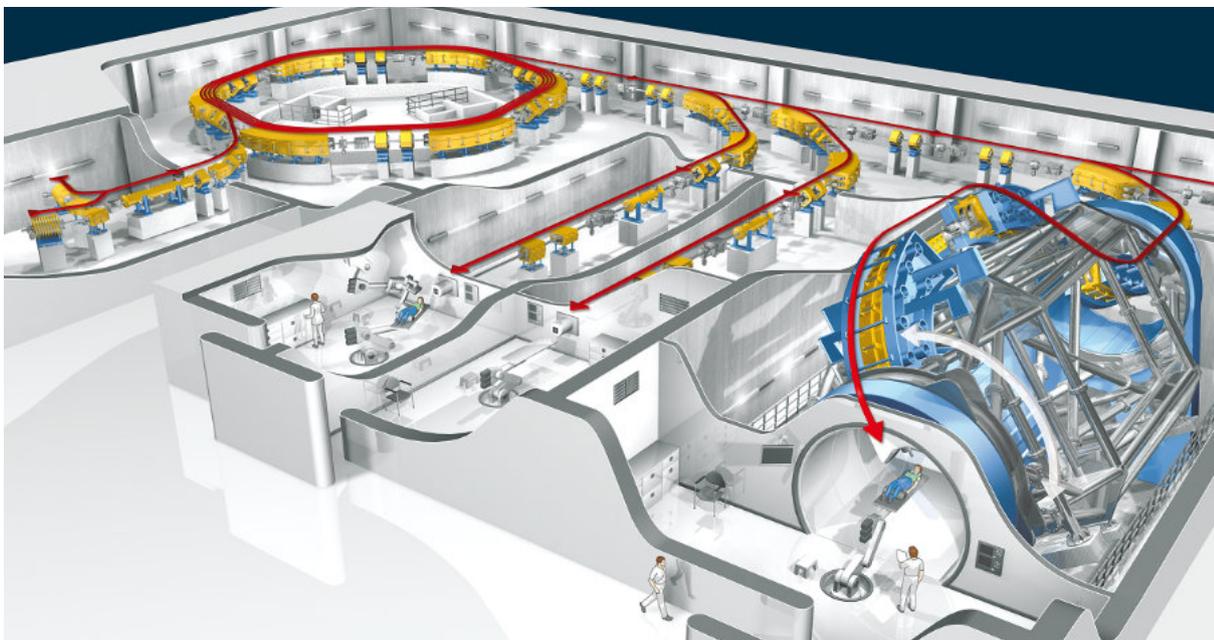
Die Geschichte der Strahlentherapie

Bereits kurz nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen durch Wilhelm Konrad Röntgen im November 1895 wurden erst-

mals Tumoren damit bestrahlt. Auch die Entdeckung der Radioaktivität im Februar 1896 durch Henri Becquerel kam schnell an die Patient:innen in Form von Strahlern (meist Radium), die auf den Körper aufgebracht wurden. Diese ersten Behandlungen waren teilweise erstaunlich erfolgreich. Allerdings zeigten sich auch im gesunden Gewebe erhebliche Schädigungen, insbesondere in der Haut. Das lag vor allem daran, dass die damals verwendeten Strahlen nur eine geringe Energie (wenige 100 keV) hatten und deshalb nicht tief ins Gewebe eindringen konnten. Zudem bestanden anfangs kaum Möglichkeiten, die Strahlung nur auf den Tumor zu konzentrieren und das gesunde Gewebe zu schonen.

Diese sogenannte Konformation der Dosis auf das Zielgebiet ist das Ziel nahezu aller physikalisch-technischen Entwicklungen in der Strahlentherapie. Nur wenn das Normalgewebe ausreichend geschützt wird, kann man die Dosis erhöhen und so den Tumor besser bekämpfen. Der erste Schritt war historisch die Nutzung höherer Strahlenenergien: die Entwicklung kompakter Linearbeschleuniger für Elektronen (Linacs, von engl.: linear accelerator) ermöglichte Elektronenenergien von 10 MeV und darüber hinaus. Diese schnellen Elektronen werden in einem Metallkörper abgebremst, wo-

Die Heidelberger Ionen-Therapieanlage ist die erste Anlage zur Strahlentherapie mit Protonen und Kohlenstoffionen in Europa. Zu sehen sind links oben die Ionenquellen, darüber der Teilchenbeschleuniger (Synchrotron) und die Verteilung der Ionenstrahlen (rote Linie) auf die Behandlungsräume (zwei Räume mit festem Horizontalstrahl und drehbare Gantry, rechts).



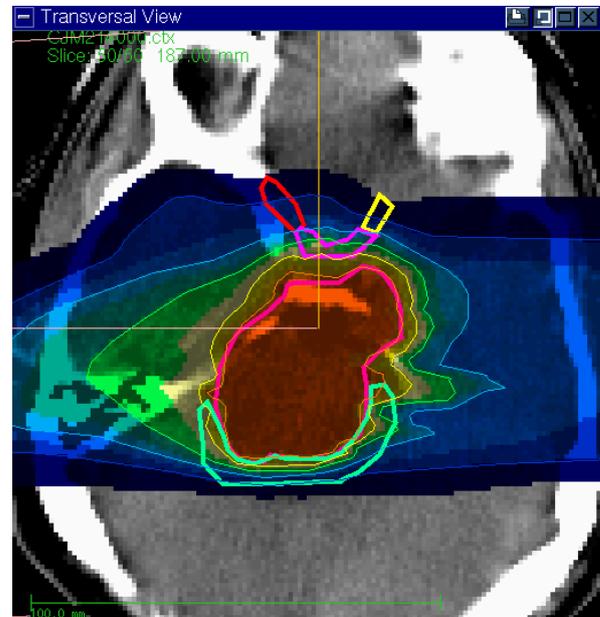
durch Röntgenstrahlung in Form von Bremsstrahlung entsteht. Damit war zunächst das Problem der geringen Eindringtiefe gelöst und Hautschäden konnten deutlich reduziert werden. Die Montage des Beschleunigers auf einem mechanischen Drehgestell (Gantry) erlaubt es außerdem, Strahlen aus unterschiedlichen Richtungen auf den Tumor zu richten. Durch den Einsatz metallischer Blendsysteme lassen sich die Strahlenfelder zudem individuell auf die Tumormorphologie anpassen und das umliegende Gewebe noch besser schonen.

Durch die rasante Entwicklung sowohl der Bildgebung als auch der computertomografischen Verfahren und der zunehmenden Rechenleistung hielten ab etwa Mitte der 1980er-Jahre leistungsfähige Computersysteme für die Strahlentherapieplanung Einzug in die Kliniken. Für die computerbasierte Planung der Strahlentherapie werden kontrastreiche dreidimensionale Röntgentomografieaufnahmen (CT-Bilder) der Patient:innen genutzt. Aus den CT-Daten gewonnene, dreidimensionale Modelle beschreiben dabei die genaue Form und Lage des Tumorumfanges sowie der umliegenden gesunden Organe. Später kam noch die magnetische Kernspinnresonanztomografie (MRT) für die Planung hinzu, die eine bessere Abgrenzung des Tumors von verschiedenen Weichteilgeweben erlaubt.

Ein weiterer Schritt hin zu erhöhter Dosiskonformation war um die Jahrtausendwende der Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren: hierbei wird die Intensität der einzelnen Strahlenfelder so optimiert, dass erst ihre Überlagerung im Tumor zu der gewünschten Dosisverteilung führt. Diese sogenannte intensitätsmodulierte Strahlentherapie wird durch bewegliche, motorisch verfahrbare Kollimatoren am Linearbeschleuniger realisiert. Damit ließen sich erstmals komplex geformte Zielvolumina (z. B. konkave Tumorformationen) bestrahlen, was die Effektivität der Strahlentherapie erheblich verbessert hat.

Therapie mit Teilchen

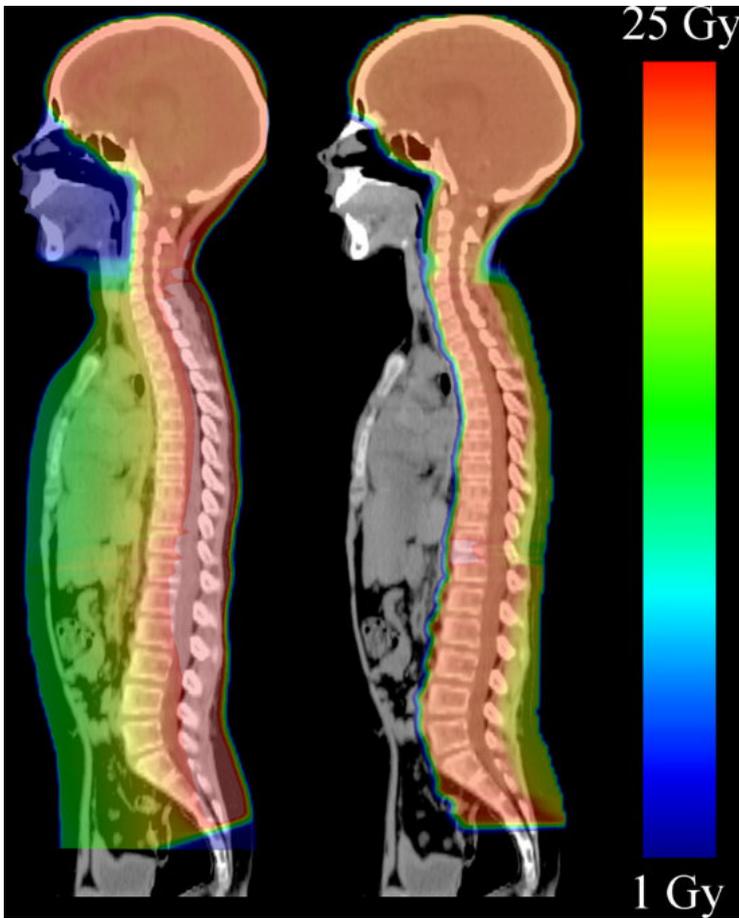
Etwa zur gleichen Zeit wurden vermehrt auch Ionenstrahlen (z. B. die Kerne der Wasserstoffatome) eingesetzt. Diese waren bereits ab Mitte der 1950er-Jahre in den Laboren der Teilchenphysik verfügbar, etwa am Lawrence Berkeley Laboratory und dem Harvard Cyclotron Laboratory in den USA oder dem Svedberg Labor in Uppsala. Dort standen Teilchenbeschleuniger zur Verfügung, die Wasserstoffkerne (Protonen) auf Energien bis zu mehreren Hundert MeV beschleunigen konnten. Dies erfordert zwar aufwendige Beschleunigeranlagen, jedoch deponieren Protonen die Dosis in einer deutlich günstigeren Art und Weise: Röntgenstrahlung wird beim Eindringen in Materie exponentiell geschwächt, sodass die Dosis im Gewebe langsam abnimmt, aber prinzipiell unbegrenzt tief eindringen kann. Bei Protonen hingegen wird zunächst nur wenig Energie abgegeben, erst gegen Ende der Reichweite nimmt die Dosis stark zu. Dies führt zu einem Dosismaximum, das Bragg-Peak genannt wird. Die Lage dieses Dosismaximums lässt sich zudem durch Veränderung der Strahlenergie genau einstellen. Der große Vorteil der Protonenstrahlung ist, dass keinerlei Strahlung hinter dem



Einsatz der computerbasierten Therapieplanung anhand von CT-Daten, hier am Beispiel der Ionentherapie zur Behandlung eines Hirntumors im Bereich der Schädelbasis eines jungen Erwachsenen. Im CT sind die Sehnerven (rot und gelb), die Sehnervenkreuzung (lila) und der Hirnstamm (grün) als besonders strahlenempfindliche Strukturen gekennzeichnet. Es ist deutlich erkennbar, wie der Hirnstamm vom Tumor bereits erheblich verformt wird. Das Tumorumfang (rot) wird durch die Strahlendosis (überlagerte Farbschattierungen) hervorragend erfasst und gleichzeitig die Risikostrukturen optimal geschont.

Tumorumfang verabreicht wird – die Protonen haben eine begrenzte Eindringtiefe. Zudem lassen sich Protonen aufgrund ihrer Ladung durch magnetische Linsen auf dünne Strahlen fokussieren und magnetisch ablenken. Dieses Verfahren ermöglicht bereits durch einzelne oder wenige Strahlenbündel das Tumorumfang mit einer hohen Dosis zu bestrahlen und gleichzeitig das Normalgewebe maximal zu schonen. Durch Verwendung schwererer Ionen, wie etwa Kohlenstoffionen, können die günstigen physikalischen Eigenschaften der Protonen noch mit der besonderen radiobiologischen Wirkung dieser Strahlen verknüpft werden. Diese Ionen werden als dicht ionisierende Strahlung bezeichnet, da sie örtlich begrenzt sehr viel mehr Energie auf das Gewebe übertragen. Kohlenstoffionen zeigen ihre besonderen Vorteile insbesondere bei Tumoren, die relativ widerstandsfähig gegenüber Röntgenstrahlen oder auch Protonen sind.

Allerdings sind für die Protonen- und noch mehr für die Ionenbeschleunigung große und aufwendige Beschleuniger erforderlich. Deshalb sind Protonen- und Ionentherapie weniger verbreitet als die klassische Strahlentherapie: Während weltweit einige Zehntausend klinische Linacs in Betrieb sind, existieren derzeit nur etwa 120 Anlagen zur Protonentherapie und 13 für schwerere Ionen, davon sieben in Japan, zwei in China und vier in Europa – eine davon steht in Heidelberg. Der Anteil insbesondere der Protonentherapiezentren wächst aufgrund der überzeugenden Therapieergebnisse und der sehr guten Verträglichkeit jedoch ständig.



Strahlentherapie eines Patienten mit Medulloblastom, einem im Kleinhirn sitzenden Tumor, mit Protonen (rechts) und Röntgenstrahlen (links). Da sich die Tumorzellen über den Liquor in das Gehirn und den Spinalkanal absetzen können, wird das gesamte Gehirn und der Spinalkanal ebenfalls bestrahlt. In beiden Fällen erfolgt hier die Bestrahlung des Spinalkanals durch ein von hinten auf den Patienten gerichtetes Strahlenfeld. Da die Protonen im Gewebe schnell abgebremst werden, werden die inneren Organe von der Bestrahlung nicht in Mitleidenschaft gezogen, anders als etwa bei Röntgenbestrahlung. Es ist deutlich zu erkennen, wie die Röntgenstrahlung auch den Bereich des Mediastinums, die Lungen, das Herz und den Darm belasten, was bei der Protonentherapie vollständig vermieden werden kann. Dies führt zu einer erheblich besser verträglichen Bestrahlung mit Protonen und einem reduzierten Risiko der Bildung sekundärer Tumoren durch die Bestrahlung des gesunden Gewebes gegenüber Röntgenstrahlen.

Während die räumliche Dosiskonformierung allmählich an ihre physikalischen Grenzen stößt, steht in der Entwicklung zunehmend die Anpassung an die zeitliche Veränderung des Tumolvolumens im Vordergrund. Durch den Einsatz der Bildgebung direkt vor und auch während der Therapie (bildgeführte Strahlentherapie, oder image guided radiotherapy – IGRT) ist es möglich, die Strahlenfelder an die jeweils im Moment der Bestrahlung tatsächlich vorliegenden anatomischen Verhältnisse im Patienten anzupassen (adaptive Therapie). Am weitesten fortgeschritten ist hier die Integration eines Linacs in einen MR-Tomografen (MR-Linac), welcher zum ersten Mal eine kontinuierliche Beobachtung des Tumors während der Behandlung ermöglicht. Damit kann die Bestrahlung prinzipiell in Echtzeit angepasst werden, was möglicherweise in naher Zukunft mit dem Einsatz modernster Computerverfahren zur automatisierten Bildverarbeitung und Dosisberechnung Realität wird (insbesondere mit Deep-Learning-Verfahren und künstlicher Intelligenz).

Neben diesen strahltechnisch getriebenen Methoden stehen derzeit auch ganz andere Verfahren im Fokus der Forschung: bei sogenannten FLASH-Bestrahlungen wird die Dosis innerhalb von Sekundenbruchteilen statt über mehrere Minuten verabreicht. Seit Langem ist bekannt, dass dies zu einer redu-

zierten Reaktion der Zellen führt – vor Kurzem wurde jedoch nachgewiesen, dass dies nur für gesunde Zellen gilt. Man geht deshalb derzeit davon aus, dass sich durch den Einsatz von FLASH gesundes Gewebe gezielt schonen lässt, ohne die Wirkung auf den Tumor zu reduzieren. Allerdings ist der biologische Mechanismus dahinter noch weitgehend unverstanden. Vermutlich spielt die veränderte Bildung der Radikale und – besonders der Sauerstoffradikale – im Tumor eine Rolle. Möglich ist außerdem, dass FLASH auch die Reaktion des Immunsystems auf bisher noch ungeklärte Weise beeinflusst. Es gibt Hinweise, dass durch Bestrahlung das Immunsystem derart aktiviert werden kann, dass es nach der Bestrahlung auch Tumorzellen außerhalb des Bestrahlungsfelds effektiv zerstören kann. Gelänge es, durch Medikamente oder FLASH die Reaktion des Immunsystems gezielt zu beeinflussen, wäre dies ein weiterer großer Schritt hin zu einer verbesserten Strahlentherapie.

Oliver Jäkel



HÖREN: MEHR ALS AKUSTIK

Während die Akustik die Entstehung und Ausbreitung von Schall untersucht, erforscht die Audiologie Hörempfindungen und findet physikalische Beschreibungen für Empfindungen wie leise, laut, hoch, tief, rau – auch, um damit Hörstörungen behandeln zu können. In dieser Disziplin arbeiten Expert:innen aus Physik, Psychologie und den Ingenieurwissenschaften, aber auch der Medizin und Pädagogik.

Das Organ, welches das menschliche Hören ermöglicht, ist das Ohr – bestehend aus dem Außenohr, dem Mittelohr und dem Innenohr. Der Schall wird durch das Außenohr aufgefangen, versetzt das Trommelfell und die Gehörknöchelchen im Mittelohr in Schwingungen und wird in der Hörschnecke oder Cochlea im Innenohr in seine unterschiedlichen Frequenzen aufgeteilt. Hier entstehen außerdem die elektrischen Reize, die den Hörnerv stimulieren. Durch den Vergleich der von beiden Ohren erhaltenen Signale (binaurales Hören) kann das Gehirn die Schallquelle sehr genau lokalisieren und Nebengeräusche unterdrücken. Dadurch kann man zum Beispiel Sprache auch bei starken Störgeräuschen noch verstehen.

Was wir heute über das menschliche Hören wissen, beruht oft auf physikalischen Untersuchungen. Bereits der Physiker Hermann von Helmholtz hat im 19. Jahrhundert grundlegende Studien über die Hörwahrnehmung durchgeführt. Etwa hundert Jahre später (1961) erhielt der ungarische Physiker und Hörforscher Georg von Békésy den Nobelpreis für die Erklärung zur spektralen Zerlegung des Schalls in der Cochlea. Ein weiterer Meilenstein war die Entdeckung des englischen Physikers David Kemp, dass auch die Cochlea selbst akustische Signale aussenden kann. Diese sind ein Nebenprodukt von nichtlinearen, aktiven Verstärkerprozessen, die verantwortlich für den großen Arbeitsbereich und die Präzision unseres Gehörs sind.

Hörstörungen

Die klinische Audiologie beschäftigt sich vor allem mit der Diagnostik und Therapie von Hörstörungen. Hier arbeiten Medizinphysiker:innen mit Ärzt:innen Hand in Hand. Mithilfe von zahlreichen akustischen und elektrischen Signalen wird die individuelle Hörverarbeitung untersucht. Dies reicht von der Bestimmung der frequenzabhängigen Hörbeeinträchtigung und des individuellen Lautheitsempfindens über die Quantifizierung von Verarbeitungszeiten bis hin zur Messung der neuronalen Verarbeitung. Für letzteres werden insbesondere nichtinvasive Messungen mithilfe von Oberflächenelektroden eingesetzt. Eine große Herausforderung hierbei ist es, durch physikalische Messungen die frequenzabhängige Hörschwelle von Säuglingen genau zu bestimmen, um schon früh mögliche Probleme zu erkennen und zu behandeln.

Eine weitere Methode ist die Analyse des vom Ohr ausgesandten Schalls: Diese otoakustischen Emissionen lassen sich sehr effizient in der Hördiagnostik nutzen – etwa beim

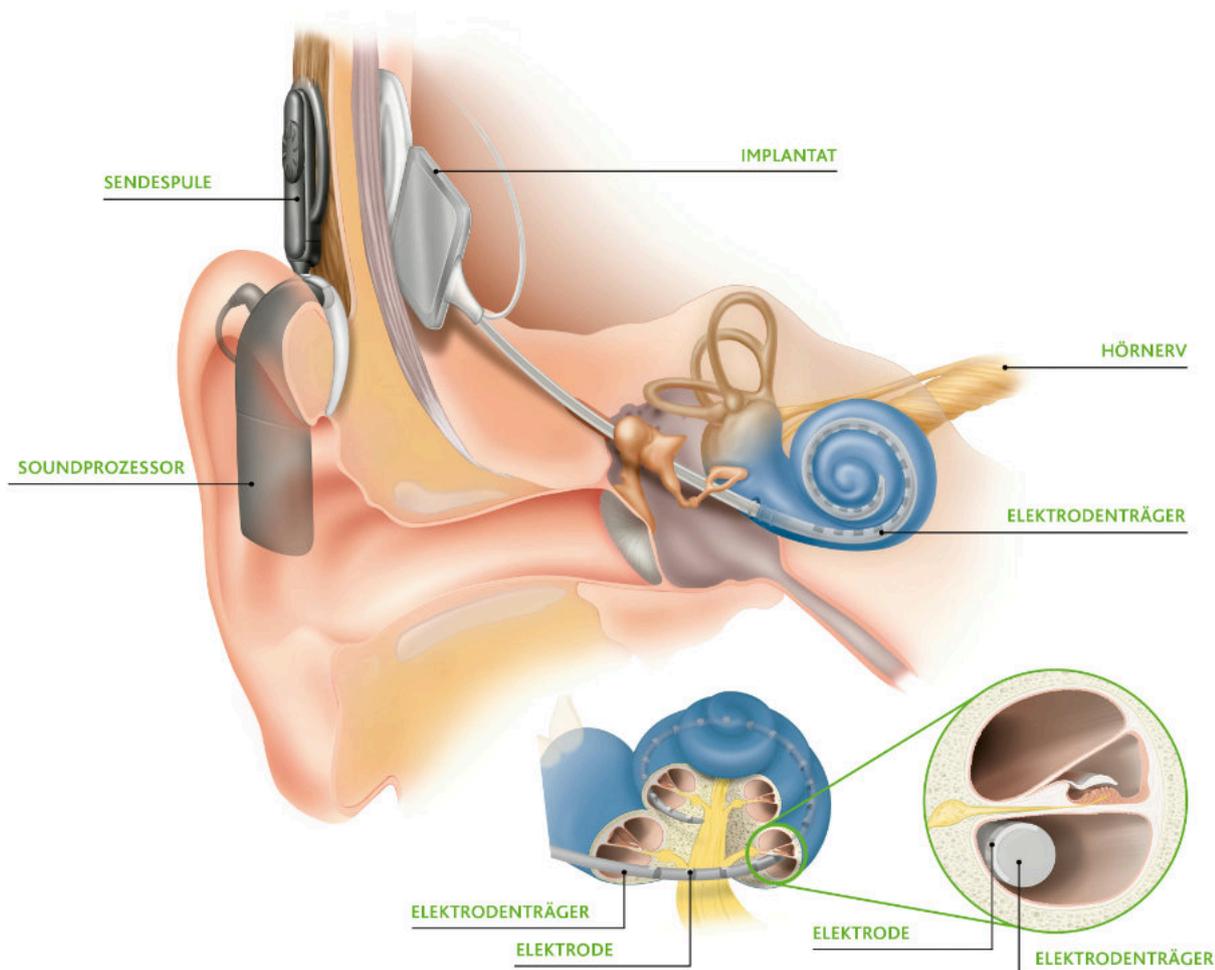
Neugeborenenhörscreening oder zur sehr präzisen Analyse der cochleären Verstärkerprozesse.

Können die Ursachen einer Hörstörung nicht beseitigt werden, so werden technische Hörhilfen (Hörgeräte) genutzt, um das Hören zu unterstützen. Elektroakustische Verstärkungssysteme sollen den Schall so aufbereiten, dass mit dem gestörten Hörsinn eine akustische Informationsaufnahme und somit das Alltagshören möglich ist. Dazu ist nicht nur die frequenzabhängige Verstärkung, sondern auch eine individuelle Einstellung der Schallverarbeitung erforderlich. Solche Hörgeräte sind aus dem Alltag von höreingeschränkten Personen heute nicht mehr wegzudenken. Aktuelle Forschungsarbeiten versuchen, die akustische Verstärkung in Hörgeräten zu optimieren und direkt das Trommelfell vibratorisch anzuregen. Durch die verbesserte Kopplung zwischen Hörgerät und Hörmechanik im Ohr soll damit ein stabileres Hören erreicht werden. Andere Arbeiten beschäftigen sich mit der Interaktion der Hörgeräte mit dem Ziel, dass auch das binaurale Hören wiederhergestellt wird. Hierzu wird nicht nur an der Technologie geforscht, sondern auch an den grundlegenden Mechanismen des Hörens mit zwei Ohren.

Cochlea-Implantate

Manchmal liegt die Ursache für die Hörstörung im Innenohr: Dann sind die Haarzellen in der Cochlea, die normalerweise den Hörnerv stimulieren, nicht mehr vorhanden oder stark reduziert – indem sie etwa durch zu große Lautstärkepegel abgebrochen sind. Cochlea-Implantate (CI) ersetzen die Haarzellen in ihrer Funktion der Umwandlung akustischer in elektrische Energie, die dann als Nervenpulse zum Hörzentrum im Gehirn weitergeleitet werden. Mindestens zwölf Elektroden, die in die Cochlea eingeführt werden, stimulieren den Hörnerv direkt mit elektrischen Pulsen. Bei geeigneter individueller Einstellung der Geräte erreichen die meisten Menschen ein gutes Alltagshören – sogar ertaubte Menschen können von der Technologie profitieren. Erstmals wurden die Cochlea-Implantate 1978 am Menschen erprobt und seitdem technisch so weiterentwickelt, dass sie heute bei hochgradigen Hörstörungen ein besseres Hören als schallverstärkende Hörsysteme ermöglichen. In der audiologischen Diagnostik wird bestimmt, wie groß die Wahrscheinlichkeit für eine Hörverbesserung durch eine CI-Versorgung ist.

CI-Systeme können allerdings deutlich weniger Frequenzen unterscheiden als das menschliche Ohr: Weil sich die elektri-



schen Felder räumlich ausbreiten, werden nicht Einzelfasern des Hörnervs, sondern ganze Nervenbündel angeregt. Die spektrale Auflösung zu verbessern, ist ein zentrales Anliegen der Forschung in diesem Bereich. Eine Möglichkeit ist, den Hörnerv mit Licht statt mit elektrischen Pulsen anzuregen. Dazu müssen zunächst lichtempfindliche Zellen in die Cochlea gebracht werden. Anschließend wird eine Kette kleiner Leuchtdioden (LEDs) implantiert. Das CI-System nimmt Schall auf und kodiert diesen in Lichtpulse, die über die LED-Kette schließlich den Hörnerv erreichen. Durch die optische Anregung lässt sich eine weitaus präzisere Stimulation erreichen und somit die Frequenzselektivität verbessern – die Patient:innen können mehr verschiedene Tonhöhen wahrnehmen und unterscheiden. Aktuell sind diese Systeme in der Erforschung und Erprobung in Tierexperimenten; bis zur Erprobung am Menschen dürfte es noch einige Jahre dauern.

Bis heute sind bei Weitem nicht alle Prozesse des Hörvorgangs verstanden. So ist zum Beispiel die Dekodierung von akustisch dargebotener Sprache in informationstragende Einheiten wie Silben, Wörter und Sätze ein sehr stabiler Prozess mit zahlreichen Korrekturmechanismen, der auch in sehr ungünstigen Situationen mit starkem Geräuschhintergrund funktioniert. Erkenntnisse hierzu könnten ebenfalls dazu genutzt werden, Hörstörungen zu therapieren.

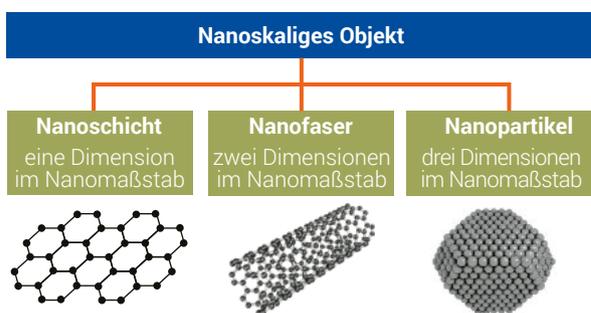
Cochlea-Implantat: Der Schall wird zunächst von einem Mikrofon des externen Soundprozessors aufgenommen. Dieser individuell eingestellte Prozessor übermittelt die Energie und Information an eine hinter dem Ohr liegende Sendespule. Diese Spule sendet die Signale durch die Kopfhaut an das darunter liegende Implantat. Von dort führt ein Kabel bis hin zu den 22 Elektroden, die innerhalb der Cochlea liegen. Dadurch kann der Hörnerv direkt elektrisch stimuliert werden.

Ulrich Hoppe

NANO FÜR DIE MEDIZIN

Die Nanotechnologie findet Anwendungen in immer mehr Bereichen unseres Alltags. Über die Nanobiotechnologie führt der Weg zur Nanomedizin. Fortschritte in dem Bereich erlauben beispielsweise, neuartige Biosensoren zu realisieren oder Wirkstoffe gezielt an den gewünschten Ort ihres Wirkens zu bringen.

Lange bevor Menschen von „Nanotechnologie“ sprachen, setzten sie diese bereits unbewusst ein. So wurde im antiken China durch das Verbrennen pflanzlicher Öle nanoskaliger Ruß gewonnen, um Tinten und Farben zu verbessern. Im Römischen Reich gab es Nanozusätze bei der Glasherstellung, um dieses zu färben. Ein weiteres Beispiel sind die sogenannten Damaszener Schwerte. Diese waren berühmt für die Härte ihrer Klingen, was an eisenkarbidhaltigen Nanodrähten und Kohlenstoffnanoröhrchen lag.



Verschiedene Klassen von Nanopartikeln

Zwar war der Japaner Norio Taniguchi im Jahre 1974 der Erste, der den Begriff „Nanotechnologie“ benutzte, doch als Vater der Nanotechnologie gilt der Physik-Nobelpreisträger Richard Feynman. In einer berühmt gewordenen Rede vom Dezember 1959 hatte er bereits bahnbrechende Ideen geäußert – etwa die Miniaturisierung von Computern, die Reduktion von Objektgrößen mit der damit einhergehenden Änderung von physikalischen Gesetzmäßigkeiten sowie die Komprimierung der 24 Bände umfassenden Encyclopedia Britannica auf einen Nagelkopf, wenn es möglich wäre, mit einzelnen

Atomen die Buchstaben zu schreiben. Außerdem stellte er die wegweisende Frage, welche Eigenschaften Materialien hätten, wenn man ihre Atome den eigenen Wünschen gemäß anordnen könnte. Diese Denkrichtung führte zu komplett neuen Funktionalitäten und Designmöglichkeiten (siehe auch „Computerbasiertes Materialdesign“ auf Seite 87).

Während die Entwicklungen in der Nanotechnologie in 1970er-Jahren vor allem durch die Biotechnologie und Mikroelektronik geprägt waren, verlagerten sich die Schwerpunkte in den Achtzigerjahren auf die Materialforschung sowie die Informations- und Kommunikationstechnik. Mit Ende des 20. Jahrhunderts begann dann der Einzug der Nanotechnologie in viele Bereiche.

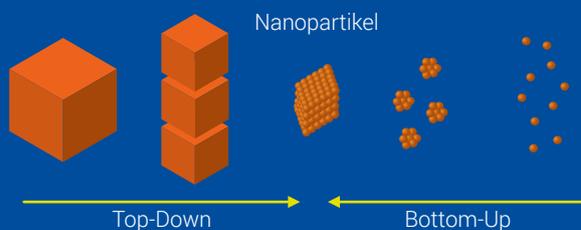
Magnetische Nanopartikel

Alle Nanotechnologien basieren auf den Eigenschaften nanoskaliger Objekte. Beispiele hierfür sind **Dünnschichtsysteme** oder **kleinste Partikel** von weniger als 100 Nanometer Größe, die **Nanopartikel**. Durch das geringe Volumen bestimmt hier oft die Oberfläche das Verhalten: So liegen bei einem 10 nm großen Partikel rund 20% aller Atome an der Oberfläche, bei einem Durchmesser von 1 nm sind es schon bis zu 90% der Atome. Aus diesem Grund bilden Nanopartikel oft hervorragende Katalysatoren, z. B. im Abgassystem von Kraftfahrzeugen.

Aufgrund ihrer geringen Größe lassen sich Nanopartikel eher als große Moleküle denn als kleine Festkörper auffassen: Sie verlieren ihre klassischen makroskopischen Eigenschaften, stattdessen werden quantenphysikalische Phänomene relevant. So verhalten sich Nanopartikel aus Stoffen wie Eisen,

HERSTELLUNG VON NANOPARTIKELN

Es existieren zwei grundsätzlich unterschiedliche Herangehensweisen, um Nanomaterialien zu synthetisieren. Im Top-Down-Ansatz werden die nanoskaligen Objekte aus größeren Einheiten hergestellt, ohne dabei Kontrolle auf atomarer Ebene zu besitzen. Ein Beispiel dafür ist die Herstellung von Graphen aus Graphit. Die Bottom-Up-Strategie verfolgt im Gegensatz dazu das Ziel, durch einen kontrollierten Aufbau aus einzelnen Atom- und Molekül aggregaten größere Systeme wie Nanopartikel herzustellen – so wie aus einzelnen Bausteinen größere Modelle erzeugt werden können.



Kobalt, Nickel oder Gadolinium, die als Festkörper „magnetisch“ sind, anders als ihre makroskopischen Konglomerate. Das Verhalten ist größenabhängig, weil die magnetischen Eigenschaften eines Objekts sich aus dem Zusammenspiel der magnetischen Momente seiner Bestandteile ergeben. Gibt es davon nur sehr wenige, so ist es für diese energetisch am günstigsten, wenn alle magnetischen Momente parallel ausgerichtet sind. Man sagt, es gibt nur noch eine Domäne. Die charakteristische Größe, unterhalb derer die Partikel eindomänig werden, liegt im Bereich von etwa 80 nm, hängt im Detail aber vom betrachteten Material ab. Diese eindomänigen Nanopartikel werden inzwischen in vielfältiger Weise in der Medizin eingesetzt. Voraussetzung dafür ist, dass sie keine unerwünschten Nebenwirkungen erzeugen, also biokompatibel sind. Bei Eisen ist das der Fall, da Eisen in sehr geringen Mengen auch im menschlichen Körper z. B. im Blutfarbstoff zu finden ist.

Mit Nanokurieren zum Ziel

Gegenwärtig erreicht nur weniger als ein Prozent der eingenommenen Medikamente ihren tatsächlichen Wirkungsort, was zu großen Nebenwirkungen und begrenzter Wirksamkeit führt. Magnetische Nanopartikel lassen sich als zuverlässige Medikamentenkuriere einsetzen, indem sie mithilfe eines äußeren Magnetfelds im Körper gelenkt werden und an ihnen gebundene Medikamente direkt zu ihrem Einsatzort bringen können. Das kann die Therapie deutlich verbessern und gesunde Zellen schonen – etwa bei der Chemotherapie.

Auch bei einer anderen vielversprechenden Tumorthherapie werden Nanopartikel verwendet: Es werden dabei magnetische Nanopartikel in den Tumor eingebracht und anschlie-

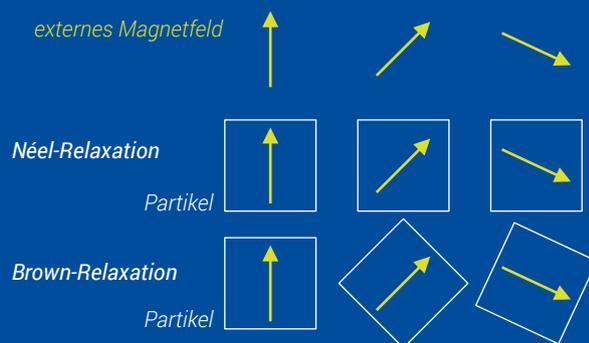
ßend durch ein von außen angelegtes magnetisches Wechselfeld induktiv erwärmt. Zwei Mechanismen tragen zur Erwärmung bei: Bei der **Néel-Relaxation** dreht sich durch die Oszillation des Magnetfelds nicht der Partikel selbst, sondern die Magnetisierungsrichtung innerhalb des Partikels. Das benötigt Energie, die dann abgegeben wird. Bei der **Brown-Relaxation** rotiert hingegen das gesamte Partikel, und die Energie wird über Reibung an die Umgebung abgegeben. Die Krebszellen werden auf diese Weise thermisch abgetötet, ohne anderes Gewebe in Mitleidenschaft zu ziehen. Um die Nanopartikel in das Zielgewebe zu transportieren, können sie entweder direkt in den Tumor oder in die den Tumor versorgende Arterie injiziert werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, spezielle Moleküle, die spezifisch am Tumorgewebe binden, auf der Partikeloberfläche zu fixieren und durch die Blutbahn zu schicken.

Magnetische Nanopartikel können darüber hinaus die Bildgebung bei der Magnetresonanztomografie (MRT) verbessern. MRT basiert auf der magnetischen Anregung der sich im Körper befindenden Wasserstoffatome. Dies funktioniert, weil die Wasserstoffkerne (Protonen) aufgrund ihres Spins selbst ein magnetisches Moment haben. Für ein MRT werden ein sehr starkes konstantes Magnetfeld sowie überlagerte kleinere gepulste Magnetfelder benötigt. Die Bildgebung basiert auf Effekten, die mit der sogenannten Relaxation der Protonenspins nach der Anregung zu tun haben. Magnetische Nanopartikel beeinflussen das lokale Magnetfeld, in dem sich die Protonen befinden, und damit deren Relaxationen. Das kann die Kontraste im Signal des MRT deutlich verstärken.

Mathias Getzlaff

KÜNSTLICHES FIEBER ZUR KREBSBEKÄMPFUNG

Bei der Hyperthermie wird Gewebe auf Temperaturen von über 40 °C erwärmt. Es bietet eine vielversprechende Ergänzung zu den Standardtherapieformen. Dabei wird in den betroffenen Zellen entweder idealerweise direkt der programmierte Zelltod aktiviert oder die Empfindlichkeit für andere Therapien gesteigert. Im simultanen Einsatz mit einer Chemo- oder Strahlentherapie werden so nicht nur die Erfolgsaussichten der Behandlung verbessert, sondern auch die Nebenwirkungen der verwendeten Therapie verringert. In der medizinischen Anwendung gibt es unterschiedliche Verfahren: Bei der Ganzkörperhyperthermie wird der gesamte Körper erwärmt, um bereits gestreute Krebserkrankungen im gesamten Körper simultan zu behandeln. Dieses Verfahren belastet den Organismus enorm. Patient:innen befinden sich unter Vollnarkose oder tiefer Betäubung und müssen intensivmedizinisch überwacht werden, während ihr Körper einer Art künstlichem Fieber ausgesetzt wird. Mit der lokalen Oberflächenhyperthermie lässt sich Gewebe durch äußere Bestrahlung mit Ultraschall oder Mikrowellen erwärmen, etwa bei oberflächlichen Metastasen oder dicht unter der Oberfläche liegenden Tumoren. Bei der interstitiellen Hyperthermie werden die Wärmequellen in Körperöffnungen direkt am Tumor angebracht, um eine punktuelle Übererwärmung zu erreichen.



KOMPLEXE WELT – VERNETZTE WELT

Die Menschheit steht vor einer Vielzahl großer globaler und existenzieller Herausforderungen auf ökologischer, sozialer, und ökonomischer Ebene: der Verlust der biologischen Vielfalt, der Kollaps von Ökosystemen, die Klimakrise, Aushöhlung demokratischer Strukturen und des sozialen Zusammenhalts, der Ersatz menschlichen Denkens und Handelns durch künstliche Intelligenz in vielen Lebensbereichen sowie Zusammenbrüche ganzer Finanz- und Wirtschaftssysteme. Die Erforschung solcher komplexer Systeme und die daraus resultierenden Gesetzmäßigkeiten helfen zunehmend beim Verstehen und damit bei der Bewältigung dieser Herausforderungen.

Komplexe Systeme überraschen und faszinieren gleichermaßen mit oft unerwartetem kollektivem Verhalten. So erklären beispielsweise weder die Flugfähigkeiten einzelner Stare die faszinierende kollektive, selbstorganisierte Dynamik von riesigen Schwärmen, noch erklärt das Verhalten Einzelner im Verkehr die durch sie in der Gesamtheit erzeugten Verkehrsströme.

Auch das Phänomen der Synchronisation ist im Alltag weit verbreitet: Glühwürmchen, die im Gleichklang blinken, eine La-Ola-Welle im Stadion (vom Spanischen „la ola“, die „Welle“) oder Joggende im Gleichschritt. Durch Theorie und präzise Experimente – etwa zu supraleitenden Josephson-Kontakten – sind die mathematisch formulierbaren Gesetzmäßigkeiten der Synchronisation sehr gut verstanden und auch vielseitig anwendbar. Dieses grundlegende Verständnis, das u. a. die Basis für den Betrieb unserer Stromnetzwerke bildet, ist ein zentrales Merkmal für die Physik komplexer Systeme. Dabei ergänzen sich Forschungsarbeiten an physikalischen Systemen aus unserer näheren und weiteren Umgebung. Diese Interdisziplinarität und universelle Anwendbarkeit sind Teil der Faszination dieser Forschung.

Die Dynamiken komplexer Systeme ergeben sich also gemeinsam aus den intrinsischen dynamischen Verhaltensweisen vieler Teilsysteme, aus deren meist nichtlinearen Wechselwirkungen untereinander sowie aus treibenden äußeren Kräften. Die entstehenden Prozesse der Selbstorganisation auf Systemebene unterstreichen die Notwendigkeit ganzheitlicher, umfassender Herangehensweisen und Lösungen für ihre Beschreibung und Kontrolle.

Die Publikationen zum Thema komplexe Systeme haben sich allein im Zeitraum 1990–2000 um den Faktor 15 erhöht und im Zeitraum 2000–2020 nochmals um den Faktor vier. [Stephen Hawking](#), Physikprofessor an der Universität Cam-

bridge, der insbesondere auch durch seine populärwissenschaftlichen Bücher einer breiten Öffentlichkeit bekannt wurde, folgerte zum Jahrhundertwechsel aus dieser Entwicklung:

„Ich denke, das nächste Jahrhundert ist das Jahrhundert der Komplexität.“

Stephen Hawking

Auch der Nobelpreis für Physik im Jahr 2021 wurde „für bahnbrechende Beiträge zu unserem Verständnis komplexer Systeme“ vergeben, die maßgeblich für Grundlagen von Untersuchungen zum Erdklima und weiteren komplexen Systemen waren.

Wie die folgenden Beiträge beispielhaft zeigen, helfen Ansätze aus der Physik entlang verschiedener Sichtachsen. Erstens haben wir aus vielen Bereichen der Physik, wie etwa der Thermodynamik und der Mechanik, umfassend gelernt, hochdimensionale Systeme mit wenigen beobachtbaren Größen und Parametern effektiv zu charakterisieren und zu modellieren. Zweitens sind viele Phänomene, die sich durch Selbstorganisationsprozesse in komplexen Systemen ergeben können, zumindest grundsätzlich mit den Methoden der Physik beschreibbar. Zum Beispiel lassen sich qualitative Verhaltensänderungen von Systemen mit den etablierten Theorien der Phasenübergänge aus der statistischen Physik und der Bifurkationstheorie aus der nichtlinearen Dynamik verstehen. Phänomene wie Hysterese, raumzeitliche Korrelationen und Erinnerungseffekte sind etwa in der Festkörperphysik oder der Optik gut bekannt. Drittens spielen auch physikalische Teilsysteme und deren Eigenschaften zur Bewältigung aktueller Herausforderungen eine bedeutende Rolle.

So kontrollieren beispielsweise quantenmechanische und andere physikalische Eigenschaften die Funktion von Batterien, etwa für Elektrofahrzeuge, sowie die Effizienz von Photovoltaikanlagen. Das sind nur zwei Beispiele, die jeweils für den nachhaltigen Umbau unserer Transportsysteme und unserer Energieversorgung essenziell sind.

Markus Bär, Philipp Hövel, Marc Timme, Michael Wilczek und Walter Zimmermann



DYNAMIK KOMPLEXER SYSTEME

Das menschliche Gehirn, das Erdklima oder lebende Organismen sind Beispiele für komplexe Systeme. Obwohl sie auf den ersten Blick hochkompliziert erscheinen, lassen sich mit den Methoden der Physik faszinierende Gesetzmäßigkeiten und grundsätzliche Eigenschaften in ihnen erkennen.

Der Begriff der komplexen Systeme entzieht sich bisher trotz einiger beachtenswerter wissenschaftsphilosophischer Versuche einer in allen Aspekten allgemein akzeptierten Definition. Praktisch alle einführenden Texte nennen jedoch die Wechselwirkung vieler Teilchen und die Fähigkeit, Ordnung auf makroskopischer Ebene auszubilden. Viele Autor:innen heben dazu die prominente Rolle von nichtlinearen Dynamiken und Rückkopplung als elementare Eigenschaft hervor. Im Ergebnis bilden sich in komplexen Systemen makroskopische Strukturen, die nicht durch die Systemelemente vorgegeben sind, sondern durch ihre Wechselwirkung untereinander und mit der Umgebung bei geeigneten Anfangs- und Randbedingungen entstehen (siehe auch „Nichtgleichgewicht und Strukturbildung“ auf Seite 31).

Die Bedeutung des Gebiets wurde 2021 durch die Vergabe des Physiknobelpreises „für bahnbrechende Beiträge zum Verständnis komplexer physikalischer Systeme“ betont. Einer der Preisträger, der italienische Theoretiker Giorgio Parisi, hält die Forschung zu komplexen Systemen für besonders interessant, auch weil hier viele Methoden der Physik in anderen Gebieten zum Einsatz kommen, wie z. B. bei Ökosystemen oder dynamischen Netzwerken. Darüber hinaus betont er, dass die grundlegenden Probleme komplexer Systeme häufig mit der Nichtgleichgewichtsphysik zu tun haben. Als interdisziplinäres Teilgebiet der Physik beschäftigt sich die Physik komplexer Systeme mit

- Dynamik, Selbstorganisation, Strukturbildung, Musterentstehung,
- konkurrierenden und/oder heterogenen Wechselwirkungen,
- Nichtlinearität, Aktivität und/oder Stochastizität,
- Nichtgleichgewicht, offenen Systemen,
- Rückkopplung, Adaption und Gedächtnis,
- Multiskalendynamik, z. B. Kritikalität, Turbulenz,
- deterministischem Chaos, Sensitivität gegenüber Anfangsbedingungen.

Auch auf dem Gebiet der Physik komplexer Systeme ist die Verzahnung von Theorie und Beobachtung bzw. Experiment zentral. Dies umfasst Simulationen von adäquaten Modellen und die Analyse großer Datensätze. Dementsprechend kommen umfänglich computergestützte Verfahren zum Einsatz. Zu den vielen Beispielen gehören u. a. die Physik der Fluide, die biologische Physik von der Zelle bis zum Schwarmverhalten von Spezies, vernetzte Systeme einschließlich sozialer Netzwerke oder Vegetation und Klima.

Untereinander und mit der Umgebung

Im 19. Jahrhundert entstand basierend auf Arbeiten von Rudolf Clausius, Josiah Willard Gibbs und anderen die Thermodynamik als eine Theorie der makroskopischen Zustände der Materie, die in wenigen zentralen Aussagen, den thermodynamischen Hauptsätzen, zusammengefasst werden kann. Schon früh entwickelten Ludwig Boltzmann und andere sie zur statistischen Mechanik weiter. Dahinter steckt die atomistische Vorstellung von Materie, in der man es mit Systemen von miteinander wechselwirkenden Teilchen zu tun hat, die sich in ihrer Gesamtheit beschreiben lassen. So erlaubte die statistische Thermodynamik vorherzusagen, welcher Gleichgewichtszustand sich in einem geschlossenen System einstellen wird, ohne dabei Aussagen über einzelne Bestandteile des Systems machen zu müssen. Dabei wurden grundlegende Begriffe wie Temperatur, (freie) Energie und Entropie entwickelt, mit denen die Vielfalt der materiellen Phänomene untersucht und besser verstanden werden kann.

Interessante kollektive Vielteilcheneffekte sind Phasenübergänge wie Gefrieren oder Schmelzen, der Übergang vom Metallen zwischen einem nichtmagnetischen und magnetischen Zustand oder auch Perkolation. Phasenübergänge werden in der Regel mit dem (kontinuierlichen oder auch abrupten) Auftauchen eines von Null verschiedenen Ordnungsparameters verbunden und trennen demzufolge häufig eine geordnete und eine ungeordnete Phase. Bei einem sprunghaften (unstetigen) Übergang spricht man von einem Phasenübergang erster Ordnung. Geschieht der Übergang allmählich (stetig), so handelt es sich um einen Phasenübergang zweiter Ordnung. Dabei gibt es in der Regel einen kritischen Punkt, in dessen Umgebung das System stark von Fluktuationen dominiert wird. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde gezeigt, dass die Systemeigenschaften häufig nicht von den Details, sondern nur von der Symmetrie des Ordnungsparameters oder der räumlichen Dimension des Systems abhängen. Somit sind Phasenübergänge zweiter Art einigen wenigen Universalitätsklassen zuzuordnen und können durch entsprechende Skalierungsgesetze umfassend beschrieben werden.

In den vergangenen Jahrzehnten hat die Physik verstärkt solche Phasenübergänge im Nichtgleichgewicht untersucht. Dabei betrachtet sie offene makroskopische Systeme, die sich durch die permanente Zu- und Abfuhr von Energie, Stoffen und/oder Information auszeichnen.

◀ Visualisierung einer turbulenten Strömung aus einer Computersimulation: Gezeigt ist der Betrag der Geschwindigkeit in einem Schnitt durch die dreidimensionale Strömung.

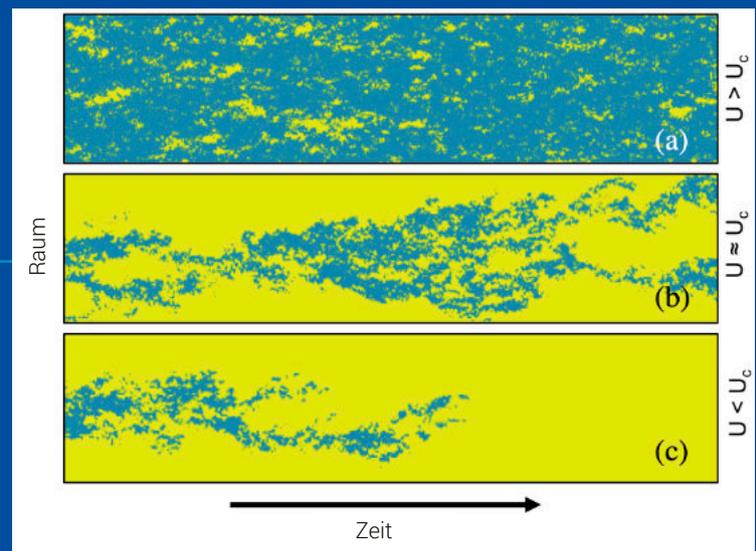
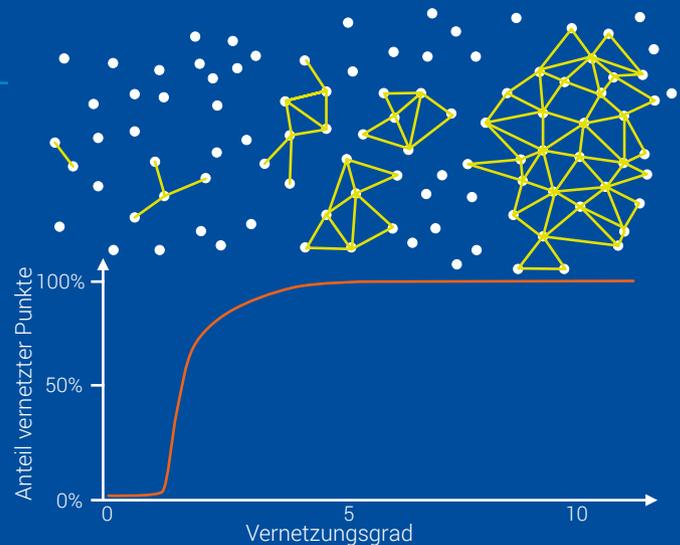
PERKOLATION

(lateinisch percolatio: Durchsickerung) beschreibt das Entstehen (oder umgekehrt das Verlorengehen) von makroskopischer Verbindungsfähigkeit in vernetzten Systemen.

Bei der **klassischen Perkolation** geht es z. B. um die Frage, ob sich in einem heterogenen Material leitfähige Bereiche so organisieren, dass sich eine durchgehende Verbindung durch das ganze System bildet. Dazu muss der Anteil leitfähiger Bereiche einen kritischen Wert, den sogenannten Perkolationspunkt, überschreiten, an dem die Leitfähigkeit schlagartig zunimmt – das Material hat sich dann von einem Isolator in einen Leiter verwandelt. Mit mehr und mehr Kanten, d. h. einer größeren Wahrscheinlichkeit p für Verbindungen, wachsen anfänglich kleine Gruppen von verknüpften Einheiten zu einem großen, systemweit verbundenen Netzwerk zusammen. Als Ordnungsparameter P dient die Größe der zusammenhängenden Netzwerkkomponente. Oberhalb des kritischen Perkolationspunkts p_c wächst $P(p)$ entsprechend eines Skalierungsgesetzes $(p-p_c)^a$ mit dem kritischen Exponenten a an.

Bei der gerichteten Perkolation bildet sich das Netzwerk mit einer Vorzugsrichtung aus. Dies lässt sich mit einer Kaffeemaschine (englisch: coffee percolator) veranschaulichen: Während das Wasser sich seine Kanäle durch das Kaffeepulver sucht, bewegt es sich insgesamt gesehen in die Vorzugsrichtung, die durch die Gravitation bestimmt wird. Die gerichtete Perkolation ist auch ein Paradebeispiel eines Nichtgleichgewichtsphasenübergangs. Es war eine große Überraschung, dass in den 2010er-Jahren der Übergang zur Turbulenz in vielen Geometrien inklusive der einfachen Rohrströmung durch die Universalitätsklasse der gerichteten Perkolation beschrieben wurde.

Bei Strömungen zwischen parallelen ebenen Wänden, die sich zueinander bewegen (**Couette-Experiment**), zeigen sich raumzeitliche Muster turbulenter und laminarer Gebiete. Bei einer langsamen Strömung unterhalb der kritischen Reynolds-Zahl ($U < U_c$) zerfällt die Turbulenz (unten), während an der kritischen Schwelle immer einzelne turbulente Bereiche im System erhalten bleiben (Mitte und oben). An einer festen Position kann die Turbulenz verschwinden und zu späterer Zeit wieder erscheinen. Auch oberhalb von U_c bleiben kleine, nicht turbulente Bereiche bestehen, die allerdings mit zunehmender Reynolds-Zahl wieder weniger werden.



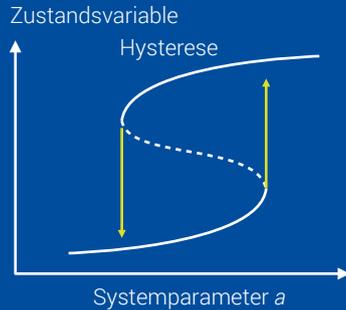
Nichtlinearität und Chaos

Im Gegensatz zu Gleichgewichtssystemen sind offene Systeme häufig durch komplexe Dynamiken gekennzeichnet, etwa durch periodische oder chaotische Oszillationen, Wellenausbreitung oder irreguläre Strukturbildung wie etwa Turbulenz. Dabei werden in vielen Fällen deterministische, nichtlineare Gleichungen als Modelle zur Beschreibung verwendet wie beispielsweise das Lorenz-Modell. Der Meteorologe Edward Lorenz hat dieses nach ihm benannte Modell als stark redu-

ziertes Modell für thermische Konvektion abgeleitet. Für diese stellt die nichtlineare Dynamik Werkzeuge zur Charakterisierung und zum Verständnis bereit. Was in der statistischen Physik als Phasenübergang behandelt wird, stellt sich hier nun als Verzweigung oder **Bifurkation** dar. Das können zum Beispiel sprunghafte Änderungen eines stationären Zustands sein, wie sie im Zusammenhang mit Hysterese in bistabilen Systemen auftreten. Hier spricht man von Sattel-Knoten-Bifurkationen – auch bekannt als „Kippunkte“, wie sie in der Diskussion um die Änderung des Erdklimas (siehe

HYSTERESE

(altgriechisch ὑστέρησις, *hystérēsis*: später) beschreibt die Abhängigkeit des Zustands eines Systems von seiner Vergangenheit.



Mit Zunahme eines Systemparameters a ändert sich der Zustand eines Systems zunächst kontinuierlich und nimmt ab einem gewissen Wert schlagartig zu (gelb). Eine direkte Umkehr dieses Sprungs ist nicht möglich. Stattdessen folgt das System bei Abnahme des Parameters a einem anderen Ast, bis es wieder auf das ursprüngliche Niveau zurückspringt. Der Zustand des Systems bei Hysterese ist damit nicht nur durch die aktuellen externen Bedingungen beschrieben, sondern hängt auch von den Zuständen des Systems in der Vergangenheit ab. Ein solches Verhalten ist z. B. aus dem Magnetismus bekannt: Die Magnetisierung eines Ferromagneten folgt bei zunehmendem und anschließend abnehmendem Magnetfeld auf dem Weg zur Umpolung unterschiedlichen Kurven.

„Kippdynamiken im Erdsystem“ auf Seite 123) oder bei den Übergangsszenarien von Vegetation in Trockengebieten verwendet werden.

Das Einsetzen von Oszillationen wird durch eine Reihe anderer Bifurkationen vermittelt (z. B. durch eine Hopf-Bifurkation, bei der ein Fixpunkt in eine periodische Dynamik übergeht). Reguläre periodische Oszillationen können wiederum auf verschiedenen Wegen in irreguläre, chaotische Oszillationen übergehen, etwa durch Periodenverdopplung.

Chaotische Systeme sind komplexe Systeme, deren zeitliches Verhalten sehr empfindlich auf unterschiedliche Anfangsbedingungen reagiert. Sie zeigen ein scheinbar zufälliges, dynamisches Verhalten, das aber durch die physikalischen Gesetze und ihre mathematischen Gleichungen, wie z. B. dem **Lorenz-Modell**, vollständig festgelegt, also deterministisch ist. Was uns hier als Zufall erscheint, sind fehlende Kenntnisse des Anfangszustands. Kleine Abweichungen der Anfangsbedingungen führen im Laufe der Zeit aber zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, weshalb eine langfristige Vorhersagen für chaotische Systeme wie etwa das Wetter unmöglich ist. Diese Sensitivität wird manchmal auch als Schmetterlingseffekt bezeichnet, was aber nicht

wörtlich zu nehmen ist, da ein reales System laufend Störungen ausgesetzt ist.

Eine Oszillation kann durch deren Amplitude und Frequenz charakterisiert werden. Zur Charakterisierung von Chaos wurde das Konzept der sogenannten **seltsamen Attraktoren** eingeführt. Diese Attraktoren besitzen eine gebrochenezahlige Dimension, die zwischen chaotischen Systemen variiert. Das Verständnis von Chaos hat Auswirkungen auf Bereiche wie Meteorologie und Kryptografie.

Werden neben einer zeitlichen Dynamik auch räumliche Veränderungsmöglichkeiten mit einbezogen, ergeben sich eine Reihe faszinierender Musterbildungen, zu denen verschiedene Wellenformen, stationäre Strukturen sowie raumzeitliches Chaos und voll entwickelte Turbulenz gehören.

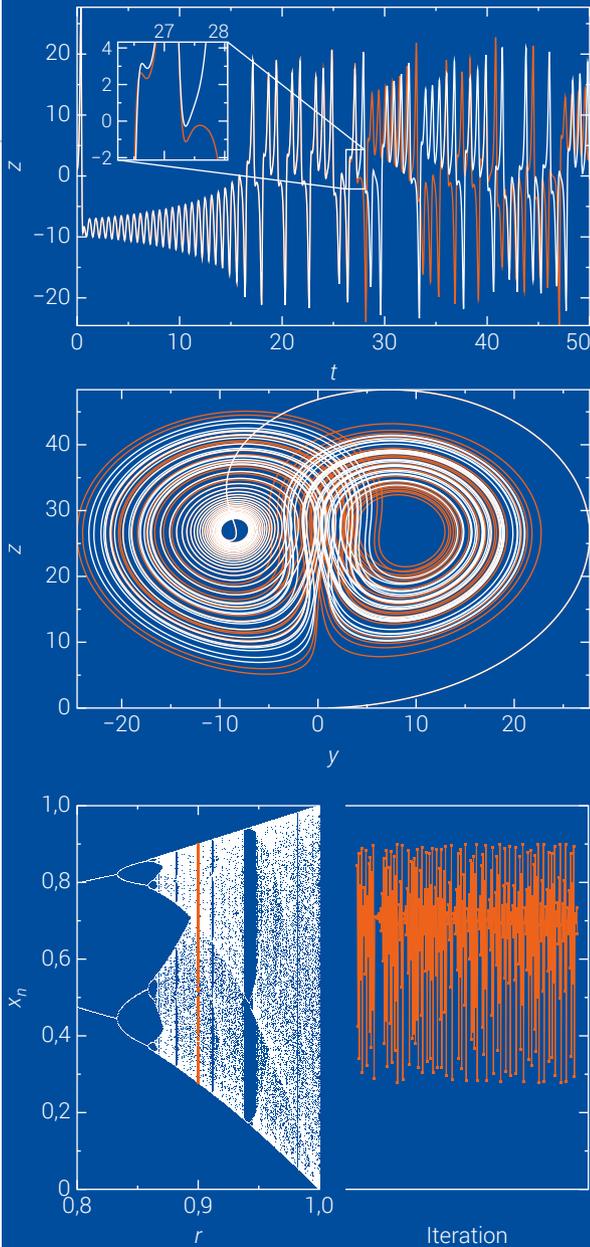
Allgegenwärtig und hochkomplex: Turbulenz

Turbulenz begegnet uns tagtäglich als raumzeitliche chaotische Fluidbewegung mit Wirbeln – beim Rühren in der Kaffeetasse, in Bächen und Flüssen oder als Luftbewegung, sichtbar etwa bei aufsteigenden Rauchschwaden oder der Wolkenbildung. Für eine präzisere Vorhersage des Wetters und des Klimas, aber beispielsweise auch für die Konstruktion von Flügeln von Windenergieanlagen oder das Verhalten von Plasma in Fusionsreaktoren, müssen wir Turbulenz verstehen, vorhersagen oder kontrollieren können. Bis heute stellt uns Turbulenz jedoch vor große wissenschaftliche Herausforderungen.

Turbulenz tritt in vielen komplexen Systemen fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht auf. Sie ist selbst komplex, weil schon verhältnismäßig einfache turbulente Strömungen viele Millionen Freiheitsgrade aufweisen. Turbulenz kann nur im Nichtgleichgewicht aufrechterhalten werden – durch eine ständige Energiezufuhr, die die typischen Wirbelbewegungen erzeugt. Diese offenbaren eine weitere Eigenschaft von Turbulenz: Chaos, d. h. raumzeitlich irreguläres Verhalten, das sich letztlich nur statistisch beschreiben lässt. Eine der Hauptaufgaben der Physik ist es, eine solche statistische Beschreibung zu entwickeln: Nicht die Frage, wann genau eine Windböe auf den Flügel einer Windkraftanlage trifft, ist entscheidend, sondern wie häufig und mit welcher Wucht das passiert.

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich unser Verständnis von Turbulenz erheblich verbessert. Ausgehend von den klassischen Experimenten des britischen Physikers Osborne Reynolds aus dem späten 19. Jahrhundert haben Forschende in einer Vielzahl von Experimenten und Computersimulationen die Entstehung von Turbulenz untersucht und charakterisiert. So lässt sich in Rohrströmungen beispielsweise beobachten, wie sich turbulente Bereiche auf eine komplexe Weise ausbreiten, die der gerichteten Perkolationsentspricht. Diese Art von Übergang tritt in einer Vielzahl von Systemen in der statistischen Physik auf, was Turbulenz zu einem prototypischen Problem aus dem Bereich der komplexen Systeme macht.

CHAOTISCHE SYSTEME



Die oberen zwei Abbildungen zeigen das Lorenz-Modell. Die Systemgröße $z(t)$ in diesem Modell ist oben für zwei Simulationen gezeigt (orange und weiss). Dabei unterscheiden sich die beiden Startbedingungen nur um winzige 10^{-10} , aber ab ca. 27 Zeiteinheiten beginnen sich die beiden Kurven stark voneinander zu unterscheiden. Diese Sensitivität gegenüber Anfangsbedingungen ist typisch für deterministisches Chaos. Der mittlere Teil zeigt die Projektion des **Lorenz-Attraktors** auf die Ebene der zwei Systemgrößen y und z (Größe x hier unsichtbar senkrecht dazu). Die zwei Trajektorien beginnen bei $y = 0$ und $z = 0$ und führen zunächst in das linke Auge des Attraktors. Die Kurven springen dann unregelmäßig zwischen der linken und rechten Halbebene hin und her.

Die untere Abbildung zeigt die **Periodenverdopplung** am Beispiel der Sinus-Abbildung $x_{n+1} = r \cdot \sin(\pi \cdot x_n)$ mit einem Übergang von regulärem zu chaotischem Verhalten. Bei niedrigen Werten von r pendelt sich das System auf einen festen Wert x ein. Bei $r \approx 0,72$ (hier links außerhalb der Skala) stellt sich eine Periodenverdopplung ein, d. h., x_n schwankt nun zwischen zwei Werten. Bei einer weiteren Erhöhung von r stellen sich schrittweise weitere Verdopplungen der Periode ein, x_n schwankt zwischen 4, 8 oder 16 verschiedenen Werten. Dieser Prozess der Periodenverdopplung (es dauert jeweils doppelt so lange, bis x_n den gleichen Wert hat) wiederholt sich in immer kleinerem Abstand von r , bis das System in einen Zustand chaotischen, unvorhersehbaren Verhaltens übergeht, bei dem die Werte von x_n sich gar nicht wiederholen (orange; im rechten Teilbild ist die Abfolge von 300 Iterationen dargestellt, im linken sind zu jedem Wert von r die 300 x_n -Werte übereinandergezeichnet). Diese Kaskade von Bifurkationen ist ein Kennzeichen chaotischer Systeme und kann bei verschiedenen natürlichen Phänomenen beobachtet werden, z. B. in der Flüssigkeitsdynamik und in elektronischen Schaltkreisen. Auffällig ist hier auch, dass für bestimmte Bereiche für r etwa bei 0,94 wieder nichtchaotische periodische Folgen zwischen festen Werten auftauchen.

Die beiden komplexen Erscheinungen ergeben sich aus sehr einfachen Rechenvorschriften von nichtlinearen Gleichungen.

Auch für vollständig turbulente Strömungen sind in den vergangenen Jahrzehnten Fortschritte erzielt worden. Inzwischen lässt sich mit optischen Messtechniken die volle dreidimensionale Strömung eines Fluids sichtbar machen. So knüpfen experimentelle Messungen inzwischen nahtlos an Computersimulationen an, die durch die rasant gestiegene Computerleistung ungeahnte Einblicke in die raumzeitliche Struktur der Turbulenz liefern. Feinste Wirbelstrukturen und ihre Wechselwirkungen lassen sich damit sichtbar machen. Daher befinden wir uns in einer spannenden Phase der Turbulenzforschung, die sich durch eine enge Verzahnung von Experiment, Simulation und Theorie auszeichnet.

Die Herausforderungen der kommenden Jahre werden sowohl darin bestehen, die rapide wachsenden Datenmengen in der Turbulenzforschung als auch von zahlreichen weiteren komplexen Systemen systematisch zu analysieren. Auch hier

haben neue Techniken, wie maschinelles Lernen, erfolgreich Einzug gehalten. Wie diese Entwicklungen zu verbesserten vorhersagefähigen Modellen und Theorien sowohl für Turbulenz als auch für komplexe Systeme fernab des thermischen Gleichgewichts oder gar zur Entdeckung neuer Phänomene führen können, müssen kreative Forscher:innen in der Zukunft zeigen.

*Markus Bär, Philipp Hövel,
Michael Wilczek und Walter Zimmermann*



KOMPLEX, CHAOTISCH, VERSTEHBAR
Manche Systeme sind so komplex, dass sie beim ersten Hinsehen kaum zu verstehen sind – etwa das Wetter. Doch aufgrund bahnbrechender Ideen und trickreicher Methoden kann man selbst solche Phänomene durchdringen, wie die Physiknobelpreisträger des Jahres 2021 bewiesen haben.

Wetter und Klima werden durch viele ineinandergreifende physikalische Prozesse bestimmt. Die Dynamik der Atmosphäre und damit das Wetter ändert sich innerhalb weniger Tage. Dagegen variiert die Oberflächentemperatur der Ozeane, als Indikator für die Klimadynamik, nur langsam über Monate bis hin zu mehreren Jahrzehnten. Auch räumlich erstrecken sich die Skalen von der Bildung von Regentropfen und Eiskristallen in Wolken über kontinentale Wettersysteme bis hin zu globalen Ozeanströmungen. Wesentliche Freiheitsgrade und Interaktionen von Wetter und Klima zu identifizieren sowie in Modellen und Computersimulationen mit Vorhersagekraft abzubilden, ist ein großer Erfolg der letzten Jahrzehnte. Für ihre theoretischen Arbeiten zur Klimaforschung und zur Physik ungeordneter Systeme erhielten [Syukuro Manabe](#), [Klaus Hasselmann](#) und [Giorgio Parisi](#) daher den Nobelpreis für Physik 2021.

Manabe erkannte als Erster im komplexen Klimasystem drei Schlüsselprozesse, um die Auswirkung der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre auf die [Erderwärmung](#) theoretisch vorherzusagen: So erfolgt Energietransport nach unten durch kurzwellige Sonnenstrahlung, dagegen nach oben durch langwellige terrestrische Strahlung zusammen mit dem vertikalen Wärmetransport durch Konvektion in der Atmosphäre. Eine Erhöhung des Treibhausgases Kohlendioxid reduziert die terrestrische Energieabstrahlung und führt zur direkten Erhöhung der Temperatur in der Atmosphäre. Die damit einhergehende Erhöhung des Wasserdampfgehalts verstärkt den Treibhauseffekt zusätzlich.

Manabe prognostizierte aufgrund dieser drei Schlüsselprozesse bereits 1967, dass eine Verdopplung der mittleren Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre zu einer Erhöhung der mittleren Oberflächentemperatur um 2,4 Grad führt. Dieser Wert liegt nahe an dem, was heutzutage viel detailliertere Modelle berechnen. Auch der vorhergesagte „vertikale Temperatur-Fingerabdruck“ ist durch Sonden- und Satellitenmessungen inzwischen global belegt.

Klaus Hasselmann gelang zuerst eine Erklärung der beobachteten, langsamen [Klimaschwankungen](#). 1963 hatte der Meteorologe Edward Lorenz entdeckt, dass die Atmosphärenbewegung chaotisch ist, was langfristige Wettervorhersagen prinzipiell unmöglich macht. Hasselmann interpretierte

die schnelle chaotische Wetterdynamik in seiner Wirkung auf das langsame Klima als zufälliges Rauschen. Dieser Perspektivwechsel war die erste Formulierung eines stochastischen Klimamodells. Hasselmann zeigte so, dass die Ursache für natürliche Klimaschwankungen das schnelle [Wetterrauschen](#) ist.

Wie kann man aber den Klimawandel an den viel größeren, durch Wetterwechsel verursachten Messsignalen ablesen? Hasselmanns richtungsweisender Vorschlag bestand darin, einerseits nach typischen Veränderungsmustern in Wetterbeobachtungsdaten aus den letzten Jahrzehnten zu suchen. Diese Muster wurden andererseits nun mithilfe vielfach getesteter Modelle untersucht: Zeigten sie sich in den Modellsimulationen ohne Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen nicht, so belegte dies einen Zusammenhang zwischen der Änderung der Treibhausgaskonzentration und der Erderwärmung. Die Methode der Entdeckung und Zuschreibung von Entwicklungen von Klimagrößen hat sich inzwischen zu einem eigenständigen Bereich auch in der Klimaforschung entwickelt, der [Attributionsforschung](#).

Giorgio Parisi hatte sich einem weiteren Problem gewidmet: In den 1950er-Jahren waren [Spin-Gläser](#) entdeckt worden – verdünnte magnetische Legierungen, die aus nichtmagnetischen Metallen wie Kupfer, Silber oder Gold bestehen. Ihnen sind geringe Mengen magnetischer Atome beigemischt. Anders als in einem magnetischen Material wie Eisen, in dem sich die atomaren magnetischen Momente gleich ausrichten, herrscht in Spin-Gläsern auf mikroskopischer Ebene Unordnung: Aufgrund der Wechselwirkung mit den Fremdatomen sind die atomaren magnetischen Momente scheinbar zufällig ausgerichtet, was zu komplexen und zunächst rätselhaften Eigenschaften dieser Materialien führt. Parisi gelang es, dieses komplexe Zusammenspiel mathematisch zu beschreiben. Die wesentliche Idee sei, „dass es in dieser Art von Systemen mehrere Gleichgewichte gibt“, so der Physiker.

Parisis Theorie lässt sich auf viele verschiedene und scheinbar völlig zufällige Materialien und Phänomene anwenden – nicht nur in der Physik, sondern auch in anderen, sehr unterschiedlichen Wissenschaften wie der Mathematik, der Biologie, den Neurowissenschaften und dem maschinellen Lernen. Nicht zu vergessen sind auch Parisis fundamentale Anstöße zur Theorie zur [stochastischen Resonanz](#) bei sehr langfristigen Klimaänderungen oder zum komplexen System der Vogelschwärme.

Thomas Stocker und Walter Zimmermann

↑ **Titelbild:** Temperaturänderung der Erde: Die Gruppe von Klaus Hasselmann konnte mithilfe ihrer Simulationen 1997 zeigen, dass der gemessene Anstieg der Erdoberflächentemperatur (orange) nur durch die menschenverursachte Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre erklärbar ist (blaue Linie). Ohne diese Erhöhung ergab sich kein Trend für einen Temperaturanstieg (graue Linie).

WIDERSTANDSFÄHIG, DA KOMPLEX

Komplexität erlaubt Systemen zusätzliche Reaktionsoptionen: Sie ermöglicht beispielsweise Vegetationen, auf verschiedene Weisen auf häufig menschengemachte Umweltveränderungen zu reagieren, und macht sie dadurch widerstandsfähiger.

Der aktuelle Klimawandel sowie häufigere und intensivere Klimaextreme wie Dürren oder Starkregenereignisse verändern oder bedrohen ganze Ökosysteme: Wichtige Pflanzenspezies können verdrängt werden, sodass die Artenvielfalt verändert oder bedroht wird. Wie genau Ökosysteme auf zukünftige Klimaextreme reagieren werden, ist aufgrund von deren Komplexität jedoch schwierig vorherzusagen. Die Komplexität von Vegetationen besitzt einen wichtigen positiven Aspekt: Sie verspricht unter anderem, nachteilige Auswirkungen von Niederschlagsrückgängen abzuschwächen, weil sie dem Ökosystem erlaubt, auf verschiedene Weisen auf die Veränderungen zu reagieren.

Aktuelle und empirisch bestätigte mathematische Modelle erfassen zwei Reaktionsmechanismen: Zum einen kann sich Pflanzenbewuchs in räumlichen Mustern organisieren (Populationsebene). Zum anderen können Arten, die in Wachstum investieren, durch Arten, die tolerant gegenüber Wasserstress sind, ersetzt werden (Gemeinschaftsebene). Es ist die Rückkopplung zwischen Vegetationswachstum und dem Transport von Wasser im Boden, die beispielsweise überlebensfähige Muster aus Vegetation und kahlen Flächen entstehen lässt.

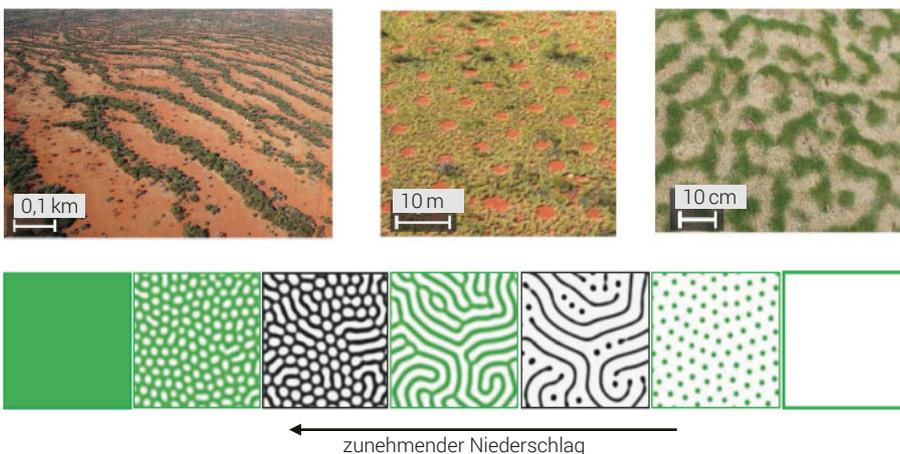
Bekämpfung der Wüstenbildung

Die Wüsten auf der Erde dehnen sich seit Jahrzehnten aus: Laut Angaben der Vereinten Nationen sind mehr als 30 Prozent der Vereinigten Staaten von Wüstenbildung betroffen. Auf der anderen Seite des Atlantiks droht ein Fünftel der spanischen Landmasse zu einer Wüste zu werden. Zahlreiche Beobachtungen und mathematische Vegetationsmodelle

zeigen, dass eine homogene Vegetation bei zunehmender Trockenheit nicht schlagartig verschwindet. Vielmehr bildet sich in Bereichen mit niedrigen Niederschlagsmengen durch Selbstorganisation ein räumlich modularer Pflanzenbewuchs. Auf diese Weise können Pflanzen über die Wurzeln auch die auf unbewachsenen Flächen versickerten Niederschläge mitnutzen. In der unteren Reihe der Abbildung ist ein universelles Szenario von dichtem Pflanzenbewuchs hin zur Wüste bei abnehmenden Niederschlägen zu sehen. Wüstenbildung nach einem über mehrere Jahre zunehmend ausgedünnten Vegetationsmuster ist ein Beispiel für einen Kippunkt: Eine Neubegrünung benötigt ohne äußere Eingriffe erst einmal wesentlich mehr Wasserzufuhr, als die Erhaltung von ausgedünnten Vegetationsmustern. Der Übergang von geschlossener Vegetation zur Wüste und zurück hat somit die Form einer Hysterese.

Eine zentrale Erkenntnis aus der Erforschung der fortschreitenden Wüstenbildung ist somit, dass durch räumliche Strukturbildung der Vegetation deren Resilienz gegenüber geringeren Niederschlagsmengen gestärkt wird. Die Erforschung von weiterentwickelten Modellen zur Beschreibung der Komplexität von Ökosystemen – hier die räumliche Selbstorganisation – wird weitere Ideen zur Bekämpfung der Wüstenbildung und damit zur Stabilisierung von Ökosystemen liefern. Diese Ergebnisse werden wichtige Hilfen für politische Entscheidungen bereitstellen.

Markus Bär, Ehud Meron
und Walter Zimmermann



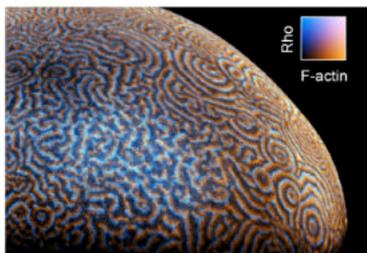
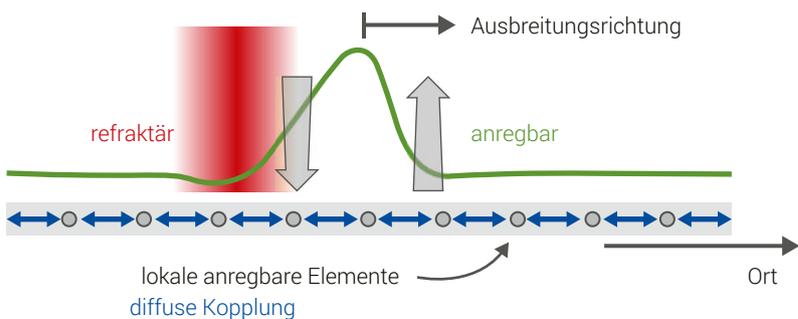
Oben: Typische Vegetationsmuster in trockenen Klimazonen: Streifen, periodische Löcher („Hexenkreise“) und Labyrinth auf unterschiedlichen Längenskalen. Unten: Eine Simulation zeigt eine universelle Abfolge von Vegetationsmustern mit von links nach rechts abnehmender Pflanzenbedeckung bis hin zur Wüste in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge. Der Übergang von homogener Vegetation zur Wüste erfolgt über Zwischenzustände von Streifen und Punkten (Spots).

