



2017
highlights der **physik**

Struktur & Symmetrie

Wissenschaftsmagazin

Dies ist eine Zusammenfassung in „Leichter Sprache“.

Struktur & Symmetrie in Leichter Sprache

Ordnung ist das halbe Leben.

Das sagen viele. Und oft stimmt es auch.

Strukturen und Symmetrien sind Ordnungen.

Sie gibt es überall.



In einem Spiegel können wir unser Gesicht erkennen.

Es sieht genauso aus wie unser echtes Gesicht.

Aber irgendetwas ist anders.

Die Gesichtshälften sind vertauscht, meine linke Gesichtshälfte ist im Spiegelbild rechts.

Das nennen wir Spiegelsymmetrie.

Wir sagen: Das sieht aus wie im Spiegel.



Wie beim Spiegel gibt es in der Natur feste Regeln.

Im Großen wie im Kleinen.

Die Planeten kreisen in Bahnen um die Sonne.

Der Sand auf dem Meeresboden bildet ein Muster.

Symmetrie gibt es häufig in der Natur.

Wir sehen sie bei Gänseblümchen, bei Blättern, bei Schneeflocken oder auf dem Fell eines Leoparden.



Auch die Spirale ist eine bekannte Form in der Natur:

Schneckengehäuse, Sonnenblumen oder Tannenzapfen haben Spiralen.

Eine Spirale erhalten wir, wenn wir von einem Punkt aus eine Linie zeichnen, die sich kreisend immer weiter von diesem Punkt entfernt.

Auch im Universum gibt es Spiralen. Viele Galaxien haben die Form einer Spirale.



Die Natur ist nicht perfekt.

Muster, die wir als schön empfinden, sind oft nicht völlig gleich.

Gesichter wirken schöner, wenn die Hälften sich leicht unterscheiden.



Manche Muster kopieren sich selbst immer weiter.

Sie tauchen immer wieder auf. Im Großen wie im Kleinen.

Das sieht man zum Beispiel beim grünen Romanesco-Blumenkohl.

Solche Gebilde nennt man Fraktale.



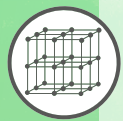
Zwei Schaukeln können verschieden schnell schwingen.

Wenn man sie verbindet, schwingen sie nach kurzer Zeit gleichmäßig nebeneinander.

So ähnlich machen das auch Musiker mit ihren Instrumenten in einem Orchester.

Wenn sie gut zusammenspielen, schwingt alles im Gleichtakt.

Und die Musik hört sich für uns wohlklingend an.



Auch für die moderne Technik sind Strukturen wichtig.

In einem Smartphone arbeiten viele winzige Computerchips zusammen.

Sie werden auf einer Silizium-Scheibe hergestellt.

Silizium besteht im Inneren aus Atomen.

Die Atome sind regelmäßig angeordnet.

Symmetrie und Struktur 4

Ordnung ist das halbe Leben 6

Am Anfang war ... Symmetrie? 8

Strukturen des Weltalls 12

Wer kontrolliert das Chaos? 18

Strukturen selbst gemacht 22

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)

AUTOREN

Dr. Uta Deffke, Christoph Kommer

REDAKTION

Prof. Dr. Eberhard Bodenschatz, Dr. Axel Carl,
Prof. Dr. Cornelia Denz, Ruben Düchting, Isabell Harder,
Max Heiland, Prof. Dr. Stefan Heusler, Dr. Oliver Kamps,
Dr. Jens Kube, Prof. Dr. Arnulf Quadt

KONZEPT UND GESTALTUNG

iserundschmidt GmbH (ius)
Agentur für Wissenskommunikation
(Verantwortlich: Ruben Düchting, Marleen-C. Schwalm)
ius.pr@dpg-physik.de

September 2017

Die Highlights der Physik im Internet:
www.highlights-physik.de



HINWEIS

Einige Stellen im Heft
verweisen auf
interessante Video-Clips
und Internetseiten.
Wer sein Smartphone
oder sein Tablet mit einem
QR-Code-Scanner ausge-
stattet hat, kommt leicht auf
die verknüpften Seiten.
Für externe Inhalte sind die
Urheber verantwortlich.

► Die Blütenblätter der Feuer-Lilie zeigen, dass es fast perfekte Symmetrien auch in der Natur gibt. Lilienblüten kommen radiärsymmetrisch vor wie hier: dreh- und spiegelsymmetrisch zugleich. Andere Lilien sind monosymmetrisch, also mit nur einer Symmetrieebene und zwei spiegelgleichen Hälften. (Bild: Denis Barthel, CC BY-SA 3.0)

Symmetrie und Struktur

„Haben Sie heute schon in den Spiegel geschaut?“

Erstaunlich, wie symmetrisch wir Menschen gebaut sind – jedenfalls auf den ersten Blick: rechts und links von unserer Mittelachse jeweils ein Auge, ein Nasenloch, ein Ohr, ein Arm, ein Bein. Würde man auf die Achse einen Spiegel stellen, ergäbe sich aus der einen Hälfte durch Spiegelung nahezu dasselbe vollständige Bild. Man nennt diese Art der Symmetrie deshalb auch Spiegelsymmetrie. Doch wenn man ganz genau hinsieht, erkennt man: Diese Symmetrie ist nicht perfekt. Die Nase sitzt vielleicht nicht ganz gerade oder ein Ohr ist größer als das andere. Im Jargon der Physik spricht man von „gebrochener“ Symmetrie.

Neben der Spiegelsymmetrie, bei der eine Richtung im Raum vertauscht wird, gibt es

noch andere Symmetrien. Die Blüte eines Gänseblümchens ist etwa rotationssymmetrisch, da jedes Blütenblatt genauso aussieht wie das Nachbarblatt, wenn man es etwas dreht. Eine Leiter ist translationssymmetrisch: Jede Leitersprosse ist identisch und erfüllt die gleiche Funktion, auch wenn man die Leiter um einige Zentimeter verschiebt. Nahezu in allen realen Fällen weicht die Symmetrie aber von der mathematischen Idealisierung ein wenig ab – die perfekte Symmetrie ist gebrochen.

Schon für die alten Griechen hatte Symmetrie viel mit Harmonie, Schönheit und wohlgeratenen Proportionen zu tun. Eine besondere Symmetrie wird mit dem „Goldenen Schnitt“ beschrieben, ein Größenverhältnis, das in Natur oder Kunst oft auftaucht und besonders ästhetisch wirkt.

Tatsächlich folgt das gesamte Universum – von den winzigsten Elementarteilchen

bis zu den größten Galaxien – Ordnungsprinzipien, die symmetrische Formen hervorbringen: Elektronenwolken um den Atomkern, Kristallstrukturen, die Doppelhelix des Erbgutmoleküls DNA, Punkt- oder Streifenmuster auf Tierfellen, Sandmuster auf dem Meeresboden, Küstenlinien, Planetenbahnen um die Sonne, Spiralgalaxien und vieles mehr. Das Faszinierende dabei ist: Dieselben Arten von Strukturen bilden sich sowohl in der belebten wie in der unbelebten Natur, auch wenn die Ursachen andere sind. (→ Info S. 19)

Die unterschiedlichen Ursachen der Strukturbildung ergründen die Physik und andere Naturwissenschaften. Während sich etwa Kristalle so formen, dass die regelmäßige Anordnung ihrer Atome eine möglichst geringe Energie aufweist und dabei geometrische Aspekte wie die dichteste Kugelpackung eine Rolle spielen, sind Streifenmuster auf Tierfellen oder Sand-

muster auf dem Meeresboden das Ergebnis komplexer sogenannter dynamischer Vielteilchen-Prozesse. Hier sind das Zusammenspiel sehr vieler Teilchen, ein steter Material- und Energiefluss und das Bestreben, dabei möglichst wenig Energie, etwa in Form von Reibung, zu verlieren, die Quelle für das Entstehen ganz neuer Formen.

Der Begriff der Symmetrie bezieht sich aber nicht nur auf räumliche Strukturen. Auch zeitliche Abläufe können symmetrisch sein. Zum Beispiel sämtliche Zyklen unseres Lebens, vom Rhythmus des Herzschlags über den Wechsel von Tag und Nacht, Sommer und Winter, bis hin zu den künstlich geschaffenen Rhythmen in der Musik.

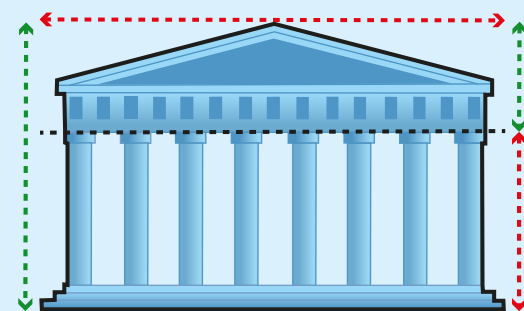
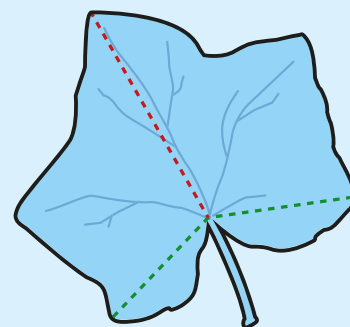
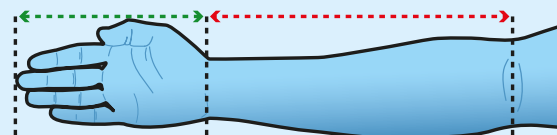
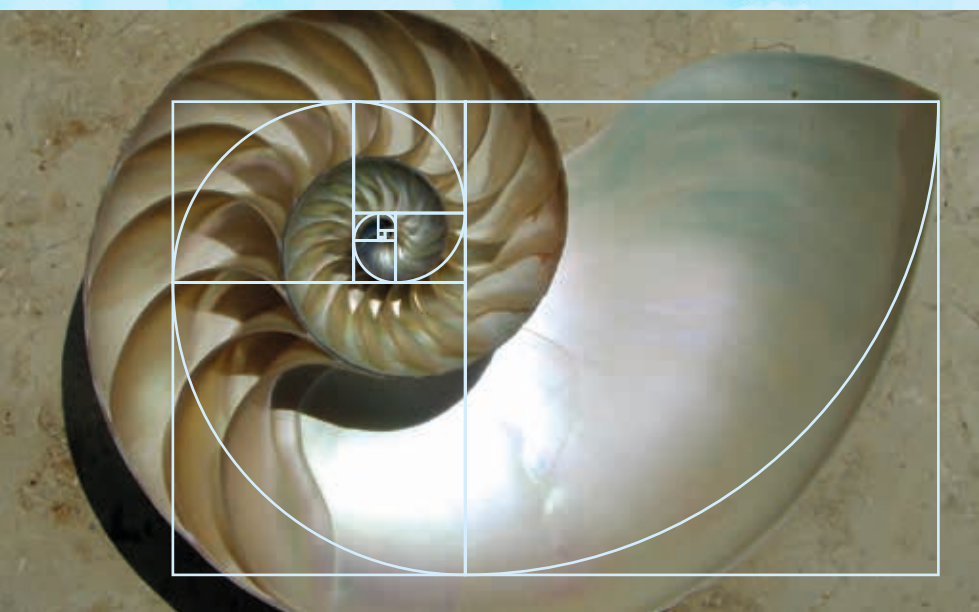
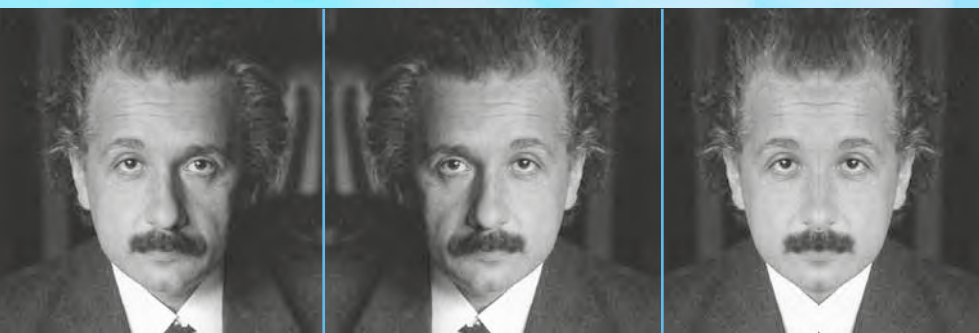
Die Physik interessiert sich nun aber nicht allein für die Beschreibung dieser Symmetrien und das Verständnis ihres Ursprungs. Man hat erkannt, dass insbesondere der Bruch der Symmetrie – also die Abweichung von der perfekten Spiegelung oder Wiederholung – eine fundamentale Bedeutung für das Entstehen neuer Strukturen besitzt. So geht man davon aus, dass zum Zeitpunkt der Entstehung unseres Universums mit dem Urknall sowohl Materie als auch Antimaterie, eine Art Spiegelbild der Materie, in exakt gleicher Menge entstanden ist – ein symmetri-

► Im Alltag begegnen wir dem Goldenen Schnitt immer wieder: Ob sein Vorkommen allerdings bereits in Bauwerken wie dem Parthenon-Tempel auf der Athener Akropolis auf bewusste Verwendung oder einen natürlichen Hang zu dieser speziellen Proportion zurückzuführen ist, ist heute unklar. (Grafik: ius)

scher Ausgangszustand also. Merkwürdig ist allerdings, dass im heutigen Universum fast keine Antimaterie mehr vorhanden ist. Dafür muss eine Asymmetrie oder Symmetriebrechung zwischen den beiden Materiearten die Ursache sein.

Der Begriff der Symmetrie hat in der Physik außerdem eine weitere wichtige Bedeutung. Ein Naturgesetz gilt als symmetrisch bezüglich des Ortes, wenn es an jedem Ort des Universums gilt. Symmetrie bezüglich der Zeit bedeutet Gültigkeit des Gesetzes zu jeder Zeit. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts hat die Mathematikerin Emmy Noether erkannt, dass aus solchen Symmetrien die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Drehimpuls abgeleitet werden können. Symmetrieüberlegungen werden so ganz allgemein zu einem nützlichen Test für physikalische Phänomene oder zum Ausgangspunkt neuer Theorien, wo experimentelle Ergebnisse noch nicht verfügbar sind.

▼ Auch das Gesicht des vielleicht bedeutendsten Physikers der Welt und Vaters der Relativitätstheorie Albert Einstein erscheint unnatürlich, wenn man es perfekt symmetrisch spiegelt. (Bild: CCO)



Der Goldene Schnitt

Ob Gemälde, Gebäude oder Mensch: Die Proportionen des Goldenen Schnitts spielen seit der Antike eine wesentliche Rolle bei der Konstruktion und dem Empfinden von Schönheit. Der Goldene Schnitt bezeichnet Längenverhältnisse in einer Struktur. Dabei gilt: Eine Strecke wird im Verhältnis des Goldenen Schnitts geteilt, wenn die kleine Strecke (grün) sich zur großen (rot) verhält wie die große zur gesamten Länge. In diesem Prinzip vereinen sich Asymmetrie und Symmetrie. Denn die Strecke wird zwar in zwei ungleiche Abschnitte geteilt, doch das Teilungsverhältnis kehrt wieder – auf jeder Größenskala.

Entdeckt wurde der Goldene Schnitt vermutlich von den alten Griechen bei Untersuchungen zur Geometrie der regelmäßigen Fünfecke. Hier findet sich der Goldene Schnitt gleich in mehreren Seitenverhältnissen.

◀ Aus dem Goldenen Schnitt lässt sich auch die Goldene Spirale ableiten. Sie besteht aus vielen zusammenhängenden Quadraten, deren Seitenlängen immer im Verhältnis des Goldenen Schnitts zu den Nachbarn stehen. Dass dieses Prinzip auch in der Natur vorkommt, veranschaulicht die Nautilus-Muschel, die genau wie eine Goldene Spirale aufgebaut ist. (Bild: Chris 73, CC BY-SA 3.0)

► Die braunschwarzen Flecken des Leopardenfells zeigen bei genauem Hinschauen eine bestimmte Ordnung: Besonders in Längsrichtung des Rückens lässt sich eine deutliche reihenförmige Anordnung erkennen. (Bild: Genie.prinks, CC BY-SA 4.0)



Ordnung ist das halbe Leben

„Haben Sie heute schon nach draußen geschaut?“

Zum Beispiel auf den schwarz-gelb geringelten Körper einer Wespe, auf gleichmäßig strukturierte Blüten oder auf das Regenwasser-Rinnsal, das dem Verlauf eines Flusses ähnelt? In der belebten wie der unbelebten Natur gibt es einen enormen Reichtum an erstaunlich regelmäßigen Formen und Strukturen: Wir finden Streifen- oder Punktmuster auf Tierfellen, Sandmuster in Wüsten oder am Strand, ebenso wie mäanderförmige Wasserläufe, die sich in ihrer Struktur trotz unterschiedlicher Größenskala ähneln.

