

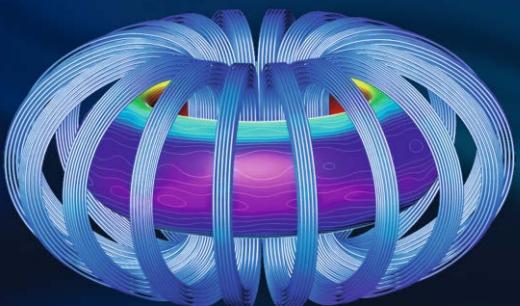


Benjamin Bahr  
Jörg Resag  
Kristin Riebe

# Faszinierende Physik

Ein bebilderter Streifzug  
vom Universum  
bis in die Welt der Elementarteilchen

2. Auflage



SACHBUCH

 Springer Spektrum

---

# Faszinierende Physik

---

Benjamin Bahr · Jörg Resag · Kristin Riebe

# Faszinierende Physik

Ein bebilderter Streifzug vom Universum  
bis in die Welt der Elementarteilchen

2. Auflage



**Springer** Spektrum

**Dr. Benjamin Bahr**

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik  
Am Mühlenberg 1  
14476 Golm  
[bbahr@aci.mpg.de](mailto:bbahr@aci.mpg.de)

**Dr. Jörg Resag**

Johannisburger Str. 9  
51373 Leverkusen  
[www.joerg-resag.de](http://www.joerg-resag.de)

**Dr. Kristin Riebe**

Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam  
An der Sternwarte 16  
14482 Potsdam  
[kristin.riebe@mk-star.de](mailto:kristin.riebe@mk-star.de)

ISBN 978-3-642-37811-9

ISBN 978-3-642-37812-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-37812-6

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnetet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

*Planung und Lektorat: Dr. Vera Spillner, Bianca Alton*

*Redaktion: Bernhard Gerl*

*Grafiken: Autoren*

*Satz: Autorensatz, auf der Grundlage der Vorlage von Glaeser/Polthier*

*Einbandabbildung: Collage aus folgenden Bildern:*

*Katze: Sienna Morris, [www.fleetingstates.com](http://www.fleetingstates.com);*

*Supernova-Überrest Cassiopeia A (links oben): NASA, ESA, K. France (University of Colorado, Boulder), P. Challis und R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics);*

*Plasma im Tokamakreaktor (Mitte rechts): U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory;*

*Flüssigkristall (rechts unten): Oleg D. Lavrentovich, Kent State University*

*Einbandentwurf: deblik, Berlin*

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-spektrum.de](http://www.springer-spektrum.de)

# Einleitung

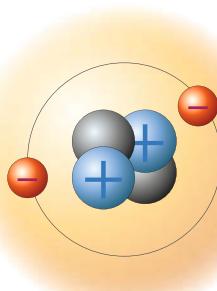
Das vorliegende Buch „Faszinierende Physik“ ist ein Streifzug quer durch die moderne Physik und zugleich eine bebilderte Reise durch die gelösten und ungelösten Rätsel unseres Universums. Sie können das Buch auf einer beliebigen Doppelseite aufschlagen und finden dort ein bestimmtes Thema in sich abgeschlossen dargestellt und mit vielen Bildern illustriert. Nach Belieben können Sie in dem Buch blättern bis Sie auf etwas stoßen, das Sie besonders interessiert und über das Sie vielleicht schon immer Näheres erfahren wollten.

Sollten Sie dabei auf noch unbekannte Begriffe treffen, so finden Sie in vielen Fällen im unteren Seitenbereich nützliche Hinweise auf andere Buchabschnitte, in denen diese Begriffe näher erklärt werden, sowie weiterführende Literatur und Internet-Links zu dem jeweiligen Thema. Sie können die einzelnen Themengebiete aber auch nacheinander lesen – sie sind logisch so angeordnet, dass grundlegende Begriffe möglichst früh erklärt werden.

Als Vera Spillner vom Springer Spektrum Verlag mit der Idee für das vorliegende Buch auf uns, das Autorenteam, zukam, waren wir begeistert. Eine ähnliche Idee war im Bereich der Mathematik bereits umge-



setzt worden (Bilder der Mathematik von Georg Glaeser und Konrad Polthier, Spektrum Akademischer Verlag 2010), und es war eindrucksvoll zu sehen, wie ansprechend sich mathematische Themen grafisch und inhaltlich darstellen lassen. So etwas wollten wir auch für die Physik erreichen!