VON SCHWÄRMEN UND SCHLEIMPILZEN

Biologische Systeme stellen eine der größten Klassen komplexer Systeme dar. Die Physik komplexer Systeme spielt deshalb hier eine wichtige Rolle, um die Vorgänge innerhalb einzelner Zellen, aber auch kollektives Zusammenwirken bis hin zur Schwarmbildung zu verstehen.

Wie bilden sich die Punkte auf dem Leopardenfell und die Streifen beim Zebrafisch? Wie formen sich geordnete Gewebestrukturen im Zuge der Embryonalentwicklung? Und wie entsteht das kollektive Verhalten von Ameisen, Fischen oder Vögeln? Die universellen Prinzipien der Physik komplexer Systeme helfen zu verstehen, wie sich geordnete Strukturen und Prozesse in biologischen Systemen herausbilden. Dabei ist die biologische Physik nicht alleine als Anwendungsfeld der Komplexitätsforschung zu sehen, sondern vielmehr als eine treibende Kraft, die viele grundlegende Beiträge zu diesem Feld geliefert hat.

Thermodynamisch gesehen sind lebende Systeme offene Systeme, die Energie und Materie mit ihrer Umgebung austauschen. Sie bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten, deren Wechselwirkungen zur kollektiven Ausbildung räumlicher und zeitlicher Strukturen führen. Deren Dynamik wiederum ist durch nichtlineares und stochastisches Verhalten gekennzeichnet. Im Folgenden stellen wir drei übergeordnete Prinzipien vor, die die Dynamik komplexer biologischer Systeme auf ganz unterschiedlichen Skalen organisieren.



Oberes Teilbild: Schema der Ausbreitung von Wellen in einem anregbaren Medium. Unteres Teilbild: Proteinwellen in einer Froschzelle (links), Spiralwellen des Signalstoffs cAMP bei der Aggregation von Schleimpilzkolonien (rechts).

Anregbares Verhalten

Manche Systeme sind nicht so leicht aus der Ruhe zu bringen: Kleine Störungen in einer Nervenzelle klingen sofort wieder ab, ebenso wie ein kleiner Funke in einem intakten Wald erlischt. Überschreitet die Störung jedoch eine kritische Schwelle, so setzt ein nichtlinearer Verstärkungsprozess ein. Beispiel Nervenzelle: Wird die elektrische Spannung an der Membran einer Nervenzelle nur geringfügig gestört, so passiert im Ganzen gesehen nichts. Ist die Störung jedoch groß genug, so öffnen sich in der Zellmembran Kanäle. Weitere Natriumionen strömen in die Zelle und verstärken die Störung des Membrangleichgewichts; die Zelle ist erregt. Analog mag vielleicht ein Funke den intakten Wald nicht in Flammen aufgehen lassen; handelt es sich aber um ein Lagerfeuer, das auf umliegende Bäume übergreift, so hat man es bald mit einem sich unkontrolliert ausbreitenden Brand zu tun. Die Feuerfront lässt einen abgebrannten Wald zurück, in dem ein neues Feuer keinen Großbrand mehr verursacht. Hat sich die Anregung also erst einmal im ganzen System ausgebreitet, so befindet sich dieses in einem inaktiven, also vorübergehend blockierten sogenannten **Refraktärzustand**. Das gilt auch für die Nervenzelle: War sie erst vor Kurzem erregt, kann sie temporär nicht auf einen neuen Reiz reagieren. Das System muss sich erst regenerieren, bevor sich eine neue Anregung ausbreiten kann: Neuer Wald muss nachwachsen, und die Ionenpumpen in der Membran müssen den Ruhezustand wiederherstellen.

Das grundlegende Schema des Anregungszyklus – überkritische Störung, nichtlineare Verstärkung und Abklingen in einen Refraktärzustand – wurde erstmals in den 1950er-Jahren durch Alan Lloyd Hodgkin und Andrew Fielding Huxley formuliert, um Messungen an den Nervenfasern des Tintenfischs zu erklären. Ihre später mit dem Medizinnobelpreis ausgezeichneten Arbeiten wurden verallgemeinert und seitdem in zahlreichen biologischen Systemen identifiziert. Sind lokale Elemente, die einen solchen Anregungszyklus durchlaufen können, räumlich mit weiteren, ebenfalls anregbaren Elementen gekoppelt, können sich Anregungswellen ausbilden, die in zweidimensionalen Systemen eine charakteristische, oft universell auftretende Spiralform annehmen. Diese Wellen lassen sich mathematisch erfassen, indem die anregbare Dynamik durch eine Reaktionskinetik beschrieben wird und die räumliche Kopplung zwischen den anregbaren Elementen durch diffusiven Transport.

Dies hilft nicht nur bei der Erklärung, wie sich elektrische Signale entlang der Zellmembran ausbreiten, sondern bei

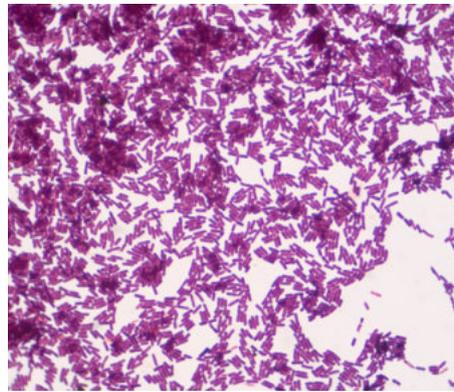
spielsweise auch beim Verstehen der Prozesse, die innerhalb einer Zelle zu deren Fortbewegung führen. Auch auf multizellulärer Ebene lassen sich anregbare Wellen beobachten, beispielsweise bei der Ausbreitung elektrischer Signale im Herzwesen. Ebenso können ganze Organismen anregbares Verhalten zeigen, wie etwa Fische, deren Fluchtreaktion innerhalb eines Schwarms selbige bei den Nachbarn auslösen kann. Auch bei Menschen zeigt sich dies etwa in einem Stadion: Sie springen auf und regen dadurch ihre Nachbarn ebenfalls zum Aufspringen an, sodass sich eine „La-Ola-Welle“ durch die Menschenmenge ausbreitet.

Kollektive Dynamik und Schwarmbildung

Kollektives Verhalten aktiver Agenten spielt auf vielen biologisch relevanten Skalen eine Rolle: Innerhalb von Zellen bilden Biopolymere typische Strukturen. Manche Bakterien schließen sich in Kolonien und Biofilmen zusammen. Auch bei der Wundheilung oder der Bildung von Krebsmetastasen spielt die Fähigkeit von Zellen, aktive koordinierte Bewegungen hervorzubringen und Verbände zu bilden, eine entscheidende Rolle.

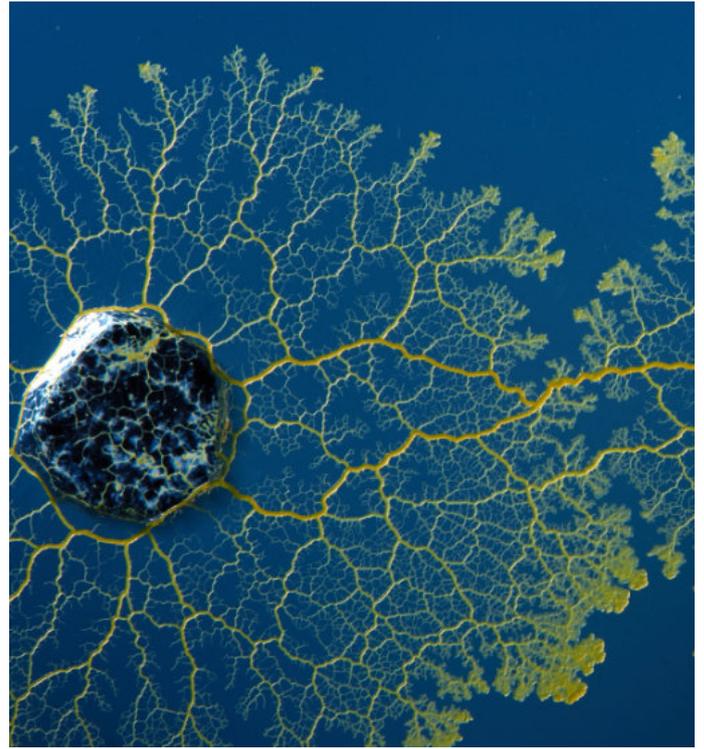
Im Alltag begegnet uns die kollektive Bewegung in Form von Schwärmen von Fischen, Heuschrecken und Vögeln. Wie auch auf der Ebene der Zellen und Mikroorganismen sind dabei die Symmetrie und Reichweite der Wechselwirkungen sowie die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen von entscheidender Bedeutung für die resultierende kollektive Dynamik und Strukturbildung. So organisieren sich Bakterien durch ein Wechselspiel von sterischen Wechselwirkungen mit kurzer Reichweite und hydrodynamischen Wechselwirkungen mit großer Reichweite: Die sterischen Wechselwirkungen sind durch die räumliche Form der Bakterien bedingt – sie führen dazu, dass sich die stäbchenförmigen Organismen in bestimmten Strukturen organisieren. Hydrodynamische Wechselwirkungen werden durch die umgebende Flüssigkeit übertragen. Sie können chaotische Wirbelstrukturen verursachen, die gemeinhin als aktive Turbulenz bekannt sind.

Die faszinierenden kollektiven Bewegungsmuster von Fischen, wie hochgeordnete polare Schwärme oder tornadoartige Wirbelstrukturen, können mit nur drei effektiven Wechselwirkungen erklärt werden: kurzreichweitige Abstoßung, um Kollisionen zu verhindern, ferromagnetisch-artige Ausrichtung mit Nachbarn auf mittlere Entfernungen und langreichweitige Anziehung. Bei kannibalistischen Heuschrecken sind die Reaktionen auf Artgenossen stattdessen eher durch Flucht- und Folgeverhalten geprägt, welche ebenfalls zu hochgeordneten, dynamischen Clustern und Bändern führen. In der Regel nimmt in all diesen Fällen die Stärke der Wechselwirkung im Schwarm mit abnehmendem Abstand zu (metrische Wechselwirkung) – mit Ausnahme von Vögeln, die sich unabhängig vom Abstand am nächsten Nachbarn orientieren (topologische Wechselwirkung). Topologische Wechselwirkungen stellen die Abstimmung eines Schwarms sicher, während metrische Wechselwirkungen häufig zur Separation einer großen Gruppe in kleinere unabhängige Untergruppen und zu starken lokalen Dichteschwankungen füh-



Beispiele für Schwarmbildung in verschiedenen Organismen. Von oben nach unten: Bakterienkolonie, Fischschwarm, Heuschreckenschwarm, Vogelschwarm.





Links: „Der Blob“: Makroskopische Zelle von *Physarum polycephalum* auf einem gefällten Baumstamm. Rechts: Zu den Enden hin verzweigt die Struktur in feinen Ästen.

ren. Viele Schwarmbildungen haben in der Regel wichtige biologische Funktionen: Individuen im Schwarm können das Verhalten ihrer Nachbarn beobachten und diese soziale Information nutzen. Räuber können im Schwarm früher entdeckt werden („Viele-Augen-Prinzip“), oder es können Viele vom Wissen Einzelner profitieren, z. B. über Nahrungsquellen. Auch das Risiko einzelner Tiere, vom Räuber fokussiert und herausgefangen zu werden, verringert sich.

Dynamik von Netzwerken

Das Überleben gelingt aber nicht nur in Schwärmen, sondern auch einfache, einzelne Organismen können sich dynamisch an ihre Umwelt anpassen und eigenständige Verhaltensweisen zeigen. Der Einzeller [Physarum polycephalum](#) (der „wahre“ Schleimpilz) fasziniert Forschende seit Langem, weil er auch ohne zentrales Nervensystem komplexe Aufgaben löst, wie beispielsweise die Optimierung von Pfaden in einem Labyrinth oder die Verteilung von Nahrung in Transportnetzwerken – und das, obwohl er nur aus einer einzigen gigantischen Zelle besteht, die zu einem röhrenförmigen Netzwerk geformt ist. Durch Flüssigkeitsströme und Transport, zusammen mit mechanisch-chemischer Kopplung zwischen den kontraktionsfähigen Röhren, kann dieses Netzwerk wachsen oder schrumpfen und sich anpassen.

Der netzförmige Körperbau des Schleimpilzes übertrifft die typische Zellgröße um viele Größenordnungen. Er kann bis zu einem Meter anwachsen und Millionen von Zellkernen umfassen. Die Netzwerkarchitektur erinnert an andere Transportnetzwerke in Pflanzen und höheren Lebewesen. Derzeit ist noch offen, inwieweit spezifische Formen der Netzwerkar-

chitektur mit Netzwerkfunktionen assoziiert werden können. Physarum kann zudem Informationen in verschiedenen Formen speichern. Aktuell wird untersucht, wie lange solche Informationen gespeichert und verarbeitet werden. Die große Hoffnung der Forschung ist, dass entsprechende Erkenntnisse über den einfachen Organismus Physarum sich auf komplexere Transportnetzwerke, wie z. B. das Geflecht von Adern in verschiedenen Organen des Menschen, übertragen lassen. Dies könnte die Vorbeugung und Behandlung von Erkrankungen der Adernetzwerke verbessern.

Markus Bär, Carsten Beta, Pawel Romanczuk

ALLTAG IN EINER VERNETZTEN WELT

Die moderne Welt ist vielschichtig und manchmal unübersichtlich: Aus ihrer hochgradigen Vernetzung entspringen globale und fundamentale Phänomene und Herausforderungen wie der Klimawandel, Personen- und Gütertransport, Pandemien, Ökosysteme oder gesellschaftliche Meinungsbildung. Mithilfe der Physik lassen sich Gesetzmäßigkeiten in diesen komplexen Systemen erkennen.

In wenigen Stunden können Menschen über verschiedene Wege zu beinahe jedem Punkt der Erde reisen. Das tägliche Leben der meisten allerdings findet in räumlich stark begrenzten Bereichen statt: Schule, Arbeit, Freizeit, Familie, Hobbys usw. haben meist klar umgrenzte und lokale Orte und Auswirkungen. Gleichzeitig erleben wir, dass wir durch die Vernetzung vieler unterschiedlicher Ebenen miteinander wechselwirken und sich unsere zwischenmenschlichen sowie technologischen Bereiche überlappen: Wir erfahren sofort, wenn auf einem anderen Kontinent ein Erdbeben oder ein wichtiges Sportereignis stattfindet. Wenn eine Bahnreise sich verspätet, lässt sich darauf schnell durch Umplanung reagieren. Solche komplexen Systeme, die sich durch lokale und langreichweitige, vielschichtige und verwobene Interaktionen auszeichnen, lassen sich nur mit einem ganzheitlichen Blick verstehen.

Die Physik trägt dazu bei, in diesen komplexen Gebilden Muster und Gesetzmäßigkeiten zu entdecken und Ordnung in

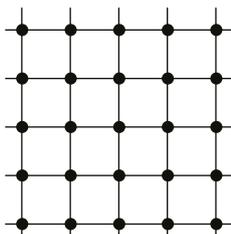
scheinbare Unordnung zu bringen. Zur Beschreibung der Realität dienen dabei Netzwerke gekoppelter Einheiten (Knoten, also Personen, Orte, Dinge, Ereignisse, ...), die Struktur ihrer Verknüpfungen untereinander (Kanten, also Freundschaften, Bahnverbindungen, Strom-/Internetverbindungen, kausale/chronologische Abläufe, ...) und ihre Untersuchung mit mathematisch-statistischen Methoden.

Krankheitsausbreitung in der modernen Welt

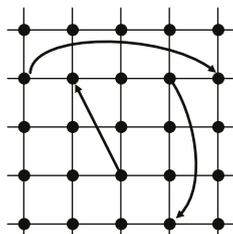
Besonders anschaulich treten der Grad, die Komplexität und die Vielschichtigkeit gesellschaftlicher Vernetzung bei der Dynamik von Infektionskrankheiten zu Tage. Viren oder Bakterien werden häufig durch direkte Kontakte übertragen, und die Ausbreitung in einer Population wird stark durch die Eigenschaften der Kontaktnetzwerke bestimmt. Durch Mobilität werden Erreger von Ort zu Ort getragen und breiten sich global auf Transport- oder Verkehrsnetzwerken aus, wie die Coronapandemie eindrücklich gezeigt hat. Dabei verändern

Netzwerke unterschiedlicher Komplexität: Gitter sind symmetrisch und alle Knoten haben die gleiche Anzahl von Nachbarn. Werden einige Verbindungen des Gitters durch langreichweitige Verbindungen ersetzt, erhalten einige Knoten zusätzliche Nachbarn und andere verlieren welche (die Anzahl der Nachbarn kann z. B. einer Gaußverteilung folgen). In einem Zufallsnetzwerk geht die räumliche Struktur verloren und die Knoten sind mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit verbunden. Die Anzahl der Nachbarn ergibt eine Poissonverteilung. Komplexe Netzwerke sind durch gleichzeitige Existenz von Bereichen größerer Konnektivität und lokalen Strukturen gekennzeichnet. Es gibt wenige Knoten mit vielen und viele Knoten mit wenigen Nachbarn. Der Begriff der räumlichen Distanz wird dabei aufgehoben. An seine Stelle tritt die Netzwerkdistanz: Die Anzahl der Kanten auf dem Weg zwischen zwei Knoten.

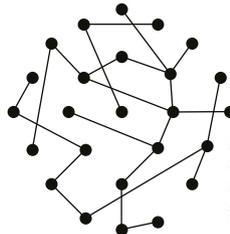
Gitter



Langreichweitige Kopplung



Zufallsnetzwerk

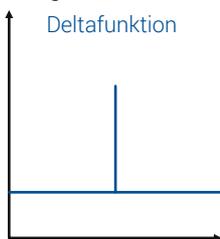


Komplexes Netzwerk

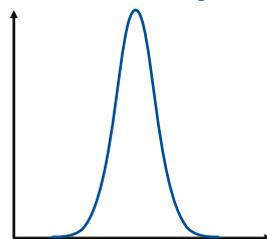


Häufigkeit

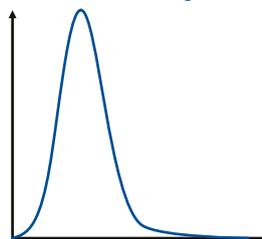
Deltafunktion



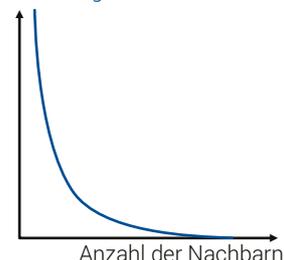
Gaußverteilung



Poissonverteilung



Potenzgesetz



sich die Netzwerkstrukturen ohne Unterlass und mit großen Konsequenzen: Ein gestriges Treffen mit einer erst heute ansteckenden Person ist für uns unschädlich. Häufig beeinflusst außerdem der Zustand der Netzwerkknoten die Wechselwirkung: Wenn wir uns krank fühlen oder um ein konkretes Risiko wissen, ändern wir unser Verhalten (bleiben etwa zu Hause) und vermeiden dadurch weitere Ansteckungen. Die Physik und moderne Netzwerkwissenschaft versuchen in diesem Kontext die Frage zu klären, welche Eigenschaften der zugrunde liegenden Netzwerke welche Aspekte der Ausbreitungsdynamik bestimmen. Gerade im Kontext der Coronapandemie waren Ergebnisse dieser Art besonders wichtig, weil fundamentale Erkenntnisse bei der Entwicklung von Eindämmungsstrategien geholfen haben. So wurde z. B. während der Pandemie unter Expert:innen und in den Medien viel über Superspreader-Ereignisse diskutiert, bei denen eine einzige infizierte Person besonders viele weitere ansteckt. Die Erkenntnis, dass stark heterogene Netzwerke mit einigen wenigen stark vernetzten Knoten und sehr vielen schwach vernetzten Knoten eine ganz andere Ausbreitungsdynamik hervorrufen als Netzwerke, in denen alle Knoten in etwa gleich stark vernetzt sind, verdanken wir im Kern einer physikalischen Betrachtung des Phänomens.

Äußerst interessant wird die Dynamik, wenn die Ausbreitung der Erreger nicht mehr als passive Komponente betrachtet werden kann, sondern der „Wirt“ auf die Ausbreitung reagiert. Wenn, wie in der Pandemie, die Gesellschaft über die Ausbreitung informiert wird, ändert sich auf individueller und gesellschaftlicher Ebene die Risikowahrnehmung und damit das Verhalten, was wiederum die Ausbreitung beeinflusst. So ergibt sich eine Rückkopplung zwischen Ursache und Wirkung. Aus der Perspektive der Physik hat man es nun mit einem

nichtlinearen, dynamischen Netzwerkphänomen zu tun. Völlig unabhängig vom konkreten Erreger kann man mit Methoden aus der Physik der kritischen Phänomene dann beispielsweise die Frage beantworten, ob und wann durch das Wechselspiel zwischen exponentieller Ausbreitung eines Erregers und selbstregulierter Kontaktreduktion die Dynamik zurückgeht. Man betrachtet dabei den Reproduktionswert oder R-Wert, der angibt, wie viele weitere Personen eine infizierte Person im Mittel ansteckt. Beträgt dieser Wert 1, so steckt jeder im Mittel nur eine weitere Person an, und die Zahl der Infizierten kann nicht exponentiell wachsen. In der Tat hat sich bei der Coronapandemie trotz unterschiedlicher Politik, gesellschaftlicher Strukturen und Verläufe in verschiedenen europäischen Ländern genau dieser Wert über viele Monate eingestellt, wenn man von statistischen Fluktuationen absieht.

Verkehr und Transport

In einer immer stärker vernetzten Welt treten immer häufiger auch unerwartete und unbeabsichtigte Effekte zu Tage. So kann etwa der [Bau einer zusätzlichen Straße](#) die Reisedauer durch ein Straßennetzwerk verlängern statt verkürzen und zu Staus führen. Eine mechanistische Analyse von Angeboten eines Fahrdienstes hat kürzlich einen anderen Effekt enthüllt und anhand der Spieltheorie erklärt: Aufgrund von automatischen Fahrpreisanpassungen, die eigentlich Angebot und Nachfrage aufeinander abstimmen sollten, bestehen für Fahrer:innen Anreize, zeitweise gemeinsam koordiniert gar keine Fahrten anzubieten. Dadurch kommt es zunächst zu Einnahmeausfällen, um jedoch danach von höheren Fahrpreisen zu profitieren. Die Fahrpreisanpassungen erreichten hier also das Gegenteil von dem, wofür sie gedacht waren.

ABKÜRZUNG MIT UMGEKEHRTEM EFFEKT

Braessches Paradoxon: eine zusätzliche Abkürzung von B nach C verlängert die Reisedauer.



Wie lange dauert die Fahrt über die verschiedenen Routen? Wir bezeichnen mit x das Verkehrsaufkommen in 1000 Autos/Stunde von Stadt A nach Stadt D. Dann ergeben sich folgende Reisedauern (immer in Minuten) für die Teilstrecken im linken Szenario: Landstraßen L1 (AB) und L2 (CD): $(0 + 10x)$, d. h. langsam, aber kürzere Wegstrecke mit einer großen Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen bei kleiner Kapazität. Autobahnen A1 (AC) und A2 (BD): $50 + x$, d. h., schnell aber größere Wegstrecke mit geringer Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen. Zusammengefasst ergibt sich für die Reisen ACD oder ABD: $50 + x + 10x$ (z. B. für $x = 6$, d. h. je 3000 Autos/Stunde für beide Strecken, eine Fahrzeit von jeweils 83 min).

Für das rechte Szenario wird eine Abkürzung zwischen den Städten B und C hinzugefügt. Die Fahrzeit durch diesen Abschnitt beträgt $10 + x$, d.h. schnell und kurze Wegstrecke mit geringer Abhängigkeit

vom Verkehrsaufkommen bei großer Kapazität. Nun stellen sich folgende Effekte ein:

1. Wenn alle die Abkürzung benutzen (L1-K-L2, d. h. Route ABCD, niemand fährt über Autobahnen A1 und A2) ergibt sich als Fahrzeit: $10x + (10 + x) + 10x = 10 + 21x$ (z. B. für $x = 6$ also 136 min)
2. Wenn alle 3 Routen gleichmäßig genutzt werden (insgesamt $x = 6$ mit je 2 über L1-K-L2, A1L2 und L1A2, d. h. Aufkommen von 4 auf L1 und L2), erhalten wir für die verschiebenden Routen Fahrzeiten von $10 \cdot 4 + (10 + 2) + 10 \cdot 4 = 92$ für ABCD, $50 + 2 + 10 \cdot 4 = 92$ für ACD und $10 \cdot 4 + 50 + 2 = 92$ für ABD.

In beiden Fällen verlängert sich die Fahrzeit im Vergleich zu dem Szenario ohne Abkürzung!

Ein weiteres Beispiel für die übertragbare Anwendbarkeit von physikalischen Konzepten: Die Physik der Perkolation (Seite 234), ursprünglich für die Festkörperphysik entwickelt, kann dazu genutzt werden, Radwegenetze unter wirtschaftlichen Nebenbedingungen (wie etwa Gesamtbaukosten) viel effizienter zu planen, als es mit bisherigen Methoden möglich war. In ähnlicher Weise haben Forschende das Phänomen der Hysterese (siehe Seite 235) aufgedeckt. Bekannt ist es aus dem Magnetismus, in dem die Wirkung (Magnetisierung) einer Ursache (Magnetfeldänderung) pfadabhängig ist. Ein ähnliches Phänomen gibt es auch bei anfragegetriebenen Mobilitätssystemen wie etwa städtischen Taxiflotten. Hier wären die Fahrtanfragen die Ursache und die Auslastung die Wirkung. Arbeiten die Taxis die Anfragen genau in der Reihenfolge ihres Eintreffens ab, so büßen sie bis zur Hälfte ihrer Effizienz ein. Ein überraschender Ausweg: eine unfaire Zuordnung von Fahrzeugen auf Fahrtanfragen – sodass gerade nicht diejenigen mit einer Taxifahrt bedient werden, die zuerst angefragt haben!

Tatsächlich steht der sich schnell wandelnde Verkehrs- und Transportsektor insgesamt vor immensen Herausforderungen, wie den zu reduzierenden Treibhausgas- und Feinstaubemissionen, wirtschaftlichen Zwängen, Staus, Stress bei Verkehrsteilnehmenden und räumlichen Einschränkungen vor allem in Städten. Die meisten dieser Herausforderungen entstehen durch multiple Interaktionen und Rückkopplungen, Nichtlinearitäten und dadurch geprägte Selbstorganisationsprozesse. Die obigen Beispiele zeigen, dass die Physik hier helfen kann, Phänomene aufzuklären und Verbesserungen vorzuschlagen.

Energieversorgung

Ähnliches gilt für unser Verständnis und die Charakterisierung regenerativer Energiesysteme im großen Maßstab. So wurde das aus der Festkörperphysik und der statistischen Physik bekannte Phänomen sogenannter anormaler Fluktuationen, also nicht Gauß-verteilter Abweichungen von einem Mittelwert, auch in Frequenzmessungen von Stromnetzen festgestellt. Eine stochastische Analyse zeigte zudem, wie sich Fluktuationen in der Stromspeisung oder beim Verbrauch auf Frequenzfluktuationen auswirken. Dies verbessert wiederum unser Verständnis, wie wir die Funktion von Stromnetzen gegen Extremereignisse absichern können. Solche Untersuchungen ermöglichen insbesondere allgemeine Einsichten in komplex verschaltete Stromnetze ohne Kenntnis aller Details der Einspeisung, des Verbrauchs und der Zustände dieser Netze. Dieser systemübergreifende Ansatz und die Universalität des qualitativen Verhaltens unterstreichen die methodische Stärke der Physik komplexer Systeme als zukunftsweisende, sozioökonomisch hoch relevante wissenschaftliche Disziplin.

Gesellschaftliche Konflikte

Die schnelle Verfügbarkeit von Informationen und der Austausch auf vernetzten Plattformen wie sozialen Netzwerken und Diskussionsforen haben weitreichende Effekte auf die Kommunikation, die gesellschaftliche Organisation und die

Meinungsbildung. Einerseits lassen sich Hintergründe schnell recherchieren. Die Existenz von freien Medien, einem zentralen Merkmal einer Demokratie mit der Funktion einer unabhängigen und kritischen Kontrollfunktion staatlichen Handelns, unterstützt diese Recherche. Andererseits steigt die Gefahr einer starken Polarisierung durch selektive Wahrnehmung von Informationen, die dem eigenen Standpunkt entsprechen und so die bereits vorgeprägte Meinung verstärken. Es entstehen Echokammern zu Ungunsten des Austauschs und des Diskurses mit anderen. Insbesondere Minderheiten werden dadurch leicht ausgeblendet. Der Pluralismus, der verschiedene politische, zivilgesellschaftliche, wirtschaftliche oder religiöse Interessengruppen beteiligen will, wird ausgehöhlt.

Der Bereich der sozioökonomischen Physik wendet Methoden aus der Physik auf soziale Systeme an, um die Mechanismen hinter solchen Prozessen besser zu verstehen. Dabei werden komplexe soziale und wirtschaftliche Phänomene mithilfe mathematischer Modelle, statistischer Analysen und simulationsbasierter Ansätze untersucht. Erkenntnisse aus dem Bereich emergenter Phänomene und kollektiver Dynamik haben zum Beispiel dazu beigetragen, einige wichtige Faktoren und Mechanismen für Chancenungleichheit zu identifizieren. Wie beeinflussen Bildungssysteme, Einkommensverteilung und soziale Netzwerke die Chancen und Möglichkeiten von Menschen? Wie kann Schutz und Förderung von Minderheiten gelingen? Durch die Anwendung von komplexen Systemmodellen (Vielteilchensysteme, Netzwerke, statistische Physik, Chaos) und Analysen gewinnen Physiker:innen Einblicke in die Mechanismen hinter Chancenungleichheit.

Die Schnell(leb)igkeit und Fülle von verfügbaren Informationen führen zu einem weiteren, viel untersuchten Effekt: der Fear of missing out (FOMO, zu deutsch: Angst, etwas zu verpassen). Smartphones und andere digitale Endgeräte erlauben uns, ständig und ortsunabhängig mit unseren sozialen und beruflichen Kontakten in Verbindung zu bleiben. Dabei kann die Sorge entstehen, Informationen, Ereignisse, Erfahrungen oder Entscheidungen, die tatsächlich oder nur scheinbar das eigene Leben verbessern könnten, zu verpassen. Dies kann zu psychischen Krankheiten wie Depressionen, Angstzuständen und einer verringerten Lebensqualität führen. Die Schnellebigkeit von Informationen beschränkt sich dabei nicht nur auf den digitalen Raum. Auch offline lässt sich eine Beschleunigung des Alltags beobachten. So folgen Neuererscheinungen von Kinofilmen in immer kürzeren Abständen und die Schlagzeile einer Tageszeitung am Morgen ist am Abend schon veraltet, da sich die kollektive Aufmerksamkeit einem neuen Thema zugewandt hat. Auch hier helfen Modelle nichtlinearer Dynamik, diese soziale Beschleunigung zu analysieren und fundamentale Mechanismen zu identifizieren.

Dirk Brockmann, Philipp Hövel und Marc Timme

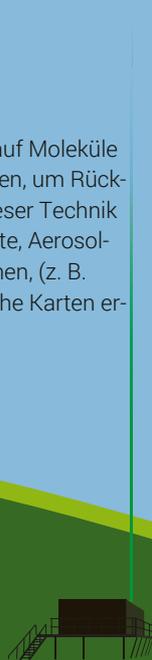
DIE ERDE IM BLICK

Durch präzise Messungen der Entfernung zwischen den zwei **GRACE-Satelliten**, die mit Mikrowellenlaserstrahlen miteinander kommunizieren, können Anomalien im Gravitationsfeld der Erde gemessen werden.



Der **ENVISAT-Satellit** ist u. a. mit Radar, altimetrischen Systemen und Multispektralsensoren zur Messung von Ozeanoberflächentemperaturen, Landbedeckung, Eisveränderungen und atmosphärischen Gasen ausgestattet.

Lidar verwendet Laserstrahlen, die auf Moleküle und Partikel in der Atmosphäre treffen, um Rückstreuungssignale zu messen. Mit dieser Technik können vertikale Profile der Luftdichte, Aerosolverteilung und der Gaskonzentrationen, (z. B. Ozon, CO₂) und sogar topographische Karten erstellt werden.



Forschungsballons sind mit Messinstrumenten ausgestattet und steigen in die Atmosphäre auf, um Daten zu Temperatur, Luftdruck, Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit in großen Höhen zu sammeln.



Gleiter sind schwimmende Geräte, die in Gewässern platziert werden, um physikalische und chemische Parameter wie Temperatur, Salzgehalt und Strömungen zu messen.



Die Erkundung der Erde hat zu einem umfassenden Verständnis unseres Planeten geführt, das im Abschnitt „Unsere Erde“ ab Seite 102 ausführlich dargestellt ist. Im Folgenden erfahren Sie, welche Methoden heute verwendet werden, um die dramatischen Veränderungen unserer Heimat zu überwachen, aber auch so alltägliche Fragen zu klären, wie das Wetter am nächsten Tag wird. Die Messungen werden dabei nicht nur vom Erdboden aus vorgenommen, sondern auch auf See, an Bord von Flugzeugen und mit Satelliten. Mit ihnen wird sowohl das Bild des globalen Klimawandels abgebildet, als auch vor Geo-Gefahren gewarnt und die Luftqualität überwacht.



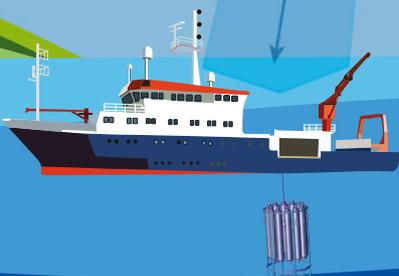
Die **Meteosat-3rd-Generation-Satelliten** verwenden multikanalige bildgebende Infrarot- und sichtbare Spektralsensoren sowie ein geostationäres Präzisionsradar, um kontinuierlich Wetter- und Klimadaten zu erfassen.



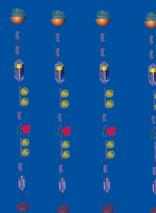
Die **MetOp-Satelliten** besitzen u. a. Mikrowellen- und Infrarotsensoren, um atmosphärische Parameter wie Temperatur, Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeiten zu messen.



Das **HALO-Forschungsflugzeug** ist mit einer Vielzahl von Messinstrumenten ausgestattet, darunter Lidar, Infrarot-Spektrometer und Mikrofone, um atmosphärische Gase, Aerosole und Aerosoloptik in großen Höhen zu untersuchen.



CTD ist ein ozeanographisches Messgerät zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (conductivity) und der Temperatur (temperature) in Abhängigkeit von der Wassertiefe (depth).



Messgeräte an **Bojen** liefern kontinuierlich Daten über Wassertemperatur, Salinität, Druck und Strömungen im Ozean.

FERNERKUNDUNG

Fernerkundung bedeutet, Sachverhalte aus der Ferne zu erkennen – eine Voraussetzung, um unter Umständen rechtzeitig Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Die heutige Erkundung physikalischer Parameter aus der Ferne, z. B. vom Satelliten aus, hat sich als wichtige Messmethode in der Umwelt- und Klimaforschung sowie der Geophysik etabliert.

Jahrtausende war die Fernerkundung auf die Sinne des Menschen – vor allem Augen und Ohren – beschränkt. Erst in den letzten Jahrhunderten wurden physikalische Geräte zur Fernerkundung entwickelt. So erfanden der Chemiker Robert Wilhelm Bunsen und der Physiker Gustav Robert Kirchhoff um die Mitte des 19. Jahrhunderts die **Spektralanalyse**. Diese ermöglichte es, aus dem Sonnenlicht auf die chemische Zusammensetzung unseres Zentralgestirns zu schließen – aus 150 Millionen Kilometern Entfernung wurde dabei das bis dahin auf der Erde unbekannte Element Helium entdeckt. Die Astronomie ist damit ein Beispiel für die Fernerkundung des Weltalls.

Bei der Erdfernerkundung lassen sich beispielsweise die Zusammensetzung der Atmosphäre oder Eigenschaften der Land- oder Ozeanoberfläche beobachten und quantifizieren. Damit gehört sie zu den wichtigsten Messmethoden in der Geo-, Umwelt- und Klimaforschung. Luftaufnahmen von Flugzeugen aus haben seit der Mitte des 20. Jahrhunderts die Landvermessung ergänzt und verdrängt. Mit heutigen Verfahren (z. B. elektronischen Bildsensoren) können Objekte lokalisiert und die Art der Landnutzung aus der Vogelperspektive bestimmt und quantifiziert werden. So lassen sich die Ausdehnung von land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen, Wüsten, Mooren und Siedlungsgebieten und deren Veränderung erfassen und das Abschmelzen von Gletschern nachvollziehen. **Satelliten** messen die von der Erde reflektierte oder emittierte Strahlung, woraus auch die wichtigsten Klimavariablen (Essential Climate Variables, ECVs) abgeleitet werden können. Damit lassen sich Veränderungen der Atmosphäre und der Erdoberfläche global über Jahre beobachten. Dies beinhaltet umfangreiche Informationen über die Temperatur, die Zusammensetzung der Atmosphäre, die Landnutzung, den Meeresspiegel, die Eisdicke und viele weitere Parameter. Diese Informationen bilden den Ausgangspunkt für ein globales Beobachtungssystem, das die Veränderungen des Erdsystems überwachen und bewerten hilft.

Aktive und passive Fernerkundungsmethoden

Aktive Fernerkundungsmessungen nutzen eigene Strahlungsquellen – etwa **Radarsysteme**, die mit Radiowellen arbeiten, oder **Lidar-Instrumente**, die die Reflexion eines ausgesendeten Laserpulses an Luftmolekülen, Wolken oder Staub in der Atmosphäre detektieren. Passive Methoden hingegen analysieren das Spektrum natürlich vorhandener Strahlung, beispielsweise die direkte Sonnenstrahlung, die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung oder die Strahlung der

Atmosphäre sowie der Erdoberfläche im Infrarot- oder Mikrowellenspektralbereich.

Die passiven Fernerkundungsmethoden umfassen einen großen Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung von den **Mikrowellen** über das **Infrarot** bis in den sichtbaren und **ultravioletten** Bereich. Messungen im Mikrowellenbereich und im thermischen Infrarot nutzen die Eigenemission der Atmosphäre, z. B. von Ozon oder Wasserdampf. Weil flüssiges und festes Wasser im Mikrowellenbereich leicht unterschiedlich emittieren, lässt sich bei der Analyse der Ozeanoberfläche das Meereis vom offenen Ozean unterscheiden – selbst in der dunklen Polarnacht. Im infraroten und sichtbaren Spektralbereich wird entweder die Eigenemission der Atmosphäre oder das Sonnenlicht, das durch Absorptionen in der Atmosphäre modifiziert oder gestreut wurde, analysiert. Die ältesten Fernerkundungsmessungen von Gasen im Ultraviolettbereich wurden zur Bestimmung der Dicke der **Ozonschicht** (Seite 275) vom Erdboden aus durchgeführt. Dafür kam das zuverlässige und robuste Dobson-Spektrometer zum Einsatz, das von Gordon Dobson in den 1920er-Jahren entwickelt wurde und noch heute rund um den Globus im Einsatz ist.

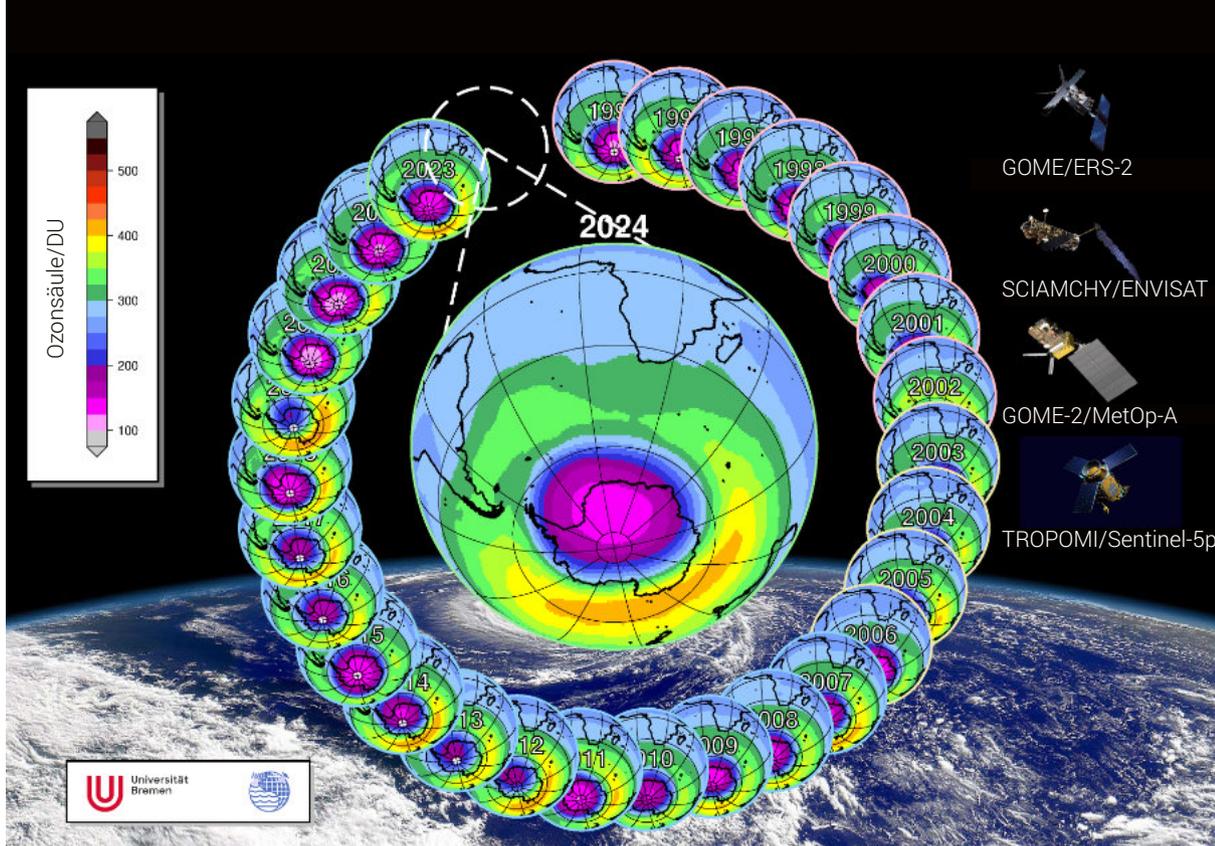
Immer genauer, immer besser

Die Einführung neuer physikalischer Prinzipien erweiterte die Fernerkundung seit den 1920er-Jahren in viele Richtungen:

Erweiterter Spektralbereich: Dank elektronischer Sensoren (und auch fotografischer Verfahren) erstreckt sich der nutzbare Spektralbereich heute vom Ultraviolett über das Infrarot bis in den Mikrowellenbereich – die Sensoren sehen also deutlich mehr als das menschliche Auge.

Detailliertere Spektren (höhere spektrale Auflösung): Unsere Augen können drei Grundfarben unterscheiden, moderne spektroskopische Systeme Millionen von Spektrallinien unabhängig vermessen und so viel genauer die Zusammensetzung eines emittierenden oder absorbierenden Materials entschlüsseln.

Bestimmung von Konzentrationsprofilen: Manche Satelliten schauen schräg durch die Atmosphäre auf die Sonne oder vermessen die Emission der Atmosphäre und bestimmen so nicht nur die Gesamtmenge von Substanzen, sondern auch, wie diese in den unterschiedlichen Höhen der Atmosphäre verteilt sind. Dabei erreichen sie eine Höhengauflösung von wenigen Kilometern. Ähnliches gelingt für manche Gase mitt-



erweile auch vom Boden aus, allerdings mit einer Höhengauflösung von nur etwa fünf bis zehn Kilometern. Hierbei wird der Umstand ausgenutzt, dass mit zunehmender Höhe der Luftdruck abnimmt, welcher die Form der Spektrallinien beeinflusst.

Ultrahohe Intensitätsauflösung: Durch die Analyse von charakteristischen Absorptions- oder Emissionsspektren lassen sich viele Spurengase in der Atmosphäre vermessen. Oft geht es darum, nur sehr schwache spektrale Signaturen aufzuspüren – etwa bei Bestandteilen der Luftverschmutzung (Smog, Seite 261), wie z. B. Stickoxiden, Schwefeldioxid oder Formaldehyd. Andererseits gibt es viele Gase, insbesondere die Treibhausgase CO_2 , Methan und N_2O (Lachgas), deren Konzentration räumlich und zeitlich nur geringe Schwankungen aufweisen, sodass extrem genaue Messungen notwendig sind, um Aussagen über deren Quellen und Senken zu machen.

Analyse der Oberflächenstrahlung: Der Pflanzenfarbstoff Chlorophyll nimmt Sonnenlicht auf und gibt Licht geringerer Energie (also größerer Wellenlänge) wieder ab. Indem man diese Fluoreszenz vermisst, kann man etwas über die Aktivität der Pflanzen erfahren und so die biologische Primärproduktion kartieren.

Akustische Methoden: Zweifellos ist die Analyse elektromagnetischer Strahlung das Arbeitspferd der Fernerkundung, aber nicht das einzige Pferd im Stall: Zum Beispiel können Temperatur- und Windprofile in der Atmosphäre durch akustische Sondierung bestimmt werden. Auch bei der Untersuchung der Meere spielen akustische Verfahren eine große Rolle.

Diese in keiner Weise erschöpfende Liste der Beispiele illustriert den Einfallsreichtum der Physiker:innen und Geowis-

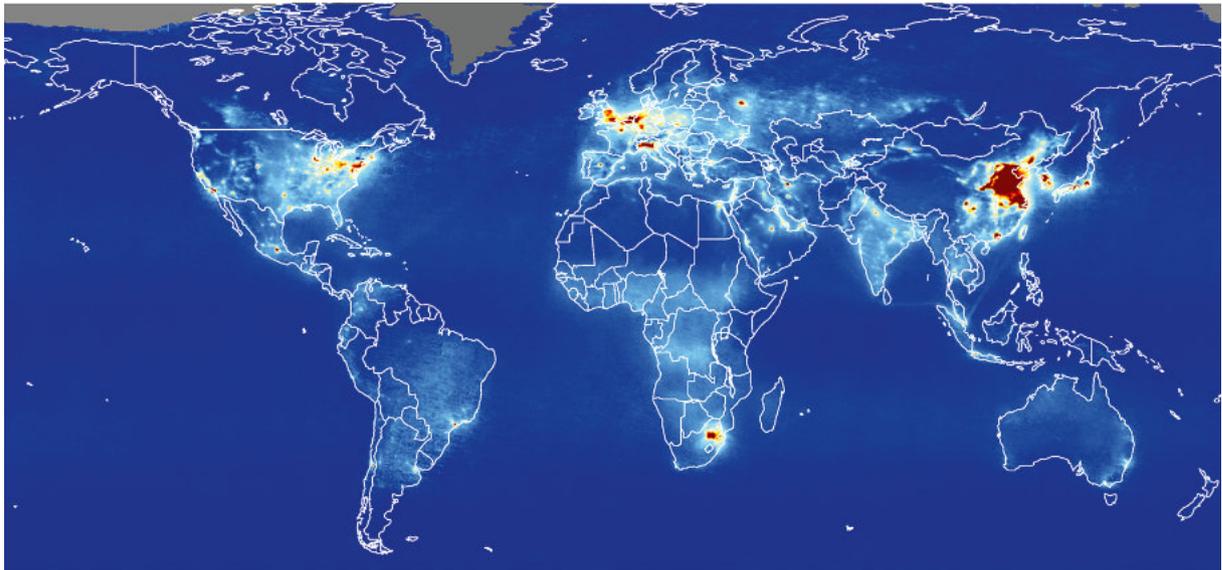
Im Oktober ist die Ozonmenge über der Antarktis im jährlichen Minimum. Die Entwicklung der stratosphärischen Oktober-Ozonsäulendichte in den Jahren 1996 bis 2024 ist hier zusammengefasst, gewonnen wurden die Daten mit Satellitenmessungen. Zu erkennen sind stets niedrige Ozonwerte mit gewissen Schwankungen, zum Beispiel eine relativ schwache Abnahme in 2019 gefolgt von starker Ozonzerstörung im Folgejahr, während im März 2024 die Ozonschicht recht kräftig ausgeprägt war. Ergänzt werden solche Satellitendaten durch Messungen mit Wetterballonen, die mehrmals pro Woche von verschiedenen Standorten aus gestartet werden. Die Ozongesamtmenge („Säule“) wird in „Dobson Units (DU)“ angegeben, 100 DU entsprechen einer Schicht von 1 mm reinem Ozon unter Normalbedingungen.

senschaftler:innen und demonstriert, dass mittlerweile eine große Zahl von Aspekten und Parametern des Erdsystems – und auch der Einfluss der Menschen darauf – durch Fernerkundung, meist von Satelliten aus, erfasst werden können. Wir sollten aber auch mögliche Gefahren im Auge behalten: So könnten zukünftige Satelliten leistungsfähig genug sein, um einzelne Personen und ihre Aktivitäten zu erkennen, sie könnten sogar eine Überwachung von Menschen aus dem All ermöglichen.

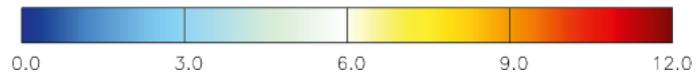
John P. Burrows, Justus Notholt, Ulrich Platt und Christian von Savigny

ERDERKUNDUNG MIT SATELLITEN

Ins All zu fliegen, um den Blick zurück auf unseren Heimatplaneten zu richten: Was von Astronaut:innen als eine eindruckliche Erfahrung beschrieben wird, ist im robotischen Betrieb mit zahlreichen Erdbeobachtungssatelliten seit über 50 Jahren täglicher Standard – von der Wetterbeobachtung bis zur Katastrophenhilfe.



NO₂ (in Einheiten von 10¹⁵ Molekülen/cm²)

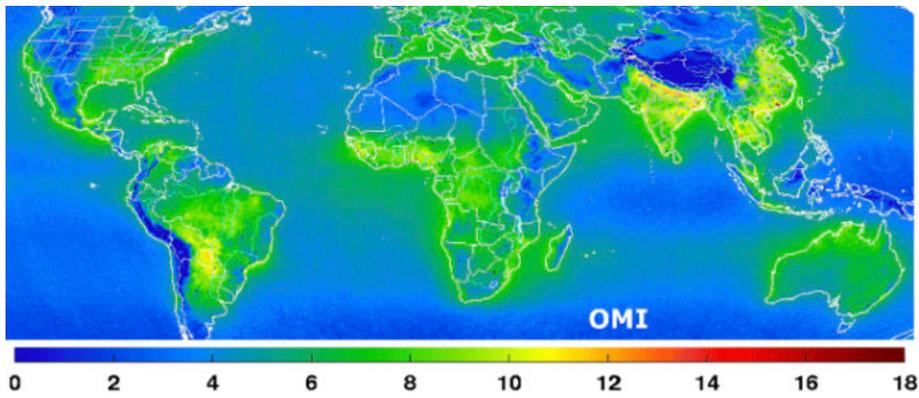


Weltkarte oben: Globale Verteilung des troposphärischen Gesamtgehalts von Stickstoffdioxid (NO₂). Daten von GOME, SCIAMACHY und GOME-2, gemittelt über den Zeitraum April 1996 bis September 2017. Die höchsten Werte werden über den Bevölkerungs- und Industriezentren der Erde erreicht. Aber auch Gewitter über den Tropenwäldern führen zu erkennbar erhöhten NO₂-Säulendichten.

Oft können wir Satelliten in den Abendstunden als sich bewegend Leuchtpunkte am Himmel sehen. Sie sind aus unserem Leben kaum mehr wegzudenken – sei es in der Telekommunikation, in der Navigation, für militärische Zwecke oder bei der Erdbeobachtung. Mit Sputnik 1 hatte die Sowjetunion im Jahr 1957 den ersten Satelliten ins All gebracht. Die Satelliten-Fernerkundung der Erde basierte zunächst auf Röhrenvideokameras (beginnend mit der LANDSAT-Serie ab 1972). Diese wurden dann durch Halbleitersensoren abgelöst und um weitere Spektralbereiche ergänzt. Satelliten beobachten die Atmosphäre oder die Erdoberfläche global, etwa zur Wettervorhersage, um den Zustand der Ozonschicht oder die Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre zu überwachen. Dazu kommen die Beobachtung der sich ändernden Meeresoberflächentemperatur, des Salzgehalts, des Meeresspiegels, von Meereis, Gletschern und Schneebedeckung sowie der Verteilung des Phytoplanktons. Durch die Überwachung der Pflanzenblüte ermöglichen Satelliten der Land- und Forstwirtschaft, Erträge abzuschätzen, Krankheiten zu erkennen und den Boden zu analysieren. Weitere gesellschaftliche Dienstleistungen umfassen die Stadtplanung und Infrastrukturüberwachung sowie das Katastrophenmanagement, etwa bei Überschwemmungen oder Erdbeben.

Es gibt aktive und passive Satelliteninstrumente, d. h. entweder haben die Satelliten eine eigene Strahlungsquelle oder sie nutzen natürliche Strahlungsquellen wie die Sonne oder die Wärmestrahlung der Erdoberfläche oder Atmosphäre. Gleichfalls passiv sind Satelliteninstrumente, die das Gravitationsfeld der Erde vermessen, um z. B. den mittleren globalen Meeresspiegel, die Eisdicke von Gletschern oder den Grundwasserspiegel zu bestimmen.

Zu den aktiven Methoden zählen vor allem Instrumente für den Mikrowellenbereich, also Radare wie das Synthetische Apertur-Radar (SAR) oder Lidar-Instrumente (z. B. Calipso oder Aeolus) für den sichtbaren und UV-Bereich. Bei einem SAR-Instrument wird die physikalische Antennengröße entsprechend der Eigenbewegung des Satelliten beim Überflug über dem zu untersuchenden Gebiet durch passend phasenverschoben ausgesandte Mikrowellenpulse um ein Vielfaches vergrößert. Damit lässt sich zum Beispiel die Oberflächenrauigkeit der Meeresoberfläche millimetergenau erfassen. Bei den Lidar-Methoden werden sehr kurze Laserpulse ausgesandt und deren Rückstreuung an Wolken- oder Staubteilchen oder Luftmolekülen erfasst. Dies ermöglicht die Bestimmung der Höhenprofile von Aerosolen und des



Mittlere globale Verteilung von Formaldehyd 2007 bis 2013 (in Einheiten von 10^{15} Molekülen/cm²). Die höchsten Werte werden über den Tropenwäldern von Südamerika und Afrika sowie über Indien, Südostchina und über dem Südosten der USA beobachtet.

Windfelds. Einige Instrumente untersuchen bereits Spurengase (z. B. O₃, CO₂ oder CH₄) mit einer vertikalen Auflösung günstigstenfalls im Bereich von Metern.

Auf unterschiedlichen Bahnen

Erdbeobachtungssatelliten umkreisen – je nach Aufgabenstellung – die Erde auf verschiedenen Umlaufbahnen. Auf einer geostationären Bahn mit einer Umlaufzeit von genau einem Sterntag steht der Satellit konstant in einer Höhe von etwa 36 000 Kilometern über einem Ort am Äquator und ermöglicht damit die Beobachtung von Tagesverläufen (jedoch nicht an den Polen). Diese Satelliten liefern uns Wetterinformationen, z. B. Bilder und Filme über die Wolkenbedeckung. Allerdings sieht ein solcher Satellit jeweils nur etwa ein Drittel der Erdoberfläche oder weniger, sodass mindestens drei solcher Satelliten an unterschiedlichen Punkten notwendig sind, um die Erde abzudecken. Häufig kommen auch niedrige Umlaufbahnen, insbesondere polare Bahnen, in Höhen von 600 bis 1000 km zum Einsatz, deren Bahnebene wenige Grad ge-

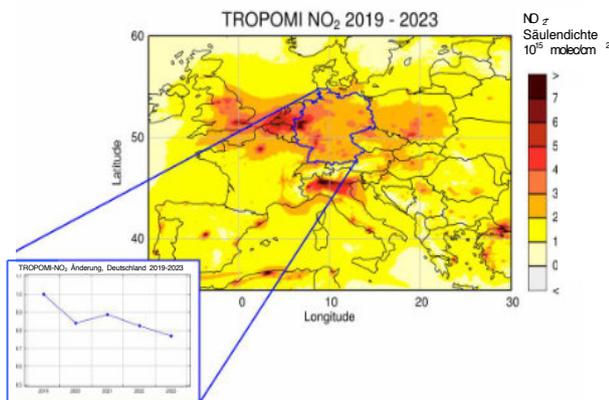
gen die Erdachse geneigt ist. Der Satellit sieht beide Pole und damit im Laufe eines Tages die ganze Erde. Bei geschickt gewählter Bahnneigung kann man erreichen, dass sich im Laufe eines Jahres die Bahnebene einmal um 360 Grad dreht, damit bleibt der Winkel zwischen Bahnebene und der Richtung zur Sonne konstant. Bei passender Bahnhöhe und damit Umlaufzeit (ca. 100 Minuten bei etwa 800 km Höhe) überquert der Satellit den Äquator dann stets zur gleichen lokalen Zeit (sonnensynchrone Bahn).

Die Satellitenfernerkundung der Erde hat unter anderem die Wetterbeobachtung und -vorhersage revolutioniert. Die heutigen – bis zu zwei Wochen in die Zukunft reichenden – Wettervorhersagen wären ohne Satelliteninstrumente in vielen Bereichen auf der Erde unmöglich. Wichtige frühe Satellitensysteme waren und sind teilweise bis heute die TIROS- und Nimbus-Serien ab 1960, NOAA-Serie ab 1970 (insgesamt 22 Satelliten auf niedrigen polaren Umlaufbahnen) und die GOES-Serie (ab 1975, 16 geostationäre Satelliten) der NASA.

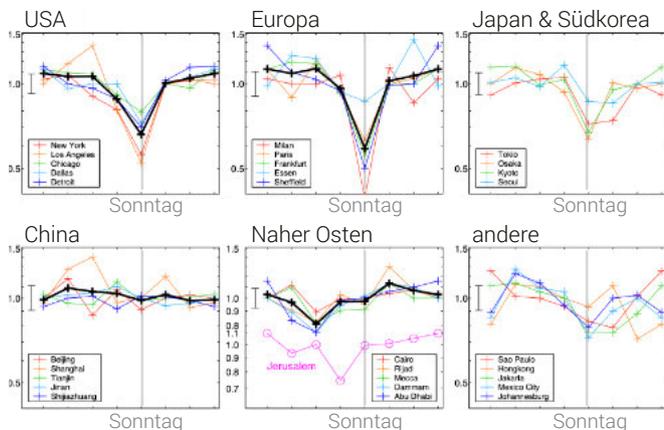
Die europäische Satellitenkonfiguration [Meteosat](#) misst seit 1977 und heute in der dritten Generation Bewölkung, Temperatur und Wasserdampf. Sie umfasst insgesamt ein Dutzend geostationäre Satelliten. Auf polaren Bahnen befinden sich z. B. drei MetOp-Satelliten. Bald werden die Satelliten der dritten Generation von Meteosat und der zweiten Generation von MetOp in der Umlaufbahn sein. Diese werden von der EU, der ESA und EUMETSAT finanziert und werden von 2026 bis 2040 Messungen durchführen. Auch die NOAA und die NASA werden in diesem Zeitraum ihre Flotte an geostationären Satelliten erweitern.

Auf den Blickwinkel kommt es an

Satellitenbeobachtungen der Erdatmosphäre werden in unterschiedlichen Beobachtungsgeometrien durchgeführt. Bei der Nadir-Geometrie schaut das Instrument direkt nach unten auf die Erdoberfläche. Nadir-Messungen liefern meist nur Informationen über die Gesamtmenge von Spurenstoffen in der betrachteten Luftsäule. Im Falle der sogenannten Okkultationsmessungen beobachtet das Satelliteninstrument die Auf- bzw. Untergänge von Himmelskörpern – meist der Son-



Verteilung der troposphärischen NO₂-Säulendichte (in Einheiten von 10^{15} Molekülen/cm²) über Westeuropa. Das Diagramm links unten zeigt die Entwicklung der NO₂-Gesamtmenge in Bodennähe über Deutschland. Neben der generellen Abnahme ist der Einbruch im Jahre 2020 während der Anfangsphase der COVID-19-Pandemie deutlich zu erkennen.



Wochengang der Luftverschmutzung aus NO₂-Daten von GOME, Mittelwert 1996–2001. Während in den USA und in Europa der Sonntag als (christlicher) Feiertag deutlich hervortritt, sind im nahen Osten der Freitag („Tag der Zusammenkunft“ im Islam) bzw. Samstag (Schabbat, jüdischer Feiertag) erkennbar.

ne, aber auch des Mondes oder von Sternen. Diese Messungen liefern meist sehr genaue Informationen über die vertikale Verteilung von Spurenstoffen oder Aerosolen. Allerdings sind diese Messungen nur bei ein oder zwei geografischen Breiten pro Tag möglich. Eine dritte Geometrie stellen die Limb-Streulicht-Messungen (auch Horizontsondierungsmessungen genannt) dar, bei denen die Sichtlinie des Instruments – ähnlich wie bei den Okkultationsmessungen – tangential durch die Atmosphäre verläuft. Im Gegensatz zu den Okkultationsmessungen wird aber nicht direkt z. B. die Sonne beobachtet, sondern in der Atmosphäre gestreutes Sonnenlicht gemessen. Damit sind Messungen auf der gesamten sonnenbeschienenen Erdhälfte möglich. Alternativ können in der Limb-Geometrie auch die von Spurenstoffen im Mikrowellenbereich oder im Infraroten emittierte Wärmestrahlung gemessen werden.

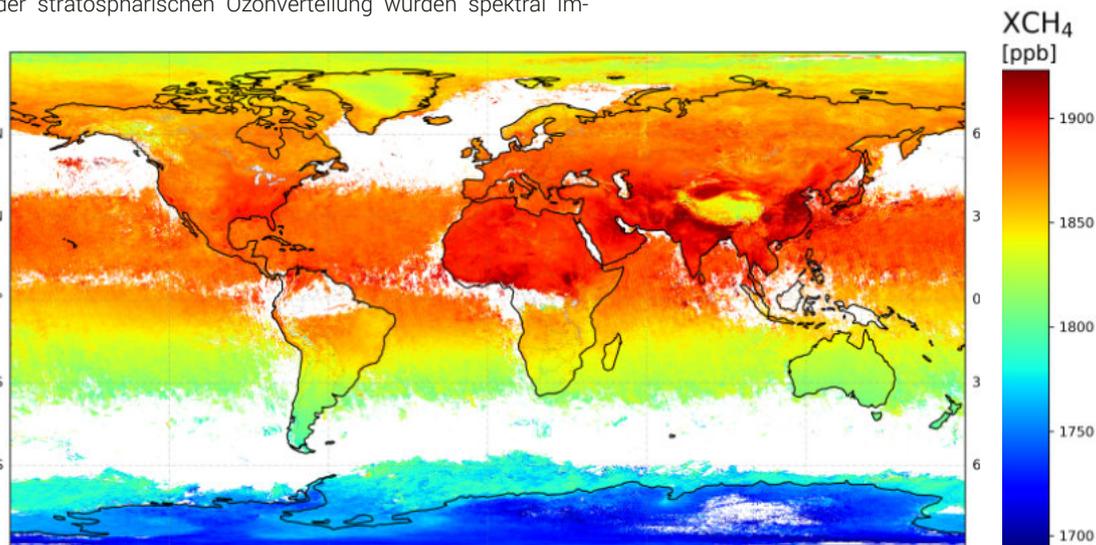
Ein zunehmend wichtiges Gebiet der Erdfernerkundung ist die Bestimmung der Zusammensetzung der Atmosphäre durch Satelliteninstrumente. Beginnend mit der Bestimmung der stratosphärischen Ozonverteilung wurden spektral im-

mer hochauflösendere Instrumente entwickelt. Der Urahn der spektroskopischen Satelliteninstrumente ist das „Global Ozone Monitoring Experiment“ (GOME) mit mehr als 4000 Wellenlängenkanälen im UV- und sichtbaren Spektralbereich. Die GOME-Serie und ihre Nachfolgeinstrumente SCIAMACHY, OMI, Sentinel 5 Precursor/TROPOMI, Sentinel 4, Sentinel 5, EMI, GEMS und TEMPO ermöglichen neben der Messung von Gasen in der mittleren Atmosphäre auch die von Spurenstoffen in der unteren Atmosphäre wie Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid, Formaldehyd, Glyoxal, Halogenoxide und von Treibhausgasen wie Methan und Kohlendioxid sowie von Aerosolen.

Spurengasen auf der Spur

Im thermischen Infrarot (also bei Wellenlängen von vier bis 20 µm) gibt es Millionen von Spektrallinien, die bisher mehr als 30 Spurengasen zugeordnet werden. Messungen werden durch solare Absorption (Okkultationsmessungen) oder in Emission (Limb) durchgeführt. Die ersten Okkultationsmessungen wurden 1985 mit dem ATMOS-Instrument an Bord des Space Shuttles durchgeführt. Das MIPAS-Instrument zur Messung von Spurengasen an Bord des Satelliten ENVISAT hat zwischen 2002 und 2012 tangential durch die Atmosphäre geschaut und die Eigenemission der Atmosphäre vermessen, um Spurengase zu quantifizieren. Das kanadische Satelliteninstrument ACE vermisst seit 2004 die Zusammensetzung der Atmosphäre im thermischen Infrarot durch solare Absorption. Das IASI-Instrument hat von 2006 bis 2021 senkrecht (Nadir) auf die Erdoberfläche geschaut und deren Wärmestrahlung vermessen. Da diese auf dem Weg zum Satelliten durch die Atmosphäre modifiziert wird, stecken darin Informationen über deren Zusammensetzung – allerdings nicht in den unteren Höhenschichten, da dort Atmosphäre und Erdoberfläche eine ähnliche Temperatur be-

Globale Verteilung des Methanmischungsverhältnisses (XCH₄), aus Nahinfrarotmessungen des TROPOMI-Instruments (Mittelwert 2021). Aufgrund der langen Lebensdauer von Methan sind die Unterschiede im Mischungsverhältnis nur gering.



sitzen und daher für das Satelliteninstrument nicht zu unterscheiden sind.

Beispiele für die heutige Leistungsfähigkeit von Satelliteninstrumenten sind die Messungen der globalen Verteilung von bodennahem Stickstoffdioxid oder von Formaldehyd und Glyoxal. Diese Gase sind aufgrund der verschiedenen Quellmechanismen sehr unterschiedlich verteilt. Diese – und weitere – Spurenstoffmessungen haben die Modellierung der globalen Luftchemie revolutioniert, da sie erlauben, die Modelle, die heute Millionen von Gitterpunkten umfassen, adäquat und nahezu in Echtzeit mit Millionen von Messdaten zu versorgen. Bei der Erfassung der Luftverschmutzung (Seite 261) in den verschiedenen Regionen der Welt lassen sich mithilfe von Satelliten nicht nur Trends erkennen, sondern beispielsweise sogar örtliche Gepflogenheiten wie der Ruhetag der dortigen Bevölkerung durch geringere Emissionen aus-

machen. Andererseits gibt es viele Gase, insbesondere die Treibhausgase CO₂, Methan und Lachgas, deren Konzentration aufgrund ihrer langen Lebensdauer räumlich und zeitlich nur geringe Schwankungen aufweist („Globale Klimaentwicklung“ auf Seite 120), sodass es extrem genaue Messungen braucht, um zum Beispiel Aussagen über deren Quellen zu machen. Die zu erwartende Weiterentwicklung der Satelliteninstrumente wird zu genaueren Messungen, räumlich höherer Auflösung und der Erfassung weiterer Parameter führen.

*John P. Burrows, Justus Notholt,
Ulrich Platt und Christian von Savigny*

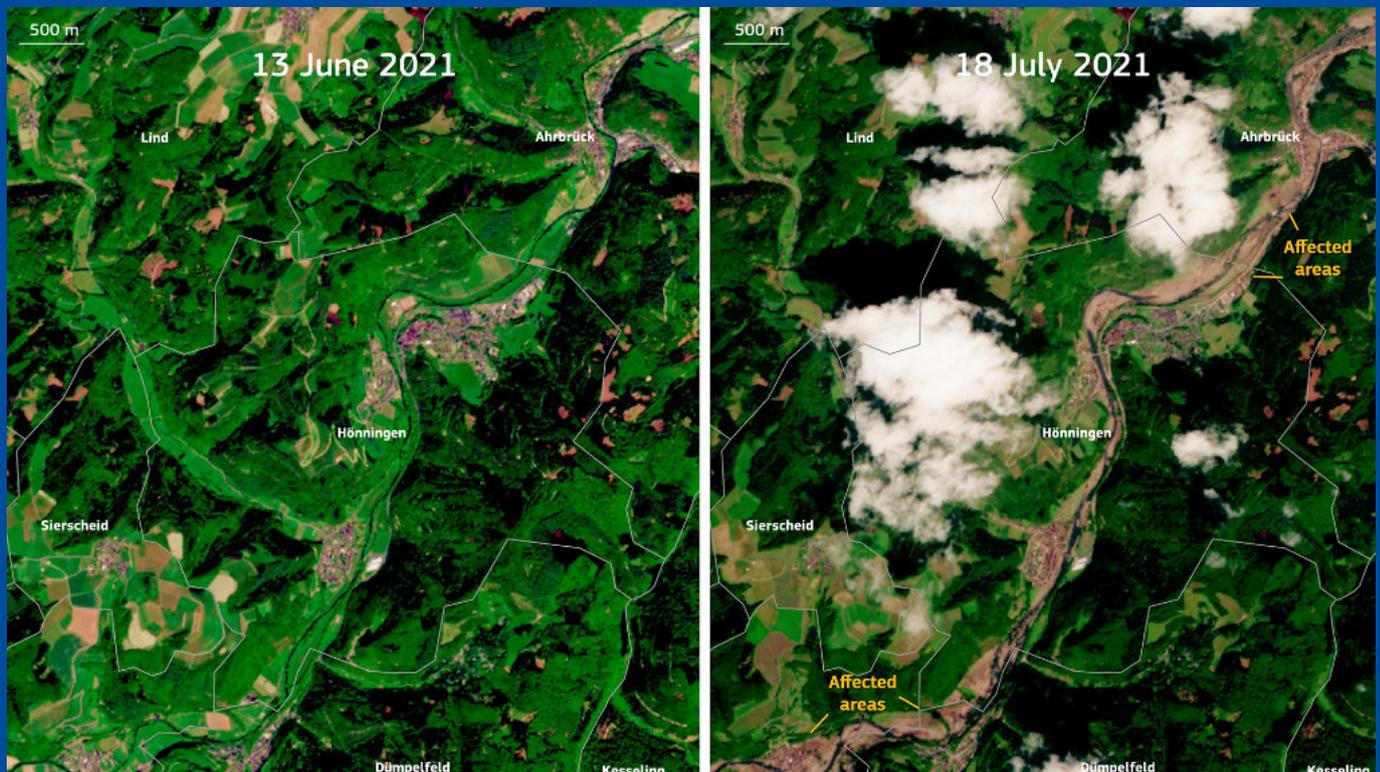
SATELLITENFERNERKUNDUNG IM KATASTROPHENEINSATZ

Ob bei der Flutkatastrophe im Ahrtal im Sommer 2021 oder den Überschwemmungen in Valencia im Herbst 2024: Schon kurz nach den Ereignissen konnten detaillierte Satellitenbilder der betroffenen Regionen den Helfer:innen ein Bild der Lage vermitteln. Genutzt wurden hier die Ressourcen des europäischen Copernicus-Programms. Die beiden Sentinel-2-Satelliten umkreisen die Erde in sonnensynchronen Umlaufbahnen. Sie beobachten jeden Punkt der Erde alle fünf Tage (sofern keine Wolken die Sicht be-

hindern) und können so besonders schnell Veränderungen im Landschaftsbild erkennen. Die Daten der Satelliten stehen öffentlich zur Verfügung.

In den Aufnahmen aus der Region Ahrtal vom 18. Juli 2021 sind die Folgen der Starkregenereignisse der Vortage deutlich zu sehen. Die mit „Affected areas“ bezeichneten Gebiete zeigen die braunen Schlammmassen, die zu erheblichen Zerstörungen an Gebäuden und Infrastruktur führten. 135 Personen in der Region verloren dabei ihr Leben.

Jens Kube

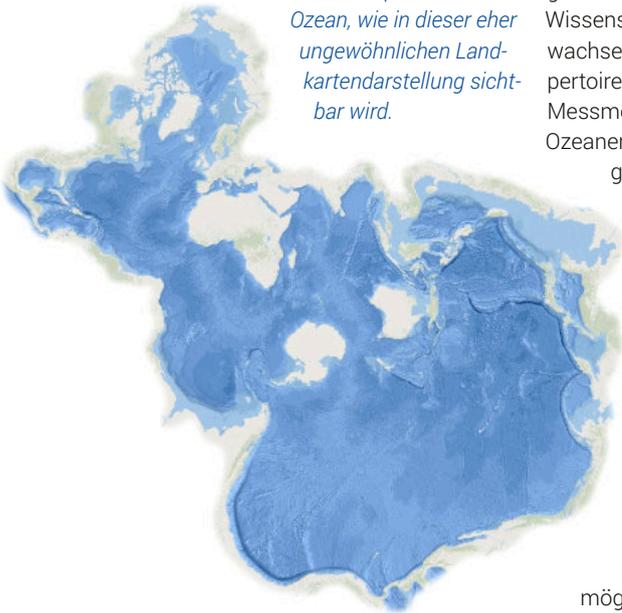


ERKUNDUNG DES OZEANS

Siebzig Prozent der Erdoberfläche sind durch den Ozean bedeckt. Seine Erforschung ist eine Mammutaufgabe, an der Wissenschaftler:innen mit einer Vielzahl moderner Methoden arbeiten.

Der Ozean umspannt die Erde und ermöglicht das Leben auf ihr. Obwohl er riesig ist und wir mehr über den Mond wissen als über die Tiefsee, haben physikalische und biogeochemische Messungen in den vergangenen 150 Jahren grundlegende Erkenntnisse über die Weltmeere geliefert – etwa zu Umwälzungsbewegungen, Strömungen und ihren Antrieben. Die Vermessung des Ozeans ist weiterhin in vollem Gange, unter anderem, um seine Rolle im Klimasystem zu erforschen. Denn Veränderungen im Meer können den Klimawandel und die Lebensbedingungen im und außerhalb des Wassers beeinflussen. Auch deswegen nimmt der Bericht des Weltklimarats, der die Grundlage für die internationale Klimapolitik bildet, immer den Ozean mit in den Blick.

Atlantik, Pazifik, Indischer Ozean und viele weitere Meere: Sie alle bilden gemeinsam den erdumspannenden Ozean, wie in dieser eher ungewöhnlichen Landkartendarstellung sichtbar wird.



Durch die technologischen Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte steht der Wissenschaft ein ständig wachsendes vielfältiges Repertoire von Sensoren und Messmethoden für die Ozeanerkundung zur Verfügung. Seit Beginn der Beobachtungen bilden Schiffe das Rückgrat der experimentellen Ozeanforschung. Deutschland besitzt eine hochmoderne Forschungsflotte, die mit dem Eisbrecher **Polarstern** Messungen im und unter dem Eis ermöglicht. Bei Expeditionen im globalen Ozean kommen

die Schiffe **Meteor**, **Maria S. Merian** und **Sonne (Schiff)** zum Einsatz, und auch für die Küstenforschung sind weitere kleinere Schiffe vorhanden.

Messungen vom Forschungsschiff aus

Die Wissenschaftler:innen an Bord von Forschungsschiffen erfassen während der Fahrt eine große Anzahl von physikalischen und biogeochemischen Parametern. So müssen sie für das Verständnis von Ozeanströmungen Druck, Temperatur und Salzgehalt genau bestimmen. Das geschieht mit ei-

ner Sonde, die in der Fachsprache CTD (Conductivity-Temperature-Depth) heißt. Sie wird an einem Draht von der Wasseroberfläche bis zum Meeresboden herabgelassen und misst währenddessen die genannten Größen. Aus der Verteilung der Dichte in der Wassersäule an zwei Positionen kann das horizontale Gefälle der Dichte und des Drucks berechnet werden. Daraus lässt sich die **geostrophische Geschwindigkeit** ableiten, die die mittlere Geschwindigkeit zwischen diesen beiden Positionen repräsentiert.

Geostrophie: Auf der rotierenden Erde zeigen großräumige Bewegungen in Ozean und Atmosphäre ein Gleichgewicht zwischen horizontaler Druckgradientenkraft und Corioliskraft.

Eine weitere Methode, um die Ausbreitung von Wassermassen zu untersuchen, sind Spurengase wie FCKWs (Fluorchlorkohlenwasserstoffe), die in geringen Mengen in der Atmosphäre vorkommen und sich an der Ozeanoberfläche im Wasser lösen. Ihre Konzentration in der Atmosphäre variiert von Jahr zu Jahr, und diese Änderungen werden ins Ozeaninnere transferiert. Dort werden die Gase weitgehend passiv mit den Ozeanströmungen mitgeführt. Demnach gibt die Konzentration der FCKW im Meereswasser Aufschluss darüber, wann eine Wassermasse zuletzt an der Oberfläche war. So lassen sich die Pfade und die Geschwindigkeit der Ausbreitung und sogar die Speicherung von anthropogenem Kohlendioxid untersuchen. Die Proben werden mit luftdichten Wasserschöpfnern entnommen, die zusammen mit der CTD bis zum Ozeanboden hinabgelassen werden. Ein weiterer beispielhafter Parameter, der bei Schiffsexpeditionen erfasst wird, ist die Stärke der vertikalen Vermischung. Sie lässt sich mit Mikrostruktursonden messen, die räumlich kleinstskalige Fluktuationen von Temperatur und Geschwindigkeitsmessung mit einer Frequenz von etwa 1000 Hertz aufzeichnen.

Verankerte Messungen

Forschungsschifffahrten dienen auch dazu, verankerte Messgeräte auszubringen, zu bergen, zu warten oder zu testen. Zur Verankerung werden Sensoren an einem Seil befestigt und dieses mit einem Gewicht versehen, das eine bestimmte Position gewährleistet. Auftriebskugeln sorgen dafür, dass die Seile mit den Geräten aufrecht im Wasser stehen. Solche verankerten Messungen liefern längere Zeitreihen aus dem Ozeaninneren. Sie sind zum Beispiel interessant in Regionen, in denen starke räumlich mehr oder weniger fixierte Strömungen vorliegen – etwa im Bereich der westli-

chen Randströme, die kaltes Wasser aus hohen Breiten zum Äquator bringen. Die Geschwindigkeit dieser Strömungen misst man unter anderem mit akustischen Sensoren mithilfe des Dopplereffekts: Wird der ausgesendete Schall an passiv im Wasser schwebenden Teilchen reflektiert, so verändert sich die Frequenz, je nachdem, ob die Strömung die Teilchen auf den Sensor zu- oder von ihm wegtreibt.