Für die Entstehung neuer Strukturen wirken viele Teilchen zusammen, beispielsweise Sand und Steine eines Wasserlaufs. Gleichzeitig muss das betrachtete System „offen“ sein, das heißt, es muss fortwährend Energie zugeführt werden, um mögliche

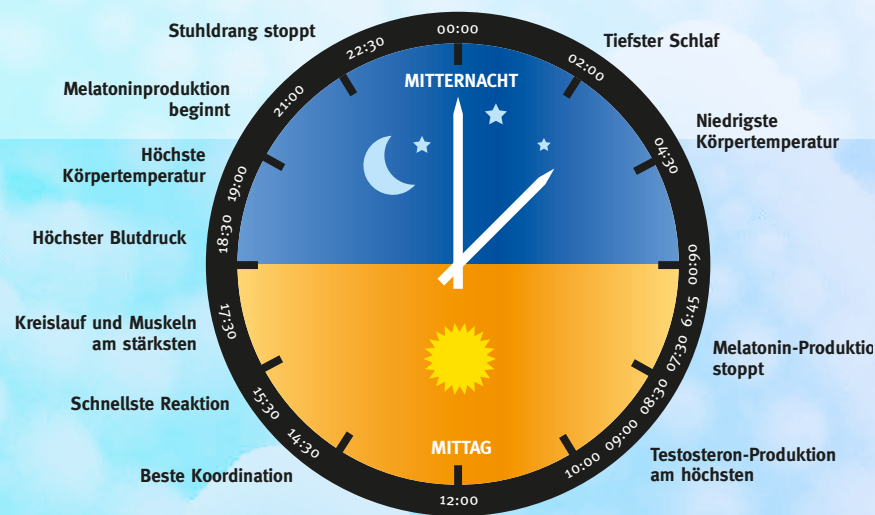
Energieverluste beispielsweise durch Reibung auszugleichen. Somit finden solche Prozesse außerhalb des thermischen Gleichgewichts statt. (→ Info S. 19) Zwei wichtige Beispiele für Strukturbildung sind zum einen der Laser und zum anderen räumliche Musterbildung, wie wir sie von den Mustern in Tierfellen kennen.



Tatsächlich können Punktmuster bei Leoparden, Streifenmuster von Zebras oder Muster an Muscheln oder Schneckenhäusern alle mithilfe des sogenannten Turing-Mechanismus beschrieben werden. Benannt ist er nach dem britischen Mathematiker und einem der Väter der Informatik Alan Turing, der sich unter anderem mit der Entstehung von Formen pflanzlicher und tierischer Organismen beschäftigte. Nach seinem Mechanismus entstehen aus einem anfänglich homogenen Gemisch zweier sich gegenseitig beeinflussender

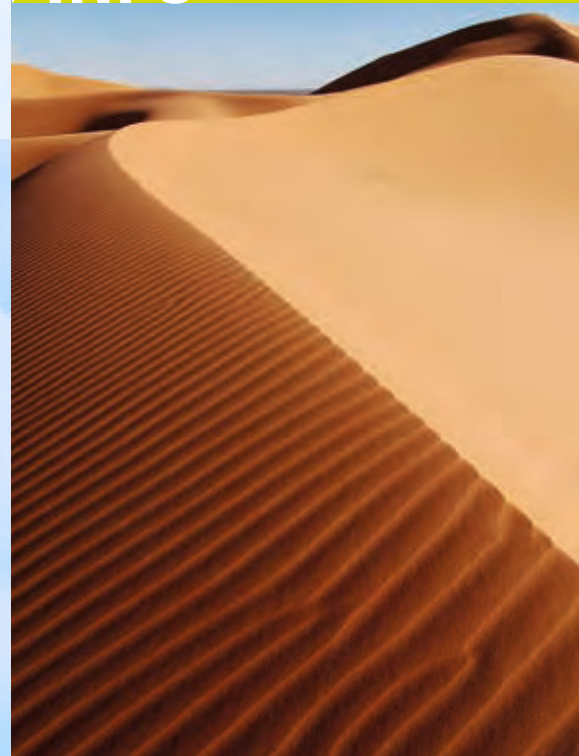
chemischer Substanzen durch spontane Symmetriebrechung stabile räumliche Strukturen. Tatsächlich kann im Experiment entweder gar kein Muster, ein Punkt- oder ein Streifenmuster erzeugt werden, das Leopardenfellen oder Zebrastrifen erstaunlich ähnlich sieht. Am Ende setzt sich unter bestimmten Bedingungen immer genau ein bestimmtes stabiles räumliches Muster durch. Turing fand heraus, dass aktivierende und hemmende Reaktionen zwischen chemischen Substanzen und deren Diffusion diese Musterbildung erklären. So führt beim Leopard eine Substanz zu einer schwarzen und eine andere zu einer braunen Färbung. Die Bildung der zur Tarnung dienenden Flecken wird schließlich durch die Körpergröße des Leopards und den Zeitpunkt, an dem der Musterbildungsprozess einsetzt, bestimmt.

Beim Laser wird ein intensiver Lichtstrahl durch eine große Anzahl von Atomen erzeugt, die Licht derselben Farbe aussen-



▲ Die circadiane Rhythmik bestimmt als unsere innere Uhr den gesamten Tages- und Nachtablauf. Durch Störungen des Circadianen Rhythmus wie Schichtarbeit, künstliches Licht oder fehlendes Tageslicht können neben Schlaf- und Essstörungen sogar Depressionen entstehen. (Grafik: ius nach DLR, CC-BY 3.0)

► Eine anfänglich kleine Unebenheit am Boden und ein gleichbleibender Wind haben dieser Düne in der Wüste Marokkos ein gleichmäßiges Muster verliehen. Auch die Düne selbst ist Resultat eines allmählichen Strukturbildungsprozesses. (Bild: Rosa Cabecinhas/Alcino Cunha, CC BY-SA 2.0)



Sandrippel



Periodische Wellenmuster im Sand, „Sandrippel“, entstehen durch den Wind, der über die Sandkörner hinweg weht und für die nötige Material- und Energiezufuhr sorgt. Erreicht er eine kritische Geschwindigkeit, bringt er die Sandkörner nicht nur zum Rollen, sondern auch zum Fliegen – je nach Masse mehr oder weniger weit. Wenn sie landen, können sie abprallen, weitere Körner in die Luft schleudern, weiterrollen oder liegen bleiben. Letzteres passiert bevorzugt dort, wo sich schon eine leichte Unebenheit gebildet hat. So wachsen Wellenmuster im Sand, deren Höhe jedoch begrenzt ist: Je höher, desto eher werden von stärkeren Luftstrom auch wieder Teilchen abgetragen. Auf diese Weise stellt sich ein Gleichgewicht zwischen ankommenden und abgehenden Teilchen ein.

Die Höhe der Rippel bleibt konstant. Allerdings können sie wandern, getrieben von der Umschichtung der Körner von der windzugewandten zur windabgewandten Seite. Auf großen Skalen erhält man auf diese Weise auch ganze Dünen, die ihrerseits wieder von unzähligen Rippeln übersät sind, sowie den dynamischen Prozess der Wanderdünen.

◀ Ein Laserstrahl wird als künstlicher Leitstern an den Nachthimmel über einem der vier VLT-Teleskope der ESO in der chilenischen Atacamawüste projiziert (VLT: Very Large Telescope). Mit diesem künstlichen Stern kann die Luftunruhe ausgeglichen werden, sodass die Bilder des Teleskops viel schärfer sind als ohne diese „adaptive Optik“. Das VLT wird zu fast einem Viertel vom BMBF finanziert. (Bild: ESO/Yuri Beletsky, CC-BY 4.0)

den. Strukturbildung bedeutet hierbei, dass die Elektronen in den Atomen sich beim Aussenden von Licht synchronisieren, was allerdings nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist. Bei zu geringer Energiezufuhr senden die Atome das Licht zufällig aus. Erst ab einer bestimmten Schwelle schwingen alle Atome im Gleichtakt und es entstehen hochgeordnete Lichtwellen – das Laserlicht.

Weitere Beispiele für Strukturbildung sind neuronale Prozesse im Gehirn, die große Vielfalt genetischer Phänotypen beim Menschen oder auch riesige Stromnetze mit vielen Erzeugern und Verbrauchern. Am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg wird untersucht, wie das komplexe Zusammenspiel sich gegenseitig aktivierender und hemmender Gene innerhalb von großen Netzwerken die Bildung von bestimmten Zelltypen begünstigen kann. Mithilfe dieses Wissens will man bösartige in gutartige Zelltypen

umprogrammieren, um so Autoimmunkrankheiten zu behandeln, oder Proteine finden, mit denen Krebszellen bekämpft werden können.

Strukturen in der Zeit sind ebenso Gegenstand aktueller Forschungen. Berühmtestes Beispiel solcher Zeitstrukturen ist der sogenannte Circadiane Rhythmus, der unzählige Prozesse in Organismen an die Tageslänge von 24 Stunden anpasst. Unsere biologische Uhr beeinflusst den Schlaf-Wach-Rhythmus, die Herzfrequenz, die Gehirnaktivität, die Zellregeneration oder die Hormonproduktion. Es gibt allerdings auch unerwünschte Effekte, die durch Synchronisation hervorgerufen werden können: epileptische Anfälle oder die Parkinson-Krankheit, bei der sich Millionen von Neuronen im Gehirn synchronisieren. Um solche Krankheiten zu verstehen und möglicherweise heilen zu können, hilft es, die zugrundeliegenden physikalischen Effekte zu kennen.





► Mit modernster Technik auf der Suche nach den aller kleinsten Bausteinen unserer Welt: Mit Hilfe der Teilchendetektoren ATLAS (hier im Bild) und CMS gelang es am CERN, das Higgs-Boson nachzuweisen, Jahrzehnte nachdem es vorhergesagt worden war. Es verleiht den Elementarteilchen ihre Masse. (Bild: CERN/Anna Pantelia)

Am Anfang war ... Symmetrie?

„Haben Sie heute schon in die Vergangenheit geschaut?“

Dann blicken Sie mal in den Nachthimmel, denn damit ist immer auch eine Zeitreise verbunden – bis hin zu den Anfängen unseres Universums vor 13,8 Milliarden Jahren. Noch ist keine adäquate Beschreibung des Beginns des Universums bekannt. Erst ab einem kurzen Moment „danach“, der auch als Geburtsstunde der Symmetrie beschrieben werden kann, gelten die Gesetze der Physik. Aus diesem Universum des ersten Moments heraus bildete sich eine unvorstellbar heiße Ursuppe aus Quarks, Antiquarks, Gluonen und weiteren Elementarteilchen. Materie und Antimaterie entstanden dabei zu gleichen Teilen, nur um sich ständig wieder gegenseitig zu vernichten. Dabei setzten sie Energie frei, aus der auch immer wieder neue

Teilchen und Antiteilchen entstanden. Perfekte Symmetrie also.

Der Ursprung sämtlicher Strukturbildung im Universum ist eine Folge des ersten Symmetriebruchs in der Geschichte des Universums: Bei den Entstehungs- und Vernichtungsprozessen bildete sich auf eine Milliarde Teilchen- und Antiteilchenpaare jeweils ein Antiteilchen weniger. Diese Unregelmäßigkeit entstand schon nach der unglaublich kurzen Zeit von 10^{-30} Sekunden. Sie führte dazu, dass neben einer enormen Menge an Strahlung auch ein winziger Bruchteil von Materie überlebte – das, was heute alle Sterne, Planeten, Gas- und Staubwolken im Universum formt. Die Strahlung ist durch die Expansion des Universums immer weiter

abgekühlt und ist heute als 2,7-Kelvin-Hintergrundstrahlung, sozusagen als Echo des Urknalls, überall im Universum nachweisbar. Die durch den Symmetriebruch entstandenen zufällig verteilten Materieteilchen ballten sich durch die Gravitationskraft zusammen und bildeten so die Keimzellen für die Strukturen im Universum, wie wir sie heute beobachten.

Warum dieser Symmetriebruch passiert ist, warum also nach dem Urknall mehr Materie übrig geblieben ist als Antimaterie, gibt immer noch Rätsel auf und ist Gegenstand ebenso spannender wie aufwändiger Experimente und Berechnungen. Manche Forschungsgruppen versuchen zum Beispiel, den Materiezustand kurz nach dem Urknall im Labor nachzubilden, um die Prozesse genau vermessen zu können. (→ Info S. 9)

Dass es Antimaterie geben muss, hat der britische Physiker Paul Dirac bereits 1928 vorhergesagt. Er befasste sich damals mit



▲ Modell des geplanten FAIR-Geländes: Neben dem großen Doppelringbeschleuniger sind acht weitere Beschleuniger- und Speicherringe in der Entstehung. Durch sie sollen ab 2022 weitere revolutionäre Erkenntnisse über das Universum und seine kleinsten Bestandteile gewonnen werden. (Bild: ion42 für FAIR/GSI)

FAIR

Auf dem Gelände des GSI Helmholtz-Zentrums in Darmstadt entsteht zurzeit die weltweit leistungsfähigste Beschleunigeranlage für die Forschung mit Antiprotonen und Ionen. Mitte der 2020er Jahre sollen hier über 3000 Forschende aus rund 50 Ländern neue Erkenntnisse über die Entstehung und den Aufbau der Elemente gewinnen können.

Mit der APPA-Experimentiereinrichtung etwa soll die Frage nach der Asymmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen beantwortet werden. Wie aus den einfachen Atomkernen in Sternen die schwereren chemischen Elemente entstanden sind, soll mit den NuSTAR-Experimenten erkundet werden. Mit CBM, einer weiteren Säule von FAIR, wird die Materie von Neutronensternen künstlich erzeugt und erforscht. Auf exotische Zustände der Materie fokussieren sich die Experimente von PANDA – hier sollen bisher nur in der Theorie vorhergesagte Kombinationen von Quarks erzeugt werden. Neben diesen Fragestellungen der physikalischen Grundlagenforschung werden auch medizinische Anwendungen der Ionenstrahlen weiterentwickelt.

Um FAIR zu ermöglichen, werden große technologische Herausforderungen gelöst. So müssen beispielsweise neue supraleitende Magnete und leistungsfähigere Teilchendetektoren entstehen. Auch für die Datenverarbeitung werden innovative IT-Lösungen entwickelt. Rund drei Viertel der Baukosten von FAIR in Höhe von 1,3 Milliarden Euro werden von Deutschland getragen, der Rest kommt von den neun beteiligten Partnerländern.



einer quantenmechanischen Berechnung zum Verhalten von Elektronen. Seine Formeln enthielten zwei Lösungsoptionen, von denen eine das Elektron beschrieb und die andere sich nur im Vorzeichen der elektrischen Ladung unterschied. Aus Symmetrieüberlegungen heraus postulierte er, dass es Elektronen mit positiver Ladung geben müsse, die Antielektronen. Schon 1932 wurden tatsächlich diese dann „Positronen“ genannten Teilchen als Bestandteil der kosmischen Strahlung beobachtet. Heute wissen wir, dass auch die anderen Bestandteile der Materie, also etwa Protonen oder Neutronen, als Antiteilchen vorkommen können.

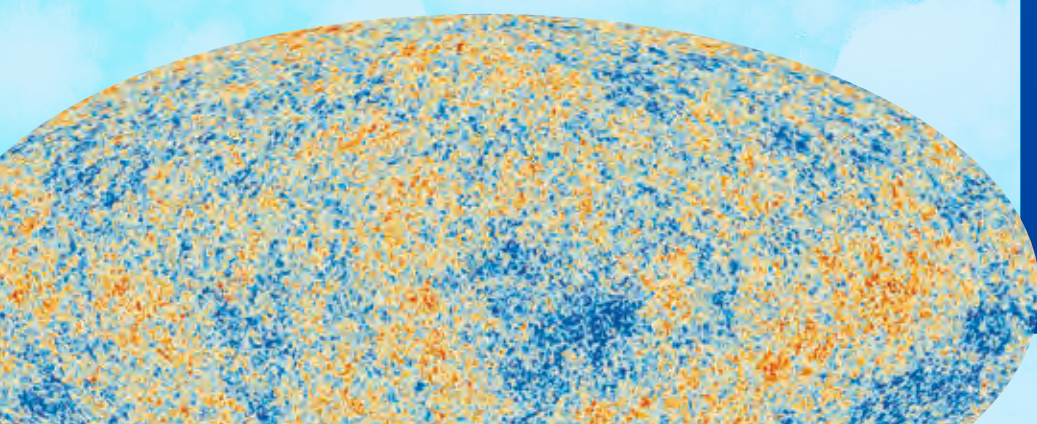
Ein solches Zusammenspiel zwischen Theorie und Experiment ist typisch für die Arbeit der Physik bei ihrem Versuch, zu verstehen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“: Aus welchen kleinsten Bausteinen ist alle Materie aufgebaut? Welche Kräfte halten sie zusammen? Immer wieder wurden bis dahin unbekannte Teilchen oder Kräfte vorhergesagt, weil sie aus mathematischen Gründen sinnvoll erschienen. Der experimentelle Nachweis gelang oft erst Jahrzehnte später, weil gerade für das Untersuchen der kleinsten Teilchen die größten Experimentieranlagen nötig sind. Das liegt an den riesigen Energien, mit denen Teilchen erzeugt und aufeinander geschossen werden müssen, um auf der Suche nach den aller kleinsten unteilbaren Bausteinen immer noch kleinere Bruchstücke zu erzeugen. Überall auf der Welt sind deshalb seit den 1950er Jahren immer größere und komplexere Teilchenbeschleuniger errichtet und immer bessere, sensiblere Detektoren und Analysemethoden entwickelt worden.