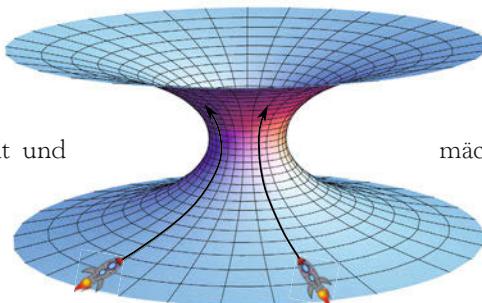
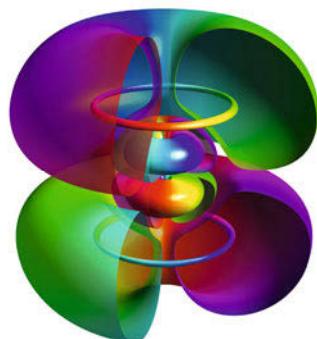
Beim Zusammenstellen der Themen für das Buch wurde uns wieder einmal bewusst, welch weites Feld sich die moderne Physik seit dem Beginn der Neuzeit erobern konnte. Ende des neunzehnten Jahrhunderts hatte man die Inhalte der heute als „klassische Physik“ bekannten Themen zusammen.

Manchem schien sogar die Physik insgesamt ein weitgehend abgeschlossenes Fachgebiet zu sein. So erhielt der junge Max Planck im Jahr 1874 vom Münchner Physikprofessor Philipp von Jolly die Auskunft, dass in der Physik schon fast alles erforscht sei und nur noch einige unbedeutende Lücken zu schließen seien. Hätte er Recht gehabt, hätte dieses Buch deutlich weniger spannende Themengebiete präsentieren können. Doch selten hatte man sich unter Physikern mehr geirrt als damals, und glücklicherweise ließ sich auch Max Planck dadurch nicht von einem Physikstudium abschrecken.



Das zwanzigste Jahrhundert brachte eine Fülle physikalischer Entdeckungen, von denen man im neunzehnten Jahrhundert kaum zu träumen gewagt hatte. Die atomare Struktur der Materie wurde experimentell nachgewiesen, und schrittweise wurde der Aufbau der Atome entschlüsselt. Albert Einstein revolutionierte mit seiner Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie in den Jahren 1905 und 1916 unser Verständnis von Raum und Zeit und vereinte so die Mechanik mit der Elektrodynamik und der Gravitation (siehe das Kapitel „Relativitätstheorie“).

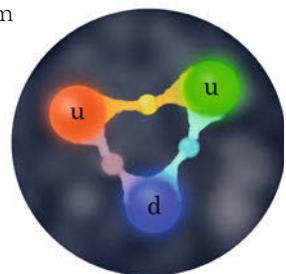
Die wohl folgenschwerste Umwälzung erfuhr unser Weltbild aber durch die Quantenmechanik, die um das Jahr 1925 von Physikern wie Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg und vielen anderen entwickelt wurde. Nur mit ihrer Hilfe ließ sich der innere Aufbau der Atome verstehen. Doch dieser Erfolg hatte seinen Preis: Teilchen besaßen nun keine wohldefinierte Teilchenbahn mehr, sondern ihre Bewegung im Raum musste durch Wahrscheinlichkeitswellen beschrieben werden. Der Zufall spielte plötzlich in der Physik eine grundlegende Rolle, und alle Versuche, ihn zu eliminieren, schlügen bis zum heutigen Tag fehl. Wie zum Trotz soll Albert Einstein unglaublich „Gott würfelt nicht“ gesagt haben. Bis heute herrscht unter den Physikern keine Einigkeit über die korrekte Interpretation der Quantenmechanik und die Frage, was sie für unser Verständnis von einer objektiven Realität zu bedeuten hat.



Zugleich hat die Quantenmechanik bisher jeden noch so ausgeklügelten experimentellen Test mit Bravour bestanden, sodass für die Praxis der pragmatische Leitspruch „shut up and calculate (sei still und rechne)“ völlig ausreichend ist. Mehr dazu im Kapitel „Atome und Quantenmechanik“.

In der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts drang man dann mit immer mächtigeren Teilchenbeschleunigern zunehmend tiefer in die Struktur der Materie vor. Waren aus den Untersuchungen des Atoms zunächst nur drei subatomare Teilchen bekannt

(Proton, Neutron und Elektron), so entdeckte man im Lauf der Zeit einen ganzen Zoo instabiler Teilchen. Man konnte sie beispielsweise bei der Kollision zweier hochenergetischer Protonen aus deren mitgebrachter Bewegungsenergie erzeugen, woraufhin sie nur Sekundenbruchteile später wieder zerfielen. Warum gab es all diese Teilchen und welche Kräfte ließen sie so schnell wieder zerfallen? Um das Jahr 1967 herum gelang es Physikern wie Steven Weinberg, Abdus Salam, Sheldon Lee Glashow, Peter Higgs und vielen anderen, diese Fragen im Rahmen des sogenannten Standardmodells umfassend zu beantworten, das uns im Kapitel „Welt der Elementarteilchen“ begegnen wird.