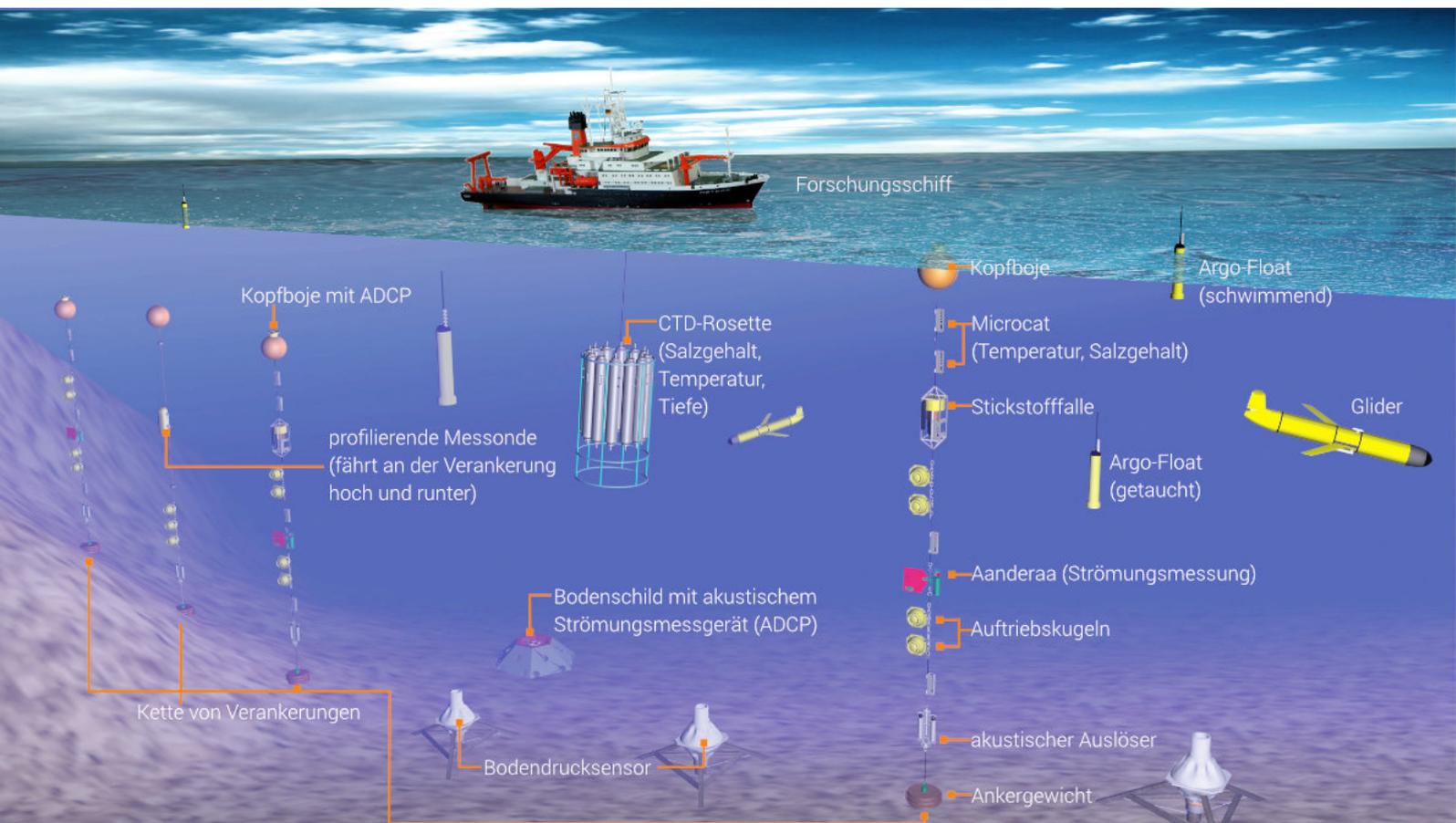
Auch die klimarelevante atlantische Umwälzzirkulation (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) benötigt jahrzehntelange Zeitreihen und daher auch verankerte Sensoren. Bei den zwei am längsten beobachteten AMOC-Messungen zwischen Florida und Afrika bzw. zwischen Kanada und Europa werden Bodenecholote am Ozeanboden verankert, aus deren Messungen man indirekt die geostrophischen Strömungen berechnen kann. Wissenschaftler:innen des Helmholtz-Zentrums GEOMAR (Kiel) beteiligen sich mit Strömungsmessungen am kanadischen Kontinentalabhang an der AMOC-Vermessung eines amerikanisch-europäischen Konsortiums (OSNAP). Das Messsystem reicht von Kanada über Grönland bis nach Europa. GEOMAR misst die wichtigsten AMOC-Strömungskomponenten auch im tropischen Atlantik. Die Vielzahl an AMOC-Messreihen verdeutlicht sowohl die noch vorhandenen Unsicherheiten als auch die Bedeutung der Zirkulation für das Klimasystem und die langfristige Vorhersagbarkeit des Ozeans (siehe auch „Der Ozean im Klimasystem“ auf Seite 111). Die AMOC gilt unter Klimawissenschaftler:innen deshalb als potenzieller Kipppunkt, dessen Eintreten dem Sonderbericht des Weltklimarats über Ozean

und Kryosphäre aus dem Jahr 2019 zufolge unwahrscheinlich, aber physikalisch möglich ist.

Autonome Plattformen

Neben Verankerungen gibt es auch Messgeräte, die durch den Ozean treiben und dabei kontinuierlich Daten erfassen. Rund 4000 dieser autonomen Forschungsgeräte messen derzeit im Rahmen des internationalen Argo-Programms rund um den Globus Temperatur- und Salzgehalt in den oberen 2000 Metern des Ozeans. Seit etwa 2006 sind ausreichend viele solcher Floater vorhanden, um die Änderungen des Wärmegehalts des globalen Ozeans sehr viel genauer, als es vorher je möglich war, zu bestimmen. Das Programm soll erweitert werden um Floater, die die Wassersäule bis 4000 Meter Tiefe vermessen, und um flachere Varianten (bis 1000 Meter), die biogeochemische Parameter erfassen können.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden weitere autonome Plattformen entwickelt, die nicht nur passiv im Ozean treiben, sondern aktiv Regionen ansteuern und vermessen können. Für die physikalische Ozeanografie sind besonders die sogenannten Gleiter von Bedeutung. Diese Unterwasserroboter sind vergleichbar mit Segelflugzeugen. Sie können sich aufsteigend und absinkend im Ozean an beliebige Orte bewegen, um währenddessen eine Vielzahl verschiedener Parameter zu messen. Weltweit sind bis jetzt wenige Hundert Gleiter im Einsatz. Aktuell werden sie vor dem Aussetzen auf ein festes



Messprogramm eingerichtet. Forschende an der Universität Bremen entwickeln aber auch neue Software, um den Gleiter ereignisabhängig zu steuern. Zum Beispiel könnte der Gleiter nach Entdecken eines Ozeanwirbels sich selbst anweisen, im Wirbel zu verharren und zusätzlich die Messfrequenz zu erhöhen.

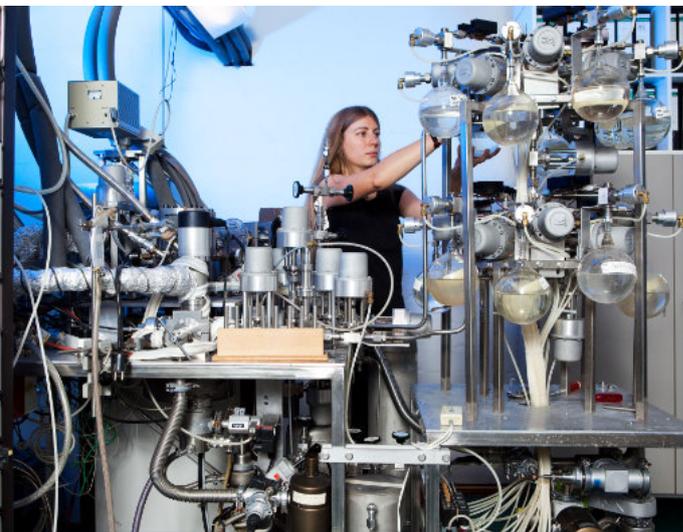
Der Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean sowie die Prozesse in dessen Oberflächenschicht werden auch mithilfe von sogenannten Wellengleitern untersucht. Wellengleiter ziehen aus dem Auf und Ab der Wellenbewegung Energie für eine Vorwärtsbewegung. So können sie entlang ihres Wegs Messungen an oder nahe der Grenzfläche zwischen Atmosphäre und Ozean durchführen. Eine andere Plattform für solche Messungen sind rund zwei Meter lange Segelboote – Saildrones –, die autonom Strecken abfahren und ebenfalls mit verschiedenen Sensoren bestückt werden können.

Fernerkundung

Um weltumspannend und kontinuierlich Daten zu erheben, sind Satelliten am besten geeignet. Sie können allerdings nur die Oberfläche und die obersten Bereiche des Ozeans vermessen und daher kaum Informationen aus den Tiefen des

Meeres liefern. Besonders bedeutsam sind Messungen der Auslenkung der Oberfläche, die mit Altimetern vorgenommen werden. Diese messen per Laufzeitverschiebung eines Lasersignals, wie sich der Abstand zwischen der Ozeanoberfläche und dem Satelliten verändert. Aus diesen Daten lässt sich die geostrophische Geschwindigkeit an der Meeresoberfläche berechnen. In Kombination mit lokalen Geschwindigkeitsmessungen im Ozeaninneren (z. B. aus den Bodenecholotmessungen) erlaubt das Rückschlüsse auf den Zustand der gesamten Wassersäule. Altimetermessungen stehen kontinuierlich seit etwa 25 Jahren zur Verfügung und ermöglichen eine sehr gute Abschätzung der Erhöhung des Meeresspiegels in diesem Zeitraum. Der im Dezember 2023 gestartete Satellit SWOT (Surface Water and Ocean Topography) wird die Meereshöhe in einer zehnmal höheren räumlichen Auflösung als herkömmliche Satelliten liefern. Damit lässt sich mehr über die Rolle von kleinen Strukturen für den Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean sagen. Satellitenmessungen stehen auch für die Oberflächentemperatur und den Salzgehalt sowie für eine wachsende Anzahl biogeochemischer Parameter zur Verfügung.

Monika Rhein und Sunke Schmidtke



ISOTOPE IN DER GEOPHYSIK

Chemische Elemente sind durch den Aufbau ihres Atomkerns bestimmt: Atome mit gleicher Protonenzahl gehören zum gleichen Element. Die anderen Kernbausteine – die Neutronen – können in abweichender Zahl vorliegen. Man spricht dann von Isotopen. Verschiedene Isotope eines Elements kommen in unterschiedlicher Häufigkeit vor: So ist beispielsweise Kohlenstoff, der immer sechs Protonen besitzt, mit acht Neutronen (das C-14) viel seltener als Kohlenstoff mit sechs Neutronen (C-12). Das Isotopenverhältnis einer Materialprobe ändert sich aber auch je nachdem, was ein Stoff „durchgemacht“ hat und in welcher Struktur man ihn vorfindet. Die bekannteste Anwendung, die dies nutzt, ist wohl die Datierung von archäologischen Funden anhand des Verhältnisses zwischen C-12 und C-14, weil letzteres radioaktiv zerfällt.

Hochpräzise Messungen stabiler und radioaktiver Isotope eröffnen deshalb stetig neue Anwendungen in den Umweltwissenschaften – nicht zuletzt dank einer rasanten technischen Entwicklung von Massenspektrometern, Laserspektrographen und neuerdings Atomfallen-Technologien. Mobile isotopenaufgelöste Laserspektroskopie erlaubt es, den Transport von Kohlenstoff und

Edelgas-Isotope und Tritium-Massenspektrometer-Labor am Institut für Umweltphysik, Universität Bremen

Wasser in der Atmosphäre, im Boden und im Ozean genau zu quantifizieren. Isotopenbilanzen von Kohlenstoff, Sauerstoff oder Stickstoff werden heute sogar in globale Klimamodelle eingebettet. In der Ozeanografie sind die Isotope von Helium und Neon für die Untersuchung von ozeanischen Wassermassen ein unerlässliches Werkzeug. Sie erlauben beispielsweise, den Anteil von glazialen Schmelzwasser abzuschätzen sowie eine zeitlich gemittelte regionale Meereis-Bildungsrate daraus abzuleiten.

Mit der Untersuchung von radioaktiven Isotopen lassen sich die Verweilzeit eines Stoffs in einer Probe und damit deren Alter bestimmen. Je älter das untersuchte Material (Meerwasser, Gletschereis, Sediment, Gestein), desto geringer wird der Anteil des radioaktiv zerfallenden Isotops. Ein Beispiel dafür ist Radiokohlenstoff (C-14, s. o.), der auch zur Altersbestimmung von Sedimentproben benutzt wird. Bei der Datierung von Grundwasser kommt das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium zum Einsatz, das durch Atomwaffentests in großen Mengen in die Atmosphäre eingebracht wurde und heute aus der Wiederaufbereitung von Brennelementen stammt.

Norbert Frank, Oliver Huhn und Monika Rhein

WETTERVORHERSAGE UND WARNUNG VOR GEO-GEFAHREN

Das physikalische Verständnis des Erdsystems erlaubt es, Vorhersagen zu treffen – über das Wetter und das Klima, aber auch über Geo-Gefahren wie Erdbeben und Vulkanausbrüche. Solche Vorhersagen sind für langfristige Schadensbegrenzung und für einen kurzfristigen Katastrophenschutz unentbehrlich und retten neben Menschenleben enorme wirtschaftliche Werte.

Viele Menschen nutzen die Wettervorhersage, um Aktivitäten zu planen: Nehme ich das Fahrrad oder die Straßenbahn? Lasse ich die Feier drinnen oder draußen stattfinden? Packe ich dicke Jacken oder Sandalen in den Koffer? Ohne eine numerische Wettervorhersage könnten wir nicht in solchem Detail planen. Wir müssten uns an den langjährigen Durchschnittswerten der Beobachtungen für diese Zeit des Jahres, also an den klimatologischen Mittelwerten, orientieren. Zwar lässt sich mit der Annahme „das Wetter wird morgen genauso sein wie heute“ – der sogenannten **Persistenz** – für kurzfristige Vorhersagen bei günstigen Bedingungen (wie einem stabilen Sommerhoch) eine erstaunlich gute Trefferquote erreichen. Bei ungünstigeren Bedingungen oder längerfristigen Vorhersagen lässt sie uns aber im sprichwörtlichen Regen stehen.

Die numerische Wettervorhersage berechnet auf Basis physikalischer Gesetze die Bewegungen der Luftmassen in der Atmosphäre, die Entwicklung der Hoch- und Tiefdruckgebiete und dazugehörige Schlechtwetterfronten. Zudem werden kleinskalige physikalische Prozesse wie Umwandlungen zwischen gasförmiger, flüssiger und fester Phase des Wassers und die entsprechenden latenten Wärmeraten abgebildet. Diese Prozesse sind der Motor der konvektiven Bewegungen und in den Tropen sogar bestimmend. Ein Computermodell löst die **Gleichungen aus Strömungsmechanik und Thermodynamik**. Dazu wird die Atmosphäre in ein dreidimensionales Modellgitter (im Beispiel des ICON-Modells des Deutschen Wetterdiensts mit dreieckiger Grundfläche und zurzeit global 13 Kilometer, über Deutschland zwei Kilometer Maschenweite) eingeteilt. Für jede der Gitterboxen werden dann in Großrechnern die Gleichungen gelöst: gekoppelte, nichtlineare partielle Differenzialgleichungen, die ein chaotisches System beschreiben. Das bedeutet, kleine Fehler oder Ungenauigkeiten wachsen mit der Zeit stark an. Das Modell weicht daher mit zunehmender Zeit immer weiter von der realen Atmosphäre ab. Als Gegenmittel wird die mathematische Methode der Datenassimilation angewandt, welche die Modelle und Beobachtungen unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten immer wieder zusammenführt.

Für die Wetterprognose nimmt die Ensemblevorhersage eine wichtige Rolle ein. Hierbei werden mehrere Modellläufe des Wettermodells ausgeführt, die jeweils leicht unterschiedliche



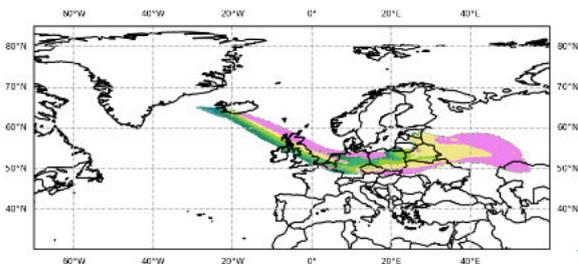
Die Daten staatlicher und privater Wetterdienste lassen sich auf dem Smartphone abrufen und ermöglichen, sich mit hoher Präzision im Alltag auf das aktuelle Wetter einzustellen. Ob es in der nächsten halben Stunde regnen wird („Now-Cast“), ist mit solchen Hilfsmitteln extrem genau vorhersagbar.

Startbedingungen haben. Je nach Wetterlage weichen die unterschiedlichen Modellläufe nach wenigen Stunden oder erst über eine Woche deutlich voneinander ab. Dies ist ein wichtiger Hinweis darauf, wie stabil oder zuverlässig die Wettervorhersage für die nächsten Tage tatsächlich ist.

Beobachtungen sind entscheidend

Weltweite Beobachtungssysteme erfassen kontinuierlich die traditionellen meteorologischen Parameter wie Druck, Temperatur, Feuchte, Wind, Wolken, Strahlung und Niederschlag, aber auch erweiterte Erdsystem-Parameter wie Spurengase und Aerosole. Seit den 1960er-Jahren beobachten zunehmend leistungsfähigere Satelliten die Atmosphäre, seit den 1970er-Jahren die Ozean- und Landoberfläche. Fortschritte ergeben sich einerseits durch die zunehmend höher aufgelösten Beobachtungen, wie vertikale Profelinformation aus Flugzeugmessungen, Fernerkundungsverfahren und Satellitenbeobachtungen. Andererseits verspricht das Einbeziehen von immer mehr Komponenten (Ozean, Eis, Vegetation, Boden) und Prozessen in die Modellierung Fortschritte in der Vorhersage sowohl des Wetters als auch des Klimas. Neue Verfahren der künstlichen Intelligenz produzieren erste Fortschritte in der Vorhersage, wobei die Leistungsfähigkeit bisher maßgeblich auf der genauen Bestimmung des gegenwärtigen Zustands der Atmosphäre beruht. Schließlich sind durch den stetigen Anstieg der verfügbaren Rechenleistung und damit möglicher höherer räumlicher Auflösung kontinuierliche Fortschritte zu erwarten.

Eine operationelle Wettervorhersage, wie z. B. am Deutschen Wetterdienst, beruht auf einer zeitlich optimierten Datensammlung, Datenassimilation und gleichzeitigen numerischen Modellierung auf einem Hochleistungscomputer. Aus dem gegenwärtigen Zustand der Atmosphäre lässt sich deren kurzfristige Veränderung – das Wetter – in die Zukunft



Vorsorglich erstellte Vorausberechnung einer Aschewolke 27 Stunden nach einem möglichen Vulkanausbruch auf Island im November 2023.

vorausberechnen. Wie gut ist eine operationelle Vorhersage? Dies lässt sich durch Verifikation mit Beobachtungen quantifizieren. Der **Vorhersagehorizont** – also der Zeitraum, in der die numerische Wettervorhersage der Klimatologie überlegen ist – liegt bei ungefähr **zwei Wochen**. Saisonale Vorhersagen beruhen auf längerfristigen Phänomenen wie dem Pazifikphänomen El Niño. Klimavorhersagen sagen eine Tendenz zu durchschnittlichen Werten voraus – sie hängen nicht mehr vom gegenwärtigen Wetter ab, sondern vom Energie- und Wasserkreislauf der Erde. Klimamodelle lösen daher kein Anfangswertproblem, sondern Randwertprobleme – das im Wetter enthaltene Chaos mittelt sich über Zeitspannen von ca. 30 Jahren weg. Beobachtungen sind hierfür von hohem Wert: Mit ihnen lassen sich die Ergebnisse der Klimamodelle verifizieren und die Modelle verbessern.

Anwendungen für die Gesellschaft

Wetter- und Klimadaten sowie Vorhersagen und Projektionen werden in fast allen Bereichen des modernen Lebens verwendet: Katastrophenschutz, Raumentwicklung, Hochwasserschutz, Wasserwirtschaft, Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Bodenschutz, Forstwirtschaft, Fischerei, Tourismus, Verkehr und Infrastruktur, Bauwirtschaft, Biodiversität und Naturschutz, menschliche Gesundheit, Industrie und Gewerbe, und Finanzwirtschaft.

Der Nutzen von modellbasierten Vorhersagen, sei es des Wetters oder anderer Geo-Gefahren wie Stürme, Überschwemmungen, Erdbeben, Erdbeben oder Vulkanausbrüche, liegt sowohl in der Abschätzung des Gefahrenpotenzials, als auch in der konkreten Vorhersage des zeitlichen Eintreffens. Wenn ein Ereignis eingetreten ist, lässt sich der Schaden begrenzen, indem die Folgen genauer vorhergesagt werden. Zum Beispiel werden bei Aktivität isländischer Vulkane vorsorglich **potenzielle Aschewolken** berechnet, welche vom Flugverkehr zu meiden sind.

*Torsten Dahm, Andrea Kaiser-Weiss,
Franz-Josef Molé und Linda Schlemmer*

FRÜHWARNSYSTEME FÜR GEO-GEFAHREN

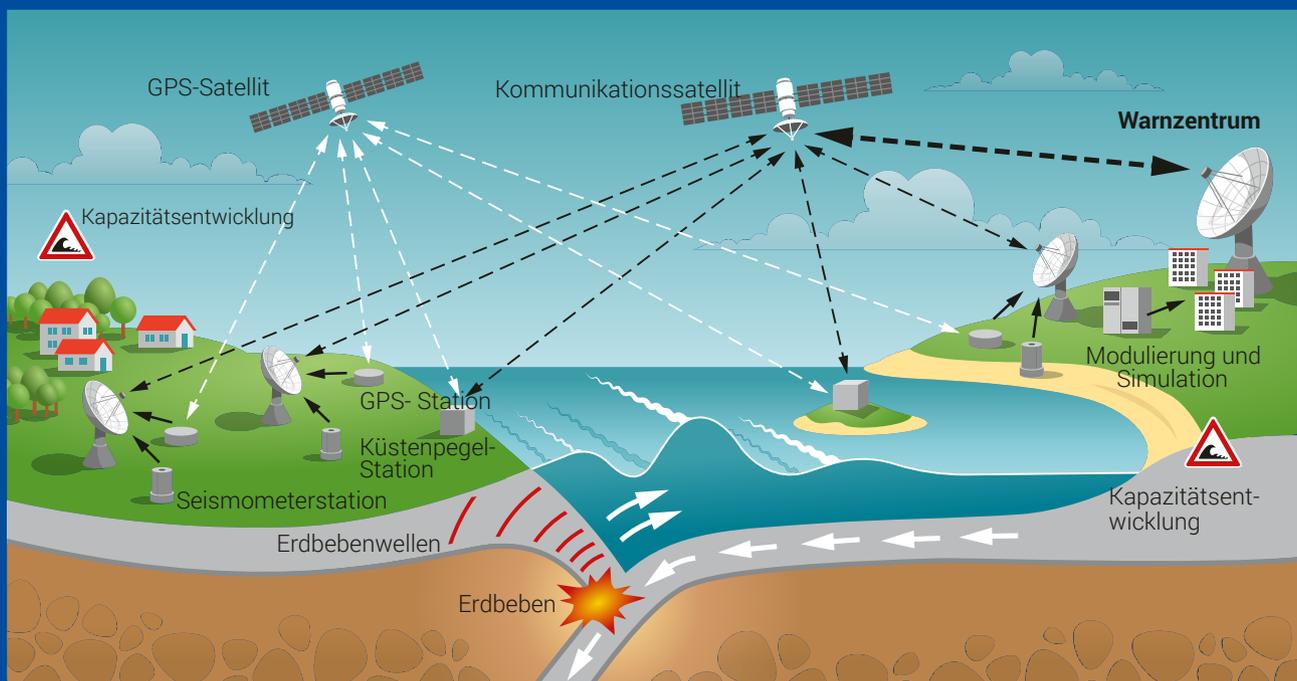
In erdbebengefährdeten Gebieten sollen operationelle Frühwarnsysteme den Beginn eines Erdbebens möglichst früh messen, um dann Gebiete in größerer Entfernung vor möglichen starken Bodenbewegungen oder vor Tsunamiwellen zu warnen. Während sich die zerstörerischen seismischen Wellen mit Geschwindigkeiten von etwa 3 bis 4 km/s ausbreiten, können die Informationen über eine herannahende seismische Welle mit Lichtgeschwindigkeit über Telekommunikationsleitungen versendet werden. Dennoch bleibt die Vorwarnzeit sehr kurz, sodass vor allem technische Maßnahmen automatisch oder halbautomatisch ergriffen werden können (Abbremsen von Schnellzügen, Schließen von Gasleitungen, Herunterfahren von kritischen Anlagen). Solche Systeme liefern öffentliche Warnungen in Mexiko, Japan, Südkorea und Taiwan, sowie Warnungen für bestimmte Nutzergruppen in Indien, der Türkei, Rumänien und den USA. Sie werden auch für den Einsatz in Italien, der Schweiz, Chile, Israel, Nicaragua, Spanien, Neuseeland, Island, sowie in Costa Rica und El Salvador getestet.

Bei der Tsunamifrühwarnung ist die Situation zeitlich günstiger, da sich Tsunamiwellen im Tiefwasser mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,15 km/s deutlich langsamer ausbreiten als seismische Wellen. So hat das Deutsche Geoforschungszentrum zusammen mit neun deutschen Partnern und Indonesien sowie in Kooperation mit Japan, China, den USA und der EU zwischen 2005 und 2014 ein Tsunamifrühwarnsystem für den indischen Ozean mit Schwerpunkt in Indonesien aufgebaut, wo es häufig

Starkbeben gibt. So könnte ein Küstenabschnitt in Indien, der etwa 1500 km entfernt zum Epizentrum des Bebens liegt, bis zu 120 Minuten vor einer nahenden Tsunamiwelle gewarnt werden – ausreichend Zeit, um Personen aus gefährdeten Gebieten am Strand oder nahe des Meers koordiniert zu evakuieren.

Auch bei Erdbebenfrühwarnsystemen gibt es neue Ansätze. 2019 wurde zum ersten Mal gezeigt, dass empfindliche Gravimeter und Breitbandseismometer die Störung des Gravitationsfelds durch den Erdbebenbruch, also das erdbebenauslösende Ereignis selbst, messen können. Der Gravitationseffekt breitet sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch die Erde aus und erreicht daher die Messstation, deutlich bevor die erste seismische Welle eintrifft, ähnlich wie Blitz und Donner bei einem Gewitter. Mit der neuen Technologie des „Prompt Gravity Effects“ könnte die Zeit zur automatischen Charakterisierung eines Starkbebens weiter verkürzt werden. Leider sind bisherige Sensoren noch nicht empfindlich genug, um die kleinen Signale auch für mittelschwere (jedoch bereits extrem zerstörerische) Erdbeben zu messen.

Torsten Dahm



REGEN, SCHNEE UND UNSICHERHEIT

Seit Jahrtausenden sind Menschen fasziniert von den sich ständig ändernden, ästhetischen und manchmal bedrohlichen Formen von Wolken, die im Mittel rund 70% der Erdoberfläche bedecken. Bis heute ist ihre Vorhersage in Wetter- und Klimamodellen schwierig, obwohl dies für die Prognose von Extremniederschlägen und Rückkopplungen mit der Klimaerwärmung essenziell ist.

Anfang des 19. Jahrhunderts erfand ein Apotheker die Wolkenkunde: Der Amateurmeteorologe Luke Howard teilte Wolken erstmals anhand ihrer phänomenologischen Eigenschaften in die Familien **Cirrus** (Federwolken), **Stratus** (Schichtwolken) und **Cumulus** (Haufenwolken) ein. Diese Einteilung dient bis heute der Beschreibung von Wolken, verfeinert durch zahlreiche Gattungen, Arten und Sonderformen im Internationalen Wolkenatlas der World Meteorological Organization (WMO).

Wichtiger als diese Einteilung nach Aussehen und Höhe sind allerdings die physikalischen Eigenschaften von Wolken: ihre Zusammensetzung aus **Wassertröpfchen** und **Eispartikeln**, die dynamischen Luftströmungen in den Wolken und ihrer Umgebung und die Absorption und Reflexion von Strahlung verschiedener Wellenlängen.

Von Nanometern bis zu Tausenden von Kilometern

Tröpfchen und Eiskristalle werden zusammenfassend als Hydrometeore bezeichnet – ein Wort, das sich aus den altgriechischen Wörtern für „Wasser“ und „in der Luft schwebend“ zusammensetzt. Diese Hydrometeore bilden sich in der Atmosphäre nur unter der Mitwirkung von kleinsten Aerosolpartikeln, an die die Wasserteilchen sich anheften können. Diese Aerosole kommen aus natürlichen oder aus menschengemachten Quellen, zum Beispiel aus Meersalz oder Schwefel und Ruß, die bei industriellen Verbrennungsprozessen entstehen. Eine weitere Voraussetzung für das Entstehen von Wolken sind die großräumigen Wetterbedingungen und Luftströmungen in Hoch- und Tiefdruckgebieten sowie das Aufheizen der Landoberfläche und die daraus folgende Konvektion. Niederschlag – also Regen, Hagel oder Schnee – entsteht durch gegenseitige Kollisionen von Hydrometeoren und deren Anwachsen durch die Kondensation von Wasserdampf.

Doch Wolken sind nicht nur für den Niederschlag wichtig. Sie reflektieren auch fast ein Viertel der auf die Erde eintreffenden Sonnenstrahlung und spielen damit eine wichtige Rolle für den Energiehaushalt der Erde. Ändern sich die mittleren optischen Eigenschaften von Hydrometeoren, so kann das große Auswirkungen

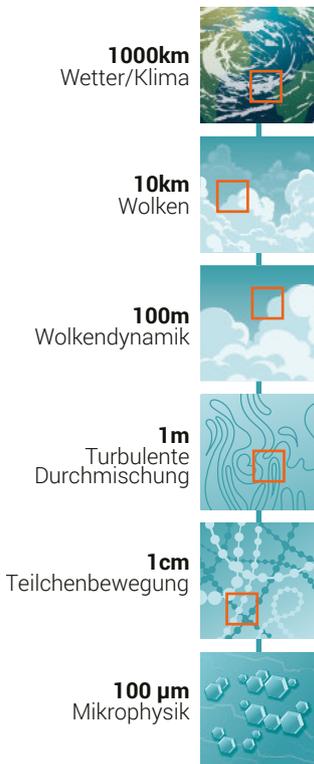
haben. Will man Wolken rundum verstehen, so muss man also sowohl die einzelnen Hydrometeore als auch die gesamte Wolke in den Blick nehmen. Diese räumlichen Skalen erstrecken sich über fast 15 Größenordnungen und sind die größte Herausforderung für das Verständnis der Prozesse in Wolken und ihrer Vorhersage.

Seit der Industrialisierung hat die Konzentration von Aerosolen in der Atmosphäre deutlich zugenommen, mit vermutlich spürbaren, aber noch nicht abschließend verstandenen Einflüssen auf Wolken. Sind mehr Aerosole vorhanden, können sich grundsätzlich mehr und kleinere Wolkentröpfchen bilden. Das sieht man deutlich, wenn man die Wolken in den Abflughäfen von Schiffen mit einer sauberen Umgebung vergleicht. Kleinere, zahlreichere Wolkentröpfchen streuen mehr Sonnenlicht als wenige große, und Kollisionen sind weniger wahrscheinlich. Das spricht zwar dafür, dass sich die Niederschlagsbildung verlangsamt, die Strömung und Rückkopplungen in Wolken können die erwarteten Effekte jedoch dämpfen. In Wolken, die sich in Temperaturbereiche unterhalb von 0 °C erstrecken – und das sind bei Weitem die meisten Wolken –, ist die Situation durch die Eisbildung allerdings deutlich komplizierter: Sowohl eine Zu- als auch eine Abnahme der Rückstreuung und der Niederschlagsbildung sind durch den Einfluss menschengemachter Aerosolpartikel denkbar.

Dies erschwert die Prognose, wie sich der Effekt von Aerosolen auf Wolken im Zuge der globalen Erwärmung weiter entwickelt. Auch Vorschläge, durch gezielte Aerosolinjektionen in das Klima (Climate Intervention, siehe auch „Kein Ersatz für Klimaschutz“ auf Seite 271) oder das regionale Wetter einzugreifen, können nicht richtig bewertet werden, solange die Prozesse in Wolken nicht ausreichend verstanden sind. Neue Studien versuchen, bessere Abschätzungen dieser Effekte aus der Beobachtung von „unbeabsichtigten“ Experimenten in natürlicher Umgebung zu gewinnen – dazu gehören etwa Vulkanausbrüche oder die Änderung von Schiffsabgasen nach der Herabsetzung des Grenzwerts für Schwefelgehalte im Schiffsdiesel.

Beobachtungen, Experimente und Modelle

Eine große Herausforderung bei der Vermessung von Wolken in der Atmosphäre ist, dass die Randbedingungen und Historie nicht kontrolliert werden können. Somit sind zwei Messungen niemals direkt vergleichbar wie es etwa Labormessungen sein könnten. Bei Probennahmen per Flugzeug, Drohne oder Sonde kommt außerdem oft hinzu, dass die



Wolkenphysik geschieht auf räumlichen Skalen von bis zu 15 Größenordnungen, die miteinander verknüpft sind.

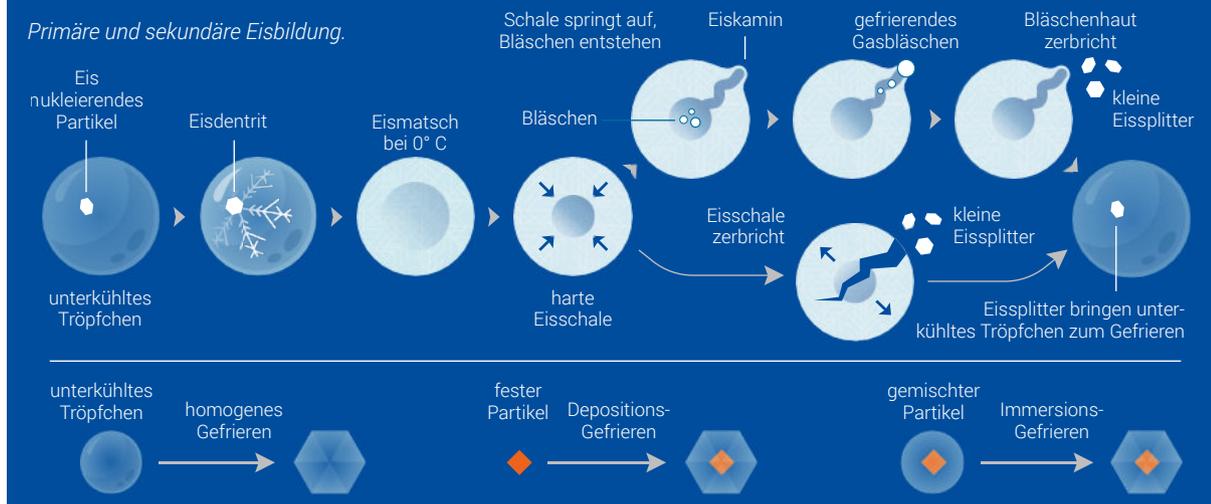
ENTSTEHUNG VON EIS IN WOLKEN

Eisbildung in Wolken ist der Ursprung für den Großteil des globalen Niederschlags, und auch Ladungstrennung und Entladung durch Blitze (ein anderer noch nur unzureichend verstandener Prozess) ist nur durch Interaktionen von Eispartikeln mit Wassertropfen möglich. Wolkentröpfchen, die einige Mikrometer groß sind, gefrieren in der Atmosphäre nicht bei 0 °C, sondern können bis zu Temperaturen von etwa -38 °C flüssig bleiben, solange kein passender Aerosolpartikel in den Tröpfchen oder ein Eiskristall durch Kollision das Gefrieren auslöst. Solche Aerosole (Eiskeime genannt) sind sehr selten, denn nur wenige haben an ihrer Oberfläche Strukturen, die dem Kristallgitter von Eis ähnlich genug sind, um die Kristallisation des Wassers zu vereinfachen. Erst bei tiefen Temperaturen, zum Beispiel in Cirruswolken in der oberen Atmosphäre, gefrieren die Tröpfchen auch ohne Keim. Wie genau Aerosole die Eisbildung bestimmen, wird mit Simulationen, Labor- und Feldmessungen

und daraus abgeleiteten Beschreibungen für Wetter- und Klimamodelle untersucht.

Oft lässt sich beobachten, dass die Anzahl der Eispartikel in Wolken die Anzahl der Eiskeime um mehrere Größenordnungen übersteigt – eines der größten Rätsel der Wolkenphysik. Möglicherweise platzen die Tröpfchen während des Gefrierens auf und erzeugen so weitere Kristallisationskeime. Eine andere Erklärung ist, dass die Eispartikel miteinander kollidieren und dabei zerbrechen.

Sobald sich die ersten Eispartikel in einer Umgebung von vielen unterkühlten flüssigen Tröpfchen gebildet haben, können diese schnell anwachsen und als Schnee, Graupel oder Hagel aus der Wolke herausfallen. In vielen Fällen schmelzen sie vor dem Auftreffen auf dem Erdboden wieder und erreichen den Boden als Regen.



Messung nur ein sehr kleines Volumen der Wolken abdecken kann. Außerdem beeinflusst diese möglicherweise selbst die Wolken – so können Eispartikel am Einlass der Messinstrumente zerbrechen. Große Anstrengungen in der Entwicklung von Messtechniken zielen darauf ab, diese Einflüsse zu minimieren. Gleichzeitig werden Methoden der Fernerkundung vom Boden (Radar, Lidar) und vom Satelliten fortlaufend verbessert. Mit der im Mai 2024 gestarteten EarthCARE-Mission (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) der ESA werden durch neue Radar- und Lidarmessungen aus dem All neue Daten erwartet, die Aufschluss über viele Details in großer Genauigkeit und mit guter globaler Abdeckung ermöglichen wird. Da Satelliten sehr große Datenmengen sammeln, helfen neu entwickelte Methoden des maschinellen Lernens bei der Auswertung und Interpretation.

Für Prozesse auf den kleinsten Skalen sind Laborexperimente unter kontrollierten, manipulierbaren Bedingungen unabdingbar. Diese reichen von Nukleationsexperimenten unter Mikroskopen über Einzeltröpfchenexperimente bis hin zu Windkanälen und Kammersimulationen, in denen sich die Bildung und Entwicklung von Wolken in Miniatur vermessen lassen. Gezielte Experimente sollen helfen, noch unverstandene Pro-

zesse wie Eismultiplikation und den Einfluss von Turbulenz zu verstehen.

Lange waren einzelne Wolken in Wetter- und Klimamodellen deutlich kleiner als die Gitterweite, also als das „Kästchen“ auf der Landkarte, für das die Parameter einzeln berechnet werden. In diesen Modellen konnten die Prozesse in Wolken also nicht im Detail ausgewertet, sondern nur mithilfe von gemittelten Eigenschaften beschrieben („parametrisiert“) werden. Durch neue Hochleistungsrechnerarchitekturen und Softwareentwicklungen werden die Auflösungen von atmosphärischen Modellen immer besser: Sie betragen bis zu einem Kilometer und nähern sich damit den Skalen der Grobstrukturen von Wolken an. Somit lösen neueste Modelle einen Teil der relevanten Prozesse (Auf- und Abwinde in Wolken) nun explizit auf – einen anderen Teil, wie die einzelnen Hydrometeore und ihre Wechselwirkungen, aber nicht. Wie diese Modelle Wolken am besten erfassen können und wie sie mithilfe von künstlicher Intelligenz weiter beschleunigt werden können, ist Gegenstand aktueller Forschung.

Corinna Hoose, Thomas Leisner und Ulrike Lohmann

SCHLECHTE LUFT

Menschen verunreinigen die Luft, die sie zum Atmen brauchen, unter anderem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe in Industrie und Verkehr und durch Emissionen der modernen Agrarindustrie. Dies stellt eine enorme Gesundheitsgefahr dar.

Seit sich etwa vier Millionen Jäger und Sammler während der neolithischen Revolution in ersten Siedlungen einfanden, wurde die benötigte Energie zunächst praktisch ausschließlich durch die Verbrennung von Biokraftstoffen (überwiegend Holz) sowie später durch Wind- und Wasserkraft erzeugt. Zur Zeit der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert war die Weltbevölkerung auf etwa eine Milliarde angewachsen. Die Verbrennung fossiler Energieträger (zunächst Kohle und Öl) zur Energiebereitstellung wurde im großen Stil betrieben. Inzwischen zählt die Weltbevölkerung mehr als acht Milliarden Menschen. Sie stößt **Schadstoffe** in einem noch nie da gewesenen Ausmaß in die Luft aus. Durch die Ausbreitung der Schadstoffe hat sich die Umweltverschmutzung von einem lokalen zu einem globalen Phänomen entwickelt, und die Welt ist in eine neue geologische Epoche eingetreten: das Anthropozän (Seite 118).

Die Bedrohung der menschlichen Gesundheit durch Luftverschmutzung ist spätestens seit der Zeit von Hippocrates um 400 v. Chr. bekannt. Auch die römischen Geschichtsschreiber Seneca und Frontinus beschrieben die angenommenen gesundheitlichen Auswirkungen des Rauchs. In Zentralasien und China wurde während der Song-Dynastie (947–1279) die Verbrennung von Kohle als Quelle von **Aerosolen und gasförmigen Schadstoffen** identifiziert. Während der Herrschaft von Edward I. in England verbot der „Smoke Abatement Act“ im Jahr 1273 die Verwendung von Kohle, da sie für die menschliche Gesundheit schädlich sei. Im Jahr 1661 beschrieb der englische Architekt John Evelyn die Luftver-

schmutzung in London und ihre Ursachen im Parlament und vor dem König und veröffentlichte diese Darstellung in seinem Essay „Fumifugium“. Luftverschmutzung durch menschliche Aktivitäten ist also kein neues Phänomen, aber aufgrund der starken Urbanisierung treffen ihre Auswirkungen heute einen viel größeren Teil der Bevölkerung.

Schädliche Gase (z. B. Stick- und Schwefeloxide, Ozon, Kohlenmonoxid, Ammoniak, Kohlenwasserstoffe) und Aerosole (auch als Feinstaub) entstehen in Ballungsgebieten durch Verbrennung (Fahrzeuge, Industrie, Kraftwerke, usw.). Auch Emissionen der Landwirtschaft und von Böden und Pflanzen können eine Rolle spielen. Weitere Quellen mit zunehmender Bedeutung sind Waldbrände oder die Verbrennung von Biomasse und Abfällen verschiedener Art. Vulkanausbrüche treten glücklicherweise selten auf, denn sie sind ebenfalls eine Quelle schädlicher Gase und Aerosole.

Smog in London und Los Angeles

Die Luftverschmutzung durch die genannten Gase geht häufig einher mit enormer Aerosolbildung, die sich selbst bei niedriger Luftfeuchte als trockener Nebel bemerkbar macht (engl. fog). Historisch war die Hauptquelle der Luftverschmutzung der Rauch (engl. smoke) der Schornsteine. Daher rührt das Kunstwort **Smog** für dieses Phänomen. Besonders üble Smog-Episoden forderten in den 1950er-Jahren vor allem in London Zehntausende von Toten, daher die Bezeichnung London-Smog für durch Rauch (aus Kohleverbrennung)

GESUNDHEITSGEFAHREN DURCH LUFTVERSCHMUTZUNG

Menschen, Tiere und Pflanzen atmen Luft. Auf geringste Beimengungen von Ozon, Schwefeldioxid, Stickoxiden oder Feinstaub reagieren sie höchst empfindlich. Bereits in Volumenanteilen von wenigen Milliardsteln beeinträchtigen diese Substanzen die Lebensfunktionen. Neben den oben beschriebenen Quellen und Auswirkungen der Luftverschmutzung im Freien hat auch die Luftverschmutzung in Innenräumen bedeutende negative Auswirkungen auf die Gesundheit. Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation (WHO) tragen beide erheblich zur weltweiten Krankheitslast bei. Die Luftverschmutzung im Freien ist für etwa 4,2 Millionen Todesfälle pro Jahr, die Luftverschmutzung in Innenräumen für etwa 3,8 Millionen vorzeitige Todesfälle verantwortlich, und dies hauptsächlich in Regionen mit niedrigem Einkommen. Ursachen sind in erster Linie Herz-Kreislauf-Erkrankungen und erst in zweiter Linie Lungenerkrankungen. Dies entspricht einem durchschnittlichen Verlust an Lebenszeit von etwa drei Jahren und ist vergleichbar mit der durchschnittlichen Lebensverkürzung durch Rauchen, bezogen auf die Gesamtbevölkerung. Während Rauchen aber eine individuelle Entscheidung ist, können wir der Luftverschmutzung kaum entgehen. Ihre Folgen betreffen alle: Kinder, Ältere, Gesunde und Kranke.

Die Daten identifizieren Feinstaub als eine der bedeutendsten Gesundheitsgefahren für Menschen. Toxische Spurengase spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Zahl der Opfer allein durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung liegt zwei- bis dreimal höher als die Anzahl der Menschen, die jährlich durch Verkehrsunfälle ums Leben kommen.

verursachten Smog. Die Massenmotorisierung bewirkte eine weitere Art von Smog, die nach einer der am stärksten betroffenen Städte – [Los Angeles](#) – benannt wurde. Die ersten bekannten Episoden von Los-Angeles-Smog ereigneten sich im Sommer 1943. Los-Angeles-Smog (auch „photochemischer“ oder „Sommersmog“ genannt) entsteht durch chemische Reaktionen von Kohlenmonoxid oder Kohlenwasserstoffen in der Atmosphäre. In den frühen 1950er-Jahren zeigte Arie Jan Haagen-Smit, dass [Autoabgase](#), die aus Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden (NO_x) bestehen, eine dominierende Rolle bei der Erzeugung von photochemischem Smog spielen.

Feinstaub kommt aus zwei Typen von Quellen: Einerseits aus der direkten Emission von Partikeln durch Verbrennung, Abrieb (z. B. von Bremsbelägen und Reifen) oder Staubaufwirbelung. Dadurch entstehen überwiegend große Teilchen (mit Abmessungen im Bereich von Mikrometern bis Bruchteile eines Millimeters), die man landläufig als Staub bezeichnen würde. Diese Teilchen fallen aufgrund ihrer Größe rasch zu Boden. Andererseits entstehen Partikel in der Atmosphäre aus gasförmigen Vorläufern wie Schwefeldioxid, Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak als Ergebnis der Verwendung von überwiegend künstlichen Düngemitteln viel kleinere Teilchen mit Durchmessern von weniger als zehn oder zweieinhalb Mikrometer (PM10 oder PM2,5). Diese sind gesundheitlich bedenklicher, weil sie tiefer in die Atemwege eindringen können, dabei die Lunge schädigen und auch in den Blutkreislauf gelangen.

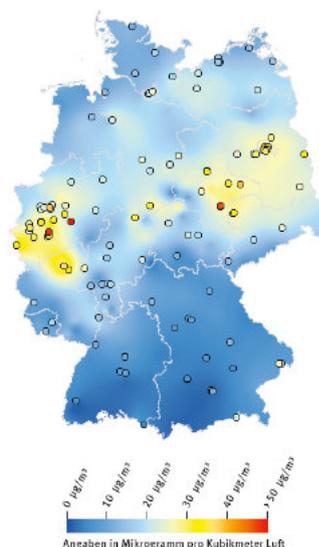
Mittlerweile ist Smog ein globales Problem geworden. Erste Anzeichen zeigten sich in den 1950er-Jahren, als im Frühjahr in der Arktis weiträumig Dunst („Arctic Haze“) beobachtet wurde, der durch den Transport von Schadstoffen aus mittleren Breiten verursacht wird. Weitere Beispiele sind der Transport der Emissionen kanadischer [Waldbrände](#) im Juni 2023 an die Ostküste und den Mittleren Westen der USA. Diese Smog-Wolke schränkte den Flugverkehr auf den großen Flughäfen ein und führte dazu, dass die Menschen Atemmasken trugen, um ihre Belastung durch die giftigen Schadstoffe zu verringern.

Messung von Luftverschmutzung

Quantitative und systematische Messungen von Bestandteilen der Luftverschmutzung datieren in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurück, als der Chemiker Christian F. Schönbein ein kolorimetrisches Verfahren zur Bestimmung der Konzentration des 1839 von ihm entdeckten Ozons in Umgebungsluft entwickelte. Heute wird das Ausmaß der Luftverschmutzung in nationalen und globalen Messnetzen kontinuierlich überwacht. Es dominieren physikalische und physiko-chemische Methoden, etwa Kurzweg-Absorptionsspektroskopie für die Ozonmessung, Gasphasen-Chemolumineszenz für die Bestimmung der Stickoxidkonzentration oder optische Verfahren zur Bestimmung von Feinstaub. Neben in-situ-Messungen gewinnen Satellitenbeobachtungen (Seite 249) an Bedeutung. Sie erlauben heute bereits Messungen mit einer Auflösung von wenigen Kilometern und könnten in Zukunft bodengebundene Messungen zum großen Teil ersetzen.

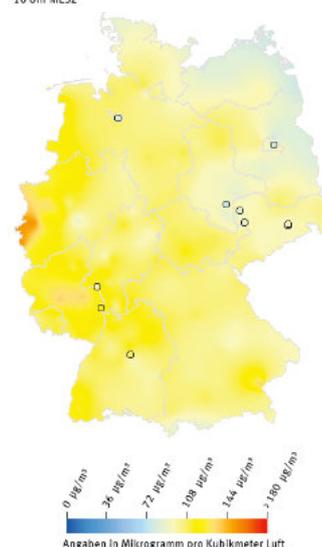
Tagesmittel der Feinstaubkonzentration (PM10)

18.01.2024



Ein-Stunden-Mittelwert der Ozonkonzentration

25.06.2024
16 Uhr MESZ



Feinstaubkonzentration im Winter (links), Ozonkonzentration im Sommer (rechts). Abrufbar sind solche Karten auf den Webseiten des Umweltbundesamts, das die Daten der Messnetze des Bundes und der Länder aufbereitet.

Maßnahmen gegen Luftverschmutzung

Luftverschmutzung ist eine Angelegenheit von öffentlichem Interesse. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse hierzu mündeten in einer nationalen und internationalen evidenzbasierten Umweltpolitik. So führte die rasante Zunahme der Luftverschmutzung seit den 1950er-Jahren zu nationalen Gesetzen zur Kontrolle der Freisetzung von Luftschadstoffen. Der grenzüberschreitende Charakter der Luftverschmutzung führt zum völkerrechtlichen Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (LRTAP aus dem englischen Namen). Ziel ist es, in internationaler Zusammenarbeit geeignete nationale Politiken zu entwickeln und durch Informationsaustausch, Konsultation, Forschung und Überwachung die nationalen Maßnahmen zur Bekämpfung der Luftverschmutzung zu koordinieren.

Durch diese nationalen und internationalen Abkommen verringerte sich die Luftverschmutzung zwar vor allem in Teilen Europas, Nordamerikas und Teilen Asiens wie neuerdings auch in China. Trotz dieser Bemühungen hat aber die Industrialisierung Südamerikas, Asiens und Afrikas dazu geführt, dass Teile dieser Regionen eine zuvor nicht gekannte Luftverschmutzung aufweisen. Die Zunahme der Verbrennung von Biomasse und von Waldbränden, die zum Teil auf menschliche Aktivitäten und indirekt auf den Klimawandel (siehe auch „Globale Klimaentwicklung“ auf Seite 120) zurückzuführen sind, hat zu einer zusätzlichen Quelle der Luftverschmutzung geführt. Die Bekämpfung der Luftverschmutzung und die Verbesserung der Luftqualität stellen also weiterhin eine Herausforderung für das 21. Jahrhundert dar.

*John P. Burrows, Justus Notholt,
Ulrich Platt und Christian von Savigny*

GLOBALE HERAUSFORDERUNGEN

Von den fundamentalen Erkenntnissen bis hin zu den Alltagsanwendungen ist die Physik unverzichtbar, um die großen Herausforderungen der Zukunft zu meistern: den Erhalt der Lebensgrundlagen einer ständig wachsenden Menschheit und die stetige Verbesserung ihrer Lebensbedingungen. Besonders zur Bewältigung der zwei wohl größten existenziellen Herausforderungen unserer Zeit, der Klimakrise und der nuklearen Bedrohung, kann die Physik wichtige Beiträge leisten.

Naturwissenschaften, allen voran die Physik sowie die mit ihrer Hilfe entwickelten Technologien, haben der Menschheit in den vergangenen gut zweihundert Jahren zu einer enormen Entwicklung verholfen. Gigantische Industrien versorgen Milliarden von Menschen mit Gütern des täglichen Gebrauchs, Züchtung und Düngung ermöglichen Ernteerträge für eine ständig wachsende Bevölkerung, eine weltumspannende Verkehrsinfrastruktur ermöglicht den globalen Austausch von Menschen und Waren auf dem Land, zu Wasser und in der Luft. Satellitengestützte und kabelgebundene Kommunikationsnetze erlauben den Informationsaustausch für diese hochentwickelte Lebensweise unserer Zivilisation. Wir kennen die grundlegenden Gesetze der Natur und nutzen sie vielfältig, wir kennen den Aufbau der Materie bis hinunter zu den Elementarteilchen und verstehen zunehmend das Zusammenspiel der verschiedenen Sphären unseres Planeten. Es liegen also alle Werkzeuge parat, um eine Zukunft zu gestalten, die Bildung, angemessenen Wohlstand und ein gedeihliches Zusammenleben aller Menschen ermöglichen kann.

Doch dieses Bild entspricht leider in vielfacher Hinsicht nicht der Realität. Der Mensch hat dem Planeten durch seine technischen Aktivitäten, durch die Errichtung von Gebäuden, Industrieanlagen und Infrastruktur rund 50 Kilogramm Technik pro Quadratmeter hinzugefügt – die sogenannte Technosphäre. Zudem hat er dem Planeten Veränderungen aufgezwungen, die inzwischen unsere Lebensgrundlagen bedrohen: Man denke an die exzessive Nutzung von Ressourcen, die ständig zunehmende Mobilität, den Verlust von Biodiversität, die Verbreitung von Schadstoffen in der Luft, den Ozeanen und in unseren Böden und den ungebremst zunehmenden Energieumsatz. Wir nennen das aktuelle Erdzeitalter also aus gutem Grund Anthropozän (Seite 118). Diese mit zunehmender Dynamik fortschreitende Entwicklung gipfelt in einem globalen Problem, das der Menschheit trotz jahrzehntelanger Kenntnis und fundierter wissenschaftlicher Aufklärung erst spät (zu spät?) in seiner vollen Tragweite bewusst wird – der Einfluss des Menschen auf das Klima der Erde. Noch kann man das Abschmelzen der Gletscher, die zunehmenden extremen Wetterereignisse oder die Veränderung atmosphärischer Strömungen als Klimakrise bezeichnen. Doch wenn die Entwicklung weiterhin ungebremst voranschreitet, steuert die Menschheit absehbar auf eine Kli-

makatastrophe zu, die Teile des Planeten unbewohnbar machen und alle ohnehin bekannten Krisenerscheinungen dramatisch verstärken wird.

Bedrohung der Lebensgrundlagen

Wir – und alle künftigen Generationen – stehen also vor der Herausforderung, die Lebensgrundlagen der Menschheit auf diesem Planeten zu erhalten. Menschen sind Teil der Biosphäre, ohne deren intakte Strukturen sie nicht lebensfähig sind. Sauberes Wasser, saubere Luft, fruchtbare Böden, eine Artenvielfalt, die den Kreislauf der Natur am Leben erhält – all das erfordert Anstrengungen in allen gesellschaftlichen Bereichen. Die Physik leistet hier grundlegende Beiträge, weil sie durch die Kenntnisse der natürlichen Abläufe und das daraus resultierende Verständnis des Gesamtsystems Erde-Mensch Handlungsoptionen aufzeigen kann.

Doch nicht nur der Klimawandel und der Verlust der Artenvielfalt bedrohen den nachhaltigen Fortbestand menschlicher Gemeinschaften. Auch Massenvernichtungswaffen können die Menschheit zu großen Teilen oder gar als Ganzes eliminieren. Das Gleichgewicht des Schreckens, das über viele Jahrzehnte die nukleare Katastrophe verhindert hat, wird ausgehöhlt durch die Aufkündigung von Verträgen zur Rüstungsbegrenzung und zu ihrer Kontrolle sowie durch das Streben weiterer Länder nach Atomwaffen. Gleichzeitig werden unter dem Schirm der nuklearen Abschreckung konventionelle Kriege in nie dagewesener Härte ausgetragen. Sie setzen sich über alle entsprechenden Vereinbarungen der Weltgemeinschaft hinweg, bringen unsägliches Leid über Millionen von Menschen und machen viele gemeinsame Bemühungen um die Bewältigung von Klimawandel, Armut und Elend zunichte.

Die Wissenschaft ist besonders gefordert, die notwendigen Fakten und Gesetzmäßigkeiten zu erarbeiten, die dann Grundlage für Entscheidungen auf allen politischen Ebenen sein können. Das erfordert die Integration der Erkenntnisse verschiedener Disziplinen zu den drängenden Menschheitsfragen. Es geht also zunehmend um fachübergreifende Untersuchungen komplexer Problemlagen in einer sich sehr dynamisch entwickelnden Welt.

Was die Physik dazu beitragen kann, erörtern die Beiträge dieses Abschnitts. Dabei zeigt sich, dass die globalen Zukunftsaussichten aus schwierig zu bewältigenden Herausforderungen bestehen. Gleichzeitig bietet die Wissenschaft fundierte Lösungsoptionen an. Dabei muss sich auch die Wissenschaft selbst in ihrer Methodik weiterentwickeln: wir haben es mit (in der Sprache der Physik) offenen, miteinander wechselwirkenden, nichtlinearen Nichtgleichgewichtssystemen zu tun, die wir erst beginnen zu verstehen – insbesondere wenn man disziplinübergreifende z. B. ökonomische, psychologische und soziale Verflechtungen und Rückwirkungen berücksichtigt. Die Aufgabe von Politik und Gesellschaft ist es dann, sich abzeichnende Lösungspfade auch tatsächlich einzuschlagen oder zumindest auszuprobieren.

Aufgaben heute

Zum einen gilt es, den anthropogenen Klimawandel zu bremsen und damit eine Klimakatastrophe zu vermeiden. Dass dies bei globalen Anstrengungen auch gelingen kann, zeigt das Beispiel des Ozonlochs (Seite 275). Die Treibhausgasemissionen müssen sinken, wir müssen Ressourcen deutlich schonender nutzen und Rohstoffe mit bisher nicht gekannter Effizienz wiederverwerten. Inzwischen gibt es auch viele Vorschläge für Maßnahmen, die darüber noch hinausgehen – etwa Methoden, die der Atmosphäre aktiv Kohlendioxid (CO₂) entziehen, wie großangelegte Aufforstungen, die Wiedervernässung von Mooren, aber auch die technische Abscheidung von CO₂. Allerdings sind Eingriffe in das Erdsystem mit komplexen Folgen verbunden und lassen sich in ihren Auswirkungen trotz weit fortgeschrittener Methoden der Modellierung nicht in allen Konsequenzen absehen. Weil sich der Klimawandel auch durch intensive Gegenmaßnahmen nicht kurzfristig beenden lässt, braucht es zusätzlich noch Strategien und Techniken zur Anpassung – etwa im Küstenschutz oder beim Regen- und Hitze-Management in Großstädten. Weitere, auch riskante, Möglichkeiten erforscht die Climate Intervention (Seite 271).

Damit diese Zukunftsaufgaben bewältigt werden können, muss die Energieversorgung für alle Aktivitäten der Menschheit sichergestellt sein, und dies auf eine nachhaltige Weise. Der Ausbau erneuerbarer Energien, die Elektrifizierung und grundsätzliche Umstellung der Mobilität und die Transformation der Industrie auf CO₂-neutrale Verfahren bei der Erzeugung von Stahl oder Zement sind Entwicklungsfelder, auf denen große Fortschritte nötig, und auch mit den bereits vorhandenen Technologien möglich sind. Andererseits wird die Forschung an neuen Materialien, alternativen Batteriesystemen und vor allem der effizienten Vernetzung vieler lokaler Energieerzeuger noch deutliche Fortschritte bei der Erzeugung und Nutzung von Energie bringen. Voraussetzung ist auch hier ein physikalisches Verständnis nicht nur der jeweiligen technischen Abläufe, sondern des Gesamtsystems Erde. Die Ablösung von Technologien, die auf Verbrennung basieren, durch effektivere, elektrische Verfahren stellt eine gewaltige und nachhaltige Modernisierung unserer Produktionskultur mit vielen Chancen für Innovationen dar. Erneuerbare Energien und effizientere Technologien reichen aus, um

weitgehend CO₂-neutral zu werden. Doch Photovoltaik und Windenergie brauchen geeignete Flächen und können Folgen für Ökosysteme haben. Auch wenn alle notwendigen Technologien für die Energiewende bereitliegen, werden weitere mögliche nachhaltige Energiequellen wie die Kernfusion erforscht, die allerdings für ein Abwenden der akuten Klimakrise auf jeden Fall zu spät verfügbar und voraussichtlich zu aufwendig und teuer sein wird.

Auch grundlegende neue Erkenntnisse zur Struktur der Materie werden in Zukunft weiterhin gebraucht. Diese könnten in neuen Technologien genutzt werden – etwa Quantentechnologien, die schon heute eine wesentliche Grundlage der globalen Wertschöpfung sind und die immer bestimmender für die weitere Entwicklung werden. Sie helfen Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften und hochgenaue Messverfahren zu entwickeln sowie Quantencomputer zu bauen, welche die Kommunikation sicher machen können.

Informationen, Daten, Kommunikation

Die Weiterentwicklung aller denkbaren Wege der Kommunikation und Informationsverarbeitung ist von besonderer Bedeutung für die Bewältigung der existenziellen Herausforderungen der Zukunft. Immer komplexere Systeme von Industrie, Logistik, Mobilität und Energieerzeugung, aber auch von urbanen Strukturen verlangen neue Kapazitäten für den Informationsaustausch, die Verarbeitung gigantischer Datenmengen, effektivere Sicherheitssysteme und vieles mehr. Hier helfen die Fortschritte auf dem Gebiet der künstlichen Intelligenz. Deren Nutzung lässt noch viele Fragen über die Rolle des Menschen im Umgang mit dieser Technologie offen und bedarf effizienter Kontrolle und Regelung. Zusätzlich brauchen alle Menschen wachsende Kompetenz im Umgang mit Fakten und Informationen. Um die komplexen Probleme zu meistern, bedarf es Fähigkeiten, diese rational zu beschreiben, um zukunftsfähige Entscheidungen treffen zu können.

Als Grundlage all dieser faszinierenden und fortschrittlichen Anwendungen bleibt die Aufgabe für die Physik auch künftig die Erforschung der grundlegenden Naturgesetze. Das betrifft nicht nur den Aufbau der Materie im Kleinen, sondern geht über alle Skalen bis zur Erforschung der Struktur und der Entwicklung des Universums. Die atemberaubend präzisen Beobachtungstechniken, die derzeit sogar die Atmosphären von Exoplaneten untersuchen lassen oder versuchen ihre Monde aufzuspüren, versprechen noch viele fundamentale Einsichten, die auch für die Stellung unseres Planeten im All bedeutsam sind.

Ulrich Bleyer

DIE GROBE TRANSFORMATION

Der Energiebedarf der Menschen in den Industrienationen ist nach wie vor groß. Genügend Energie ist auf der Erde verfügbar, sie wird aber ineffizient und mit schwerwiegenden Umweltfolgen bereitgestellt. Die Energiewende bietet nachhaltigere Lösungen – es braucht aber eine große grundlegende Transformation.

Der globale Klimawandel (siehe „Globale Klimaentwicklung“ auf Seite 120) erfordert eine weltweite Neuausrichtung der Energieversorgung hin zu einer nachhaltigen Nutzung **erneuerbarer Energiequellen**. Damit kein Kohlendioxid mehr in die Atmosphäre gelangt, müssen fossile Energieträger ersetzt werden. Zudem braucht es eine Entwicklung hin zu modernen, strombasierten Technologien, die Energie wesentlich effizienter nutzen können als Verbrennungsprozesse. Die notwendigen technischen Voraussetzungen für diese globale Menschheitsaufgabe stehen zur Verfügung und werden erfolgreich weiterentwickelt. Zugleich erlaubt uns die Energiewende, den Energieverbrauch regional autarker zu gestalten und damit unabhängiger von Regierungen und Konzernen zu werden, die freiheitlich-demokratische Grundwerte nicht teilen.

Ein vielversprechender Anfang ist gemacht. Seit 2023 erzeugt Deutschland bereits über die Hälfte seines Stroms aus erneuerbaren Energiequellen, Tendenz steigend. Der Weg zu einem vollständig klimaneutralen und nachhaltigen Energiesystem ist dennoch weit, denn der Stromverbrauch macht nur etwa 15 Prozent des gesamten Primärenergieverbrauchs in Deutschland aus. Den weitaus größeren Energiebedarf haben die Industrie, der Wärmesektor und der Verkehr. Dieser Bedarf wird noch weitgehend durch Technologien gedeckt, die auf der Verbrennung fossiler Energieträger basieren. Mit der Elektrifizierung dieser Sektoren wird der Primärenergieverbrauch deutlich sinken. Es braucht dafür die notwendige Infrastruktur für die Erzeugung, Verteilung und Speicherung elektrischer Energie. Diese Transformation ist umso besser zu bewältigen, je größer der internationale Verbund ist, in dem sie gestaltet wird.

Die Physik liefert die wissenschaftlichen Grundlagen zum Verständnis des Erdsystems und damit der Quellen erneuerbarer Energien. Sie ermöglicht es, Technologien hinsichtlich ihrer Effizienz und Zukunftsfähigkeit einzuordnen, liefert Daten, wie viel erneuerbare Energie im Erdsystem überhaupt entsteht, wie Strom gespeichert

und verteilt werden kann, und sie hilft, die Auswirkungen des Energieverbrauchs der Menschheit auf das Gesamtsystem Erde zu bestimmen.

Strombasierte statt wärmebasierte Technologien

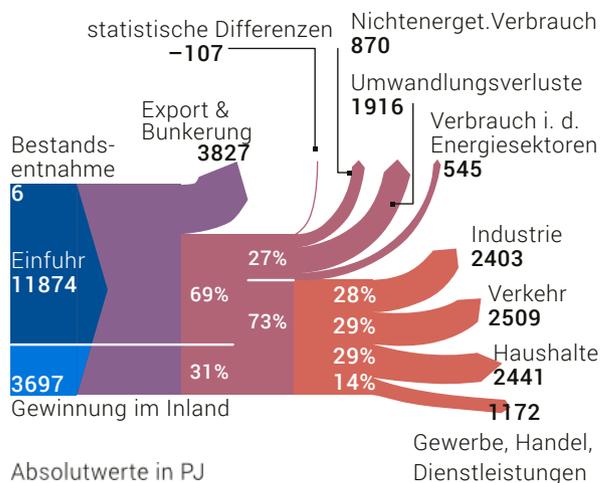
Mit den modernen zur Verfügung stehenden Technologien lässt sich der Primärenergiebedarf Deutschlands um fast die Hälfte senken, ohne dass dies unseren Lebensstandard negativ beeinflusst. Im Vordergrund steht dabei die Umstellung auf strombasierte Technologien, denn diese nutzen Energie wesentlich effizienter als wärmebasierte.

Bei vielen modernen Stromerzeugungstechnologien spielt Wärme als Zwischenstufe keine Rolle mehr. Während Windenergie „konventionelle“ Energie ist, die die Bewegungsenergie der Atmosphäre nutzt, basiert Photovoltaik auf Quantenphysik, insbesondere dem photoelektrischen Effekt, den Albert Einstein als Quanteneffekt erkannte. Die technischen Stromentstehungskosten sind für Photovoltaik und Windenergie deutlich günstiger als für thermische Kraftwerke, die

Etwa 76% des Primärenergiebedarfs in Deutschland werden durch Importe gedeckt, vorwiegend in Form von fossilen Energieträgern wie Rohöl, Kohle und Gas. Davon gehen 16% durch die Stromerzeugung in thermischen Kraftwerken als Abwärme verloren. Der verbleibende Endenergieverbrauch (also in Form von Strom, Treibstoffen, Gas, etc.) verteilt sich zu jeweils fast 30% auf Industrie, Verkehr, und Haushalte und zu etwa 14% auf Gewerbe, Handel und Dienstleistungen. In diesen Sektoren spielt Verbrennung auch eine wichtige Rolle für Raumwärme, Prozesswärme, Warmwasser und Mobilität.



Ein Beispiel für die technologische Überlegenheit von elektrischen Prozessen gegenüber Verbrennungsvorgängen ist die Erzeugung von Licht. Die Kerze erzeugt durch Verbrennung heiße Rußpartikel, die durch thermische Abstrahlung etwas Licht, aber überwiegend unsichtbare Infrarotstrahlung erzeugen. Der durch Strom erhitzte Draht einer Glühlampe erzeugt mehr sichtbare und weniger infrarote Strahlung als eine Kerze. Die heutige LED-Technologie hingegen erzeugt Licht fast ganz ohne die Wärmestrahlung mit wenig Energie: Sie nutzt eine Technologie, die auf der Quantenphysik basiert.



mit Kohle oder Kernkraft betrieben werden. Im Strompreis macht sich dies nur teilweise bemerkbar: Etwa 20 Prozent des Strompreises in Haushalten sind Erzeugungskosten, der Rest sind Kosten des Netzes, Steuern, Umlagen, Vertriebskosten und Firmengewinne.

Im Verkehrssektor ist die Elektromobilität unverzichtbar für die **Energiewende**. Dort werden aktuell über 90 Prozent der etwa 2500 Petajoule pro Jahr in Verbrennungsmotoren in Wärme umgewandelt (das sind 21% des Primärenergieverbrauchs), um damit Bewegung zu erzeugen. Dabei ist der Wirkungsgrad gering, etwa 20 Prozent. Elektromotoren können Strom wesentlich effizienter in Bewegung umsetzen und beim Bremsen einen Teil der Energie zurückgewinnen. Die Wende zur Elektromobilität könnte in der Summe den Energieverbrauch im Verkehrssektor auf etwa 20 Prozent des heutigen Werts reduzieren. Weitere erhebliche Reduzierungen lassen sich dadurch erreichen, dass im Stadtverkehr weniger Masse pro Person beschleunigt werden muss, zum Beispiel durch den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs oder durch Nutzung von Fahrrädern oder E-Bikes.

Einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs im Gebäudesektor leisten Wärmepumpen. Die hohe Temperatur bei der Verbrennung fossiler Energieträger in Heizkesseln oder Gasthermen ist nicht notwendig, um einen Raum im Winter etwa 10 oder 20 Grad über der Außentemperatur zu halten. Eine Wärmepumpe kann dies viel effizienter erreichen: Sie verrichtet lediglich Arbeit, um einen geringen Temperaturunterschied aufrechtzuerhalten. Pro 100 Watt an eingesetzter elektrischer Leistung können Wärmepumpen 300 bis 500 Watt an Wärmeleistung erzeugen. Rund 80 Prozent des Energieverbrauchs in Haushalten geht in die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser – mit Wärmepumpen ließe sich dieser Bedarf mit etwa einem Viertel der Energie in Form von Strom bewerkstelligen. Ein weiteres großes Einsparpotenzial für Energie liegt in der besseren Wärmedämmung etwa durch die Isolierung von Wänden und Mehrscheiben-Isolierverglasung von Fenstern.

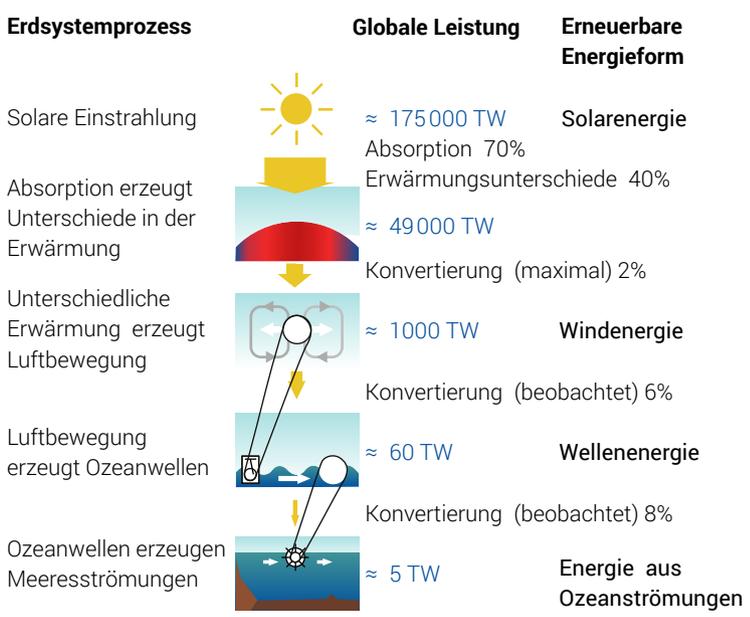
Auch industrielle Prozesse lassen sich durch Elektrifizierung klimaneutral gestalten. Aufgrund der hohen Energiedichten von fossilen Brennstoffen, der Notwendigkeit von Kontinuität in den Erzeugungsprozessen und der Verwendung von Kohlenstoff in chemischen Umwandlungsprozessen bedarf es hier allerdings neuer Verfahren sowie Energieträger mit hohen Dichten, insbesondere Wasserstoff. Dieser kann über Elektrolyse klimaneutral aus erneuerbarem Strom hergestellt werden. Synthetische Kraftstoffe für Schiffe und Flugzeuge

Als Naturwissenschaftler:innen haben wir keine Zweifel an der Notwendigkeit und der Dringlichkeit der hier angesprochenen Transformation unserer Energiewirtschaft. Gleichzeitig sind wir uns bewusst, dass zu deren Umsetzung die Einsichten der Wirtschaftslehre, der Psychologie und der Soziologie eine ebenso wichtige Rolle spielen werden. Die Darstellung hier kann nur ein Ausschnitt einer breiten und zwingend interdisziplinären Diskussion und Lösungssuche sein.

Die Herausgeber:innen

oder aus dem CO₂ der Luft gewonnene Polymere sind in ihrer Herstellung sehr energieintensiv, für die Abwendung des Klimawandels aber dringend erforderlich. Die Verwendung dieser Kraftstoffe für Mobilität, die recht einfach durch Elektromobilität ersetzt werden kann, oder die Nutzung von grünem Wasserstoff für Raumwärme erscheint daher aufgrund der damit verbundenen Umwandlungsverluste nicht sinnvoll.

Diese technologischen Fortschritte, die den Primärenergiebedarf senken und den Strom überwiegend mit Sonne und Wind erzeugen, findet man in gängigen Szenarien der Energiewen-



Sonnenlicht wird vom Erdsystem schrittweise in verschiedene Energieformen umgewandelt. Aus Erwärmungsunterschieden entstehen Winde, Winde treiben Wellen an, die wiederum Meeresströmungen antreiben. Bei jeder Energieumwandlung ist die danach verfügbare Leistung deutlich geringer. Diese verschiedenen Energieformen lassen sich als erneuerbare Energien nutzen. Die direkte Nutzung von Solarenergie hat das deutlich größte Potenzial.

Nur für wenige Einsatzbereiche ist Wasserstoff wirtschaftlich überhaupt sinnvoll. Oft gibt es bessere Alternativen.

Alternativen zu Wasserstoff: **ohne echte Alternative** | **Elektrizität/Batterien** | **Biomasse/Biogas** | **andere**

unvermeidlich

- A → Dünger | Hydrierung | Methanol | Hydrocracken | Entschwefelung
- B → Schifftransport* | Geländefahrzeuge | Stahl | Chem. Rohstoffe | Langfr. Speicherung
- C → Langstreckenflüge* | Fernzüge | Küsten- u. Flussschiffe | Oldtimer* | Lokale CO₂-Kompensation
- D → Mittelstreckenflüge | Fernbusse und -LKW | Hochtemperaturprozesse
- E → Kurzstreckenflüge | Lokaler Fährverkehr | Kommerz. Wärme | Inselversorgung | Saubere Energieimporte | USV
- F → Leichtflug | Regionalzüge | Regionaler Schwerverkehr | Mittel-/Niedrigtemperaturprozesse | Heimwärme
- G → U-Bahnen/Busse | H,FC-Autos | Städt. Lieferverkehr | 2- und 3-Räder | E-Fuels | Electricity Balancing

nicht wettbewerbsfähig

* durch Ammoniak oder E-Fuel (weniger gasförmiges oder flüssiges H₂)

ENERGIESPEICHER

Elektrische Energie ist die effizientest nutzbare, aber auch eine der empfindlichsten Energieformen – Elektrizität muss im Augenblick der Nutzung bereitgestellt werden. Die wichtigsten Quellen erneuerbarer Energie, Photovoltaik und Windenergie, können nicht genau nach Bedarf gesteuert werden, sondern liefern dann Strom, wenn die Bedingungen dafür günstig sind – Photovoltaik also beispielsweise am Tag und vor allem im Sommer, Wind bei entsprechenden Wetterverhältnissen. Bei einem 60%-Solar- zu 40%-Windausbau ergänzen sich Solar- und Windenergie über die Jahreszeiten verteilt ideal. Trotzdem bleiben kurzzeitige Schwankungen und Defizite von wenigen Tagen, im Extremfall Dunkelflauten, bei denen kaum Sonne scheint und wenig Wind weht.

Durch intelligente Stromverteilung und Nutzung, das Vorhalten von Überkapazitäten und länderübergreifende Stromnutzung können die Schwankungen der Energieversorgung weiter reduziert werden. Darüberhinaus sind Speicher notwendig. Die physikalisch-technischen Grundlagen für ausreichende Speicherkapazitäten sind vorhanden. Randbedingungen für deren ausreichenden Ausbau sind rasche Realisierbarkeit und geringe Kosten.

Batterien

Elektrochemische Speicherung in Batterien ist die bevorzugte Technologie in der Mobilität und in Haushalten. Ihr Wirkungsgrad ist ausgezeichnet (ca. 90%) und sie sind auch in größeren Anlagen als Kurzzeitspeicher geeignet. Es gibt Konzepte für großtechnische unterirdische Redoxflow-Batterien in ehemaligen Salzstöcken.

Pumpspeicherwerke

Die klassischen Pumpspeicherwerke sind langlebige Speicheranlagen mit großer Kapazität und gutem Wirkungsgrad (70–80%). Hier wird elektrische Energie in Form von potenzieller Energie in einem hochgelegenen Wasserreservoir gespeichert und bei Bedarf durch Turbinen abgelassen. Da die geografischen und ökologischen Gegebenheiten in Deutschland kaum neue Pumpspeicherwerke zulassen, wurde die Idee entwickelt, mit großen Betonhohlkörpern im Meer oder in ausgedienten und dann geflu-

teten Braunkohlegruben die notwendige Höhendifferenz herzustellen. Die Unterwasseranlagen sind in ökologischer Hinsicht deutlich vorteilhafter als konventionelle Pumpspeicheranlagen.

Pressluftspeicher

Hier wird durch elektrische Energie Druckluft erzeugt und bei Bedarf aus dieser wieder entnommen. Die direkte Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie ist je nach Bauweise von mittlerer Effizienz (ca. 50% bis 70%). Die Technologie der Pressluftgroßspeicher mit einem Druck von 150 Bar ist für Erdgasspeicher erprobt. Große Kapazitäten wären möglich. Bisher gibt es in Deutschland eine Prototypenanlage.

Chemische Speicher (außer Batterien)

Die Erzeugung von grünem Wasserstoff, anderen synthetischen Brennstoffen und Biogas ist für die Bereitstellung von Rohstoffen und Prozesswärme in der Industrie unverzichtbar. Diese Substanzen lassen sich sehr gut transportieren und speichern. Allerdings ist ihre Bereitstellung aufwendig und vergleichsweise ineffizient (70% bis 80% der Energie gehen im Prozess verloren). Wenn diese klimaneutralen Brennstoffe aus Überschussstrom erzeugt werden, kann sich trotz des geringen Wirkungsgrads Rückverstromung lohnen, da bei voll ausgebaute Versorgung mit erneuerbaren Energien nur wenige Prozent des Jahresbedarfs durch den Speicher gehen.

Auch in Versorgungssystemen mit ausschließlich erneuerbarer Energie wird es neben grünem Wasserstoff oder daraus hergestellten Folgeprodukten wie Ammoniak und Methanol noch Speicherung von chemischer Energie etwa von Müll oder Biogas für die Verbrennung (u. a. in Gasturbinenkraftwerken) geben. Diese Energiequellen könnten ausreichen, um fehlende Speicherkapazitäten auszugleichen.

Speichertechnologien in der Entwicklung

Entwickelt werden weiterhin „exotische“ Technologien wie etwa Schwungräder, Superkondensatoren, Schwerkraft- oder Osmospeicher.

de wieder. Mit der Transformation hin zu strombasierten Technologien wird aber insgesamt der Strombedarf bis 2050 um etwa die Hälfte steigen. Dies kann z. B. durch den starken Ausbau der Windenergie auf eine in Deutschland installierte Leistung von etwa 200 GW auf Land, 70 GW auf See, und 350 GW aus Photovoltaik bewerkstelligt werden. Zum Vergleich: Ende 2023 waren 61 GW aus Windenergie an Land, 8 GW auf See, und 82 GW aus Photovoltaik installiert.

Direkte und indirekte Energieerzeugung aus Sonnenlicht

Wie viel erneuerbare Energie prinzipiell verfügbar ist, und ob sie für die Energiewende reicht, zeigt eine Überlegung basierend auf den physikalischen Gesetzen der Energieerhaltung und der Thermodynamik. Der Ausgangspunkt für diese Potenziale ist die einfallende Solarstrahlung.

Die Nutzung von Sonnenlicht durch [Photovoltaik](#) hat bei Weitem das größte Potenzial. Hier wird die Strahlungsenergie direkt in elektrische Energie umgewandelt. Heutige Solarpaneele nutzen bereits 20 Prozent der Strahlung. Selbst in Deutschland, das eher weniger günstig für die Nutzung von Photovoltaik erscheint, ist das Potenzial der direkten Nutzung des Sonnenlichts gewaltig: Im Prinzip ließe sich damit ein Vielfaches des gegenwärtigen Energiebedarfs in Deutschland decken.

Sobald Sonnenlicht absorbiert wird, überwiegend an der Erdoberfläche, wird die Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt. Da die Erwärmung der Erdoberfläche und die Kühlung durch Abstrahlung von der Atmosphäre ins Weltall räumlich und zeitlich getrennt ablaufen, bilden sich Temperaturunterschiede aus, welche die Luftbewegungen in der Atmosphäre antreiben. Dabei wird jedoch nur ein Bruchteil von weniger als einem Prozent des einfallenden Sonnenlichts in Bewegungs-

energie umgewandelt. Diese geringe Effizienz kommt zustande, weil die Unterschiede in der Temperatur wesentlich geringer sind als beispielsweise in einem thermischen Kraftwerk.

Die so erzeugte Windenergie wird transportiert und verteilt und letztlich nahe der Oberfläche durch Reibung wieder in Wärme umgewandelt. Alternativ lässt sich die Windenergie durch Windturbinen zur Stromerzeugung nutzen. In Deutschland kann Windenergie einen großen Beitrag zur Stromerzeugung liefern, vor allem in der dunkleren Jahreshälfte – dann ist der Unterschied in der Sonneneinstrahlung zwischen Tropen und Pol am größten und in den mittleren Breiten ist es typischerweise windig.