Nach der Entdeckung von Proton, Elektron und Neutron als **Bausteine des Atoms** entstanden in den 1960er Jahren die Überlegungen, dass das Proton aus noch kleineren Teilchen aufgebaut sein müsste. Ende der 1960er Jahre entdeckte man am kalifornischen Beschleunigerzentrum SLAC dann tatsächlich erste Hinweise auf diese Bausteine: die „Quarks“. Zur Beschreibung der elementaren Bausteine unseres Universums und der Wechselwirkungen zwi-

schen ihnen kristallisierte sich als Ergebnis vieler Theorien und Experimente das Standardmodell der Elementarteilchenphysik heraus. Es umfasst sechs Quarks und sechs sogenannte Leptonen (zu ihnen gehört das Elektron). (→ Grafik S. 10) Das Zusammenspiel dieser Bausteine wird durch die sogenannten Austauschbosonen beschrieben. Diese Teilchen vermitteln drei der vier Kräfte der Natur. Lediglich die Gravitationskraft ist noch nicht Bestandteil dieser Theorie. Die besondere Stärke des Standardmodells liegt vor allem in seiner Vorhersagekraft, die wiederum durch bestimmte Symmetrien möglich wird. Diese spielen ähnlich zu den ursprünglichen Überlegungen von Emmy Noether eine zentrale Rolle. Bei sämtlichen Wechselwirkungen treten auch hier physikalische Größen auf, die an jedem beliebigen Ort zu jeder Zeit gleich sind. Diese sogenannten Eichsymmetrien legen den theoretischen Grundstein für die Regeln, denen das Standardmodell gehorcht. In den letzten Jahrzehnten konnten alle so vorhergesagten Teilchen und Wechselwirkungen des Standardmodells sehr präzise vermessen werden.

Auch in der Struktur des Standardmodells, von dem übrigens für die Antimaterie eine Variante mit entsprechenden Antiteilchen existiert, lassen sich Symmetrien finden: Die Quarks und Leptonen können entsprechend ihrer Eigenschaften in drei Familien unterteilt werden. Nur die Teilchen der ersten – leichtesten – Familie des Standardmodells sind die

▼ Die Karte des europäischen Forschungssatelliten Planck zeigt die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung, die ihren Ursprung 380.000 Jahre nach dem Urknall hatte. Damals wurde das Universum schlagartig durchsichtig. Aus der Form der kleinen Schwankungen dieser heute nur noch 2,7 Kelvin kalten Strahlung lässt sich ableiten, wie das Universum zusammengesetzt ist: Es besteht zu 5 Prozent aus gewöhnlicher Materie, wie wir sie aus Sternen, Planeten und Gasnebeln kennen, zu 27 Prozent aus Dunkler Materie, von der wir bisher nur ihre Schwerkraftwirkung gemessen haben und zu 68 Prozent aus Dunkler Energie, die das Universum expandieren lässt. (Bild: ESA/Planck Collaboration)





Symmetrie bei Elementarteilchen

Für die Betrachtungen von Elementarteilchen spielen die sogenannten C-, P- und T-Symmetrien eine entscheidende Rolle: Die C-Symmetrie ist die Invarianz gegenüber der Vertauschung von Materie und Antimaterie, die P-Symmetrie, auch Parität genannt, ist die Invarianz gegenüber Spiegelungen und die T-Symmetrie ist die Invarianz gegenüber Zeitspiegelung – also vorwärts oder rückwärts laufender Zeit.

In der Praxis bedeutet dies, dass die Physiker überlegen, ob ihre Experimente zum Beispiel anders ablaufen würden, wenn sie es durch einen Spiegel betrachten würden, wenn die Zeit rückwärts liefe oder die betrachteten Teilchen ihre Antiteilchen wären. Wolfgang Pauli hat 1955 das CPT-Theorem aufgestellt. Die gleichzeitige Vertauschung von Teilchen und Antiteilchen (C), von rechts und links (P) und von Zukunft und Vergangenheit (T) führt zu exakt denselben physikalischen Gesetzen wie die uns bekannten. Dafür, dass vom Beginn des Universums nur die Materie übrig geblieben ist, muss eine Verletzung der CP-Symmetrie verantwortlich sein. Diese CP-Verletzung wird an Teilchenbeschleunigern anhand von sogenannten neutralen Kaonen, einer leichten Teilchenart, experimentell untersucht.

chen ihre unterschiedlichen Massen erhalten. Es ergaben sich bei theoretischen Voraussagen für bestimmte Teilchenreaktionen unsinnige Ergebnisse. Das war der Anlass für Peter Higgs sowie – unabhängig davon – François Englert und Robert Brout 1964 als Ergänzung das später so genannte Higgs-Feld und das mit ihm korrespondierende Higgs-Teilchen zu postulieren. Je stärker Teilchen mit ihm in Wechselwirkung treten, desto größer ist ihre Masse. Andere bleiben masselos.

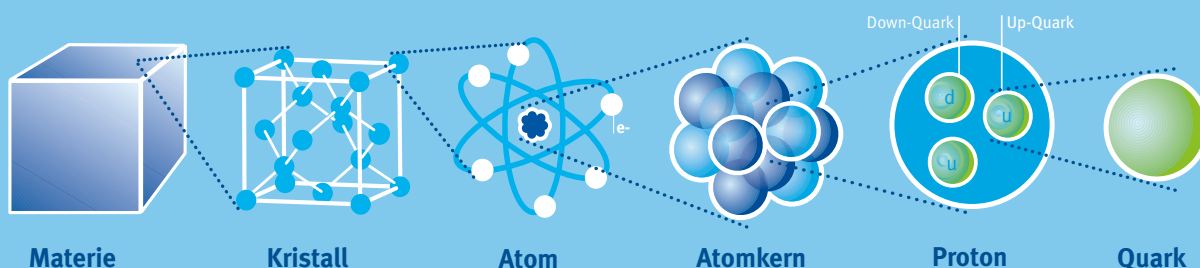
Auch die Einführung des Higgs-Teilchens basiert auf Überlegungen zu Symmetrien und deren Brechung: Kurz nach dem Urknall gab es nur eine einzige Urkraft. Erst durch den Bruch dieser Symmetrie können sich diese Kräfte unterscheiden. Die Ursache für den Bruch der Symmetrie zwischen der schwachen Kraft und der elektrischen Kraft ist das Higgs-Teilchen, da nur die Träger der schwachen Kraft (die $W^{+/-}$ und Z^0 Bosonen) vom Higgs-Teilchen Masse erhalten, nicht aber das Photon.

Bausteine unserer realen, stabilen Welt: Das Up- und das Down-Quark sowie das Elektron und das Elektron-Neutrino.

Von Anfang an hatte das Standardmodell aber zwei grundsätzliche Probleme. Zum einen fehlt ihm mit der Gravitation ausge-rechnet eine der beiden fundamentalen

Kräfte, die in unserem Alltag dominieren. Bislang ist es noch nicht gelungen, die Gravitation als Quantentheorie zu formulieren, sodass es kein in das Modell passendes Teilchen gibt.

Zum anderen konnte im Rahmen des Modells nicht erklärt werden, woher die Teil-



Leptonen

Quarks

Elektron-Neutrino ν_e Masse: $< 2 \text{ eV}$ Ladung: 0	Myon-Neutrino ν_μ Masse: $< 2 \text{ eV}$ Ladung: 0	Tau-Neutrino ν_τ Masse: $< 2 \text{ eV}$ Ladung: 0	Z-Boson Z^0 Masse: 91,2 GeV Ladung: 0	Higgs-Boson H Masse: 126 GeV Ladung: 0
Elektron e Masse: 0,51 MeV Ladung: -1	Myon μ Masse: 105,7 MeV Ladung: -1	Tau τ Masse: 1,78 GeV Ladung: -1	W-Boson $W^\pm$ Masse: 80,4 GeV Ladung: ± 1	
up u Masse: 2,3 MeV Ladung: 2/3	charm c Masse: 1,3 GeV Ladung: 2/3	top t Masse: 173,2 GeV Ladung: 2/3	Photon γ Masse: 0 Ladung: 0	
down d Masse: 4,8 MeV Ladung: -1/3	strange s Masse: 95 MeV Ladung: -1/3	bottom b Masse: 4,2 GeV Ladung: -1/3	Gluon g Masse: 0 Ladung: 0	

Starke Wechselwirkung

Elektromagnetische Wechselwirkung

Schwache Wechselwirkung

Austauschteilchen



▲ Im Strahlrohr des Undulators im Speicherring PETRA III am Forschungszentrum DESY in Hamburg (oben) werden durch abwechselnd polarisierte Magnetfelder Elektronen auf einen Slalomkurs gezwungen. Ein mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegtes Elektron gibt dabei elektromagnetische Strahlung ab, die Synchrotronstrahlung. Auch die European Synchrotron Research Facility (ESRF) nutzt dieses Prinzip. Deutschland ist an dieser multinationalen Großforschungseinrichtung in Grenoble wesentlich beteiligt. (Bilder: DESY | National Synchrotron Radiation Research Center)

Beinahe 50 Jahre lang blieb das Higgs-Teilchen blanke Theorie. Ein etwas beunruhigender Zustand, wenn man bedenkt, dass ohne eine Erklärung für die Massen das ganze Gebäude des doch sonst so gut funktionierenden Standardmodells zusammenbrechen würde. Aus vielen Berechnungen und Experimenten konnte man schon abschätzen, welche Eigenschaften das Higgs-Teilchen ungefähr haben müsste. Es war klar, dass der bis dahin größte **Teilchenbeschleuniger** konstruiert werden musste, um es eines Tages doch nachzuweisen: Der Large Hadron Collider, LHC.

Mit den Messungen des ATLAS- und des CMS-Experiments am LHC am Forschungszentrum CERN ist dies tatsächlich gelungen:

◀ Das Standardmodell fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Teilchenphysik zusammen. Es beschreibt alle bekannten Elementarteilchen und wichtige Wechselwirkungen zwischen ihnen. Viele Voraussagen des Standardmodells wurden durch Experimente inzwischen bestätigt. Allerdings hat das Modell auch noch Schwächen. So fehlt ihm bis heute eine fundamentale Kraft: die Gravitation. (Grafik: ius)

gen: Am 4. Juli 2012 gab man öffentlich bekannt, das Higgs-Teilchen mit großer Sicherheit nachgewiesen zu haben. In den folgenden Monaten bestätigte sich dieses Ergebnis. Weil sie die theoretischen Grundlagen dafür geschaffen hatten, erhielten Peter Higgs und François Englert 2013 den Nobelpreis für Physik – Robert Brout war bereits 2011 verstorben.

Mit der Entdeckung schließt sich eine große Lücke im Verständnis der inneren Struktur unserer Welt. Aber es ist nicht das Ende dieses Prozesses. Denn so praktisch das Standardmodell zurzeit auch ist: Es bleiben Fragen offen wie die nach dem Platz der Gravitation. Nach Meinung vieler Physikerinnen und Physiker ist es noch zu komplex, nicht zuletzt mit den merkwürdigen Eigenschaften der Quarks und einer Reihe exakt abgestimmter Naturkonstanten, die es beinhaltet. Sie suchen weiter nach einer umfassenderen, einfacheren Theorie wie zum Beispiel die populäre Supersymmetrie und verwandte Modelle. Symmetrie-Überlegungen spielen auch hierbei eine große Rolle.



XFEL



Der Europäische Röntgenlaser – European XFEL – ist das neueste Großgerät für die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung mit großer deutscher Beteiligung (rund 58 Prozent der Baukosten von 1,2 Milliarden Euro). Er wurde seit 2009 in Hamburg und im benachbarten Schenefeld errichtet und ab September 2017 für den Nutzerbetrieb eröffnet. Der European XFEL ist ein „Freie-Elektronen-Laser“, in dem auf praktisch Lichtgeschwindigkeit beschleunigte Elektronen als Quelle von Röntgenlicht verwendet werden. Durch spezielle Magnetfelder werden die Elektronen senkrecht zur Flugbahn hin und her beschleunigt, wodurch sie gebündeltes Laserlicht in Flugrichtung aussenden. Sie erhalten ihre Energie auf einer 1,7 Kilometer langen Strecke mit 17,5 Milliarden Volt Beschleunigungsspannung. Der gesamte Tunnel vom Start der Elektronen auf dem Gelände des Forschungszentrums DESY bis zu den Messplätzen in Schenefeld ist 3,4 Kilometer lang.

Der Clou beim European XFEL: Die Röntgenstrahlung kann wie eine ultraschnelle Stroboskoplampe benutzt werden, um die schnellen Vorgänge bei chemischen Reaktionen zu filmen. Dazu werden die Röntgenblitze mit einer Dauer von je nur 10 Femtosekunden (das sind 0,000.000.000.000.01 Sekunden) 27.000 mal pro Sekunde auf die Proben geleitet. Damit bei so kurzen Pulsen überhaupt genügend Licht auf den Proben ankommt, um Messungen damit durchführen zu können, muss jeder einzelne Blitz sehr hell sein.

Die Forschungsfragen, die mit dem Röntgenlaser beantwortet werden sollen, berühren den Aufbau und die Wirkungsweise von biologischen Molekülen. Wenn nämlich erklärt werden kann, wie beispielsweise bestimmte Erkrankungen auf atomarer Ebene wirken, dann könnte man damit ganz gezielt Medikamente maßschneidern, die ihnen entgegenwirken. Auch für moderne Materialien, wie sie in Solarzellen oder Brennstoffzellen benötigt werden, erhoffen sich die Forschenden mit dem European XFEL bahnbrechende Verbesserungen.

(Bild: DESY 2017)

► Die Andromeda-Galaxie ist die der Milchstraße am nächsten gelegene Spiralgalaxie. Sie gehört wie unsere Galaxis zum Laniakea-Supercluster – ein riesiger Verbund von rund 100.000 Galaxien. (Bild: NASA, CCO)

Strukturen des Weltalls

„Haben Sie heute schon in den Nachthimmel gesehen?“

Sie erkennen dabei den Mond, das ein oder andere Sternbild, den Polarstern und vielleicht sogar einen Planeten wie den Mars. Mehr Strukturen erkennen wir im Nachthimmel mit bloßem Auge nur, wenn es besonders dunkel ist. Wir staunen über das helle Band der Milchstraße am Firmament – eine unvorstellbar große Ansammlung von geschätzt 100 Milliarden bis 300 Milliarden Sternen. Es ist die Galaxie, von der unser Sonnensystem ein winziger Teil ist. Ihrer Form nach wird sie als Balkenspiralgalaxie bezeichnet. Von einem Rand zum gegenüberliegenden braucht ein Lichtstrahl 100.000 bis 120.000 Jahre. Und mit 13,6 Milliarden Jahren ist sie fast so alt wie das Universum, mit seinen 13,8 Milliarden Jahren.

Wie konnten die Strukturen im Universum überhaupt entstehen und sich entwickeln? Nach heutiger Kenntnis sind die Keime dafür kurz nach dem Urknall entstanden: Winzige, durch Quantenfluktuationen unvermeidbare Schwankungen der Energiedichte auf mikroskopischer Ebene haben sich innerhalb kürzester Zeit – der sogenannten Inflationsphase – aufgebläht und sind gefroren. Der zweite wesentliche Effekt ist der Symmetriebruch zwischen Materie und Antimaterie, der zu einem winzigen Überschuss an Materie führte, während die übrige Materie und Antimaterie sich gegenseitig zu Strahlung vernichteten.