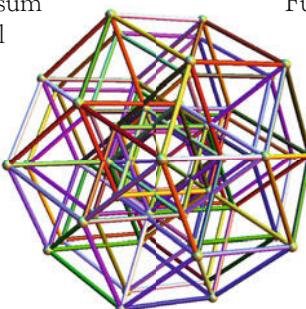


Doch auch das Standardmodell kann nicht alle offenen Fragen beantworten, die sich uns heute in der Physik stellen. Warum haben die Teilchenmassen genau die Werte, die wir im Experiment vorfinden? Wie lassen sich Gravitation und Quantenmechanik, die sich heute



noch weitgehend unversöhnlich gegenüberstehen, mit einander vereinen? Woraus besteht die dunkle Materie, die unser Universum durchdringt, und noch mysteriöser: woraus besteht die sogenannte dunkle Energie, die das Universum immer schneller auseinanderzutreiben scheint? Ist unser Universum womöglich nur ein kleiner Teil eines viel größeren Multiversums? Hier befinden wir uns an der vordersten Front der Forschung, und wir werden uns die entsprechenden Ideen wie Supersymmetrie, Stringtheorie oder Loop-Quantengravitation im Kapitel „Grenzen des Wissens“ genauer ansehen.

Neben den bisher genannten Themengebieten gibt es viele weitere Teilgebiete der Physik, die nicht so eng mit der Ergründung der Naturgesetze als solchen verbunden sind, sondern die eher einen bestimmten Bereich der Natur zum Gegenstand haben. Wir haben vier dieser Bereiche in unser Buch aufgenommen: die Festkörperphysik, welche die physikalischen Eigenschaften von Kristallen und anderen festen Körpern untersucht, die Geophysik, die sich mit dem Aufbau unserer Erde und den darin ablaufenden physikalischen Vorgängen (beispielsweise der Platten tektonik) beschäftigt, Astronomie und Astrophysik, die sich mit dem Leben und Sterben von Planeten, Sternen und ganzen Galaxien befassen und die mit ihren wunderschönen Bildern natürlich nicht fehlen durften,



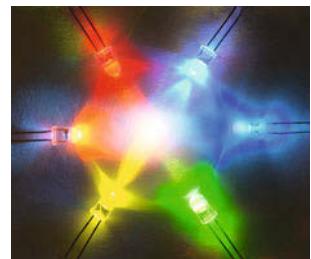
sowie die Kosmologie, die unser gesamtes Universum und seine Entwicklung im Blick hat und die gerade in den letzten Jahren eine Fülle neuer Erkenntnisse über unsere Welt hervorgebracht hat. Sicher ist damit die Liste interessanter physikalischer Themengebiete noch lange nicht komplett, aber wir hoffen, dass bei den 134 Themen in diesem Buch für jeden Leser etwas Interessantes dabei ist und dass dieses Buch viele Freunde finden wird.

Die Grafiken in diesem Buch stammen aus unterschiedlichen Quellen. Viele wurden von uns, dem Autorenteam und dabei insbesondere von Kristin Riebe, selbst erstellt. Viele andere wurden von verschiedenen Künstlern, Fotografen sowie Forschern und ihren Instituten zur Verfügung gestellt (siehe den Bildnachweis am Ende des Buches sowie die Angaben im Fußbereich der einzelnen Buchabschnitte) – ihnen allen gilt unser Dank.

Ganz besonders möchten wir uns bei Vera Spillner von Springer Spektrum bedanken, die das Autorenteam zusammengeführt hat und uns jederzeit während der Erstellung des Buchmanuskripts mit neuen Anregungen und konstruktiver Kritik zur Seite stand – ohne sie hätte es dieses Buch so nicht gegeben. Unser Dank gilt auch Bianca Alton, die das Buch verlagsseitig von Beginn an bis zum Druck betreut hat. Nicht zuletzt möchten wir uns bei unseren Freunden und Familien für ihre Geduld und ihr Verständnis während der zeitintensiven Erstellungsphase dieses Buches bedanken.

Benjamin Bahr  
Jörg Resag  
Kristin Riebe

Mai 2013



# Inhalt

Einleitung.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VIII



1 Astronomie und Astrophysik.....	3
Die Sonne und ihr Magnetfeld – Sonnenflecken und Flares.....	4
Die Entstehung des Sonnensystems – Akkretionsscheiben und Protoplaneten .....	6
Die Entstehung des Mondes – Wie der Einschlag des Planeten Theias den Mond erschuf.....	8
Die Kepler'schen Gesetze – Wie sich die Planeten bewegen.....	10
Satelliten mit geosynchronen Orbits – Kunstvolle Schleifen am Himmel .....	12
Der Rand des Sonnensystems – Wo genau zieht man die Grenze? .....	14
Extrasolare Planeten – Die Suche nach Planeten jenseits des Sonnensystems .....	16
Der Sternenhimmel – Sterne, Planeten und die Milchstraße.....	18