Über den Ozeanen geht ein geringer Teil – etwa ein Prozent – der Windenergie nicht durch Reibung verloren, sondern erzeugt Wellen, die Durchmischung des Ozeans und die windgetriebene Ozeanzirkulation. Auch diese Energieformen lassen sich als erneuerbare Energien nutzen. Da die Energie dabei aber schon mehrfach umgewandelt wurde – von Sonne zu Wind zu Strömung bzw. Wellen –, sind die Potenziale global wesentlich geringer als die von Sonne und Wind. Zusätzliche Meeresströmungen entstehen durch die Gezeiten. Die damit verbundene Energie wird aus dem Abbau von Rotations- und Gravitationsenergien des Erde-Mond-Sonne-Systems gewonnen. Auch wenn diese in wenigen Küstenregionen zu starken Tidenhuben führt und dort als erneuerbare Energie genutzt werden kann, ist ihr Potenzial auf globaler Skala mit etwa 5 TW Leistung sehr gering. In Deutschland spielen Wellen- und Gezeitenkraftwerke für die Energiewende keine Rolle.

Biodiesel und Geothermie

Die Photosynthese nutzt ebenfalls Sonnenlicht direkt, das heißt, ohne es vorher in Wärme umzuwandeln. Sie wandelt Lichtenergie in chemische Energie in Form von Kohlehydraten und Biomasse um, die auch ein potenziell nutzbarer Energieträger und vor allem ein Speicher ist. Die Effizienz der Umwandlung ist mit 0,5 bis 1,5 Prozent deutlich geringer als bei der Photovoltaik. So bräuchte man die gesamte Fläche Deutschlands, um den gegenwärtigen Energieverbrauch im Verkehrssektor durch Biodiesel aus Energiepflanzen abzudecken. Daher ist das Potenzial von Bioenergie oder ähnlichen abgeleiteten Formen von erneuerbarer Energie wie Biokraftstoff in Deutschland entsprechend gering. Allerdings trägt Biomasse aus Abfällen der Holzverarbeitung und Biomüll, genutzt in thermischen Kraftwerken, durchaus nennenswert zur erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland bei.

Eine weitere Energieform, die zu den Erneuerbaren gezählt wird, ist die Geothermie. Sie nutzt die Wärme der Erdkruste, die überwiegend bei der Entstehung freigesetzt wurde und durch radioaktive Zerfälle entsteht, und baut diese ab. Nachhaltig bietet sie damit nur wenig Energie, da der Wärmestrom aus dem Erdinneren an die nutzbaren Bereiche nahe der Oberfläche nur weniger als 0,1% der einfallenden Solarstrahlung in Deutschland entspricht.

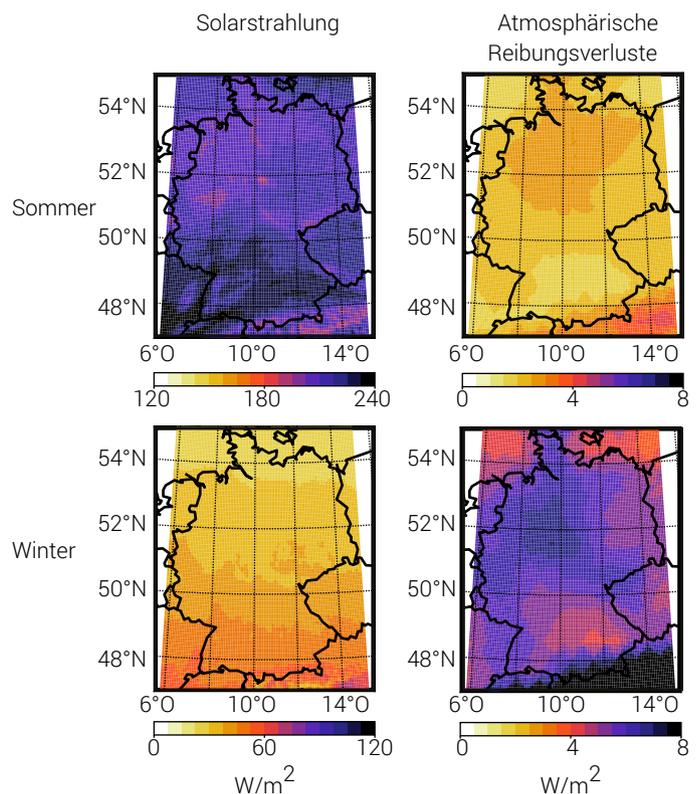
So spielen vor allem die direkte Nutzung der Solarenergie, Wind, Biomasse aus Abfällen und Wasserkraft als erneuerbare Energiequellen eine wesentliche Rolle in Deutschland. Ihre Potenziale, insbesondere der Solarenergie, sind deutlich höher als der Energieverbrauch in Deutschland, sodass wir uns prinzipiell ausreichend mit erneuerbarer Energie versorgen können.

Energieverfügbarkeit

Im Prinzip ergänzen sich Sonne und Wind in Deutschland sehr gut: Im Sommer ist die Einstrahlung hoch, aber der Wind ist schwach, im Winter ist es umgekehrt. Aber Wind und Sonne sind variabel und speisen nicht nach Bedarf in das Stromnetz ein. Die Verteilung der Netzlast zeigt, wie häufig wie viel Strom benötigt wird: Im Jahr 2022 betrug die Maximallast etwa 79 Gigawatt, das Minimum lag bei 34 Gigawatt.

Durch die Einspeisung der Erneuerbaren wurde die Strommenge, die von regelbaren (meist thermischen) Kraftwerken gedeckt werden muss, stark gesenkt. Diese Residuallast beschreibt also die Lücken, in denen Sonnen- und Windstrom nicht ausreichen, und die durch Importe, Speicher oder Kraftwerke gedeckt werden, die schnell Energie erzeugen können. Dies kann durch eine bessere Vernetzung innerhalb Europas und den Ausbau von Stromspeichern weiter sinken. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Strommengen auf verschiedenen Zeitskalen [zu speichern](#).

Auf saisonaler Skala ergänzen sich Sonne und Wind gut. Während im Sommer Photovoltaik viel leisten kann, der Wind aber häufig schwächer ist, ist die Situation im Winter umgekehrt: wenig Licht, aber häufig viel Wind (hier dargestellt als mittlere atmosphärische Reibungsverlustenergie).



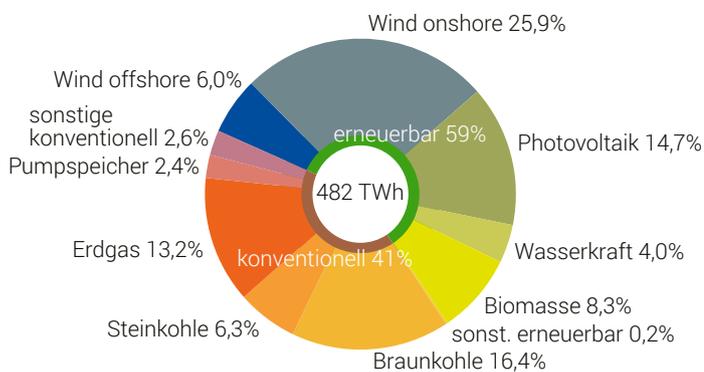
ERNEUERBARE ENERGIEN

Die kontinuierliche Verfügbarkeit einer ausreichenden Menge Energie ist die Grundlage unserer Zivilisation und Motor unserer technisierten Welt. Energie kann erzeugt werden. Vielmehr muss verfügbare Energie in technisch verwertbare Formen umgewandelt werden. Die wichtigste und kontinuierlich verfügbare Energieform ist der ständige Zustrom an Sonnenenergie mit einer mittleren Leistung von 342 Watt pro Quadratmeter der Erdoberfläche. Die am effizientesten, direktesten und umweltschonendsten nutzbare Energieform ist die elektrische Energie. Entsprechend ist die Umwandlung von Sonnenenergie in Strom die direkteste Methode, Energie nachhaltig bereitzustellen. Doch auch in Wind- und Wasserkraft steckt Solarenergie, da diese die Bewegungen der Atmosphäre und des Ozeans antreibt. Wind- und Wasserkraft zählen daher ebenfalls zu den erneuerbaren Energien. Klimaneutral und nachhaltig ist außerdem die Elektro-

nergie aus der Rückverstromung von Wasserstoff oder Methan, die durch eine Elektrolyse genanntes Verfahren mit erneuerbaren Energien erzeugt wurden, ebenso wie Biogas.

Die Energiewende erfordert eine gewaltige, nachhaltige Modernisierung unseres Energiesystems und muss als Gesamtpaket gestaltet werden, das drei wesentliche Anforderungen erfüllt. Erstens müssen in allen technischen Bereichen auf Verbrennung basierende Technologien auf elektrische Energie oder elektrochemisch erzeugte Rohstoffe umgestellt werden. Zweitens braucht es eine Infrastruktur für klimaneutrale und nachhaltige Energieerzeugung, ihre Verteilung über intelligente Stromnetze sowie die Speicherung (Seite 267). Und drittens muss all dies auf der Basis der verfügbaren Technologien innerhalb der kommenden beiden Jahrzehnte realisiert werden.

Nettostromerzeugung in Deutschland 2024



Der Unterschied zwischen Energieangebot und Nachfrage kann auch verringert werden, indem der Strompreis abhängig von Angebot und Bedarf dynamisiert wird, sodass Energie insgesamt effizienter genutzt wird, wenn sie verfügbar ist. Die klassischen thermischen Kraftwerke mit ihrer Auslegung auf eine Grundlast, also der kontinuierlichen Erzeugung von Strom, haben jedoch in so einem Energiesystem keinen Platz. Sie sind zu unflexibel und teuer.

Kernspaltung und Kernfusion werden manchmal als weitere Optionen für die zukünftige Energieversorgung genannt, in der die Physik die Grundlagen schafft. Allerdings hat Deutschland den Ausstieg aus der Nutzung der Kernkraft bereits vollzogen. Diese Formen der Energiegewinnung sind teuer, unflexibel und langwierig im Aufbau und beinhalten die noch ungelösten Probleme der Endlagerung und der Haftung. Diese Problematik sowie die damit verbundenen Kosten trägt die Gesellschaft. Bei den Erneuerbaren entstehen diese Kosten nicht. Ob Kernfusionskraftwerke nennenswert zur Stromversorgung beitragen könnten, ist noch nicht abschließend geklärt.

Auch werden in einem Energiesystem, welches durch die sehr günstigen, aber variablen erneuerbaren Energien geprägt ist, keine Grundlastkraftwerke mehr gebraucht. Die kurzzeitigen Lücken in der Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien lassen sich effektiver durch Speicher, Vernetzung oder Gasturbinenkraftwerke decken, die schnell, flexibel, und

wesentlich günstiger Energie liefern können. Der Beitrag von nuklearer Energiegewinnung für den nötigen und zügigen Ausstieg aus fossilen Energieträgern erscheint auch deswegen stark begrenzt.

Nie ohne Folgen

Der Energieverbrauch der Menschheit hat bereits planetare Auswirkungen angenommen, und so hat die Energienutzung Auswirkungen auf die Erde („Globale Klimaentwicklung“ auf Seite 120). Aber auch die Nutzung von erneuerbarer Energie ist nicht ohne Folgen. Wenn Solarpaneele auf ehemaligen Ackerflächen stehen, bedecken sie den Erdboden und verändern die Verdunstungseigenschaften der Landoberfläche. Windturbinen entziehen der Atmosphäre die Energie des Windes, wodurch dieser geschwächt wird. Dieser Effekt spielt beispielsweise bei dem zukünftigen Ausbau der Offshore-Windenergienutzung in der Deutschen Bucht eine bedeutsame Rolle. Bei einem Ausbau der Offshore-Windenergie auf 70 GW Leistung in der Deutschen Bucht wird z. B. erwartet, dass der mittlere Ertrag um mehr als 30% reduziert ist.

Auch thermische Kraftwerke haben Auswirkungen auf das System: Sie benötigen viel Wasser für die Kühlung. Die Kohlekraftwerke in der Lausitz entziehen gewaltige Mengen an Grundwasser in einer Region Deutschlands, die sowieso schon durch Trockenheit geprägt ist. Mit dem Klimawandel werden Kontinente noch trockener, und damit führen Flüsse weniger Wasser. Dies kann die Verfügbarkeit von Kühlwasser einschränken. So mussten aufgrund von Kühlwassermangel im Sommer 2022 in Frankreich bereits mehrere Kernkraftwerke heruntergefahren werden.

Die Energiewende muss als Gesamtsystem gestaltet werden, um negative Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren. Auch hierzu kann die Physik mit einem Systemansatz und Einordnung von Größenordnungen Beiträge liefern.

*Axel Kleidon, Gerhard Luther,
Horst Schmidt-Böcking und Karl-Friedrich Ziegahn*

5 VOR 12 ODER SCHON SPÄTER?

Nach Vorträgen über die menschengemachte Erderwärmung werden Klimawissenschaftler:innen oft gefragt, ob es noch „fünf vor 12“ oder bereits „fünf nach 12“ sei. Die folgerichtige Antwort ist eine Gegenfrage: Was verstehen wir unter „12 Uhr“?

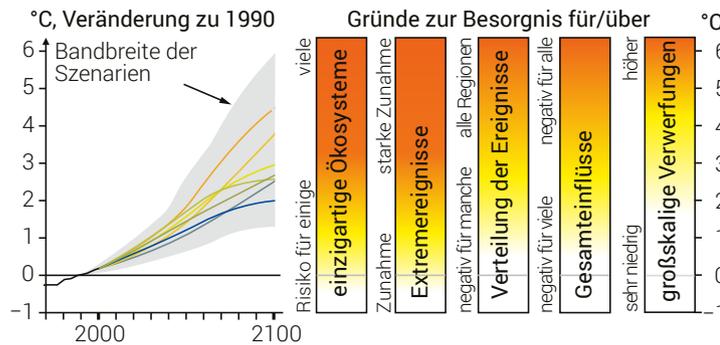
In der Regel ist mit dem symbolischen „12 Uhr“, dem High Noon, ein Zeitpunkt gemeint, zu dem die Krise in eine Katastrophe umschlägt, wo also das vermutlich noch Beherrschbare ins vermutlich Unbeherrschbare kippt, wo Kostbares vielerorts unwiederbringlich verlorengeht. Kann die Wissenschaft solche Vorstellungen präzisieren und möglicherweise sogar vorher sagen, in welchem Jahr unserer Zeitrechnung die Klimauhr 12 schlägt?

Zahlreiche Studien belegen, dass die bedeutsamsten Folgen einer Klimaveränderung zuallererst von der mittleren globalen Oberflächentemperatur abhängen. Die in der frühen Debatte bereits ausgesprochene Vermutung, dass durch eine längerfristige Überschreitung der 2-Grad-Linie eine für die Menschheit katastrophale Klimaveränderung ausgelöst wird, wird durch eine rasch wachsende Zahl von Forschungsarbeiten bestätigt. So gesehen entspricht 12 Uhr einem Temperaturanstieg um 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Wert.

Jenseits dieser Temperaturlinie kippen eine Reihe von essenziellen Teilsystemen der globalen Umwelt in einen anderen Zustand oder werden gar zerstört. Ob es sogar eine kritische Temperaturschwelle gibt, ab der das planetare Klimasystem als Ganzes die Holozän-Betriebsweise – die in den letzten 12 000 Jahren das Entstehen der Zivilisation ermöglichte – abrupt verlässt, ist derzeit Gegenstand von besorgten Spekulationen.

Bei Umsetzung der heutigen politischen Klimaschutzstrategien weltweit würde sich die Erde um ca. 2,7 °C erwärmen. Dies wiederum würde etwa ein Drittel der gegenwärtig besiedelten Gebiete – insbesondere die inneren Tropen – unbewohnbar machen. Es ist kaum vorstellbar, dass die dadurch erforderliche Umsiedlung von mehreren Milliarden Menschen ohne Zusammenbruch der Weltordnung durchgeführt werden könnte, selbst wenn für die notwendige Migration etliche Jahrzehnte zur Verfügung stünden.

Die Einhegung des Klimawandels mithilfe von Temperaturleitplanken ist ein quasi-statischer Ansatz, dessen Wirksamkeit inzwischen lei-



Gründe für die Besorgnis über die prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels. Diese Grafik findet sich im dritten Bericht des Weltklimarats von 2001 an prominenter Stelle. Die linke Seite zeigt verschiedene mögliche Szenarien, mit welchem Temperaturanstieg gegenüber 1990 in Zukunft zu rechnen ist. Die rechte Seite der Abbildung ist das inzwischen berühmte geworden „Burning Embers Diagram“. Hier drückt eine intuitive Farbkodierung verschiedene Dimensionen eines „gefährlichen“ Klimawandels semi-quantitativ aus. Die wichtigsten Begriffe in diesem Zusammenhang sind Disruption und Irreversibilität, die wiederum durch die Forschung zur Kippdynamik (Seite 123) im System Erde adressiert werden können.

der infrage steht: Seit dem Jahr 2023 scheinen sich wichtige Parameter im System Erde (z. B. die Oberflächentemperatur des Nordatlantiks) nichtlinear zu verändern, das Durchbrechen der 1,5 °C-Linie steht offenbar unmittelbar bevor, und auch die 2 °C-Linie dürfte in wenigen Dekaden fallen. Es wird künftig darum gehen, die Exkursion in den hochgefährlichen Temperaturraum jenseits der 2 °C so flach und vor allem so kurz wie möglich zu halten. Dies ist (notgedrungen) ein dynamisches Konzept, das völlig neue Herausforderungen an Wissenschaft, Politik und Gesellschaft stellt.

Eine aktuelle Analyse führt auf eine subtilere Definition von „12 Uhr“. Sie basiert auf den Begriffen Risiko (also Ereignisschaden mal Ereigniswahrscheinlichkeit) und Dringlichkeit (also der Quotient aus benötigter und verfügbarer Reaktionszeit). Die Situation ist eine echte Notlage, wenn sowohl Risiko als auch Dringlichkeit hoch sind.

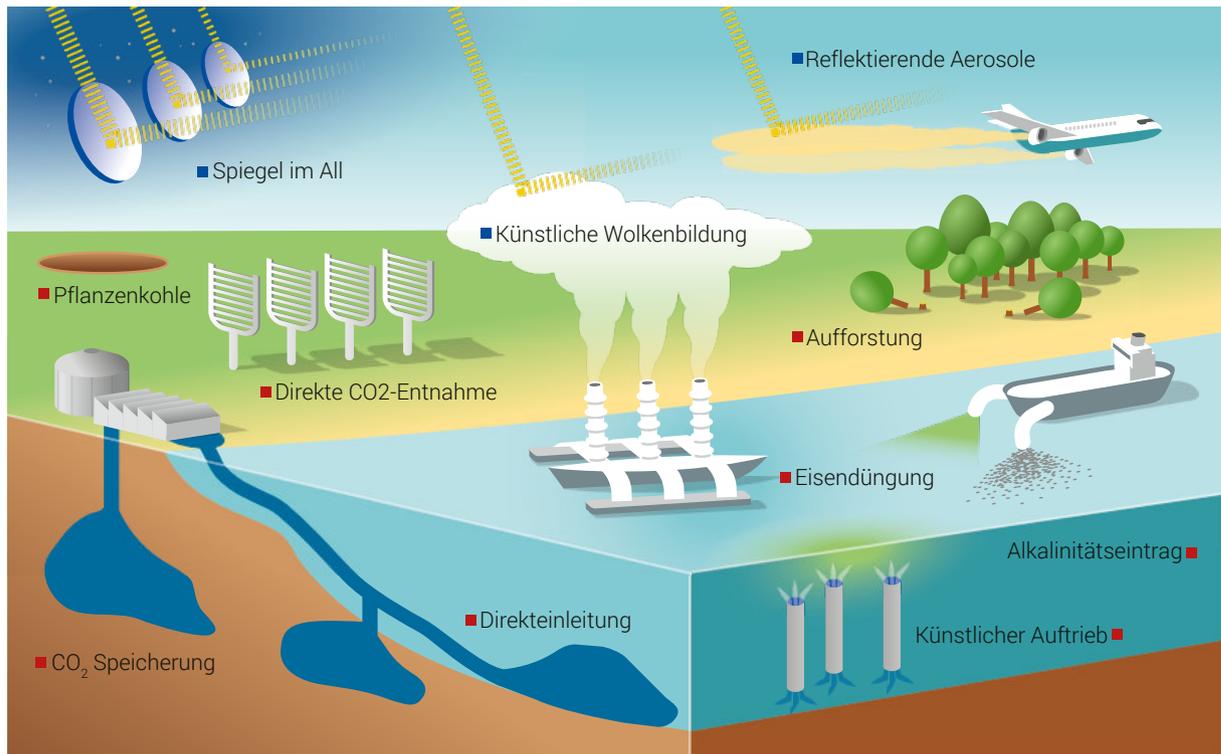
Im Kontext der Kippdynamik im Erdsystem entspricht die verfügbare Interventionszeit gewissermaßen eine Latenzphase, in der wichtige Kippelemente (wie der Grönländische Eisschild) trotz Überschreiten der zugehörigen Temperaturlinien noch nicht in die irreversible Zustandsänderung eingerastet sind. Demgegenüber steht die Zeit, die das globale Wirtschaftssystem mindestens benötigen würde, um sich aus dem „überkritischen“ Temperaturbereich wieder herauszubewegen, wenn unmittelbar entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.

„12 Uhr“ entspricht dann der Situation, in der die verfügbare Interventionszeit und die benötigte Reaktionszeit genau gleich sind. Diese Größen sowie das Risiko zu quantifizieren, stellt eine historische Forschungsaufgabe unter höchstem Zeitdruck dar.

Hans Joachim Schellnhuber

KEIN ERSATZ FÜR KLIMASCHUTZ

Großtechnische Eingriffe in das Klimasystem – Climate Engineering – werden als Teil einer Lösung der Klimakrise diskutiert und erforscht. Sie können Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen aber keinesfalls ersetzen, könnten sie aber ergänzen.



Verschiedene Climate-Engineering-Optionen, unterteilt in Senkung der CO₂-Konzentration (CDR, rot) und Strahlungsmanagement (SRM, blau). CDR-Technologien entnehmen der Atmosphäre CO₂ und speichern es im Boden oder unter dem Ozean. SRM reduziert die einfallende Sonnenstrahlung, indem es die Reflektivität der Erdoberfläche erhöht.

Im Jahr 2015 einigten sich 195 Staaten im Rahmen des [Pariser Klimaabkommens](#) auf das Ziel, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius – möglichst sogar auf unter 1,5 Grad Celsius – zu begrenzen. Das ist aber nur zu schaffen, wenn die Weltwirtschaft bis spätestens Mitte des Jahrhunderts weitgehend klimaneutral ist. Die momentanen politischen Zusagen zur Dekarbonisierung reichen dazu sehr wahrscheinlich nicht aus. Leider fällt es Staaten rund um den Globus schwer, Emissionen zu reduzieren. Dies zeigen in Deutschland aufgeregt geführte Diskussionen um Flüssiggas-Terminals, Wärmepumpen und die deutschen Klimaziele.

Die Schwierigkeit, die nötigen Klimaschutzmaßnahmen auf den Weg zu bringen, gibt der Diskussion um [Climate Engineering](#) (CE) Auftrieb. Unter CE, auch [Geoengineering](#) genannt, versteht man den absichtlichen großskaligen Eingriff in das Klimasystem der Erde mit dem Ziel, die negativen Einflüsse der Klimaveränderung zu mildern. CE ist dabei ein Oberbegriff für zwei unterschiedliche technologische Ansätze: zum

einen die Senkung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) und zum anderen die Beeinflussung des Strahlungshaushalts (Solar Radiation Management, SRM).

Ohne CDR wird es nicht gehen

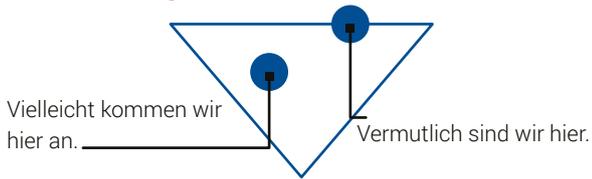
CDR soll CO₂ aus der Atmosphäre entziehen. Entsprechende Methoden und Technologien gelten als unverzichtbar, um das Ziel von maximal 1,5 °C globaler Temperaturerhöhung noch einzuhalten. Biologische Verfahren basieren auf der Photosynthese, bei der CO₂ in Biomasse umgewandelt wird. Entsprechend zählen die Aufforstung oder die Wiedervernäsung von Mooren zu den biologischen CDR-Maßnahmen. Darüber hinaus binden geochemische und technische Verfahren („künstliche Bäume“) CO₂ aus der Luft ([Direct Air Capture, DAC](#)) oder aus Abgasen energieintensiver Industrien ([Carbon Capture and Storage, CCS](#)) und pressen das verflüssigte CO₂ in Speicher im Boden oder im Meeresboden. Ein weiterer Vorschlag, der aktuell erforscht wird, ist die Ausbrin-

ABWENDUNG

Schnelle Verminderung der Treibhausgasemissionen
Dekarbonisierung

ANPASSUNG

z. B. Umsiedlung, höhere Deiche, Umstellung von Land- und Forstwirtschaft



CLIMATE ENGINEERING

Eingriff in den Strahlungshaushalt der Erde (SRM)
Senkung der atmosphärischen CO₂-Konzentration (CDR)

Unsere Optionen der Reaktionen auf den Klimawandel: Die Ecken des Dreiecks symbolisieren die Extreme: Abwendung des Klimawandels durch schnelle Verminderung der Treibhausgas-konzentration in der Atmosphäre; Anpassung an den Klimawandel; Climate Engineering. Heute ist es für eine vollständige Abwendung des Klimawandels zu spät, wir liegen zwischen Abwendung und Anpassung. Climate Engineering könnte Abwendung und Anpassung erleichtern, birgt aber seinerseits enorme Risiken.

gung von Gesteinsmehl auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Durch den Prozess der Verwitterung von Gestein würde dies ebenfalls CO₂ aus der Atmosphäre binden. Debattiert wird auch über eine künstliche Erhöhung des pH-Werts des Ozeans, was diesem erlauben würde, noch mehr CO₂ aufzunehmen.

Allerdings sind diese Methoden technologisch noch nicht hinreichend entwickelt und noch nicht im großen Stil umsetzbar. Selbst bei einem zeitnahen technologischen Durchbruch von DAC- oder CCS-Verfahren fehlen unterirdische CO₂-Speicher und geeignete Flächen. Um netto-null Treibhausgasemissionen zu erreichen, müssten in Deutschland zur Mitte des Jahrhunderts 50 bis 70 Millionen Tonnen Kohlendioxid abgeschrieben werden. Derzeit untersuchen die Forschungsverbände CDRterra und CDRmare intensiv CDR-Techniken, um das bisher lückenhafte Wissen über CDR-Entnahmefethoden zu erweitern und mehr Transparenz bei der Kommunikation der Ergebnisse zu erreichen.

Eine grundsätzlich andere Herangehensweise ist das Strahlungsmanagement oder SRM. Zum Beispiel könnte man Wolken mithilfe von Seesalzinjektionen aufhellen, damit sie mehr Sonnenstrahlung reflektieren (Marine Cloud Brightening MCB) oder speziell Zirruswolken ausdünnen, um die terrestrische Ausstrahlung zu erhöhen. Die Aufhellung von Wolken wird aktuell am Great Barrier Reef in Australien getestet. Etwas aufwendiger und erheblich kostspieliger ist die Idee, Spiegel im Weltall zu installieren, um die Sonnenstrahlung abzuschirmen – hierfür wäre eine Fläche von mehr als zwei Millionen Quadratkilometern nötig.

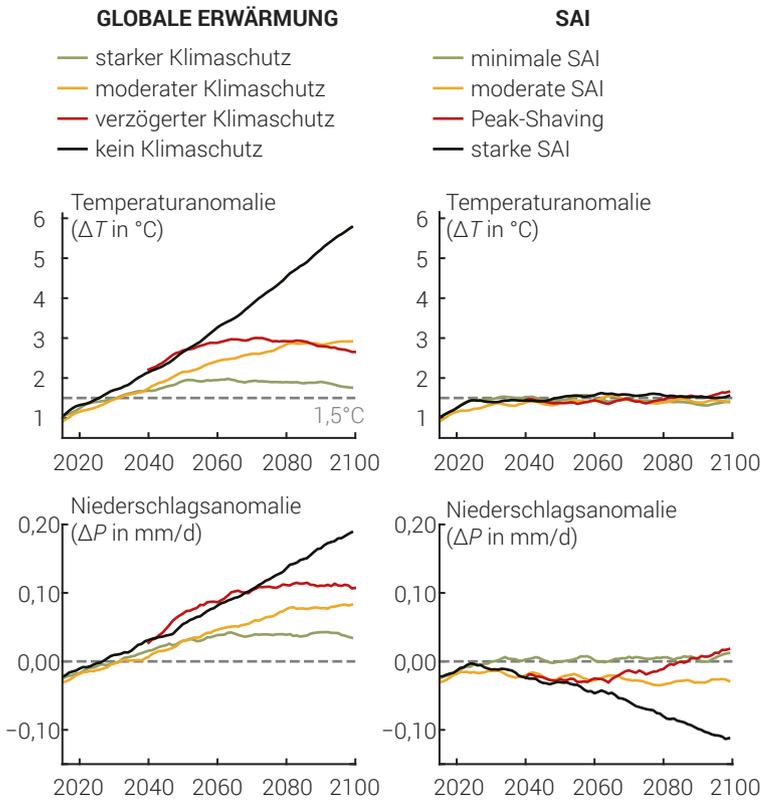
Die am besten untersuchte SRM-Technologie ist die [stratosphärische Aerosolinjektion \(SAI\)](#). Der Chemienobelpreisträger Paul Crutzen hatte diese Idee Anfang des 21. Jahrhunderts von früheren Arbeiten in den 1960er- und 1970er-

Jahren aufgegriffen und damit eine vom Menschen erzeugte Schicht von Sulfataerosolen in der Stratosphäre ins Spiel gebracht. Zu diesem Zweck müsste SO₂ in die untere tropische Stratosphäre (18–20 km) gebracht werden, wo es zu Sulfataerosolen reagiert. Gleichzeitig werden Gase und Aerosole transportiert und global verteilt. Technologien zur Durchführung existieren allerdings noch nicht. Die Aerosolteilchen reflektieren einen Teil der Sonnenstrahlung und führen so zu einer Abkühlung am Erdboden. Diese wirkt dann der Erwärmung durch den Treibhauseffekt entgegen. Vorbild dieser Methode ist ein natürlicher Vorgang, nämlich die globale Abkühlung nach großen Vulkanausbrüchen, z. B. des Pinatubo 1991, die ebenfalls große Mengen an SO₂ in die Stratosphäre schleudern. Klimamodelle können die klimatischen Auswirkungen von Vulkanen gut simulieren und geben Grund zu der Annahme, dass der kontinuierliche Einsatz von SAI über viele Jahre die globalen Oberflächentemperaturen tatsächlich stabilisieren könnte. Erkenntnisse über Wirksamkeit, Effizienz und Nebeneffekte können nur durch Computersimulationen gewonnen werden, da die vollen Auswirkungen nur nach langjährigem großskaligen Einsatz bestimmt werden können. Großskalige Experimente hierzu gibt es bisher nicht (Stand 2025).

Physikalische Konsequenzen von SRM

Sowohl die stratosphärischen Aerosole als auch die SRM-Vorschläge zu den Wolken basieren auf einer veränderten Aerosolkonzentration in der Atmosphäre. Die physikalische Grundlage besteht darin, dass Aerosole mit solarer und terrestrischer Strahlung interagieren. Sie streuen solare Strahlung, wodurch ein Teil der auf die Erde einfallenden Solarstrahlung wieder in den Weltraum reflektiert wird, was zu einer Abkühlung am Erdboden führt. Die Effizienz der Streuung ist stark von der Größe der Aerosolteilchen abhängig. Sulfataerosole streuen (bezogen auf die eingesetzte Masse) am besten im Größenbereich von 0,2 bis 0,4 µm. Auch wenn Wolken durch Seesalzemissionen aufgehellt werden, müssen die Aerosole in den Wolken in einem bestimmten Größenspektrum (mittlerer Trockendurchmesser 0,1 Mikrometer) liegen, sonst könnte aus der angestrebten Kühlung eine Erwärmung der Atmosphäre werden! Zirruswolken lassen sich nur in wenigen Regionen der Erde in den Modellsimulationen erfolgreich ausdünnen, da nur selten die optimalen Bedingungen vorherrschen. Auch SRM ist demnach keine einfache Lösung.

Zudem hat SRM immer globale Auswirkungen. Abhängig vom Ort der Einführung verteilen sich die Sulfataerosole in die nördliche und südliche Hemisphäre, und erreichen letztendlich wieder die Erdoberfläche. Entsprechend hätte eine regionale SAI-Anwendung prinzipiell globale Auswirkungen. Ein grundsätzliches Problem ist auch die verschiedene raumzeitliche Wirkung von Treibhausgasen gegenüber SRM-Maßnahmen: Treibhausgase vermindern die Ausstrahlung von Wärme global, SRM vermindert die direkte Sonneneinstrahlung am meisten bei niedrigen Breiten und in der Sommerhemisphäre. Diese wenigen Beispiele zeigen, dass SRM sehr komplex ist. Zudem ist es in vielen Details der Aerosolbildung noch nicht ausreichend verstanden.



Simulierter globaler Mittelwert von Temperatur- und Niederschlagsänderungen unter verschiedenen Klimaszenarien mit unterschiedlicher Mitigation (links) und Szenarien mit stratosphärischer Aerosolinjektion (SAI), bei denen der Temperaturanstieg der Klimaszenarien auf maximal 1,5 $^{\circ}\text{C}$ gegenüber dem vorindustriellen Wert begrenzt würde (rechts). Unter Klimawandelbedingungen steigen Temperatur und Niederschlag mit der Zeit an, unter SAI bleibt die globale Durchschnittstemperatur konstant, allerdings nimmt der Niederschlag ab.

Risiken und Nebenwirkungen

Die Aus- und Nebenwirkungen von SRM-Methoden lassen sich mit Erdsystemmodellen simulieren. Dazu gibt man ihnen Klimaszenarien mit verschiedenen Annahmen für zukünftige Treibhausgas- und andere Emissionen vor. Für ein extremes Szenario ohne Klimaschutz berechnen die zwei in der Studie verwendeten Modelle einen entsprechend starken Anstieg der globalen Mitteltemperatur um etwa sechs Grad Celsius bis zum Jahr 2100 und eine Zunahme des Niederschlags um 0,2 Liter pro Quadratmeter und Tag. Gemäßigtere Szenarien mit Klimaschutzmaßnahmen zeigen entsprechend etwas geringere Temperatur- und Niederschlagszunahmen. Wird die Temperaturzunahme durch SAI in den Modellsimulationen auf 1,5 $^{\circ}\text{C}$ begrenzt, so nimmt der mittlere globale Niederschlag ab, weil auch die Verdunstung aufgrund der niedrigeren Bodentemperatur und der verringerten solaren Einstrahlung abnimmt. Ein Nebeneffekt des SAI ist also eine Reduktion des Niederschlags – in diesem Szenario um rund vier Prozent bis zum Ende des Jahrtausends. Die geringsten Niederschlagsänderungen ergeben sich in den Modellen für ein Szenario mit starkem Klimaschutz und geringem SAI. Dies zeigt, dass trotz möglicher SAI-Anwendungen eine starke Reduktion der Treibhausgase unbedingt notwendig wäre, um weniger Nebeneffekte zu erzielen und eine unbegrenzte

Anwendung zu vermeiden. Ohne begleitende deutliche Emissionsminderungen gäbe es keinen Ausstieg aus SAI, und die Gefahr eines unkontrollierten Abbruchs mit folgendem sehr schnellem Temperaturanstieg wäre groß.

Die konkreten klimatischen Auswirkungen von SRM hängen stark von den Details der Anwendungen ab. Globale SRM-Anwendungen könnten z. B. die Häufigkeit extremer Wetterereignisse, Hitzewellen oder Starkniederschläge sowie das Abschmelzen des arktischen Eises verringern. Allerdings könnte die Verringerung der Niederschläge in einigen Regionen zu Problemen bei der Wasserversorgung führen. Regionale Dürren und Überschwemmungen und weitere Extreme wären deutlich verringert, aber wegen der Klimavariabilität immer noch zu erwarten. Regionale Auswirkungen, sowie spürbare Auswirkungen auf die Landwirtschaft, Pflanzen, physische und psychische Gesundheit, sind bislang zu wenig erforscht. SAI erhöht außerdem die diffuse Einstrahlung, was vermehrt zu roten Sonnenuntergängen führt.

Die Modelle erlauben heute noch keine klaren Aussagen darüber, wie viel Schwefel eingesetzt werden müsste, um einen bestimmten Temperatureffekt zu erreichen. Das liegt an der unterschiedlichen Berechnung von Aerosolbildung und Transport in den Modellen, verbunden mit nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen diesen Prozessen. Betrachtet man die SO_2 -Mengen, welche in den verschiedenen Modellen benötigt werden, um die Erde um den gleichen Temperaturbetrag zu kühlen, so unterscheidet sie sich um den Faktor zwei. Ein weiteres Problem ist der Effekt der Aerosole auf die Ozonosphäre, das Schutzschild der Erde vor gefährlicher ultravioletter Strahlung: Es wäre zu erwarten, dass sich das Ozonloch mit der Anwendung von SAI langsamer zurückbildet.

Die Wissenslücken, die sich in unseren Modellen zeigen, sind auch durch Beobachtungen nicht einfach zu füllen. Vulkanausbrüche ermöglichen zwar die Beobachtung der Aerosolbildung und deren Verteilung über den Globus in der Natur. Jedoch sind ausreichend starke Vulkanausbrüche sehr selten. Allerdings tragen auch kleinere Vulkanausbrüche in den letzten zehn Jahren viel zu unserem Verständnis bei und helfen, die Modelle zu verbessern. Für das Verständnis von Langzeitanwendungen von SAI bleiben aber nur numerische Simulationen. Daher ist es wichtig, die entsprechenden Modelle weiterzuentwickeln und mit Messungen und detaillierten Beobachtungen der Erdatmosphäre durch Satellitensensoren zu überprüfen.

Gesellschaftliche Folgen von SRM

Neben der wissenschaftlichen Betrachtung möglicher Nebenwirkungen von SRM muss man auch die Kosten, die technische Machbarkeit (z. B. Transporte von Millionen Tonnen Material in die Stratosphäre) und die gesellschaftlichen Auswirkungen bewerten. SAI gilt als relativ kostengünstig, allerdings nur unter der Annahme einer hohen Effizienz. Rechtlich wäre es derzeit vermutlich möglich, als Einzelperson, Unternehmen oder Staat SAI und andere SRM-Methoden anzuwenden. In diesem Zusammenhang stellt sich daher die Fra-

ge, wer über das Klima entscheiden darf? Internationale Vereinbarungen und Regeln zur Anwendung von SRM sind dringend erforderlich. Bei negativen Auswirkungen, wie Dürren oder Überschwemmungen, könnten politische Krisen auftreten. Andererseits könnte SAI auch durch den Klimawandel hervorgerufene Krisen abwenden oder mildern. Effektive Kompensationsmöglichkeiten für Folgeschäden gibt es zudem nicht, weshalb dringend internationale Haftungsregeln beschlossen werden müssten.

Eingriffe in den Strahlungshaushalt der Erde können nur als vorübergehende Notmaßnahme zur Abwendung katastrophaler Folgen der globalen Erwärmung angesehen werden. Sie können weder ein Ersatz für Emissionsreduktionen noch für CDR sein, da sie die CO_2 -Konzentrationen und damit auch deren direkte Folgen wie die Versauerung der Meere unberührt ließen. Einmal gestartet, müsste SRM so lange aufrechterhalten werden, bis niedrige CO_2 -Konzentrationen erreicht sind – eine Belastung für viele Generationen. Je nach Umfang des SRM-Einsatzes würde ein plötzlicher Ausstieg, etwa aufgrund großer Naturkatastrophen oder eines Weltkriegs, eine große Gefahr darstellen: Deutliche Klimaveränderungen innerhalb einer Dekade wären die Folge und würden die Ökosysteme und die Menschheit bedrohen. Daher wären geringe SRM-Einsätze in Kombination mit starker Mitigation weniger gefährlich als sehr große SRM-Maßnahmen

Es ist weitaus sicherer, CO_2 -Emissionen zu vermeiden, als die Folgen im Nachhinein zu beheben. Auch CDR-Maßnahmen werden nur erfolgreich sein, wenn gleichzeitig die Treibhausgasemissionen deutlich zurückgehen. Rasche und drastische Emissionsreduktionen müssen daher oberstes Ziel von Politik und Wirtschaft sein.

Ist Climate Engineering also die Lösung der Klimakrise? Die Antwort ist kompliziert. SRM könnte helfen, für eine bestimmte Zeit die Effekte des Klimawandels zu verringern. Allerdings muss dies mit starker Mitigation und CDR verbunden werden, um die Abhängigkeit von diesen Anwendungen und damit auch die Risiken zu verringern. Die globale Mitteltemperatur der Erde ließe sich theoretisch regeln. Der Preis wäre jedoch neben dem Klimawandel ein weiteres Experiment mit ungewisser Effizienz und unwägbar potentiellen Nebenwirkungen.

Ulrike Niemeier, Ulrich Platt und Simone Tilmes

Partikel in den Abgasen der Schiffe führen unter bestimmten Bedingungen zur Bildung langgezogener Wolken, wie hier an der europäischen Atlantikküste. Dies könnte ein Modell für die künstliche Aufhellung (Marine Cloud Brightening) von niedriger Bewölkung als SRM-Maßnahme sein.

DER KAMPF GEGEN DAS OZONLOCH – EINE ERFOLGSGESCHICHTE?

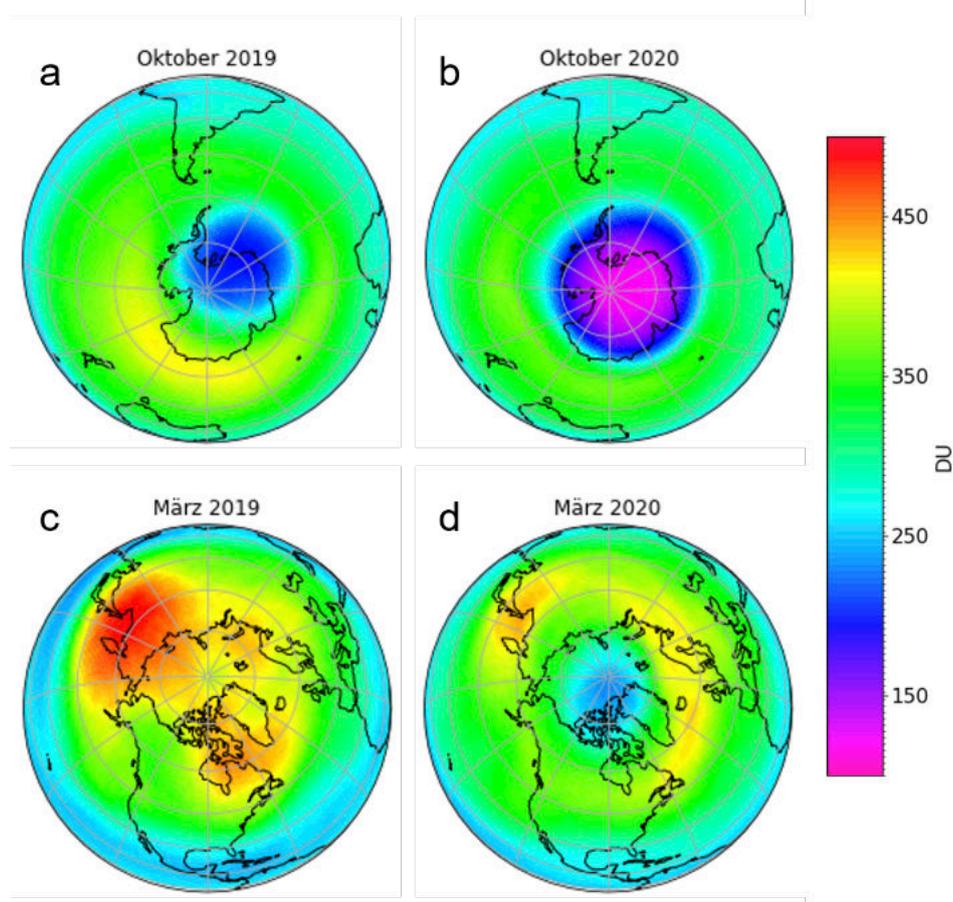
Das Ozonloch über der Südpolarregion im Frühjahr wurde in den 1980er-Jahren entdeckt. Die Wissenschaft konnte dieses Phänomen schnell erklären, sodass die Weltgemeinschaft mit dem Montrealer-Protokoll zum Schutz der Ozonschicht unmittelbar reagieren konnte. Erste Erfolge sind sichtbar.

In etwa 15 bis 35 Kilometer Höhe absorbiert Ozon (O_3) den größten Teil der ultravioletten Strahlung der Sonne und schützt somit das Leben auf der Erdoberfläche vor deren schädlichen Wirkungen. Seit Anfang der 1980er-Jahre lässt sich zwischen August und November eine sehr starke Ausdünnung dieser stratosphärischen Ozonschicht über der Antarktis von bis zu 70 Prozent beobachten. Grund hierfür sind erhöhte Chlor- und Bromkonzentrationen in der Stratosphäre, bedingt vor allem durch menschengemachte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die zu einem Abbau des Ozons führen. Über der Nordpolarregion ist das Phänomen weniger stark ausgeprägt, was mit den im Vergleich zur Antarktis milderen Temperaturen und einem instabileren Polarwirbel zu tun hat.

Bereits 1987 reagierte die internationale Politik mit einem globalen Abkommen auf das bedrohliche Ozonloch: mit dem [Montrealer-Protokoll](#) zum Schutz der stratosphärischen Ozonschicht. Seitdem berichtet die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) regelmäßig über deren Zustand. Die Berichte dokumentieren neben dem aktuellen Forschungsstand auch die Umsetzung der Verminderung bzw. die Einhaltung des Verbots der Produktion und des Gebrauchs von ozonzerstörenden Substanzen (insbesondere der FCKW), die im Rahmen des Montrealer-Protokolls und den nachfolgenden, verschärfenden Ergänzungen ratifiziert wurden. Der Erfolg dieser international bindenden Regeln ist heute erkennbar. So ging der stratosphärische Chlorgehalt von etwa Mitte der 1990er-Jahre bis zum Jahr 2020 um rund 11 Prozent zurück. Auch erste Hinweise auf die Erholung der Ozonschicht als Folge davon sind sichtbar.

Wie es weitergeht, ist eine weiterhin aktuelle Forschungsfrage. In den letzten Jahrzehnten hat sich das Grundlagenwissen zur Physik und Chemie der Atmosphäre deutlich verbessert: Lange Messreihen geben Aufschluss über relevante dynamische und chemische atmosphärische Größen. Gewonnen werden sie mit unterschiedlichen Geräten und Messmethoden vom Boden aus, an Ballonen und aus Flugzeugen, in Kombination mit satellitengestützten, globalen Messungen. Auch durch numerische Modelle konnten viele Prozesse der Atmosphäre analysiert werden.

Darstellung der Gesamtozonsäule (in Dobson-Einheiten, DU) in der Südpolarregion (a und b) und der Nordpolarregion (c und d) in den jeweiligen Frühlingsmonaten Oktober und März für die Jahre 2019 (a und c) und 2020 (b und d). Diese Falschfarbenansicht zeigt monatlich gemittelte Gesamtozonwerte über den jeweiligen Polargebieten. Geringe Ozonwerte sind in den Farben Blau und Lila und hohe Ozonwerte in den Farben Orange und Rot dargestellt.



Mehrmals pro Woche werden die Satellitenmessungen der Ozonschicht durch Ballonsondierungen unterstützt, die zusätzlich zur Gesamtmenge des Ozons auch ein Höhenprofil liefern. Hier der Start einer Ozonsonde in Ny-Ålesund, Spitzbergen.



Wichtig ist die Frage nach dem Einfluss des menschengemachten Klimawandels auf die [Ozonschicht](#). Durch erhöhte Konzentrationen von Treibhausgasen erwärmt sich die unterste Atmosphärenschicht, die Troposphäre („Globale Klimaentwicklung“ auf Seite 120). In der darüber liegenden Stratosphäre, wo sich auch die Ozonschicht befindet, führen erhöhte Treibhausgaskonzentrationen hingegen zu einer Abkühlung.

In den vergangenen Jahren zeigten sich auffällige Schwankungen der winterlichen stratosphärischen Temperaturen in beiden Polarregionen. So waren relativ hohe Temperaturen in der antarktischen Stratosphäre wie in 2019 mit geringen [Ozonverlusten](#) verbunden. Umgekehrt gingen sehr stabile, kalte Verhältnisse mit starken stratosphärischen Ozonabbau einher (z. B. 2020). Ähnliche Beobachtungen gab es in der Nordhemisphäre. Eine Zeitreihe der Jahre 1995 bis 2024 der antarktischen Ozondaten finden Sie auf Seite Seite 248.

Daran zeigt sich, dass die Entwicklung der stratosphärischen Ozonwerte stark von der Dynamik der Stratosphäre abhängt – und damit auch von der Abkühlung der Stratosphäre durch erhöhte Treibhausgaskonzentrationen. Klima-Chemie-Modelle können die seit den späten 1970er-Jahren nachgewiesene rapide Abnahme des Ozongehalts in der Stratosphäre gut nachvollziehen, vor allem in den Polargebieten im Frühjahr. Da die Menge der FCKW (d. h. hier der Chlorgehalt der Atmosphäre) nun wieder abnimmt, erholt sich die Ozonschicht – vor allem in den Polarregionen. Ferner führt die Abkühlung der Stratosphäre durch erhöhte Treibhausgase in Zukunft zu mehr Ozon (vor allem im Bereich der mittleren und oberen Stratosphäre), da sich die ozonabbauenden chemischen Reaktionen hier bei niedrigeren Temperaturen verlangsamen. Für die Zukunft zeigen die Rechnungen in den Klimaszenarien mit starken bzw. gemäßigten Anstiegen der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen, dass sich die Ozonschicht außerhalb der Tropen bis etwa zur Mitte dieses Jahrhunderts regeneriert. Danach dürften die Ozonwerte weiter steigen – vor allem in den Klimaszenarien mit stark ansteigenden Treibhauskonzentrationen werden zukünftige Ozonwerte berechnet, die deutlich über den Ozonwerten der 1960/70er-Jahre liegen könnten. Die Simulationsergebnisse der Klima-Chemie-Modelle mit zurückgehenden Treibhauskonzentrationen zeigen teilweise ein etwas anderes Bild: Es ist möglich, dass der Ozongehalt in der Stratosphäre in den mittleren geografischen Breiten und auch in der Südpolarregion kaum auf die Werte der 1960er-Jahre bis 1970er-Jahre zurückkehren wird, trotz des erwartenden Rückgangs der ozonabbauenden Stoffe.

In den Tropen kommt ein weiterer Prozess hinzu, der in den Modellabschätzungen dazu führt, dass hier in den meisten Szenarien der Gesamtozongehalt nicht auf die Werte der 1960er-Jahre bis 1970er-Jahre zurückkehrt. Grund ist unter anderem ein Transportphänomen: In den Klimamodellrechnungen mit erhöhten Treibhausgaskonzentrationen verstärkt sich die polwärts gerichtete Zirkulation mit aufsteigenden Luftmassen in den Tropen und absteigenden Luftmassen in hohen Breiten. Der Aufstieg von Luftmassen in den Tropen würde sich also verstärken, was lokal zu einem geringeren Ozongehalt führt, da ozonärmere Luftmassen verstärkt aus der Troposphäre in die untere Stratosphäre verschoben werden.

Einerseits ist es gut zu sehen, dass es erste Hinweise einer Erholung der Ozonschicht gibt. Das Montrealer-Protokoll wirkt und dies ist ein großer Erfolg! Andererseits ist auch erkennbar, dass die Rückbildung des stratosphärischen Ozons regional unterschiedlich abläuft. Weitere Untersuchungen sind daher notwendig.

Martin Dameris

SATELLITEN ALS NEUE GEFAHR

Eine ganz neue Bedrohung der Ozonschicht könnte aus den Tausenden kleinen und kurzlebigen Kommunikationssatelliten für globale Internetabdeckung hervorgehen: Hunderte von ihnen werden jedes Jahr geplant auf die Erde zurückstürzen und in den hohen Atmosphärenschichten verglühen. Das Material könnte dort wieder zu einer Anreicherung von ozonvernichtenden Chemikalien führen. Damit stellen die Megakonstellationen von Starlink und anderen Anbietern neben der Störung des Nachthimmels durch ihre Lichtreflexe eine ernste Bedrohung für den Übergangsbereich zwischen Atmosphäre und Weltraum dar.

QUANTENCOMPUTING

Informatik muss auch als Teilgebiet der Physik gedacht werden. Dabei geht es nicht nur um das „Womit“, sondern auch das „Wie“ des computerbasierten Rechnens. Die Quantenphysik erlaubt das Umsetzen völlig neuer und vielversprechender Rechenprinzipien – mit viel Potenzial, allerdings bisher nur für sehr spezielle Probleme.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts konnten dank der Quantenmechanik erstmals atomare Phänomene widerspruchsfrei beschrieben werden: die diskreten Spektrallinien von Atomen, die Stabilität der Materie oder das Verhalten von Festkörpern. Trotz dieser unbestreitbaren Erfolge wurde die Theorie kontrovers diskutiert. Ein Grund dafür war, dass in quantenmechanischen Berechnungen Objekte auftauchen, deren Bedeutung nicht unmittelbar klar ist. Das wichtigste Beispiel sind Überlagerungszustände: Wenn ein Teilchen an den Orten A und B existieren kann, dann beschreibt die Quantenmechanik auch Zustände, in denen das Teilchen gleichzeitig über beide Orte verteilt ist. Einige der führenden Köpfe der Zeit wie Albert Einstein hielten dies für ein mathematisches Artefakt, das keine Entsprechung in der Wirklichkeit hat. Andere, darunter Niels Bohr, argumentierten, dass mikroskopische Teilchen sich tatsächlich völlig anders verhalten als die unseren Sinnen direkt zugängliche Welt. Geklärt werden konnte die Frage damals nicht. Dessen ungeachtet wurde die Quantentheorie vielfach experimentell bestätigt und brachte wichtige Technologien wie den Laser hervor.

Die derzeit vielleicht vielversprechendste mögliche neue Anwendung der Quantentechnologie ist die Konstruktion von Rechenmaschinen, die klassischen Computern in bestimmten Bereichen fundamental überlegen sind.

Eine ganz andere Art der Berechnung

Moderne Mikroprozessoren enthalten Milliarden von Schalteinheiten, die jeweils Milliarden Male pro Sekunde ihren Zustand wechseln können. Damit sind sie zwar menschlichen „Computern“, wie man Berechnungen ausführende Personen bis ins 20. Jahrhundert nannte, weit überlegen, die Rechenprinzipien sind jedoch die gleichen. In dieser Sichtweise waren alle Fortschritte der vergangenen Jahrzehnte lediglich quantitativ, nicht qualitativ. Gibt man einem Menschen einen Stapel Papier und viel Zeit, so kann er jeden Rechenschritt eines klassischen Computers nachvollziehen und wird am Ende zum gleichen Ergebnis gelangen. Diese Beobachtung wurde in der Informatik unter dem Namen starke Church-Turing-Hypothese zum Prinzip erhoben. Jahrzehntlang (für die junge Informatik eine Ewigkeit!) stellte die These von Alonzo Church und Alan Turing ein Fundament der Informatik dar. Dann kam die Quanteninformation. Sie nutzt geschickte quantenphysikalische Überlagerungen – eben jene Quantenzustände, über deren Interpretation einst gestritten wurde.

Nehmen wir an, ein Computer kodiert ein Bit durch den Aufenthaltsort eines Elektrons. Sagen wir, zunächst klassisch,

dass zwei Speicherzellen zur Verfügung stehen. Ist das Elektron in der linken Zelle, entspricht dies einer logischen „0“, die rechte Zelle einer „1“. Die Quantenmechanik besagt nun, dass es ebenfalls einen Zustand gibt, in dem das Bit in Überlagerung auf beide Zellen verteilt ist. Wirklich interessant wird das, wenn wir mehrere Bits auf einmal betrachten. Denn zwei klassische Bits haben schon vier mögliche Zustände: 00, 01, 10 und 11. Drei Bits kommen auf acht: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111; für vier Bits sind es 16, die auszuschreiben schon unübersichtlich würde, und ab ca. 300 Bits gibt es bereits mehr Möglichkeiten als Atome im Universum! Ein quantenmechanisches System kann vergleichsweise leicht in eine Überlagerung aller dieser Zustände gebracht werden.

Statt sich mit dem vagen Problem aufzuhalten, was diese Überlagerungen bedeuten, stellte man sich ab den 1990er-Jahren die pragmatischere Frage, ob man aus der astronomischen Zahl von Möglichkeiten einen Vorteil für Berechnungen ziehen kann. Dafür sprach die sogenannte Linearität der Quantenmechanik. Diese macht folgende Vorhersage: Bringt man das Eingaberegister eines Computers in einen Überlagerungszustand und wendet dann eine Rechenoperation an, so werden die Rechenwege für alle möglichen Eingaben gleichzeitig durchschritten. Selbst ein kleiner quantenmechanischer Computer kann also mehr Rechenwege auf einmal bearbeiten, als Atome im Universum existieren – dieser Effekt heißt Quantenparallelismus.

Ein wichtiges Problem musste aber noch gelöst werden: Am Ende der Rechnung befindet sich das Ausgaberegister ebenfalls in einem Überlagerungszustand – nämlich über alle möglichen Antworten. Es ist nicht offensichtlich, wie man daraus nützliche Informationen ziehen kann.

Eine erste Methode dafür wurde 1992 durch den britischen Physiker David Deutsch und den australischen Mathematiker Richard Jozsa entwickelt. Ihre Lösung beruht darauf, dass quantenmechanische Systeme Welleneigenschaften zeigen. Wenn zwei Wellen auf einer Wasseroberfläche ineinanderlaufen, entstehen Regionen, in denen sich die Auslenkungen verstärken („konstruktive Interferenz“) und Regionen, in denen sie sich gegenseitig kompensieren („destruktive Interferenz“). In ihrem Algorithmus bringen Deutsch und Jozsa nicht Auslenkungen von Wasser, sondern verschiedene Rechenwege quantenmechanisch miteinander in Interferenz. Sie zeigten, zunächst für ein einfaches Beispielproblem, wie man alle Lösungen konstruktiv und alle uninteressanten Rechenwege destruktiv interferieren lassen kann. Eine Mes-

sung am Ausgaberegister liefert dann eine Lösung des Problems.

Aus der Perspektive der theoretischen Informatik stellt dies ein sensationelles Resultat dar. Die Kombination aus Quantenparallelismus und Quanteninterferenz beschrieb erstmalig einen Rechenprozess, der sich nicht auf eine Abfolge einfacher Operationen reduzieren ließ. Die starke Church-Turing-Hypothese, eine Grundannahme der theoretischen Informatik, geriet ins Wanken. Es zeigte sich also, dass Informatik nicht unabhängig von Physik gedacht werden kann.

Von der Entschlüsselung bis zur Materialforschung

Die weitreichenden Folgen dieser theoretischen Entwicklungen wurden zunächst kaum wahrgenommen – wohl auch, weil das von Deutsch und Jozsa betrachtete Rechenproblem keine bekannte praktische Anwendung besitzt. Dies änderte sich zwei Jahre später, als der US-amerikanische Mathematiker Peter Shor den nach ihm benannten Quantenalgorithmus vorstellte. Shor zeigte, dass ein Quantencomputer mit einigen Tausend Qubits die Verschlüsselungstechniken knacken könnte, die Textnachrichten, Suchanfragen und Bankgeschäfte im Internet vor unbefugten Zugriffen schützen. Kryptograf:innen bezeichnen den Tag, an dem der erste hochskalierte Quantencomputer verfügbar sein wird, daher manchmal als Kryptogeddon. Quantencomputing ist seitdem nicht mehr nur ein akademisches Thema.

Seit den theoretischen Durchbrüchen der 1990er-Jahre sind Hunderte weitere Quantenalgorithmen beschrieben worden. Besonders praktisch relevant sind Anwendungen für die Materialwissenschaften. Die Eigenschaften von Festkörpern werden durch die Quantenmechanik bestimmt und es ist daher nicht überraschend, dass Quantencomputer diese effizienter simulieren können als klassische Rechenmaschinen.

Viel Aufmerksamkeit wurde auch investiert, um solche Quantenvorteile für kombinatorische Optimierungsprobleme zu finden: Auf welche Route kann ein Lieferant alle Kunden am effizientesten bedienen? Wie können teure Maschinen optimal für die Produktion genutzt werden? Unter welchen Bedingungen Quantencomputing in diesem Bereich sinnvoll ist, bleibt aber weiterhin eine offene Frage. Theoretische Methoden sind noch nicht stark genug und experimentelle Testläufe – sogenannte Benchmarks – sind schwierig, solange entsprechende Quantenhardware nicht verfügbar ist.

Auch wenn es in der öffentlichen Diskussion manchmal vereinfachend so dargestellt wird, sieht es derzeit nicht so aus, als ob Quantencomputing für allgemeine Rechenaufgaben eine Beschleunigung erreichen kann – erst recht nicht für bestehende Software. Auf Quantencomputern wird keine Textverarbeitung und kein Computerspiel laufen. Es ist daher eben nicht mit vergangenen Entwicklungen wie der Erhöhung der Taktfrequenz von Prozessoren oder der Anzahl der Rechenkerne zu vergleichen.

David Gross

DIE HARDWARE

Quantencomputer praktisch zu bauen, bleibt eine enorme Herausforderung. Der Grund liegt darin, dass Quanteneffekte extrem fragil sind: Kleinste Störungen lassen die Überlagerungszustände kollabieren. Aus diesem Grund müssen Qubits vor unkontrollierten Umgebungseinflüssen streng abgeschirmt werden. Gleichzeitig müssen sie aber für Steuerungssignale gut erreichbar bleiben. Es liegt auf der Hand, dass diese beiden Ansprüche – strenge Abschirmung und gute Kontrollierbarkeit – nur schwer gleichzeitig zu realisieren sind.

Derzeit werden eine Vielzahl von Plattformen auf ihre Tauglichkeit als skalierbarer Träger von Quanteninformation untersucht: Festkörperqubits (können auf den technologischen Erfahrungen der Mikroelektronik aufbauen), gefangene Ionen (leichter anzusteuern, aber sehr viel langsamer als Festkörperqubits), Photonen (fast ganz immun gegen äußere Störungen, aber sehr schwierig miteinander in Wechselwirkung zu bringen), Atome (gut zu kontrollieren und zu verschieben, aber eher langsam auszulesen) und viele mehr. Trotz massiver Fortschritte gibt es weiterhin keinen klaren Favoriten.

Stand 2023 ist noch kein praktisch relevantes Problem auf einem Quantencomputer gelöst worden, für das es nicht bessere klassische Ansätze gibt. Der Vorsprung klassischer Maschinen scheint in den letzten Jahren aber stark geschrumpft zu sein. Ob die Entwicklung eher dem Mooreschen Gesetz folgt (der Beobachtung, dass klassische Computer ihre Leistungsfähigkeit in regelmäßigen Abständen verdoppeln, siehe „Mikrochips: immer kleinere Strukturen“ auf Seite 177) oder der Entwicklung praktischer Fusionsreaktoren (im Prinzip möglich, aber praktisch immer einige Jahrzehnte in der Zukunft, siehe auch „Energie aus Kernfusion“ auf Seite 193) bleibt eine offene und spannende Frage.



Zum Thema siehe auch „Quantencomputer – Anwendungen und Realisierungen“ auf Seite 187 und „Quantenbits erzeugen und kontrollieren“ auf Seite 199 und die dort folgenden Artikel.

PHYSIK ALS TRAGENDE SÄULE DER KI-IMPLEMENTIERUNG?

Physikalische Analysen, die völlig ohne menschliches Zutun auskommen und künstliche Intelligenzen, die eigenständig komplexe physikalische Theorien in einer Vielzahl von Dimensionen und mit beliebig vielen Parametern entwickeln: Ist das Zukunftsmusik oder tatsächlich bald Realität?

Digitalisierung und künstliche Intelligenz (KI) haben in den letzten Jahren nicht nur den Alltag vieler Menschen verändert, sondern auch die Art und Weise, wie Wissenschaft betrieben, wie Physik gemacht wird. Maschinelles Lernen wird dabei in den unterschiedlichsten Teilbereichen eingesetzt und unter anderem zur Unterscheidung von Signal- und Hintergrundereignissen oder zur Rekonstruktion physikalisch relevanter Parameter genutzt, wie etwa bei der Bestimmung der Energie eines in einem Teilchendetektor registrierten Teilchens.

Die verwendeten Rechenverfahren sind dabei ebenso vielfältig wie die Einsatzgebiete und reichen von einfachen Entscheidungsbäumen – einer verhältnismäßig einfachen Abfolge von Ja-Nein-Entscheidungen – und deren Ensembles bis hin zu hochgradig komplexen neuronalen Netzen, denen die Idee, das menschliche Gehirn nachzubilden zu wollen, zugrunde liegt.

Die Kombination von Physik und KI ist also längst Realität. Und nicht nur das: Es ist eine Erfolgsgeschichte. Immer neue Algorithmen werden entwickelt und zur Lösung immer komplexerer Probleme verwendet. Die Entdeckung von Neutrinos aus der Milchstraße ist dabei nur ein Beispiel unter vielen. Welche Rolle wird die Physik in den nächsten Jahren bei der Entwicklung von KI spielen – also bei der Weiterentwicklung einer Technologie, die ihren Ursprung in der Informatik hat?

Maschinelles Lernen und KI als Werkzeuge

Da wäre zunächst die banale Antwort, dass maschinelles Lernen und KI für Physiker:innen in erster Linie Werkzeuge sind. Werkzeuge können aber nur effizient eingesetzt werden, wenn ihre Benutzer:innen sie beherrschen. Oder um es plakativ zu sagen: Man benutzt keinen Rasenmäher, um sich die Haare zu schneiden. Jenseits solcher reißerischer Aussagen sollte man sich aber vergegenwärtigen, dass gerade im Bereich KI auch der Aspekt der Nachhaltigkeit immer stärker berücksichtigt wird. Effizient mit Ressourcen haushalten bedeutet auch effizient mit Rechenleistung umgehen.

Künstliche Intelligenz kann unter anderem bei physikalischen Großexperimenten eingesetzt werden. Diese zeichnen nie dagewesene Datenmengen auf, die häufig unter dem Schlagwort Big Data subsumiert werden („KI und Big Data verändern die physikalische Forschung“ auf Seite 155). Dabei ist aber nicht nur die schiere Menge der Daten entscheidend, sondern auch die Geschwindigkeit, mit der sie aufgezeichnet und (vor-)verarbeitet werden müssen. Mit zukünftigen Projek-

ten wie dem Radioteleskop Square Kilometer Array (SKA) oder dem High-Luminosity-Upgrade des weltgrößten Teilchenbeschleunigers, dem Large Hadron Collider (LHC), werden die zu verarbeitenden Datenraten noch einmal deutlich ansteigen. Wahrscheinlich wird der Bedarf an praktikablen Lösungen zur Analyse dieser Daten zum technologischen Fortschritt im Bereich KI beitragen.

Clevere Analysealgorithmen sind für den Betrieb physikalischer Großexperimente aber längst nicht ausreichend. Neben der eigentlichen Analyse müssen die einzelnen Komponenten des Experiments und deren Zusammenspiel aufwendig simuliert werden. Um den Bedarf an Ressourcen zu senken, können komplexe Simulationsketten durch sogenannte Generative Adversarial Networks (GAN) abgebildet werden, die häufig nur einen Bruchteil der Ressourcen der seit Jahrzehnten etablierten Monte-Carlo-Methoden benötigen. Der Einsatz von GANs ist ein außerordentlich aktives Forschungsfeld innerhalb der Physik, bei dem es neben dem Beantworten von konkreten physikalischen Fragestellungen auch darum geht, die von Großexperimenten benötigten Ressourcen mit der gesellschaftlich drängenden Frage der Nachhaltigkeit in Einklang zu bringen, also etwa bei der Energieerzeugung entstehende Treibhausgase einzusparen.

Training der KI-Algorithmen

Der Einsatz von KI-Methoden setzt unabhängig von deren Zweck voraus, dass die Algorithmen mit entsprechenden Messdaten trainiert und validiert werden. Nur mit qualitativ hochwertigen Daten lassen sich qualitativ hochwertige Modelle schaffen. Dieser Umstand wird häufig etwas flapsig, aber durchaus gerechtfertigt, mit garbage in, garbage out (auf Deutsch: Müll rein, Müll raus) beschrieben. Je sensibler oder regulierter dabei der Einsatzbereich des KI-Modells ist, desto höher muss auch die Qualität der Eingangsdaten sein – etwa bei der Energie- und Wasserversorgung, Medizinprodukten und beim autonomen Fahren.

Die Erfahrung im Umgang mit großen Datenmengen sowie die Beurteilung der Qualität dieser Daten durch Parameter wie Genauigkeit, Präzision, Rauschen und Verzerrung ist eine Kernkompetenz von Physiker:innen. Sie können einschätzen, welche Datenqualität erforderlich ist, um eine vertrauenswürdige Antwort durch die KI zu bekommen.

Darüber hinaus kann es sich als hilfreich erweisen, physikalische Gesetzmäßigkeiten durch sogenanntes physics informed learning (zu Deutsch etwa: durch die Physik informiertes

Lernen) direkt zu implementieren. Ein so verstärktes KI-System kommt nicht versehentlich auf physikalisch unsinnige Fehlschlüsse, sondern kennt die Naturgesetze schon vor dem Lernvorgang.

Aber nicht nur die Menge und die Qualität der Daten sind relevant, sondern auch deren Nachvollziehbarkeit, insbesondere nach deren Aufbereitung in Analysen. Die Messdaten wissenschaftlicher Experimente sollen der wissenschaftlichen Gemeinschaft zugänglich gemacht werden. Dabei wird es in Zukunft zunehmend darauf ankommen, nicht nur die Daten selbst, sondern auch die Analyseskripte als Datenprodukte verfügbar zu machen und die Reproduzierbarkeit von Analysen in einem äußerst dynamischen Umfeld und über einen langen Zeitraum zu gewährleisten.

KI als Teil der Ausbildung

Nimmt man alle diese Aspekte zusammen, ergibt sich für die Physik, dass Kenntnisse über maschinelles Lernen Teil der Ausbildung werden müssen. Dies gilt insbesondere für Physiker:innen, die nach dem Studium bzw. der Promotion eine Anstellung in der Industrie finden möchten. Auch in diesem Bereich sind KI und deren Einsatz längst gelebte Realität. Ob die Ausbildung im Bereich KI universitär oder außeruniversitär stattfindet, ist zweitrangig.

Jenseits einer eher allgemeinen Ausbildung im Bereich KI bietet die Physik aber auch hervorragende Möglichkeiten, sich in einem bestimmten Bereich des maschinellen Lernens zu spezialisieren, z. B. im Rahmen einer Masterarbeit oder der Promotion. Physikalische Analysen sind in ihren Details häufig so komplex, dass diese auch von erfahrenen KI-Expert:innen nicht ohne Weiteres gelöst werden können. Weil es häufig eben nicht ausreicht, ein beliebiges neuronales Netz zu trainieren, müssen physikalisches und algorithmisches Wissen ineinandergreifen. Wer einen Algorithmus anpasst oder erweitert, um ein spezifisches physikalisches Problem zu lösen, gewinnt beinahe automatisch an Expertise.

Die Komplexität physikalischer Fragestellungen sorgt aber nicht nur für die Ausbildung von Expert:innen, sondern macht auch die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Informatiker:innen attraktiv.

Jeder neue KI-Algorithmus stellt ein weiteres und gegebenenfalls hochspezialisiertes Werkzeug im Werkzeugkasten der Physik dar, das möglicherweise auch in anderen Fachgebieten genutzt werden kann, um Lösungen für drängende



Die Architektur künstlicher neuronaler Netze ist durch das menschliche Gehirn inspiriert. Dieses Bild wurde mit der KI Stable Diffusion mit dem Prompt „Artificial neural network in the form of a human brain with input and output nodes highlighted“ erstellt.

Probleme der Zukunft zu finden. Dabei ist es außerordentlich wichtig, den Dialog mit anderen Wissenschaften aufrechtzuerhalten beziehungsweise aktiv zu suchen. Neben der Informatik sind hier die anderen Naturwissenschaften sowie Ethik, Philosophie, Psychologie und Politik zu berücksichtigen. Der Einsatz von KI zum Wohle aller muss auf möglichst vielen Säulen ruhen.

Die Physik ist nur eine dieser Säulen, aber eine, die auf eine lange Tradition im Bereich Technikfolgenabschätzung blickt (siehe „Technikfolgen und Gesellschaft“ auf Seite 319). Mit diesen Erfahrungen im Rücken und der Bereitschaft, eine führende Rolle nicht nur in der Entwicklung von, sondern auch im öffentlichen Diskurs über KI einzunehmen, kann die Physik neben der Informatik zu einer tragenden Säule der digitalen Transformation werden.

Tim Ruhe

ALLEIN IM UNIVERSUM?

Schon immer haben sich Menschen mit der Frage beschäftigt, ob die Erde der einzige Planet ist, der Leben beherbergt. Seit der Entdeckung von über 7000 Planeten, die um andere Sterne kreisen, wissen wir, dass das Sonnensystem nur eines unter vielen ist. Erdähnliche Planeten zu finden, auf denen Leben existieren könnte, rückt in greifbare Nähe.

Die Sonne ist ein Stern wie Milliarden andere in unserer Milchstraße. Die acht Planeten in unserem Sonnensystem – Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun – sind wohlbekannt. Sowohl der junge Mars als auch die unter kilometerdicken Eiskrusten verborgenen Ozeane der Jupiter- und Saturnmonde kommen als mögliche Orte für die Entwicklung von Leben außerhalb der Erde in Betracht. Zukünftige Satellitenmissionen werden dort nach Spuren von Leben suchen – von vergangenem oder sogar noch existierendem.

Auch außerhalb unseres Sonnensystems geht die Suche weiter: Im Jahr 1995 entdeckten die beiden Schweizer Astrophysiker Michel Mayor und Didier Queloz als ersten Planeten außerhalb unseres Sonnensystems 51 Pegasi b, der um einen Nachbarstern der Sonne kreist. Für diese Entdeckung erhielten sie 2019 den Physiknobelpreis, und es entstand ein rapide anwachsendes neues Forschungsgebiet.

Inzwischen kennen wir über 7000 solche extrasolaren Planeten (Exoplaneten). Statistische Analysen zeigen: Planeten sind nicht etwa die Ausnahme, sondern der Normalfall.

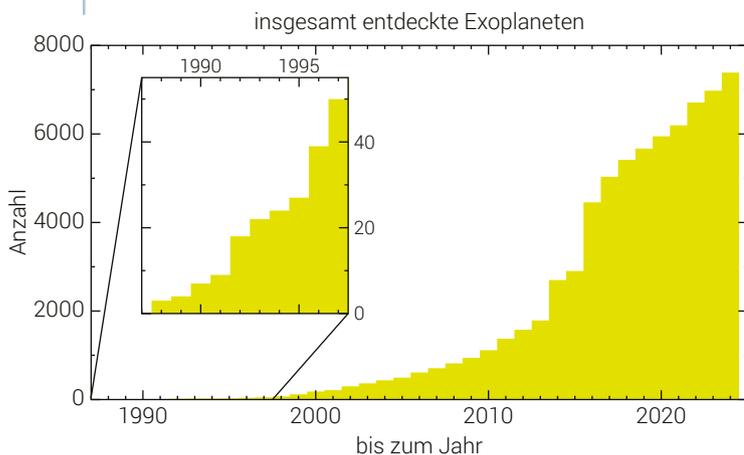
Eigenschaften der Exoplaneten

Die bisher bekannten Exoplanetensysteme unterscheiden sich stark von unserem Sonnensystem. Bereits die zuerst entdeckten Gasplaneten mit sehr großen Massen und kurzen Umlaufzeiten von nur wenigen Tagen waren eine Über-

raschung, da sie sich sehr nahe an ihrem Zentralstern befinden („Heiße Jupiter“). Auf so sternnahen Umlaufbahnen können sich aber kaum große Gasriesen bilden. Deshalb glaubt man, dass diese Planeten von ihrem ursprünglichen Entstehungsort im äußeren Bereich des jeweiligen Planetensystems zu ihrem aktuellen Abstand migriert sind, sie sich also auf Spiralbahnen zum Stern bewegt haben. Die kurzen Umlaufperioden sind aber keine typischen Eigenschaften von Exoplaneten, sondern Auswahlereffekte bei der Suche: Die meisten Methoden finden am leichtesten Planeten mit großen Massen und kleinen Umlaufperioden, wie auch 51 Pegasi b.

Viele weitere unerwartete Eigenschaften extrasolarer Planeten folgten. Dazu gehören u. a. sehr langgestreckte Umlaufbahnen, wie es sie in unserem Sonnensystem allenfalls bei Kometen gibt. Auch dies deutet auf Störungen der Planetenbahnen in der Entstehungszeit hin. Inzwischen gelingt es immer häufiger, auch einen zweiten, dritten oder vierten Planeten in einem Exoplanetensystem zu entdecken. Den Rekord hält gegenwärtig das System Kepler-90 mit acht bestätigten Planeten, gefolgt von Trappist-1 mit sieben Planeten. Dabei zeigt sich, dass Planetensysteme, die aus mehreren kleinen oder massearmen Planeten bestehen, häufiger sind als Systeme mit sowohl massearmen wie massereichen Planeten (wie unser Sonnensystem). Und wir finden um kleine, kühle Sterne (sogenannte M-Zwerg) meist auch nur kleine Planeten. Unsere Kenntnis der typischen „Architektur“ von Planetensystemen ist allerdings noch immer stark durch Auswahlereffekte der Messmethoden beeinflusst. Ein echter „Zwilling“ unseres Sonnensystems, d. h. ein System mit ähnlicher Planetenverteilung, wurde bisher noch nicht gefunden. Darüber hinaus gibt es erste Hinweise, dass es möglicherweise auch Planeten geben könnte, die gar nicht (mehr) an einen Zentralstern gebunden sind, sondern sozusagen „freifliegend“ in der Milchstraße unterwegs sind.

Mit der Verfeinerung der Entdeckungsmethoden wurde deutlich, dass die meisten Exoplaneten keine Heißen Jupiter sind. Diese machen tatsächlich nur ein Prozent der Exoplaneten aus. Die meisten extrasolaren Planeten hingegen haben Massen, die zwischen der der Erde und der des Neptuns liegen. Wir kennen heute heiße „Super-Erden“ und heiße sogenannte „Mini-Neptune“. Solche Planeten kommen in unserem Sonnensystem nicht vor. Der Exoplanet GJ367b ähnelt eher einem „Super-Merkur“ mit einer sehr hohen Dichte, also einem sehr großen Planetenkern. Andere haben mittlere Dichten, die eher den Eis-/Gasplaneten im Sonnensystem ähneln und daher eine Wasserstoffhülle haben müssen. Diese Vielfalt kennen wir bisher nur für Planeten mit kurzen Umlaufperioden

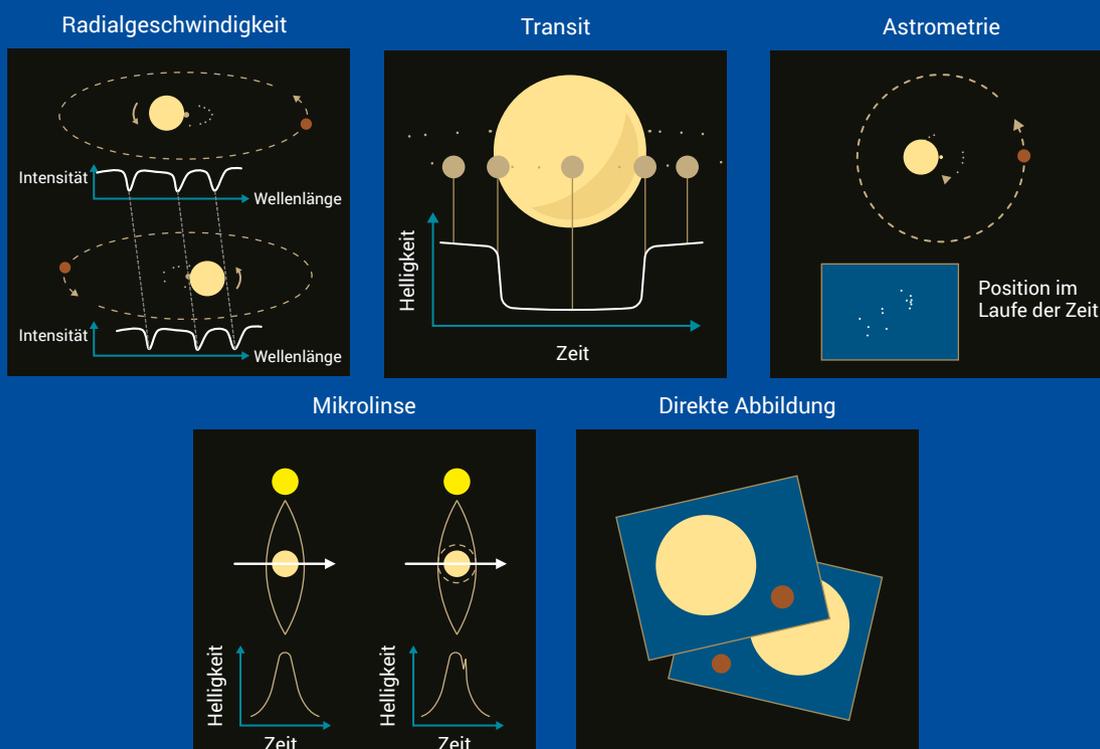


Die Anzahl bekannter Exoplaneten steigt durch immer bessere Beobachtungsmethoden stark an. Die besonders steilen Anstiege 2014 und 2016 beruhen vor allem auf den Entdeckungen mit dem Kepler-Weltraumteleskop. Die Exoplaneten mit einem Entdeckungsdatum vor 1995 wurden bei ihrer Entdeckung noch nicht als solche identifiziert und erst später erkannt.