Nach ungefähr 70.000 Jahren begannen sich zum ersten Mal größere Materiean-

sammlungen zu bilden, da durch die Expansion das Universum das Gleichgewicht zwischen dem auseinandertreibenden Strahlungsdruck der Photonen und der zusammenziehenden Gravitation der Materie erreicht hatte. Ab diesem Punkt gewann die Gravitation mehr und mehr die Überhand. So wurden dichtere Regionen langsam kompakter und Regionen mit niedrigerer Massendichte immer leerer. Die treibende Kraft dafür war möglicherweise die sogenannte [Dunkle Materie](#). Nach ihrem Verhalten sollte sich in der gesamten Universumsentwicklung die uns bekannte, sogenannte baryonische Materie von da an richten.

Nach 380.000 Jahren war das Universum durch seine Expansion schließlich so weit abgekühlt, dass die bis dahin von freien Elektronen und Protonen aufgehaltenen Photonen entweichen konnten. Das Universum wurde durchsichtig. Diesen Übergangsmoment sehen wir noch heute



mit speziellen Mikrowellendetektoren wie dem PLANCK-Satelliten als kosmische Hintergrundstrahlung. Für die Forschung ist sie eine der reichhaltigsten Informationsquellen, um die großskalige Strukturbildung des Kosmos und den Urknall zu erklären.

INFO

Dunkle Materie

Die bei der Strukturbildung so wichtige (unsichtbare) Dunkle Materie, die nur über die Schwerkraft auf normale Materie wirkt, erklärt die Bewegung der sichtbaren Materie im Kosmos. Ohne die Dunkle Materie könnte beispielsweise die Umlaufgeschwindigkeit von Sternen um die Zentren von Galaxien nicht erklärt werden. Ein weiteres Indiz für ihre Existenz liefert der sogenannte Gravitationslinseneffekt. Hierbei wird Licht von einem Gravitationsfeld abgelenkt, und zwar umso stärker, je näher das Licht an seinem Zentrum vorbeikommt. Wie bei einer optischen Linse ergibt dies charakteristische Zerrbilder von Galaxien oder besonders hellen Sternen, die mit leistungsstarken Teleskopen beobachtet werden können. Die Stärke dieses Effekts kann dabei mit Dunkler Materie erklärt werden.

Die Zusammensetzung des Universums aus normaler Materie, Dunkler Materie und Dunkler Energie ist heute sehr genau bekannt. Die Auswertung der Daten der Mission des Planck-Satelliten der Europäischen Raumfahrtagentur ESA ergab, dass nur 5 Prozent aus normaler Materie bestehen, während die Dunkle Materie 27 Prozent und Dunkle Energie 68 Prozent ausmachen. Woraus die Dunkle Materie besteht, wissen wir noch nicht. Etliche Teilchen werden als mögliche Kandidaten gehandelt.

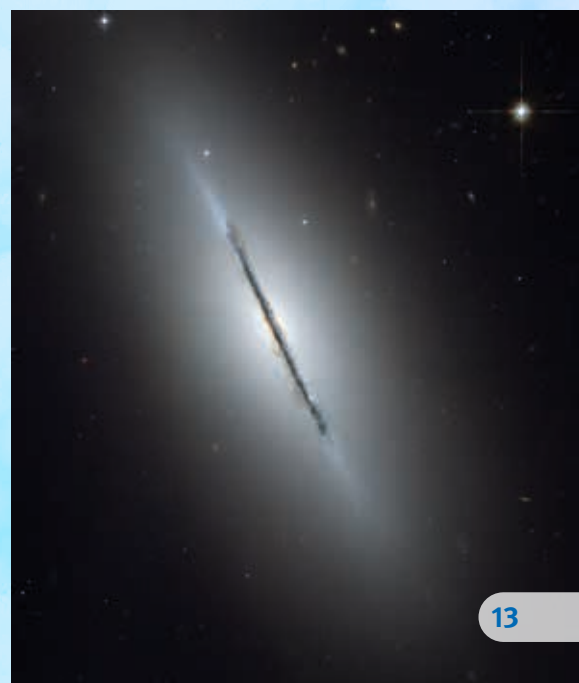
Die besten Chancen werden zurzeit den sogenannten WIMPs eingeräumt. Zu ihnen könnte das supersymmetrische Neutralino gehören. Jagd danach wird in Beschleunigerexperimenten zum Beispiel am LHC gemacht. Andere Experimente sind CRESST III oder XENON1T, die tief unter der Erde im italienischen Gran-Sasso-Tunnel aufgebaut sind. An ihnen sind auch mehrere deutsche Universitäten und Max-Planck-Institute beteiligt.

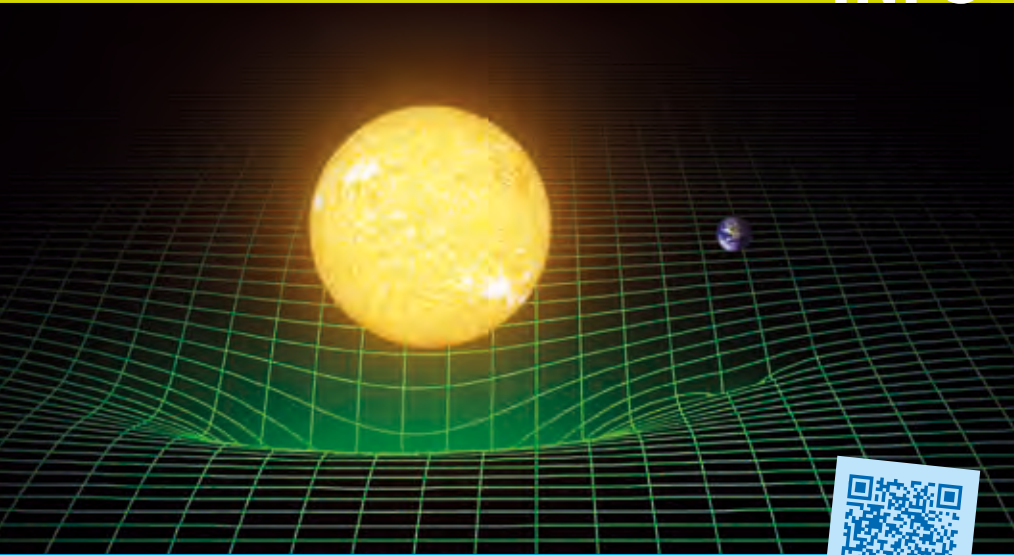
► Spiralgalaxie, elliptische Galaxie, Balkenspiralgalaxie und linsenförmige Galaxie (von oben). Die Voraussetzungen, die zur Bildung der unterschiedlichen Formationen führten, sind noch nicht endgültig geklärt. (Bilder: European Southern Observatory/ESO, CC-BY 4.0 | NASA/ESA/The Hubble Heritage Team, CCO)

Die kosmische Strukturentstehung folgte einem sogenannten hierarchischen Bottom-Up-Modell: Zuerst formten sich kleinere Strukturen und aus ihnen wiederum größere Strukturen entsprechend den Gravitationsgesetzen. So entstanden aus vielen kleinen Materieansammlungen zunächst kleine Galaxien, aus mehreren von ihnen wiederum größere Galaxien. Galaxien selbst bilden sich innerhalb von riesigen kugelförmigen Verdichtungen Dunkler Materie, sogenannten Halos. Diese Halos wachsen in ihrer Größe einerseits durch die Expansion des Universums, andererseits durch die Anhäufung von mehr Materie und die Verschmelzung mit anderen Halos. Zur gleichen Zeit versetzen sich die Materieansammlungen über ihre Gezeitenkräfte gegenseitig in Drehung. Zu ihren Zentren hin ist aufgrund der Drehimpulserhaltung die Rotation schneller als in den Außenbereichen – wie bei einer Pirouette beim Eiskunstlauf mit angezogenen Armen. In vielen dieser Zentren ist die Gravitationskraft darüber hinaus so groß, dass sich dort Schwarze Löcher bilden können.

Dabei entsteht eine Vielfalt verschiedener Galaxien mit unterschiedlichen Symmetrien: Spiralgalaxien, Balkenspiralgalaxien wie unsere Milchstraße, elliptische oder linsenförmige Galaxien. Unter welchen Voraussetzungen sich die unterschiedlichen Strukturen bilden, ist nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung.

Galaxien verbinden sich darüber hinaus zu großen Galaxienhaufen. Der Haufen, in dem sich unsere Milchstraße befindet, wird als Lokale Gruppe bezeichnet. Sein Gravitationszentrum befindet sich zwischen unserer und der uns benachbarten Andromeda-Galaxie. Die Lokale Gruppe ist Teil des Virgo Superhaufens, welcher wiederum Teil des riesigen Laniakea-Superhaufens ist. Laniakea besteht aus vier Superhaufen, 300 bis 500 kleineren Galaxienhaufen und aus insgesamt ungefähr 100.000 Galaxien. Seine Ausdehnung beträgt 520 Millionen Lichtjahre und seine Masse mehr als 100 Billionen Sonnenmassen. Mehrere dieser Superhaufen bilden schließlich große Filamente, die langen Fäden ähneln. Dazwischen finden sich riesige Hohlräume in denen sich keine größeren Strukturen mehr befinden. Diese sogenannten Voids bilden mit den Filamenten ein wabenartiges kosmisches





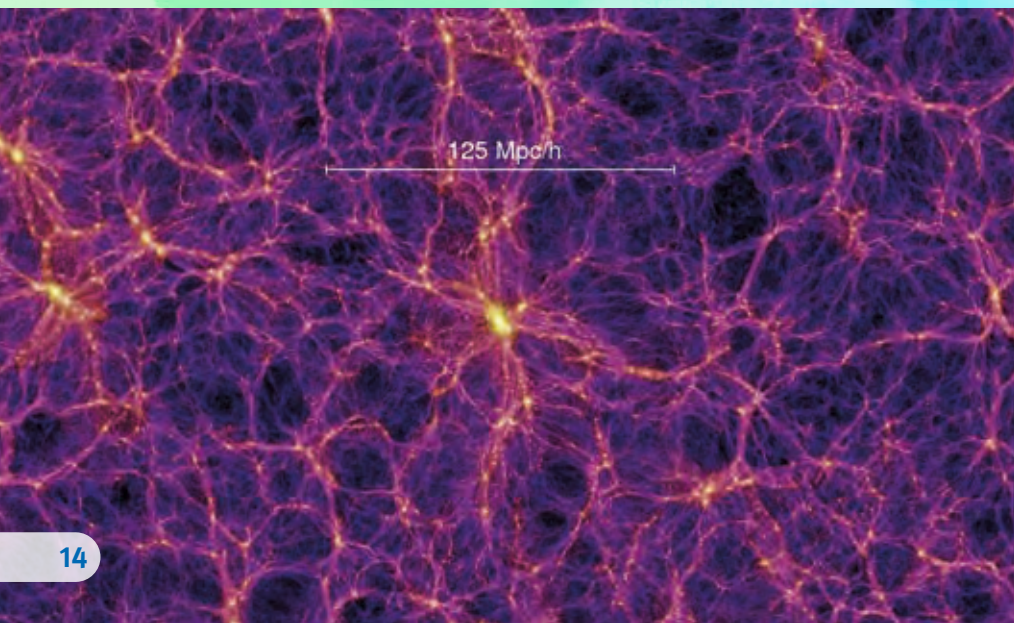
Allgemeine Relativitätstheorie

Die Gravitation wird auf astronomischen Skalen mit der berühmten Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) Albert Einsteins aus dem Jahre 1915 beschrieben. Hierbei verändern Materie sowie Energie die Geometrie der sogenannten vierdimensionalen Raumzeit. Einstein erkannte nämlich, dass Zeit und Raum als untrennbare Einheit betrachtet werden müssen. Materie und Energie krümmen diese Raumzeit. So können wir uns unsere Sonne wie ein großes Gewicht auf der Mitte eines Trampolins vorstellen: Wenn man eine Murmel nun auf eine Kreisbahn schickt, wird sie gleichzeitig von der Mitte angezogen. Das Kernstück der ART sind die Einsteinschen Feldgleichungen. Mithilfe dieser Gleichungen wurden faszinierende Phänomene wie Schwarze Löcher oder Gravitationswellen vorhergesagt, die erst später entdeckt wurden. Der jüngste Erfolg der ART: Im Jahr 2015 wurden erstmals die Gravitationswellen beobachtet, nämlich als Längenveränderung eines Messgerätes um einen Tausendstel Atomkerndurchmesser! Ihr Ursprung war das Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher in einer entfernten Galaxie.

Mathematische Symmetriegründe erlauben einen bestimmten Term in den Einsteinschen Gleichungen, der prinzipiell jeden Wert annehmen kann: die Kosmologische Konstante. Einstein verwarf diesen Term allerdings wieder und bezeichnete den Versuch, damit ein statisches Universum zu modellieren, als seine „größte Eselei“. Heute wird dieser Term als Dunkle Energie interpretiert (aus der unser Universum hauptsächlich bestehen könnte), die für die beschleunigte Expansion des Universums verantwortlich wäre. Die physikalische Natur der Dunklen Energie ist bis heute Gegenstand der Forschung.

(Bild: T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab)

▼ Ein Ausschnitt aus der Millennium-Simulation zeigt das wabenförmige Netz aus Filamenten und Voids 13,6 Milliarden Jahre nach dem Urknall. Er ist das Ergebnis aufwändiger Computersimulationen, die am Supercomputer der Max-Planck-Gesellschaft in Garching durchgeführt wurden. Gezeigt wird die Verteilung der normalerweise unsichtbaren Dunklen Materie, der die uns bekannte baryonische Materie folgt. (Bild: Springel et al., Virgo Consortium, MPI, Garching.)

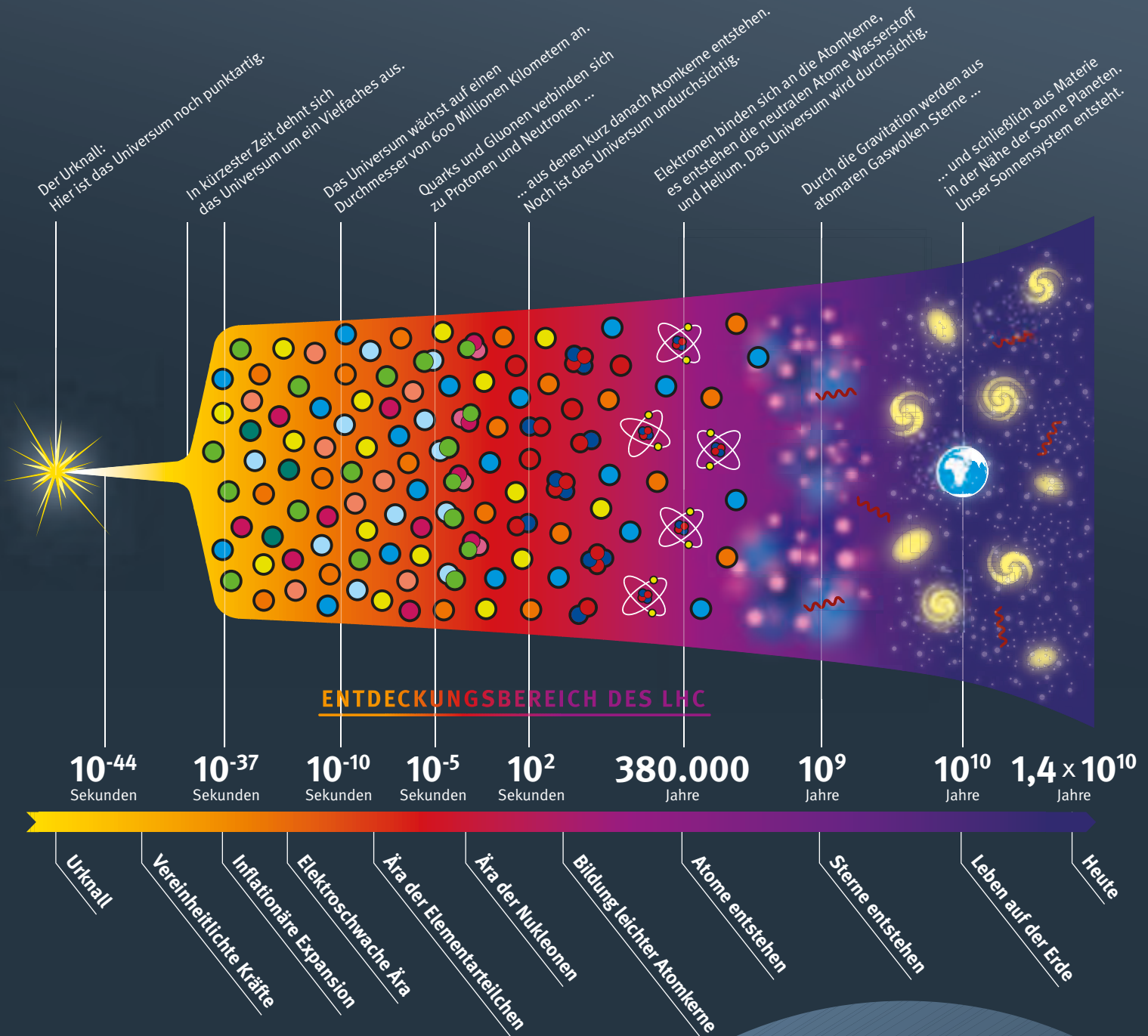


Netz. Die theoretische Reproduktion dieser Strukturen stellte die Forschung lange Zeit vor große Herausforderungen. Denn nur mit den einfachen physikalischen Gesetzen der Gravitation und der Hydrodynamik sollten diese Objekte entstehen können. Solche Resultate können allerdings nur mit aufwändigen Computersimulationen auf riesigen Supercomputern erreicht werden. Im Jahr 2005 konnten erstmals Ergebnisse der sogenannten Millennium-Simulation präsentiert werden, an der auch deutsche Gruppen beteiligt waren. Bei dieser Simulation entstanden im Computer – ausgehend von Bedingungen, wie sie kurz nach dem Urknall herrschten – sämtliche erwarteten und beobachteten Großstrukturen bis hinunter zur Galaxiengröße.