Die Geburt von Sternen – Wie kontrahierende Gaswolken zu Sternen werden.....	20
Spektralklassen – Welche Farbe haben Sterne? .....	22
Das Hertzsprung-Russell-Diagramm – Temperatur, Leuchtkraft und Lebensweg der Sterne .....	24
Cepheiden – Sterne mit Herzschlag .....	26
Planetarische Nebel – Das Ende gewöhnlicher Sterne .....	28
Weisse Zwerge – Ausgebrannte gewöhnliche Sterne .....	30
Thermonukleare Supernovae – Wenn weiße Zwerge zu nuklearen Bomben werden .....	32
Kollaps-Supernovae – Das Ende massereicher Sterne .....	34

Neutronensterne – Ausgebrannte massereiche Sterne .....	36
Monstersterne und Hypernovae – Das kurze Leben und explosive Ende sehr massereicher Sterne .....	38
Standardkerzen – Leuchttürme im All .....	40
Supermassive schwarze Löcher – Schwerkraftmonster in den Zentren der Galaxien.....	42
Aktive Galaxien – Intergalaktische magnetische Energieschleudern.....	44
Galaxientypen – Die Vielfalt der Galaxien .....	46
Das Schicksal der Milchstraße – Wenn Milchstraße und Andromedagalaxie sich treffen .....	48
Verschmelzende Galaxien – Kollision der Giganten .....	50

## 2 Elektromagnetismus und Licht.....53

Vektorfelder und Feldlinien – Richtungsweisende Hilfszeichnungen .....	54
Die elektromagnetische Wechselwirkung – Maxwells Gleichungen der elektromagnetischen Felder.....	56
Hertz'scher Dipol – Schwingen und streuen .....	58
Gewitter – Blitze, Elmsfeuer und Rote Kobolde .....	60



Farben – Wie bunt ist die Welt? .....	62
Lichtbrechung – Licht auf krummen Touren .....	64
Regenbogen – Ästhetische Lichtbrechung an Wassertropfen .....	66
Anisotrope Medien – Doppelt sehen ohne Alkohol .....	68
Optische Linsen – Abbildungen und Abbildungsfehler .....	70
Adaptive Optiken – Intelligente Spiegel .....	72
Luftspiegelungen – Fliegende Holländer, Fata Morganas und Phantomsinseln .....	74
Tarnvorrichtungen – Metamaterialien und der Traum von der Unsichtbarkeit.....	76

## 3 Mechanik und Thermodynamik .....79

Newton's Gesetze der Mechanik – Warum bewegt sich ein Körper?.....	80
Das Foucault'sche Pendel – Der Nachweis der Erdrotation.....	82
Kräftefreie Kreisel – Frei rotierende Körper in der Schwerelosigkeit.....	84
Kreisel mit äußerem Drehmoment – Präzession und Nutation .....	86
Newton's Gravitationsgesetz – Von fallenden Äpfeln und kreisenden Planeten.....	88



Kosmische Geschwindigkeiten – Aufstieg und Absturz im Schwerefeld der Himmelskörper.....	90
Die Gezeiten – Wie der Mond Ebbe und Flut hervorbringt .....	92
Das archimedische Prinzip – Oder warum Schiffe im Bermuda-Dreieck untergehen können.....	94
Die Physik der Strömungen – Wirbel und Turbulenzen.....	96
Warum fliegt ein Flugzeug? – Bernoulli oder Newton? .....	98
Gewöhnliche Wasserwellen – ... und ihre besonderen physikalischen Eigenschaften .....	100
Besondere Wasserwellen – Tsunamis, Solitonen, Monsterwellen .....	102
Der Lotuseffekt – Tauziehen zwischen Kohäsion und Adhäsion.....	104
Chaotische Bewegungen – Deterministisch, aber unvorhersehbar .....	106
Schwingende Saiten und Platten – Kann man Töne sehen? .....	108
Resonanz – Wenn man beim Schwingen die richtige Note trifft.....	110
Scheinkräfte – Wenn wir Kräfte spüren, ohne eine Ursache zu finden .....	112
Granulare Materie – Flüssig und fest zugleich.....	114
Brown'sche Bewegungen – Das unvorhersagbare Verhalten von Staubkörnern, Pollen und Börsenkursen....	116
Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik – Was der Zeit eine Richtung gibt .....	118
Negative absolute Temperaturen – Heißer als heiß.....	120



<b>4 Relativitätstheorie.....</b>	<b>123</b>
Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie – Licht kann man nicht überholen .....	124
Terrellrotation – Von hinten durch die Brust ins Auge .....	126
$E=mc^2$ – Masse ist eingesperzte Energie .....	128
Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie – Einsteins Theorie der Gravitation .....	130

Die Raumzeit nicht-rotierender schwarzer Löcher – Im Sog von Raum und Zeit.....	132
Die Raumzeit rotierender schwarzer Löcher – Im Strudel von Raum und Zeit.....	134
Der Warp-Antrieb – Wie man schneller als das Licht sein könnte.....	136
Wurmlöcher – Abkürzungen durch Raum und Zeit .....	138
GPS – Ortsbestimmung durch Satellitensignale.....	140