DIE SUCHE NACH EXOPLANETEN

Bei der Suche nach Planeten um andere Sterne gibt es zwei große Schwierigkeiten: Die Planeten befinden sich von uns aus gesehen sehr nah an ihrem Zentralstern. Dazu kommt, dass der Stern ungefähr eine Milliarde Mal heller erscheint als sein Planet. Zwei eng nebeneinander liegende Lichtpunkte mit solch riesigem Helligkeitskontrast sind extrem schwierig nachzuweisen. Deshalb dominieren bisher indirekte Methoden bei der Suche nach Exoplaneten. Sie alle bedürfen unglaublich hoher Präzision, um die durch die Planeten erzeugten winzig kleinen Schwankungen in den jeweiligen Messgrößen nachzuweisen.

- Radialgeschwindigkeitsmethode:** Stern und Planet kreisen um den gemeinsamen Massenschwerpunkt, d. h. der Stern bewegt sich periodisch auf uns zu und von uns weg. Das Signal dieser Geschwindigkeitskomponente beträgt für einen Heißen Jupiter etwa 50 m/s, für die Erde um die Sonne nur etwa 10 cm/s. Mithilfe der Keplerschen Gesetze kann eine untere Planetenmassengrenze bestimmt werden.
- Transitmethode:** Wenn wir ein Planetensystem exakt von der Seite sehen, zieht der Planet periodisch vor der Sternscheibe vorbei. Dabei blockiert er einen Teil des Sternlichts. Aus der Abnahme der Sternhelligkeit kann die Größe des Planeten (im Vergleich zum Stern) bestimmt werden. Ein jupitergroßer Planet um eine Sonne verursacht einen Helligkeitsabfall von ca. 1%, eine Erde nur 0,01%. Kombiniert man dies mit der Radialgeschwindigkeitsmethode, können auch die Planetenmasse und die mittlere Dichte bestimmt werden. Dabei werden neben einigen bodengebundenen Teleskopen hauptsächlich Satellitenteleskope benutzt (von der europäischen Mission CoRoT, über die NASA-Teleskope Kepler/K2 und TESS, bis zu ESAs CHEOPS- und PLATO-Missionen).
- Astrometrische Methode:** Diese Technik misst die elliptische Bewegung des Sterns um den gemeinsamen Schwerpunkt. Die (Winkel-)Radien dieser periodischen Bewegung sind allerdings extrem klein, sodass die Auflösung fast aller Teleskope nicht dafür ausreicht – mit Ausnahme des Gaia-Satellitenteleskops der ESA, dessen Datensatz mit dieser Methode bald viele Entdeckungen liefern dürfte.
- Mikrolinsmethode:** Albert Einstein hat gezeigt, dass ein Hintergrundstern durch den Gravitationslinseneffekt für kurze Zeit heller erscheint, wenn ein Vordergrundstern direkt vor ihm vorbeizieht. Hat dieser Vordergrundstern einen Planeten, zeigt sich dies ebenfalls in einer Helligkeitsveränderung. Diese Methode kann Exoplaneten mit relativ kleiner Masse jenseits der Marsbahn entdecken und ist sehr gut geeignet für statistische Analysen zur Häufigkeit von Exoplaneten. Sie ermöglicht außerdem die Entdeckung von freifliegenden Exoplaneten in der Milchstraße. Allerdings spielt der Zufall hier eine große Rolle, da Planet und Hintergrundstern sehr genau aufgereiht sein müssen. Deshalb müssen sehr viele Hintergrundsterne regelmäßig überwacht werden.
- Direkte Abbildung:** Der starke Helligkeitskontrast und der kleine Winkelabstand von Stern und Planet machen eine direkte Aufnahme im sichtbaren Licht sehr schwierig. Junge Planeten strahlen allerdings insbesondere im infraroten Wellenlängenbereich heller als ältere Planeten. Mit hochauflösenden Infrarot-Aufnahmen wurden bereits einige Planeten entdeckt (z. B. das System HR 8799 mit vier Planeten). Es werden bereits heute Konzepte für neue, große Satellitenteleskope untersucht (z. B. das Nancy Grace Roman Telescope und das geplante Habitable World Observatory HWO der NASA sowie das LIFE-Missions-Konzept in Europa), die auch kleine Planeten auf erdähnlichen Umlaufbahnen abbilden können sollen.



(bis etwa 80 Tage, d. h. kürzer als Merkur). Der Bereich, in dem wir die Gesteinsplaneten im Sonnensystem finden, d. h. bis hin zum Erd-/Venusorbit, ist mit den meisten Methoden noch nicht nachweisbar. Die Kepler-Mission der US-amerikanischen Weltraumbehörde NASA hat zwar einige Kandidaten in diesem Bereich ermittelt. Mittlere Dichten konnten aber nicht bestimmt werden, sodass nicht sicher ist, um welchen Planetentyp es sich jeweils handelt. Diese Wissenslücke soll ab 2027 die Mission PLATO der Europäischen Weltraumagentur ESA schließen.

Mit zunehmender Messgenauigkeit ist uns heute auch die Zusammensetzung der Atmosphären einiger Exoplaneten zugänglich. Zieht ein Planet von uns aus gesehen vor seinem Stern vorbei, so läuft ein Teil des Sternenlichts durch den dünnen Atmosphärenring seines Planeten hindurch. Mit äußerst aufwendigen Messungen kann man dann feststellen, ob der Planet eine Atmosphäre hat, und teilweise sogar ihre Zusammensetzung bestimmen. Dies ist bereits für mehrere Heiße Jupiter und Mini-Neptune gelungen. Dabei wurden unter anderem Wasserstoff, Helium, Natrium, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasser nachgewiesen. Auch das vom Planeten reflektierte Licht enthält wichtige Informationen: Es zeigt, dass die Mehrzahl der Heißen Jupiter dunkler ist als un-

Künstlerische Darstellung aller sieben bekannten Planeten des Trappist-1-Systems und der Erde im gleichen Maßstab zum Vergleich. Die Oberflächenstrukturen der Exoplaneten sind passend zu den bisher gemessenen Eigenschaften der Planeten frei interpretiert. Die Planeten kreisen auf sehr nahen Bahnen um ihren im Vergleich zur Sonne kleinen Zentralstern: Sie würden alle innerhalb der Bahn des Merkurs Platz finden.

ser Jupiter. Das James-Webb-Weltraumteleskop (JWST, Seite 71) und die europäische Mission ARIEL werden unsere Kenntnis der Atmosphären erweitern.

Gibt es eine zweite Erde?

Ein besonderer Fokus bei der Suche nach Planeten um andere Sterne liegt auf der Frage, ob es eine zweite Erde gibt. Gemeint ist ein Planet mit einer der Erde vergleichbaren Größe und Masse (also ein Gesteinsplanet wie die Erde), der sich in einer nur leicht elliptischen Bahn innerhalb der habitablen (bewohnbaren) Zone um einen sonnenähnlichen Stern bewegt. Damit ist der Bereich um einen Stern gemeint, in dem die mittlere Oberflächentemperatur eines Planeten zwischen 0 und 100 Grad Celsius liegt, sodass flüssiges Wasser existieren kann. Diese Definition ist stark vereinfacht, erlaubt aber eine erste Einordnung von neu entdeckten Planeten nur auf Basis ihrer grundlegenden Parameter: Abstand zum Stern, Masse, Radius, mittlere Dichte.

Heute kennen wir gesichert nur wenige Gesteinsplaneten in der habitablen Zone, wovon das [Trappist-1-System](#) am bemerkenswertesten ist. Alle bekannten verhältnismäßig erdähnlichen Planeten umkreisen kühle M-Zwergsterne. Gesteinsplaneten in der habitablen Zone um sonnenähnliche Sterne kennen wir bisher noch nicht. Der Nachweis von Gesteinsplaneten in der habitablen Zone ihres jeweiligen Sterns reicht allerdings bei Weitem nicht aus, um auf Leben schließen zu können. Auch moderate Oberflächentemperaturen bedeuten nur, dass diese Grundvoraussetzung für Leben ge-



geben ist – aber nicht, dass sich Leben auch tatsächlich entwickelt hat.

Einen Exoplaneten, der tatsächlich der Erde in allen bekannten Eigenschaften ähnelt, haben wir bisher (Stand 2024) noch nicht gefunden, und es ist auch unwahrscheinlich, jemals einen exakten „Erd-Zwilling“ zu entdecken. Aber vielleicht ist das auch gar nicht notwendig, denn auch Planeten mit etwas anderen Parametern könnten Leben hervorgebracht haben.

Bisher konnten Atmosphären nur für sehr wenige Gesteinsplaneten untersucht werden. Erste Messungen des JWST an drei Gesteinsplaneten in der habitablen Zone des Trappist-1-Systems zeigen, dass die bisher untersuchten Planeten wohl keine dichte Atmosphäre haben. Anders bei dem Sub-Neptun-Planeten K2-18b: Hier deutet der Nachweis von Methan und Kohlendioxid darauf hin, dass es sich eventuell um eine Wasserwelt mit einer darüber liegenden Wasserstoffatmosphäre handeln könnte.

Die Suche nach Leben

Das Leben auf der Erde begann vor ca. 3,5 Milliarden Jahren, also etwa eine Milliarde Jahre nach ihrer Entstehung – was im astronomischen Maßstab als kurz einzustufen ist. Nun kann man durchaus annehmen, dass diese – wenn auch teilweise unbekannt – Prozesse zur Entstehung und Entwicklung des Lebens ebenso anderswo auftreten können, wenn die Bedingungen ähnlich sind. Von daher ist es durchaus vorstellbar, dass es Leben anderswo im Universum gibt. Naheliegende Orte wären dann Exoplaneten mit ähnlichen Bedingungen wie die Erde (siehe dazu auch „Ursprünge des Lebens“ auf Seite 145).

Ist ein Planet gefunden, der die Voraussetzungen für Leben bietet, so ist die nächste Frage, wie sich tatsächliches Leben nachweisen lässt.

Wir beschränken uns im Folgenden notwendigerweise auf „Leben, wie wir es kennen“, also wie es auf der Erde vorkommt. Für unser Leben ist Sauerstoff unabdingbar. Er wird auf der Erde hauptsächlich durch die Photosynthese in Pflanzen erzeugt. So wäre die Entdeckung von Sauerstoff oder Ozon in der Atmosphäre eines Exoplaneten ein starkes Indiz für Leben, insbesondere weil molekularer Sauerstoff sehr reaktiv ist und leicht chemische Verbindungen eingeht. Er würde also relativ schnell aus der Atmosphäre verschwinden, wenn er nicht ständig nachproduziert würde. Aber es gibt auch abiotische Prozesse, die Sauerstoff hervorbringen können. Zudem hat sich im Laufe der Erdgeschichte die Zusammensetzung der Erdatmosphäre stark gewandelt. Ein weiteres wichtiges Molekül ist daher Wasser, da flüssiges Wasser nach allem, was wir wissen, für das Leben benötigt wird. Weitere wichtige Moleküle sind Kohlendioxid und Methan, aber auch Lachgas (N_2O), das auf der Erde fast ausschließlich von der Biosphäre produziert wird. Letztendlich wird es sich beim



Baufortschritt des ELT im Januar 2025, das im Jahr 2028 seinen Betrieb aufnehmen soll

Nachweis von Leben um einen Indizienbeweis handeln müssen. Es braucht daher ein umfassendes Verständnis der klimatischen und biologischen Prozesse auf Planeten, bevor dieser Indizienbeweis überzeugend geführt werden kann.

Zur Erfassung der Indizien bedarf es einer neuen Generation von Teleskopen, die in der Lage sind, die mit Computermodellen vorhergesagten sehr schwachen Signale nachzuweisen. Diesem Ziel widmen sich Konzepte wie das Habitable World Observatory (HWO) der NASA und die LIFE-Missionsidee aus Europa, die für die 2030er-/2040er-Jahre geplant sind. Auch mit bodengebundenen Teleskopen wie dem [Extremely Large Telescope \(ELT\)](#) der Europäischen Südsternwarte (ESO) werden die Atmosphären von Gesteins-Exoplaneten untersucht werden.

Die direkt anschließende Frage, ob es anderswo auch „intelligentes Leben“ oder gar technische Zivilisationen gibt oder geben kann, ist noch viel schwieriger zu beantworten. Zum einen hängt die Entwicklung von den Einzellern über Mehrzeller, einfache Wirbeltiere bis zu den Menschen von sehr vielen evolutionären Zufällen ab. Und selbst wenn die Evolution überall ähnlich vonstatten gehen würde: Die allerlängste Zeit der Erdgeschichte war das Leben auf der Erde primitivster Natur: Bakterien und Einzeller. Die ersten menschlichen Hochkulturen sind vor etwa fünftausend Jahren entstanden. Dieser Zeitraum entspricht etwa einem Millionstel des Erdalters von 4,5 Milliarden Jahren. Statistisch gesehen müssten wir also eine Million erdähnliche Planeten entdecken, um darunter eine einzige zu finden, die sich zufällig gerade im Zeitalter der „Hochkulturen“ befindet (vorausgesetzt, dass sich alle Planeten auf ähnlichen Zeitskalen entwickeln wie die Erde). Die Suche nach Leben auf anderen Planeten konzentriert sich daher in den meisten Fällen auf den Nachweis von primitivem Leben, das es auf unserem Planeten schon von fast Beginn an gibt.

Katja Poppenhäger, Heike Rauer und Joachim Wambganß



MENSCHEN

Physik wird von und für Menschen betrieben. In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die formale Physikausbildung organisiert ist und welche Karrieremöglichkeiten sich im Kontext der Physik ergeben. Es wird beschrieben, welche kulturelle Rolle die Physik einnimmt, welche philosophischen und geschichtlichen Aspekte dabei wichtig sind und wie Kunst und Physik sich gegenseitig inspirieren. Dass physikalische Erkenntnisse an sich zwar unpolitisch sind, ihre Anwendung aber sehr wohl mit der Politik und ethischen Fragestellungen verknüpft ist (man denke etwa an die Kernspaltung, die Klimaveränderung oder die Informationstechnik), wird ausführlich im letzten Abschnitt „Für die Gesellschaft“ erläutert.

Nachhaltiges Wissen entsteht dort, wo bereits in der Schule die Leidenschaft für das Fach geweckt wird. Dass die Unterrichtsgestaltung einige klassische Methoden wie die Experimente aus der Physiksammlung nutzt und gleichzeitig die Möglichkeiten der Digitalisierung integrieren muss, ist dabei eine aktuelle Herausforderung für die Lehrenden.

Ein Physikstudium hat aufeinander aufbauende Abschlussstufen: Den Bachelor und den Master. Die Promotion kann sich daran anschließen. Rund 2800 Studierende schließen pro Jahr in Deutschland mit einem Bachelor und ebenso viele mit einem Master ab, etwas mehr als 1500 Promotionen pro Jahr kommen dazu. Bei den rund 400 Lehramtsabsolvent:innen der Physik ist Mathematik das häufigste Zweifach. Alle, die Dingen auf den Grund gehen wollen und an Teamlösungen und Austausch interessiert sind, finden hier einen vielseitigen Studiengang mit mannigfaltigen Berufsperspektiven.

In der Ausbildung von Lehrpersonal für Physik gilt es, gesellschaftlichen und technischen Veränderungen Rechnung zu tragen, diese im Sinne des lebenslangen Lernens zu integrieren und so junge Menschen in ihrer individuellen Persönlichkeit zu fördern. Die zielgruppengerechte Vermitt-

lung eines breiten naturwissenschaftlichen Fundamentes ist gerade bei immer diverseren Klassen mit ganz unterschiedlichem Vorwissen eine große Herausforderung. Neben der naturwissenschaftlichen Grundbildung spielt heute auch die Vermittlung von Medien- und Technologiekompetenz eine große Rolle.

Gut ausgebildete, studierte Physiker:innen arbeiten zu einem großen Teil in anderen Berufen, denn ihr mathematisch-analytisches Denken, mit dem sich unterschiedlichste, komplexe Probleme lösen lassen, wird überall benötigt. Das bedeutet gleichzeitig die Qual der Wahl beim Berufstart, hier unterstützt die DPG mit Berufsinformationen. Das Studium war immerhin für ganze 87% die richtige Wahl, sie würden es jederzeit wieder aufnehmen.

Die Erforschung der grundlegenden Zusammenhänge, wie sie die Physik betreibt, ist eine der wichtigsten Kulturleistungen der Menschheit. Aufbauend auf den Erkenntnissen und der methodischen Stringenz der Physik wurden und werden viele Innovationen und Verbesserungen der Lebensbedingungen erreicht.

Physikalische Fragen sind häufig auch philosophischer Natur, wie die Natur des Messprozesses in der Quantenmechanik oder Fragen nach Raum und Zeit. Dies betrifft auch Bereiche, die sich der alltäglichen Erfahrung entziehen, wie etwa im Kern eines Schwarzen Lochs oder bei den Prozessen im Allerkleinsten. Messprozesse in der Quantenmechanik, Fragen nach Raum und Zeit – oft geht es darum, Fragen zu stellen, die philosophischer Natur sind. Dies betrifft besonders die Bereiche, die sich der alltäglichen Erfahrung entziehen, wie etwa am Rand eines Schwarzen Lochs oder bei den Prozessen im Allerkleinsten.

Die Physikgeschichte beschreibt dabei die Stationen, die die Wissenschaft auf ihrem Weg genommen hat, von einer reinen von Männern dominierten zu einer diversen und par-



tizipativen Wissenschaft, in der oft leider noch immer längst nicht alle Namen genannt werden, die Großes vollbracht haben.

Kunst und Physik beflügeln sich gegenseitig. Physikalische Forschung liefert zuweilen Themen für Bild, Musik, Roman oder Film. Kunstwerke wiederum können mit physikalischen Methoden untersucht werden, um etwa übermalte Gemälde zu rekonstruieren. Die Freiheit der Kunst, den Stand der Wissenschaft weiterzudenken oder aus einer Außensicht zu reflektieren kann physikalische Forschung sogar inspirieren.

Die zentralen Fragen der Gesellschaft sind heute auch Fragen der gesamten Weltgemeinschaft. Länderübergreifende Forschung ist deshalb gefragt. Die Gemeinschaft der Forschenden ist international organisiert, was weitere diplomatische Kanäle eröffnet. Dabei legt die Wissenschaft Wert auf ihre weitgehende Unabhängigkeit und auf Freiheit und Toleranz.

Physikalische Forschung öffnet oft die Tür zu technischen Entwicklung, die sowohl friedlich als auch kriegerisch genutzt werden können. Dieser Ambivalenz ist sich die Physik sehr wohl bewusst.

Wenn nämlich die Büchse der Pandora einmal geöffnet ist, wie durch die Erfindung der Atombombe, bedarf es klarer und bindender Regeln und Verträge, um die gesamte Menschheit davor zu schützen. Auch heute ist die Gefahr eines Atomkriegs bei weitem nicht gebannt und scheint wieder zunehmend größer zu werden.

All dies berührt den Bereich der ethischen Fragestellungen, ohne die keine gute wissenschaftliche Praxis möglich ist. Ob es Atombomben sind oder das Geo-Engineering: Beides beinhaltet schwere Eingriffe in die Umwelt des Menschen

und bedarf der ethischen Reflexion im Rahmen der Technikfolgenabschätzung.

Die Kommunikation von wissenschaftlichen Zusammenhängen trägt zum besserem Verständnis bei und bietet zum Beispiel eine Grundlage zur Veränderung unseres Umganges mit den Ressourcen der Erde. Deshalb ist die Beratung der Politik eine wichtige Aufgabe. Damit naturwissenschaftlich unterfütterte Veränderungen und Gesetze auf den Weg gebracht werden können, braucht es fundiertes und gleichzeitig verständliches Hintergrundwissen wie UN-Generalsekretär Antonio Guterres mit der Gründung des „Scientific Advisory Board“ 2023 unterstrichen hat.

Was aus all dem hervorgeht: Wissenschaft und Gesellschaft brauchen gegenseitiges Verständnis und Austausch, damit sie ihre aufklärerische Kraft entfalten kann und der Gesellschaft dient. Deshalb sollten möglichst viele an den Ergebnissen physikalischer Forschung teilhaben. Dies ist eine wichtige Aufgabe der Wissenschaftskommunikation. Dazu sind in den letzten Jahren viele neue Formate entstanden, so gibt es neben Schülerlaboren sogar Vorträge und Diskussionen in Kneipen und Bars, um eine breite gesellschaftliche Zielgruppe in der Freizeit anzusprechen – fernab von Instituten und Universitäten und leicht verdaulich für alle.

BILDUNG UND BERUF



Spätestens in der Schule sollte die Neugier auf Physik geweckt werden. Hier sind Lehrkräfte gefragt, eine gute Mischung von Experiment, Theorie und der Integration von neuen Medien und Lernformen zu finden. Die Physikdidaktik erkundet dabei Wege, wie Lernenden zeitgemäß und ihren unterschiedlichen Voraussetzungen entsprechend Inhalte vermittelt, bzw. sie gemeinsam mit ihnen erarbeitet werden. Studierende der Physik lernen, den technologischen Herausforderungen unserer Welt mit Fachwissen und Teamwork zu begegnen. Beides können sie dann in ganz unterschiedlichen Branchen einsetzen, wie sowohl die Arbeitsmarktstatistik als auch ganz konkrete Karrierebeispiele in diesem Abschnitt zeigen.



In der universitären Ausbildung nehmen Vorlesungen weiterhin eine wichtige Rolle ein, auch wenn Sie heute durch multimediale Möglichkeiten angereichert sind. Sehr wichtig sind dabei auch die Vorführungen von Experimenten aus verschiedensten Fachgebieten – und zwar „in echt“, und nicht nur als Videoaufnahmen.



ALLTAGSBEZOGEN, INTERAKTIV UND MULTIMEDIAL

Digitale Technologien sind im Alltag der Schüler:innen längst präsent und sollten es auch in der Schule sein. Nicht alle klassischen Unterrichtsmethoden sind deshalb überholt, aber in vielerlei Hinsicht bedarf es einer Neujustierung des Physikunterrichts.

So unterschiedlich wie die Lehrkräfte als Personen sind, so unterschiedlich sind auch die eigenen Erfahrungen mit Unterricht. Das gilt für alle Fächer, und damit auch für die Physik. Auf der Negativseite wird von nicht zeitgemäßen Lehrkräften, verrechneter Physik und fehlendem Bezug zum Leben berichtet. Doch auch Experimentierfreude und begeisternde Vermittlung der Lerninhalte können den Unterricht auszeichnen. So oder so unterscheidet sich der Physikunterricht, den die jetzt unterrichtenden Generationen als Schüler:innen erlebt haben, in vielen Aspekten vom Physikunterricht, den sie heute planen, umsetzen oder in Hospitationen beobachten.

Neue Möglichkeiten

Der **Alltag der Schüler:innen** hat sich gravierend verändert: Sie wachsen in einem digitalen Umfeld auf, das den Alltag bestimmt und einen unübersehbaren Einfluss auf ihre Motivation hat. Die Bereitschaft, sich mit klassischen und grundlegenden – und aus unserer Sicht nach wie vor notwendigen – Inhalten, wie beispielsweise der elektrischen Reihen- und Parallelschaltung oder dem elektrischen Feld eines Plattenkondensators, auseinanderzusetzen, ist weniger ausgeprägt, als man es sich wünschen würde. Zur Unterrichtsplanung gehört auch, eine Fragehaltung zu erzeugen und Motivation zu schaffen. Auch die unterschiedlichen Lernvoraussetzungen unter den Schüler:innen beeinflussen die Unterrichtsgestaltung.

Versetzen wir uns in eine typische siebte Klasse mit 28 oder mehr Schüler:innen, die sowohl hinsichtlich des Leistungsvermögens, der Motivation, der Vorbildung als auch der körperlichen Entwicklung sehr heterogen sind. Die Erkenntnis, dass es im eigenen Zuhause Reihen- und Parallelschaltungen gibt, ist eher nachrangig. Die Tatsache, dass es Größen gibt, die diese Schaltungen beschreiben und voneinander abhängig sind, ist fundamental, den meisten Schüler:innen aber gleichgültig. Doch die Fragen, welches Risiko man eingeht, wenn man Mehrfachsteckdosen hintereinander schaltet, welche Schaltung sich bei den zwei Lichtschaltern im Flur verbirgt oder welche Rolle Kondensatoren in der Diskussion zur Energiewende spielen, können als Einstiegsimpulse für eine Auseinandersetzung mit elektrischen Schaltungen oder dem Plattenkondensator dienen.

Je nach Leistungsstand können die aufgeworfenen Fragestellungen untersucht werden: Idealerweise mithilfe eines Experiments, das die Schüler:innen selbst planen und anhand eines Protokolls bzw. differenzierten Arbeitsauftrags bearbeiten. Unterstützende Materialien, Lösungen oder vertiefende

Informationen können mit QR-Codes auf den Arbeitsunterlagen bereitgestellt werden und sind somit niedrigschwellig zugänglich, sofern **Digitalgeräte** im Unterricht vorhanden und zugelassen sind. Auf **Lernplattformen** wie beispielsweise Moodle können Schüler:innen und Lehrkräfte die Ergebnisse austauschen und Korrekturen durchführen.

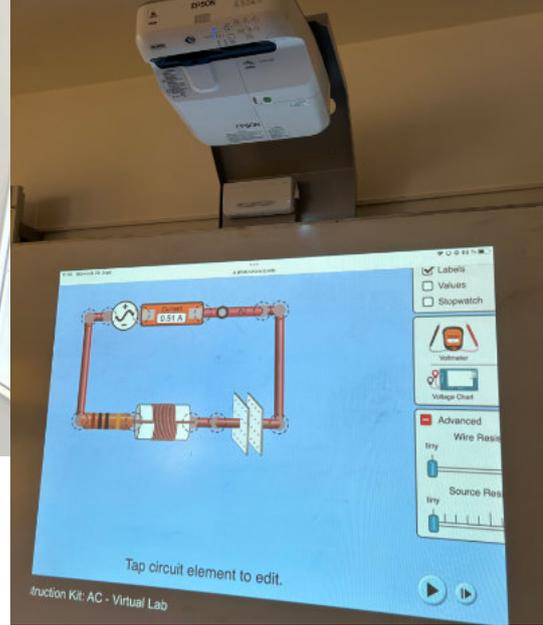
Zu vermitteln, wie richtig recherchiert werden kann, ist eine zentrale Aufgabe jedes Unterrichts. Die Lehrkraft oder das Schulbuch als Monopol der Wissensvermittlung haben allerdings ausgedient. Wissen ist schnell und im Überfluss verfügbar, wird aber leider oft unreflektiert angenommen, nicht kritisch hinterfragt oder geprüft. Hier konkurrieren Onlinevideos mit den Lehrkräften.

Innovative Technologien im Physikunterricht

Die Dynamik des digitalen Zeitalters hat dazu geführt, dass die herkömmlichen Lehrmethoden im Physikunterricht nicht mehr ausreichen, um das Interesse der Schüler:innen zu wecken. Es ist unabdingbar geworden, die Lehre interaktiv und **multimedial** zu gestalten. Deshalb darf sich Physikunterricht nicht nur auf das Bearbeiten von Arbeitsblättern oder auf Versuchsprotokolle beschränken. Selbst erstellte Videoprotokolle, das Vertonen stummer Videos, eigene Podcasts und Klassenblogs sind nur einige Möglichkeiten, die Ergebnisse des Physikunterrichts zu reflektieren, zu verbreiten und andere daran teilhaben zu lassen.

Zudem können **Apps und Lernplattformen**, die interaktive Experimente und Simulationen ermöglichen, Lernerfahrungen revolutionieren. Mit ihnen können komplexe physikalische Konzepte wie der genannte Plattenkondensator visualisiert und besser verständlich gemacht werden, indem Schüler:innen verschiedene Szenarien durchspielen und die Auswirkungen in Echtzeit beobachten. Dies fördert nicht nur das Verständnis, sondern steigert auch die Motivation, sich mit der Materie auseinanderzusetzen. Klassische Übungs- und Festigungsphasen können durch **Quizplattformen** abwechslungsreich gestaltet werden. In höheren Jahrgangsstufen erstellen die Schüler:innen die Quizfragen teilweise auch selbst.

Es gibt inzwischen zahlreiche **außerschulische Lernorte**, die Schüler:innen eine Annäherung an moderne physikalische Forschungsinhalte und einen direkten Kontakt mit Physik als Wissenschaft ermöglichen. Exemplarisch seien hier Initiativen wie „Light and Schools“ (Universität Hamburg) oder das DLR School Lab des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt genannt. So kann der Übergang vom Interesse an



Alltagsphänomen zur eigenen wissenschaftlichen Arbeit gelingen.

In Ergänzung dazu bietet die Digitalisierung auch die Möglichkeit, Expert:innen aus anderen Standorten direkt in den Unterricht einzuschalten. Durch [Videokonferenzen](#) und andere Onlineplattformen können Schüler:innen von Fachwissen und Erfahrungen profitieren, die außerhalb ihres geografischen Standorts liegen. Dies erweitert nicht nur den Horizont der Lernenden, sondern fördert auch den interkulturellen Austausch und die Vernetzung mit Gleichgesinnten und Fachexpert:innen weltweit.

Auswirkung auf die Unterrichtsplanung

Die Digitalisierung hat nicht nur direkte Auswirkungen auf die Lernenden, sondern auch auf die Lehrkräfte selbst. Digitale Werkzeuge und Plattformen erleichtern die Zusammenarbeit unter den Pädagog:innen immens. Gemeinsam können sie Unterrichtsmaterialien nicht nur effizienter planen und zusammenstellen, sondern diese auch kontinuierlich und kollaborativ weiterentwickeln. Dies fördert einen dynamischen Lehrplan, der sich an aktuelle Anforderungen anpasst, und schafft Raum für kreative und interdisziplinäre Unterrichtsansätze. Andererseits erreicht die Lehrkräfte damit auch die Beschleunigung der Arbeitsvorgänge durch die Digitalisierung, die in Wirtschaft und Verwaltung schon seit einigen Jahrzehnten sowohl die Produktivität als auch den Lern- und Geschwindigkeitsdruck auf die Mitarbeiter:innen erhöht.

Hat damit eine klassische [Physiksammlung](#) ausgedient? Nicht unbedingt. Es gibt einen Standard an klassischen Schulversuchen, den jede:r Schüler:in einmal durchgeführt haben sollte – dazu gehört auch die Parallel- und Reihenschaltung mit entsprechenden Messungen von Spannung, Stromstärke und Widerständen. Ergänzt und vertieft werden die Versuche aber durch Simulationen und die Recherche in digitalen Medien. Digitale Messwerterfassungssysteme und sogar das eigene Smartphone (z. B. mit der App PhyPhox, Seite 176) ermöglichen inzwischen Versuche, die früher in Schulen nicht möglich gewesen wären, und erleichtern den Einstieg in eine vertiefte Diskussion über die Versuche und die daraus gewonnenen Erkenntnisse.

Blick in die Zukunft

Während klassische Experimente ihren festen Platz im Physikunterricht haben und diesen auch beibehalten werden, könnten in Zukunft zusätzlich Technologien der Augmented

Reality (AR) eingebunden werden. Sie verbinden die physische und digitale Welt miteinander und erweitern so den Lernprozess. Wenn durch den Einsatz von AR-Brillen in der siebten Klasse die Bewegung von Elektronen direkt in die reale Welt eingeblendet werden könnte, würde dies eine völlig neue Lern- und Verstehensebene eröffnen. Komplexe Modelle und abstrakte Konzepte würden auf einmal interaktiv erlebbar und somit verständlicher für die Schüler:innen werden.

Darüber hinaus ist es wichtig, Schüler:innen nicht nur Wissen zu vermitteln, sondern sie auch zu kritischem Denken und zum eigenständigen Lösen von Problemen zu erziehen, auch hinsichtlich der eingesetzten Technik selbst. In einer Welt, die von Technologie durchdrungen ist, benötigen sie diese Fähigkeiten mehr denn je. Werkzeuge der [künstlichen Intelligenz](#) wie ChatGPT finden immer mehr Anwendungsbereiche. Wie sie dabei Schüler:innen im Lernprozess unterstützen und ihnen neue Perspektiven aufzeigen, wird zurzeit stark diskutiert und erprobt.

Zuletzt sollten wir uns auch fragen, ob die gegenwärtigen, traditionellen Prüfungsmethoden noch zeitgemäß sind, wo doch Informationen jederzeit und überall verfügbar sind und kollaboratives Arbeiten immer wichtiger wird. Möglicherweise könnte man stärker [praxisorientierte, projektbasierte Prüfungsformate](#) einführen, bei denen die Anwendung von Wissen und das Lösen realer Probleme im Vordergrund stehen.

Es liegt an uns, die Lücke zwischen der digitalen Welt, in der die Schüler:innen aufwachsen, und den immer noch vorherrschenden konventionellen Lehrmethoden zu überbrücken. Wir sollten uns als Vermittelnde zwischen den Schüler:innen und der Physik sehen, die diese in ihrer Alltagswelt erleben. Das setzt voraus, dass Physiklehrkräfte ihre eigene „physikalische“ Lernbiografie – so erfolgreich sie ihnen selbst auch vorkommen mag – kritisch reflektieren und unterschiedliche Lernwege konzipieren können, um der Heterogenität gerecht zu werden und den Physikunterricht abwechslungsreich zu gestalten. Ohne entsprechende fachliche und fachdidaktische Kompetenzen ist dies nur schwer möglich. Wie Albert Einstein schon zu sagen pflegte: „Die höchste Kunst der Lehre ist es, Freude am kreativen Ausdruck und Wissen zu wecken.“

Daniel Dohmen und Yvonne Struck

DAS STUDIUM DER PHYSIK

Physikalische Bildung ist nicht nur die individuell notwendige Grundlage für ein modernes Weltverständnis sowie für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe, sondern auch unverzichtbar für die technologische Entwicklung in Deutschland.

Physik ist immer dort, wo Neues gedacht und technologische Entwicklungen angestoßen werden. Wir stehen heute vor gewaltigen Aufgaben, für deren Bewältigung begrenzte Ressourcen zur Verfügung stehen. Um so wichtiger ist es, Menschen zu bilden, die erfolgversprechende Lösungen für Probleme finden können. Um beispielsweise die Folgen des Klimawandels zu verstehen, die Leistungsfähigkeit von Computerchips oder die moderne Medizin zu verbessern, benötigt man das Grundlagenwissen der Physik, aber auch eine analytische Denkweise und experimentelle Fertigkeiten. All das wird in herausragender Weise im Physikstudium vermittelt.

Physik ist ein faszinierendes Studienfach, aber auch anspruchsvoll. Ziel des Physikstudiums an einer Universität ist ein grundlegendes Verständnis der Eigenschaften und Ver-

haltensweisen der Materie in Raum und Zeit. Hierfür erlernen Studierende die aktuellen experimentellen Techniken in Forschungslaboren und die analytischen Methoden durch Vorlesungen und Übungen. Die Erkenntnisse der Physik werden in allen Naturwissenschaften, insbesondere der Chemie und Biologie, aber auch in der Medizin und den Ingenieurwissenschaften angewendet.

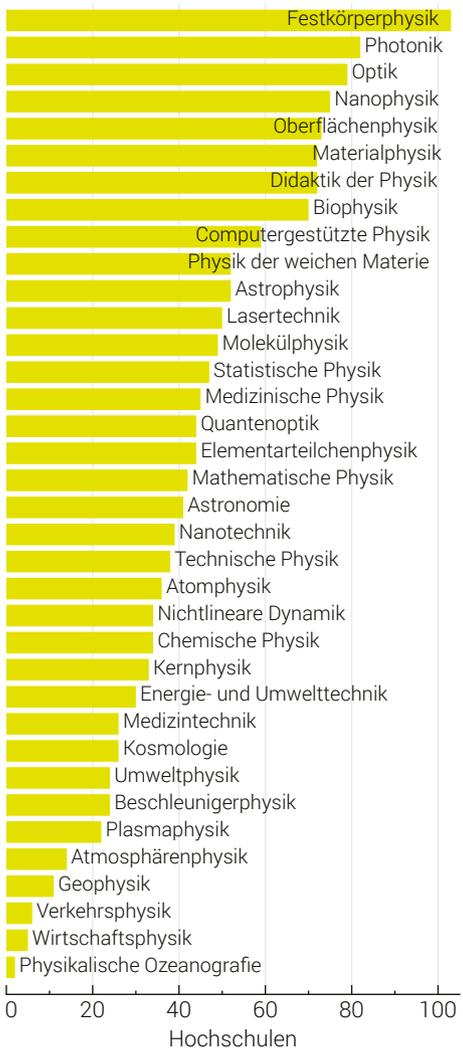
Studieninhalte

Das Studium der Physik ist so vielfältig wie die Phänomene und Prozesse, die wir in der Welt beobachten und erfahren können. Wer sich für Physik interessiert, will diese Vielfalt verstehen und zum Wohle der Menschen verwenden (siehe Seite 319). Dazu muss man lernen, in Laboren genaue Beobachtungen und Experimente durchzuführen, am Schreibtisch mit Papier und Bleistift mathematische Theorien zu entwerfen und Schlüsse aus ihnen zu ziehen sowie am Computer komplexe Systeme zu simulieren, um vorhersagen zu können, was passieren könnte. Durch immer ausgeklügeltere Messinstrumente werden neue Phänomene und ungewöhnliche Vorgänge sichtbar, die wir mit bloßen Sinnen nicht wahrnehmen können und die oft auch unserer Alltagserfahrung nicht entsprechen. Das Studium der Physik ist daher vor allem durch Offenheit, Neugier und Spielfreude getrieben, um ungewöhnliche Fragen an die Natur zu stellen und neue Wege für eine Antwort zu finden. Das Studium ist daher auch sehr forschungsorientiert und führt zügig an eigene Experimente und theoretische Modelle heran.

Die fachliche Schwerpunktbildung im Physikstudium beginnt mit der Bachelorabschlussarbeit und kann sowohl zum **Masterstudium** als auch zur **Promotion** noch verändert werden. Als Themen können dabei alle Bereiche der Physik, wie wir sie hier im Gesamtwerk darstellen, ausgewählt werden, abhängig von der fachlichen Ausrichtung der Institute des jeweiligen Studienorts.

Ablauf des Fachstudiums

Alle Universitäten in Deutschland, an denen Physikstudiengänge angeboten werden, haben sich in einer **Konferenz der Fachbereiche Physik (KFP)** zusammengeschlossen. Sie trifft sich zweimal im Jahr und bespricht die Inhalte und die Struktur des Studiums der Physik. Deswegen läuft ein Bachelorstudium an allen Universitäten recht ähnlich ab, und die Studienangebote der Fachbereiche unterscheiden sich hauptsächlich in der Anzahl der Studierenden und Professuren. In den ersten drei bis vier Semestern werden die drei Gebiete Experimentalphysik, theoretische Physik und Mathematik etwa zu gleichen Teilen behandelt, oft in Form von vierstündigen **Vorlesungen mit zwei- bis dreistündigen Übungen**. Die Übungen sind häufig sehr rechenorientierte Unterrichtsstunden mit Hausaufgaben, die in der Regel von höhersemestrigen Studierenden oder Doktorand:innen betreut werden, während die Vorlesungen in der Regel von Professor:innen gehalten werden. In der **Experimentalphysik** geht es da-



Häufigkeit von thematischen Schwerpunktsetzungen in den knapp 250 Fachstudiengängen, die im Studienatlas Physik gelistet sind www.studienatlas-physik.de.

	Pflichtbereich				Wahlpflichtbereich		
1. Semester	Physik 1 Mechanik Wärmelehre		Mathematik 1		Programmieren Rechentechniken	Einführung anderer Fächer Astronomie Chemie Informatik Meteorologie BWL, VWL Philosophie	<i>Beispielhafter Modulplan des Physik-Bachelorstudiums. Das Physikstudium ist ein Vollzeitstudium, das Methoden und Inhalte gleichermaßen vermittelt. Bis zum Bachelor müssen europaweit 180 Leistungspunkte erreicht werden. Das Punktesystem ermöglicht die gegenseitige Anerkennung der Leistungen, sodass Studienortwechsel innerhalb Europas ohne großen Aufwand möglich sind. Am Ende jedes Blocks stehen in der Regel Klausuren oder schriftliche Ausarbeitungen.</i>
2. Semester	Physik 2 Optik Elektromagnetismus	Praktikum Mechanik Wärmelehre	Mathematik 2	Theoretische Physik 1 Mechanik			
3. Semester	Physik 3 Quantenphysik	Praktikum Optik Elektromagnetismus	Mathematik 3	Theoretische Physik 2 Elektrodynamik	Data-Science KI-Methoden		
4. Semester	Physik 4 Festkörper, Atome, Moleküle	Praktikum Elektronik		Theoretische Physik 3 Quantenmechanik	Computerphysik		
5. Semester	Physik 5 Kerne und Teilchen	Praktikum Festkörper, Atome, Moleküle		Theoretische Physik 4 Statistische Physik	Präsentation Proseminar Präsentationstechniken Seminar zur Bachelorarbeit	Vertiefung Astrophysik Medizinphysik Klimaphysik	
6. Semester	mündliche Prüfung	Praktikum Kerne und Teilchen		mündliche Prüfung		Bachelorarbeit	

bei zunächst um Mechanik, Wärmelehre, Elektrodynamik und Optik, später kommen Quantenphysik, Atom- und Molekülphysik sowie Festkörper-, Kern- und Teilchenphysik hinzu, wobei anfangs viele Versuche vorgeführt werden. Da diese Physik die Grundlage für nachhaltige Energieversorgung, Medizin und Computertechniken darstellt, werden in weiteren Vorlesungen oft Themen wie Klimaphysik, Biophysik und künstliche Intelligenz vertieft.

In zahlreichen **Laborpraktika** lernen die Studierenden, mit Messgeräten professionell umzugehen und Versuche eigenständig durchzuführen. Am Anfang des Studiums stehen oft auch ein Programmierkurs und zunehmend der Umgang mit Daten, um Experimente steuern und Messdaten richtig auswerten zu können.

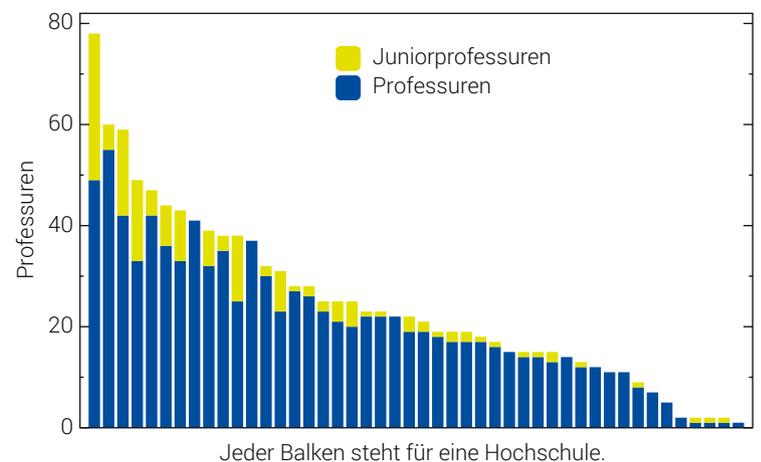
In der **theoretischen Physik** geht es um die großen Phänomenbereiche der Physik und ihren systematischen naturgesetzlichen Aufbau (Seite 11): klassische Mechanik, Elektrodynamik, Quantenmechanik sowie Thermodynamik und statistische Physik. Im Masterstudiengang werden neben „Klassikern“ wie die Quantenfeldtheorie verstärkt Vorlesungen angeboten, die den Forschungsrichtungen der Fachbereiche oder Fakultäten entsprechen und aus der Breite der in diesem Buch besprochen Themen kommen. Die Studierenden lernen dabei Phänomene mathematisch zu beschreiben, zahlreiche Modelle durchzurechnen und Naturgesetze zu begründen.

Die **Mathematik** stellt die notwendige Sprache bereit, um Probleme formalisieren und analytisch durchdringen zu können (Seite 17). Vor Beginn des Studiums bieten viele Universitäten Brückenkurse für Mathematik an („Nulltes Semester“), damit alle mit gleichem oder ähnlichem Niveau starten können. Im Studium stehen dann vor allem Analysis für die Differenti-

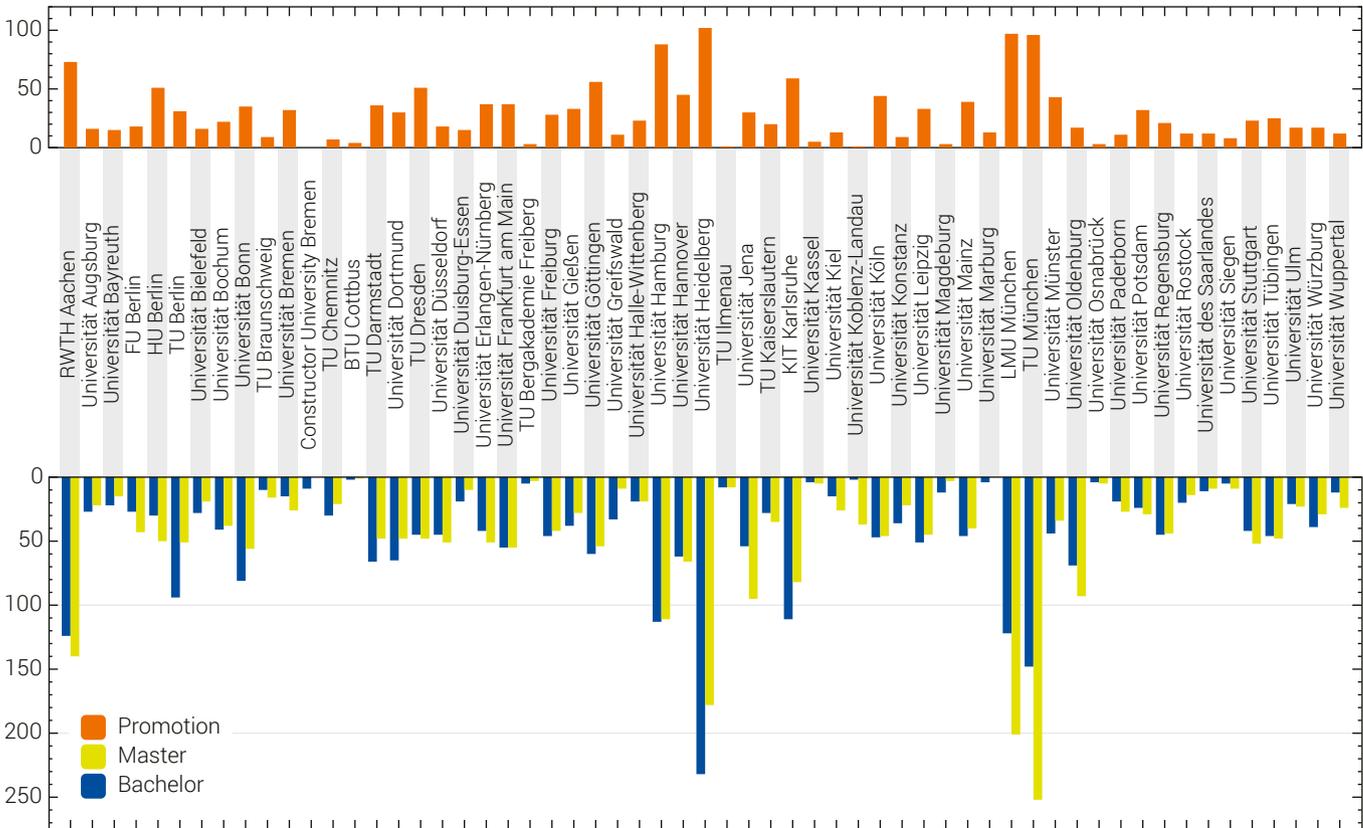
al- und Integralrechnung sowie lineare Algebra auf dem Stundenplan. Später kommen noch Grundzüge der Maß- und Wahrscheinlichkeitstheorie, der Funktionentheorie und Funktionalanalysis hinzu.

In der Regel wählen die Studierenden zusätzlich ein weiteres physikalisches Vertiefungsfach wie z. B. Astronomie und ein nicht-physikalisches Nebenfach wie zum Beispiel Informatik oder Chemie. Manche Universitäten ermöglichen auch Nebenfächer in der Philosophie und Geschichte der Physik, um die erkenntnistheoretischen, ontologischen und sprachlichen Grundlagen der physikalischen Forschung oder die Geschichtlichkeit ihres Wissens zu studieren. Oft geschieht dies in interdisziplinären Lehrveranstaltungen mit den Human-, Sozial- oder Geisteswissenschaften, denn Physik hat als eine

Anzahl von Professuren und Juniorprofessuren für Physik an den Universitäten in Deutschland: Die Physik-Fachbereiche kommen in allen Größen vor.



Abschlüsse 2024



zentrale Kulturleistung der Menschen nicht nur eine lange Geschichte, sondern spielt mit ihren Methoden auch heute eine wichtige Rolle – z. B. für historische und archäologische Forschungen – und ist als eine der wirkmächtigsten Weltbeschreibungen auch bedeutsam für Kunst und Literatur.

Physiker:innen müssen zudem lernen, die Folgen ihrer Forschung für die Gesellschaft abzuschätzen und ethisch zu bewerten. Zunehmend ist daher auch Wissenschaftskommunikation integraler Bestandteil des Studiums, um Physiker:innen zu befähigen, in einen Dialog mit der Gesellschaft zu treten und ihre Forschungen bekannt zu machen. Für angehende Lehrende liegt der fachliche Fokus stärker auf der

experimentellen Physik und den konzeptionellen Grundlagen des Naturverständnisses.

Physikstudiengänge an den Universitäten

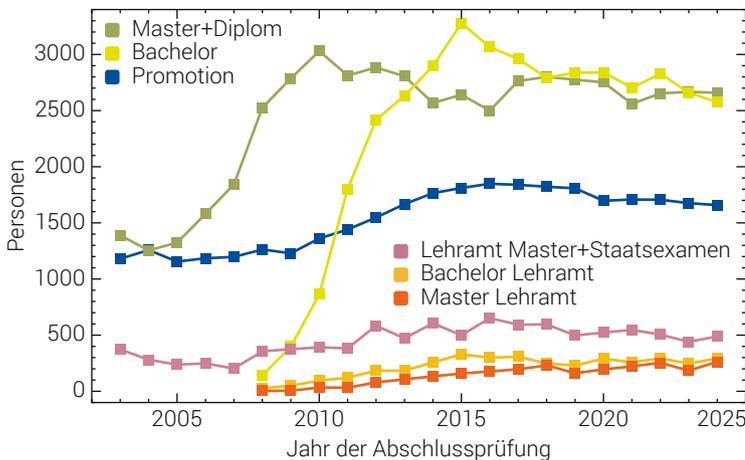
Physik kann flächendeckend in Deutschland an fast allen Universitäten studiert werden. Die Größe der Fachbereiche der Physik variiert dabei sehr stark. Insgesamt ist die Zahl der Absolvent:innen in Deutschland über die letzten 15 Jahre mit rund 2800 Abschlüssen pro Jahr recht konstant gewesen. Das ist bemerkenswert, weil in den 1970er- bis 1990er-Jahren die Studierendenzahl mit einer Periode von zehn Jahren stark schwankte.

Nahezu alle Studierenden nutzen die Möglichkeit der konsekutiven Studiengänge, um das Physikstudium nach der Bachelorprüfung durch einen Master zu vertiefen, was in etwa dem Niveau der bis Anfang der 2000er-Jahre durchgeführten Diplomstudiengänge entspricht.

Der Anteil von Frauen unter den Studierenden steigt über die Jahre langsam an, aber eine Gleichverteilung ist längst nicht erreicht. Sowohl bei den Bachelor- als auch den Masterabschlüssen sowie bei den Promotionen liegt der Frauenanteil bei ca. 25%, allein bei den Lehramtsstudiengängen Physik ist der Frauenanteil höher und beträgt ca. 35%.

Abschlüsse für das Lehramt der Sekundarstufe II erreichen jedes Jahr ca. 400 Studierende. Diese Absolventenzahl reicht bei Weitem nicht aus, um den Bedarf an Lehrkräften für Physik in den Schulen zu decken.

Zeitlicher Verlauf der bestandenen Abschlussprüfungen in den verschiedenen Physikstudiengängen; die Bachelor-/Masterabschlüsse wurden erst 2008 eingeführt, daher der steile Anstieg dort.



Aufgrund des hohen Bedarfs gibt es in der Regel keine Zulassungsbeschränkungen für Studiengänge der Physik. Alle mit einem Interesse an einem wissenschaftlichen Verständnis der Natur sind willkommen und haben beste Berufsaussichten als Physiker:innen, aber auch in der Ingenieursbranche, in einem Lehrberuf, in der Unternehmensberatung, IT, Wissenschaftskommunikation und vielen anderen Berufsfeldern, wie die Karrierebeispiele in diesem Abschnitt zeigen.

Das Studium der Physik ist forschungsorientiert, und die Studienbedingungen sind hierfür an allen Universitäten sehr gut. Die Betreuung erfolgt vor allem in Tutorien und Praktika in kleinen Lerngruppen. Spätestens im dritten Jahr beginnt eine eigene Forschungsarbeit in einer Arbeitsgruppe des Fachbereichs oder kooperierender Institute.

Studienerfolg und seine Voraussetzungen

Die tatsächlichen durchschnittlichen Studiendauern liegen für den Bachelorabschluss bei 7,5 Semestern, für den Master bei weiteren 5,5 Semestern, d. h. mehr als ein Semester über der [Regelstudienzeit](#) von sechs bzw. vier Semestern.

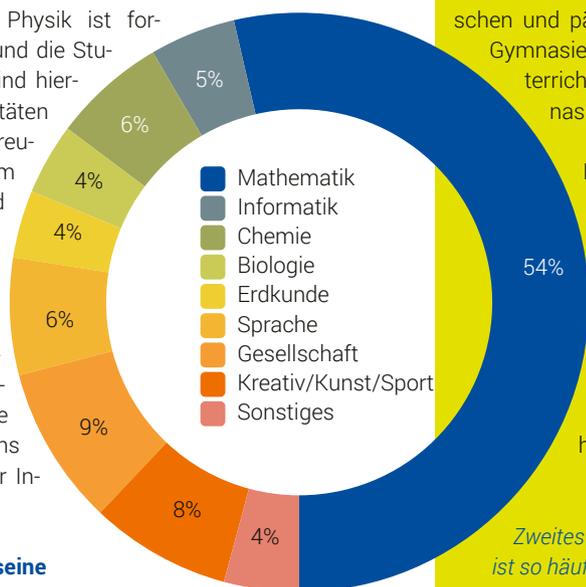
Die Bestehensquote bei den Abschlussprüfungen ist sehr hoch, ein Bachelorstudium wird im Mittel mit der Note 2 (gut) abgeschlossen, ein Masterstudium mit der Note 1,5. Allerdings verlässt rund die Hälfte der Studienanfänger:innen das Bachelorstudium in den ersten beiden Semestern, ohne sich zur Abschlussprüfung anzumelden. Dies untermauert die oft kolportierte vereinfachte Wahrnehmung unter Physiker:innen: „Wer die ersten beiden Semester durchhält, schafft auch den Abschluss!“ Weiterhin zeigen Untersuchungen, dass über 30% der Eingeschriebenen nie an einer Übungsveranstaltung teilnehmen und daher als „Parkstudierende“ gewertet werden müssen.

Über die Hälfte der Absolvent:innen eines Physikmasterstudiengangs schließen eine Promotion an, die im Schnitt vier Jahre dauert. Hinzu kommen aus dem Ausland ca. 30% der in einem Jahr in Deutschland Promovierten, was die große Internationalität der Physik und die Anziehungskraft deutscher Institute belegt. Viele Studierende stellen ihre Forschungsergebnisse aus Bachelor- oder Masterarbeiten auf internationalen Konferenzen oder den DPG-Tagungen vor, und vor allem Promovierende gehen zeitweise zu Forschungsaufenthalten an ausländische Institute, vor allem in Europa, aber auch in die USA, nach Kanada oder Japan.

LEHRAMTSSTUDIUM

Im Gegensatz zum Fachstudium Physik ist das Lehramtsstudium in Deutschland durchaus verschieden gestaltet, weil unterschiedliche Vorgaben der Bundesländer zu berücksichtigen sind und das Studium für eine Vielzahl verschiedener Schulformen differenziert werden muss. Während beim Lehramtsstudium für Grundschulen und Förderschulen die didaktischen und pädagogischen Fähigkeiten im Vordergrund stehen, liegt für Gymnasien und Berufsschulen der Fokus auf dem Fachwissen. Ein Unterricht im Fach Physik ist vor allem in der Sekundarstufe II an Gymnasien und Gesamtschulen vorgesehen.

In Deutschland studiert man in der Regel zwei Fächer für das Lehramt an einer weiterführenden Schule. Das Fach Physik wird von der Hälfte der Studierenden mit dem Fach Mathematik kombiniert, was sich hervorragend ergänzt. Aber auch andere Schulfächer, insbesondere die Naturwissenschaften Chemie, Biologie und Erdkunde sowie die Informatik lassen sich sehr gut zusammen mit Physik studieren. Zusätzlich zum Fachstudium kommen Lehrveranstaltungen zur Fachdidaktik, zur Allgemeinen Pädagogik und Erziehungswissenschaften sowie Praktika in der Schule hinzu.



Zweites Studienfach der Lehramtsstudierenden in Physik: Mathematik ist so häufig wie alle anderen Fächerkombinationen zusammen.

Die wichtigsten Voraussetzungen für das Physikstudium sind die Freude daran, den Dingen auf den Grund gehen zu wollen, und ein Durchhaltevermögen beim Lösen von Problemen. Es braucht Geduld, um Experimente aufzubauen, bis sie funktionieren, oder um theoretische Resultate zu erzielen, wo es zunächst keinen Weg zu geben scheint. Zu Beginn des Studiums ist die Mathematik aus der Schule wichtig, weshalb die meisten Universitäten Brückenkurse vor dem ersten Semester anbieten. Physikalisches Vorwissen aus der Schule ist hilfreich, aber von der systematischen Anlage des Studiums her grundsätzlich nicht erforderlich.

Entscheidend für den Studienerfolg ist, sich mit anderen Studierenden und den Dozierenden auszutauschen, Lerngruppen zu bilden und im Team zu arbeiten. Alleine findet man oft keine Lösung für Übungsaufgaben oder experimentelle Herausforderungen, weshalb Physik schon immer im Gespräch und in Diskussionen mit anderen erfolgte. Physik wird eben von Menschen für Menschen gemacht.

Klaus Mecke

MEHR ALS GUTER UNTERRICHT

Die Physikdidaktik beschäftigt sich mit der Frage, was physikalische Bildung ausmacht und wie diese am besten erreicht werden kann. Es geht dabei nicht um die Physik allein, sondern um die Frage, wie die Begegnung von Mensch und physikalischer Natur sinnstiftend gestaltet werden kann.

Die **Physikdidaktik** ist eine relativ junge Wissenschaft: Der Fachverband Didaktik innerhalb der DPG gründete sich 1973. Physikdidaktische Forschung beschäftigt sich – sehr allgemein gesprochen – mit den Inhalten, Bedingungen und Methoden für Bildungsprozesse zu physikalischen Inhalten. Solche Bildungsprozesse sind äußerst komplex: Das Lehren und Lernen ist eine soziale Interaktion mit einer Vielzahl von Aspekten, die ineinandergreifen. Die Physikdidaktik muss daher lernende und lehrende Personen, Lerngegenstände, Rahmenbedingungen und Lernangebote betrachten und Forschungsmethoden für ihre Wechselwirkungen entwickeln und anwenden.

dem Ziel einer naturwissenschaftlichen Grundbildung (engl. scientific literacy) für alle muss physikdidaktische Forschung versuchen, dieser Diversität gerecht zu werden. So formuliert der österreichische Physiknobelpreisträger Wolfgang Pauli einmal: „Als Physiker kann man davon ausgehen, dass ein Elektron wie das andere ist, während Sozialwissenschaftler auf diesen Luxus verzichten müssen.“

Da es also darum geht, vor allem junge Menschen in ihrer individuellen Persönlichkeit zu fördern und sie bei der Begegnung mit der Physik zu begleiten und zu unterstützen, entwickelt die physikdidaktische Forschung mithilfe empirischer



Ein wichtiger Schwerpunkt der Forschung dabei ist, Inhalte auszuwählen und modernen, attraktiven und lernförderlichen Physikunterricht in der Schule methodisch zu gestalten. Dabei gilt es, das Interesse von Lernenden an naturwissenschaftlichen Themen zu fördern und sie in die Lage zu versetzen, auf Basis von fundierten grundlegenden Kenntnissen und Kompetenzen die Gesellschaft von morgen mitzugestalten. Die Physikdidaktik geht dabei über den schulischen Unterricht hinaus: Es gibt physikbezogenes Lernen auch im Kindergarten, in Universitäten und Hochschulen, in Science Centers, Museen und Ausstellungen, im Fernsehen, im Internet, in Büchern und an weiteren Orten.

Hinweise auf erfolgreichen Physikunterricht

Jede Person, die Physik lernt oder lehrt, bringt ein eigenes Vorwissen, spezifische Interessen und ihre persönliche Einstellung mit. Wie man Lernen erlebt, ist deshalb sehr individuell. Die Bildungsforschung geht davon aus, dass Wissen individuell konstruiert werden muss (**konstruktivistische Lerntheorie**) und es darum weder die eine optimale Lösung noch den optimalen Weg oder die gleiche Erkenntnis gibt. Mit

Untersuchungen theoretische Modelle, die es erlauben, diese komplexen Zusammenhänge zu beschreiben und zu reflektieren. Damit erhalten Lehrkräfte Hinweise darauf, wie sie ihren Unterricht erfolgreich gestalten können, ohne dass sich daraus aber einfache Faustregeln oder allgemeine Gültigkeiten ableiten lassen. Im einzelnen Fall kann Unterricht dennoch erfolglos sein, weil in dem komplexen sozialen Geflecht zwischen unterschiedlichen Personen und Rahmenbedingungen nie zwei Situationen komplett vergleichbar sind. Wichtig ist dann, mit den vorhandenen physikdidaktischen Begriffen und Theorien die Lernsituation analysieren und das Lernangebot verbessern zu können.

Vorgehensweise fachdidaktischer Forschung und Lehre

Forschende in der Physikdidaktik müssen sich also den Methoden der **Sozialwissenschaften** und der **Psychologie** sowie der Wissensbestände der **Erziehungswissenschaften** und der **Bildungsforschung** bedienen, um Lernsituationen in ihren vielen Facetten analysieren und konstruieren zu können. Gleichzeitig brauchen sie ebenso das Wissen ihres Fachs, um ganz spezifisch das Erlernen von physikalischen Inhalten und

PHYSIKDIDAKTIK IM DEUTSCHSPRACHIGEN RAUM



In Deutschland gibt es 60 Professuren (inklusive Juniorprofessuren) in der Physikdidaktik. In der überwiegenden Mehrzahl verfügen die Institute über eine Professur, wenige haben zwei Professuren, einige arbeiten ohne Professur.

Seit den 1970er-Jahren wurden über 600 physikdidaktische Promotionen an den Standorten in Deutschland (Ost und West) abgeschlossen. Die thematische Ausrichtung und Entwicklung, die sich in diesen Dissertationen zeigt, wird zur Zeit in einem Forschungsprojekt der physikdidaktischen Gemeinschaft ausgewertet.

Kompetenzen in den Blick nehmen und beispielsweise Lernschwierigkeiten berücksichtigen zu können. Sie sind also Bildungsforschende mit spezifischem fachbezogenen Anliegen. Die Physikdidaktik stellt somit eine eigenständige, sehr komplexe und interdisziplinäre Forschungsdisziplin dar.

Fachdidaktische Forschung muss dabei bestimmten Gütekriterien standhalten, wie beispielsweise der Objektivität, Verlässlichkeit und Gültigkeit. Sie analysiert die Ausprägungen von veränderlichen Größen, deren wechselseitige Einflüsse aufeinander und ihre Konsequenzen beispielsweise für den Lernerfolg. Sie zieht außerdem theoretische Konzepte zur Modellbildung heran.

In diesem Sinne gibt es Ähnlichkeiten zur fachphysikalischen Forschung. Gleichzeitig sind die Forschungssituationen aber auch grundlegend verschieden, wie das zuvor genannte Zitat von Pauli andeutet. So sind die Kontrolle von veränderlichen Größen, die Vergleichbarkeit der Messgrößen und die Übertragbarkeit von Ergebnissen weitaus komplizierter, wenn man es mit (unterschiedlichen) Menschen, Schulklassen, Schulen, Bundesländern und Nationen zu tun hat.

Ziel der physikdidaktischen Ausbildung ist die Fähigkeit, physikbezogene Lernangebote zielgruppengerecht zu planen, zu gestalten und zu reflektieren. Die physikdidaktische Lehre muss dafür einerseits die erforderlichen Kompetenzen bereitstellen, andererseits aber auch die notwendige Flexibilität fördern, um auf wechselnde Bedingungen angemessen reagieren zu können. Dazu gehören beispielsweise Kenntnisse über typische Vorstellungen von Lernenden, bewährte und innovative Unterrichtskonzeptionen, Rückführung auf relevante Teilaspekte und wesentliche Fachmethoden (z. B. Experimente und Modelle). Auch Kenntnisse über Verfahren zur Diagnostik, Beurteilung und Rückmeldung zu Lernleistungen sowie zur adaptiven und differenzierenden Gestaltung physikbezogener Lehrangebote werden gebraucht. Dabei liegt der Fokus der universitären Lehre, also der ersten Ausbildungsphase, stärker auf der Analyse und Reflexion von Lernangeboten und Lernprozessen. Die schulpraktische Lehrerbildung in der zweiten Ausbildungsphase hingegen befasst sich stärker mit der Planung und Durchführung der Lehrangebote. In Zeiten

schneller gesellschaftlicher und technischer Veränderungen und dem drängenden Lehrkräftemangel bekommen Lehrkräftefortbildungen (3. Ausbildungsphase) eine immer größere Bedeutung.



Bereits heute erfordert der Schulalltag eine dynamische Anpassungsfähigkeit. Wie (Physik-)Unterricht in zehn oder zwanzig Jahren aussehen wird und vor welchen Herausforderungen Lehrkräfte dann stehen werden, ist noch offen.

Herausforderungen der Zukunft

Ein Physikunterricht, der einen relevanten Beitrag für eine Welt von morgen leisten soll, braucht teilweise andere Inhalte als bisher und muss andere Fähigkeiten vermitteln. Beispielsweise ist die Physik des Klimawandels ein verhältnismäßig neues Thema im Physikunterricht, und auch Aspekte der Energieversorgung müssen mit Zukunftsperspektive unterrichtet werden. Außerdem ist stärker zu erforschen, wie nicht nur die leistungsstarken Lernenden, sondern alle eine ausreichende naturwissenschaftliche Grundbildung erwerben können, und wie der Physikunterricht einer zunehmenden Diversität der Lernenden gerecht werden kann. Dabei ist auch zu untersuchen, wie der Physikunterricht zur Medien- und Technologiekompetenz bei der Digitalisierung beitragen kann. Der Lehrkräftemangel und die Einstellung von Quer- und Seiteneinsteiger:innen erfordern zudem ein regelmäßiges Überdenken der Lehrkräfteaus- und -fortbildung. Schließlich muss auch erforscht werden, wie effektive Fortbildungen zu neuen Inhalten und Fähigkeiten aussehen können.

Susanne Heinicke, Heiko Krabbe und Thomas Wilhelm

DER ARBEITSMARKT FÜR PHYSIKER:INNEN

Physiker:innen sind gefragt wie nie: Mit ihren analytischen Fähigkeiten lösen sie komplexe Probleme und sind in vielen Branchen willkommen. Der Frauenanteil steigt, und die Berufszufriedenheit ist herausragend. Die DPG unterstützt bei Karrierefragen und zeigt: Physik eröffnet vielfältige Möglichkeiten.

Mindestens seit den 1970er-Jahren erfasst die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) den Arbeitsmarkt für Physiker:innen und informiert ihre Mitglieder darüber. Die Daten setzen sich im Wesentlichen aus zwei Quellen zusammen: aus dem **Mikrozensus**, das ist die repräsentative Ein-Prozent-Stichprobe des Statistischen Bundesamts über alle deutschen Haushalte, sowie von der **Bundesagentur für Arbeit (BA)**.

Erstere basieren auf einer umfangreichen Befragung und Modellbildung. Dadurch beleuchten sie einen um drei bis vier Jahre zurückliegenden Stand des Arbeitsmarkts – aktuell das Jahr 2021. Der Mikrozensus betrachtet alle Physiker:innen, die nach Selbstauskunft einen akademischen Physikabschluss besitzen, insgesamt 181 700 Personen.

Die Daten der Bundesagentur erscheinen monatlich bzw. jährlich und beziehen sich lediglich auf die Gruppe „Erwerbsberuf Physiker:in“ aus dem Mikrozensus. Auch wenn die Zahlen der BA somit nur einen Anteil von rund 19% der Gesamtzahl der Physiker:innen abdeckt, lassen sich daran aktuelle Trends ablesen.

Wer ist Physiker:in?

Bei den **statistischen Erhebungen** wird zwischen dem Ausbildungsberuf und dem Erwerbsberuf Physiker:in unterschieden. Unter ersterem werden im Mikrozensus alle Personen erfasst, die einen akademischen Abschluss in einem Studiengang mit der Hauptfachrichtung Physik erlangt haben. Absolvent:innen eines Lehramtsstudiums im Fach Physik werden im Mikrozensus nicht berücksichtigt, da dieser die Lehramtsabschlüsse nicht nach Fachrichtung erfasst. Absolvent:innen

der Physikalischen Technik an den Hochschulen für Angewandte Wissenschaft gehören zwar laut Definition des Mikrozensus nicht zu den Physiker:innen, sondern zu den Ingenieur:innen. Die Daten im Mikrozensus basieren aber auf Selbstauskunft, sodass Absolvent:innen, die sich als Physiker:innen „fühlen“, dies durchaus teils als ihren Ausbildungsberuf/Studienabschluss angeben.

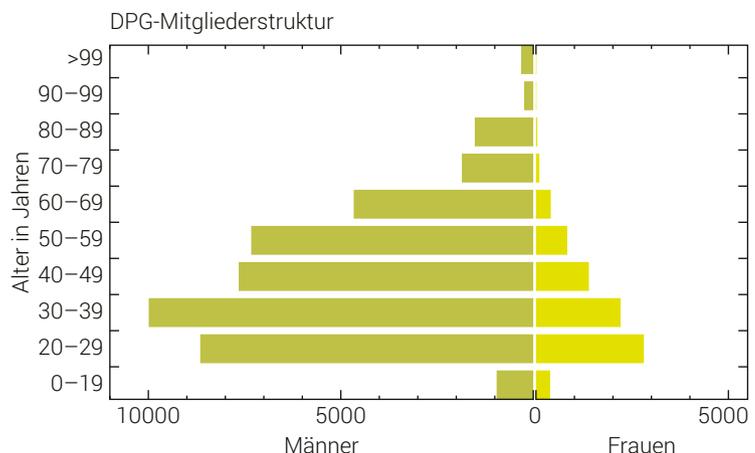
Während der Ausbildungsberuf am formalen Bildungsabschluss ansetzt, wird der Erwerbsberuf Physiker:in tätigkeitsbasiert erfasst. Dazu gehören Personen, die z. B. Gesetzmäßigkeiten in der Natur erkennen und in mathematische Modelle fassen. Verwendet wird die Klassifikation der Berufe der Bundesagentur für Arbeit (KldB 2010), bei der dem Erwerbsberuf Physiker:in Kennziffern zugeordnet werden. Alle Personen in Berufen, die diesen Kennziffern zugeordnet werden, zählen zum Erwerbsberuf Physiker:in. Personen mit abgeschlossenem Physikstudium, die im Management (wirtschaftswissenschaftlicher Erwerbsberuf) arbeiten, gehören danach nicht zum Erwerbsberuf Physiker:in – und obwohl es seltsam klingt, gehören auch Professor:innen nicht dazu: Sie sind den Lehr- und Forschungsberufen zugeordnet.

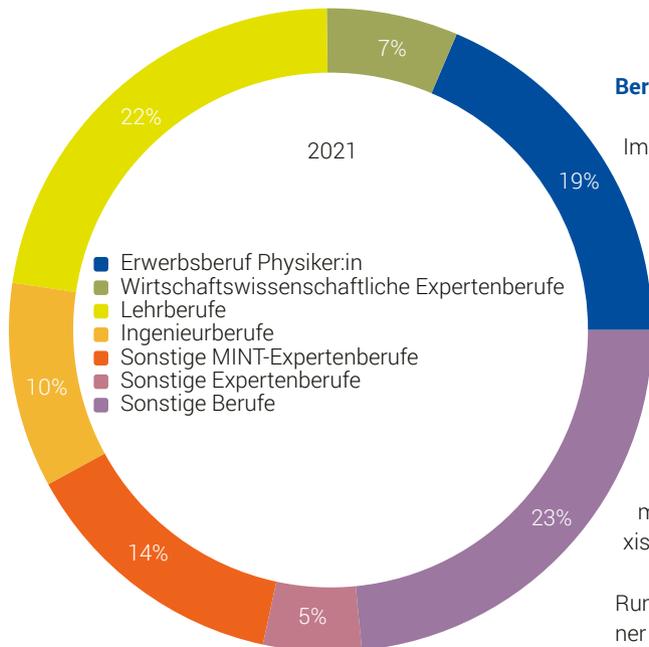
131 700 erwerbstätige Physiker:innen

In Deutschland gab es im Jahr 2021 insgesamt 181 700 Physiker:innen, davon 4200 Erwerbslose und 45 800 Nichterwerbspersonen, also Rentner:innen, Sorgende und andere Personen, die dem Arbeitsmarkt nicht zur Verfügung stehen. In den folgenden Auswertungen beschränken wir uns auf die Gruppe der erwerbstätigen Physiker:innen, die 131 700 Personen umfasst.

Altersstruktur der erwerbstätigen Physiker:innen aus dem Mikrozensus [1]

34 Jahre oder jünger	36 800 (27,9%)
34 bis 44 Jahre	31 700 (24,1%)
45 bis 54 Jahre	29 900 (22,7%)
55 Jahre oder älter	33 300 (25,3%)
gesamt	131 700 (100%)





Berufe

Im Gegensatz zu vielen anderen Berufsgruppen ist bei Physiker:innen der Anteil an Personen, die auch im Erwerbsberuf Physiker:in arbeiten, mit rund einem Fünftel recht gering. Dies liegt einerseits an der sehr engen Definition des Erwerbsberufs Physiker:in und andererseits daran, dass Physiker:innen in anderen Berufen gern gesehen sind (Pull-Faktor). Das Gegenteil wäre, wenn ausgebildete Personen im Zielberuf keine Stelle finden können und notgedrungen auf andere Berufe und Branchen ausweichen müssen (Push-Faktor). Grund für die Beliebtheit von Physiker:innen in anderen Berufen und Branchen ist, dass sie mathematisch-analytische Denkmuster auf hohem Niveau anwenden und auch in der Praxis komplexe technische Probleme lösen können.

Rund ein Drittel aller erwerbstätigen Physiker:innen sind in einer leitenden Position im unteren oder mittleren/höheren Management tätig. Damit sind etwas häufiger als der Durchschnitt aller Akademiker:innen in Führungs- oder Aufsichtspositionen beschäftigt.

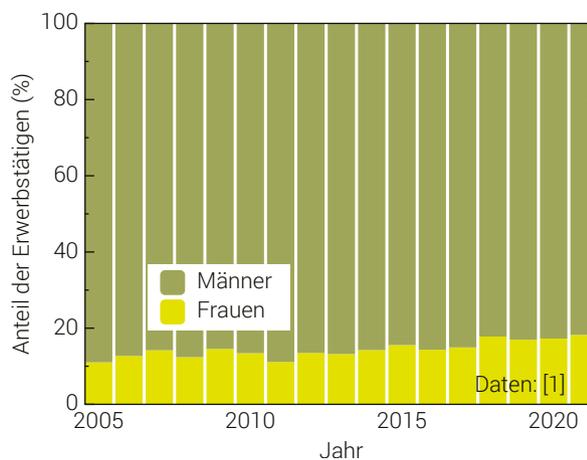
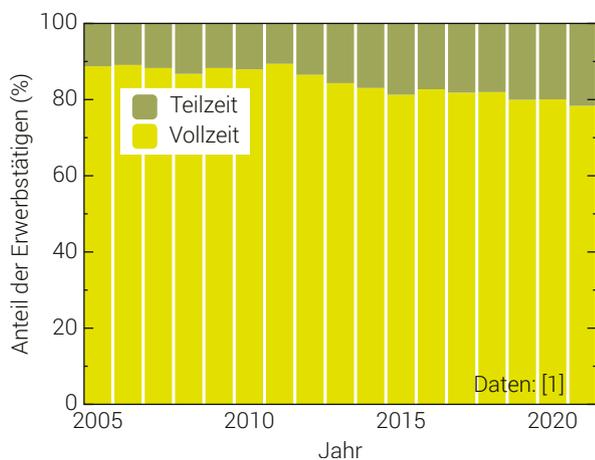
22% der Physiker:innen sind befristet beschäftigt. Dies inkludiert auch die große Zahl an Promovierenden. Interessant ist, wie sich der Anteil an Teilzeittätigkeit seit dem Jahr 2005 von 11% auf 22% verändert hat. Dies entspricht der anekdotischen Evidenz, dass mehr Menschen gerne in Teilzeit arbeiten; sei es, um an der Kindererziehung teilzuhaben, oder um mehr Ausgleich zwischen Arbeit und Freizeit zu erreichen. Da der Arbeitsmarkt für Physiker:innen äußerst gut ist, ist der Fall, dass eine Vollzeitbeschäftigung nicht zu bekommen ist, zu vernachlässigen.

Frauen in der Physik

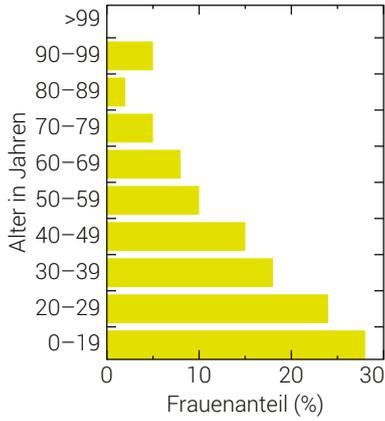
Der Frauenanteil in der Physik lag im Jahr 2021 bei 18% und damit höher als in den Jahren zuvor (11% in 2005). Hoffnungsvoll stimmt, dass in den jungen Alterskohorten der Frauenanteil zunimmt. Bei den Studienanfänger:innen liegt er derzeit, je nach Zählweise, bei 20 bis 30%.

42% der erwerbstätigen Physiker:innen haben promoviert, 58% besitzen einen (Fach-)Hochschulabschluss ohne Promotion. Die allermeisten davon erwarben ihren Abschluss im Inland (83%) und 17% im Ausland. Dies sagt nichts über die Nationalität der Personen aus: Jemand kann den Großteil seiner Bildungslaufbahn in Deutschland absolviert haben und zur Promotion ins Ausland gegangen sein. Umgekehrt können Personen mit inländischem Master oder Promotionsabschluss ihre vorherige Bildungslaufbahn in einem anderen Land begonnen haben.

Der Großteil der Physiker:innen (81%) arbeitet im Angestelltenverhältnis. 7% sind Beamte, 7% sind selbstständig. Die meisten kommen in Unternehmen mit mehr als 50 Mitarbeitenden unter. Der Anteil von Angestellten, die in kleineren Firmen arbeiten, hat sich im Vergleich zu den Vorjahren 2016-2019 von 28% auf 24% verringert, was möglicherweise auf die wirtschaftlichen Auswirkungen der Coronapandemie zurückzuführen ist: Selbständige sind teils in Festanstellungen gewechselt, und in Kleinunternehmen gab es eher Einstellungsstopps als in Konzernen.



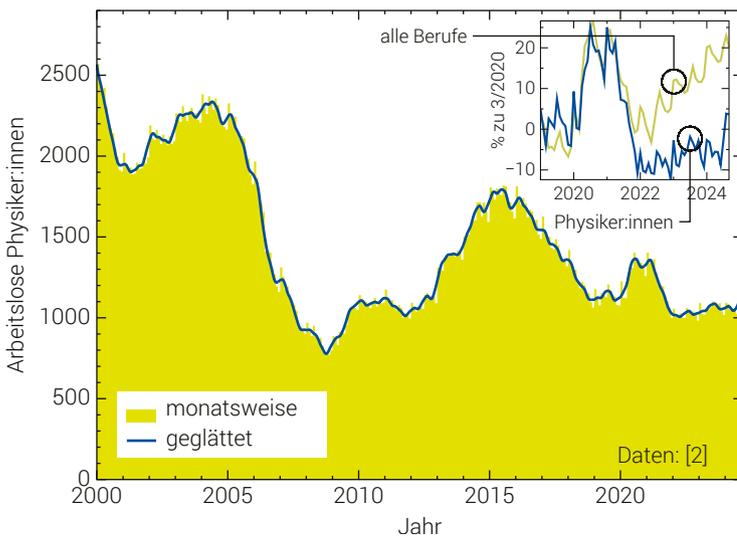
DPG-Mitgliederstruktur



Um einen Überblick über den Frauenanteil in verschiedenen Alterskohorten zu erhalten, bietet sich eine Analyse der Mitgliederstruktur der DPG an. Selbstverständlich sind nicht alle Physiker:innen Mitglied der DPG und es gibt dort auch Nicht-Physiker:innen. Trotzdem lassen sich Trends sicherlich auch aus dieser Untergruppe ablesen.