Innerhalb der Galaxien formen sich Sterne aus sogenannten molekularen Gaswolken. Sobald die Gravitationskraft den Strahlungsdruck der Photonen überschreitet, kollabiert das Gas (zum größten Teil Wasserstoff) zu einer Kugel, da die Gravitation in alle Richtungen gleichmäßig symmetrisch wirkt. Die meisten Sterne sind durch ihre Rotation allerdings abgeplattet. So war es eine Überraschung, dass im Jahr 2016 in einer Entfernung von 5000 Lichtjahren zur Erde ein Stern entdeckt wurde, der bei einem Radius von 1,5 Millionen Kilometern nur Abweichungen von circa drei Kilometern aufweist. Damit ist er das kugelrundeste in der Natur vorkommende Objekt, das je vermessen wurde.

Bei der Sternentstehung bildet sich häufig aufgrund der Drehimpulserhaltung eine Scheibe aus Gas und Staub um den Stern aus. Diese Scheibe bietet die Grundlage für Planetensysteme, wie in unserem Sonnensystem. Durch die Ansammlung verschiedener chemischer Elemente sowie von Staubpartikeln formen sich unter dem Einfluss der Gravitation schließlich sogenannte Planetesimale, die Vorgänger von Planeten und Asteroiden. Große Ansammlungen dieser Planetesimale verklumpen unter ihrem gemeinsamen Gravitationsdruck bis schließlich ein kugelförmiger Planet entsteht. Dabei sinken die schwereren Elemente im noch weitestgehend flüssigen Planeten hin zum Gravitationszentrum, also in den Kern. Die leichteren landen in den Außenbereichen und formen so die äußeren Schichten eines Planeten. Dieser Prozess führte vor 4,6 Milliarden Jahren auch zur Entstehung unseres Planetensystems mit seinen acht Planeten ganz unterschiedlicher Struktur.





13,8 Milliarden Jahre komprimiert auf 20 Zentimeter:

Bei seiner Geburt blähte sich das Universum in einem Bruchteil einer Nanosekunde von einem Punkt auf die Größe der Erdbahn aus – inzwischen hat es eine Größe von mehr als 45 Milliarden Lichtjahren erreicht. Um die ersten Augenblicke seiner Existenz zu ergründen, werden extrem leistungsstarke Teilchenbeschleuniger benötigt. Mit ihrer Hilfe werden Bedingungen nachgebildet, die immer näher an den Moment des Urknalls reichen. (Grafik: ius nach „Österreichische Akademie der Wissenschaften“)

Elementarteilchen des Universums

- Quark
- Elektron
- Myon, Tauon
- Gluon
- W-, Z-Boson
- Photon
- Neutrino
- Meson
- Baryon
- Atomkern
- Atom
- Reste kosmischer Hintergrundstrahlung
- Zusammenballung von Gaswolken
- Heutige Galaxien



1927
Balthasar van der Pol
baut mit Verstärkerröhren einen elektrischen Oszillator, bei dem bei äußerer periodischer Anregung chaotische Dynamik auftritt.



1918
Emmy Noether
verknüpft im Noether-Theorem elementare physikalische Größen wie Ladung, Energie und Impuls mit geometrischen Eigenschaften.



1904
Alfred W. Lotka & Vito Volterra
beschreiben die Grundregeln des Räuber-Beute-Systems, das die schwankenden Populationsgrößen von Jägern und Gejagten definiert.



1948
Mary Cartwright
analysiert die großen Auswirkungen von kleinen Änderungen bei Anfangsbedingungen, später in der Chaostheorie „Schmetterlingseffekt“ genannt.



1952
Alan Turing
beschreibt erstmals die spontane Strukturbildung in offenen Systemen, also Systemen, denen ständig Energie zugeführt wird.



1510
Leonardo da Vinci
zeichnet das Verhalten von Wasser, das auf Hindernisse trifft und in ein Becken stürzt – die erste wissenschaftliche Darstellung einer Turbulenz.



1665
Christiaan Huygens,
krank im Bett liegend, entdeckt, dass zwei Pendeluhren im Gleichtakt schwingen. Die erste überlieferte Beobachtung von Synchronisation.



1890
Henri Poincaré
entdeckt, dass Planetenbahnen instabil werden können. 1904 begründet er die algebraische Topologie: Ein Objekt, das kein Loch hat, mutiert zu einer Kugel.



1955
Wolfgang Pauli
formuliert das CPT-Theorem: Jeder Vorgang, der nach bestimmten Regeln aus einem anderen hervorgeht, steht ebenfalls im Einklang mit den Gesetzen der Physik.



◀ Auch wenn die Anordnung der Kaktusblätter unregelmäßig erscheint (links), birgt sie eine überraschende Symmetrie – die Spiralen können durch die Fibonacci-Reihe beschrieben werden (→ Seite 6). Die Blume rechts ist nahezu rotationssymmetrisch – ihre Blätter weisen annähernd die gleichen Abstände auf.



1961
Jeffrey Goldstone
entdeckt die spontane Symmetriebrechung, durch die ein physikalisches, symmetrisches System in einen asymmetrischeren Zustand übergeht.



1964
Murray Gell-Mann & George Zweig
schlagen Quarks als elementare Bausteine der Teilchen Meson und Baryon vor und begründen damit das Standardmodell der Elementarteilchen.



1967
Ilya Prigogine
begründet sich selbstorganisierende dynamische Strukturen in nichtlinearen Systemen. Die Thermodynamik wird damit erstmals auf Systeme fern vom Gleichgewicht angewendet.

(Bilder: AIP, Physics Today Collection | Joi, CC-BY-SA 3.0 | Héping fèndōu jiū dìqū, CC-BY-SA 4.0 | Dschwen, CC-BY-SA 3.0 | StagiaireMGIMO, CC-BY-SA 3.0 | Rama, CC-BY-SA 2.0 FR | Cirone-Musi, CC-BY-SA 2.0 | Holger Motzkau, CC-BY-SA 3.0 | Mary Levin, CC-BY-SA 4.0 | Bengt Nyman, CC-BY 2.0 | Brown University, CC-BY-SA 3.0 | Sijothankam, CC-BY-SA 3.0 | Paul Nylander | Prof. Dr. Stefan Heusler | CCO)

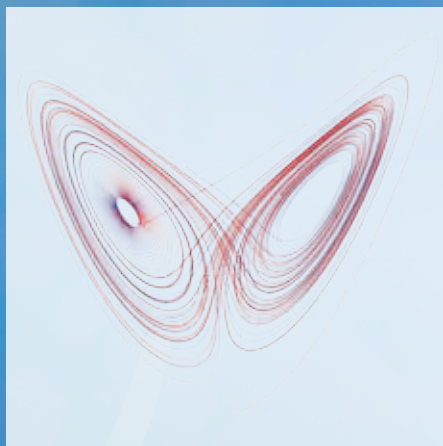
Unendliche Symmetrie



► Bei der Modellierung des Wetters oder des Lasers mit einem Set von drei Gleichungen, den sogenannten Lorenz-Gleichungen, entstehen markante Gebilde, die den dreidimensionalen Raum allerdings nur wenig füllen. Aufgrund seiner charakteristischen Form wird der hier abgebildete Lorenz-Attraktor auch Schmetterlings-Attraktor genannt.



◀ Magnetische Pendel veranschaulichen deterministisches Chaos: Die Pendelspitze wechselwirkt mit dem Magnetfeld von fünf Magneten in der Bodenplatte und zieht chaotische Bahnen. Das Pendel landet trotz sehr ähnlicher Startpositionen immer an ganz anderen Stellen. Färbt man den Einzugsbereich der Magnete ein, zeigt sich eindrücklich, dass schon kleinste Änderungen in den Anfangsbedingungen andere Resultate hervorbringen.



◀ Muster sind das Resultat der Strukturbildung komplexer Systeme. Erstaunlicherweise gibt es eine Universalität der Strukturbildungsgesetze: Völlig verschiedene physikalische, chemische oder auch biologische Systeme zeigen dasselbe Verhalten. Oft entstehen hexagonale Strukturen – zum Beispiel bei Wasserblasen, Bienenwaben, Schlangenhaut oder im Basaltgestein.



1990
James A. Yorke
begründet die Forschung zur Kontrolle von Chaos: der Übergang von chaotischem zu geordnetem Verhalten kann gesteuert werden.



1984
Daniel Shechtman
entdeckt in einer Aluminium-Mangan-Legierung eine – entgegen der Theorie von Kristallen – aperiodisch angeordnete Struktur: Quasikristalle.



1975
Benoît Mandelbrot
wird zum Vater der fraktalen Geometrie. Er prägt nicht nur den Begriff „fraktal“, sondern beschreibt auch die Mandelbrot-Menge.



1973
Roger Penrose
entdeckt eine Familie von Kachel-Mustern, die eine Ebene lückenlos parkettieren können, ohne dass sich dabei ein Grundschema periodisch wiederholt.



1973
David Thouless, Duncan Haldane & Michael Kosterlitz
begründen die Bedeutung topologischer Phasen und Phasenübergänge für Materie.



1968
Hermann Haken
formuliert die Synergetik als Lehre vom Zusammenwirken von Elementen gleich welcher Art, die in komplexen dynamischen Systemen wechselwirken.

► Auch die Kerne der Sonnenblume sind spiralförmig und nach dem Goldenen Winkel angeordnet. Mathematisch gesehen ist er der irrationalste Winkel von allen – also am weitesten von allen Regelmäßigkeiten entfernt. Das Fehlen periodischer Muster bedeutet für die Sonnenblume, dass die Kerne die Fläche optimal nutzen (mittleres Bild).





► Am Kopf des Romanesco-Blumenkohls lassen sich gleich zwei mathematische Verfahren erkennen: Als eine von wenigen Pflanzen weist sein Blütenstand Selbstähnlichkeit – und damit eine fraktale Struktur – sowie Fibonacci-Spiralen auf. (Bild: mato/shutterstock.com)

Wer kontrolliert das Chaos?

„Haben Sie heute schon nach dem Wetter gesehen?“

Vielleicht war vor wenigen Tagen noch Regen vorhergesagt, aber Sie freuen sich über den Sonnenschein, der Ihnen ins Gesicht strahlt. Das Wetter entwickelt sich nämlich chaotisch, das heißt seine Entwicklung ist empfindlich abhängig von seinem ganz genauen momentanen Zustand. Da dieser aber nie ganz genau bekannt ist, kann das Wetter nicht mehr als ein paar Tage vorausgesagt werden. Aber auch für die Anzahl von Beutetieren und deren natürlichen Feinden, Börsenkurse, das Verhalten von großen Menschenmassen, für die Vorhersage von Verkehrslagen oder die Entstehung von Sonnenflecken gelten die Gesetze der sogenannten nichtlinearen Physik.

Ein berühmtes Beispiel nichtlinearer Physik ist die Rayleigh-Bénard-Konvektion. Hierbei

wird eine Flüssigkeit von unten erhitzt und von oben gekühlt. Ab einer bestimmten kritischen Temperaturdifferenz gerät die Flüssigkeit in Wallung. Dabei entstehen sehr plötzlich kleine Bewegungszellen, ein flächendeckendes Muster, das aussieht wie eine Rollenstruktur. In jeder Zelle strömt warme Flüssigkeit zum thermischen Ausgleich nach oben, an ihrem Rand strömt kalte Flüssigkeit mit ihrer höheren Dichte nach unten. Dieser Prozess des Wärmetransports heißt Konvektion. Diese räumliche Struktur ist nicht von außen geprägt, sondern hat sich spontan selbst organisiert. Sie bleibt solange stabil, wie die Temperaturdifferenz aufrecht erhalten wird.

Durch eine weitere Temperaturerhöhung wird dieses geordnete Rollenmuster in-

stabil und neue, weniger symmetrische Muster entstehen. Bei weiterer Temperaturerhöhung entstehen scheinbar ungeordnete, chaotische Muster – die Strömung ist jetzt turbulent.

Die Beschreibung der turbulenten Strömung von Flüssigkeiten und Gasen ist sehr komplex. Turbulent sind nicht nur Wirbel in Flüssen, die aufsteigende heiße Luft über einer Kerze oder die Vermischung von Milch in Kaffee, sondern auch Strömungen in Motoren, die Luftverwirbelung hinter Flugzeugen oder unzählige atmosphärische Prozesse. Interessant ist hierbei vor allem der Übergang ausgehend von der laminaren Strömung, bei der eine Flüssigkeit oder ein Gas in sich nicht vermischenden Schichten strömt, hin zur turbulenten Strömung. Im Jahr 1883 erforschte der Physiker Osborne Reynolds dieses Phänomen, als er das Strömungsverhalten in Rohrleitungen untersuchte. Dabei stellte er fest, dass ab

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Gemäß des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik streben abgeschlossene Systeme zu thermischem Gleichgewicht, einem Zustand niedriger Energie und maximaler Entropie. Entropie ist dabei ein Maß für die dem System zugänglichen Zustände, im Volksmund häufig als Unordnung bezeichnet. Auf einer großen Skala wirken sie dann räumlich wie zeitlich homogen (also ohne „Ordnung“). Das lässt sich zum Beispiel bei einer Flüssigkeit in einem Topf beobachten. Wird sie in Bewegung versetzt, so klingt diese mit der Zeit ab. Ganz anders verhält sich ein System, wenn es „offen“ ist, ihm also Energie, Materie oder auch Information hinzugefügt wird. Diesen Zustand bezeichnet man auch als Nichtgleichgewicht. Wird beispielsweise die Flüssigkeitsschicht im Topf von unten erhitzt und von oben gekühlt, sind ab einer bestimmten Temperaturdifferenz die Rayleigh-Bénard-Konvektionszellen zu beobachten. Es entsteht eine räumliche Struktur, die sich spontan selbst organisiert.

In dieser Hinsicht herrschen hier ganz andere Voraussetzungen als zum Beispiel bei der Entstehung von Kristallen aus einer flüssigen Phase. Auch hier entstehen Strukturen, allerdings unter der Prämisse der Energieminimierung und in einem abgeschlossenen System. Dies stellt ein sogenanntes Gleichgewichtssystem dar, während sich Strukturen, die sich in chaotischen Systemen bilden, generell nur im offenen Nichtgleichgewicht bewegen.