## 5 Kosmologie..... 143

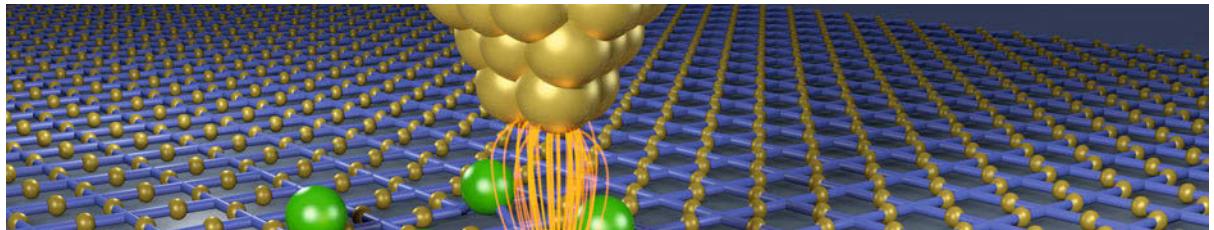
Ein tiefer Blick ins Universum – Wenn das Hubble-Teleskop in die Vergangenheit schaut.....	144
Das expandierende Universum – Warum ist der Nachthimmel dunkel?.....	146
Die kosmische Hintergrundstrahlung – Mikrowellen aus der Frühzeit des Universums.....	148
Dunkle Materie – Das Universum ist schwerer als es aussieht.....	150
Beschleunigte Expansion und dunkle Energie – Die fehlende Materieform im Universum .....	152
UrknaLL und inflationäre Expansion – Warum der Raum flach und der Hintergrund überall gleich kalt ist... <td>154</td>	154
Die Entstehung der Materie – Was ab $10^{-10}$ Sekunden nach dem UrknaLL geschah.....	156



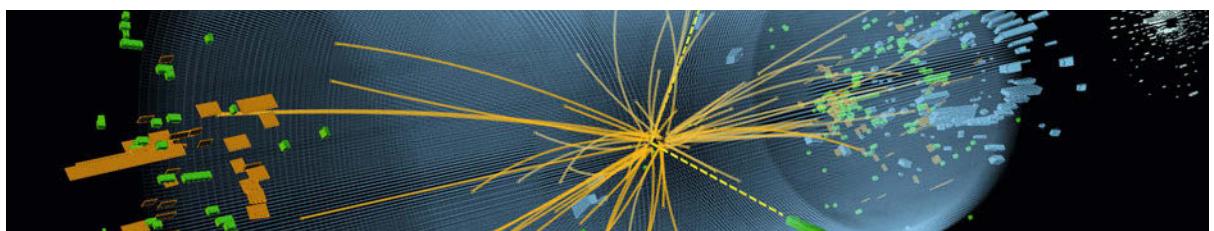
Kosmische Horizonte – Oder wie weit wir durch Raum und Zeit sehen können.....	158
Strukturen im Kosmos – Ein Netzwerk aus Materie .....	160
Entstehung kosmischer Strukturen – Die Macht der Gravitation .....	162
Gravitationslinsen – Wie man mit scheinbar verzerrten Galaxien das Universum wiegt .....	164
Gravitationswellen – Rhythmishe Verzerrungen von Raum und Zeit.....	166
Gravitationswellendetektoren – Die Vermessung der schwingenden Raumzeit .....	168

## 6 Atome und Quantenmechanik ..... 171

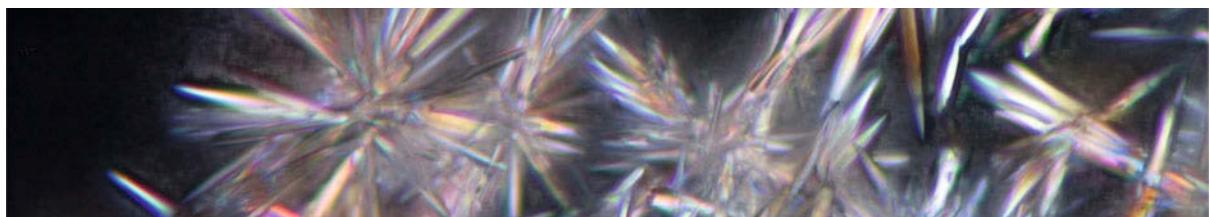
Das Bohr'sche Atommodell – Wie kann man sich ein Atom vorstellen?.....	172
Atomkerne – Seit hundert Jahren bekannt und doch nicht im Ganzen verstanden.....	174
Radioaktiver Zerfall – Atomkerne aus dem Gleichgewicht .....	176
Welle-Teilchen-Dualismus – Teilchen bewegen sich in Wellen .....	178
Wellenfunktion – Verschmierte Teilchen .....	180
Der Tunneleffekt – Teilchen ohne Aufenthaltserlaubnis .....	182
Der Franck-Hertz-Versuch – Energiesprünge in Atomen .....	184