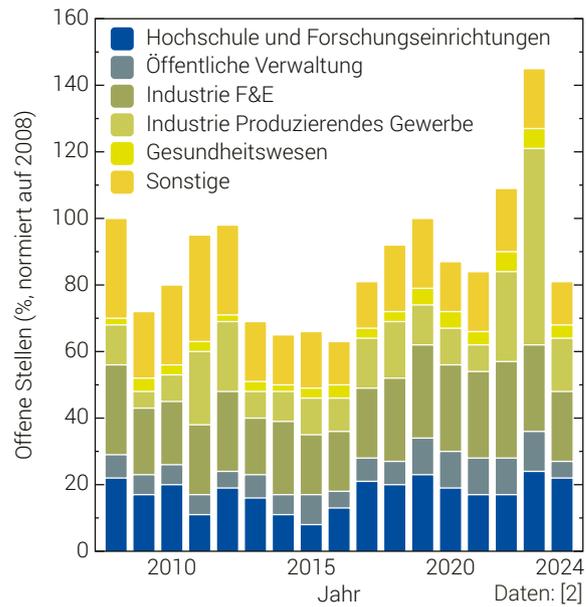
In der Alterskohorte bis 19 Jahre liegt der Frauenanteil in der DPG bei 28%. In dieser Altersgruppe befindet sich ein Großteil der Abiturpreisträger:innen. In der Gruppe 20 bis 29 Jahre, welche die Studienanfänger:innen beinhaltet, liegt er bei 24%. Insgesamt ist die Entwicklung in der DPG insofern erfreulich, dass der Frauenanteil unter den Mitgliedern von 3% im Jahr 1980 auf 16% im Jahr 2024 gestiegen ist.

Arbeitslose und offene Stellen



Die Zahlen der Bundesagentur für Arbeit zeigen: Die größte Zahl an arbeitslosen Physiker:innen (Erwerbsberuf Physiker:in) gab es im Jahr 2000. Lokale Maxima befinden sich um die Jahre 2004, 2010, 2015 und 2020. Das Maximum um das Jahr 2020 ist auf die Corona-Pandemie zurückzuführen. Im kleinen Bild ist zu sehen, dass die Zahl der Arbeitslosen zwischen März und April 2020 analog zum Gesamtarbeitsmarkt in die Höhe schnellte. Zwischen März und Dezember 2021 erholt sich die Arbeitslosenzahl aber ebenso schnell wieder und steht seitdem besser da als der Gesamtarbeitsmarkt.

Die Bundesagentur für Arbeit erfasst nur offene Stellen, die Arbeitgeber:innen für den „Erwerbsberuf Physiker:in“ melden. Der Stellenmarkt, der für Physiker:innen zur Verfügung steht, ist allerdings deutlich größer, da Physiker:innen, wie weiter oben berichtet, in weitaus mehr Berufszweigen tätig sind. Auch vergeben Unternehmen in der Physik weniger als 10% ihrer offenen Stellen unter Beteiligung der Bundesagentur für Arbeit. Dennoch weisen die dort registrierten offenen Stellen



auf Trends hin. In den Jahren 2022 und 2023 war ein großer Anstieg der offenen Stellen zu verzeichnen. Wir interpretieren dies als ein Indiz des zunehmenden Fachkräftemangels, weil sich insbesondere die Nachfrage im Sektor „Industrie und produzierendes Gewerbe“ verdoppelt hat. Im Jahr 2024 ist die Zahl wieder auf das Niveau der Vorjahre gesunken.

Wie unterstützt die DPG?

Physiker:innen arbeiten in äußerst diversen Berufen und Branchen. Dabei sind sie außerordentlich gefragt, der Arbeitslosenanteil ist gering und hat sich nach der Coronapandemie gut erholt.

Für Absolvent:innen ist die Tatsache, dass ihnen viele Türen offen stehen, Fluch und Segen zugleich. Wenn man viele Möglichkeiten hat, muss man sich gut informieren, was diese Möglichkeiten sind und wie sie zu den eigenen Interessen und Stärken passen. Aus diesem Grund haben viele Aktivitäten der DPG die Berufsinformation zum Thema. Um nur einige zu nennen: [Berufsvorbereitungsseminare](#), Podcasts, Social-Media-Aktionen wie „Physikerin der Woche“, das [Mentoring-Programm](#), das [Laborbesichtigungsprogramm](#) „Ein Tag vor Ort“. Das Ziel ist, die Mitglieder bei ihren Berufs- und Karriereentscheidungen zu unterstützen und ihnen dabei mit Rat und Tat zur Seite zu stehen. Die Aussichten sind gut: Die Berufszufriedenheit unter Physiker:innen ist besonders hoch – 87% würden das Fach noch einmal studieren. Das ist der höchste Wert unter allen Fachrichtungen!

Anja Metzelthin

[1] Berechnungen der DPG auf Basis des Mikrozensus. Bei der Interpretation der Daten ist zu beachten, dass speziell der Datensatz des Jahres 2020 durch fehlende Angaben während der Coronapandemie beeinflusst ist. In geringerem Maße betrifft diese Ungenauigkeit auch noch das Jahr 2021.
[2] Sonderauswertung der Bundesagentur für Arbeit für die DPG. Sie beinhaltet folgende Berufskennziffern: 41404, 41484, 41494, 41414 und 41403. Dies ist eine Untergruppe der in den Veröffentlichungen der Bundesagentur für Arbeit oft allgemein ausgewerteten Gruppe „414 – Physiker“

AW Verbunden durch Physik Deutsche Physikalische Gesellschaft DPG

Ein Tag vor Ort

Laborbesichtigungsprogramm für Physik-Studierende

Teilnahme kostenfrei

Weitere Info unter: www.eintagvorort.de

2 APRIL 2025	Besichtigung/Führung	Mi, 2.4.2025 10:00 - Mi, 2.4.2025 15:30	Köln
Laborbesichtigung - Leybold GmbH & INFICON GmbH			
Ein Tag vor Ort - Das Laborbesichtigungsprogramm der DPG			
2 APRIL 2025	Besichtigung/Führung	Mi, 2.4.2025 11:15 - Mi, 2.4.2025 15:45	Ditzingen
Laborbesichtigung - Trumpf GmbH + Co. KG			
Ein Tag vor Ort - Das Laborbesichtigungsprogramm der DPG			
3 APRIL 2025	Besichtigung/Führung	Do, 3.4.2025 10:30 - Do, 3.4.2025 16:30	Frankfurt
Laborbesichtigung - d-fine GmbH			
Ein Tag vor Ort - Das Laborbesichtigungsprogramm der DPG			
8 APRIL 2025	Besichtigung/Führung	Di, 8.4.2025 9:30 - Di, 8.4.2025 16:00	Remmingen
Laborbesichtigung - Robert Bosch GmbH			
Ein Tag vor Ort - Das Laborbesichtigungsprogramm der DPG			
9 APRIL 2025	Besichtigung/Führung	Mi, 9.4.2025 9:30 - Mi, 9.4.2025 16:30	Gütersloh
Laborbesichtigung - Miele & Cie. KG			
Ein Tag vor Ort - Das Laborbesichtigungsprogramm der DPG			
10 APRIL 2025	Besichtigung/Führung	Do, 10.4.2025 10:00 - Do, 10.4.2025 16:00	Gräfelfing
Laborbesichtigung - TOPTICA Photonics AG			
Ein Tag vor Ort - Das Laborbesichtigungsprogramm der DPG			

Deutsche Physikalische Gesellschaft DPG

DPG Mentoring Programm 2024

Jetzt anmelden unter: mentoring.dpg-physik.de
Anmeldezeitraum: 1. - 31. Mai 2024

Profittiere als Mentee von erfahrenen Physiker:innen im Berufsleben

Begleiten Sie als Mentor:in junge Physiker:innen beim Berufseinstieg



Gefördert durch WIRTSCHAFTS- UND ERBEHERAUSGABUNG DPG Deutsche Physikalische Gesellschaft DPG

Leading for Tomorrow

Physikerinnen und Physiker in Führungspositionen?

Trotz oder wegen Physikstudiums?

Wirtschaft oder Wissenschaftsmanagement?

Ist das überhaupt was für mich?

Mehrtägige Intensivworkshops und Learning Expedition
Bewerbung möglich vom 1. bis 31. März 2024

Mehr Informationen und die Möglichkeit zur Bewerbung: leading-for-tomorrow.dpg-physik.de



Foto Mitte: DPG/Ohse, unten: DPG/Metzlenthin

ZEHN KARRIEREN MIT PHYSIK

Physiker:innen stehen beruflich viele Türen offen. Diese zehn Physiker:innen berichten beispielhaft über ihre Karrierewege und verdeutlichen damit, wie vielfältig die Berufsoptionen sind.

Julian Schmehr, CEO von X-Spectrum: „Meine wissenschaftliche Karriere begann in Schottland mit dem Master und der Promotion in Physik. Als Postdoc in Kalifornien konnte ich anschließend nicht nur in einem tollen wissenschaftlichen Umfeld arbeiten, sondern auch Delfinen direkt aus dem Büro beim Schwimmen zusehen. Trotzdem traf ich die schwierige Entscheidung, die akademische Laufbahn zu verlassen und schloss mich in Hamburg dem Start-up-Unternehmen X-Spectrum an. Das war ein Glücksgriff: Durch unsere Rolle als Entwickler von Röntgenkameras für die Forschung habe ich engen Kontakt zur Wissenschaft, aber bewege mich nun in einem wirtschaftlichen Umfeld.“

Carolyn Schlein, Produktmanagerin bei PHYWE: „Während meines Physikstudiums an der Universität Göttingen arbeitete ich als Werkstudentin bei PHYWE, einem Hersteller von Lehr- und Lernmitteln für die naturwissenschaftliche Bildung. Dort bekam ich das Angebot, nach meinem Bachelorabschluss als Produktmanagerin zu arbeiten, und nahm es an. Die Möglichkeit, einen bedeutenden Beitrag zur Bildung zu leisten, erfüllte mich mit Freude und Motivation. Schließlich wurde ich zur Leiterin des Produktmanagements befördert, was mir bestätigte, die richtige Entscheidung getroffen zu haben. Ich freue mich darauf, weiterhin innovative Projekte zu leiten und die Bildung aktiv mitzugestalten. Es lohnt sich, unkonventionelle Wege zu gehen und Chancen zu ergreifen.“



Simon Müller, Direktor Deutschland bei Agora Energiewende: „Zu Beginn meines Studiums interessierte mich vor allem, wie der menschliche Geist und das Gehirn funktionieren. Im Hauptstudium konzentrierte ich mich dann auf die theoretische Halbleiterphysik. Nach einem Vortrag des Klimawissenschaftlers Stefan Rahmstorf (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) erschloss ich den Energie- und Klimabereich als optimalen Weg, mein naturwissenschaftliches Studium gesellschaftlich nutzbar zu machen. Über das Mercator-Kolleg für internationale Aufgaben kam ich an die Internationale Energieagentur, wo ich fast neun Jahre arbeitete. Mein physikalisch-technisches Verständnis nutze ich in meinem Beruf jeden Tag. Gleichzeitig macht mit der Kontakt mit Menschen Spaß. Nur im Dialog können wir gesellschaftliche Veränderungen erfolgreich umsetzen.“

Andreas Reiserer, Professor an der TU München: „Nach meiner Promotion am MPI für Quantenoptik an der TU München wollte ich aufgrund der langen Unsicherheit, die mit wissenschaftlichen Karrieren in Deutschland verbunden ist, zunächst in die Wirtschaft wechseln. Der Otto-Hahn-Award der Max-Planck-Gesellschaft hat mir jedoch eine Alternative aufgezeigt – keine Sicherheit, aber zumindest eine Idee, wie es weitergehen könnte. Nach einem zweijährigen Postdoc in den Niederlanden bin ich daher als Leiter einer Nachwuchsforschungsgruppe an das MPI für Quantenoptik zurückgekehrt und wurde im Anschluss als Professor an die TU München berufen.“

Anna Chrobry, Projektmanagerin: „Während ich zu Beginn meines Studiums an der Universität Krakau vor allem die Kernphysik im Auge hatte, wuchs im Laufe der Zeit meine Faszination für die Erdatmosphäre und das Klima. Das führte dazu, dass ich in Bremen in Umweltphysik promovierte. Da Bremen auch ein Zentrum der Luft- und Raumfahrtindustrie ist, erfüllte sich im Anschluss daran ein Kindheitstraum: Als Raketwissenschaftlerin bei Airbus trug ich zu thermischen Entwicklungen für Raumfahrzeuge des Artemis-Mondlandungsprogramms bei. Der Hansestadt bin ich treu geblieben, aber das Berufsfeld habe ich mittlerweile gewechselt. Ich berate Firmen in den Bereichen Projektmanagement sowie Unternehmensentwicklung und -strategie. Dass ich als Forscherin gelernt habe, Prozesse zu analysieren, Probleme zu lösen und mit Menschen zusammenzuarbeiten, kommt mir dabei sehr zugute.“

Jacob Beutemps, Content-Creator. „Während meines Studiums der Physik und Sozialwissenschaften auf Lehramt entdeckte ich meine Leidenschaft für die Wissensvermittlung auf eine ganz neue Art: Ich begann, zusammen mit der ehemaligen Produktionsfirma von Günther Jauch einen YouTube-Kanal zu produzieren. Nicht nur, dass ich so einen spannenden Einblick in die Medienwelt bekam, es war für mich auch eine neue Art, mich mit der Physik zu befassen, da ich sie nun für ein breites Publikum auf YouTube zugänglich machen musste. Dazu begann ich meine Promotion zum Lernen aus Videos, die ich im November 2024 erfolgreich abschließen konnte. Die Kombination aus Praxis und Forschung eröffnete mir wertvolle Einblicke, die ich direkt in der Praxis anwenden konnte und zusätzlich an andere Creators von Wissensvideos weitergeben konnte. Ich bin überzeugt, dass die Zukunft des Lernens spannend und vielversprechend ist, und vor allem durch KI noch einmal viel Bewegung dort reinkommen wird. Deshalb will ich auch nach der Promotion weiter in dem Bereich forschen – natürlich neben meinem YouTube-Kanal.“

Martin Schleske, Geigenbaumeister. „Mit sieben Jahren fing ich an, Geige zu lernen, und begann dann mit 17 Jahren in Mittenwald meine Geigenbaulehre. Damals schon wusste ich: Entweder möchte ich einmal bessere Geigen bauen als Antonio Stradivari oder wissen, warum das nicht geht. Durch das Physikstudium lernte ich dann großartige akustische Werkzeuge kennen wie die Modalanalyse, die Spektralanalyse, die Psychoakustik oder die Holzforschung. Die Akustikforschung hilft mir, dem Geheimnis des guten Klangs auf den Grund zu gehen. Heute spielen bedeutende Musiker und Musikerinnen weltweit meine Instrumente anstelle ihrer altitalienischen Meisterwerke. Es ist meine Lebensberufung, an der Werkbank einen Klang zu erschaffen, der die Kraft hat, die Seele zu berühren – mit einer aufbauenden, erschütternden, tröstenden und heilsamen Schönheit.“

Safia Ouazi, Lehrerin am Robert-Havemann-Gymnasium Berlin: „Mich fasziniert, wie neue Erkenntnisse über das Verhalten der Materie auf einer unendlich kleinen oder unendlich großen Skala entstehen. Das unendlich Kleine habe ich während meiner zehnjährigen Karriere als Forscherin in drei verschiedenen Ländern untersucht. Dabei habe ich einzelne Atome mit einem Rastertunnelmikroskop manipuliert. Aus familiären Gründen entschied ich mich aber, die akademische Laufbahn zugunsten einer Tätigkeit als Lehrkraft zu verlassen. Als Lehrerin für Physik und Mathematik widme ich mich heute dem unendlich Großen und führe unter anderem astronomische Beobachtungen durch. Aktuell setze ich mich dafür ein, dass aus einer ehemaligen Erdfunkstelle eine Sternwarte für Schulen wird – erste Radiosignale aus unserer Galaxie haben wir dort bereits empfangen. Mit solchen und weiteren Projekten, wie der Teilnahme an einer NASA/DLR-Mission, einer MoonBounce-Veranstaltung oder einem Funkkontakt mit der Antarktis, möchte ich den Nachwuchs für die Naturwissenschaften begeistern.“



David Grodzki, Teamleiter bei Siemens Healthineers: „Vor meinem Physikstudium an der LMU München war ich fest überzeugt, nach dem Abschluss sofort zu einer Unternehmensberatung zu gehen. Doch die Physik, das Austüfteln neuer Ansätze und noch zu entdeckende Anwendungen machten mir einfach zu viel Spaß. Durch Praktika bei Prof. Stefan Hell (Göttingen) habe ich früh erfahren, dass man mit einem starken Willen und eigener Überzeugung Lösungen für scheinbar unlösbare Probleme finden kann. Dies und die analytische Denkweise, die man als Forscher erlernt, begleiten mich seitdem. Heute leite ich bei Siemens Healthineers ein Team, das sich mit neuen Methoden im Bereich der Magnetresonanztomografie beschäftigt, von denen Millionen von Patient:innen weltweit profitieren können.“

Stefanie Walch-Gassner, Professorin an der Universität zu Köln: „Die Astrophysik fasziniert mich seit einem Praktikum am Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) in Garching und war auch Thema meiner Diplom- und meiner Doktorarbeit an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München. Ich fragte mich, wie die Geburtsorte neuer Planetensysteme – kalte Scheiben aus Gas und Staub um junge Sterne – entstehen. Dieser Frage ging ich bei einem Forschungsaufenthalt in Wales und als Postdoktorandin am MPA weiter nach. Das Zusammenspiel der physikalischen Prozesse, welche die Sternentstehung ermöglichen, prägt auch meine Forschung an der Universität zu Köln, wo ich seit 2013 einen Lehrstuhl für theoretische Astrophysik inne habe und einen Sonderforschungsbereich leite. Als erste Präsidentin der Astronomischen Gesellschaft lege ich viel Wert auf die Zusammenarbeit innerhalb der astronomischen Gemeinschaft, die Förderung des Nachwuchses und die Kommunikation unserer Wissenschaft.“

PHYSIK IN KULTUR UND GESCHICHTE

GRUNDLAGENFORSCHUNG ALS KULTURLEISTUNG

1959 prägte der britische Wissenschaftler und Schriftsteller C. P. Snow den Begriff von den „Zwei Kulturen“: Er hat damit die große Stille beschrieben, den großen Bruch, das gegenseitige Unverständnis zwischen den Bereichen Kunst, Literatur und Geisteswissenschaften auf der einen Seite und Technik und Naturwissenschaften auf der anderen Seite. Damals wie heute kokettieren so manche Akteur:innen mit ihrer mehr oder weniger vollkommenen Unkenntnis von Technik, Physik oder gar Mathematik.

„Die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung ist eine der größten und erfolgreichsten Kulturleistungen der Menschheit.“

Diese scheinbare Ignoranz überrascht angesichts der Bedeutung naturwissenschaftlicher und technischer Inhalte für den Fortbestand unserer Art zu leben, für die

Stabilität unserer Gesellschaft und sogar die Existenz von Einzelnen beim Thema Gesundheit. Für eine Gesellschaft, die von technischen Entwicklungen geprägt ist und von diesen lebt, spielen die Kenntnis von Risiken und Chancen naturwissenschaftlicher Forschungsergebnisse in ihrer technischen Ausformung eine kardinale Schlüsselrolle. Die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung ist eine der größten und erfolgreichsten Kulturleistungen der Menschheit. Sie hat unsere finanzielle, ideelle und kommunikative Unterstützung in möglichst breiter Front verdient.

Eine Brücke über den Abgrund

Natürlich gehört Grundlagenforschung zum kulturellen Grundbestand unserer Gesellschaftsform, die sich durch die Verwendung von technischen Konstrukten und Artefakten aller Art auszeichnet. Weder die moderne Wirtschaftsform, noch ein demokratisch verfasster Rechtsstaat mit jeweils Millionen Akteur:innen wäre möglich ohne technisch hergestellte Prozess- und Netzstrukturen, die die Mobilität, die Kommunikation und die Versorgung mit allen möglichen Gütern kontinuierlich über Raum und Zeit, rund um die Uhr gewährleisten. Und dies gilt längst nicht mehr nur für die industrialisierten Länder, sondern es gilt für den gesamten Globus mit seinen Vernetzungen in Rohstoffen, Verkehr, Waren, Informationen und Menschen. Nicht umsonst sprechen wir längst vom Anthropozän (Seite 118), dem Erdzeitalter, das durch

den Menschen geprägt ist. In seiner Erforschung wird die Natur als Gegenstand und Kulisse ebenso betrachtet wie ihre Wechselwirkung mit der Sphäre des Menschen in all seinen Ausformungen. Hier entsteht also endlich eine Brücke über den Abgrund zwischen den beiden Welten Snows. Endlich können Geisteswissenschaften und Naturwissenschaften miteinander reden, wenn sie gemeinsam daran forschen, was der Mensch mit der Natur macht, aber auch wie die Natur auf diese Veränderungen reagiert. Endlich werden Kultur und Natur nicht nur gegenübergestellt, sondern zusammen gedacht und zusammen erforscht. Die Grundlage für diesen Dialog ist die Inventur der Natur, also die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung.

Grundlagen des Weltverständnisses

Den Grundlagen der physikalischen Welt in Kosmos und Materie sowie in Raum und Zeit kommen dabei besondere Bedeutung zu. Grundlagenforschung in der Teilchenphysik einerseits und in der Astrophysik und Kosmologie andererseits sichert unser Bild und unsere Kenntnisse von Natur nach oben (Kosmos) und unten (elementare Bausteine der Materie) ab. Diese Disziplinen liefern über durch [Experimente und Beobachtungen](#) bestätigte [Theorien](#) das immer stabilere Fundament für jede Art von technischer Anwendung innerhalb der irdischen Wirklichkeit.

Mithilfe einer sehr strengen [quantitativen Analyse](#) der Bausteine und Wechselwirkungen der Materie untereinander sowie mit elektromagnetischer Strahlung aller Art, setzen wir uns mit der Natur auseinander. Dies bildet das zentrale Gerüst des modernen Lebens. Ohne die möglichst genaue Kenntnis des Aufbaus der Materie wäre weder moderne Medikamentenforschung noch die Erzeugung von lichtempfindlichen Oberflächen möglich, die wir für die technische Nutzung des Sonnenlichts brauchen. Die enorme Präzision der Ergebnisse und daraus abgeleiteten Erkenntnisse ergibt sich durch das Rütteln an den Grenzen des Möglichen, also durch die experimentelle Annäherung an möglichst extreme Zustände der Materie. Grundlagenforschung überdehnt die Anwendungs- und Wirklichkeitsbereiche in Dimensionen, die auf der Erde praktisch nie existieren. Dann zeigt sich die Zuverlässigkeit der zunächst auf Basis qualifizierter Vermutungen

erfundenen und dann im Experiment bestätigten mathematischen Zusammenhänge, die wir [Naturgesetze](#) nennen.

Folgendes Beispiel verdeutlicht die außerordentlich hohe Kunst des Messens, Wiegens und Zählens in der Synthese der Physik des Allergrößten mit der Physik des Allerkleinsten. Dabei geht es nur um reine Erkenntnis, nicht um Anwendungen. Es geht um die [Entdeckung der Gravitationswellen](#), sich ausbreitende Schwingungen der Raumzeit. Die Raumzeit ist die Kombination von Raum und Zeit, in der sich, zumindest mathematisch, Wirkungen ausbreiten können. Die Wirkungen würden sich als Gravitationswellen manifestieren, die Ursachen wären theoretisch große Massenveränderungen, etwa [Schwarze Löcher](#), die miteinander verschmelzen können und dabei die Raumzeit in Schwingungen versetzen, so wie es Einsteins allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt.

Schwarze Löcher sind Objekte mit so kompakter Masse, dass von ihnen keine elektromagnetische Strahlung entweicht. Die Astrophysik konnte zeigen, dass solche Objekte am Ende des Lebens von Sternen entstehen, die sehr viel schwerer als die Sonne sind.

Am 14. September 2015 registrierten zwei kilometerlange Laser-Interferometer-Detektoren (LIGO) an unterschiedlichen Standorten in den USA nahezu zeitgleich,

dass die Länge ihrer Messstrecke sich für 0,2 Sekunden verändert hatte. Die Zeitverschiebung beider Messungen von sieben Millisekunden entsprach exakt der Zeit, die Licht (und Schwerkraft) vom einen zum anderen Detektor (2100 Kilometer Abstand) benötigen würde. Das Signal, das die beiden Detektoren erfasst hatten, wurde von Gravitationswellen verursacht, die durch die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher entstanden waren. Wie sich herausstellte, war die Quelle und damit die Ursache der Wellen rund 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernt – also rund 10^{25} Meter. Die Längenänderung, die LIGO registrierte, war ein Tausendstel Protonenradius, also 10^{-18} Meter. Wir können in der Physik somit über 43 Größenordnungen in der Länge absolut präzise Messungen durchführen. Das Besondere an diesem Beispiel ist außerdem das Wechselspiel der Quantenmechanik in ihrer technischen Aus-

formung, dem Laser, und der Gravitation in ihrer Wellenstruktur. Beide, Quantenmechanik und Gravitation, sind nicht abhängig voneinander. Die Schwerkraft hängt nur von den Massen und ihrem Abstand ab, der Laser vom Material, das strahlt. Somit hat man im „Gerichtshof der Naturgesetze“ – so hat der Philosoph Immanuel Kant die Natur bezeichnet – zwei unabhängige Gutachter, die zum gleichen Ergebnis kommen.

Die Bedingungen unserer Existenz

Aber die Grundlagenforschung liefert uns noch viel allgemeinere Erkenntnisse von den Grenzen des physikalisch überhaupt Möglichen. Dazu gehören insbesondere die berühmten Sätze der Thermodynamik, die bereits Mitte des 19. Jahrhunderts formuliert und seitdem mit besonders ausgeklügelten experimentellen Verfahren immer wieder bestätigt wurden: Erstens kann Energie weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur verwandelt werden. Und zweitens ist jeder Prozess mit der Entwertung von Energie verbunden, weil unvermeidlich Wärmeverluste auftreten. Das alles sind fundamentale Aussagen über jeden Prozess im Universum.

Grundlagenforschung liefert somit als Kulturleistung die Vorbedingungen für das, was wir tun können – aber auch für das, was wir tun sollen. Das Sollen besteht aus dem [Erhalt und der Verbesserung der Lebensbedingungen](#) aller Geschöpfe auf unserem Planeten. Er ist die einzige Heimstatt, die wir Menschen haben. Das ist angesichts der Entfernungen im Universum zunächst einmal eine quantitative und damit wertfreie Aussage, die allerdings offensichtlich normative Konsequenzen hat, wenn man das Überleben der Menschheit als erstrebenswert erachtet. Kultur ist das, was der Mensch hervorbringt, Natur ist das, was von allein passiert. Die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung ist eine der größten und erfolgreichsten Kulturleistungen der Menschheit. Wir sollten sie unbedingt nutzen.

Harald Lesch

Künstlerische Darstellung der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher, die zu Gravitationswellen führt.

WAS BESCHREIBT DIE PHYSIK?

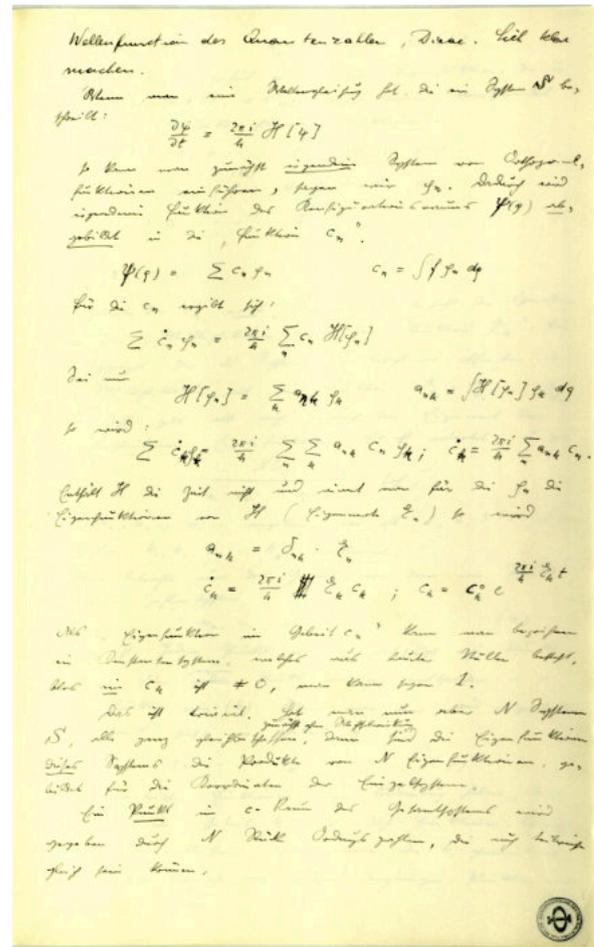
Die Philosophie der Physik beschäftigt sich mit der Interpretation der Theorien, Ergebnisse und Methoden der Physik. Fortschritte auf dem Gebiet der Physik sind eine endlose Quelle neuer Aufgabenstellungen für dieses Arbeitsgebiet.

Mit der Geburt der vermeintlich kontraintuitiven speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie sowie der Quantenmechanik im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts rückten interpretative Fragen ins Zentrum der Physik, und im Laufe des Jahrhunderts formte sich die Philosophie der Physik als eigenes Arbeitsgebiet heraus. Doch schon weit vorher zeigt sich, dass interpretative Fragen ein integraler Bestandteil der physikalischen Arbeit und der Auseinandersetzung mit den Ergebnissen der Physik sind. So diskutierten bereits Isaac Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz die Frage, was aus der Newtonschen Physik über das Wesen von Raum und Zeit folgt, wobei sie Fragestellungen und Begriffe entwickelten, die dann später auf die Interpretation der allgemeinen Relativitätstheorie angewendet wurden. Ernst Mach wiederum setzte sich mit dieser Debatte in seiner „historisch-kritischen“ Geschichte der klassischen Mechanik im Detail auseinander, und seine Darstellung hat wiederum Albert Einstein in der Entwicklung der allgemeinen Relativitätstheorie beeinflusst.

Heute sind „Philosophen der Physik“ zum großen Teil Wissenschaftler:innen, die sich aufbauend auf einer soliden Ausbildung in Physik häufig erst im Rahmen ihrer Doktorarbeit Interpretationsfragen explizit zugewandt haben und nunmehr an einem Institut für Philosophie arbeiten. Während die meisten Physiker:innen während ihres Studiums keine Philosophiekurse belegen, war das in der Generation von Albert Einstein, Niels Bohr und Max von Laue, sowie auch etwas später bei Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli, noch anders: Philosophie gehörte damals zum Pflichtprogramm eines Physikstudiums. Und so wurden auch viele der großen interpretativen Debatten um Relativitätstheorie und Quantenmechanik von Physiker:innen und Philosoph:innen gemeinsam angestoßen.

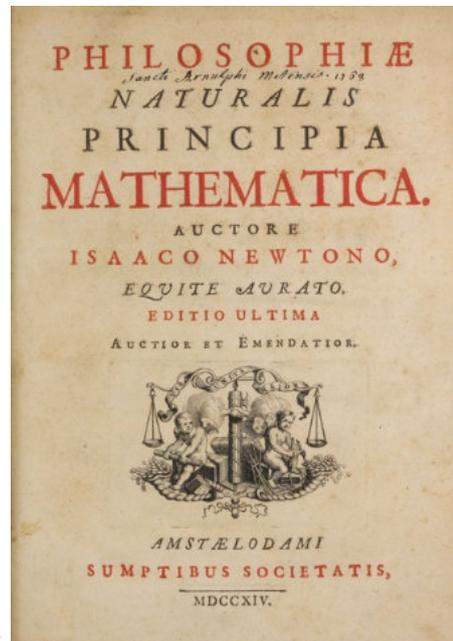
Schrödingers Katze

Ein besonders zentrales Beispiel für ein solches interpretatives Problem ist das Messproblem in der Quantenmechanik, das Physiker:innen und Philosoph:innen auch heute noch in Atem hält. Es wird das erste Mal in einem Aufsatz von Erwin Schrödinger im Jahr 1935, also zehn Jahre nach der Geburt der Quantenmechanik, auf den Punkt gebracht und dort auch anhand des inzwischen unter dem Namen „Schrödingers Katze“ berühmt gewordenen Gedankenexperiments erläu-



Eine Seite aus Erwin Schrödingers Notizbuch mit Ausführungen über die Wellengleichung, die später seinen Namen bekommen sollte.

tert. Im Messproblem der Quantenmechanik geht es um die Frage, welche Bedeutung die Wellenfunktion hat, mit der sich Quantensysteme beschreiben lassen. Max Born hatte 1926 vorgeschlagen, die Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsdichte zu interpretieren, die bestimmt, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich das System in einem bestimmten Zustand befindet. Das Problem entsteht nun dadurch, dass die Schrödingergleichung, die die zeitliche Fortentwicklung



eines Quantensystems beschreibt, eine Wellengleichung ist.

Das heißt, wenn Welle 1 eine Lösung der Gleichung ist und auch Welle 2 eine Lösung der Gleichung ist, dann ist auch die Überlagerung der beiden Wellen, also (Welle 1 + Welle 2), eine Lösung. Für Wasserwellen ist uns das sehr vertraut; wenn aber die quantenmechanische Wellenfunktion wirklich eine Zustandswelle ist, so folgt hieraus, dass wenn Zustand 1 eine Möglichkeit ist, und auch Zustand 2 eine Möglichkeit ist, dann auch die Überlagerung aus diesen beiden Zuständen eine physikalische Möglichkeit sein muss.

In seinem Gedankenexperiment zeigte Schrödinger auf, welche Konsequenzen hiermit die Kopplung eines durch eine Wellenfunktion beschriebenen quantenmechanischen Systems (wie einer radioaktiven Substanz) und eines makroskopischen Systems (wie einer Katze) hat. Er beschrieb eine Situation, in der die Katze in einer Kiste eingeschlossen ist. Darin befinden sich außerdem eine radioaktive Substanz sowie ein Mechanismus, der im Falle eines Zerfallsereignisses ein Gift freisetzt, das die Katze tötet. Wann so ein Zerfallsereignis eines radioaktiven Elements stattfindet, lässt sich mit der Quantenmechanik in der Bornschen Interpretation nicht vorhersagen – man kann lediglich die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der man dies erwartet, und diese ergibt sich laut Born aus dem Quadrat der Wellenfunktion.

Solange die Kiste geschlossen ist – also niemand die Situation beobachtet –, ist das Schicksal der Katze an den quantenmechanischen Zerfallsprozess gebunden. Dieser lässt sich beschreiben durch die Überlagerung von „Zerfall hat stattgefunden“ und „Zerfall hat nicht stattgefunden“. Dementsprechend lautet der daran angeschlossene Zustand der Katze „tot“ und „nicht tot“.

Das Messproblem nun besteht in der Feststellung, dass wir eine solche Überlagerung von Zuständen nie zu beobachten

Das Titelblatt von Isaac Newtons Hauptwerk, der „Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie“. Erst im 19. Jahrhundert wurde der Begriff „Naturphilosophie“ durch den Begriff „Physik“ ersetzt (wenn auch nicht in Neuauflagen von Newtons Principia).

scheinen, sondern immer nur einen „reinen“ Zustand, also etwa eine lebendige oder eine tote Katze. Wie aber kann das sein, wenn die Quantenmechanik und Borns Interpretation der Wellenfunktion stimmen?

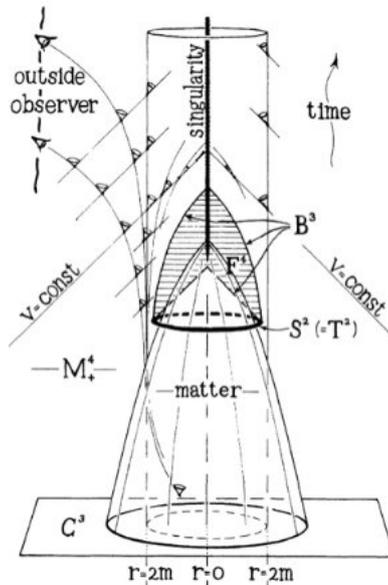
Diese Frage erzeugt also nun die unterschiedlichen Interpretationen der Quantenmechanik, die jeweils unterschiedliche Versuche darstellen, das Messproblem zu lösen. Die immer noch prominentesten Interpretationen sind (a) die unterschiedlichen Varianten der auf Bohr und Heisenberg zurückgehenden Kopenhagener Deutung; (b) sogenannte dynamische Kollapstheorien; (c) die Everett- oder

Viele-Welteninterpretation sowie (d) die Bohmsche Interpretation der Quantenmechanik.

Was sind Raum und Zeit?

Andere Interpretationsfragen in der Physik sind bedeutend älter als die Quantenmechanik. Sie betreffen zum Beispiel den Status von Raum und Zeit. In seiner *Principia* hatte Isaac Newton 1686 den Begriff des absoluten Raumes und der absoluten Zeit eingeführt, um darauf aufbauend seine Mechanik und im Besonderen die Unterscheidung zwischen absoluter und scheinbarer Bewegung zu begründen. Laut Newton waren damit Raum und Zeit für sich existierende Entitäten, und der Raum im Besonderen war für die Materie eine Art Container. Gottfried Wilhelm Leibniz hingegen argumentierte, dass der Raum als solcher nur eine menschliche Abstraktion ist, und dass es in der Natur nur Relationen, also Beziehungen, zwischen materiellen Körpern gibt, inklusive der Relation, dass sich zwischen den Körpern ein bestimmter Abstand befindet. Damit war laut Newton ein Raum auch ohne Materie möglich, laut Leibniz aber nicht. Newtons Position wurde bald als Substanzialismus, die von Leibniz als Relationalismus bezeichnet.

Albert Einstein war bei der Entwicklung seiner allgemeinen Relativitätstheorie (ART), die sowohl eine neue Mechanik als



Der Kollaps eines Sterns zu einem Schwarzen Loch und die dabei entstehende Singularität, wie von Roger Penrose erstmals 1965 dargestellt.

auch eine neue Gravitationstheorie liefern sollte, stark durch die Ideen von Leibniz motiviert, über die er aus den Schriften von Ernst Mach lernte. Aber erst in den 1960er-Jahren wurde die Interpretation der ART vor dem Hintergrund der klassischen Debatte zwischen Newton und Leibniz gefasst. Die Frage war: Ist eine substanzialistische oder eine relationalistische Auffassung der in der Relativitätstheorie vereinheitlichten Raumzeit die überzeugendere Interpretation der Theorie? Sollte Einsteins Theorie so interpretiert werden, dass der Raumzeit für sich Existenz zugeschrieben wird und Materie nunmehr (über die Einsteinschen Feldgleichungen) in Wechselwirkung mit Materie steht, oder könnte man in der Tradition von Leibniz Materie weiterhin für primär halten? Die Debatte ist immer noch nicht abgeschlossen.

Was ist ein Schwarzes Loch?

Während die Diskussionen um das Messproblem in der Quantenmechanik sowie die Interpretation der ART bereits Jahrzehnte andauern, hat die philosophische Debatte zur Physik von Schwarzen Löchern gerade erst begonnen. In ihrem Kern handelt es sich um eine der typischsten Arten von Fragen in der Philosophie, nämlich „Was ist ...?“. „Was ist ein Schwarzes Loch?“ hat dieselbe Struktur wie „Was ist Wissen?“, „Was ist Wahrheit?“ oder auch „Was ist ein gutes Leben?“.

Mit solchen Fragen beschäftigt sich die Philosophie bereits seit dem Altertum. Um sie zu beantworten, sucht sie typischerweise nach Kriterien, die auf alle Fälle erfüllt sein müssen. Solch ein notwendiges Kriterium ist aber nicht immer

hinreichend, um das Gesuchte zu definieren. Es hat in der Philosophie großes Aufsehen erregt, dass Schwarze Löcher sich bisher einer solchen Charakterisierung über notwendige und hinreichende Bedingungen zu entziehen scheinen oder dass zumindest unterschiedliche Teilbereiche der Physik unterschiedliche Arbeitsdefinitionen nutzen. Eine der gegenwärtig dynamischsten Bereiche der Philosophie der Physik ist zu untersuchen, wie genau diese unterschiedlichen Arbeitsdefinitionen miteinander zusammenhängen und sich aufeinander beziehen.

Ein aktuelles Projekt der Lichtenberg-Gruppe für Geschichte und Philosophie der Physik an der Universität Bonn untersucht die historische Genese des Begriffs „Schwarzes Loch“ in den 1950er- bis 1970er-Jahren gemeinsam mit einer Reihe der in dieser Zeit neu entwickelten mathematischen Methoden und Begriffe, wie etwa der eines Ereignishorizonts. Solchen neu entwickelten Begriffen stehen neu gefasste, ältere Begriffe zur Seite, wie etwa der einer Raumzeit-Singularität, der in den 1960er- und 1970er-Jahren im Vergleich zu seiner Bedeutung etwa bei Einstein ganz neu angegangen wird. Dabei ist das Ziel ein philosophisches bzw. konzeptuelles, nämlich das Bestreben zu verstehen, was Schwarze Löcher eigentlich sind. Die Herangehensweise hingegen ist eine historische und mathematische und stützt sich auf Manuskripte, Briefwechsel und Berechnungen der Physiker:innen, die auf diesem Gebiet Bahnbrechendes geleistet haben.

Dennis Lehmkuhl

PHYSIKGESCHICHTE



Physik hat Geschichte und ist bis heute durch sie geprägt. Die Akteure und Akteurinnen unterlagen genauso einem historischen Wandel wie ihre Methoden, Arbeitsmöglichkeiten und Ziele. Dies in seiner komplexen Dynamik zu betrachten, trägt zum Verständnis von Physik bei.

WER? Menschen haben sich seit jeher über physikalische Phänomene gewundert. Wer allerdings überhaupt Physik betreiben konnte, wer seine Gedanken, Beobachtungen und vielleicht auch Versuche anderen mitteilen oder diese schriftlich verewigen durfte, das wurde durch gesellschaftliche Umstände festgelegt. Es gab klar umrissene Rollenmodelle: der antike Philosoph, der Mönch im Mittelalter, das Akademiemitglied seit dem 17. Jahrhundert. Im 19. Jahrhundert schließlich gab es weltweit etwa hundert Physikprofessoren. Im 20. Jahrhundert wuchs die Zahl der Physiker stark, es stießen immer mehr Physikerinnen hinzu. Bisweilen wurde das Studium der Physik für bestimmte Gruppen gezielt politisch gefördert – wie etwa in der DDR für Kinder aus Arbeiterfamilien – und anderen verwehrt. Konflikte mit religiösen, weltanschaulichen und politischen Systemen hatten den Personenkreis im Lauf der Geschichte meist beschränkt und im Extremfall manchen Forscher, etwa in Stalins „Säuberungen“ der 1930er-Jahre, das Leben gekostet.

Auch die Frage, wer seine Einsichten öffentlich machen konnte – und zu welchem Zeitpunkt –, war reglementiert. Der italienische Gelehrte Galileo Galilei bekam das zu spüren, und auch Isaac Newton wartete freiwillig viele Jahre, bis er seine *Principia* veröffentlichte. Frauen als Physiktreibende mussten aber auch im 20. Jahrhundert Stellung und Stimme immer wieder neu erringen. So wird bis heute diskutiert, warum Lise Meitner bei der Vergabe des Nobelpreises nicht berücksichtigt wurde und welche Folgen dies hatte.

Zunehmend waren es nicht so sehr Einzelforscher wie noch Wilhelm Röntgen und Albert Einstein (wobei die Forschung bei beiden wichtige Zuarbeit anderer Personen identifiziert hat), sondern Forscherteams, die wesentliche Durchbrüche erreichten. Beispielsweise gelang der Nachweis des Higgs-Bosons am CERN in Zusammenarbeit von mehreren Tausend Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen.

WIE? Die wissenschaftliche Revolution begründete eine Methode der Naturforschung, die bis heute erfolgreich ist. Dieser Wandel im Denken vollzog sich über viele Jahrzehnte. Zuerst rückte das Experiment ins Zentrum – die Befragung der Natur. Der englische Philosoph Francis Bacon sprach gar davon, die Natur auf die Folter zu spannen. Experimentieren erschien nun als ein legitimer und Erfolg versprechender Weg, die Natur zu ergründen, und verdrängte die rein denkerischen, spekulativen Ansätze. Parallel wurde die Mathematik zu einem zentralen Arbeitsmittel der Physik und ist es bis heute geblieben.

Ein neuer Wettbewerb der Ideen zur Naturbeschreibung entstand und wurde vor allem in wissenschaftlichen Zeitschriften ausgetragen, die sich ab 1665 als neues Medium aus den Briefwechseln von Akademiesekretären und anderen gut vernetzten Naturforschern entwickelt hatten. Hier konnte prinzipiell jeder seine experimentellen Ergebnisse und theoretischen Überlegungen vorstellen, musste sich aber auch der Kritik anderer aussetzen. Damit wurde ein Ausleseprozess in die Naturwissenschaft eingeschrieben, Reproduzierbarkeit und Kontrollierbarkeit wurden etabliert. Bis heute definieren Zeitschriftenpublikationen, der Begutachtungsprozess durch die Fachgemeinschaft und die Rezeption unter den Kolleginnen und Kollegen, ob ein wissenschaftliches Resultat Gültigkeit hat. Diese Unabhängigkeit der neuzeitlichen Wissenschaft von allen anderen Instanzen erlaubte zugleich eine immer weitere Öffnung für Menschen unterschiedlicher gesellschaftlicher, sozialer und weltanschaulicher Herkunft.

WO? Zu den Ressourcen, die die Physik erfordert, gehörten seit jeher Personal, Messinstrumente und Material sowie Gebäude, in denen geforscht und insbesondere experimentiert werden konnte. Manchmal musste man in aufwendigen Expeditionen erst dorthin gehen, wo sich physikalische Phänomene am deutlichsten zeigten.

LAURA BASSI

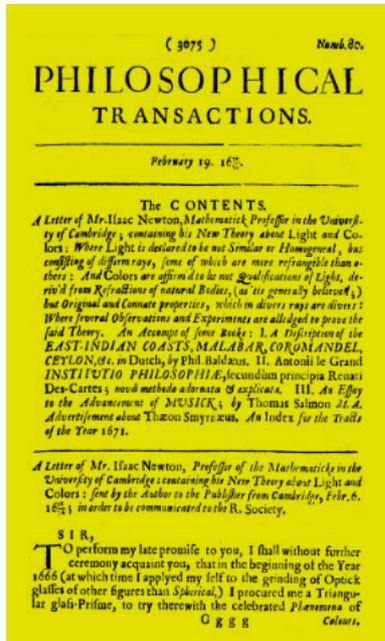
Physikerin im 18. Jahrhundert

Bis ins 20. Jahrhundert hinein war die systematische Beschäftigung mit Physik – wie mit anderen Wissenschaften – fast ausschließlich Männern vorbehalten. Eine der wenigen Ausnahmen war Laura Bassi (1711–1778), die in Bologna 1732 als lateinisch disputierendes Wunderkind den Dokortitel und eine Professur für Philosophie erhielt. Der Hermelinumhang, der auf ihrem Portrait zu erkennen ist, gehörte zur Amtstracht der Professoren. Die Zwanzigjährige nahm darüber hinaus Unterricht in Höherer Mathematik und beschäftigte sich mit physikalischen Experimenten, etwa zur Optik. Jahrzehntlang hielt sie – im 18. Jahrhundert eine übliche Praxis – in ihrem eigenen Wohnhaus Physikvorlesungen mit Experimenten. Auch forschte und publizierte sie in der Bologneser Akademie der Wissenschaften und vereinte dort als Erste Themen der Naturphilosophie wie die Elektrizitätslehre mit Forschungen zur Mechanik, die bis dahin den mathematischen Wissenschaften zugerechnet wurde. Gefördert von Papst Benedikt XIV. und von ihrem Ehemann unterstützt, wurde Bassi weit über Bologna hinaus zur Repräsentantin für weibliche Gelehrsamkeit und zugleich für die entstehende Disziplin Physik.



Nicht weniger als die gesellschaftlichen Bedingungen haben daher auch die verfügbaren und erreichbaren Orte die Physik geprägt. Das Universitätslabor, wie wir es heute kennen, ist vergleichsweise jung. Zunächst hatten die Akademien im 17. Jahrhundert Instrumentenkabinette aufgebaut und ermöglichten ihren Mitgliedern, Versuche vorzuführen. Trotzdem blieb das eigene Zuhause lange der wichtigste Ort physikalischer Forschung. So war der Physiker und Chemiker Gustav Magnus für sein Privatlabor im heute nach ihm benannten Palais in Berlin berühmt, das viele Jahre als Tagungsort der DPG genutzt wurde. Seine Instrumentensammlung kam nach seinem Tod in die Berliner Universität. Damit entstand schließlich das Universitätsinstitut mit Laborplätzen, wie wir es heute kennen. Es wurde im 20. Jahrhundert durch Labore an Forschungsinstituten oder Großforschungseinrichtungen sowie in der Industrie ergänzt, in den vergangenen Jahrzehnten sogar durch Weltraumlabor. Die Entwicklung elektronischer Rechner machte den Einsatz von numerischen Methoden und Simulationen möglich. Neben den eigentlichen Laboratorien gehören deshalb heute auch Rechenzentren zu den Orten physikalischer Forschung. Vielfach sind aus diesen festen physischen Orten heute jederzeit und überall verfügbare „virtuelle Labore“ geworden.

WOMIT? Viele physikalische Phänomene werden erst durch Instrumente erzeugt oder der näheren Untersuchung zugänglich. Bereits die Vakuumpumpe, das wichtigste Instrument der wissenschaftlichen Revolution, faszinierte auf dem Reichstag in Regensburg 1654 politische und geistliche Würdenträger. Die von dem



Newton's berühmte Abhandlung zur Optik erschien, wie viele frühneuzeitliche wissenschaftliche Aufsätze, noch in der Form eines Briefs.

Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke erfundene Luftpumpe steht am Anfang einer Linie der Vakuumphysik, die es erlaubte, physikalische Phänomene in Reinform zu erforschen, die Bausteine der Materie zu entdecken und Aufschluss über ihren Aufbau zu erhalten.

Als Forschungstechnologie ermöglichte sie Kathoden- und Kanalstrahlröhren oder Röntgenapparaturen bis zum Teilchenbeschleuniger. Die Versuche von James Franck und Gustav Hertz sowie Otto Stern und Walther Gerlach wären ohne Vakuumphysik nicht möglich gewesen.

Ähnliche Linien lassen sich für andere Instrumente und die daraus erwachsenen Forschungstechnologien ziehen, sei es für die seit dem 18. Jahrhundert verbreiteten Elektrisiermaschinen oder den im 20. Jahrhundert erfundenen Laser.

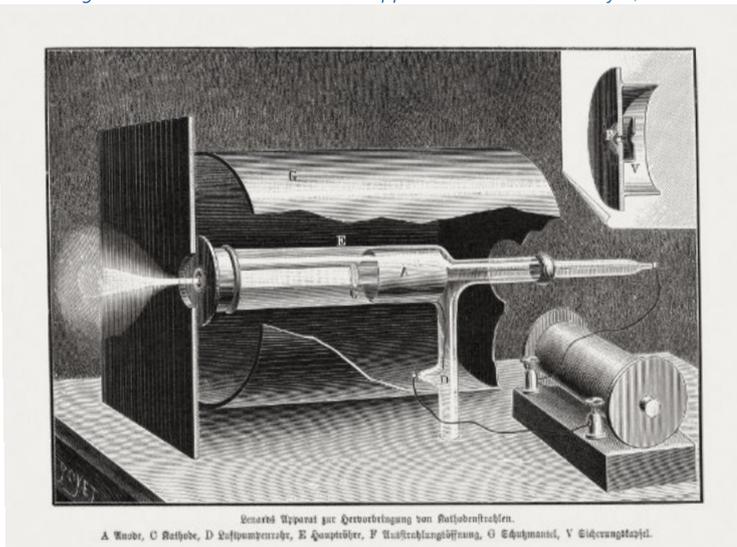
WOZU? Generalisierungen, dass „Wissensdurst“ oder die Frage, „was die Welt im Innersten zusammenhält“, Menschen antrieb, sich mit Physik auseinanderzusetzen, lassen sich historisch kaum belegen. Vielmehr waren die Zwecke physikalischer Forschung vielfältig und situationsabhängig.

Ein Beispiel mag dies verdeutlichen: Als das erste Fernrohr 1609 Venedig erreichte, gelangte es sogleich in Galileis Hände. Er zerlegte und analysierte es, und es gelang ihm, ein Instrument mit einer wesentlich höheren Vergrößerung zu konstruieren. Doch bevor er damit den Mond, die Planeten und den Sternenhimmel betrachtete, präsentierte er es zunächst dem Senat Venedigs als Instrument, mit dem man feindliche Schiffe früher erkennen konnte. Auch Galileis Mechanik mit den Fallgesetzen und der Festigkeitslehre nahm vielfach Anleihe bei den Problemen der venezianischen Militäringenieur, die Schiffe und Kanonen konstruierten.

Häufig standen und stehen militärische Zwecke oder industrielle Anwendungen am Anfang physikalischer Forschung und gewährleiten nicht zuletzt deren Finanzierung. Die Verbindungen waren mal stärker und mal schwächer und reichen von unmittelbarer Auftragsforschung bis zur Stiftungsfinanzierung im Hintergrund. So firmierten die Institute des Vorläufers der Max-Planck-Gesellschaft als Kaiser-Wilhelm-Institute für Chemie oder Physik zwar unter staatlichem Titel, wurden aber hauptsächlich aus Industriegeldern finanziert.

Nach dem Zweiten Weltkrieg kamen in den USA die Gelder für Grundlagenforschung und insbesondere die Physik zu bis zu 90% vom amerikanischen Verteidigungsministerium. Das war nicht nur der Politik im Zeitalter des Kalten Kriegs geschuldet, die auf wissenschaftliche und technologische Führung setzte, sondern auch dem aktiven Lobbyismus von Phy-

Zeichnung einer Kathodenstrahlröhre Philipp Lenards von Louis Poyet, 1894



sichern, die die politische Situation nutzten, um Forschungsmittel zu reklamieren. Generationen von theoretischen Physikerinnen und Physikern haben sich dank solcher Förderung seit 1958 auf NATO-Sommerschulen international vernetzt. Die Einführung von Zivilklauseln an vielen deutschen Universitäten seit den 1980er-Jahren spiegelt zugleich gesellschaftliche Vorbehalte gegen die Einflussnahme des sogenannten militärisch-industriellen Komplexes.

DARUM PHYSIKGESCHICHTE

Die Fragen nach dem Wer, Wie und Wo, nach dem Womit und Wozu der Physik – und natürlich auch nach ihren Inhalten – sind, seit es Physik gibt, gestellt worden. Die Erkenntnisinteressen haben sich dabei immer wieder geändert. Physikalische Lehrbücher der Frühen Neuzeit dokumentierten in ihrer Darstellung oft die Geschichte des jeweiligen Gebiets gleich mit – ein Ansatz, der als historisch-genetische Methode bis heute in der Didaktik bekannt ist. Das Nachvollziehen der Erkenntnis Schritte in ihrer historischen Abfolge, so die Annahme, helfe beim Verstehen der physikalischen Phänomene und Konzepte. Mit der Spezialisierung der Physik entfiel die Geschichte der Physik aus den Lehrbüchern. Es gab nunmehr eigene Bücher zur Physikgeschichte, sei es für die Lehrerbildung und Didaktik oder aus Faszination für die physikalische Forschung etwa von Isaac Newton. Biografien wie die über Hermann von Helmholtz, die auch in einer kürzeren Volksausgabe erschien, vermittelten einer bürgerlichen Öffentlichkeit die Genialität einzelner Forschender und stilisierten Naturforschung als Teil einer gelehrten Kultur. Physikgeschichte war damit immer auch Lobbyarbeit für die Physik.

Mit der Etablierung der Wissenschaftsgeschichte als eigenes Fach erweiterten sich die Methoden. Beispielsweise wurde gemeinsam mit Physikerinnen und Physikern, die als Zeitzeugen auftraten, in mehreren Konferenzen zur Geschichte der Teilchenphysik ein Modell für eine partizipative Geschichtsschreibung erprobt.

EINE ATOMBOMBE FÜR DEUTSCHLAND?

Die Frage nach den Zielen des deutschen Uranprojekts im „Dritten Reich“ ist wie kaum eine andere Frage der Physikgeschichte diskutiert worden. Robert Jungk verbreitete 1956 in *Heller als Tausend Sonnen* die für lange Zeit einflussreiche Sicht, die deutschen Physiker hätten nie eine Bombe bauen wollen und können. Die erst 1992 zugänglich gemachten Abhörprotokolle der deutschen Atomforscher, die ein Jahr lang auf dem englischen Landsitz Farm Hall interniert waren, brachten neue Erkenntnisse. Sie ließen aber auch viele Fragen offen, da die Tonbänder vernichtet worden waren und die Gespräche nur in Auszügen in englischer Übersetzung überliefert sind. Klar wird aber, dass die deutschen Atomforscher auf Anregung von Carl Friedrich von Weizsäcker bereits am 8. August 1945 in einem Memorandum bewusst eine Deutung ihrer Arbeit formulierten, die dieser so beschrieb: „Ich glaube es ist uns nicht gelungen, weil alle Physiker im Grunde gar nicht wollten, dass es gelang. Wenn wir es gewollt hätten, dass Deutschland den Krieg gewinnt, hätte es uns gelingen können.“ Mit der Etablierung dieser Lesart blieb das fachliche und persönliche Ansehen der deutschen Wissenschaftler gewahrt, und sie wurden in der nun durch den Kalten Krieg geteilten Welt rasch wieder Teil der internationalen Physikergemeinschaft des Westens.

Doch die Physikgeschichte widmet sich nicht nur den Stars der Physik. Sie fragt auch nach den unsichtbaren Helfern und Helferinnen (!) in der Forschung, nach der Rolle von Institutsmechanikern und Rechnerinnen. Sie untersucht, was es bedeutete, in der Groß- oder Industrieforschung zu arbeiten. Und das Interesse der Wissenschaftsgeschichte an der wissenschaftlichen Teilhabe von Frauen bot Physikerinnen schon früh Gelegenheit zur Reflexion und Identifikation.

Nicht zuletzt stellen historische Forschungen zur Verantwortung der Physik – ob während des Nationalsozialismus, im Kalten Krieg oder in heutigen Forschungskontexten – ein nicht immer bequemes, aber für die Fachgemeinschaft unverzichtbares Moment der Reflexion dar.

Beate Ceranski und Arne Schirmacher

SOURCES FOR THE HISTORY OF QUANTUM PHYSICS

Ein Wandel in der Physikgeschichtsschreibung

Als um 1960 in den USA erste Studienprogramme und Professuren für Wissenschaftsgeschichte entstanden, sahen einige Physiker und Physikhistoriker es als Aufgabe und geradezu als Verpflichtung, die vielleicht bedeutendste wissenschaftliche Entwicklung des 20. Jahrhunderts zu dokumentieren: die Quantentheorie. Thomas S. Kuhn, der zu dieser Zeit an einer später berühmt gewordenen Schrift über die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen arbeitete, wurde Leiter eines vierköpfigen Teams, das über 100 Wissenschaftler interviewte. Es sammelte eine große Menge an Quellenmaterial – Briefe, Notizbücher, Manuskripte – und sicherte sie auf Mikrofilm. Auch wenn Kuhns Hoffnung weitgehend enttäuscht wurde, im Gespräch mit den Akteuren ihre revolutionären Durchbrüche genau nachvollziehen zu können, hat das Projekt bleibende Bedeutung: Es etablierte das Interview als Methode der Wissenschaftsgeschichtsschreibung und die Erforschung der Zeitgeschichte wurde Teil der Physikgeschichtsschreibung.

Die Physikgeschichte arbeitete fortan nicht nur mit den Veröffentlichungen, also mit ihren fertigen Forschungsergebnissen, sondern interessierte sich auch für die vielschichtigen Entstehungszusammenhänge neuen Wissens. Als „science in the making“ oder „scientific practice“ entstand eine neue Art der Wissenschaftsgeschichtsschreibung, die den Blick auf die Geschichte der Physik bereichert hat.

PHYSIK UND KUNST: KREATIVE WECHSELWIRKUNGEN

Physik und Kunst sind zwei unterschiedliche Arten, die Welt zu betrachten und darzustellen. Bringt man sie in Verbindung, können sie ihr produktives Potenzial entfalten, um unsere Welt besser zu verstehen.

Physikalische Effekte lassen uns staunen. Sie faszinieren uns und fordern unseren Verstand heraus. Kein Wunder, dass Physik nicht nur zum Spielen anregt, sondern auch Literatur-, Musik- und Kunstschaffende inspiriert, sich mit physikalischen Erkenntnissen und Experimenten kreativ auseinanderzusetzen.

So nahm etwa Gerhard Richter den ersten Blick in ein Atom durch ein Rasterkraftmikroskop zum Anlass, die unscharfe Welt in seinem Gemälde *Silikat* (2003) mit Öl auf Leinwand darzustellen. Der Schriftsteller Italo Calvino schrieb *Cosmicomics* (1965) über die Geschichte eines expandierenden Universums und Philip Glass komponierte mit seiner Oper *Einstein on the Beach* (1976) einen Klassiker der modernen Musik, um die revolutionäre Kraft der Ideen des Physikers aufzuführen. Nicht umsonst laden Forschungsinstitute wie das CERN in Genf oder das Fermilab in den USA regelmäßig Gastkünstler:innen ein, um eine Brücke zu bilden zwischen der Wissenschaft und der Kunst.

Kunstwerke haben dabei keine Funktion zu erfüllen, sollen auch keine Physik darstellen oder gar popularisieren, aber sie können Physik in einer anderen Weise als durch Messvorschriften und Formeln erfahrbar machen. Künstler:innen können andere Fragen stellen als die nach logischer Konsistenz oder experimenteller Realisierbarkeit. Kunst kann der Physik ästhetische Dimensionen entlocken, ihre Bedeutung für unser Selbstverständnis und unsere Werte ausloten.

Eine Welt von Physik und Kunst

Kunst und Physik sind trotz der Verschiedenheit ihrer Denk- und Arbeitsweisen keine getrennten Sphären. Es gab schon immer Menschen, die sich in beiden Kulturen bewegten und kreativ tätig waren. So ist der Physiker Georg Christoph Lichtenberg heute vor allem auch als Autor der *Sudelbücher* bekannt und der Künstler Leonardo da Vinci für seine naturwissenschaftlichen Zeichnungen und Studien. Auch heute leben viele physikalisch ausgebildete Künstler wie z. B. der Bildhauer Julian Voss-Andreae, der Schriftsteller Ulrich Woelk oder der Komponist Bojan Vuletić, in deren Werken sich die Physik deutlich bemerkbar macht.

Physik ist zudem stets in die Gesellschaft eingebettet, in der sie entsteht – nicht nur sozial und politisch, sondern auch in den kulturellen Debatten des Feuilletons oder der sozialen Medien. Grundlegende Konzepte der Quantenphysik wie Unschärfe oder Verschränkung widersprechen unserer vom Alltag geprägten Intuition. Sie sind daher bis heute nicht nur

↑ *Wahr, schön oder nützlich: Mikroskopaufnahme, Gerhard Richters Bild Silikat oder die Front eines Computers?*

eine Herausforderung für die philosophische Interpretation der modernen Physik, sondern geben zudem Anlass, sich in Kunst, Literatur und Musik mit ihnen auseinanderzusetzen.

Umgekehrt sind auch Physiker:innen geprägt durch zeitgenössische kulturelle Debatten und Ideen, was zu Parallelitäten in Denkprozessen in Gesellschaft, Kunst und Physik führen kann. So stellte etwa der Beginn der Moderne um 1900 nicht nur wissenschaftlich und technologisch, sondern auch zivilisatorisch eine enorme Umwälzung dar, die sich in der zunehmend abstrakteren Malerei durch ihren Bruch mit der Tradition ankündigte.

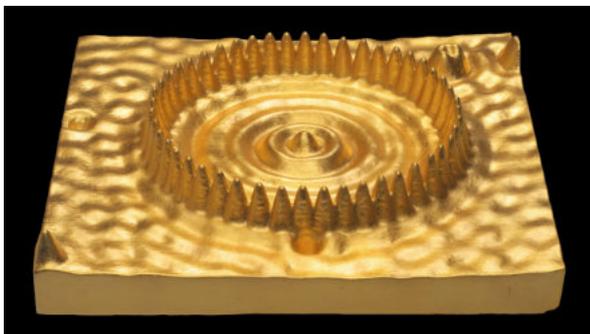
Physik als Mensch erfahren

Zahlreiche Schriftsteller:innen haben Physik aus einer kulturellen Perspektive reflektiert und ihr mit Romanen und Erzählungen oft einen Spiegel vorgehalten. Theaterstücke wie Bertolt Brechts *Leben des Galilei* oder Michael Frayns *Copenhagen* fragen z. B. nach der Verantwortung der Forschenden, aber auch nach Unschärfen in Erinnerung und Geschichtsschreibung. Gemälde und Skulpturen wie Antony Gormleys *Quantum Cloud* (1999) in London können spektakuläre Ergebnisse der Forschung bildnerisch wiedergeben und dabei die



Raphaela Edelbauer, *Die Inkommensurablen* (2023) Johannes Kepler, *Somnium* (1634)
 Edwin Abbott Abbott, *Flatland* (1884) Johann Wolfgang von Goethe, *Die Wahlverwandtschaften* (1809)
 Bertolt Brecht, *Galileo Galilei* (1938/1955) Jens Harder, *Alpha ... directions* (2009)
 Michael Frayns, *Copenhagen* (1998) Herbert George Wells, *The Time Machine* (1895)
Friedrich Dürrenmatt, *Die Physiker* (1961)
 Italo Calvino, *Cosmicomics* (1965) Dietmar Dath, *Dirac* (2006)
 Primo Levi, *Das Periodische System* (1971)
 Siegfried Lenz, *Einstein überquert die Elbe bei Hamburg* (1975)
 Juli Zeh, *Schilf* (2007) Richard Powers, *Bewilderment* (2021)
 Thomas Lehr, *42* (2005) Hermann Broch, *Die unbekannte Größe* (1933)
 Thomas Mann, *Zauberberg* (1924) Robert Musil, *Der Mann ohne Eigenschaften* (1930)
 Durs Grünbein, *Cyrano oder Die Rückkehr vom Mond* (2014)
 Ulrich Woelk, *Die Einsamkeit des Astronomen* (2005) Thomas Pynchon, *Entropy* (1960)
 Max Frisch, *Der Mensch erscheint im Holozän* (1979) Jeanette Winterson, *Gut Symmetries* (1997)

Literarische Werke: Poetisierungen der Physik in Figuren, Handlung, Erzählstruktur und Stil.



Unschärfe in der Quantenphysik wie bei jeder noch so realistischen Malerei ausstellen.

Physikalisch inspirierte Klanginstallationen können physikalische Effekte zu einem öffentlichen Erlebnis machen und uns diese Phänomene anders erfahren lassen als im Labor. So dehnen Komponist:innen Zeit im Klangraum, bildende Künstler:innen finden neue Sichtweisen auf eine Quantenwelt voller Fluktuationen und Schriftsteller:innen reflektieren Quantenprinzipien in der Sprache, dem Stil und dem Aufbau literarischer Texte. Eine solche ungewohnt neue Erfahrung physikalischer Phänomene ist eine wesentliche Voraussetzung, um sich unsere Welt aneignen und in ihr orientieren zu können. Denn unsere Sinne und Gehirne sind in der klassischen Welt entwickelt und trainiert worden, sodass es der künstlerischen Kreativität bedarf, die physikalisch entdeckte Natur zu erleben. Physikalische Neuerungen prägen also nicht nur die technologische und zivilisatorische Entwicklung, sondern fordern auch unser Welt- und Selbstverständnis heraus, aus dem wir unsere ethischen und ästhetischen Überzeugungen gewinnen.

Kunstwerke gehen dabei über eine bloße Illustration von Ideen und Konzepten der modernen Physik hinaus: Sie zeigen Aspekte, die weder der Alltagserfahrung noch der methodisch arbeitenden Physik zugänglich sind. Indem Julian Voss-Andreae seinen *Quantum Corral* mit Gold überzieht, illustriert er eben nicht nur die Elektronenwellenfunktion durch die Reflektivität der Metalloberfläche, die aufgrund der Leitfähigkeit der Elektronen entsteht, sondern bringt sie in Verbindung mit dem transzendenten Licht des Heiligen bei mittelalterlichen Altären und Ikonen.

Physik revolutioniert Darstellungsweisen der Kunst

Künstler:innen nutzten schon immer physikalisches Wissen für ihre Werke. So ist die technische Akustik wichtig beim Bau von Konzertsälen ebenso wie für die Tonerzeugung beim Instrumentenbau, um den Klang zu verbessern oder auch um spezielle Klangeffekte nach ästhetischen Kriterien zu modifizieren. Leinwände wurden schon immer physikalisch-chemisch präpariert; heute können Untergründe für Gemälde sogar nanostrukturiert werden, um z. B. Benetzungseffekte hervorzubringen. Durch die klassische Mechanik konnte das barocke Kulissentheater im 17. Jahrhundert die Aufführungspraxis revolutionieren: Neue Techniken für Bühnenbilder, Dreh- und Hebebühnen ermöglichten schnelle Szenenwechsel. Auch Wolken- und andere Effektmaschinen wurden entwickelt, wobei die neuzeitliche Optik mit ihren Farblampen oder sogar Lasern die Beleuchtung und Lichtregie im Theater revolutionierte.

Mit den Erfindungen der Elektrodynamik entstanden im 19. Jahrhundert völlig neue Kunstformen wie Fotografie, Film- und Videokunst, die eine realistische Malerei obsolet erscheinen lassen. Die Entdeckung der Radiowellen ermöglichte eine weltweite Massenverbreitung von Kunstwerken, die vor-

ZWEIUNDVIERZIG

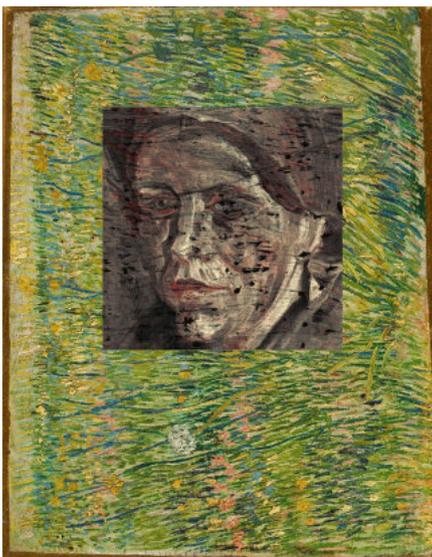
Science-Fiction erzählt von fiktionalen Welten, die durch ein Nolum geprägt sind, welches es in unserer gegenwärtigen Welt zwar (noch) nicht gibt, das aber im Unterschied zur Fantasy oder zum Märchen im physikalischen Weltverständnis prinzipiell möglich und dadurch glaubhaft erscheint. Dabei lotet Science-Fiction soziale, politische und ethische Folgen einer sich (technisch) verändernden Welt aus. So imaginierte schon Johannes Kepler eine Reise zum Mond, um aus dieser veränderten Perspektive das kopernikanische Weltbild verstehbar zu machen. Und H. G. Wells „erfindet“ eine Zeitmaschine als eine literarische Technik, um den Untergang der Menschheit auf einer biologisch evolvierenden Erde glaubhaft erzählen zu können.

Autor:innen wie Stanislaw Lem, Ursula Le Guin oder Arthur C. Clarke avisieren zukünftige Technologien wie persönliche Computer, das Internet, Satellitennavigation oder künstliche Intelligenz, um über die Bedeutung des physikalischen Fortschritts für den Menschen zu erzählen. Die Themen bzw. Handlungsverläufe sind daher oft sehr traditionell und orientieren sich an alten Motiven: der Bedrohung durch Fremdes, des Zauberehrings, der neue Techniken nicht beherrscht, des Frankenstein oder modernen Prometheus, der sich mittels künstlicher Intelligenz gegen seinen Schöpfer wendet.

Indem sie aber Feen und Orks durch Raumschiffe und Teleportation ersetzt, hat die Science-Fiction ästhetische Darstellungsweisen gefunden, um den tiefsten Menschheitsfragen nach dem Sinn des Lebens glaubhaft im physikalisch-technischen Zeitalter nachzugehen. Daher fasziniert Science-Fiction und motiviert zudem für eine Beschäftigung mit Physik: Nicht wenige Forschende geben an, auch durch die Besatzung der Enterprise im Star-Trek-Universum von Gene Roddenberry oder die Reise von Arthur Dent per Anhalter durch die Galaxis von Douglas Adams zu physikalischen Fragen inspiriert worden zu sein.

her nur vor Ort in Kirchen, Konzertsälen oder Museen zu erleben waren. Kommunikations- und Darstellungsweisen ändern sich so mit den physikalisch realisierbaren Medien und

ließen neue ästhetische Fragen entstehen: Was ist Kunst im Zeitalter ihrer technischen Reproduzierbarkeit? Und was unterscheidet menschengemachte Kunst von der durch künstliche Intelligenz erzeugten? Heute sind es vor allem die durch den Transistor möglich gewordenen digitalen Techniken, die neue Schreibweisen und Leseinteraktivitäten einer elektronischen Literatur hervorbringen. Physik



Mit Synchrotron-Röntgenstrahlung wurde am DESY ein übermaltes Van-Gogh-Bild sichtbar gemacht.

revolutionierte eben nicht nur unser Weltbild, sondern auch die technischen Möglichkeiten von Kunst, ihre Arbeitsweisen und Verbreitungswege; letztendlich auch ihre ästhetischen Kriterien und Bewertungen.

Physikalische Methoden der Geisteswissenschaften

Auch die Kunst- und Kulturwissenschaften bedienen sich der neuen physikalischen Möglichkeiten. Die Radiokohlenstoffmethode wird zur Altersbestimmung von Kulturgütern genutzt und die Plasmaphysik zu deren Konservierung und Restaurierung. Die Durchleuchtung mit Röntgen- oder Neutronenstreuung und die Magnetresonanztomografie werden zur Kompositions- und Strukturanalyse von Gemälden oder zur Bildgebung des Inneren von Skulpturen verwendet. Dies ermöglicht nicht nur, übermalte Gemälde zu rekonstruieren, sondern auch die kunsthistorische Stilkritik durch vorher nicht Sichtbares zu erweitern. So konnte etwa eine massenspektrometrische Analyse der Benin-Bronzen nicht nur Fälschungen erkennen, sondern auch die Herkunft der verwendeten Bronze aufklären: Sie stammte aus Deutschland und wurde als Bezahlmittel im Sklavenhandel verwendet. Solche Kulturgeschichte hilft gleichermaßen der Physikgeschichte, wenn Papyri und alte Bücher wie ein Schriftstück des Archimedes durch philologische Arbeit wiedergefunden und durch spektrale Messmethoden gelesen werden können, selbst wenn sie sich nicht mehr aufblättern lassen.

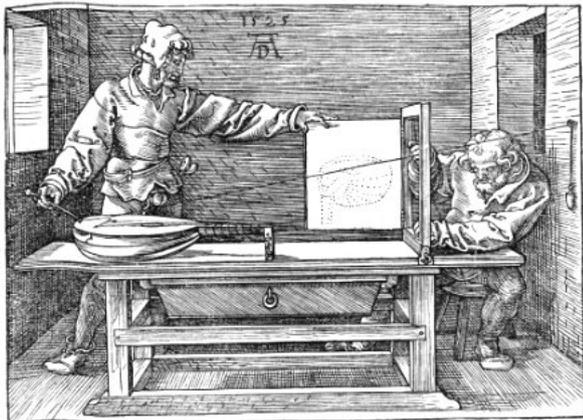
Überall erfahren die Wissenschaften aufgrund der Digitalisierung einen enormen Zuwachs an physikalisch-mathematischen Methoden: Ganze Textkorpora, z. B. von Shakespeare, können statistisch analysiert, komplexe Strukturen von Kunstwerken visualisiert, mit digitalen Musikeditionen kann experimentiert werden. Besonders unser Verständnis genuin subjektiver Phänomene kann heute mit physikalischen Methoden erweitert werden. Beginnend bei der Psychophysik im 19. Jahrhundert untersucht heute die empirische Ästhetik mit experimentellen Methoden, warum was wem gefällt. Denn neuronale Prozesse bedingen nicht nur unsere Wahrnehmungsmöglichkeiten, sondern formen literarische Stilmittel wie Reim und Rhythmus eines Gedichtes. Ein physikalisches Verständnis der Welt ist daher grundlegend, um ästhetische Bewertungen von Kunst zu verstehen.

Auch die Physik gewinnt Methoden der Geisteswissenschaften hinzu, etwa in der Biophysik: um assoziative Denkprozesse physikalisch durch Bildgebung des arbeitenden Gehirns untersuchen zu können, arbeiten Metaphernexpert:innen und Medizinphysiker:innen zusammen. In der Terra-Astronomie werden Messdaten zur Sonnenaktivität vervollständigt durch philologische Auswertung von historischen Berichten über Himmelsbeobachtungen, um den astrophysikalischen Beobachtungen eine längere Zeitbasis zu geben.

Physik nutzt Techniken der Kunst

Ästhetische Verfahren sind in der Physik nicht unbekannt, denn selbst Physiker:innen müssen reden, schreiben und darstellen. Sie nutzen daher nicht nur rhetorische Stilmittel bei Vorträgen und Aufsätzen, sondern ebenso künstlerische Ver-

fahren der Bildgestaltung für Datendarstellungen und Illustrationen. Physiker:innen müssen argumentieren und verwenden an Punkten, wo sich keine Experimente durchführen lassen, literarische Erzähltechniken in Gedankenexperimenten: Berühmte Beispiele sind Erwin Schrödingers Katze und Albert Einsteins lichtschnelle Züge und fallende Fahrstühle. Gerade für den Beginn von Forschungsprozessen sind fiktionale Geschichten und damit ästhetische Fragen des Erzählens wichtig.



Nachdem Künstler:innen der Renaissance wie Albrecht Dürer die [Zentralperspektive](#) wiederentdeckt hatten, wurde sie auch zu einem Thema der darstellenden (projektiven) Geometrie. Dies war eine wichtige Grundlage für die Entwicklung der neuzeitlichen Physik um 1600, wo z. B. die Camera Obscura sowohl als wissenschaftliches wie auch als künstlerisches Instrument diente. So verwendete Johannes Kepler sie quasi als epistemische Maschine in seiner fiktionalen Traumerzählung *Somnium* (1609) für eine Mondastronomie. Bekannt geworden für die Kunst des Zeichnens als ein Instrument der Forschung sind auch Galileo Galileis Skizzen des Mondes im *Sidereus Nuncius* (1610). Physik ist eben auch eine Wissenschaft, bei der man hinsehen und anfassen muss, weshalb in den Naturwissenschaften nicht nur ein geschultes Auge wertgeschätzt wird, sondern auch die tastende und zeichnende Hand eines bildenden Künstlers oder bildenden Künstlerin. Heute spielen ästhetische Datenvisualisierungen und Datenkunst eine immer größere Rolle in der Wissenschaft, beispielsweise in der Teilchenphysik oder der Soziophysik von Systemen vernetzter Agenten, um die Nadel des Relevanten im Heuhaufen der Daten erkennen zu können.

Ästhetische Argumente der Schönheit spielen nicht nur für die Darstellung, sondern auch für die Suche nach physikalischen Theorien eine Rolle. Denn in der Natur zeigen sich oft erstaunlich schöne Naturgesetze, sei es die Symmetrien der elementaren Teilchen, der goldene Schnitt bei Quasikristallen oder die Anordnung von Blättern bei Pflanzen gemäß der Fibonacci-Zahlenfolge. Gerade für innovative Umbrüche kann die mimetische Kraft der Kunst eine entscheidende Rolle in der Physik spielen. So entwickelte Gottfried Wilhelm Leibniz seine *Dissertatio de Arte Combinatoria* (1666) anhand von Permutationsgedichten u. a. von Georg Philipp Harsdörffers *Fünffachem Denckring der teutschen Sprache* (1651) und legte

damit die Grundlage der Kombinatorik. Und Kip Thorne entwickelte seine Theorie von Wurmlöchern aufgrund der fiktiven Reise zur Vega in Carl Sagens Roman *Contact* (1985). Nicht zuletzt waren es Fragen der Ästhetik, die im 19. Jahrhundert bei Gustav Theodor Fechner und Hermann von Helmholtz zu einer Psychophysik und einer physikalischen Theorie der Sinneswahrnehmung führten.