▲ Die Beschreibung des turbulenten Verhaltens von Flüssigkeiten und Gasen erfordert enorme Rechenleistungen – sei es beim Schütten von Milch in eine Kaffeetasse oder bei der Berechnung von Wirbelschleppen beim Start eines Flugzeugs. (Bilder: StockSnap, CCO | NASA/Langley Research Center, CCO)

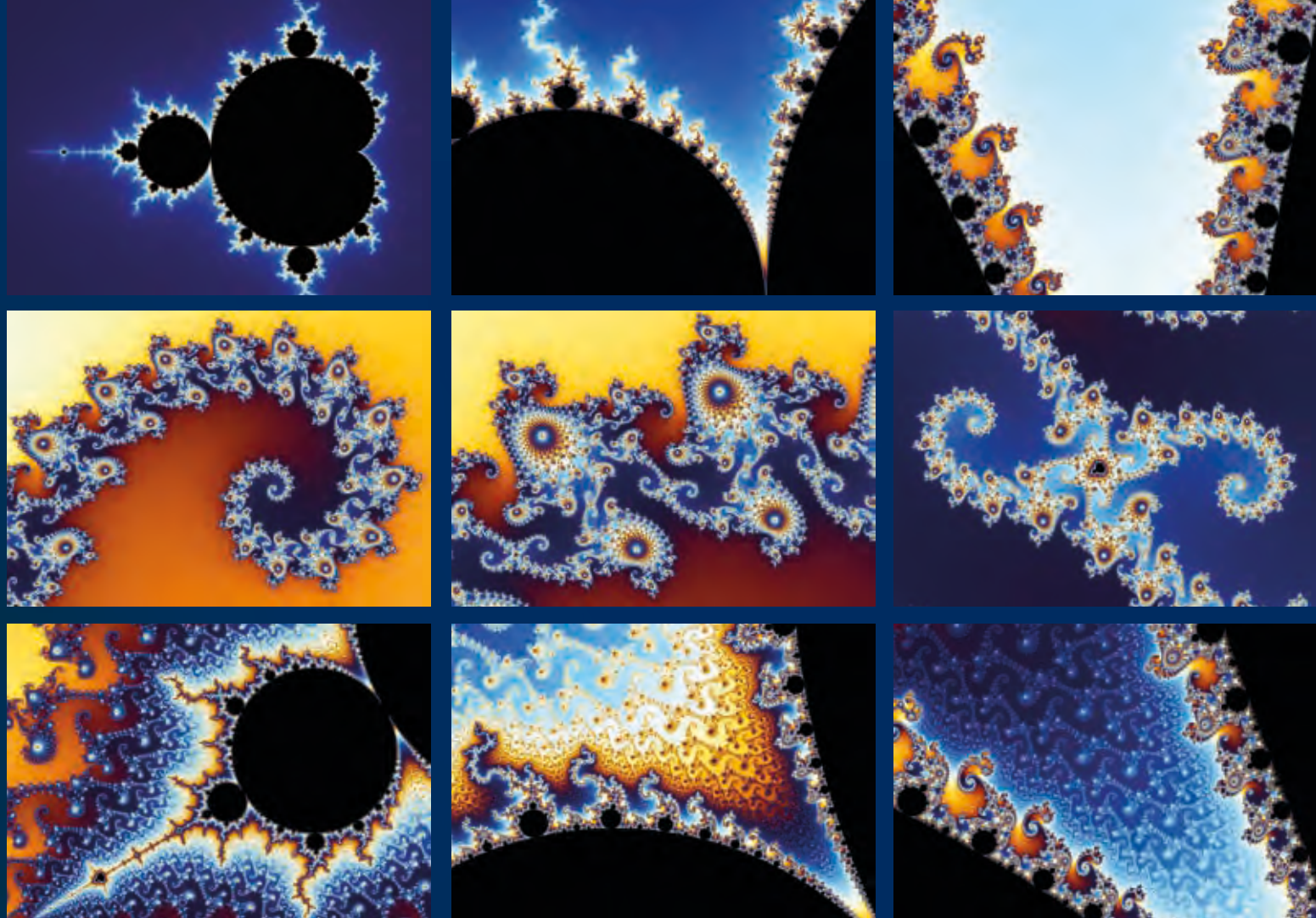
einer gewissen Flussgeschwindigkeit in den untersuchten Rohren Turbulenz entstand. Dieser Phasenübergang wird seitdem durch die Reynolds-Zahl charakterisiert. Die Bildung chaotischen Verhaltens ist allerdings nicht nur bei Flüssigkeitsströmungen von großem Interesse.

Schon im Film Jurassic Park erkennt der fiktive Mathematiker und Chaosforscher Ian Malcolm korrekt, dass in chaotischen Systemen kleine Ursachen eine große Wirkung haben können. Dieses auch als Schmetterlingseffekt bekannte Prinzip wird in Fachkreisen oft als deterministi-

sches **Chaos** bezeichnet. Das bedeutet, dass leichte Variationen in den Anfangsbedingungen trotz strikt vorgeschriebener zeitlicher Entwicklung völlig unterschiedliche Langzeitergebnisse hervorrufen können. Der vom amerikanischen Meteorologen Edward Lorenz geprägte Begriff vergleicht hierbei vereinfacht die Auswirkungen, die der Flügelschlag eines

▼ Visualisierung des Mischungsverhaltens turbulenter Strömungen, das große Auswirkungen auf die Wolkenmikrodynamik und damit auf das Klimageschehen hat. (Bild: Prof. Dr. Eberhard Bodenschatz)





Schmetterlings in Brasilien auf das Wetter in Texas haben kann. Das als Analogie zu verstehende Bild findet sich tatsächlich bei einer großen Vielzahl von Phänomenen in der Natur und in unserem Alltag wieder. Wettervorhersagen sind gerade deswegen nur auf kurzen Zeitskalen hinreichend genau, weil die zur Verfügung stehenden Messmethoden nur ein unvollständiges Abbild aller Parameter, wie Temperatur, Druck oder Luftfeuchtigkeit geben. Schon der Ausgangszustand des Wetters ist also nur unvollständig bekannt. Selbst hochkomplexe Computersimulationen erlauben genaue Vorhersagen daher nur in Bereichen von wenigen Tagen aufgrund der Ungewissheit der zugrundeliegenden Struktur der Vorgänge

▼ Das 1915 vom polnischen Mathematiker Wacław Sierpinski beschriebene, nach ihm benannte Dreieck ist ein Fraktal – mit jedem Schritt finden sich in ihm immer kleinere Kopien seiner selbst. (Bilder: Georg-Johann Lay, CCO)

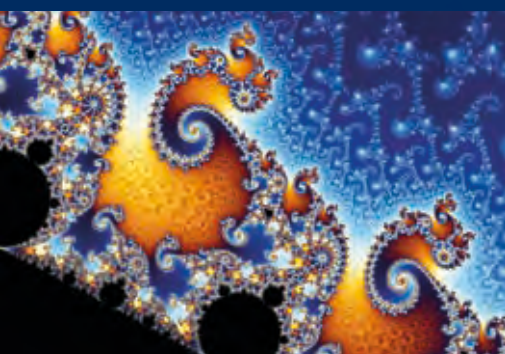
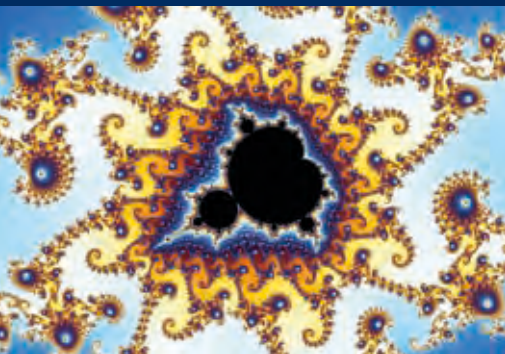
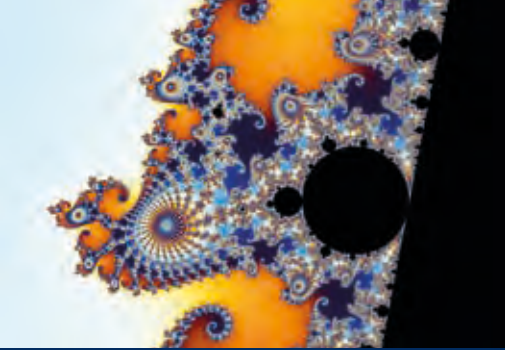
und der Nichtlinearität der Gleichungen. Für eine verlässliche Wettervorhersage von zwei Wochen würde man mehr als 100 Millionen gleichmäßig verteilter Wetterstationen auf der ganzen Welt benötigen.

Nicht nur beim Wetter, auch im Tierreich kann es chaotisch zugehen: Mit dem Räuber-Beute-Modell wird mathematisch untersucht, wie sich die Mengen von Räuber- und Beutetieren gegenseitig beeinflussen, wenn sich die Räuber ausschließlich von den Beutetieren ernähren würden. Abhängig von den Parametern des Systems können dabei stabile Bevölkerungszahlen entstehen, aber auch regelmäßig oder gar chaotisch schwankende Mengen von Beutetieren oder Räubern. Nicht nur für Tierpopulationen wird dieses Modell erfolgreich angewandt, sondern auch für Modelle der Epidemiologie, wie das SIR-Modell, bei dem untersucht wird, wie sich Krankheiten wie Ebola oder Cholera ausbreiten, oder für

Konjunkturschwankungen in der Wirtschaft. Unter bestimmten Bedingungen lässt sich bei diesen Modellen chaotisches Verhalten zeigen. Die zugrundeliegenden Gleichungen bekommen ab einem sogenannten kritischen Punkt, ab dem ein Phasenübergang von der Ordnung zum Chaos einsetzt, eine rasant ansteigende Zahl von Lösungsmöglichkeiten. Diese ist abhängig vom sogenannten Feigenbaum-Parameter, den der Physiker Mitchell Feigenbaum 1975 bei seiner Forschung über chaotische Funktionen und Zahlenreihen entdeckte.

Die dabei auftretende ständige Vermehrung der Lösungen wird auch als Bifurkation bezeichnet und ähnelt dem Verhalten eines tropfenden Wasserhahns: So sind anfangs die Zeitabstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tropfen noch gleich und geordnet. Öffnet man den Wasserhahn allerdings immer weiter, erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit und



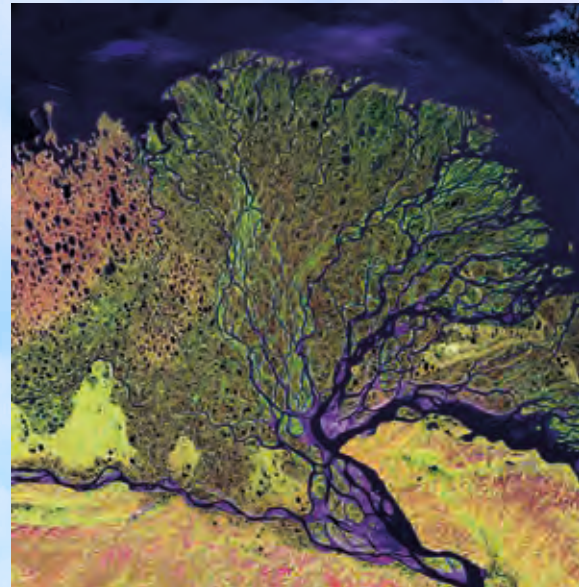


◀ Der Mathematiker Benoît Mandelbrot zeigte, wie sich mit verblüffend simplen Formeln faszinierende Fraktalwelten erschaffen lassen. Betrachtet man die Bilderfolge zeilenweise von links nach rechts, taucht man immer tiefer in sie ein. Dabei stößt man wieder auf die Ausgangsfigur – das sogenannte Apfelmännchen. (Bilder: Wolfgang Beyer, CC BY-SA 3.0)

in ein ursprünglich großes Dreieck ständig weitere kleinere Dreiecke eingesetzt.

Auch deterministisch chaotische Systeme zeigen häufig fraktale Eigenschaften. Dies zeigt sich in der Bildung eines „Seltsamen Attraktors“. Dieser zeigt das Verhalten einer Lösung der Gleichung eines chaotischen Systems. Sie hängt stark von den Anfangsbedingungen ab und nimmt niemals denselben Weg. Ein Beispiel dafür ist der Lorenz-Attraktor (→ S. 17), der bei der Berechnung eines einfachen meteorologischen Systems entsteht und den Schmetterlingseffekt widerspiegelt.

Fraktale Objekte entstehen nicht allein durch Berechnung unter Verwendung abstrakter Zahlenreihen und mathematischer Gleichungen, sondern man findet sie auch sehr häufig in der Natur. Beispiele dafür sind der Romanesco-Blumenkohl, Farnpflanzen, Flusssysteme, Blutgefäße oder Küstenlinien sowie Blitze oder Schneeflocken. Einige Schneckenhäuser bilden sogar Sierpinski-Dreiecke auf ihrer Oberfläche.



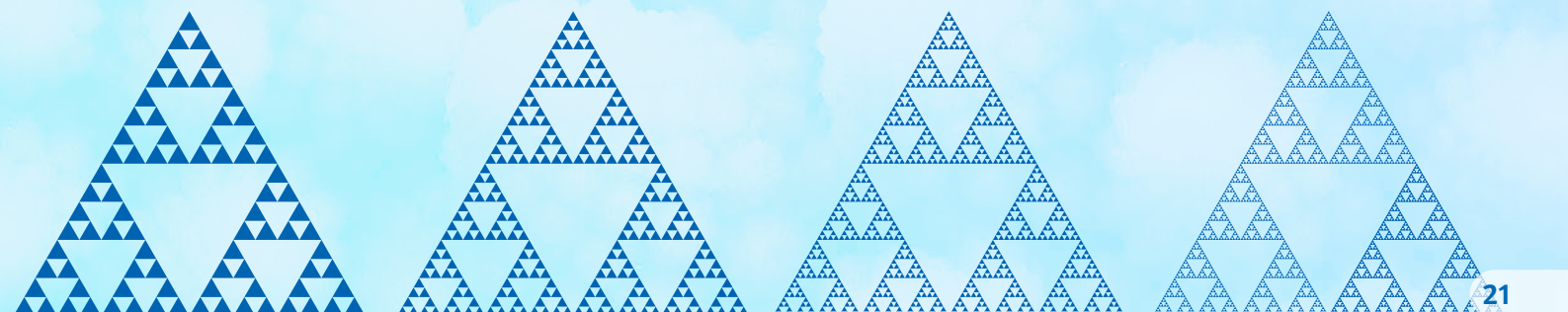
▲ Sei es bei den feinen Verästelungen eines Blitzes, beim Flussdelta oder im Eiskristall – Fraktale sind nicht nur theoretische Gedankenspiele, sondern finden sich an unzähligen Stellen auch in der Natur. (Bilder: NASA, CC0 | Gisela Kraus, CC BY-SA 3.0 | Annick MONNIER, CC BY-SA 3.0)

die Zeitabstände zwischen den nun zahlreicheren Tropfen werden immer unterschiedlicher und vielfältiger. Am Ende herrscht ein chaotischer Strömungszustand.

Eng mit dem Feigenbaum-Parameter verbunden ist die Mandelbrot-Menge, das „Apfelmännchen“. Mit einer einfachen Vorschrift erhält man ein sogenanntes Fraktal. Fraktale sind Objekte, deren Strukturen und Muster sich immer wiederfinden, egal aus welcher Entfernung man das Objekt betrachtet. Vergrößert man zum Beispiel einen winzig kleinen Ausschnitt der Mandelbrot-Menge, sieht dieser Ausschnitt wieder aus wie ein neues eigenständiges Apfelmännchen. Dies kann man praktisch unendlich fortsetzen.

Die zugrundeliegende Eigenschaft von Fraktalen wird als Skalenfreiheit oder Selbstähnlichkeit bezeichnet. Am Beispiel des Sierpinski-Dreiecks kann man dies gut erkennen. Nach bestimmten Regeln werden

Schließlich finden sich chaotische Systeme auch in vielen alltäglichen Prozessen, von Börsenkursen über das Verhalten von Menschenmengen, die in Panik geraten, bis hin zur Staubbildung im Straßenverkehr. Hierbei können nicht nur zufällige Ereignisse wie Unfälle oder Unwetter zu Staus führen. Auch sehr kleine Variationen beim Bremsen und Beschleunigen im dichten Verkehr können zu Phasenübergängen vom geordneten Verkehrsfluss hin zum „Stau aus dem Nichts“ führen. In der Entwicklung befindliche elektronische Fahrassistenzsysteme oder intelligent kontrollierte dynamische Ampelphasen können durch entsprechende Vernetzung und Kopplung an die jeweilige Verkehrssituation solchen unerwünschten Effekten entgegenwirken.





► Wafer-Produktion in einem Reinraum in Dresden. Auf den millimeterdünnen Scheiben finden als Folge der Miniaturisierung immer mehr elektronische Bauelemente Platz. (Bild: GLOBALFOUNDRIES)

Strukturen selbst gemacht

„Haben Sie heute schon Ihr Smartphone benutzt?“

Es verbindet Sie mit dem Rest der Welt; mit den Freunden in der nächsten Stadt, den Geschäftspartnern in China, mit der Steuerung der heimischen Licht- oder der industriellen Fertigungsanlage. Ob Telefonieren, Verschicken von Nachrichten und Videos oder Streamen von Musik – möglich wird das und vieles mehr durch ultrakleine Computerchips, winzige Antennen und robuste und gleichzeitig sensible Touchscreens. Hinter all dem stecken ausgeklügelte Strukturen der Mikro- und Nanoelektronik und der Optik. Dass sie mittlerweile mit der Präzision von einzelnen Atomlagen gefertigt werden können, spielt eine entscheidende Rolle für ihre Funktionalität. Und ihre stete Miniaturisierung hat dazu geführt, dass sich die Rechenkapazitäten und die Geschwindigkeiten von

Computerchips in den vergangenen 20 Jahren dramatisch erhöht haben.