Der Spin eines Teilchens – Quantisiertes Kreiseln .....	186
Das Pauli-Prinzip – Warum Elektronen sich gegenseitig meiden.....	188
EPR-Experiment und Bell'sche Ungleichung – Ist die Quantenmechanik unvollständig? .....	190
Die Interpretation der Quantenmechanik – Schrödingers Katze und Everett's viele Welten .....	192
Plasma – Der vierte Aggregatzustand .....	194
Fusionsreaktoren – Hightech-Energie aus dem Sonnenfeuer.....	196
Bose-Einstein-Kondensate – Atome im quantenmechanischen Gleichschritt .....	198
Laserkühlung – Warum Gase kälter werden können, wenn man sie mit Licht bestrahlt .....	200
Supraleitung – Widerstand ist zwecklos .....	202
Supraflüssigkeiten – Nasser als nass .....	204
Quantenvakuum – Wie stark drückt das Nichts?.....	206
Elektronenmikroskopie – Mikroskope für den Nanometerbereich .....	208
Rastertunnelmikroskopie – Wie man einzelne Atome sichtbar macht.....	210
Nanowelten – Ganz unten ist eine Menge Platz.....	212
Laser – Lichtteilchen im Gleichschritt.....	214
Quantencomputer – Quantenbits: Ja, Nein und Vielleicht .....	216
<b>7 Welt der Elementarteilchen .....</b>	<b>219</b>
Das Standardmodell der Teilchenphysik – Quarks, Leptonen und drei Wechselwirkungen.....	220
Feynman-Diagramme – Die Sprache der relativistischen Quantenfeldtheorie.....	222
Die starke Wechselwirkung – Die Kraft, die Quarks verbindet .....	224
Die schwache Wechselwirkung – Teilchenzerfälle, W-, Z- und Higgs-Bosonen.....	226



Neutrinos – Flüchtige Geisterteilchen .....	228
Antimaterie – Spiegelbild und Vernichter der Materie .....	230
Quark-Gluon-Plasma – Wenn Protonen und Neutronen schmelzen .....	232
Die kosmische Höhenstrahlung – Energiereicher als im weltgrößten Beschleuniger.....	234
Der Large Hadron Collider (LHC) – Der mächtigste Teilchenbeschleuniger, der je gebaut wurde.....	236
Die Entdeckung des Higgs-Teilchens – Ein Meilenstein der Teilchenphysik .....	238



<b>8 Kristalle und andere feste Stoffe.....</b>	<b>241</b>
Plasmonen – Brillantes Quantenleuchten .....	242
Ferromagnetismus – Elementarmagnete: gemeinsam sind sie stark.....	244
Kristallgitter – Die vierzehn verschiedene Arten, den Raum periodisch zu füllen.....	246
Kristallisation – Vom Keim zum ausgewachsenen Kristall .....	248
Quasikristalle – Nicht periodisch und doch symmetrisch.....	250
Flüssigkristalle – Ordentlich nass .....	252
Elektronen in Halbleiterkristallen – Vom Isolator zum Leiter mit einer Prise Arsen .....	254
Halbleiterdioden – Wie man elektrische Einbahnstraßen baut .....	256
Leuchtdioden – Leuchtende Kristalle und biegsame Bildschirme .....	258



<b>9 Geophysik.....</b>	<b>261</b>
Der innere Aufbau der Erde – Eine Reise in die Unterwelt.....	262
Die Drift der Kontinente – Konvektionsströme und Plattentektonik.....	264
Erdbeben und seismische Wellen – Wenn Kontinentalplatten sich verhaken .....	266
Der Erdkern als Quelle des Erdmagnetfeldes – Der innere Geodynamo unserer Erde .....	268

---

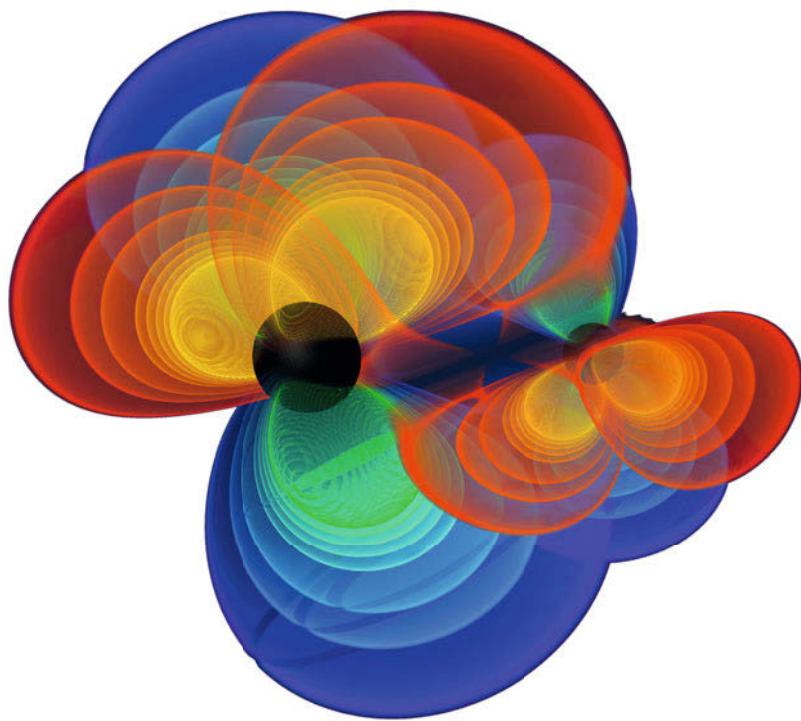
Erdmagnetfeld und Polarlichter – Wenn der Sonnenwind den Himmel zum Leuchten bringt .....	270
Eiszeiten und Milankovitch-Zyklen – Warum gibt es Eiszeiten?.....	272