Darstellungsweisen der Kunst werden heute vor allem in der Öffentlichkeitsarbeit und der Didaktik der Physik verwendet: Erzählungen und Filme im Unterricht, Wissenschaftstheater und Science-Slams, sowie Physik der Musik oder des Malens als motivierende Kontexte aus dem Alltag. Sprachsensibilität bei Konzeptentwicklungen und eine künstlerische Handhabung von Physik dienen dabei nicht zuletzt einer Überbrückung der Kluft zwischen ihrer mathematischen Sprache und dem erlebbaren Alltag.

Kunst und Physik: verschiedene Formen des Denkens

Kunst und Physik haben ein gemeinsames Interesse an Erkenntnis, aber sie erfahren die Welt auf unterschiedliche Weisen, und andersartige Sprechweisen erschweren ein gegenseitiges Verständnis. Zudem sind ihre Ziele, Methoden und Motivationen verschieden. Während Physik Naturgesetze verstehen und anwenden möchte, kennt die Kunst keine Zwecke oder gar Vorgaben. Physiker:innen verpflichten sich zu Methoden guter wissenschaftlicher Praxis und benutzen für ihre Kommunikation etablierte Darstellungsweisen. Kunst hingegen ist frei, ihre Ziele und Ausdrucksmittel zu finden. Anders als bei der sich ständig erklärenden Wissenschaft ist es oft schwierig, Kunst in Worte zu fassen, denn „das Denken ist beim Malen das Malen“ wie Gerhard Richter betont.

Dennoch gibt es viele Gemeinsamkeiten: die Neugier und die Freude am Ergebnis, das Interesse an Erkenntnis und die Suche nach neuen Darstellungsweisen. Denn wie bei einem Mikroskop oder jeder neuen Messgröße gibt auch „die Kunst nicht das Sichtbare wieder, sondern macht sichtbar“, wie Paul Klee in seinen *Schöpferischen Konfession* (1920) bekennt. So waren etwa Metaphern stets wichtig, um neue physikalische Konzepte zu entwickeln, sei es für Entitäten wie Michael Faradays Felder oder für Strukturen wie Friedrich August Kekulé's Schlange. Die Vorstellungskraft von Künstler:innen kann dabei Aspekte der Wirklichkeit entdecken, die die Physik aufgrund ihrer Methodenstrenge nicht sehen kann. Sie kann durch Kunst lernen, Flexibilität hinsichtlich der Bedeutung in ihren impliziten Annahmen bei Experimenten und Modellen zu entdecken, neue Interpretationsmöglichkeiten ihrer Begriffe zu finden und eine Ahnung von ungewohnten Denkwegen zu bekommen. In der Freiheit des künstlerischen Assoziierens und Gestaltens liegt daher auch ein enormes Potenzial für die Wissenschaft, das zu neuen Erkenntnissen der Physik führen kann.

Klaus Mecke

FÜR DIE GESELLSCHAFT

Physikalische Erkenntnisse prägen unser modernes Weltbild, unsere Kultur und die Grundlagen der modernen Technik. Physikalische Forschung verbindet auch Länder und wird heute, auch angesichts der dafür notwendigen Ressourcen, offen, international und interdisziplinär betrieben. Motiviert wird sie meist mit ihrem großen Nutzen für die Menschheit und die jeweilige Gesellschaft. Sie soll in erster Linie zivilen Zwecken und dem Wohl der Menschen insgesamt dienen. Seit der Aufklärung vor rund dreihundert Jahren wurde in unterschiedlicher Weise immer wieder formuliert, dass Forschung frei von Ideologie sein soll, der Neutralität und Objektivität verpflichtet. Zudem bauen die Erkenntnisse der Physik seit Jahrhunderten auf Grundlagenforschung und angewandter Forschung auf.

Die Erkenntnisse der Physik sind vielfältig nutzbar. Spätestens, wenn sie Labor und Forschungseinrichtung verlassen haben, muss eine Gesellschaft sich damit befassen, wie mit ihnen umzugehen ist. Sie sind somit ein moderner Faktor in der jeweiligen Gesellschaft, national wie international. Wissen verleiht aber auch Macht. Wissen und Methoden der Wissenschaft können ambivalent sein, in ihrem Nutzen also Vorteile und unerwünschte Wirkungen vereinen. Einmal erkundete Zusammenhänge und darauf beruhende Erfindungen sind kaum rückholbar oder einfach zu verbieten. Aus der Garantie der Wissenschaftsfreiheit im Grundgesetz folgt heute die Pflicht der Forschung, Verantwortung wahrzunehmen, d. h. Forschende und Institutionen zu sensibilisieren, eine Nutzen-Risiko-Abwägung vorzunehmen, vor negativen Folgen zu warnen, adäquate ethische Regeln zu diskutieren und vorzuschlagen und Gesellschaft wie Politik über Konsequenzen zu informieren oder zu beraten.



Dieser Abschnitt beschäftigt sich zunächst mit dem internationalen Charakter von Wissenschaft und dem Begriff der Wissenschaftsdiplomatie (Science Diplomacy). Angesichts des geopolitischen Wandels stehen internationale Projekte vor neuen Herausforderungen. Ein Gespräch zwischen Karin Zach und Rolf Heuer (Seite rechts) verdeutlicht die Internationalität von Wissenschaft und ihre heutigen Herausforderungen. Disruptive Technologien (etwa bei den Quantentechnologien) können einerseits bahnbrechende Innovationen ermöglichen, aber andererseits auch neue Risiken heraufbeschwören, denen gesellschaftlich auch durch rechtliche oder ethische Regeln begegnet werden sollte (Seite 321). Eine weitere Herausforderung bilden die Chancen und Risiken von Cybertechnologien im Rahmen einer sich weiter entwickelnden Informationsgesellschaft. Hier stehen die Auswirkungen des Einsatzes von künstlicher Intelligenz im Mittelpunkt der Debatten. Die Abschätzung von Chancen und Risiken auch im Sinne der Steigerung von Akzeptanz in der Gesellschaft benötigt eine funktionierende Wissenschafts- und Technikfolgenabschätzung, beginnend mit einer wissenschaftlichen Entdeckung,

ihrer Anwendung und Vermarktung bis hin zur Diskussion ihrer gesellschaftlichen Implikationen (Seite 319). Die Ambivalenz einer Jahrhundertentdeckung wird deutlich am Beispiel der Freisetzung der Nuklearenergie für friedliche wie militärische Zwecke und der Abrüstungsanstrengungen, an denen sich maßgeblich auch Physiker:innen beteiligt haben (Seite 323). Neben der Schaffung von ethischen sowie internationalen und nationalen Regeln zur Risikominimierung gibt es auch die Pflicht, die Gesellschaft und die Politik über die Implikationen der Forschung und Entwicklung aufzuklären und zu beraten (Seite 329). Ein weiterer wichtiger Aspekt ist eine rationale Wissenschaftskommunikation (Seite 333), die wissenschaftsbasierte Fakten verständlich präsentiert, kritische Sichtweisen nicht ausspart und wissenschaftliche Methodik in der Gesellschaft verankert. In einer Zeit, in der mass mediale Halbwahrheiten, Falschmeldungen und Verschwörungstheorien zum Alltag gehören, ist die Vermittlung und Kenntnis von wissenschaftsbasierten Fakten, Analyse und Methodik essentiell.

Götz Neuneck



WISSENSCHAFT VERBINDET: SCIENCE DIPLOMACY

Naturwissenschaftliche Forschung hat viel zum Verständnis unserer Welt beigetragen und das Wissen der Menschen bereichert. Heute findet Wissenschaft und insbesondere die Physik mehr denn je in internationaler Zusammenarbeit statt.

Forschungsprojekte, Konferenzen und ein kontinuierlicher Wissensaustausch bringen Wissenschaftler:innen zu gemeinsamer Forschungsarbeit und Lehre täglich zusammen. Zugleich helfen wissenschaftlicher Austausch und internationale Kooperationen, das gegenseitige kulturelle Verständnis jenseits von politischen und ideologischen Barrieren zu verbessern. Grundsätze wie Integrität, Transparenz und Reziprozität sind international akzeptierte Leitprinzipien der Wissenschaft. Sie kann im besten Fall Brücken bauen und zu Frieden und Völkerverständigung beitragen. Die Wissenschaft soll dem Wohlergehen aller Völker und einer nachhaltigen Zukunft dienen – so formulierten es die Wissenschaftsminister:innen der G7-Staaten 2022 in Frankfurt. Aber ist es ein Naturgesetz, dass Wissenschaft international sein muss und dass gleichsam automatisch „Wissenschaft als Mittel zur Verständigung der Völker“ dienen kann?

Unter dieser Überschrift erklärte der durch seinen Beitrag zur Quantenphysik berühmt gewordene Werner Heisenberg, der freilich auch am deutschen „Uranprojekt“ beteiligt war, im Juli 1946 den Studierenden der jüngst wiedereröffneten Göttinger Universität, dass man es sich nicht zu leichtmachen dürfe, hatte man doch gerade noch im „Dritten Reich“ ver-

sucht, Wissenschaft als national und durch „Rasse“ bedingt zu definieren. Dennoch fand Heisenberg die Internationalität und völkerverbindende Kraft insbesondere der Physik einerseits darin, „dass sie den Blick zu dem zentralen Bereich wendet, von dem aus sich die Welt im Ganzen ordnet, vielleicht also einfach dadurch, dass sie schön ist.“ Zum anderen aber hat die Wissenschaft „durch ihre praktischen Auswirkungen tatsächlich einen größeren Einfluss auf das Leben der Völker. Wohlstand und politische Macht hängen von dem Stand der Wissenschaft ab, und an diesen praktischen Konsequenzen kann die Wissenschaft auch dann nicht vorbeigehen, wenn ihr eigenes Interesse an der Wissenschaft aus anderen und reineren Quellen fließt.“

Im Kern begründete für Heisenberg die Universalität wissenschaftlicher Erkenntnis, wie sie sich etwa im Verständnis physikalischer Phänomene zeigt, die menschenverbindende Kraft der Wissenschaft (eine Idee, die sich schon bei Max Planck findet), und nicht deren segensreiche Anwendungen. Ihre Bedeutung für Wohlstand und Lebensqualität gibt der Wissenschaft dennoch einen besonderen Hebel, auch diplomatisch zu wirken.

„WISSENSCHAFT IST DIE BASIS, UM SACHLICH UND VORURTEILSFREI INTERNATIONAL ZUSAMMENZUARBEITEN.“

Wie die internationale Zusammenarbeit in der Praxis aussieht, haben Rolf Heuer (ehemaliger CERN-Generaldirektor) und Karin Zach (DPG-Vorstandsmitglied für internationale Aktivitäten) in einem Videobeitrag für dieses Buch dargestellt. Schauen Sie online das gesamte Video an.

Am Beispiel des 1954 gegründeten CERN und des 2008 eingeweihten SESAME in Jordanien verdeutlichen Karin Zach und Rolf Heuer, dass international betriebene Wissenschaft mehr ist als die Zusammenarbeit verschiedenster Forscher:innen. Mit der Logik als Grundlage der Physik und einer gemeinsamen Fragestellung lassen sich kulturelle Grenzen überwinden und ein Mehrwert aus den unterschiedlichen Denkweisen und Erfahrungswerten Menschen unterschiedlichster Herkunft ziehen. Wenn Forschung mit einem gemeinsamen Ziel auf Augenhöhe betrieben wird, schafft sie eine gemeinsame Ebene und überwindet Grenzen. Viele Fragen in der Wissenschaft sind nämlich nicht national lösbar, erklärt Karin Zach. Heute arbeiten am CERN 12000 Wissenschaftler:innen aus 110 Ländern zusammen. Im SESAME in Jordanien sitzen Forschende aus Israel und Palästina zusammen an einem Tisch und arbeiten unabhängig vom politischen Geschehen in ihren Herkunftsländern an Fragestellungen der Physik, so Heuer. Die Geschichte zeigt: Schon im

kalten Krieg war gemeinsam betriebene Wissenschaft das verbindende Element, und auch heute kann sie diplomatische Kanäle öffnen und Horizonte erweitern.



<https://physik-erkenntnisse-perspektiven.de/heuer-zach>



UNESCO Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur (gegründet 1945).

ALLEA All European Academies ist ein Zusammenschluss von Akademien der Wissenschaften und ähnlichen Einrichtungen in Europa (gegründet 1994).

IUPAP Internationale Union für reine und angewandte Physik, eine internationale Nichtregierungsorganisation zur Förderung und Vereinheitlichung der Physik (gegründet 1922).

Der internationale Charakter physikalischer Forschung

Die Notwendigkeit für gemeinsame internationale Projekte liegt heute freilich in der Komplexität der Herausforderungen begründet: Einige Forschungsbereiche, wie die Antarktisforschung oder die Ozeanografie, sind ohne internationale Kollaboration bei Messungen und Experimenten und ohne die Vernetzung von Forschungsstationen auf verschiedenen Kontinenten nicht möglich. Im Angesicht neuer globaler Herausforderungen – wie etwa dem Klimawandel, den Auswirkungen neuer Technologien oder auch Pandemien – wird offenkundig, dass sich solche Probleme nur gemeinsam lösen lassen.

Ein gewichtiger Grund für die internationale Zusammenarbeit sind auch die mit der Forschung verbundenen Kosten, die Staaten nicht einzeln tragen können oder wollen, so etwa bei Großgeräten wie Teleskopen, Teilchenbeschleunigern oder Fusionsreaktoren. Die Internationale Raumstation ISS oder die Fusionsanlage ITER haben allein durch ihre herausgehobene Lage und kollaborative Organisation eine völkerverständigende Rolle. Ein besonderes Beispiel ist das Synchrotron SESAME in Jordanien, an der Wissenschaftler:innen verfeindeter Länder aus dem Nahen Osten gemeinsam forschen. Solche internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit nimmt den Charakter von Diplomatie an, wenn hier Wissenschaftler:innen eine gemeinsame Sprache sprechen, sich zu Neutralität und Objektivität verpflichtet fühlen und naturwissenschaftlichen Gesetzen und Prinzipien folgen, die überall gültig und nicht national gebunden sind.

Inzwischen ist „Science Diplomacy“ oder Wissenschaftsdiplomatie zu einem oft benutzten Begriff geworden. Internationale Organisationen haben ihre Bedeutung seit etwa 15 Jahren erkannt, insbesondere die britische Royal Society und die American Association for the Advancement of Science (AAAS). Letztere gründete 2008 ein „Center for Science Diplomacy“ und gibt die Zeitschrift „Science Diplomacy“ heraus. Die Europäische Union hat eine „Science Diplomacy Alliance“ gegründet und Workshops zu dem Thema durchgeführt. Das Auswärtige Amt der Bundesrepublik Deutschland hat im Dezember 2020 ein Konzept zur Außenwissenschaftspolitik beschlossen, „um das Kooperationsverhältnis zwischen Außenpolitik, Wissenschaft, Citizen Science und Wissenschaftskommunikation im internationalen Prozess zu verankern.“

Drei Dimensionen von Wissenschaft und Diplomatie

Zur Konkretisierung des heute immer stärker benutzten Begriffs „Science Diplomacy“ ist die Unterscheidung von drei Dimensionen hilfreich:

„Wissenschaft in der Diplomatie“ umfasst die Nutzung wissenschaftlicher Methoden und Erkenntnisse zur Unterstützung der jeweiligen nationalen Außenpolitik. Beispielsweise sind Wissenschaftler:innen im Rahmen mancher Projekte im diplomatischen Dienst tätig oder werden zu Verhandlungen hinzugezogen, bei denen eine wissenschaftliche Expertise notwendig ist, wie etwa beim Nichtverbreitungsvertrag von Nuklearwaffen (siehe Seite 326). Da Staaten im Allgemeinen unterschiedliche außenpolitische Schwerpunkte haben, unterstützen sie entsprechend wissenschaftliche Beziehungen vor allem zu ausgewählten Staaten. In manchen technologie-relevanten Themenfeldern ist es von zentraler Bedeutung, dass wissenschaftliche und technische Prinzipien und Entwicklungsoptionen von Akteur:innen in Diplomatie und Parlamenten auch im Detail verstanden werden, weshalb hier aktive Aufklärungsarbeit notwendig ist.

In Demokratien hat eine „öffentliche Wissenschaft“ die Aufgabe, bei neuen Erkenntnissen die Öffentlichkeit ebenso wie die Politik auf mögliche problematische Folgen hinzuweisen. Auch wenn die auf Grundlagenforschung beruhenden Entwicklungen oft schwer abzuschätzen sind, sind es zuerst Wissenschaftler:innen, die fundiert die Entwicklungspfade und Verwertungskonsequenzen durchdenken. Freilich haben die meisten Forschenden kaum Zeit und nicht immer Motivation dafür, doch geeignete Institutionen können hier durch Gutachten wertvolle Dienste leisten. So gibt es das in Berlin angesiedelte „Büro für Technik-Folgenabschätzung beim Deutschen Bundestag“ und in Bezug auf Fragen der Innovationsfähigkeit und Risiken für Mensch und Gesellschaft die naturwissenschaftliche Friedensforschung.

„Diplomatie für die Wissenschaft“ ist der Bereich, den Wissenschaftler:innen im täglichen Betrieb in erster Linie vor Augen haben: die internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit. Dieser beschreibt die diplomatische Unterstützung für internationale Großprojekte wie beispielsweise das Forschungszentrum CERN, das Gravitationswellenobservatorium LIGO oder SESAME. Bi- und multilaterale Gespräche und Verhandlungen sollen internationale Kollaborationen mit anderen Staaten und aufgeschlossenen Akteur:innen ermöglichen. Internationale Großprojekte tragen durch die gemeinsame Arbeit von Hunderten oder gar Tausenden von Forschenden aus verschiedensten Ländern direkt zum gegenseitigen Verständnis für kulturelle Besonderheiten und Denkweisen und damit zur Verständigung zwischen den Völkern bei.

Oft wird zu dieser Kategorie die Nutzung von Wissenschaft zur Verbesserung internationaler und nationaler Zusammenarbeit im Rahmen wissenschaftsinduzierender Entwicklungspolitik durch Organisationen wie die UNESCO, ALLEA

oder IUPAP gerechnet. Auf nationaler Ebene tragen Organisationen wie der Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD) und die Humboldt-Stiftung aktiv dazu bei, indem sie Forschenden Auslandsaufenthalte finanzieren und somit internationale Kontakte ermöglichen sowie Fragen zur Wissenschaftsmobilität oder zur Bildung von neuen Netzwerken über Ländergrenzen hinweg diskutieren und gegebenenfalls realisieren.

Dieses Konzept wurde insbesondere von der Royal Society, der AAAS und der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verfolgt. Sie identifizierten diverse Absichten einzelner Akteure (Staaten, internationale Organisationen, Nichtregierungsorganisationen), neue Aktionsfelder und Umsetzungen, in denen die Wissenschaften mit ihrer Expertise eine wichtige Rolle spielen können. Ausgehend von der jeweiligen nationalen Sicht gibt es bezüglich der Auswahl von Themen und Handlungsfeldern naturgemäß Unterschiede.

Als „Wissenschaft für die Diplomatie“ kann man den Beitrag von Wissenschaftsorganisationen und Wissenschaftler:innen zur Verbesserung der internationalen Beziehungen zwischen Ländern und aktive Versuche von Konfliktlösungen bezeichnen. Die Leopoldina formuliert das derzeit folgendermaßen:

„Wenn offizielle Kanäle eingeschränkt sind, kann die Wissenschaft helfen, Vertrauen wiederherzustellen und Glaubwürdigkeit aufzubauen. Gleichzeitig trägt die Wissenschaftsdiplomatie zur Vertiefung bestehender Partnerschaften und zum besseren gegenseitigen Verständnis in den internationalen Beziehungen bei. Sie ermöglicht einen konstruktiven Dialog über nationale und kulturelle Grenzen hinweg [...] Wissenschaftsdiplomatie unterstützt zudem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in aller Welt, die Unterdrückung und Menschenrechtsverletzungen ausgesetzt sind. Eine weitere Dimension besteht darin, wissenschaftliche Expertise zur Überwindung globaler Herausforderungen und akuter Krisen zu nutzen.“

Historisch geht diese Perspektive auf die „Pugwash Conferences on Science and World Affairs“ zurück, die seit 1957 stattfinden, also bereits früh im Kalten Krieg begannen. Hier wurden (wie auch bei einigen nationalen Akademien der Wissenschaften, etwa der USA, Russlands und Chinas) über lange Zeit Hintergrundgespräche geführt und Rüstungskontroll- und Abrüstungsvereinbarungen vorbereitet. Auch die Internationale Atomenergie-Organisation IAEA entstand unter anderem in diesem Rahmen. Das war möglich, da sich Wissenschaftler:innen politisch unverdächtig über die Blockgrenzen hinweg treffen konnten, eine gemeinsame Sprache hatten und humanitäre Verantwortung übernahmen. Oft ist ein genaues Verständnis für die Nutzung jeweils aktueller Technologien notwendig, etwa um ein teures und gefährliches Wettrennen zu verhindern. Im Kalten Krieg und in der Folgezeit brachte Pugwash Wissenschaftler:innen, Entscheidungsträger:innen und Expert:innen zur Konfliktlösung in Bereichen zusammen, in denen der Einsatz von Massenvernichtungswaffen, insbesondere von Nuklearwaffen, eine offensichtliche Gefahr darstellte.

Die Erfolge dieses Ansatzes wurden mit dem Friedensnobelpreis von 1995 honoriert. Das Pugwash-Netzwerk gibt es bis heute und es erscheint vor dem Hintergrund aufflammender Konflikte und Spannungen wichtiger denn je.

Neue Herausforderungen in der Geopolitik

Die Wissenschaftsdiplomatie steht in Zeiten zunehmender Spannungen und Konflikte vor neuen Herausforderungen: Der Verdrehung von Fakten, dem bewussten Platzieren von Falschinformationen oder der konstanten Manipulation von Wahrheiten muss auch von wissenschaftlicher Seite widersprochen werden, gerade da, wo wissenschaftliche Grundlagen im Spiel sind. In Diktaturen gelangen auch Wissenschaftler:innen zunehmend unter Druck. Fast zwanzig Physikfachgesellschaften und internationale Organisationen haben im Jahr 2023 das Grundsatzpapier „Prinzipien und Politiken für internationale wissenschaftliche Kollaborationen“ verabschiedet, das das Prinzip der Integrität für faire, offene und vertrauensvolle Forschung, Transparenz zwischen allen Partnern und Gegenseitigkeit beim Austausch von Wissen und Material anstrebt.

Die Wissenschaft sollte sich nicht durch geopolitische Rivalitäten instrumentalisieren lassen, sondern muss basierend auf ihren eigenen Kontakten zu Frieden und Völkerverständigung beitragen. Daher dürfen auch in der aktuellen Situation funktionierende Wissenschaftsnetzwerke und der internationale Charakter von Projekten nicht zerstört werden. Schließlich muss auch in die künftige Generation von Forschenden und in kommende gesellschaftliche Diskurse investiert werden, bei denen die Wissenschaft selbst eine wichtige Rolle spielt. Die Freiheit wissenschaftlichen Denkens sowie ideologisch unverbaute und rationale Dialoge sind gerade dann nötig, wenn es um komplexe Konflikte und Probleme geht. Gleichzeitig tragen die wissenschaftliche Gemeinschaft als Ganzes wie auch unabhängige Einzelpersonen und Forschungseinrichtungen eine besondere Verantwortung dafür, der Gesellschaft zu helfen, etwa die Auswirkungen von destabilisierenden Entwicklungen besser zu verstehen und gefährliche Risiken für die Menschenwürde, das Leben, die Gesundheit, die Freiheit, die Demokratie, das Eigentum und die Umwelt zu begrenzen. Diese Punkte müssen in die Ausbildung junger Wissenschaftler:innen einbezogen werden. Ebenso ist es Aufgabe der Wissenschaft, sich mit ihrem Faktenwissen an öffentlichen Debatten zu kritischen Themen zu beteiligen und selbst Position zu beziehen. Dies spiegelt sich auch in der Satzung der DPG wider, in der ihre Mitglieder verpflichtet werden, für „Freiheit, Toleranz, Wahrhaftigkeit und Würde in der Wissenschaft einzutreten.“ Darüber hinaus unterstreicht die Satzung eine besondere Verantwortung, sich „bewusst zu sein, dass die in der Wissenschaft Tätigen für die Gestaltung des gesamten menschlichen Lebens in besonders hohem Maße verantwortlich sind.“

Götz Neuneck, Arne Schirmacher und Karin Zach



TECHNIKFOLGEN UND GESELLSCHAFT

Technologien verändern unsere Gesellschaft. Auch die Physik hat deshalb eine besondere gesellschaftliche Verantwortung, mögliche Technikfolgen offen zu kommunizieren und zu diskutieren.

Ob es um die Geheimnisse des Universums, die Ausbreitung von Aerosolen in der Covidpandemie, den Klimawandel oder das Higgs-Teilchen geht: Die Physik wird von der Gesellschaft primär aufgrund ihrer grundlegenden Erkenntnisleistungen geschätzt. Nicht zufällig haben einige Physiker:innen als Welterklärer mediale Prominenz und Physik-Nobelpreise sorgen stets für neue Aufmerksamkeit.

Dieses der Physik entgegengebrachte Vertrauen bedarf eines verantwortungsvollen Umgangs. Das impliziert auch eine erkenntnistheoretische Bescheidenheit, mit der die gelegentlich an Physiker:innen herangetragenen Wünsche nach allumfassender Welterklärung und -deutung diskutiert werden müssen. Die fortschreitenden Erkenntnisse der Physik beziehen sich auf das, was ihren Methoden zugänglich ist. So erzeugtes Wissen wiederum generiert neue Erkenntnisse und eröffnet technische Möglichkeiten, die in der modernen Welt stets Eigendynamiken entwickeln und auch in Zukunft entwickelt werden.

Zwischen Erkenntnis und Anwendung

Auch wenn Technik oft als „angewandte Physik“ entsteht, z. B. in Bereichen wie der Nanotechnologie, Energiekonversion oder Raumfahrt, erschöpft sich ihre Rolle als Anwendung naturwissenschaftlichen Wissens darin nicht. Vielmehr hat Technik auch eine ermöglichende Rolle in der physikalischen Forschung, z. B. in der Nutzung digitaler Technologien für die Datenauswertung oder in großen experimentellen Anlagen: So arbeitet der Large Hadron Collider (LHC) am CERN trotz seines riesigen Technikbedarfs primär erkenntnisorientiert. Insofern unterstützt die Physik einerseits den technischen Fortschritt durch neue und technisch nutzbare Erkenntnisse, ohne dass der technische Fortschritt selbst ihr Hauptanliegen ist. Andererseits profitiert sie von diesem Fortschritt und ist sogar auf ihn angewiesen.

Physik und Technik sind also in gewisser Weise zwei Seiten der gleichen Medaille, wobei die technische mit all ihren Konsequenzen in Medien und Gesellschaft weniger präsent ist: Oft erscheint die technische Seite der Physik hauptsächlich als zukünftige Möglichkeit, nicht als gegenwärtige Realität. Damit ist die Physik weniger von direkten gesellschaftlichen Auseinandersetzungen um neue Technologien betroffen als die Technikwissenschaften. Während naturwissenschaftliches Weltwissen große Anerkennung genießt, ist die Akzeptanz von Technik in der modernen Gesellschaft nicht umstandslos gegeben. Zwar lässt sich die verbreitete Rede von einer generellen Technikskepsis oder sogar -feindlichkeit in

Deutschland empirisch nicht erhärten. Dennoch ist die Haltung kritischer geworden als etwa in den Wirtschaftswunderjahren mit den Verheißungen des Atomzeitalters oder der damaligen Euphorie um Kunststoffe.

Dos and Don'ts der Risikokommunikation

Einer der härtesten Gesellschaftskonflikte der bundesdeutschen Geschichte war in dieser Hinsicht der Streit um die Kernenergie. Auf der einen Seite standen Entscheider:innen aus der Politik und später auch aus der Wirtschaft, unterstützt durch die Natur- und Ingenieurwissenschaften. Auf der anderen Seite befanden sich die Betroffenen – zunächst oft Anwohner:innen an den realisierten oder geplanten Nuklearstandorten wie Wylh, Kalkar, Gorleben oder Wackersdorf, dann aber auch beträchtliche und wachsende Teile der deutschen Bevölkerung. Dieser Konflikt hat zu Verletzungen und Verhärtungen geführt, die teils bis heute wirken und die Frage aufwerfen, welche Lehren sich daraus ziehen lassen.

Es ist sicher nicht falsch, in der frühen Kernenergie-debatte auch Kurzsichtigkeit und Technikgläubigkeit der Nuklearexpert:innen, damals fast sämtlich Befürworter:innen, festzustellen. Kritiker:innen wurden oft als irrational, vorgestrig oder unwissend dargestellt. Auf diese Weise ging Vertrauen verloren. Man kann aus der Risikodebatte zur Kernenergie lernen, wie wichtig Vertrauen zu Institutionen und Personen ist, und wie zentral dafür wiederum eine offene Kommunikation ist.

Dass eine offene Kommunikation gelingen kann, hat die Nanotechnologiedebatte vor etwa 20 Jahren gezeigt, an der Physiker:innen ebenfalls maßgeblich beteiligt waren. Es gab Befürchtungen, ihr könne ein ähnliches Desaster in Bezug auf die öffentliche Akzeptanz drohen wie der Kernenergie. Dass dies nicht eintrat, lag zumindest teilweise an einer offenen und partizipativen Risikokommunikation. Hier wurden, anders als in der frühen Kernenergie-debatte, Kritiker:innen nicht pauschal als „uninformiert“ angesehen, sondern es wurde offen über mögliche Risiken und Verantwortung diskutiert. Das schaffte Vertrauen. Man könnte paradox formulieren: Weil alle Seiten offen über Nichtwissen und mögliche Risiken diskutierten, blieb die Debatte konstruktiv.

Chancen durch Technikfolgenabschätzung

Beide Beispiele zeigen, dass moderne Gesellschaften den technischen Fortschritt hinterfragen, z. B. nach nicht intendierten Folgen, nach Nachhaltigkeit und nach möglichen Gewinnern und Verlierern. Eine vorausschauende Analyse und

◀ *Die Reaktorkatastrophe von Tschernobyl 1986 hat noch immer praktische Auswirkungen. Die neue Schutzhülle (hier im Jahr 2013 ganz links im Bild, noch bevor sie 2016 auf ihre endgültige Position gebracht und 2019 fertiggestellt wurde) soll für hundert Jahre halten. Spätestens dann muss man sich der Eindämmung der noch immer gefährlichen Ruine erneut annehmen.*

die Bewertung von Technikfolgen sind unerlässlich, um Chancen frühzeitig erkennen und Risiken vermeiden oder minimieren zu können. Eine wissenschaftliche Disziplin – die Technikfolgenabschätzung (TA) – erforscht daher Technikfolgen prospektiv. Sie erarbeitet Strategien zum verantwortlichen Umgang mit den oft auftretenden Ambivalenzen und Unsicherheiten und bringt dieses Wissen in Entscheidungsprozesse ein, z. B. im Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) oder in der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech). Das TAB beispielsweise erstellt auf wissenschaftlicher Grundlage orientierende Studien für das Parlament, darunter immer wieder auch mit engem Bezug zur Physik, etwa in den Feldern Energiewende, Digitalisierung und Rüstung.

Die TA ist in sich interdisziplinär und umfasst sowohl Natur- und Technikwissenschaften als auch Sozialwissenschaften und Ethik. Am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) beispielsweise sind drei der vier Personen in der Institutsleitung Physiker:innen. Oft haben TA-Forschende eine zweite universitäre Ausbildung in einer Sozial- oder Geisteswissenschaft, teils haben sie sich das erforderliche Wissen in der Praxis angeeignet. Aktuelle Felder der TA, in denen Kompetenz aus der Physik besonders gefragt ist, sind vor allem die Quantentechnologien, insbesondere das Quantencomputing, das weiterhin umstrittene Climate Engineering als technischer Eingriff in das Klimasystem und die Kernfusion als mögliche Energieoption, aber auch interdisziplinär entstandene Schnittstellenbereiche wie Biophysik und Medizinphysik mit den jeweiligen technologischen Entwicklungen.

Technikfolgen sind nicht einfach Folgen der Technik, sondern Folgen ihrer Nutzung in der Wirtschaft, im Konsum, in der Mobilität etc. – also Ergebnis menschlichen Handelns in Verbindung mit Technik und Wissenschaft. Methodische Sorgfalt ist entscheidend, um in den vielfachen Gemengelagen interdisziplinärer Wissensbestände, die dazu noch auf die Zukunft bezogen werden, Nachvollziehbarkeit und erkenntnistheoretische Transparenz zu sichern.

Dies betrifft insbesondere die Kommunikation mit und die Einbeziehung von gesellschaftlichen Akteur:innen. Hier gilt es zum einen, Wirtschaft, Behörden und zivilgesellschaftliche Gruppen, national wie international, einzubeziehen. Zum anderen kommt die TA den seit den 1980er-Jahren gestiegenen Mitwirkungsansprüchen der Bevölkerung durch partizipative Verfahren und Bürgerbeteiligung nach. Diese beziehen sich häufig auf Standortfragen, so etwa in Bezug auf die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle oder zum Verlauf von Hochspannungstrassen. Andere stellen neue Technologien wie z. B. soziale Roboter oder autonomes Fahren in sogenannten Reallaboren in gesellschaftliche Zusammenhänge, um neue Kooperationsformen von Mensch und Technik zu erproben. Die Beteiligung von Personen und Gruppen außerhalb von

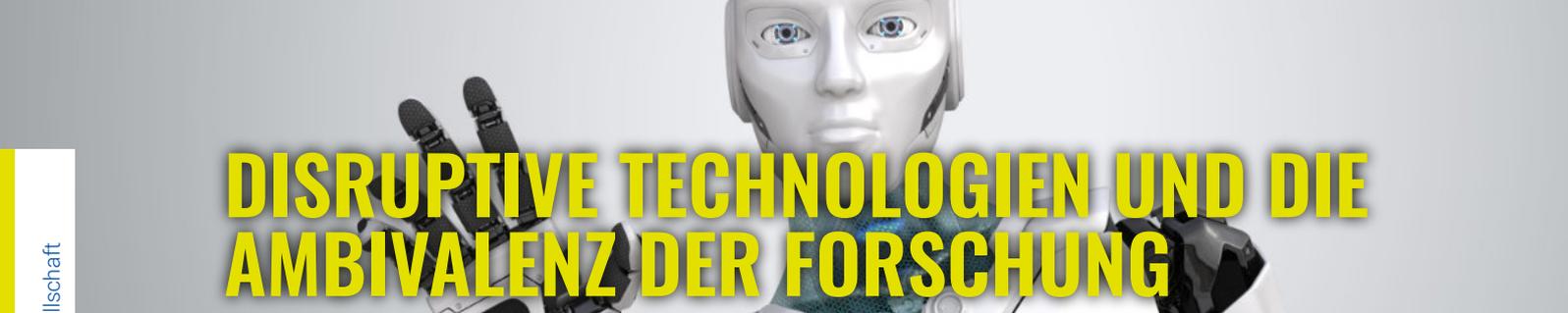
Wissenschaft und Politik soll die sachliche und politische Legitimation von Technikentscheidungen verbessern, aber auch das lokale Wissen zivilgesellschaftlicher Gruppen und ihre Perspektiven in die Bewertung einbringen.

Dies führt zunächst vom Kerngeschäft der Physik weit weg. Andere Elemente der TA wie komplexe Modellierungen, Simulationen oder systemanalytisch fundierte Szenarien oder Fallstudien liegen ihr sicher näher. Wichtiger in der TA ist vermutlich die Fähigkeit, komplex zu denken, Komplexität zu reduzieren und Problemlösungen zu erarbeiten. Wenn sich also TA zwar nicht als Physik betreiben lässt, ist die Kompetenz von Physiker:innen hier sehr hilfreich. Und umgekehrt ist es für Physiker:innen wichtig, bei ihrer Arbeit beide Seiten derselben Medaille – Physik und Technik – im Auge zu behalten. Die TA sollte deshalb auch Bestandteil der Lehre sein.

Armin Grunwald

Unsere heutige Technik bestimmt die Zukunft der nachfolgenden Generationen, für deren Lebensqualität wir verantwortlich sind.





DISRUPTIVE TECHNOLOGIEN UND DIE AMBIVALENZ DER FORSCHUNG

Die rasante Entwicklung von Technologien wie künstlicher Intelligenz und Quantentechnologien verändert unser Leben grundlegend. Doch Fortschritt birgt auch Risiken: Die Nutzung für zivile und militärische Zwecke und weitere ethische Dilemmata stellen Wissenschaftler:innen vor große Herausforderungen.

Für viele Menschen deutlich sichtbar beschleunigt sich der wissenschaftlich-technische Fortschritt weiter. Neue Materialien, Energiesysteme oder digitale Technologien verändern unser tägliches Leben. Die Physik ist daran, ebenso wie andere Disziplinen, mit Innovationen und bahnbrechenden wissenschaftlichen Erkenntnissen beteiligt. Diese fußen auf grundlegender und angewandter Forschung. Auch ist von neuen „disruptiven“ Technologien die Rede. Darunter versteht man zukunftsweisende Entwicklungen, die bereits existierende Technologien, Produkte oder Dienstleistungen ersetzen oder diese vom Markt verdrängen. Genannt werden heute insbesondere die künstliche Intelligenz oder die Quantentechnologien. Moderne KI-Systeme basieren fast ausschließlich auf künstlichen neuronalen Netzwerken. Das sind Netzwerke, die aus einzelnen, miteinander verknüpften Einheiten bestehen und mithilfe von Daten selbst lernen können. Quantentechnologien nutzen die Gesetze der Quantenmechanik. Ziele sind hier u. a. der Bau von superschnellen Quantencomputern, neuen höchst empfindlichen Sensoren und verschlüsselter Kommunikation. Viele künftige Entwicklungen haben ein enormes wirtschaftliches Potenzial und sind das Ergebnis von Grundlagenforschung.

Anwendung – für welche Zwecke?

Die oft nicht voraussagbaren Ergebnisse von Grundlagenforschung und angewandter Forschung bringen viele wirtschaftlich und gesellschaftlich lukrative und faszinierende Anwendungschancen mit sich, die aber auch neue Risiken, Missbrauchsmöglichkeiten und militärrelevante Anwendungen beinhalten. Die Forschenden sind dabei im Prinzip die ersten, die mögliche Konsequenzen ihrer Ergebnisse einschätzen können. Die schnellen Technologiezyklen, nationale Wettbewerbe, lukrative Verwertungsangebote oder die schnelle Weiterverbreitung von Erkenntnissen erschweren dabei eine gezielte und interdisziplinäre Technologiefolgenabschätzung. Die Ergebnisse von Grundlagenforschung sind ambivalent, d. h. sie können zu einer konflikthaften, von gegensätzlichen Aspekten geprägten Bewertung eines Forschungsergebnisses führen. Klassische Beispiele sind die Nutzung der Kernkraft für zivile (Reaktoren) wie militärische Zwecke (Atombombe) oder die Entschlüsselung der DNS und damit die Möglichkeit der Manipulation von Genen und die Schaffung biologischer Waffen (Stichwort: CRISPR-CAS). Die Konsequenzen solcher Entwicklungen sind sehr schwer vorzusehen, denn wenn solche Ergebnisse öffentlich werden oder die jeweiligen Technologien proliferieren, steigt auch das Missbrauchspotenzial durch andere.

Oft wird auch von Doppelverwendbarkeit („Dual-Use“) gesprochen. Hierunter versteht man allgemein die Verwendbarkeit von Technologien, Gütern oder Software sowohl für zivile als auch für militärische Zwecke. Dies ist besonders für die nationale und europäische Rüstungsexportkontrolle von Bedeutung, da bestimmte Technologien oder Baupläne nicht in die Hände anderer Staaten gelangen sollen, insbesondere im Bereich von Massenvernichtungswaffen, deren Entwicklung, Besitz und Einsatz Deutschland durch internationale Verträge und Kontrollregime verboten ist. International geregelte Güter sind in der Außenwirtschaftsverordnung und der EU-Dual-Use-Verordnung aufgelistet. Forscher:innen haben die Pflicht, sich darüber zu informieren, was in manchen Anwendungsfeldern, wie etwa der Softwareentwicklung, nicht einfach ist. Zudem haben Universitäten und Forschungseinrichtungen in Bundesländern Zivilklauseln beschlossen, die betonen, ausschließlich für zivile und nicht für militärische Zwecke zu forschen. Der Artikel 26.1 des Grundgesetzes hebt hervor, dass „Handlungen, die geeignet sind und in der Absicht vorgenommen werden, das friedliche Zusammenleben der Völker zu stören, insbesondere die Führung eines Angriffskrieges vorzubereiten, verfassungswidrig“ sind und unter Strafe stehen. Freiheit von Lehre und Forschung hingegen sind im Artikel 5 unserer Verfassung festgeschrieben.

Ethische Bewertungsmaßstäbe

Aus der Wissenschaftsfreiheit und dem Wissen über potenziell schädliche Entwicklungen leitet sich aber auch eine besondere Verantwortung der Wissenschaft ab. Die Leopoldina und die DFG haben 2014 und 2022 Empfehlungen zum Umgang mit sicherheitsrelevanter Forschung veröffentlicht, um das Problembewusstsein und die Bewertungskompetenz der Forschergemeinschaft zu stärken. Es geht also nicht nur um späteren militärischen oder zivilen Dual-Use, sondern auch um Multipurpose-Use-Anwendungen (Mehrzweckanwendungen) in verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen, da wissenschaftliche Entwicklungen für viele Teile der Gesellschaft sicherheitsrelevant sein können. Die deutsche Wissenschaft setzt hier auf Eigenverantwortung und Selbstregulierung. Zu diesem Zweck wurden von der Leopoldina sowohl ein gemeinsamer Ausschuss als auch bei bestimmten Institutionen „Kommissionen für die Ethik sicherheitsrelevanter Forschung“ (KEF) gegründet (siehe auch „Ethik in der Forschung“ auf Seite 327). Hier wird insbesondere von „besorgniserregender sicherheitsrelevanter Forschung wissenschaftlicher Arbeiten“ gesprochen, „bei der die Möglichkeit besteht, dass sie Wissen, Produkte oder Technologien hervorbringen, die unmittelbar von Dritten missbraucht werden

können, um Menschenwürde, Leben, Gesundheit, Freiheit, Eigentum, Umwelt oder friedliches Zusammenleben erheblich zu schädigen.“ In den letzten Jahren wurden neben Richtlinien zudem Checklisten zur ethischen Bewertung sicherheitsrelevanter Forschung erarbeitet, Schulungs- und Informationsmaterialien entwickelt und die Kompetenzbildung weiter vorangetrieben. Das Thematisieren ethischer Fragestellungen in der wissenschaftlichen Lehre kann hier frühzeitig Gefahren vorbeugen und die späteren Forscher:innen auf mögliche Zielkonflikte und Dilemmata vorbereiten, schließlich geht es auch um die Sicherheit von Forscher:innen selbst.

2017 hat die Max-Planck-Gesellschaft „Hinweise und Regeln der Max-Planck-Gesellschaft zum verantwortlichen

Umgang mit Forschungsfreiheit und Forschungsrisiken“ erarbeitet. Hier wird betont: „Eine erfolgreiche Grundlagenforschung erfordert weiter die Transparenz, den freien Informationsaustausch sowie die Veröffentlichung von Forschungsergebnissen.“ Hier sind Zielkonflikte und Dilemmata möglich und eine Risikominimierung geboten.

Sicherheitsrelevante Forschung

Forschungsbereiche, die ein besonderes Risikopotenzial in Bezug auf die internationale Sicherheit haben, sind laut eines aktuellen Berichts des Generalsekretärs der Vereinten Nationen: künstliche Intelligenz (Mustererkennung, maschinelles Lernen) und Autonomie, Quantentechnologien (Quantencomputer), unbemannte Waffensysteme, Bioinformatik und synthetische Biologie, digitale Technologien (Cyberangriffe), Materialtechnologien, Weltraumtechnologien oder elektromagnetische Erzeugung von Strahlung wie z. B. Laserlicht. Hier wird die Integration von Technologieanalysen und Nutzen-Risiko-Überprüfungen von besonders schädlichen Ent-



„Aggregat 4“ und „Vergeltungswaffe 2“ – die Zeit der Raumfahrt nahm in der Heeresversuchsanstalt Peenemünde vor und während des 2. Weltkriegs ihren Anfang. Die Finanzierung der Arbeiten beruhte darauf, dass die Raketen als verheerende Waffe gegen London eingesetzt wurden. Der Kopf des deutschen Raketenwaffenprogramms, Wernher von Braun, leitete später die Entwicklung der Mondraketen der NASA. Ambivalenz, sowohl im Forschungsinhalt als auch in der Person.

em Informationsaustausch und der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse lebt und Militärforschung Geheimhaltung erfordert, die ein offener Wissenschaftsbetrieb nicht einhalten kann.

Götz Neuneck

wicklungen im Forschungsprozess durch verantwortliche Staaten eingefordert.

In den letzten Jahren – besonders nach Beginn des Angriffs Russlands auf die Ukraine – ist unter dem Stichwort „Zeitenwende“ die Forderung erhoben worden, Universitäten und Forschungseinrichtungen sollten stärker in militärrelevante Forschung eingebunden werden. Angesichts der veränderten globalen Rahmenbedingungen sollte die strikte Trennung zwischen ziviler und militärischer Forschung und Entwicklung aufgelöst werden. Wenngleich eine gesellschaftliche Diskussion angesichts veränderter geopolitischer Situationen notwendig erscheint, so muss darauf verwiesen werden, dass Wissenschaft von Offenheit, einer kooperativen Forschungsatmosphäre, frei-

DIE BÜCHSE DER PANDORA

Das Wechselspiel von Rüstung und Abrüstung ist die Geschichte der Interaktion von Physik und Militär einerseits und von Physik und zivilgesellschaftlichem Engagement andererseits.

Im Dezember 1938 entdeckten Otto Hahn und Fritz Strassmann in Berlin die Kernspaltung des Uran-Atoms. Schnell wurde klar: Die dabei freiwerdende Energie lässt sich sowohl für friedliche als auch für militärische Zwecke verwenden. Im Zweiten Weltkrieg gelang den Physiker:innen im geheimen Manhattan-Projekt (1942–45) in Los Alamos (USA) mit enormen finanziellen und personellen Mitteln der Bau und der Test der ersten Atombombe. Zwei nach heutigem Maßstab „kleine Atombomben“ zerstörten im August 1945 die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki – mit verheerenden Folgen: Mehr als hunderttausend Menschen waren sofort tot, viele weitere starben an den Folgen des Bombenabwurfs – denn Atombomben setzen neben enormer Hitze und Druck auch schädliche radioaktive Strahlung frei. Einen Schutz gegen eine Atomexplosion gibt es bis heute nicht. Der Leiter des Manhattan-Projekts, Julius Robert Oppenheimer, sagte: „Die Physiker haben erfahren, was Sünde ist, und dieses Wissen wird sie nie mehr ganz verlassen.“

In der Nachkriegszeit scheiterten Bestrebungen, einen Rüstungswettlauf zwischen den Großmächten zu verhindern und die Weltgemeinschaft ausschließlich auf die friedliche Nutzung der Kernenergie einzuschwören. Im Gegenteil: Weitere Staaten sahen die Existenz der Atombombe als Bedrohung an und begannen mit der Entwicklung und Tests eigener Arsenale. Das militärische Nuklearzeitalter hatte begonnen.

Hochrüsten in der Nachkriegszeit

Im Kalten Krieg wurden Kernphysiker:innen, Ingenieur:innen und militärische Großprojekte ein zentraler, systematisch geförderter Faktor der „nationalen Sicherheit“. Neue, gut finanzierte Waffenlabore entstanden in den USA sowie in abgeschotteten Wissenschaftsstädten in der UdSSR. Die [Zahl der nuklearen Sprengköpfe](#) stieg in den 1960er- bis 1980er-Jahren drastisch an. Im Januar 1961 warnte US-Präsident Dwight D. Eisenhower vor einem verstärkten Wettrüsten auch aufgrund neuer technologischer Revolutionen. Besonders signifikante Beispiele für wissenschaftliche Projekte, die das Wettrüsten vorantrieben, sind der Bau der Wasserstoffbombe (1953–1955), die eine tausendfache Explosionssteigerung gegenüber der Hiroshimabombe ermöglicht, sowie die Entwicklung von Interkontinentalraketen, Atom-U-Booten und strategischen Bombern sowie anderen zielgenauen Trägersystemen, an deren Einsatzdoktrinen auch Wissenschaftler:innen beratend beteiligt waren. Sogenannte taktische Atomwaffen, die für den unmittelbaren Einsatz in Kriegsgebieten konstruiert wurden, wurden in Europa und Asien auch im Hinblick auf konventionell geführte Kriege sta-

tioniert. Das Wettrüsten dauerte bis in die 1990er-Jahre hinein. Physiker:innen und geheime Forschungseinrichtungen spielten dabei eine besondere Rolle.

Doch Physiker:innen haben auch schon seit jeher vor der nuklearen Aufrüstung gewarnt: Schon in Los Alamos und direkt danach versuchten bedeutende Nobelpreisträger wie Niels Bohr, Albert Einstein und Max Born eine künftige weltweite Atombewaffnung in weiteren Ländern durch hochrangige politische Kontakte, öffentliche Appelle, später durch Abrüstungsvorschläge und internationale Regelungen zu verhindern. Auch der Franck-Report vom 11. Juni 1945 warnte vor einem drohenden Wettrüsten und empfahl erste Kontrollmaßnahmen. Nach Kriegsende bestand in der Zeit des „uneingeschränkten Nuklearoptimismus“ die Hoffnung, durch internationale Regelungen die zivile Nutzung der Kernenergie global zu regeln. 1957 wurde die Internationale Atomenergie-Agentur, IAEA, als unabhängige Agentur der Vereinten Nationen gegründet, um weitere Länder mit dem Versprechen auf das Recht auf zivile Nutzung der Kernenergie vom militärischen Gebrauch der Kernenergie abzuhalten. Diese Initiative führte sowohl zur Weiterverbreitung der friedlichen, aber auch in einigen Fällen der militärischen Nutzung.

In ihrem Manifest vom 9. Juli 1955 riefen u. a. Albert Einstein und Bertrand Russell Regierungen, die breite Öffentlichkeit und die Wissenschaft auf, der nuklearen Bedrohung für die Menschheit mehr Beachtung zu schenken. Die Unterzeichner, darunter auch die Nobelpreisträger Max Born und Hideki Yukawa, forderten die Regierungen auf, „friedliche Mittel für die Beilegung ihrer Konflikte zu finden.“ Daraus resultieren die „Pugwash Conferences on Science and World Affairs“, in denen Wissenschaftler:innen seit ihrer Gründung 1957 bis heute Vorschläge zur nuklearen Risikoreduzierung, Konfliktlösung und Abrüstung diskutieren und erarbeiten. In den folgenden Jahrzehnten gelang es, basierend auf technischer Expertise und Analysen, Rüstungskontrollverträge vorzubereiten und anzuregen, besonders zwischen den USA und der UdSSR.

Wider die nukleare Bedrohung

Ein erster Schritt war das Verbot der Stationierung von Atomwaffen in verschiedenen Regionen, so in der Antarktis (1959), später im Weltraum (1967) und auf dem Meeresboden (1971). Dennoch nahm die Produktion von neuen Sprengköpfen auf neuen Trägersystemen weiter dramatisch zu. Als es im Zuge der Kubakrise im Oktober 1962 fast zu einem Atomkrieg zwischen der UdSSR und den USA kam, wurden danach

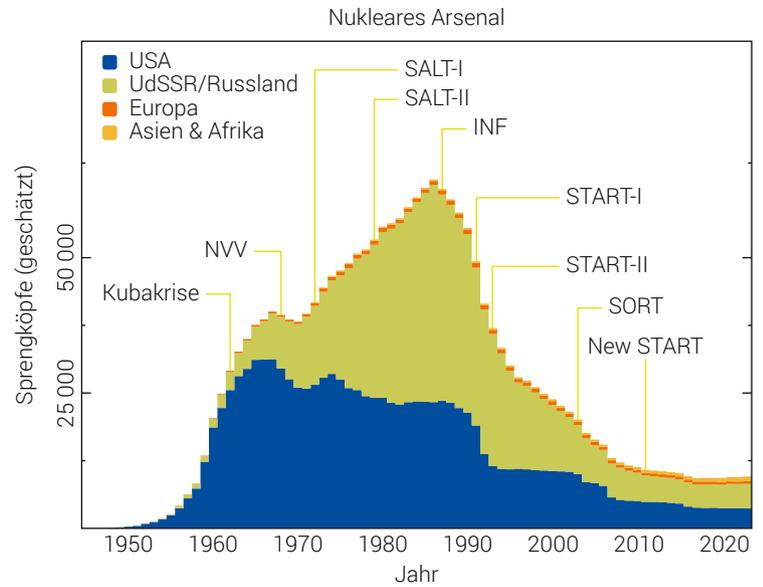
erstmalig Rüstungskontrollkonzepte von Wissenschaftler:innen entwickelt, um einen Atomkrieg aus Fehlkalkulation oder Irrtum auszuschließen. Rote Telefone und vertrauensbildende Maßnahmen wurden eingeführt, um eine weitere Kubakrise zu verhindern.

Ein weiterer Schritt zur Abrüstung waren die Begrenzung bzw. das Ende der teilweise wöchentlich stattfindenden überirdischen Atomtests und die Entwicklung von Technologien, um dies überprüfen zu können. 1963 verbot der „Begrenzte Teststoppvertrag“ Atomtests in der Atmosphäre, im Welt- raum und unter Wasser. Unterirdische Atomtests wurden aber weitergeführt. 1958 nahmen Fachleute aus zehn Staaten in Genf die Arbeit zur Entwicklung von seismischen Messverfahren auf, mit denen sich auch unterirdisch gezündete Nuklearladungen detektieren ließen. Hier wurden in internationaler Zusammenarbeit erstmalig die Randbedingungen und die Grundlagen für eine spätere Verifikation eines vollständigen Teststoppvertrags geschaffen. Die Frage nach adäquaten Technologien konnten wissenschaftliche Gruppen insbesondere auch dann weiterverfolgen, wenn der politische Prozess stagnierte. Dies führte einerseits zu weiteren technologischen Entwicklungen, wie seismischer Detektion, Hydro- oder Infraschallmessungen, und hatte andererseits einen vertrauensbildenden Effekt. Bis heute werden im Rahmen der IAEA Sicherungsmaßnahmen ausgearbeitet oder forensische Analysen von Nuklearmaterial durchgeführt.

Wissenschaftler:innen spielten bei der Begründung und Umsetzung des Vertrags über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (NVV), der am 5. März 1970 in Kraft trat, eine wichtige Rolle. Der NVV verpflichtet die traditionellen Nuklearwaffenstaaten zur Abrüstung und garantiert den 184 Staaten, die keine Nuklearwaffen besitzen, die friedliche Nutzung der Kernenergie. Ein umfassender Teststoppvertrag (Comprehensive Nuclear-Test-Ban-Treaty, CTBT) konnte 1996 geschaffen werden. Er ist immer noch nicht in Kraft, weil noch nicht alle beteiligten Staaten ihn ratifiziert haben. Der CTBT verfügt aber über ein globales Messsystem, das von Wien aus koordiniert wird. Global gilt ein weltweites Testtabu, an das sich lediglich Nordkorea nicht hält.

Gesellschaftliches Engagement der Wissenschaft

Vor dem Hintergrund des in den 1960er-Jahren begonnenen beispiellosen quantitativen wie qualitativen Wettrüstens zwischen den Blöcken haben besonders Physiker:innen aufgrund ihres Wissens versucht, Regierungen oder internationale Organisationen (z. B. die IAEA) zu beraten oder vertrauliche Gespräche über die Blöcke hinweg zu organisieren. Der Öffentlichkeit verpflichtete Wissenschaftler wie Leo Szilard, Joseph Roblat oder Carl Friedrich von Weizsäcker gründeten Organisationen wie die Federation of American Scientists, das Bulletin of the Atomic Scientists oder die Vereinigung Deutscher Wissenschaftler, um die Öffentlichkeit zu informieren sowie Abrüstungsempfehlungen und Verifikationsmaßnahmen zu erarbeiten. In Deutschland forderten 1957 führende Kernphysiker, darunter Werner Heisenberg, Carl Friedrich von Weizsäcker und Otto Hahn, in der Göttinger Erklärung eine umfassende Aufklärung der Bevölkerung über



Geschätzte Größe des nuklearen Arsenal weltweit. Die Kubakrise und wichtige Rüstungskontrollverträge sind markiert (dazu auch die Tabellen auf der folgenden Doppelseite).

die Gefahren von Atomwaffen in Europa und einen Verzicht der Bundesrepublik Deutschland auf Atomwaffenbesitz. In der Sowjetunion konvertierte Andrei Sacharow, der die Wasserstoffbombe mitentwickelt hatte, zu einem der prominentesten Verfechter der nuklearen Abrüstung. Sein Engagement begann Ende der 1950er-Jahre mit der Forderung nach einem Ende der atmosphärischen Kernwaffentests.

Die Weiterentwicklung und die Weiterverbreitung von Atomwaffen waren dennoch nicht aufzuhalten. Die Zahl der produzierten Sprengköpfe zwischen den USA und der UdSSR erreichte 1987 ihren Höhepunkt. Als die USA das Nuklearmonopol verloren hatten, warben Physiker wie Edward Teller für die Wasserstoffbombe, später für die Entwicklung eines undurchdringbaren Abwehrschirms gegen russische Nuklearraketen. In diesem Rahmen forderte US-Präsident Ronald Reagan 1986 die Wissenschaft dazu auf, daran zu forschen, wie mithilfe neuer Strahlenwaffen Atomwaffen „impotent und obsolet“ gemacht werden können. Dies führte auf wissenschaftlicher Seite zu neuen Studien, die zeigten, dass die geforderten exotischen Technologien nicht zu Verfügung standen und ein hundertprozentiger Schutz nicht möglich war. Im Gegenteil: Simulationsmodelle über die Folgen eines globalen Nuklearkriegs verdeutlichten der Öffentlichkeit die planetaren Konsequenzen eines Atomkriegs. Berechnungen zum „nuklearen Winter“, also zur Verdunkelung der Erdatmosphäre durch Atomexplosionen, zeigten die katastrophalen Folgen eines Nuklearwaffeneinsatzes für jede Gesellschaft und die gesamte Menschheit. Unter dem sowjetischen Staatschef Michail Gorbatschow wurden gemeinsame seismische Messungen von amerikanischen und russischen Wissenschaftler:innen in der Nähe von Atomtestgeländen und die Verifikation von operativen Atomsprengköpfen an Bord eines russischen Kriegsschiffs im Schwarzen Meer im Juli 1989 möglich und bereiteten einen Wandel in den westlich-russischen Beziehungen vor.

NUKLEARE RÜSTUNG UND ABRÜSTUNG

1938 Entdeckung der Kernspaltung (Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner, Otto Frisch, Leo Szilard, Niels Bohr, Frédéric Joliot-Curie)

1942–1945 Manhattan-Projekt (Los Alamos, Robert Oppenheimer u. a.)

16.7.1945 Zündung der ersten Atombombe (Trinity-Test, USA)

6. und 9.8.1945 Abwurf der Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki

29.8.1949 Zündung der ersten sowjetischen Atombombe

ab 1950 Entwicklung der Wasserstoffbombe (Vereinigte Staaten und Russland, Edward Teller, Andrei Sacharow u. a.)

1.11.1952 Zündung der ersten Wasserstoffbombe durch die USA im pazifischen Eniwetok-Atoll

18.12.1953 Eisenhower-Rede „Atoms for Peace“ vor der UN-Generalversammlung (erste gleichnamige Konferenz 1955 in Genf, Homi Bhabha, Niels Bohr, Isidor Rabi u. a.)

9.7.1955 Russell-Einstein-Manifest (Bertrand Russell, Albert Einstein und zehn weitere Nobelpreisträger)

7.–10.7.1957 Gründung der Pugwash Conferences on Science and World Affairs (Friedensnobelpreis 1995)

29.7.1957 Gründung der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA) (Friedensnobelpreis 2005)

12.4.1957 Göttinger Erklärung (Max Born, Otto Hahn, Werner Heisenberg u. a.)

ab 1958 Entwicklung der Neutronenbombe von Samuel Cohen (USA, ab 1981 wurden 700 Neutronensprengköpfe produziert, inzwischen alle demontiert)

Oktober 1962 Kubakrise (Beginn von Überlegungen zur Rüstungskontrolle und Abrüstung)

1958–1960 Group of Scientific Experts in Genf (Expert:innen aus zehn Staaten beschäftigen sich mit seismischer Messtechnik)

23.3.1983 SDI-Rede von Ronald Reagan zur Einführung von strategischer Raketenabwehr (Edward Teller, Hans Bethe und Richard Garwin)

19.11.1996 CTBTO PrepCom Vorbereitungskommission für die Organisation des Vertrages über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (CTBT) mittels eines weltweiten Überwachungssystems

April/Mai 1998 Nuklearwaffentests in Indien und Pakistan (Beginn eines nuklearen Rüstungswettlaufs zwischen Indien und Pakistan)

2006–2017 Sechs nordkoreanische Nuklearwaffentests (Nordkorea, Indien, Pakistan und Israel sind nicht Mitglieder des NVV), seitdem gab es keine weiteren Nuklearwaffentests

Im Kalten Krieg hatten amerikanische, russische und europäische Wissenschaftler bereits früh auf vertraulicher Basis auf der Ebene nationaler Wissenschaftsakademien oder transnationaler Organisationen wie Pugwash geholfen, durch Track-II-Treffen zum Ende des Kalten Kriegs beizutragen. Ende der 1980er-Jahre setzten sich konkrete Abrüstungsvorschläge durch. Die gefährlichen Mittelstreckenraketen verschwanden im Rahmen des INF-Vertrags 1987 aus Europa und Russland. Die Trägersysteme wurden zerstört. Die riesigen Nukleararsenale der USA und Russlands konnten, abgesichert durch strategische Abrüstungsverträge START I/II weiter reduziert werden. Als 1989 die Berliner Mauer fiel, konnten die politischen Entwicklungen durch neue Rüstungskontrollverträge wie die START-Verträge 1991 und 1993 abgesichert werden. Mit der Unterzeichnung des CTBT und der Errichtung

eines weltweiten Messsystems zur Detektion und Lokalisierung von Nukleartests gelang es, ein internationales Tabu zur Durchführung von Atomwaffentests zu errichten. Der CTBT-Vertrag soll der Entwicklung neuer Arten von Atomwaffen ein Ende setzen und die Weiterverbreitung von Atomwaffen beschränken. Physiker:innen beteiligen sich an der Entwicklung von Überprüfungstechnologien und dem Aufbau eines internationalen Messsystems. Indien und Pakistan führten denoch 1998 Nukleartests durch und Nordkorea testete bisher sechsmal seit 2017 (Stand 2024). Wissenschaftliche Analysen der Nuklearprogramme, Produktionskapazitäten und Trägersysteme dieser Länder sind angesichts der fehlenden öffentlichen Daten unerlässlich. Die ungeklärten Programme des Irak führten 2003 zu einem Krieg und in Bezug auf den Iran trotz internationaler Kontrollbemühungen zur Notwendigkeit weiterer Studien, denn viele Schlüsseldetails dieser Staaten sind nicht bekannt.

Neue Konflikte, nukleare Gefahren

Im Jahr 2002 kündigten die USA den ABM-Vertrag, der die Raketenabwehr der USA und Russlands auf je 100 Systeme begrenzte. Seitdem wird die strategische und taktische Raketenabwehr weiterentwickelt. Unter US-Präsident Barack Obama gelang es 2009, eine Diskussion über die reale Option einer Welt ohne Atomwaffen in Gang zu bringen, in der klar wurde, dass weitere technische Maßnahmen und starker politischer Willen zur Abrüstung des immer noch riesigen Nukleararsenals nötig sind. 2010 unterzeichneten die USA und Russland den New-START-Vertrag und verpflichteten sich damit, ihre strategischen Arsenale auf je 1550 Sprengköpfe auf 700 Trägern nachprüfbar zu begrenzen. New-START ist zwar weitgehend erfüllt, das Abkommen endet aber trotz einer fünfjährigen Verlängerung im Februar 2026. Inzwischen ist auch der INF-Vertrag gekündigt und der Abrüstungsdialog zwischen den USA und Russland blockiert. Die neun Nuklearstaaten verfügen zusammen immer noch über 13 000 nukleare Sprengköpfe. Davon gehören über 90 Prozent den USA und Russland. Zudem nimmt die Zahl der einsetzbaren Atomwaffen in einigen Staaten weiter zu, so u. a. in Indien, Pakistan, Großbritannien, China und besonders in Nordkorea. Im Kontext des Ukrainekriegs wurden zivile Nuklearanlagen beschossen und der russische Präsident Wladimir Putin brachte die Möglichkeit eines Einsatzes von taktischen Nuklearwaffen wieder ins Spiel. Diese Waffenkategorien sind nicht Bestandteil von Abrüstungsregelungen. Neue nuklearbestückte Trägersysteme (Überschallwaffen, Unterwassertorpedos oder nuklearbetriebene Marschflugkörper) befinden sich in der Testphase. Zum Verständnis dieser Modernisierungsentwicklungen und den damit einhergehenden Bedrohungen ist das verstärkte Engagement von Physiker:innen gefragt.

Die Gefahr eines Einsatzes nuklearer Waffen und fortgesetzter nuklearer Weiterverbreitung nimmt angesichts ungelöster Konflikte weltweit wieder zu. Ein Nuklearwaffeneinsatz aus Versehen ist heute daher ebenso wenig ausgeschlossen wie ein beabsichtigter Einsatz oder ein Akt des Nuklearterrorismus. Würde auch nur ein Prozent des bestehenden militärischen Nukleararsenals zum Einsatz kommen, hätte dies ne-

ben den unmittelbaren katastrophalen Konsequenzen wegen des „nuklearen Winters“ auch unabsehbare Folgen für das globale Klima und aufgrund der damit zusammenhängenden Ernteausfälle auf die Ernährung und Lieferketten. Simulationsprogramme zeigen, dass auch kleine Nuklearexplosionen überregionale Folgen haben und mit weitreichendem Fall-out, Klimafolgen und Hungersnöten einhergehen. Selbst ein „regionaler“ Nuklearkrieg würde neuesten Simulationen zufolge zu Millionen Toten führen und zusätzlich das globale Klimasystem und die Nahrungsmittelproduktion massiv beeinträchtigen sowie zu einer globalen Hungersnot führen.

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft hat sich immer wieder mit Statements zu Abrüstungsfragen zu Wort gemeldet, unter anderem im Rahmen der öffentlichen Max-von-Laue-Vorlesungen. Die Arbeitsgruppe Physik und Abrüstung beschäftigt sich in Fachsitzungen mit Fragen der nuklearen Rüstungskontrolle, Rüstungstechnologiefolgenabschätzung, Verifikation und Abrüstung. Arbeitsgruppen an Universitäten forschen u. a. zu Problemen der Risikofolgenabschätzung, zur Verifikation von Abrüstungsverträgen und zur Nichtverbreitung nuklearer Waffensysteme und -materialien. Mithilfe neuer Messmethoden für Radionuklide, mit Detektoren für Infra- und Hydroschall und mit seismischen Instrumenten lassen sich beispielsweise Verstöße gegen das Verbot von Atomtests aufdecken. Auch bei der Abrüstungskontrolle kommen physikalische Verfahren zum Einsatz: So gilt es beispielsweise zu prüfen, ob ein deklarerter Sprengkopf, der abgerüstet wurde, nicht in Wirklichkeit eine Attrappe ist. Solche Authentifizierungen lassen sich mittels Messung von Gamaspektren sowie von Neutronen an den zerlegten Komponenten durchführen. Eine Herausforderung besteht darin, die nuklearen Sprengköpfe zu authentifizieren und zu zerlegen, ohne dass proliferationsrelevantes Wissen verraten oder weitergegeben wird. Dabei nutzen die Abrüstungskontrolleur:innen kryptografische Verfahren sowie die „Zero-Knowledge“-Verifikation, bei denen eine Partei die andere stichhaltig und nachvollziehbar von der Tatsache überzeugen kann, dass eine Kernwaffe authentisch ist, ohne dabei jegliche Informationen über die Waffe oder deren Design zu offenbaren. Mit diesen und weiteren Maßnahmen, Rüstungskontrollkonzepten, Vorschlägen zur Risikoreduzierung und öffentlicher Aufklärung hoffen die Physiker:innen, die Büchse der Pandora, die sie einst mit geöffnet haben, wieder verschließen zu können und die Gefahr eines Nuklearkriegs auf ein Minimum zu reduzieren.

Götz Neuneck

VERTRÄGE

Antarktisvertrag 1.12.1959: kernwaffenfreie Antarktis (in Kraft seit 23.6.1961, unterzeichnet von 45 Staaten)

Limited Test Ban Treaty (LTBT) 5.8.1963: Verbot von Tests in Atmosphäre, Weltraum und unter Wasser (in Kraft seit 10.10.1963, unterzeichnet von 131 Staaten)

Vertrag von Tlatelolco 14.2.1967: kernwaffenfreie Zone in Südamerika und Karibik (in Kraft seit 22.4.1968, alle 33 Staaten der Region)

Nichtverbreitungsvertrag (NVV) 1.7.1968: Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (in Kraft seit 5.3.1970, unterzeichnet von 189 Staaten)

Meeresboden-Vertrag 11.2.1971: Vertrag über das Verbot der Anbringung von Kernwaffen und anderen Massenvernichtungswaffen auf dem Meeresboden und im Meeresuntergrund (unterzeichnet von 86 Staaten, in Kraft seit 18.5.1972)

ABM-Vertrag (außer Kraft) 26.5.1972: Bilateraler Vertrag zwischen USA und UdSSR (später Russland, Weißrussland, Ukraine und Kasachstan) zur Begrenzung von Systemen zur Abwehr von ballistischen Raketen (in Kraft seit 3.10.1972, die USA sind 2002 einseitig zurückgetreten)

SALT I 26.5.1972: Bilaterales Abkommen zwischen USA und UdSSR zur Begrenzung von strategischen Offensiv-Waffen (in Kraft seit 3.10.1972)

SALT II 18.6.1979: Bilaterales Folgeabkommen zwischen USA und UdSSR zur Begrenzung von strategischen Offensiv-Waffen (nie in Kraft getreten)

Vertrag von Rarotonga (Südpazifik) 6.8.1985: Vertrag zur Schaffung einer kernwaffenfreien Zone im Südpazifik (in Kraft seit 1986, von 13 Staaten unterzeichnet)

INF-Vertrag USA/UdSSR-Russland, 8.12.1987: Verbot der Herstellung und Lagerung von Mittelstreckensystemen (erfüllt und außer Kraft), am 1.6.1988 in Kraft getreten, von den USA 2002 gekündigt

START-I USA/UdSSR-Russland, 31.7.1991: Reduzierung der strategischen Nuklearwaffen innerhalb von sieben Jahren um ca. ein Drittel gegenüber 1991 auf gemeinsame Obergrenzen von 1600 Trägersystemen und 6000 Gefechtsköpfen (in Kraft 5.12.1994, erfüllt und außer Kraft)

Comprehensive Testban Treaty (CTBT) 10.11.1996: Verbot jeglicher Art von Nuklearwaffentests und anderer Formen von Nuklearexplosionen. Der Kernwaffenstopp-Vertrag soll der Entwicklung neuer Arten von Kernwaffen ein Ende setzen und die vertikale Weiterverbreitung von Kernwaffen beschränken (187 Unterzeichner- und 178 Ratifikationsstaaten, nicht jedoch Ägypten, China, Iran, Israel und die USA. Indien, Pakistan und Nordkorea haben nicht unterzeichnet. De-Ratifizierung durch Russland 2023, Vertrag nicht in Kraft).

Strategic Offensive Reduction Treaty (SORT) 24.5.2002: Reduziert US/RF Arsenale auf ca. 1700 bis 2200 strategische Sprengköpfe bis 2012 (erfüllt 2012)

New-START Vertrag USA/Russland, 8.4.2010: Begrenzung auf je 1550 Sprengköpfe auf 700 Trägern der USA und Russland, Laufzeit 15 Jahre (in Kraft seit 5.2.2011)

Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons (TPNW) 22.1.2021, Atomwaffenverbotsvertrag: Verbot Nuklearwaffen „zu entwickeln, zu testen, zu produzieren, herzustellen oder anderweitig zu erwerben, zu besitzen oder zu lagern“, in Kraft

ETHIK IN DER FORSCHUNG

Die Freiheit der Forschung ist ein wichtiges Grundrecht in Deutschland, doch müssen Forschungsgegenstand und Forschungsprozess rechtlichen und ethischen Grundsätzen entsprechen.

Was sind typische Beispiele für Aspekte der Ethik, die bei der Forschung bedacht werden müssen?

Ulrike Beisiegel: Typisch sind sicherheitsrelevante Fragen zu Risiken im Umgang mit Menschen, Tieren und der Natur (Umwelt), wie es auch die gemeinsame Kommission von Deutscher Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Leopoldina definiert. Der Begriff „sicherheitsrelevant“ kann dabei in sehr verschiedene Richtungen interpretiert werden. Es kann die Sicherheit der Forschenden selbst oder der oben genannten Bereiche betreffen, aber auch die Sicherheit der Forschungseinrichtungen oder die Sicherheitspolitik von Staaten. In der aktuellen Diskussion dominiert die Frage der möglichen militärischen Nutzung der Forschung im Sinne der Dual-Use-Anwendungen sowie der Weitergabe von vertraulichen Daten an nicht-sichere Drittstaaten.

In welchen Aspekten betrifft dies die Physik?

Da physikalische Methoden in sehr vielen Forschungsbereichen eine Rolle spielen, ist die Physik auch oft betroffen. Ein Beispiel: Tierversuche an Teilchenbeschleunigern! Physik ist zudem die Grundlage aller technischen Entwicklungen und der meisten wirklichen Innovationen (siehe KI). Die Dual-Use-Frage ist damit eigentlich bei jedem physikalischem Erkenntnisgewinn zu stellen, und die innovative Weiterentwicklung

sollte dann von klugen ethischen und fachlichen Abwägungen entsprechend begleitet werden.

Gibt es Unterschiede in Fragen der Ethik des Forschungsprozesses und des Forschungsgegenstands?

Ja. Ethische Aspekte des Forschungsprozesses liegen zunächst in der guten wissenschaftlichen Praxis – also dem Gebot der Ehrlichkeit gegenüber sich selbst und anderen sowie der Einhaltung des Rechts und der Regeln des Wissenschaftssystems. Dazu kommt die Wahl der Methoden, mit denen der Forschungsgegenstand untersucht werden soll. Diese sollten ethisch vertretbar sein (z. B. bei Tierversuchen).

Ein Forschungsgegenstand selbst ist dann unethisch, wenn er sich in seiner Zielsetzung gegen die Würde oder das Leben des Menschen richtet oder gegen relevante Werte verstößt. Bei militärischer Forschung gilt das beispielsweise für die Entwicklung von Massenvernichtungswaffen.

Welche formalen Mechanismen gibt es an Forschungseinrichtungen?

Nach der Empfehlung der DFG und Leopoldina aus 2014 sollte jede wissenschaftliche Einrichtung eine „Kommission für Ethik in der Forschung“ haben. Davon unabhängig gibt es seit langem Ethikkommissionen in der Medizin, die die Durchführung von Studien am Menschen beaufsichtigen. Für ethische Fragen im Forschungsprozess ist auch das Ombudssystem Ansprechpartner.

Was hat Ihr Interesse für das Thema Wissenschaft und Ethik geweckt? Welche Aspekte sind Ihnen besonders wichtig?

Aus der medizinischen Forschung kommend habe ich erlebt, wie der Enthusiasmus für eine Forschungs idee und der Karri-



Ulrike Beisiegel ist Biochemikerin. Sie war von 2011 bis 2019 Präsidentin der Universität Göttingen und von 2005 bis 2010 Mitglied des Wissenschaftsrats und Sprecherin des Ombudsgremium der DFG. Beisiegel hat sich als junge Wissenschaftlerin in der „NaturwissenschaftlerInnen-Initiative Verantwortung für den Frieden“ auch als Autorin für die Friedensbewegung engagiert. Seit 2021 ist sie Vorsitzende der Kommission für Ethik in der Forschung beim DESY in Hamburg.

eredruck ethische Aspekte in den Hintergrund drängen kann. Ich habe auch erlebt, wie Daten manipuliert wurden und wie wenig ethische Fragen in der medizinischen Forschung diskutiert werden.

Die DFG hatte mich dann 1996 in die Kommission zur Erarbeitung der Regeln zur guten wissenschaftlichen Praxis berufen, und ich habe mich in den verschiedenen Positionen meiner Karriere aktiv für Integrität in der Wissenschaft eingesetzt. Dabei habe ich die große Bedeutung ethischer Fragen im Forschungsprozess kennengelernt.

Heute ist mir wichtig, dass gerade bei völlig neuen, zunächst attraktiv erscheinenden Innovationen ethische Fragen nicht außer Acht gelassen werden. Konkret sollte der Technikfolgenabschätzung hier wieder ein größerer Stellenwert eingeräumt werden, auch wenn das natürlich Zeit kostet.

Was sind aus Ihrer Sicht die größten ethischen Gefahren der naturwissenschaftlichen Forschung?

Das Geo-Engineering birgt sicher die größten Risiken und Gefahren für unseren Planeten, der dabei zu einem Reallabor mit unabsehbaren Folgen wird.

Sicher ist für die Physik die Entwicklung der Atombombe eine Zäsur in der ethischen Bewertung der Forschung. Das liegt nun lange zurück – welche Aspekte sind es heute, die hier betrachtet werden müssen?

Ein noch heute wichtiger Aspekt aus der Physik bei der Entwicklung der Atombombe ist die Übernahme von Verantwortung der 18 Atomphysiker mit der Göttinger Erklärung von 1957. Das sollte ein Vorbild für die Wissenschaft heute sein. Die Wissenschaft muss den Menschen in noch einfacherer Sprache klar machen, dass der Klimawandel die Erde und

uns tatsächlich gefährdet und auch noch deutlicher die Politik beraten. Dabei ist es wichtig, mit einer Stimme zu sprechen und so etwas wie eine „Europäische Erklärung“ zur Bedeutung des Klimawandels herauszugeben.

Kann sich die Physik in dem Maße von den Personen der Forschenden frei machen, wie sie es mit ihrem Objektivitätsanspruch reklamiert?

Nein. Jede Forschung ist durch das Subjekt, die forschende Person, beeinflusst. Das gilt für das Design der Experimente, für die Durchführung und für die Interpretation der Ergebnisse. Objektivität kann erst durch kritisches Hinterfragen durch andere Forschende und den sich daraus ergebenden verifizierenden Experimenten entstehen. Praktisch ergibt sich das durch eine Akzeptanz von Ergebnissen und ihrer Interpretation durch die gesamte Fachgemeinschaft.

Die Fragen stellten Sarah Köster und Jens Kube



POLITIKBERATUNG MIT PHYSIK

Obwohl die Wissenschaft selbst unpolitisch ist, beeinflusst sie sehr wohl den politischen Raum. Wissenschaftliche Politikberatung verbindet Forschung mit politischem Handeln und bewertet Themen wie Klimawandel, KI oder Gesundheitskrisen. Die Beratung kann dabei sowohl von der Wissenschaft ausgehen als auch von der Politik beauftragt werden.

Wir leben heute in einer von Wissenschaft und technischen Innovationen geprägten Welt. Die Implikationen von Forschung und Entwicklung bergen aufgrund vielfältiger, oft nicht sofort erkennbarer Anwendungsmöglichkeiten enorme wirtschaftliche und gesellschaftliche Chancen, aber auch viele Risiken und Missbrauchsmöglichkeiten. Forschende sind oft die ersten, die mögliche Konsequenzen ihres Tuns einschätzen können. Wissenstransfer ist durch offene Labore, die schnelle Einführung von neuen Technologiezyklen im internationalen Wettbewerb und die Diffusion von neuen Erkenntnissen und Produkten in vielen Lebensbereichen und Staaten in der Forschung etabliert. Zur Wissenschaftspolitik gehört auch die Pflicht der Wissenschaft, die Chancen und Risiken neuer Entwicklungen Politik, Gesellschaft und internationaler Gemeinschaft zu erklären. Dort, wo neue Anwendungen und neue Technologien ins Spiel kommen, müssen Mechanismen, Wirkungen und Konsequenzen von den Adressaten verstanden werden, damit sie politisch verantwortungsvolle Entscheidungen treffen können. Die Komplexität dieser Zusammenhänge ist dabei eine ewige Herausforderung. Sie erfordert zusätzliche Anstrengungen und ist auch Aufgabe und Auftrag der Politikberatung für Regierungen, Parlamente, die allgemeine Öffentlichkeit und die internationale Gemeinschaft. Bei der Politikberatung fließen unterschiedliche Erkenntnisse und Erfahrungen der Wissenschaftsdiplomatie, Technologiefolgenabschätzung (Seite 319) und Wissenschaftskommunikation (Seite 333) zusammen. Themen wie Viren, künstliche Intelligenz, Biodiversität, Extremwetter oder nukleare Bedrohung benötigen wissenschaftliche Grundlagen für eine rationale Politik. Auch Ressortforschung ist nötig, um dem politischen Entscheidungsprozess konkrete Ergebnisse zur Verfügung zu stellen. In einer Welt, in der immer mehr Falschinformationen verbreitet werden, ist wissenschaftliche Rationalität und Expertise dringend notwendig.

Was ist Politikberatung?