Der Kern heutiger Prozessoren und Mikrocontroller sind integrierte Schaltungen (ICs) auf Silizium-Basis, die Berechnungen und Logik-Operationen durchführen können. Mit einer Vielzahl von Prozessschritten werden Bauelemente wie Dioden und Transistoren in Siliziumscheiben (Wafer) hergestellt – in einer kaum vorstellbaren Dichte von Milliarden Transistoren auf wenigen Quadratmillimetern. Entgegen mancher Prognose konnten die Fertigungsverfahren in den vergangenen Jahren so weiterentwickelt werden, dass immer winzigere Strukturen herstellbar wurden. Die Chip-Fertigung erfolgt in Reinräumen mit besonders staubfreier Atmosphäre. Auf den Silizium-Kristall werden Halbleiter-, Isolator- und Leiter-Materialien mit höchster Präzision aufgedampft und mit Licht und chemischen Verfahren strukturiert: mit Lithographie.

Mit Strukturbreiten von wenigen Nanometern wird man allerdings in absehbarer Zukunft an physikalische Grenzen stoßen – sowohl was die Herstellung angeht als auch die Funktionalität: Wenn Strukturen zu schmal werden oder zu dicht beieinander liegen, treten Effekte der Quantenmechanik auf, die für die klassischen Chip-Konzepte störend sind. Deshalb arbeiten Forscher an neuen Techniken, die solche Effekte gezielt ausnutzen.

So nutzt das Prinzip der Spintronik nicht nur die Ladung der Elektronen als Informationsträger, sondern auch ihren Spin, eine quantenmechanische Eigenschaft, die mit dem Drehimpuls vergleichbar ist. Der Spin des Elektrons ist mit einem





magnetischen Moment verknüpft, das sich in eine von zwei definierten Richtungen einstellen lässt. Auf dieser Basis lassen sich zukünftig neuartige Bauelemente konstruieren, die auch die magnetischen Eigenschaften von Materialien ausnutzen.

Erste große Erfolge in dieser Richtung erzielten 1988 Peter Grünberg am Forschungszentrum Jülich und Albert Fert an der Uni Paris-Sud mit der Entdeckung des

▼ Der enorme technische Fortschritt in der Halbleitertechnik hat Heimcomputer in Leistungssphären katapultiert, die in ihren Anfangsjahren undenkbar schienen. Dennoch wird der klassische Ansatz der Chipherstellung bald an seine Grenzen stoßen – neue Konzepte sind gefragt. (Bild: CCO)

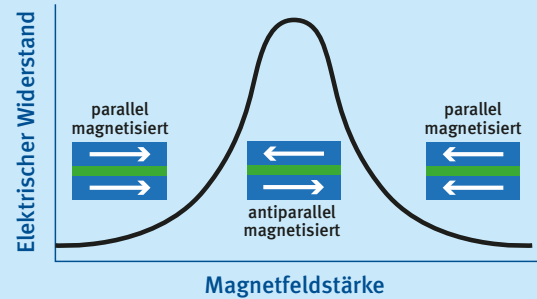


▼ Hochreines Silizium. Das Halbmetall dient heute als Grundmaterial für die meisten Produkte der Halbleiterindustrie wie integrierte Schaltkreise, Sensoren oder Solarzellen. (Bild: Enricoros, CCO)



► Der GMR-Effekt tritt auf, wenn zwei magnetische Schichten durch eine sehr dünne, nicht magnetische Lage getrennt werden. Sind beide Schichten parallel ausgerichtet, ist der Widerstand des Schichtpakets gering (links und rechts), bei einer antiparallelen Ausrichtung ist er deutlich größer (Mitte). (Grafik: ius)

sogenannten Riesenmagnetowiderstandes in einer Struktur aus dünnen abwechselnd magnetischen und nicht-magnetischen Schichten. Basierend auf dieser



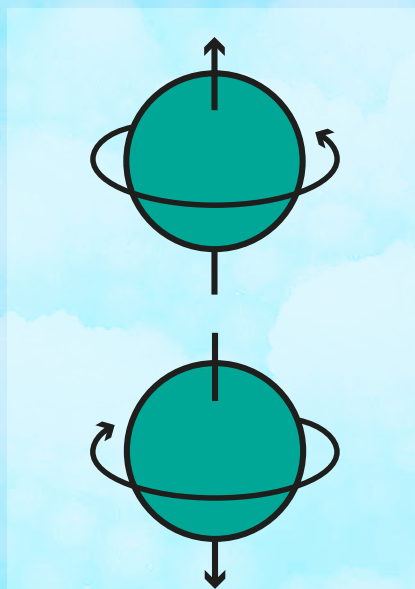
GMR-Effekt

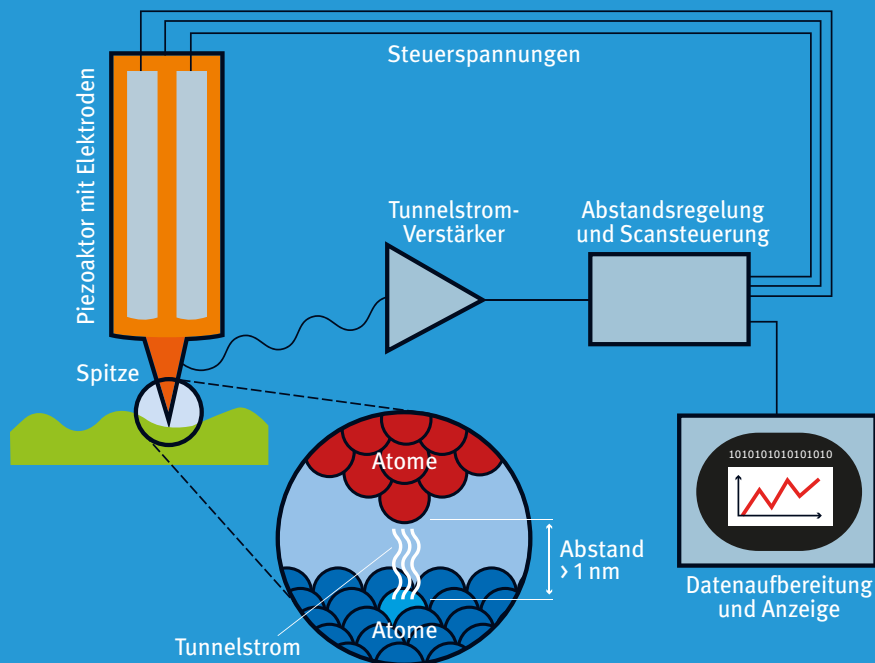
Der GMR-Effekt, auch Riesenmagnetowiderstand genannt, wird in Mehrschichtsystemen beobachtet. Im einfachsten Fall bestehen sie aus zwei parallel angeordneten dünnen, magnetischen Schichten, die durch eine nur wenige Atomlagen dünne, nichtmagnetische Schicht voneinander getrennt sind. Der elektrische Widerstand dieses Schichtpaketes hängt sehr stark davon ab, ob die Magnetisierung in den beiden äußeren Schichten gleich oder entgegengesetzt ist. Die Elektronen „spüren“ beim Stromfluss durch das Schichtpaket am Übergang zwischen den beiden magnetischen Schichten, ob sich die Magnetisierungsrichtung geändert hat oder nicht, weil sie selbst wie ein winziger Magnet wirken. Das äußert sich darin, dass der elektrische Widerstand des Schichtpaketes klein ist, wenn die Magnetisierungen der beiden Schichten parallel ausgerichtet sind und entsprechend messbar größer ist, wenn die Magnetisierungen antiparallel ausgerichtet sind.

Auf diesem Prinzip basierend wurden hochsensible Leseköpfe für magnetisch gespeicherte Bits in Festplatten entwickelt. Dazu wird das Schichtpaket des Sensors bei der Herstellung so präpariert, dass die Magnetisierung der unteren magnetischen Schicht in der Richtung unveränderlich festgehalten wird. Die Magnetisierung der dazu parallelen oberen magnetischen Schicht ist dagegen leicht durch ein von außen angelegtes Magnetfeld zu verändern. Ein sehr kleines Magnetfeld, das in eine von zwei möglichen Richtungen zeigt, reicht dann aus, um die Magnetisierung in der Sensorschicht in die eine oder andere Richtung zu drehen.

Auf der Festplatte sind digitale Nullen und Einsen als unterschiedliche Magnetisierungsrichtung gespeichert. Wenn diese Bereiche am Lesekopf vorbeirotieren, dann ändert sich der Sensorwiderstand entsprechend. Dieses Signal kann ausgelesen werden – und damit die gespeicherten Daten. Durch den Riesenmagnetowiderstand können die Magnetzonen auf der Festplatte deutlich kleiner werden als mit älteren Methoden. Das macht die großen Speicherkapazitäten moderner Festplatten erst möglich.

▼ Elektronen haben eine Eigenschaft, die von herkömmlichen elektronischen Bauelementen nicht genutzt wird: einen inneren Drehsinn, den Spin. Er kann zwei Orientierungen haben: links- oder rechtsherum. (Grafik: CCO)





► 2016 wurde der Nobelpreis für Chemie an drei Forscher vergeben, die sich mit dem Design und der Herstellung von winzigen molekularen Maschinen beschäftigen. Eines ihrer spektakulärsten Ergebnisse ist ein Nanoauto, das aus einem einzigen Molekül besteht und von vier elektrischen Rädern angetrieben wird. (Bild: 2011 Empa)

2007 sogar mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Entdeckung entwickelten Forscher bei IBM in Kalifornien extrem empfindliche Schreib- und Leseköpfe für magnetische Datenspeicher, mit denen um Größenordnungen bessere Speicherdichten möglich wurden und die heute praktisch in allen Computerfestplatten verwendet werden. Mittlerweile wird aber auch an ganz neuen Konzepten der Datenspeicherung und Verarbeitung gearbeitet.

Ein Beispiel sind sogenannte Race-Track-Speicher aus winzigen Nanobürsten, die sich in ihrer Funktion an den Strukturen des menschlichen Gehirns orientieren. Forscher interessieren sich auch für ganz neue Konzepte und Materialien: In der molekularen Elektronik sollen einzelne maßgeschneiderte Moleküle die grundlegenden funktionellen Bausteine sein, während in der Bio-Elektronik zum Beispiel biologische Komponenten wie DNA oder Proteine mit elektronischen Komponenten verknüpft werden. Immer kleinere Strukturen herzustellen und ihre vielfältigen strukturellen wie elektromagnetischen Effekte auszunutzen erfordert nicht nur immer bessere Fertigungsverfahren, auch geeignete Messmethoden sind unerlässlich, um so kleine Strukturen kontrollieren und neue funktionelle Zusammenhänge erforschen zu können. Man kann sogar sagen, dass die Entwicklung immer ausgeklügelterer Mikroskopie- und Messtechniken ein wesentlicher Motor der fortlaufenden Miniaturisierung war und ist.

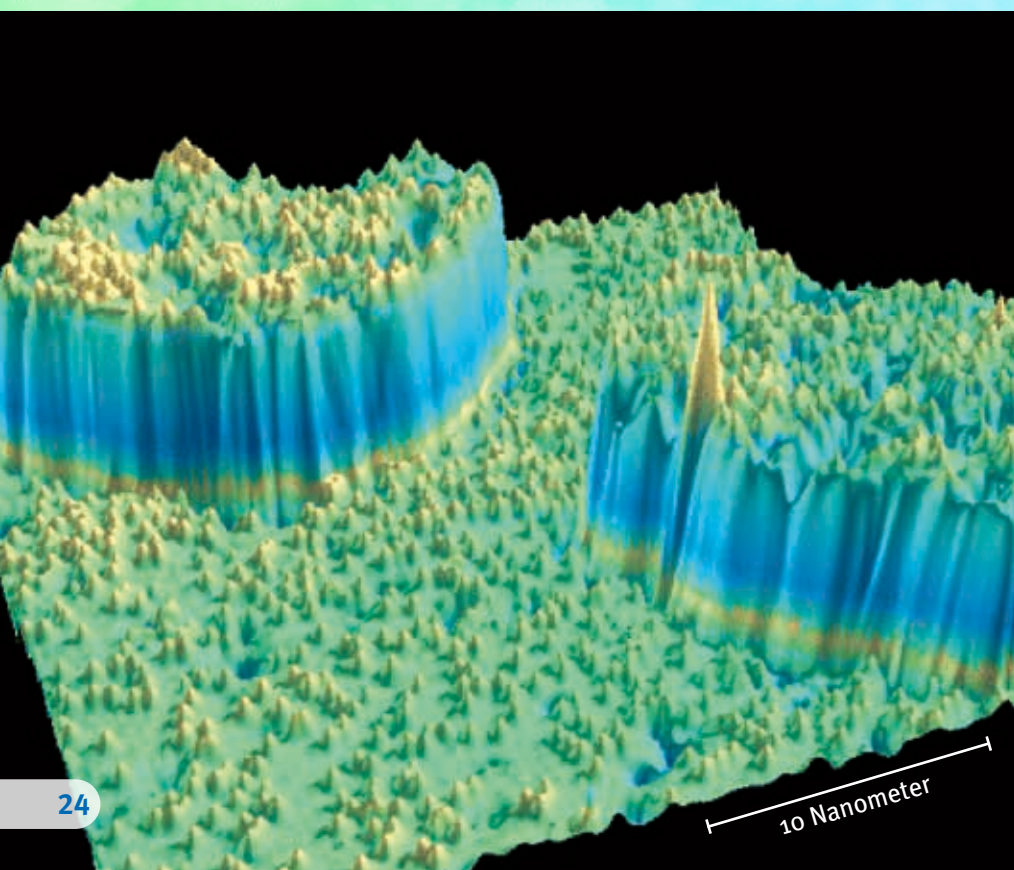
So wie die Röntgenstrahlung erste Einblicke in das Innere von Materie ermöglicht hat, gelang es ab den 1930er Jahren mit Elektronenstrahlen eine um einen Faktor 1000 bessere Auflösung (und damit Vergrößerung) als mit herkömmlichen Mikroskopen zu erzielen. Elektronen kann nämlich eine Wellenlänge zugeordnet werden, die umso kleiner ist, je größer die Energie der Elektronen ist. Diese Wellenlänge ist im Vergleich zu sichtbarem Licht sehr viel kleiner, sodass mit den Elektronenwellen entsprechend kleinere Strukturen beob-

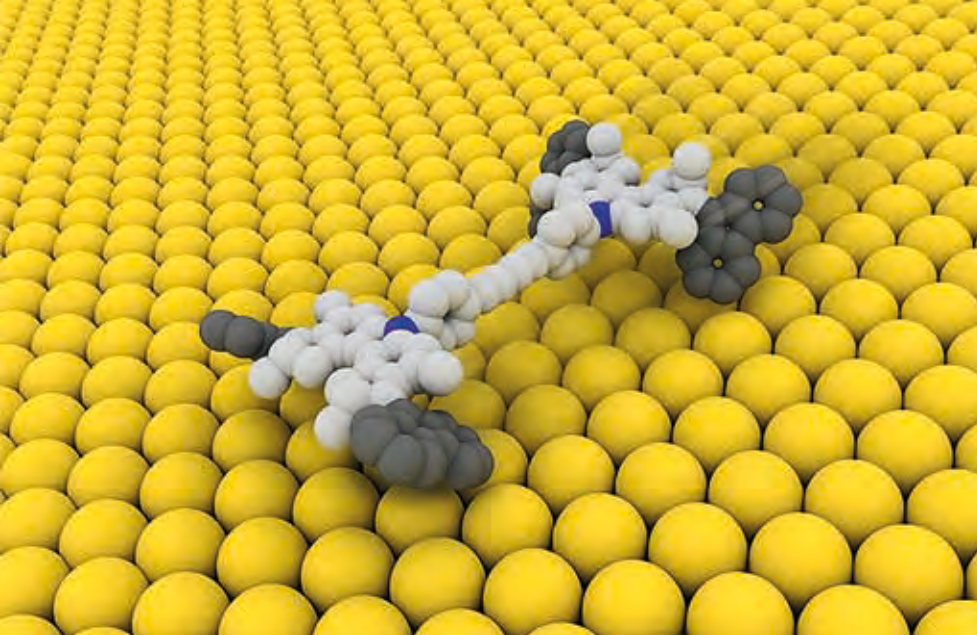
◀ Mit rastertunnelmikroskopischen Aufnahmen lassen sich atomgenaue Bilder von Oberflächen anfertigen. Die hier zu sehenden kleinen Spitzen sind Verunreinigungen einer Eisenkristalloberfläche mit Chrom-Atomen. (Bild: CCO)

Rastertunnelmikroskopie

Bei der Rastertunnelmikroskopie wird eine elektrisch leitende Spitze in minimalem Abstand zeilenweise über eine leitende Probe geführt. Am unteren Ende der Spitze, die oft aus einem dünnen Wolframdraht besteht, befindet sich im besten Fall nur ein einziges Atom. So ergeben metallische Spitze und metallische Probenoberfläche ein System aus zwei sich gegenüberstehenden, sich nicht berührenden Elektroden, zwischen denen eine Spannung angelegt wird. Weil sie sich nicht berühren, dürfte eigentlich kein Strom fließen. Doch bei den winzigen Abständen, die zwischen den Atomen der Spitze und der Probe eingestellt werden können, erlaubt die Quantenphysik, dass Elektronen dieses Hindernis überwinden. Dieser Effekt wird Tunnel-effekt genannt, da die Elektronen eine Energiebarriere „durchtunneln“. Die Stärke dieses Tunnelstroms hängt sehr empfindlich vom Abstand zwischen Spitze und Probe ab und ist daher ein extrem genaues Maß für diesen Abstand. Wenn die Spitze nun zeilenweise über die Probenoberfläche geführt wird, dann lässt sich ein Abbild der Probenoberfläche mit praktisch atomarer Auflösung erstellen.