## 10 Grenzen des Wissens ..... 275

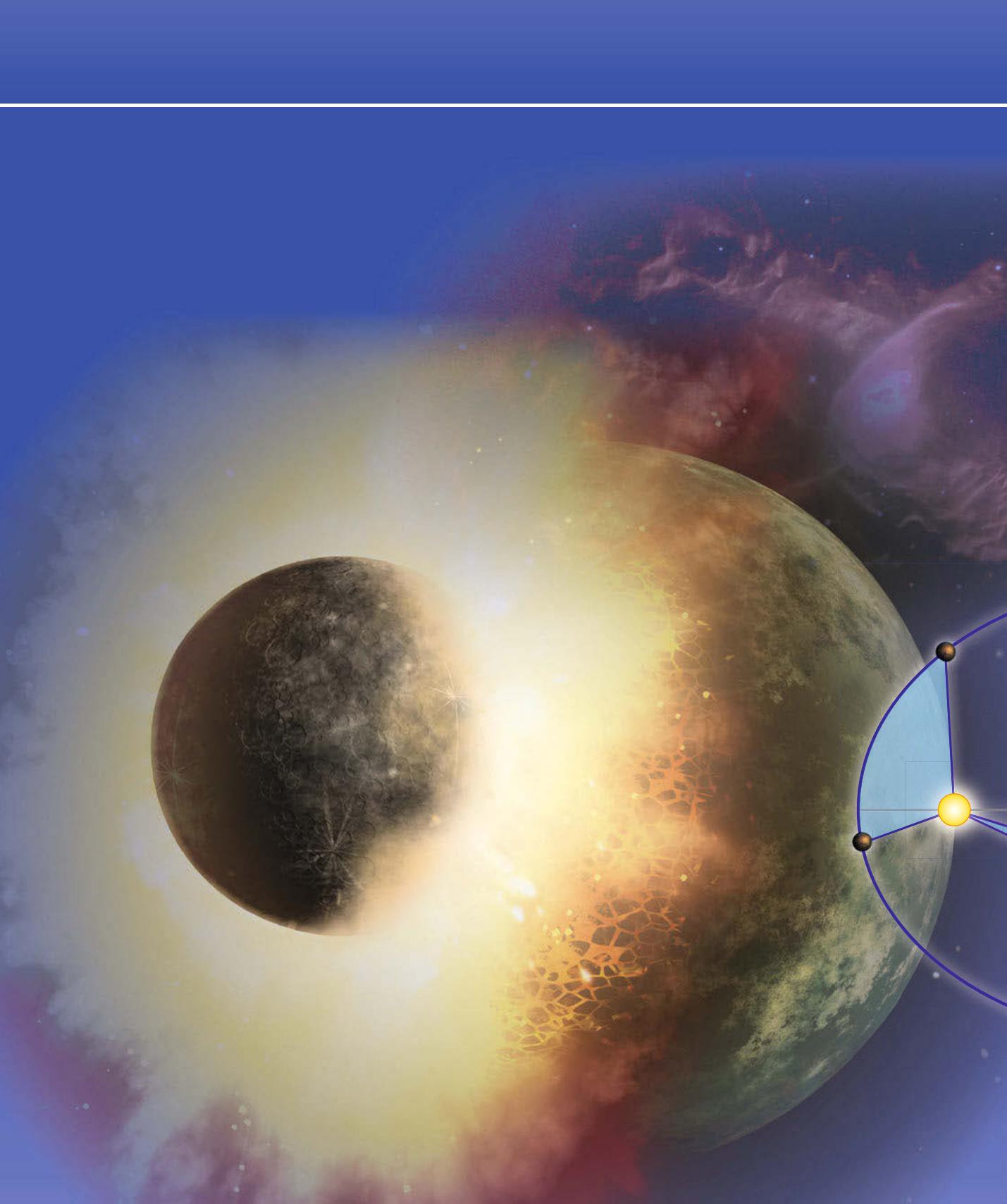
Supersymmetrie – Auf der Jagd nach den Superpartnern.....	276
Stringtheorie und M-Theorie – Auf der Suche nach der Weltformel.....	278
Verborgene Dimensionen – Wie viele Dimensionen hat der Raum? .....	280
Multiversum und anthropisches Prinzip – Hinter dem Horizont geht's weiter .....	282
Branenwelten – Die Stringtheorie enthält mehr als Strings .....	284
Entropie und Temperatur schwarzer Löcher – Schwarze Löcher sind nicht vollkommen schwarz.....	286
Das holografische Prinzip – Ist unsere Welt ein Hologramm? .....	288
Loop-Quantengravitation – Quanten der Raumzeit .....	290