Wissenschaftliche Politikberatung (Scientific Advice) ist das Bereitstellen von fundierten Informationen und daraus resultierenden Handlungsempfehlungen an politisch und gesellschaftlich Handelnde, z. B. Ministerien, Parlamente oder internationale Organisationen. Grundlage neben der wissenschaftlichen Expertise und Rationalität sind dabei rechtliche Rahmen wie das Grundgesetz, die UN-Charta oder internationale Verträge. Auch Ethik und Moral, gesellschaftlicher Fortschritt, Nachhaltigkeit und politische Orientierung sowie wirtschaftliche Interessen spielen dabei stets eine wichtige Rolle. Wissenschaft soll objektiv, politisch neutral

und dem Wohlergehen aller verpflichtet sein. Wissenschaftler:innen sind befähigt, mit komplexen Themen umzugehen und Lösungen zu erarbeiten. Davon abzugrenzen sind wissenschaftsbasiertes Konsultieren (policy consulting) oder Lobbyismus, bei dem es darum geht, bestimmte Ziele zu erreichen. Hier ist große Zurückhaltung der Wissenschaft und große Transparenz geboten.

Zu unterscheiden ist die Politikberatung innerhalb des Regierungssystems durch Ressortforschung und die Beratung des Parlaments (z. B. im Gesetzgebungsprozess) sowie die Beratung der Öffentlichkeit oder die globale Gemeinschaft dort, wo komplexe globale Themen wie der Klimawandel zur Debatte stehen. Verschiedene Themen- und Handlungsfelder benötigen auch unterschiedliche wissenschaftliche Expertise. Physiker:innen leisten auf verschiedenen Ebenen in vielerlei Institutionen, national und international, wichtige Beiträge.

Institutionen und Politikberatung

In verschiedenen Ländern wird ein großer Teil der wissenschaftlichen Politikberatung von diversen Gremien wie Expertenkommissionen, Instituten oder Thinktanks wahrgenommen. Staaten haben eine uneinheitliche Beratungskultur. Aufgrund der Erfahrungen im Nationalsozialismus, in dem die Wissenschaft ideologisch instrumentalisiert wurde, gibt es in Deutschland eine gewisse Distanz zwischen Wissenschaft und Politik. Das Parlament und dessen Ausschüsse werden insbesondere durch Expertisen und Gutachten des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) und des Wissenschaftlichen Dienstes des Deutschen Bundestags beraten, an denen auch Physiker:innen beteiligt sind. In Deutschland gibt es keine Wissenschaftsberater:innen wie in den USA oder Großbritannien, die den verschiedenen Ministerien zurarbeiten. In Deutschland sind die Präsidien der DFG, der Max-Planck-Gesellschaft oder der Helmholtz-Gemeinschaft jedoch stellvertretend für ihre Organisationen Ansprechpartnerin für die Politik. Gerade im Bereich nationaler Sicherheit, bei der neue Technologien einen erheblichen Einfluss auf Militärstrukturen, Konfliktlagen und neue Bedrohungen haben, sind Wissenschafts- und Technikanalysen von Bedeutung, man denke nur an die Chancen und Risiken von künstlicher Intelligenz, Quanten- oder Raumfahrttechnologien.

Die Nationale Akademie Leopoldina berät im Regierungsauftrag Politik und Öffentlichkeit basierend auf wissenschaftlich fundierten Analysen zu gesellschaftlichen Themen. Interdisziplinäre Gruppen verfassen Stellungnahmen, Diskussions-

papiere, Zukunftsberichte oder Faktenzusammenstellungen, die öffentlich zugänglich sind und verständlich sein sollen. Empfehlungen der Leopoldina wenden sich aber auch an die Wissenschaft selbst. So hat die Leopoldina zusammen mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft 2014 „Empfehlungen zum Umgang mit sicherheitsrelevanter Forschung“ erarbeitet und einen gemeinsamen Ausschuss zu der Problematik ins Leben gerufen. Ethikkommissionen an Universitäten und Forschungseinrichtungen beschäftigen sich mit ethisch problematischen Fällen oder der Verbesserung der Aufmerksamkeit von Dual-Use-Anwendungen. Auf EU-Ebene wurde 2016 der „Scientific Advice Mechanism“ ins Leben gerufen, an dessen Spitze eine siebenköpfige „High Level Group“ von Wissenschaftler:innen steht. Die Group of Chief Scientific Advisors (GCSA) bietet dem Kollegium der Europäischen Kommissare hochwertige und unabhängige wissenschaftliche Beratung zu allen Themen, einschließlich zu politischen Fragen, die das Europäische Parlament und der Rat als wichtig erachten. Daran beteiligen sich auch die europäischen Akademien der Wissenschaften durch das Konsortium SAPEA (Science Advise for Politics by European Academies).

Natürlich gibt es unterschiedliche Sicht- und Verfahrensweisen in Politik und Wissenschaft. Es bleibt zudem die Frage, ob Wissenschaftsberatung von der Politik tatsächlich genutzt, verstanden, aufgegriffen oder umgesetzt wird. Eine Umfrage der Fachzeitschrift Nature Ende 2024 ergab, dass 70 Prozent der 400 befragten Expert:innen, der Meinung sind, dass Regierungen nicht auf wissenschaftliche Beratung zurückgreifen. Zudem wissen Forscher:innen oft nicht, wie die Meinungs- und Entscheidungsfindung in der Politik funktioniert oder dass wissenschaftliche Ergebnisse zu langsam kommuniziert werden. Hier besteht Verbesserungsbedarf, insbesondere für nationale und internationale Notlagen. Auch die Öffentlichkeit betrachtet die Wissenschaft zunehmend skeptisch. So wird Wissenschaft einerseits für Fehlentscheidungen oder auftretende Schäden verantwortlich gemacht, andererseits wird behauptet, die Politik habe nicht genügend auf wissenschaftliche Expertise gehört. Die aktuelle Umfrage der Fachzeitschrift Nature ergab, dass fast 80 Prozent der Befragten mit dem Wissenschaftsberatungssystem in ihrem Land unzufrieden sind.

Beratung der Politik als Ressortforschung: forschen – prüfen – beraten

Ressortforschungseinrichtungen (RFE) haben unterschiedliche Rechtsformen und sind organisatorisch einem Ministerium (Ressort) des Bundes zugeordnet. Im Jahr 2024 wurden

im Bundesbericht Forschung und Innovation (BuFI) 43 Bundeinrichtungen mit Forschungs- und Entwicklungsaufgaben mit schätzungsweise mehr als 16 000 Mitarbeiter:innen und einem Gesamtbudget von 1,9 Milliarden Euro benannt. Die Ressortforschung ist institutionell zwischen Wissenschaft und Politik angesiedelt und agiert in einem Spannungsfeld der unterschiedlichen Rationalitäten von Wissenschaft und Politik.

Die wichtigsten Aufgaben der RFE sind die Durchführung von wissenschaftlicher Forschung, Politikberatung zur Erfüllung gesetzlicher Aufgaben in den Ressorts und Informationsbeschaffung sowie hoheitliche Aufgaben und direkte Prüfaufgaben, etwa in der Form gesetzlich festgelegter Aufsicht, Normung, Zulassung und Risikobewertung. Die Forschung der RFE ist analog zu anderen außeruniversitären Forschungseinrichtungen missionsorientiert und zumeist praxisnah und sehr interdisziplinär ausgelegt. Die RFE kombinieren kurzfristig abrufbare wissenschaftliche Kompetenzen mit anwendungsinspirierter Grundlagenforschung zu langfristig angelegten Fragestellungen. Mit dieser als „Antennenfunktion“ beschriebenen Forschung sollen Themenfelder bearbeitet werden, die noch keinen Handlungs- oder Regelungsbedarf seitens der Politik erkennen lassen, aber für gesellschaftspolitische Fragen der Zukunft relevant werden können. Durch das Transferwissen und die Übersetzungsleistungen vom wissenschaftlichen System in das Anwendungssystem werden auch transdisziplinär Stakeholder der Politik, Verwaltung und Gesellschaft eingebunden.

Die Ursprünge der Ressortforschung liegen in der Zeit der Aufklärung und der preußischen Reformpolitik im 19. Jahrhundert. Erste staatliche Forschungseinrichtungen wie die heutige Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (1871) und die Physikalisch-technische Reichsanstalt (1887) wurden gegründet, um die Verwaltung zu unterstützen und wissenschaftliche Erkenntnisse für den Staatsaufbau in der Industrialisierung zu nutzen. Die Weimarer Republik brachte eine stärkere institutionelle Verankerung der Ressortforschung und Gründungen von RFE, die sich mit spezifischen politischen und gesellschaftlichen Herausforderungen beschäftigten, z. B. soziale Bedingungen der Arbeit, Ernährung und öffentliche Gesundheit. Während des Nationalsozialismus wurde die Ressortforschung ideologisch instrumentalisiert und in den Dienst der Kriegsführung und der totalitären Politik des Regimes gestellt.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde in der Bundesrepublik die wissenschaftliche Unabhängigkeit der RFE gestärkt, auch

wenn die Einrichtungen weiterhin den Ministerien zugeordnet blieben. Von 1950 bis 1980 gewannen die RFE insbesondere in den Bereichen Umwelt, Gesundheit und Sicherheit an Bedeutung, auch durch die Gründung des Umweltbundesamts (1974). Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstand die 1969 gegründete Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (heute Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR). Die RFE der DDR waren stärker zentralisiert und organisatorisch und ideologisch in das sozialistische Planungssystem eingebunden. Nach 1990 erlebte die deutsche Ressortforschung eine zunehmende Professionalisierung und Internationalisierung, sodass globale Herausforderungen wie der Klimawandel, die Digitalisierung und globale Gesundheitskrisen zu stärkerer Vernetzung der Forschungseinrichtungen mit internationalen Partnern führte. Zwischen 2004 und 2009 stand die Ressortforschung durch Evaluationen durch den Wissenschaftsrat verstärkt im Fokus der wissenschaftspolitischen Öffentlichkeit. Der Wissenschaftsrat betonte die Notwendigkeit wissenschaftlicher Qualitätsstandards in der Ressortforschung und regte eine stärkere Profilierung und Vernetzung der Einrichtungen an, welche in die Veröffentlichung der „Zehn Leitlinien einer modernen Ressortforschung“ durch die Bundesregierung im Jahr 2007 mündete.

Die Ressortforschung nimmt eine spezielle Rolle in der Politikberatung ein, die mit einer doppelten Verantwortung umschrieben wird. Sie muss einerseits wissenschaftlichen Standards genügen und methodisch saubere, objektive und nachprüfbar Forschungsergebnisse liefern. Andererseits muss sie die politischen und administrativen Anforderungen der Ministerien berücksichtigen. Forschungsergebnisse sollen für politische Entscheidungsträger:innen verständlich und nutzbar im Sinne von konsensfähigen robusten politischen Lösungen sein. Im Gegensatz zu anderen wissenschaftlichen Einrichtungen unterliegen die RFE einer unbedingten Pflicht, die an sie gerichteten wissenschaftlichen Fragen zu beantworten und so zum politischen Entscheidungsprozess beizutragen. Dabei bleibt der wesentliche Maßstab aber immer der wissenschaftliche „State-of-the-Art“. Letztlich verantwortet die Politik die Verwendung der Forschungsergebnisse. Im Bereich der Gefahr- und Risikowarnungen besitzen aufgrund der staatlichen Vor- und Fürsorgepflichten die Ergebnisse und Empfehlungen der RFE eine Verbindlichkeit, die über die der Wissenschaft hinausgeht, und

sie zusätzlich mit staatlicher Legitimität ausstattet. Die Beziehungen zwischen Ministerien und RFE sind heute durch eine gegenseitige Anpassung und Aushandlung administrativer und wissenschaftlicher Rationalitäten gekennzeichnet, sodass sowohl wissenschaftlich als auch politisch motivierte Themen in die Forschungsprogramme einfließen. Das Spannungsverhältnis zwischen politischen Aufgaben und Forschung, das in der Literatur in der Vergangenheit häufig als problematisch angesehen wurde, wird heute durch verschiedene Regelungen, wie etwa Vorgaben zur Forschungsplanung, transparente Standards für die Auftragserteilung und die Präsentation von Ergebnissen in unterschiedlichen Kontexten, klare Publikationsrichtlinien sowie die Freiheit bei der Wahl wissenschaftlicher Methoden, angemessen ausgeglichen.

Die Ressortforschung kann sich somit nur an den höchsten wissenschaftlichen Standards orientieren und ihre Ergebnisse im wissenschaftlichen Diskurs veröffentlichen und diskutieren. Es müssen Strukturen und Mechanismen geschaffen werden, welche Unabhängigkeit der Ressortforschung von politischen Einflüssen sowie Vertrauen in das Beratungswissen der Organisationen gewährleistet. In einer verstetigten nationalen und internationalen Zusammenarbeit mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen können die RFE durch den Austausch von Wissen und Methoden an Kompetenzen für ihre Aufgabe gewinnen.

Beratung der Öffentlichkeit: Haltung und Kontroversen

Jenseits von Regierungsinteressen ist eine unabhängige Expertise für die Information von Öffentlichkeit durch die Wissenschaftsgemeinschaft notwendig. Wissenschaft soll parteipolitisch neutral sein, ihre Argumente objektiv und verantwortungsvoll vorbringen und ihre Quellen und Argumente transparent gestalten. Im demokratischen Diskurs ist es zentral, dass unabhängige Fachorganisationen wie die Deutsche Physikalische Gesellschaft oder die Vereinigung Deutscher Wissenschaftler (VDW) sich durch öffentliche





Bei parlamentarischen Abenden bringt die DPG den politischen mit dem wissenschaftlichen Raum zusammen.

Stellungnahmen oder Studien zu aktuellen Zeitfragen äußern: Beispiele sind Stellungnahmen der DPG zur Raumfahrt, zur Energieproblematik, zum Atomteststoppvertrag oder zur nuklearen Abrüstung. In der VDW, die 1957 nach der Göttinger Erklärung von 18 Wissenschaftlern gegen

die geplante nukleare Aufrüstung Deutschlands gegründet wurde, vernetzen sich Expert:innen aus vielen wissenschaftlichen Disziplinen, die ihre Verantwortung für die Folgen von wissenschaftlicher Forschung und technischer Entwicklung kritisch reflektieren und mit differenzierter Expertise an der gesellschaftlichen Debatte aktiv teilnehmen. Transparenz der Forschungsergebnisse und zugrunde gelegte Kriterien, gesellschaftliche Akzeptanzdebatten und die Einbeziehung relevanter Stakeholder sind hier entscheidend.

Beratung der Internationalen Gemeinschaft: Globale Fragen und internationale Organisationen

Probleme wie der Klimawandel oder die nukleare Bedrohung können nur gemeinsam gelöst werden. Der wissenschaftsbasierte Ratschlag internationaler Organisationen spielt hier eine wichtige, auch völkerverbindende Rolle. Die COVID-Pandemie hat beispielhaft gezeigt, dass internationale Kooperation zum Austausch von Daten zu Gesundheitslage und Behandlungsfortschritt organisiert werden kann. Die Vermittlung der Ergebnisse für die Regierungen spielte dabei eine wichtige Rolle. UN-Generalsekretär Antonio Guterres hat 2023 ein „Scientific Advisory Board“ ins Leben gerufen und damit die große Bedeutung von wissenschaftlicher Beratung unterstrichen.

Der Weltklimarat (IPCC, „Intergovernmental Panel on Climate Change“), wurde von der UN und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) 1988 gegründet, um für politische Entscheidungsträger den Stand der Forschung zum Klimawandel zusammenzufassen, und diesen Grundlage für wissenschaftsbasierte Entscheidungen zu bieten. Andere Organisationen wie die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO), die Weltgesundheitsorganisation (WHO) oder die

Weltorganisation für Meteorologie (WMO) sind wissenschaftlich-technische Organisationen, die im Rahmen des UN-Systems Expertise, Daten und Standards für die Weltgemeinschaft zu Verfügung stellen, und deren Ergebnisse unverzichtbar sind. Die Organisation des Vertrags über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (CTBT) wurde 1997 gegründet, um die Grundlage für die Einhaltung des Verbots von Kernwaffentests technisch möglich zu machen. Heute umfasst das internationale Überwachungsmessnetz weltweite seismologische, hydroakustische oder Infraschallmessstationen. Das Zusammenführen all dieser Erkenntnisse und Methoden ist wichtig auch in und für die Nationalstaaten z. B. für die Staaten des globalen Südens, die nicht über die Ressourcen und Expertisen der Hochtechnologiestaaten verfügen. Die „International Union of Pure and Applied Physics“, die 1922 gegründet wurde, soll nicht nur die internationale Kooperation für Physik fördern, sondern auch, laut Statut, „... helfen bei der Anwendung der Physik zur Lösung von Problemen, die die Menschheit betreffen.“

Angesichts der künftigen Herausforderungen für die Menschheit und der zunehmend wichtigen Rolle von Wissenschaft und Technologie, seien es Daten oder Geräte, ist ein offenes, robustes und qualitativ hochwertiges Wissenschaftsberatungssystem ebenso wichtig wie die stärkere Nutzung wissenschaftlicher Expertise durch die Politik. Beginnend mit der Ressortforschung, einer guten Vernetzung von Institutionen, Thinktanks und Ministerien bis hin zu internationalen Organisationen ist ein kontinuierlicher, interdisziplinärer, transparenter Dialog über wissenschaftliche Ergebnisse und deren Relevanz für die Politik notwendig. Dazu gehört nicht nur die Offenheit der Forschung für gesellschaftliche Entwicklungen, sondern auch die Einsicht in der Politik, dass die Wissenschaft Wesentliches für den gesellschaftlichen Fortschritt beiträgt.

Götz Neuneck und Ulrich Panne

DIALOG MIT DER GESELLSCHAFT

Erkenntnisse und Anwendungen der Forschung durchdringen unseren Alltag. Wissenschaftskommunikation erklärt Forschungsergebnisse, Methoden der Forschung und Grenzen ihrer Erkenntnis. Sie unterstützt den Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft über Ergebnisse, Ziele und Rahmenbedingungen der Forschung.

Wissenschaft begegnet uns jeden Tag, wir nutzen ständig ihre Ergebnisse, ohne dass wir es bewusst wahrnehmen. Egal ob es der Akku unseres Handys ist, welches uns durch den Alltag bringt, oder die Wettervorhersage, die unsere Pläne rettet – hinter all dem stecken komplexe wissenschaftliche Erkenntnisse. Dabei interessiert meist nur, dass der Akku möglichst lang hält und die Vorhersage stimmt, weniger jedoch, welche Materialien im Akku verbaut sind oder in welchem Wellenlängenbereich das Regenradar arbeitet. Daher ist die Verbindung zwischen Wissenschaft und Gesellschaft nicht immer so eng, wie sie sein sollte. Vielen Menschen erscheint Forschung wie eine ferne Welt, die schwer zu greifen ist. Genau hier setzt **Wissenschaftskommunikation** an: Sie erschließt diese Welt, indem sie nicht nur Wissen teilt, sondern auch erklärt, warum Forschung wichtig ist, welche Methoden sie verwendet, was sie sicher weiß und wo ihre Grenzen liegen.

Von der Erklärung zum Dialog

Die Kunst dabei liegt nicht nur in der Vermittlung von Fakten, sondern im Aufbau eines Dialogs mit allen Teilen unserer Gesellschaft. Denn Wissenschaft ist keine Einbahnstraße – sie lebt davon, Fragen zu stellen, Hypothesen zu prüfen und neue Perspektiven zu integrieren. „Wissenschaft entsteht im Gespräch“, formulierte Werner Heisenberg. Genau das muss auch die Kommunikation widerspiegeln. In einem weiteren Zitat sagt Heisenberg, dass Wissenschaft von Menschen für Menschen gemacht wird. Das zeigt sofort, dass die Wissen-

schaft in das gesellschaftliche Umfeld eingebunden ist und nicht nur über ihre Ergebnisse, sondern auch über die in ihrem System handelnden Personen, mit der Gesellschaft interagiert. Das braucht Austausch, eben Kommunikation.

Ein erfolgreicher Dialog mit der Öffentlichkeit bedeutet, auf die Anliegen der Menschen einzugehen, ihre Interessen aufzugreifen und zu zeigen, wie Forschung Antworten auf drängende Fragen liefern kann. Wenn etwa ein Thema wie der Klimawandel immer wieder in der Diskussion steht, muss verständlich werden, wie wissenschaftliche Erkenntnisse hier nicht nur die Probleme beschreiben, sondern auch Lösungswege aufzeigen können.

Nachwuchs und Politik erreichen

Kinder und Jugendliche spielen dabei eine besondere Rolle. Sie sind die Forschenden und Entwickler:innen von morgen. Um sie zu begeistern, braucht es mehr als nur Formeln und für Außenstehende schwierig zu fassende Theorien. Es geht darum, Neugier zu wecken, die Faszination für die Natur und Technik zu entfachen und ihnen zu zeigen, wie spannend die eigene Entdeckung neuer Zusammenhänge sein kann. Schulprojekte, Experimente und Wettbewerbe, bei denen sie selbst Hand anlegen können, sind ein idealer Einstieg. Dies kann zum Beispiel in **Schülerforschungszentren** und **Schülerlaboren** geschehen, die in den letzten Jahrzehnten an vielen Standorten entstanden sind. Ein aus der Teilchenphysik entstandenes Projekt ist das bundesweit agierende Netzwerk Teilchenwelt, in dem Schüler:innen zunächst durch Projekttag in ihrem Klassenverbund an die Elementarteilchen herangeführt werden und – bei weiterem Interesse – über ein Stufen- und Mentoringprogramm es bis zu mehrwöchigen Aufenthalten am CERN bringen können.

Doch die Arbeit der Forschenden endet nicht bei der Heranführung und Qualifikation der nächsten Generation. Ein weiterer entscheidender Kommunikationspartner der Wissenschaft ist die Politik, die über die finanzielle und strukturelle Ausgestaltung des Wissenschaftssystems entscheidet. Politiker:innen stehen jedoch oft vor einer besonderen Herausforderung: Sie müssen bei ihren Entscheidungen die gesellschaftlichen Implikationen wissenschaftlicher Ergebnisse

The screenshot shows the homepage of 'welt der physik'. At the top, there are navigation links for 'Teilchen', 'Materie', 'Leben', 'Technik', 'Erde', and 'Universum'. Below the navigation, there are several article thumbnails. The main article is titled 'Physik hinter den Dingen: Physik der Weihnachtsbäckerei' with a sub-headline 'Was beim Kneten und Backen in einem Teig passiert, verrät Thomas Vögls vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung im Interview.' and a date of 'Artikel | 11.12.2024'. Below this, there are three smaller article thumbnails: 'Kosmologie: Hubble-Konstante bleibt rätselhaft' (08.12.2024), 'Meeress: Eisfreie Arktis rückt näher' (03.12.2024), and 'Planeten des Sonnensystems: Es gab wohl nie Ozeane auf der Venus' (02.12.2024). A QR code is located to the right of the article thumbnails.



Seit 2003 bereitet das Onlinemagazin Welt der Physik aktuelle Themen der Physik für ein interessiertes Publikum verständlich auf. Es wird gemeinsam von der DPG und dem Bundesforschungsministerium herausgegeben. <https://weltderphysik.de>

VERTRAUEN UND EINFLUSS

Seit 2014 befragt die gemeinnützige Organisation „Wissenschaft im Dialog“ jedes Jahr rund 1000 Personen zu ihren Einstellungen gegenüber Wissenschaft und Forschung. Die Fragen werden dabei an aktuelle Entwicklungen angepasst. So fragte das Wissenschaftsbarometer 2020 konkret zum Einfluss der Wissenschaft auf die Corona-Politik und erfasste 2023 erstmals Ansichten zum Chatbot ChatGPT.

Das Wissenschaftsbarometer erlaubt so Einblicke in die zeitliche Entwicklung. Seit 2014 ist die Zahl der Befragten, die sich nicht gut über wissenschaftliche Ergebnisse informiert fühlen von 35 Prozent auf 17 Prozent gesunken. Fast ein Drittel fühlt sich hingegen gut bis sehr gut über Wissenschaft informiert. In Hinblick auf das Bildungsniveau der Befragten gibt es allerdings große Unterschiede, so fühlen sich 44 Prozent mit hohem formalen Bildungsniveau – also mindestens Abitur – gut bis sehr gut informiert, während es bei Personen mit mittlerem und niedrigem formalen Bildungsniveau nur 23–25 Prozent sind.

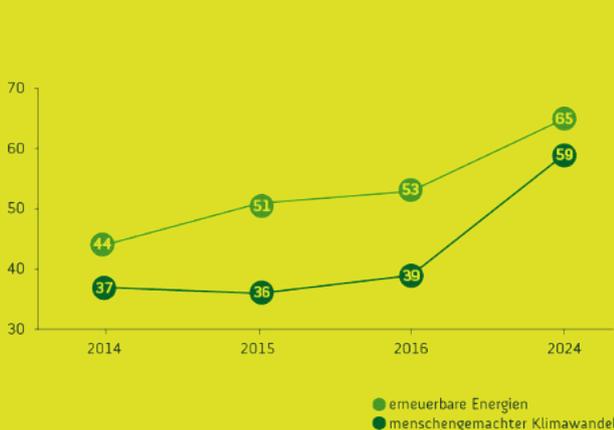
Eine ähnliche Tendenz ist in Bezug auf das Vertrauen in Wissenschaft zu beobachten. Bei Menschen mit Abitur ist dieses Vertrauen deutlich größer (75 Prozent) als bei Menschen, die eine Volks- oder Hauptschule besucht haben (40–46 Prozent). Niedrigschwellige Kommunikation von Forschungsergebnissen in allgemeinverständlicher Sprache vermag es, alle zu interessieren und zu informieren und hat, den Ergebnissen des Wissenschaftsbarometers zufolge, noch aufzuholen. Gerade in Zeiten von Social Media, Filterblasen und Fake News, welche viele in den Bann ziehen und häufig zu Fehlannahmen führen, kann Wissenschaft mit Fakten und deren Einordnung reduktionistischen und nicht-rationalen Perspektiven entgegensteuern. Kaum oder gar kein Vertrauen in die Wissenschaft hatten aber nur neun Prozent.

Misstrauen begründeten die Befragten vor allem mit der Abhängigkeit der Forschenden von ihren Geldgebern und möglichen Eigeninteressen. Im Jahr 2024 wurde das erste Mal explizit nach Wissenschaftsfreiheit gefragt. Fast 50 Prozent der Befragten schätzten diese zwar als gegeben ein, es bestanden allerdings auch erhebliche Zweifel bezüglich des Einflusses von Politik und Wirtschaft, den zwei Drittel als zu groß einschätzten. Viele würden sich auch gern an der Auswahl von Forschungsthemen oder an Forschungsprojekten beteiligen.

An den Aussagen zu erneuerbaren Energien und zum Klimawandel zeigt sich eindrücklich, dass gute Kommunikation von Forschungsergebnissen Sichtweisen in der Gesellschaft verändern kann. Während 2014 nur 37 Prozent der Bevölkerung den Aussagen der Wissenschaft zum menschengemachten Klimawandel vertrauten, sind es 2024 59 Prozent. Diese Tendenz lässt sich ebenso bei Aussagen zu erneuerbaren Energien ablesen, deren Nutzen 2014 weniger als die Hälfte der Befragten erkannten – 10 Jahre später sind es immerhin zwei Drittel. So ist weiterhin stichhaltige Wissenschaftskommunikation gefragt, um die Kluft zwischen Forschung und Gesellschaft zu schließen.

Jens Kube, Denise Müller-Dum und Elisabeth Stachura

Vertrauen in die Aussagen von Wissenschaftlern zu verschiedenen Themen*



Wie groß ist Ihrer Meinung nach der Einfluss der Wissenschaft auf die Politik?



mit einbeziehen ohne selbst Spezialist:in zu sein. Wo Verbände oder große Unternehmen der Wirtschaft Lobbyvertretungen im politischen Raum unterhalten, wird im Bereich der Forschung die Wissenschaftskommunikation zur Brückenbauerin. Beratungsformate, wie parlamentarische Abende oder Expertenanhörungen, geben den Verantwortlichen das Wissen an die Hand, das sie brauchen, um nachhaltige und fundierte Entscheidungen zu treffen. Und nicht zuletzt soll auch eine Publikation wie die vorliegende helfen, wissenschaftliche Erkenntnisse in den politischen Raum zu bringen und dort korrekt einzuordnen.

Ideenaustausch

Kommunikation ist dabei nicht nur etwas, das die Wissenschaft nach außen richtet – sie ist das Fundament der Forschung selbst. Jeder Fortschritt beginnt mit einem Austausch von Ideen. Wenn Forschende miteinander diskutieren, Theorien prüfen und Ergebnisse vergleichen, entsteht Wissen. Diese Dynamik wissenschaftlicher Kommunikation endet nicht an den Grenzen eines Fachgebiets. Im Gegenteil: So ist die wohl wichtigste Aufgabe unserer Zeit, den „Organismus Erde“ zu verstehen, ihn zu erhalten und somit die Frage



← Selbst so auf den ersten Blick schwer zu greifende Themen wie die Interpretation der Quantenmechanik lässt sich spielerisch erschließen. Mit der App „Katze Q – Ein Quanten-Adventure“ der Universität Würzburg wird ein zeitgemäßer Zugang gewählt, in dem Erklärungen, Animationen und Interaktionen digital kombiniert sind. Katze Q spielt dabei auf das berühmte Gedankenexperiment „Schrödingers Katze“ an.

Vom Science Center bis zum musikalisch unterstützten Vortrag: Die Formate in der Wissenschaftskommunikation haben sich in den letzten Jahren immer weiter entwickelt. Mit Mut zu Experimenten gelangen hier immer neue interessante Verknüpfungen von Wissenschaft, Kultur und Gesellschaft. →

anzugehen, wie eine resiliente, auf Nachhaltigkeit und Anpassungsfähigkeit ausgerichtete Wissenschaft und Wirtschaft der Zukunft aussehen könnte, nur zu lösen, indem Expert:innen u.a. aus Biologie, Meteorologie, Physik, Chemie, Informatik und nicht zuletzt aus den Sozialwissenschaften, der Psychologie sowie insbesondere aus der Ökonomie im gesellschaftlichen Diskurs zusammenarbeiten.

Hier zeigt sich, wie wichtig es ist, dass Wissenschaft nicht nur in ihrer eigenen Sprache bleibt. Gerade für Laien ist der Zugang zu wissenschaftlichen Themen oft eine Herausforderung. Zu viele Fachbegriffe und zu komplizierte Erklärungen können abschreckend wirken. Die besten Beispiele für gelungene Wissenschaftskommunikation zeigen, wie es anders geht. Projekte wie das Wissenschaftsfestival „Highlights der Physik“, Kneipenformate wie „Science goes public“ oder „Pint of Science“, Podcasts wie „Sag mal, du als Physiker...“, „Methodisch inkorrekt!“ oder „Welt der Physik“ beweisen, dass man selbst komplexe Themen anschaulich, spannend und zugänglich machen kann. Solche Formate holen die Men-

schen dort ab, wo sie stehen, und machen Wissenschaft zu einem Erlebnis.

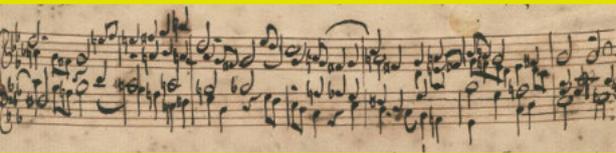
An den Aussagen zu erneuerbaren Energien und zum Klimawandel zeigt sich eindrücklich, dass gute Kommunikation von Forschungsergebnissen Sichtweisen in der Gesellschaft verändern kann. Während 2014 nur 37 Prozent der Bevölkerung den Aussagen der Wissenschaft zum menschengemachten Klimawandel vertrauten, sind es 2024 59 Prozent. Diese Tendenz lässt sich ebenso bei Aussagen zu erneuerbaren Energien ablesen, deren Nutzen 2014 weniger als die Hälfte der Befragten erkannten – 10 Jahre später sind es immerhin zwei Drittel. So ist weiterhin stichhaltige Wissenschaftskommunikation gefragt, um Forschung noch mehr in die Gesellschaft zu integrieren.

Ulrich Bleyer und Jens Kube

FACHSPRACHE – DIE BESONDERE HERAUSFORDERUNG DER WISSENSCHAFT

Die Sprache der Wissenschaft ist speziell – und setzt spezielle Kenntnisse voraus. Viele Fachdisziplinen haben eigene Begriffe und Darstellungsformen entwickelt, die perfekt auf ihre Untersuchungsfelder abgestimmt sind. Mit zunehmender Spezialisierung und Tiefe der wissenschaftlichen Untersuchungen steigt auch die Spezialisierung ihrer Darstellung und damit der Begriffswelt. Dem steht die Entwicklung entgegen, dass immer komplexere Systeme in ihrer Entwicklung untersucht werden, man denke nur an das Erdsystem und die Klimaproblematik. Besonders herausfordernd ist dabei die Mathematisierung der modernen Naturwissenschaft. Gerade die Bearbeitung komplexer Fragestellungen mit Computermodellen, KI-Anwendungen und immer neuen mathematischen Formalismen macht die Forschung für Laien schwer zugänglich.

Hier hilft ein Vergleich: Die mathematische Sprache der Physik ist wie Notenschrift in der Musik. Noten erlauben es, musikalische Ideen systematisch und universell zu teilen, sodass Orchester weltweit die gleichen Stücke spielen können. Doch genauso wie Laien sich schwer tun, eine Orchesterpartitur zu lesen und zu interpretieren, erschließt sich die mathematische Fachsprache nur den Spezialist:innen. Sich in diese Welt einzuarbeiten, verlangt viel Fleiß und Ausdauer, genau wie in der Musik.



Das bedeutet jedoch nicht, dass Wissenschaft für Laien unverständlich sein muss. So wie man Musik genießen kann, ohne Noten lesen zu können, ja sogar ganz ohne Noten musizieren kann, lassen sich wissenschaftliche Themen mit gutem Geschick und kreativen Erklärungen auch ohne Fachsprache vermitteln oder selbst erfahren. Populärwissenschaftliche Texte, anschauliche Videos und verständliche Vorträge, vor allem aber die Möglichkeiten selbst mit einfachen Experimenten Naturphänomene zu erfahren, holen Menschen in ihrer Lebenswelt ab und machen komplexe Inhalte greifbar. Dieses „Übersetzen“ ist ein entscheidender Schritt, um die Faszination und Bedeutung der Wissenschaft auch außerhalb ihrer Fachkreise erlebbar zu machen.



ANHANG

SACHREGISTER

1

1,5-Grad-Ziel 120, 270–271
3D-Druck 138, 189
3D-Sonografie 220
5G 161

A

Abrikosov-Gitter 29
Abrüstung 324–325
Abschlussprüfung 293
Adaption 233
additive Fertigung 189–190
AdS-CFT-Dualität 202
Aerosol 259–261, 273
Aggregatzustand 73
Akkretion 61
Akkretionskeil 104
Aktive Materie 97
Aktive Weiche Materie 99
Akustik 227
Albedo 127
Algorithmus 202
allgemeine Relativitätstheorie 18, 22, 27, 59–61, 67, 69–70, 307
ALICE 40, 49
ALMA 57, 63
Altermagnet 182–183
Aminosäure 133
Ammoniak 192
AMOC 111, 125, 254
amorphe Metalle 190
Analogrechner 185
angewandte Forschung 7
Angio-OCT 219
Anrege-Abtast-Methode 93
Anstieg des Meeresspiegels 111
Antarktis 121, 125
Anthropozän 118–119, 261, 263
Antibiotikaresistenz 192
Antiferromagnet 181
Antimaterie 153
Antiproton 52
Äquivalenzprinzip 59–60, 153, 161
Arbeitsmarkt 297
Arctic Haze 262
Argonaut Lander 170
ARIEL 169
Arktis 121, 127, 129
arktische Verstärkung 127
Artemis-Programm 170
Aschewolke 257
ASDEX Upgrade 193–194
Astrometrische Methode 282
Astroteilchenphysik 70
Atlantische Umwälzzirkulation (AMOC) 111, 125, 254
ATLAS 37–38, 40
Atmosphäre 108, 112, 115, 130
Atom 135
Atom-U-Boot 323
Atombombe 310, 323

Atomfalle 161
Atomkern 51
Atomuhr 22, 107, 160–161
Attosekundenphysik 93, 162, 167
Attraktor 236
Attributionsforschung 237
Audiologie 227
Aufforstung 271
Auflösung 132
Augmented Reality 290
Ausdehnung des Universums 67
außerschulischer Lernort 289
Automobilindustrie 190
Avogadro-Experiment 210
Avogadro-Konstante 210–211
Axion 53, 68
Axon 143

B

Bachelor 291
Bakterienkolonie 240
Bakterium 132, 135
Ballonmessungen 130
Baryon 48
Baryonen-Assymetrie 47, 152, 159
Batterie 267
BB84-Protokoll 203
BCS-Theorie 30
befristete Beschäftigung 298
Bell-Zustandsmessung 204
Beschichtung 192
beschleunigte kosmische Expansion 60
Beschleunigungssensor 175
Betazerfall 43, 46, 52
Beugungsgrenze 135
Bifurkation 124, 234, 236
Big Data 19, 155
Bildungsforschung 295
binaurales Hören 227
Bindungsenergie 97
Biodiesel 268
Biodiversität 108
Biomolekül 147
Biophysik 131
Biosphäre 108
BIPM (Internationales Büro für Maß und Gewicht) 16
Bit 187, 197–198, 277
Blob 241
Blutgefäß 142
Bodenecholot 255
Boltzmann-Konstante 210
Borexino 45
Bosch-Prozess 175
Bose-Einstein-Kondensat 85, 89, 91
Boson 36
Bottom-Quark 36
Brownsche Bewegung 97
Bundesagentur für Arbeit 297
Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) 320

C

C-14-Methode 255, 313
Calabi-Yau-Raum 54
Camera Obscura 314
Carbon Capture and Storage (CCS) 122, 271
Carbon Dioxide Removal (CDR) 271
CDRmare, CDRterra 272
CERN 14, 19, 40, 43, 50, 53, 55, 159, 317, 333
CHAMP 107
Chancenungleichheit 244
Chaos 235
Charm-Quark 36
ChatGPT 158, 184, 290, 334
Chemie 292
Chemotherapie 230
CHEOPS 282
Cherenkov Telescope Array (CTA) 19, 70
Climate Engineering 122, 259, 271, 320
CMB (kosmischer Mikrowellenhintergrund) 67
CMS 37, 40
Cochlea, Cochlea-Implantat 227
Compact Linear Collider (CLIC) 55
Computertomografie 215, 222, 225
Confinement 43
Cooper-Paar 30, 75, 212
Corioliskraft 253
Coronapandemie 120, 134, 242–243, 334
Coronavirus 141
CoRoT 168, 282
Couette-Experiment 234
CP-Symmetrie 159
CTD 253

D

Datenvolumen 19
DAVINCI 169
Dekarbonisierung 271
DEMO 194
Dendrit 143
Denken 143
Desoxyribonukleinsäure (DNA) 133, 145, 147
Deuterium 193
Deutsch-Jozsa-Algorithmus 202, 277
Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) 320
Deutsche Physikalische Gesellschaft iii, 299, 331
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY 43, 53
Diagnose 214
Dialog 333
Dichtefunktionaltheorie 87–88
Didaktik 295
Differentialakzelerometer 56
Digitalisierung 290
Digitalrechner 185
Diplom 293
Dipol 110
Dipol-Dipol-Wechselwirkung 90, 92
dipolare Gase 92
Direct Air Capture (DAC) 271
Diskontinuität 123

- disruptive Technologie 321
 Divertor 194
 DNA 133, 145, 147
 DNA-Origami 150
 Dobson Units (DU) 248, 275
 Dobson-Spektrometer 247
 Domäne 81
 Doppelspaltexperiment 24
 Doppelstern 52
 Doppler-Effekt 160
 Dosisberechnung 226
 Down-Quark 36
 Drehratensensor 175
 Drifter 112
 Drohne 259
 Dual-Use 321, 327
 Dunkle Energie 37, 67, 152
 Dunkle Materie 37, 53, 58, 67, 70, 152
 Dünnschichtsystem 229
 Dynamotheorie 109
- E**
 E-Bike 266
 Eichboson 36
 Eichsymmetrie 35–36
 Einheit 16
 Einheitensystem 11, 16, 209, 211
 Einheitenvorsätze 34
 Einschusszeit 194
 Einsteinkreuz 58
 Einsteinsche Feldgleichungen 59
 Einzelphotonenquelle 199
 Eisen 51–52
 Eisschild 114, 121
 Eiszeit 118
 elektrisches Dipolmoment 159
 Elektrodynamik 12
 elektromagnetische Wechselwirkung 36
 Elektromobilität 266
 Elektron 36, 44
 Elektronendichte 87
 Elektronenmikroskop 135
 Elektronenvolt 33, 69
 Elementarladung 36, 210
 Elementarteilchen 35, 39
 Elementsynthese 51
 ELSA 53
 ELT 284
 Embryo 239
 Emergenz 15, 18, 28, 30, 48, 73, 244
 Endlager 269
 Energie 193
 Energieband 77
 Energieeffizienz 184
 Energiequelle 193
 Energiespeicher 267
 Energieverbrauch 269
 Energieversorgung 244, 265
 Energiewende 265–266, 320
 Entropie 12, 21, 28, 99
 ENVISAT 251
 EnVision 169
 Epilepsie 144
 erdähnlicher Planet 281
 Erdbeben 104, 256
 Erdbebenfrühwarnsystem 258
 Erddynamo 103, 109
 Erderkundung 246, 249
 Erderwärmung 120, 124, 237
 Erdkern 103, 109
 Erdmagnetfeld 109, 176
 Erdmantel 103
 Erhaltungssätze 17
 erneuerbarer Energiequelle 265, 269
 eROSITA 19
 Erwerbsberuf Physiker:in 297
 Erythrozyt 139
 Erziehungswissenschaften 295
 ESA 169
 Ethik 150, 293, 320–321, 327
 EU AI Act 185
 Euclid 19, 68, 152
 Europa (Jupitermond) 168
 eV 33, 69
 Event Horizon Telescope (EHT) 62
 Evolution 145, 147
 Exabyte 19
 Exchange-Bias-Effekt 181
 ExoMars Rover 169
 Exoplanet 146, 153, 168, 281
 Experimentalphysik 291
 Extradimension 54
 Extremely Large Telescope (ELT) 284
 Extremwetter 120
 Exziton 85
- F**
 Fachsprache 335
 Fahrpreisanpassung 243
 Fahrrad 266
 FAIR 48, 52
 FAIR-Prinzipien 155
 Farbblutung 36, 43
 Farm Hall 310
 FASER 53
 FCKW 122, 253, 275
 Fear of missing out 244
 Fehlerkorrektur 200
 Feinstaub 261–262
 Feinstrukturkonstante 161
 Feld 13
 Feldeffekttransistor 78
 Feldgleichungen 60
 Femtosekundenlaser 160
 Fermi-Gas 89
 Fermi-LAT 19
 Fermion 35
 Fernerkundung 129, 247, 249, 255
 Ferromagnet 87, 179, 182, 235
 Fertigungstechnologie 192
 Festkörpertheorie 87
 Feynman-Diagramm 36
 Fieber 230
 Fischeschwarm 240
 Flachbildschirm 142
 Flavour 45, 47
 Floater 112, 254
 Flugzeug 259
 Fluorchlorkohlenwasserstoff 122, 253, 275
 Fluoreszenz 135
 Fluoreszenzmikroskopie 135, 140
 Fluoreszenzspektroskopie 98
 Flüssigkristall 97
 Flusslinien 30
 Flutkatastrophe 252
 fMRT 143
- Formaldehyd 252
 Forschung und Entwicklung 142
 fossile Energieträger 118, 266
 Frauenanteil 293, 298
 Frequenzkamm 160
 Frequenzselektivität 228
 Friedmann-Lemaître-Modelle 67
 Frühwarnsystem 258
 Fusion 51, 76, 191, 193, 269
 Fusionsreaktor 191
 Future Circular Collider (FCC-ee) 55
- G**
 Galaxienhaufen 58, 66, 68
 Galilei-Transformation 21
 Galileo-Mission 168
 Gammastrahlungsastrophysik 70
 Gantry 225
 Gas 73
 Gasturbinenkraftwerk 269
 Gaußverteilung 242
 Gebirge 106
 Gehirn 143
 Geisteswissenschaften 303
 Gen 147
 Generation 47
 GEO600 64
 Geodäsie 106, 207
 Geoengineering 271, 328
 Geoid 107
 GEOMAR 254
 Geometrie 22
 Geophysik 255
 geostationärer Satellit 250
 Geostrophie 253
 Geothermie 268
 GERDA 46
 gequetschtes Licht 25, 207
 Geschichte 292, 308
 gesellschaftliche Konflikte 244
 Gesetzgebung 329
 Gewitter 249
 Ginzburg-Landau-Gleichung 29
 Gleiter 112
 Gletscher 114
 globale Erwärmung 120, 124, 237
 Gluon 36, 43, 48
 Glyoxal 252
 GMR (Riesmagnetowiderstand) 180
 GNSS (Satellitennavigation) 129
 GOCE 107
 GOME 249, 251
 Göttinger Erklärung 324–325, 332
 GPS 59
 GRACE 105, 107
 GRACE Follow-On 105, 107
 Grafit 83, 194
 Gran-Sasso-Labor 45
 Graphen 30, 83–84
 Graupel 260
 Gravitation 18, 22, 59, 69, 159
 Gravitationsgesetz 68
 Gravitationskonstante 67
 Gravitationslinse 59, 66, 68
 Gravitationswellen 52, 60, 64, 69–70, 304
 Gravitationswellenastronomie 64
 Gravitationswellendetektor 60
 Gravitationswellenhintergrund 68

Graviton 69, 153
GRAVITY 62
GRAVITY+ 63
Grönland 125, 129
große Vereinheitlichung 53
Großrechner 112, 201
Grover-Algorithmus 187
Gründerzentrum 142
Grundgesetz 7, 321
Grundlagenforschung 7, 303
Grundlastkraftwerk 269
Grundwasser 106, 108, 269

H

H-Mode 194
H.E.S.S. 70
Habitable World Observatory (HWO) 284
Hagel 259–260
Halbleiter 177
Hall-Widerstand 211
Hamiltonoperator 87
Harrow-Hassidim-Lloyd-Algorithmus 202
HAWC 70
Hawking-Strahlung 202
heißer Jupiter 281
Helium 51
Heliumkern 193
Helmholtz, Hermann von 314
HERA 43
Heterostruktur 84, 163
Heuschrecke 240
Higgs-Boson 37, 41, 43, 53
Higgs-Factory 55
Higgs-Mechanismus 36
High-Luminosity-LHC 55
High-Performance-Computing 20
Highlights der Physik 335
Hochdurchsatzscreening 155
Hochleistungsflüssigkeitschromatograf 223
Hochtemperaturplasma 192–193
Hochtemperatursupraleiter 76, 206
Holozän 118–119, 270
Hörstörung 227
Hulse-Taylor-Doppelpulsar 60, 65
Hydrometeor 259
Hydrosphäre 108
Hysterese 181, 234–235

I

IceCube 70
Immunsystem 226
In-Situ-Beobachtung 112
Infinitesimalrechnung 17
Inflationsphase 68
Informatik 292
Informationsparadoxon 153, 202
Infrarot 247
Infrarotspektroskopie 137
Intensitätsauflösung 248
Interdisziplinarität 142
Interferenz 24–25
Interferometrie 64
Interkontinentalrakete 323
International Linear Collider (ILC) 55
Internationale Atomenergie-Organisation (IAEA) 318
internationale Zusammenarbeit 317
Internationales Einheitensystem (SI) 11, 16, 209, 211

Intertialsystem 21
Ion 188, 191
Ionenpumpe 239
Ionentherapie 225
IPCC (Weltklimarat) 120–121, 270, 332
Isolator 77
Isolierverglasung 266
Isotop 255
ITER 193

J

James-Webb-Weltraumteleskop (JWST) 52, 58, 71, 169
Janusteilchen 99–100
Jet 61, 65
JET (Fusionsexperiment) 193
Jetstream 127
Jod 221
Josephson-Effekt 212
Josephson-Kontakt 188, 199–200, 211–212
JUICE 58, 168–169
Jupiter 22, 109, 169
Jupitermond 22, 58, 168–169

K

Kallisto 168
Kalorimeter 38–39
Kalter Krieg 323
Kaltluftausbruch (CAO) 127
Karriere 301
Katastrophe 252
Katastrophenschutz 256
Kausalität 14, 27
KEK 47
Kelvin 210
Kepler-Gesetze 60
Kepler-Mission 282–283
Kern-Zeeman-Effekt 217
Kernfusion 51, 76, 191, 193, 269
Kernspintomografie 217, 225
Kernuhr 161
Kilogramm 210
Kippunkt 123, 234, 254, 270
klassische Mechanik 12
Klima 15, 108, 120, 123, 237
Klimakatastrophe 122
Klimakrise 263
Klimaneutralität 192
Klimaschutz 270–271
Klimawandel 112, 123, 127, 129, 238, 270, 273, 334
KM3NeT 70
Knochenimplantat 190
Knoten 242
Kohlendioxid 104, 112, 115, 118, 120–122, 192, 265
Kohlenmonoxid 261
Kolloid 97, 139
Kommunikationsfähigkeit 142
Kommunikationssatellit 276
komplexe Systeme 231, 233
kondensierte Materie 73
Konferenz der Fachbereiche Physik 291
Konfokalmikroskop 136
konstruktivistische Lerntheorie 295
Kontaktwechselwirkung 92
Kontinuitätsgleichung 17
Kontrastmittel 215
Konvektion 103, 109

Konzentrationsprofil 247
Korallenbleiche 111, 121, 126
korrelierter Isolator 85
kosmische Hintergrundstrahlung 60
kosmische Strahlung 70, 109
kosmische Zensur 152
Kosmologie 12, 18, 51, 67
kosmologische Inflation 68
kosmologische Konstante 67–68
Krankheitsausbreitung 242
Krebs 224
Krebsnebel 52
Krebszelle 137, 140
Kristallisationskeim 260
Kryoelektronenmikroskopie 133, 135
Kryosphäre 112–113
Kryptografie 18, 235
Kunst 311
künstliche Intelligenz 20, 88, 155–156, 184, 231, 279, 290, 321–322, 327
künstliche neuronale Netze 144, 279
Küstenforschung 253

L

La-Ola-Welle 240
Laborpraktikum 292
Lachgas 284
Landauer-Grenze 185
Landoberfläche 108
LANDSAT 249
Large 279
Large Hadron Collider (LHC) 19, 37, 40, 43, 47, 55, 156, 319
Larmorfrequenz 217
Laser 138, 191, 205
Laserfusion 193
Laserkühlung 205
Lava 104
Leben 131, 145, 147, 281
LEGEND-1000 46
Lehramt 293
Lehramtsstudium 294
Lehrkräftemangel 296
Leibniz, Gottfried Wilhelm 314
Leiter, elektrischer 77
Lemaître, Georges 67
Lense-Thirring-Effekt 59–60
LEP 43
Lepton 35
Lernapp 289
Lernen 144
Lernplattform 289
LHAASO 70
LHCb 40, 47
Licht 137
Lichtablenkung 60
Lichtenberg, Georg Christoph 311
Lichtgeschwindigkeit 11, 21, 23, 209
Lichtjahr 34
Lichtscheibenmikroskop 136
Lidar 247, 249, 260
LIGO 64, 207, 317
Linearbeschleuniger 224
Lipid 147
LISA 52, 64, 170
Literatur 311
Lithium 51
Lithografie 177
Lithographie 177

Lithosphäre 108
Logikgatter 196
Lokalität 14
Lorentz-Invarianz 160
Lorenz-Modell 234–235
Luftschauer 70
Luftverschmutzung 251, 261
Lunge 139
Lutetium 223

M

MAGIC 70
Magma 104
Magnetfeld 109
Magnetfusion 193
magnetisches Moment 81, 87–88
Magnetometer 208
Magnetosphäre 110
Magnetresonanztomografie 30, 143, 217, 222, 230, 313
Majorana 46, 79
Majorana-Teilchen 37
Manhattan-Projekt 323
Maria S. Merian (Schiff) 253
Mars Sample Return 169
maschinelles Lernen 260, 280
Master 291
Materialwissenschaft 155
Mathematik 17, 292
Matrizenmechanik 18
Max-Planck-Gesellschaft 7, 309
Maxwell-Gleichungen 16–17
Meereis 127
Meereis 113, 121, 127
Meereis-Albedo-Effekt 127
Meereisbedeckung 112
Meeresspiegel 111, 114, 119, 121, 125
Meerestemperatur 121
Mehrphotonenzustand 199
Meißner-Ochsenfeld-Effekt 29, 76
Membran 139
Memory-Based-Computing, 20
Mensch 131
Mentoring 299
Merkur 109
MESA 53
Meson 48
Mesosphäre 116
Messgerät 11
Messung 16
Messunsicherheit 16
Messvorgang 24
Metall-3D-Druck 189
metallische Gläser 190
Metamaterial 15, 80
Metastase 222
Meteor (Schiff) 253
Meteorologie 130, 235, 256
Meteosat 250
Meter 23, 209
Meterkonvention 209
Methan 251
MetOp 250
Metrologie 16, 210
Michael Faraday 314
Microscope 56
Mikrofluidik 140
Mikrolinsenmethode 282

Mikroroboter 100, 147
Mikroskop 162
Elektronen- 135
Fluoreszenz- 135, 140
Konfokal- 136
Kryoelektronen- 133, 135
Lichtscheiben- 136
optisch 135, 139
Rasterkraft- 136
Superresolution- 135
Tunnel- 89

Mikrowellen 247
Mikrowellenhintergrund 67
Mikrozensus 297
Milchstraße 57–58
Militär 321
Militärforschung 322–323
Millisekundenpulsar 65
MINFLUX 136
Mini-Neptun 281
Modulplan 292
Moirémuster 85
Mol 210
Molekül 135
Molekulardynamik 133, 146
Molybdänsulfid 83
Mondlandefähre 189
Mooresches Gesetz 177, 185
MOSAIC 129
MRT 30, 143, 217, 222, 230, 313
multimedialer Unterricht 289
Multimessenger-Astronomie 70
Multipol 110
Muschel-Theorem 99
Musik 311
Muskelzelle 139
Muster 233, 242
Myon 36, 43
Myondetektor 38

N

Nanomedizin 229
Nanopartikel 229–230
Nanotechnologie 100, 229
NASA 169
Nationale Akademie Leopoldina 329
Nationale Forschungsdateninfrastruktur (NFDI) 155
Naturgesetz 11–12, 304
Naturkonstante 11, 210
Naturwissenschaft 303
Néel-Relaxation 230
nematische Phase 97
Neptun 109
Nervenzelle 143, 239
neuromorphes Computing 143, 158, 185–186
Neuron 143
neuronale Netze 143–144, 157–158
Neurowissenschaft 144
Neutrino 36, 45, 51
Neutrinomasse 46, 153
Neutrinooszillation 45
Neutron 51
Neutronenstern 51, 58, 61, 65
Newtonsches Gravitationsgesetz 60
Nichtgleichgewicht 233
Nickel 51–52
Nickeloxid 76

Niederschlag 260, 273
Niedrigfeld-MRT 218
NMR-Spektroskopie 133
NOEMA 63
Noether-Theorem 35
Nordpol, magnetischer 109
Now-Cast 256
nukleare Bedrohung 263
nukleares Arsenal 324
Nukleosynthese 51
Nullmeridian 23
Nullpunktenergie 28
Numerik 18–19

O

Oberflächenstrahlung 248
Ohmsches Gesetz 11
Onlinevideo 289
optisch gepumptes Magnetometer (OPM) 208
optische Atomuhr 160
optische Kohärenztomografie 219
optische Pinzette 97, 137
optische Uhr 107, 161
optisches Gitter 206
optisches Mikroskop 135, 139
Optogenetik 138
Organ 131
Overshoot-Szenario 124, 126
Ozean 112
Ozeanbeobachtung, Ozeanerkundung 112, 130, 253
Ozeanerwärmung 112
Ozeanografie 254
Ozon 116, 130, 247, 261–262
Ozonloch 122, 275
Ozonschicht 116, 248, 276

P

Paläomagnetismus 109
Pandemie 243
Paritätssymmetrie 159
Parsec 34
Pedosphäre 108
Pentaquark 50
Periheldrehung 59–60
Periodensystem 51
Periodenverdopplung 236
Perkolations 233–234
Permafrost 127
Persistenz 256
Perzeptron 144
PET (Positronen-Emissions-Tomografie) 221–222
Petabyte 19
PETRA 43
Phasenübergang 29, 48, 52, 90, 95, 100, 144
Philosophie 292, 305
Phorese 99
Photon 36, 137
Photosynthese 268, 271
Photovoltaik 265, 267
Phyphox 176
Physarum polycephalum 241
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) 22, 210
Physikdidaktik 295
Physikgeschichte 308
Physiksammlung 290
Pierre-Auger-Observatorium 70

Piezoeffekt 219
 Pixeldetektor 42
 Planck-Energie 69
 Planck-Konstante 11, 195, 210
 Plasma 52, 73, 178, 191–193
 PLATO 168–170, 282–283
 Podcast 289, 335
 Poincaré-Transformation 21
 Poissonverteilung 242
 Polarlicht 191
 Polaron 94
 Polarstern (Schiff) 129, 253
 Politikberatung 329
 Polymer 97
 Positronen-Emissions-Tomografie (PET) 221–222
 Potenzgesetz 187
 Präzisionsmessungen 151, 159
 Pressluftspeicher 267
 Primärenergiebedarf 265
 Primfaktorzerlegung 187
 primordiale Nukleosynthese 51
 Promotion 142, 291, 294, 298
 Prostatakarzinom 223
 Protein 133, 147
 Proton 36, 51
 Protonentherapie 225
 Protoplanet 57
 Prüfung 290
 Psychologie 295
 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 22, 210
 Pugwash Conferences 323
 Pulsar 65
 Pulsar Timing Array 66
 Pulsar-Timing 65
 Pumpspeicher 267

Q

Quadrupol 110
 Quanten-Hall-Effekt 77–78, 211
 Quantenalgorithmus 202, 278
 Quantenchromodynamik 48
 Quantencomputer 18, 20, 79, 91, 157, 185–187, 197, 201–202, 277
 Quantenemitter 200
 Quantenfehlerkorrektur 158
 Quantenfeld 14
 Quantengasmikroskop 205
 Quantengravitation 69
 Quanteninterferenz 278
 Quantenkryptografie 198, 203, 278
 Quantenmaterie 89
 Quantenmechanik 24, 87, 153, 195, 277
 Quantenparallelismus 187, 277–278
 Quantenphysik 12
 Quantenpunkt 200
 Quantenrepeater 204
 Quantensensorik 161, 207
 Quantensimulation 205
 Quantentechnologie 26
 Quantenteleportation 203
 Quantentheorie 27, 87, 277
 Quark 35, 43, 48
 Quark-Gluon-Plasma 48–49
 Quasiteilchen 85
 Qubit 91, 187–188, 197–199, 201, 278
 Quetschlicht 25, 207
 Quizplattform 289

R

r-Prozess 52
 Radar 247, 260
 Radialgeschwindigkeitsmethode 282
 Radioaktivität 221, 224
 Radioisotop 223
 Radionuklidbatterie 170
 Radiopharmazeutikum 223
 Rahmentheorie 27
 Ramanspektroskopie 137
 Rasterkraftmikroskop 136
 Rastersondenmikroskop 162, 208
 Raumkrümmung 67
 Raumwärme 266
 Raumzeit 22, 69
 reaktives Ionentiefenätzen 175
 Rechenleistung 184, 201
 Rechenmodell 112
 Refraktärzustand 239
 Regelstudienzeit 294
 Regen 259
 Rekonnexion 110
 Relativitätstheorie 305
 allgemeine 18, 22, 27, 59–61, 67, 69–70, 307
 spezielle 21, 27, 60
 Residuallast 268
 Resonanz 188
 Resonator 196
 Ressortforschung 329–330
 Reynoldszahl 142, 234
 Ribonukleinsäure (RNA) 145, 147
 Ribosom 145
 Riesenmagnetowiderstand (GMR) 180
 Ringlaser 106
 Ringnebel 72
 Risiko 270
 Risikokommunikation 319
 RNA 145, 147
 Röntgen-Freie-Elektronen-Lasern 162
 Röntgenbeugung 163
 Röntgenstrahlung 215, 313
 Röntgenstrukturanalyse 133
 rote Blutkörperchen 135
 Roter Riesenstern 52
 Rotverschiebung 59–60, 107
 ROV 130
 Rückkopplung 127, 233
 Russell-Einstein-Manifest 325
 Rüstung 325
 Rüstungskontrollverträge 325–326
 Rydberg-Atom 90–91, 206
 Rydberg-Blockadeeffekt 91

S

s-Prozess 52
 Sagittarius A* 60–61
 SARS-CoV-2-Virus 134, 141
 Satellit 247, 249, 260
 Satellitennavigation 59, 129
 Saturn 109
 Sauerstoff 115
 Scanner (Chipfertigung) 177
 Schadstoff 261
 Scherung 97
 Schiff-Effekt 60
 Schiffsabgase 274
 Schilddrüse 221

Schleifenquantengravitation 69
 Schleimpilz 241
 Schnee 259–260
 Schrödinger-Gleichung 24, 87, 305
 Schrödingers Katze 202, 305–306, 335
 Schule 289, 295
 Schülerforschungszentrum 333
 Schülerlabor 333
 Schulversuch 290
 schwache Wechselwirkung 43
 schwaches Äquivalenzprinzip 56
 Schwarmbildung 100, 240
 Schwarzes Loch 28, 57, 60–61, 69–70, 152, 202, 304, 307
 Schwarzschildradius 61–62, 202
 Schwefeldioxid 261
 Schwerkraft 22, 59, 67
 SCIAMACHY 249, 251
 Science Diplomacy 316
 Science Center 335
 Science-Fiction 313
 Seesalzinjektion 272
 Sekunde 209
 Selbstorganisation 144, 233
 Sensor 175
 Sentinel 251
 SESAME 317
 Sgr A* 60–61
 Shor-Algorithmus 187, 202, 278
 SI (Internationales Einheitensystem) 11, 16, 209, 211
 Simulation 19, 133
 Single-Photon-Emissionscomputertomografie 221
 Singularität 28, 153, 307
 Skyrmion 77, 81, 88
 Sloan Digital Sky Survey (SDSS) 19
 Smartphone 175–176
 Smog 261
 Solar Radiation Management (SRM) 271
 Sonne 57
 Sonnensystem 57, 281
 Sonnenwind 110
 Sonografie 219
 soziale Netzwerke 233
 Sozialwissenschaften 295, 320
 sozioökonomischen Physik 244
 Spannungsnormal 79, 212
 SPECT 221–222
 Spektralanalyse 247
 spezielle Relativitätstheorie 21, 27, 60
 Spieltheorie 243
 Spin 35, 87
 Spurdetektor 39
 Square Kilometre Array (SKA) 19, 63, 66, 157, 279
 Squeezing 25
 SQUID 207
 Stadtverkehr 266
 Standardmodell der Teilchenphysik 13, 35, 43, 53, 68, 160
 Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) 47
 starke Wechselwirkung 36, 50, 52
 starkes Äquivalenzprinzip 66
 Starlink 276
 statistische Physik 12, 28
 Staubscheibe 57
 Stellarator 193
 steriles Neutrino 46

Sterilisierung 192
 Stern 51, 191
 Sternentstehungsregion 58
 Stickstoff 115, 192
 Stickstoffdioxid 249, 252
 Stoffmenge 210
 Stoffwechsel 149
 STORM 136
 Strahlendosis 223
 Strahlenexposition 216
 Strahlentherapie 224, 230
 Strahlungsrückwirkung 60
 Strange-Quark 36
 Stratigrafie 119
 Stratosphäre 116, 276
 stratosphärische Aerosolinjektion (SAI) 272
 Stringtheorie 54
 strombasierte Technologien 265
 Stromnetz 244
 Stromnormal 79
 Stromspeicher 268
 Strömungsmechanik 256
 Strukturbildung 233
 Studienerfolg 294
 Studium 291
 Subduktionszone 104
 Sudbury Neutrino Observatory (SNO) 45, 53
 Südpol, magnetischer 109
 Super-Erde 281
 Super-Kamiokande 45
 Superresolutionsmikroskop 135
 Supernova 51, 58, 70
 Superposition 201
 Superspreader-Ereignis 243
 Supersymmetrie 55
 Suprafestkörper 90
 Suprafluid 89
 Supraleiter 29, 75, 79, 188, 199
 Süßwasser 105
 Süßwassereis 113
 SWOT 255
 Symmetrie 17, 67, 77
 Symmetrieverletzung 47, 53
 Synchrotron 52, 162
 synthetische Biologie 147, 322
 synthetische Zelle 147
 synthetischer Kraftstoff 266

T
 Tageslänge 106
 Tauon 36
 Technikfolgenabschätzung 319–321, 328
 Teilchen 13, 109
 Teilzeittätigkeit 298
 Temperaturanstieg 127, 273
 Terabyte 19
 TESS 282
 Tetraquark 50
 Tevatron 43
 theoretische Physik 292
 Theorie 27
 Theorie von Allem 28
 Theragnostik 222
 Therapie 214
 thermisches Kraftwerk 265
 Thermodynamik 12, 233, 256
 Tierversuche 327
 TMR (Tunnelmagnetwiderstand) 180

Tokamak 193
 Top-Quark 36
 Topologie 77, 81
 topologische Photonik 80
 topologischer Isolator 78–79
 topologischer Supraleiter 79
 Trägheitsfusion 193
 Transistor 78
 Transitmethode 282
 Transmon-Qubit 200
 Trappist-1 283
 Treibhausgas 118, 120
 Tritium 193–194
 TROPOMI 251
 Troposphäre 116
 Tscherenkowstrahlung 39, 70
 Tschernobyl 320
 Tsunami 104, 258
 Tumor 140, 218, 223–224
 Tunnelmagnetwiderstand (TMR) 180
 Tunnelmikroskop 89
 Turbulenz 100, 233, 260
 Turing, Alan 32
 Twist 84

U
 Überlagerungszustand 277
 Übung 291
 Uhr 22–23
 Ultra-Niedrigfeld-MRT 218
 Ultrahochvakuum 205
 Ultrakurzzeitphysik 93–94, 162–164, 167
 Ultrakurzzeitspektroskopie 93, 167
 Ultraschall 219
 ultraschnelles Transmissions-
 Elektronenmikroskop 95
 Ultraviolett 177, 192
 Umgehungsstraße 243
 Umpolung 109
 Umwälzbewegung (Ozean) 111, 124
 Umwandlungsverlust 266
 unbemanntes Waffensystem 322
 Unschärferelation 25
 Unterhaltungselektronik 175
 Unterricht 289, 295
 Up-Quark 36
 Ur-Kilogramm 210
 Ur-Meter 209
 Uranus 109, 154
 Urknall 48, 51, 67

V
 Van-der-Waals-Kraft 91, 139
 Vegetation 233, 238
 Vektorboson 36
 Vera-Rubin-Observatorium 19
 verborgene Parameter 25
 Verbrennung 118, 261, 265
 VERITAS 70, 169
 Verkehrsnetzwerk 242
 Vermittlung 333
 Vernetzung 242
 Versauerung 121
 Verschränkung 25, 204
 Vertrauen 334
 Verwitterung 272
 Very Large Telescope (VLT) 62
 Videokonferenz 290
 Virgo 64

Virus 132
 Viskoelastizität 139
 visueller Cortex 144
 VLBI 106
 Vogelschwarm 240
 Vollzeitbeschäftigung 298
 Von-Klitzing-Konstante 211
 Vorhersagehorizont 257
 Vorlesung 288, 291
 Vulkanausbruch 256, 272

W
 W-Boson 36, 44, 46
 Wafer 177
 Wald 125
 Waldbrand 262
 Wärmepumpe 266
 Warmlufteinschub (WAI) 127
 Warmzeit 118
 Wasserdampf 115
 Wasserstoff 51, 165, 266
 Wasserstoffbombe 324
 Wasserstoffbrennen 51
 Wasserstoffperoxid 99
 Wassertropfen 260
 Wattwaage 151, 210
 weiche Materie 97, 139
 Weißer Zwerg 52, 61
 Weißes Loch 152
 Wellenfunktion 24, 305–306
 Wellenleiter 80
 Wellenmechanik 18
 Welt der Physik 333
 Weltklimakonferenz 120
 Weltklimarat (IPCC) 120–121, 270, 332
 Wendelstein 7-AS, 7-X 193–194
 Wetter 259
 Wettervorhersage 256
 WIMP 68
 Windenergie 265, 267–268
 Wirbel 81
 Wissenschaftsbarometer 334
 Wissenschaftsdiplomatie 317
 Wissenschaftsfreiheit 334
 Wissenschaftsgeschichte 310
 Wissenschaftskommunikation 293, 333
 Wolfram 194
 Wolframdiselelid 83
 Wolken 259
 World Wide Web 19
 Wüstenbildung 238

Z
 Z-Boson 36, 44
 Zebrafisch 239
 Zeit 21
 Zeitverzögerung 59–60
 Zelle 131, 135, 137, 139, 143, 147–148
 Zellkraftmikroskopie 139
 Zellmembran 139
 Zellteilung 140, 148
 Zentralperspektive 314
 Zika-Virus 133
 Zivilklause 310
 Zucker 147
 Zwei-Photonen-Laserdruck 138
 Zyklotron 222

MITWIRKENDE

Werner Aeschbach, Universität Heidelberg
Monika Aidselburger, Max Planck Institut für Quantenoptik (MPQ), Garching
Christian Back, TU München
Anna Bakenecker, TU Darmstadt
Vadim Banine, ASML, Berlin
Markus Bär, PTB, Berlin
Matthias Bartelmann, Universität Heidelberg
Pia Bausch, OHB System AG, Bremen
Reimund Bayerlein, University of California, Davis (USA)
Jacob Beautemps, Universität zu Köln
Christoph Becher, Universität des Saarlandes
Ingeborg Beckers, BHT, Berlin
Ulrike Beisiegel, ehem. Universität Göttingen
Oliver Benson, HU Berlin
Carsten Beta, Universität Potsdam
Fabian Bleier, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen
Ulrich Bleyer, Teltow
Nicole Bobrowski, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo, Catania (Italien)
Holger Boche, TU München
Susann Boretius, DPZ, Göttingen
Dieter Braun, LMU München
Peter Braun-Munzinger, GSI, Darmstadt
Dirk Brockmann, TU Dresden
Piet Brouwer, FU Berlin
Bernd Brüggemann, Universität Jena
Markus Buchgeister, BHT, Berlin
Dmitry Budker, Universität Mainz, GSI, Darmstadt, Universität Kalifornien, Berkeley (USA)
John P. Burrows, Universität Bremen
Beate Ceranski, Universität Stuttgart
Anna Chrobry, Airbus Defence and Space, Bremen
Ralph Claessen, Universität Würzburg
Roberto Covino, Universität Frankfurt am Main
Torsten Dahm, GFZ, Potsdam
Martin Dameris, LMU München
Karsten Danzmann, Universität Hannover
Sebastian Deffner, University Maryland, Baltimore County (USA)
Klaus Desch, Universität Bonn
Daniel Dohmen, Heinrich-Hertz-Schule, Hamburg
Sebastian Dohrmann, DPG, Bad Honnef
Janina Doll, TRUMPF Laser- und Systemtechnik SE, Ditzingen
Jonathan Donges, PIK, Potsdam
Claudia Draxl, HU Berlin
Herbert Dreiner, Universität Bonn
Astrid Eichhorn, Universität Heidelberg
Jens Eisert, FU Berlin
Thomas Elsaesser, MBI, Berlin
Johanna Erdmenger, Universität Würzburg
Karin Everschor-Sitte, Universität Duisburg-Essen
Heino Falcke, Universität Nijmegen (Niederlande)
Stefan Filipp, TU München
Stefan Finkbeiner, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen
Herbert Fischer, KIT, Karlsruhe
Frank Fleschner, MPI für Plasmaphysik, Garching
Adalbert Fono, LMU München
Norbert Frank, Universität Heidelberg
Yannick Gehlen, DPG, Bad Honnef
Reinhard Genzel, MPI für extraterrestrische Physik, Garching
Mathias Getzlaff, Universität Düsseldorf
Karl-Heinz Glaßmeier, TU Braunschweig
Kerstin Göpfrich, Universität Heidelberg
Stephan Götzinger, FAU, Erlangen
David Grodzki, Siemens Healthineers AG, Erlangen
Rudolf Gross, TU München
David Gross, Universität zu Köln
Armin Grunwald, KIT, Karlsruhe
Christian Haas, AWI, Universität Bremen
Eva Hackmann, Universität Bremen
Ulrich Hansen, Universität Münster
Stephanie Hansmann-Menzemer, Universität Heidelberg
Günther Hasinger, TU Dresden
Martina Havenith, Universität Bochum
Martin Heimann, MPI für Biogeochemie, Jena
Tobias Heindel, TU Berlin
Susanne Heinicke, Universität Münster
Caroline Heneka, Universität Heidelberg
Gregor Hertel, Universität Freiburg
Ronja Hetzel, RWTH Aachen
Rolf-Dieter Heuer, Genf (Schweiz)
Michèle Heurs, Universität Hannover
Johann M. Heuser, GSI, Darmstadt
Tra-Mi Ho, DLR, Bremen
Sebastian Hofferberth, Universität Bonn
Corinna Hoose, KIT, Karlsruhe
Ulrich Hoppe, Universitätsklinikum Erlangen
Philipp Hövel, Universität des Saarlandes
Rupert Huber, Universität Regensburg
Oliver Huhn, Universität Bremen
Oliver Jäkel, DKFZ, Heidelberg
Rolf Janovsky, OHB System AG, Bremen
Fedor Jelezko, Universität Ulm
Klaus-V. Jenderka, Hochschule Merseburg
Tomáš Jungwirth, Tschechische Akademie der Wissenschaften, Prag (Tschechien), Universität Nottingham (UK)
Valentin Kahl, ibidi GmbH, Gräfelfing
Andrea Kaiser-Weiss, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
Bernhard Keimer, MPI für Festkörperforschung, Stuttgart
Bernhard Ketzer, Universität Bonn
Sabine Klapp, TU Berlin
Mathias Klaus, Universität Mainz, Universität Trondheim (Norwegen)
Mathias Kläui, Universität Mainz
Axel Kleidon, MPI für Biogeochemie, Jena
Angelika Knothe-Schulz, Universität Regensburg
Tobias Korn, Universität Rostock
Sarah Köster, Universität Göttingen
Heiko Krabbe, Universität Bochum
Michael Kramer, MPI für Radioastronomie, Bonn
Annika Kreikenbohm, Würzburg
Jens Kube, awk/jk, Bremen
Gitta Kutyniok, LMU München
Claus Lämmerzahl, Universität Bremen
Karlheinz Langanke, GSI, Darmstadt
Tim Langen, Universität Stuttgart
Mojib Latif, GEOMAR Kiel, Universität Kiel
Inti Lehmann, FAIR/GSI, Darmstadt
Dennis Lehmkuhl, Universität Bonn
Thomas Leisner, KIT, Karlsruhe
Peter Lemke, AWI, Universität Bremen
Harald Lesch, LMU München
Christian Lisdat, PTB, Braunschweig
Meike List, DLR und Universität Bremen
Ulrike Lohmann, ETH Zürich (Schweiz)
Thomas Lohse, HU Berlin

Robert Löw, Universität Stuttgart
Hartmut Löwen, Universität Düsseldorf
Gerhard Luther, Universität des Saarlandes
Eric Lutz, Universität Stuttgart
Karl Mannheim, Universität Würzburg
Florian Marquardt, MPI für die Physik des Lichts, Erlangen
Silvia Masciocchi, GSI, Darmstadt
Klaus Mecke, Universität Erlangen-Nürnberg
Tanja E. Mehlstäubler, PTB, Braunschweig, Universität Hannover
Florian Meinert, Universität Stuttgart
Ehud Meron, Ben-Gurion University, Beer-Sheva (Israel)
Ingrid Mertig, Universität Halle-Wittenberg
Dieter Meschede, Universität Bonn
Anja Metzethin, DPG, Bad Honnef
Heinrich Miller, AWI, Universität Bremen
Franz-Josef Molé, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
Simon Müller, Agora Energiewende, Berlin
Denise Müller-Dum, awk/jk, Bremen
Stephan G. Nekolla, TU München
Cord-Patrick Neuber, Bremen
Götz Neuneck, Universität Hamburg
Gereon Niedner-Schatteburg, TU Kaiserslautern
Ulrike Niemeier, MPI für Meteorologie, Hamburg
Justus Notholt, Universität Bremen
Silke Ospelkaus-Schwarzer, Universität Hannover
Safia Ouazi, Robert-Havemann-Gymnasium, Berlin
Gabriel Pankow, TRUMPF SE + Co. KG, Ditzingen
Ulrich Panne, BAM, Berlin
Stephan Paul, TU München
Chiara Pedersoli, OHB SE, Bremen
Ekkehard Peik, PTB, Braunschweig
Volker Perlick, Universität Bremen
Tilman Pfau, Universität Stuttgart
Thomas Pfeifer, MPI für Kernphysik, Heidelberg
Christian Pfeleiderer, TU München
Norbert Pietralla, TU Darmstadt
Ulrich Platt, Universität Heidelberg
Tilman Plehn, Universität Heidelberg
Katja Poppenhäger, Leibniz-Institut für Astrophysik, Potsdam
Ulrich Pöschl, MPI für Chemie, Mainz
Jörg Pretz, RWTH Aachen und Forschungszentrum Jülich
Viola Priesemann, MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen
Heike Rauer, DLR, Berlin
Arno Rauschenbeutel, HU Berlin
Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin
Karl-Henning Rehren, Universität Göttingen
Andreas Reiserer, TU München
Stephan Reitzenstein, TU Berlin
Bernhard Renger, TU München
Jascha Repp, Universität Regensburg
Markus Rex, AWI, Potsdam
Monika Rhein, Universität Bremen
Klaus Richter, Universität Regensburg
Andreas Richter, Universität Bremen
Heike Riel, IBM Research Europe, Zürich
Paweł Romańczuk, HU Berlin
Claus Ropers, MPI für Multidisziplinäre Naturwissenschaften, Göttingen
Tim Ruhe, Universität Dortmund
Daniela Rupp, ETH Zürich (Schweiz)
Melanie Rutowski, DPG, Bad Honnef
Markus Sauer, Universität Würzburg
Marco Scharringhausen, DLR, Bremen

Silvia Scheithauer, MPI für Astronomie, Heidelberg
Hans Joachim Schellnhuber, IIASA, Laxenburg (Österreich), PIK, Potsdam
Hansjörg Scherer, PTB, Braunschweig
Arne Schirrmacher, HU Berlin
Carolin Schlein, PHYWE, Göttingen
Linda Schlemmer, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
Martin Schleske, Meisteratelier für Geigenbau, Landsberg am Lech
Peter Schlosser, Universität Arizona (USA)
Anja Schmidt, DLR, Oberpfaffenhofen-Wessling
Horst Schmidt-Böcking, Universität Frankfurt am Main
Ferdinand Schmidt-Kaler, Universität Mainz
Sunke Schmidtke, GEOMAR, Kiel
Melanie Schnell, DESY, Hamburg, Universität Kiel
Stefan Schönert, TU München
Lutz Schröter, Volkswagen AG, Wolfsburg
Ulrich Schwarz, Universität Heidelberg
Olaf Schwarzkopf, Helmholtz-Zentrum Berlin
Petra Schwill, MPI für Biochemie, Martinsried
Monika Sester, Universität Hannover
Jens Simon, PTB, Braunschweig
Gunnar Spreen, Universität Bremen
Elisabeth Stachura, awk/jk, Bremen
Thomas Stocker, Universität Bern (Schweiz)
Ulrich Stroth, MPI für Plasmaphysik, Garching und TU München
Yvonne Struck, Heinrich-Hertz-Schule Hamburg
Alexander Szameit, Universität Rostock
Simone Tilmes, NCAR, Boulder (USA)
Marc Timme, TU Dresden
Joachim Ullrich, PTB, Braunschweig
Markus Ulm, Robert Bosch GmbH, Reutlingen
Stefan Ulmer, Universität Düsseldorf, RIKEN, Saitama (Japan)
Mark van de Kerkhof, ASML Veldhoven (Niederlande)
Martin Visbeck, GEOMAR Kiel, Universität Kiel
Achim von Keudell, Universität Bochum
Klaus von Klitzing, MPI für Festkörperforschung, Stuttgart
Christian von Savigny, Universität Greifswald
Philipp Wagenblast, TRUMPF Laser- und Systemtechnik SE, Ditzingen
Stefanie Walch-Gassner, Universität zu Köln
Joachim Wambsgaß, Universität Heidelberg
Harald Weinfurter, LMU München
Manfred Wendisch, Universität Leipzig
Reinhard Werner, Universität Hannover
Michael Wilczek, Universität Bayreuth
Thomas Wilhelm, Universität Frankfurt am Main
Frank Wilhelm-Mauch, Forschungszentrum Jülich GmbH
Ricarda Winkelmann, PIK, Potsdam
Martin Wolf, FHI, Berlin
Jörg Wrachtrup, Universität Stuttgart
Jörg Wunderlich, Universität Regensburg
Ursula Wurstbauer, Universität Münster
Karin Zach, Meckenheim
Daniel Zeuch, Forschungszentrum Jülich
Karl-Friedrich Ziegahn, KIT, Karlsruhe
Johannes Zierenberg, Universität Göttingen
Walter Zimmermann, Universität Bayreuth

Die Instituts- und Firmenzugehörigkeiten sind mit Stichtag 1. Juli 2024 angegeben.