(Grafik: ius nach Michael Schmid)



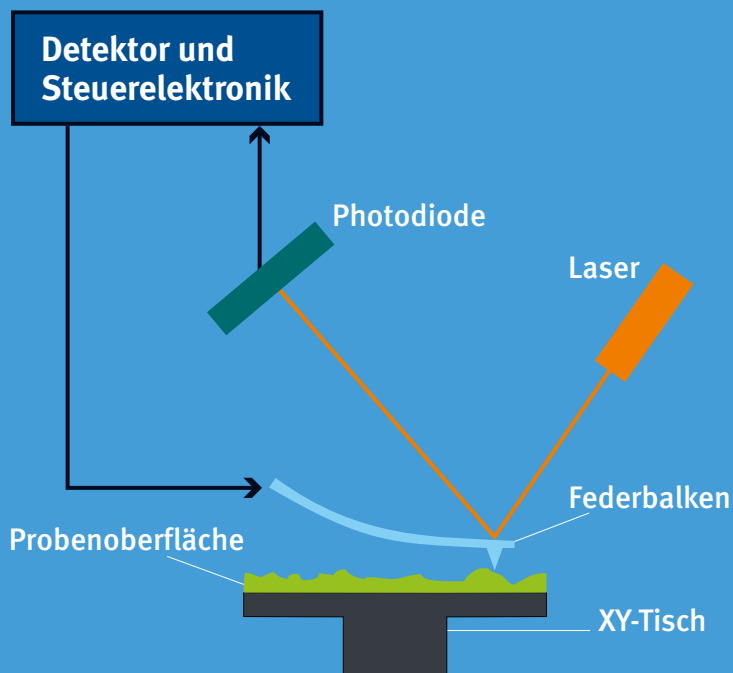


achtbar sind. Ernst Ruska war in den 1930er Jahren der Pionier der Elektronenmikroskopie, wofür er 1986 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Anders als bei der indirekten Röntgenstrukturanalyse von Max von Laue ist man nicht auf die Beugung an Kristallgittern

beschränkt, sondern erhält ein direktes Abbild der Objekte – sowohl beim Durchleuchten dünn geschliffener Proben als auch bei der Reflexion an Oberflächen. Das Ernst-Ruska-Zentrum für Elektronenmikroskopie am Forschungszentrum Jülich gehört zu den weltweit führenden

▲ Im Diamanten vereinen sich auf seltene Weise praktische mit ästhetischen Eigenschaften. Geschliffen einer der gefragtesten Edelsteine, wird er in der Industrie aufgrund von besonderer Härte, Verschleißfestigkeit und Wärmeleitvermögen vor allem als Schneidstoff genutzt. (Bild: Mario Sarto, CC BY-SA 3.0)

INFO



Einrichtungen bei dieser Entwicklung. Dort können mittlerweile Strukturen einer Größe von 0,05 Nanometern dargestellt werden – das liegt im Bereich des Durchmessers von Atomen!

Ernst Ruska teilte sich den Nobelpreis mit dem deutschen Physiker Gerd Binnig und dessen Schweizer Kollegen Heinrich Rohrer, die seit 1981 eine revolutionär neue Art der Mikroskopie entwickelt hatten: das Rastertunnelmikroskop. Mit ihm und seinem Verwandten, dem Rasterkraftmikroskop, können im Prinzip einzelne Atome auf Oberflächen abgebildet werden. Ihre Konturen werden durch die Wechselwirkung der Mikroskop-Spitze mit den Elektronen der Atomhülle abgetastet.

Mit der Erfindung von Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskop begann eine neue Ära der Erforschung und der Strukturierung im kleinsten Maßstab. Mit der feinen Spitze dieser Mikroskope ließen sich nicht nur die Oberflächen abtasten, sondern auch einzelne Atome gezielt verschieben. Den Startschuss hierfür gab der US-amerikanische Nanopionier Don Eigler, als er 1989 den Schriftzug „IBM“ aus 35 Xenonatomen auf einer gekühlten Nickelunterlage arrangierte. Auf diese Weise wurden nicht nur ganz neue Einsichten in die Wechselwirkung zwischen einzelnen Atomen möglich. Es inspirierte einen neuen, sogenannten Bottom-up-Ansatz, für einen quasi LEGO-artigen Aufbau von Strukturen. 2016 wurde der Chemie-Nobelpreis an drei Nanowissenschaftler vergeben, die gezeigt hatten, dass man aus Molekülen winzige Scharniere, Propeller, Getriebe und andere Nanomaschinen herstellen kann. Bei ihrer Variante des Bottom-up-Ansatzes ließen sie sich von der Natur

Rasterkraftmikroskop

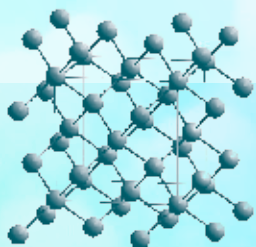
Das Rasterkraftmikroskop arbeitet nach einem etwas anderen Messprinzip. Auch hier gibt es eine Sonde, deren Spitze möglichst nur aus einem Atom besteht. Die Sonde ist an einem flexiblen Federbalken befestigt, der in periodische Schwingungen mit fester Frequenz versetzt wird. Diese schwingende Spitze wird nun zeilenweise über die Probe geführt, wobei die Spitze die Probe gerade eben nicht berührt. Verschiedene Kräfte zwischen der Spitze und einer Probenoberfläche können – je nach Ursache der Kraft – anziehende oder abstoßende Wirkung auf die Spitze haben. Sie sind auf jeden Fall sehr stark vom Abstand zwischen Spitze und Probe abhängig. Diese Kräfte vergrößern oder verkleinern die Schwingungsfrequenz des Federbalkens, was mithilfe eines von seiner Rückseite reflektierten Laserstrahls sehr präzise vermessen werden kann. Auf diese Weise ergibt sich ebenfalls ein Abbild der Probenoberfläche mit praktisch atomarer Auflösung. Der Vorteil gegenüber der Rastertunnelmikroskopie: Auch Proben, die nicht elektrisch leitend sind, können untersucht werden.

(Grafik: ius nach Twisp)

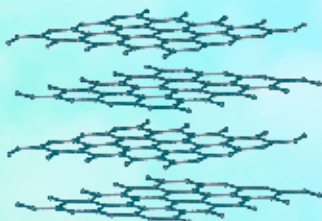




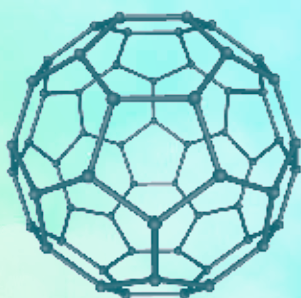
A



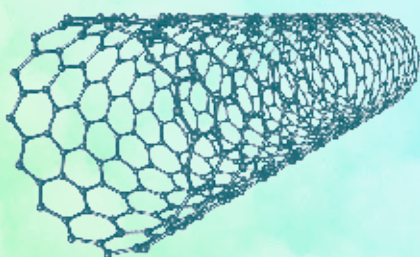
B



C



D



◀ Einige der Strukturformen, die Kohlenstoff annehmen kann: A) Diamant, B) Graphit, C) Fullere, die bei der Herstellung von organischen Solarzellen Verwendung finden und D) Nanoröhrchen. (Grafik: Uni Konstanz | Michael Ströck, CC BY-SA 3.0)

in der Schmuckschatulle und als Geldanlage begehrt, sondern auch wegen seiner besonderen Härte, die auf der besonders stabilen Kristallstruktur beruht. Graphit hingegen – mit schichtartigem kristallinen Aufbau – lässt weichen Materialabtrag beim Reiben über eine Oberfläche zu, was im Bleistift ausgenutzt wird. Seit den 1970er Jahren entdeckte man darüber hinaus einen wahren Zoo von Nanoobjekten aus Kohlenstoff: Zunächst wurden sogenannte Fullere bekannt, fußballförmige Riesenmoleküle. Die zu Beginn der 1990er Jahre entdeckten Kohlenstoffnanoröhrchen zeichnen sich durch die besondere Kombination von mechanischer Festigkeit, hoher Strombelastbarkeit und extrem guter Wärmeleitfähigkeit aus. Ihre elektronischen Eigenschaften sind außerdem etwa durch Verdrillung einstellbar: Sie können – je nach genauer Struktur – halbleitend oder leitend sein, stark gekühlt sogar supraleitend. Sie lassen sich in verschiedenen Formen herstellen: Der Durchmesser variiert zwischen wenigen bis einigen zehn Nanometern, sie können bis zu einem halben Meter lang werden. All das macht sie zu interessanten Bausteinen für elektronische Schaltungen, Speichermedien oder Sensoren.

2004 machte der Physiker André Geim Furore, als er an der Universität Manchester gemeinsam mit einem Kollegen durch vorsichtiges Abheben eines Klebestreifens von Graphit das neue Material Graphen erzeugte – eine einzelne Atomlage aus Kohlenstoffatomen in bienenwabenhörmiger Anordnung. Damit ist es das dünnste bekannte Material. Graphen (mit langem „e“ am Ende gesprochen) ist mechanisch extrem stabil, dennoch biegsam und leitet Strom sehr gut. Dadurch könnte es zu einem Baustein für biegsame Elektronik werden. Die weitere Erforschung und Nutzbarmachung von Graphen wird durch zahlreiche Förderinitiativen von Bund und Europäischer Union umfangreich gefördert. Mittlerweile werden auch andere Materialien in ihren zweidimensionalen Varianten erforscht, wie zum Beispiel das zweidimensionale Silizium, „Silicen“.

Fehlt im Kohlenstoff-Zoo noch die eindimensionale Variante: Carbin. Vorhergesagt vor 130 Jahren gelang die Herstellung in nennenswertem Maßstab zuerst 2016 an der Universität Wien – als Aneinanderkettung von 6000 Kohlenstoffatomen in der schützenden Umgebung eines Nanoröhrchens. Carbin soll noch stabiler als Diamant oder Kohlenstoffnanoröhrchen sein. Es lässt die Forscherinnen und Forscher von diversen Anwendungen träumen.

Besonders spannend sind optische Metamaterialien, deren Entwicklung seit den

inspirieren, die für nahezu jede Aufgabe eine passende biomolekulare Maschine hervorgebracht hat.

„Nano“ bedeutet aber nicht einfach nur immer kleiner. Bei kleinen Abständen tauchen nämlich neue physikalische Effekte auf, wie es der quantenmechanische Tunneleffekt beim Rastertunnelmikroskop gezeigt hat. Außerdem gilt: Je kleiner Objekte werden, desto größer ist ihre Oberfläche im Vergleich zum Volumen – und damit wird die Form auf atomarer Ebene immer wichtiger für die Eigenschaften. Werden Materialien zum Beispiel sehr dünn, dann können elastische Stoffe plötzlich sehr steif werden, magnetische Stoffe unmagnetisch oder umgekehrt, manche Leiter werden zu Isolatoren. Eine treffliche Spielwiese für die Erforschung und Nutzbarmachung solcher Effekte ist Kohlenstoff. Dieses chemische Element kommt in vielfältigen Modifikationen vor: Als Diamant ist er nicht nur

► Fulleren in kristalliner Form. Die in Fußballform angeordneten Moleküle aus Kohlenstoffatomen werden für eine Verwendung in Medizin, Elektrotechnik und Maschinenbau erforscht. (Bild: Jochen Gschnaller, CC BY-SA 3.0)



Neutronenstreuung

Mit der Streuung von Neutronen können Forscherinnen und Forscher die atomare Struktur und die magnetischen Eigenschaften von Materialien untersuchen, ohne sie zu zerstören. Denn Neutronen sind vergleichsweise klein und treten besonders mit leichten Elementen wie Wasserstoff in Wechselwirkung. Das macht sie zu einem idealen Instrument für die Untersuchung biologischer Strukturen wie Proteinen. Weil sie elektrisch neutral sind, reagieren Neutronen – anders als Licht – nicht mit den Elektronen der Atomhülle, sondern mit dem Atomkern.

Sie besitzen ein magnetisches Moment, verhalten sich also wie winzige Magnete und sind deshalb auch sensibel für die magnetischen Eigenschaften der Materialien. Eine der weltweit leistungsfähigsten Neutronenquellen ist die Forschungs-Neutronenquelle Heinz-Maier-Leibnitz (FRM II) in Garching bei München. Dort werden die Neutronen in einem Forschungsreaktor erzeugt.



▲ Blick in die Experimentierhalle des FRM II in Garching. Die um den eigentlichen Forschungsreaktor angelegte Halle verfügt über rund 30 wissenschaftliche Instrumente, die über Strahlrohre mit Neutronen versorgt werden. Rund 1000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Jahr treiben hier ihre Forschung voran. (Bild: Bernhard Ludewig)



▲ Von Harry Potter inspiriert, entwickelten Forscher der Universität von Rochester eine neue Art von Tarnumhang. Sie setzten nicht auf teure digitale Metamaterialien, sondern einfach auf vier Linsen, von denen jeweils zwei die gleiche Brennweite haben. Entscheidend ist ihre Anordnung: Das Licht wird von der ersten Linse auf einen Punkt fokussiert, dann von der zweiten mit der anderen Brennweite. Der Vorgang wird vom zweiten Linsenpaar wiederholt. Dadurch wird das Licht so umgelenkt, dass ein Gegenstand für den Betrachter, der durch den Linsenaufbau schaut, unsichtbar erscheint. (Bild: J. Adam Fenster/University of Rochester)

1990er Jahren maßgeblich von dem britischen Physiker John Pendry vorangetrieben wurde. Mit ihnen können optische Effekte erzielt werden, die in der Natur normalerweise nicht vorkommen, insbesondere ein negativer Brechungsindex. Dies ermöglicht eine wesentlich flexiblere Lenkung von Licht, als sie etwa mit Glasfasern möglich wäre. Deshalb sind Metamaterialien auch bekannt geworden als der Stoff, aus dem Tarnmäntel oder Tarnkap-

pen konstruiert werden können. Diese gibt es tatsächlich schon – allerdings nur für spezielle Anwendungen. Sie bestehen aus der regelmäßigen Anordnung von elektromagnetisch wirksamen Elementen wie etwa kleinen Spulen. Lichtwellen, die auf diese Strukturen treffen, können so um Gegenstände herumgelenkt werden. Ein Betrachter sieht, obwohl er direkt auf den Gegenstand schaut, lediglich das Bild des Hintergrundes, ohne zu ahnen, dass der Gegenstand dazwi-



▲ Photonische Kristalle zwingen nicht nur Licht in Industrie und Forschung auf die richtige Bahn, sondern kommen auch in der Natur vor. So sorgen ihre charakteristischen Strukturen etwa beim Blauen Morphofalter dafür, dass seine Flügel in schillernden Farben leuchten. (Bild: Bilboq, CCO)

schen steht. Ähnliches gelingt auch mit einer einfachen Linsenanordnung, bei der wie bei Harry Potter Gegenstände scheinbar hinter dem Linsenaufbau unsichtbar werden können.

Ob man also über ein Sonnenblumenfeld oder in den Himmel schaut, das Telefon oder den Computer benutzt – unsere Welt ist voller Strukturen und Symmetrien, die noch viel Raum für zukünftige Forschung lassen.

2017 highlights der physik

Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2017: Struktur & Symmetrie“ (Münster, 18. – 23.9.2017).
Infos: www.physik-highlights.de

Veranstalter



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Deutsche Physikalische Gesellschaft



Partner



Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH



Förderer



Medienpartner