Bildnachweis .....	292
Index.....	299



Kurz bevor sich zwei schwarze Löcher (schwarze Kugeln) vereinigen,  
senden sie hochfrequente Gravitationswellen aus.  
[Mehr dazu im Artikel „Gravitationswellen“ auf Seite 166.](#)



# 1 Astronomie und Astrophysik

Wie sind Sonne, Mond und Sterne entstanden? Was sind planetarische Nebel und wie groß sind Monstersterne? Diese Fragen können Physiker heute – nach Jahrhunderten der Erforschung des Sternenhimmels und der Naturgesetze – recht genau beantworten.

Der Sternenhimmel hat zu allen Zeiten eine große Faszination auf Menschen ausgeübt, und oft wurde er mythisch interpretiert – oder ganz praktisch als Navigationshilfe oder zur Bestimmung der Jahreszeiten genutzt. Mit der Erfindung des Fernrohrs vor rund 400 Jahren verstanden Forscher jedoch zunehmend besser, was sich hinter den Beobachtungen am Himmel verbarg: Sterne, wie unsere Sonne, erwiesen sich dabei als glühende Gaskugeln; Planeten hingegen als Himmelskörper, die – wie unsere Erde – ihre Sonne auf elliptischen Bahnen umrunden. Mit der Zeit entdeckte der Mensch, dass auch Sterne nicht ewig leuchten: Sie werden in Gas- und Staubwolken geboren, leben zwischen einigen Millionen und vielen Milliarden Jahre lang und beschließen ihr Leben mit einem Aufflackern oder in einer Supernova-Explosion.

Mithilfe der Gleichungen der Physik begann der Mensch seine astronomische Umgebung zu begreifen – und heute blicken wir mithilfe großer Teleskope zunehmend weiter ins All hinaus, suchen nach extrasolaren Planeten, erforschen den Lebenszyklus naher und ferner Sterne und können sogar die Zukunft unserer Milchstraße und des Universums vorhersagen. Einige der spannendsten Fragen und Erkenntnisse aus der Astronomie und Astrophysik haben wir in diesem Abschnitt für Sie zusammengefasst.

# Die Sonne und ihr Magnetfeld

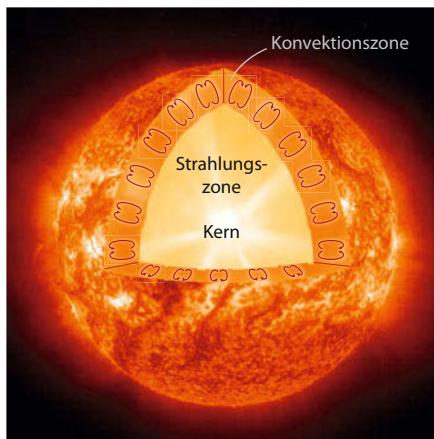
## Sonnenflecken und Flares

Unsere Sonne ist eine riesige Gaskugel aus rund 73,5 % Wasserstoff, 25 % Helium und 1,5 % sonstiger Elemente, in dem innersten Zentrum bei rund fünfzehn Millionen Kelvin das nukleare Feuer der Kernfusion brennt. Es dauert dabei tatsächlich mehrere Millionen Jahre, bis die im Inneren erzeugte Energie schließlich die rund hundert Erdradien weite Strecke bis zur Oberfläche der Sonne, der Photosphäre, zurückgelegt hat und von dort bei nur noch rund 5800 Kelvin in den Weltraum abgestrahlt wird.

Über der Photosphäre der Sonne liegt noch die Chromosphäre, deren rötliches Licht man manchmal bei einer totalen Sonnenfinsternis sehen kann, sowie weiter außen die sehr heiße, aber zugleich nur wenig dichte Korona, die sich ein bis zwei Sonnenradien in den Weltraum erstrecken kann und die bei einer Sonnenfinsternis als heller Strahlenkranz erscheint.

Das Wasserstoff-Helium-Gasmisch, aus dem die Sonne besteht, liegt in der Sonne in ionisierter Form als Plasma (↓) vor, sodass es elektrisch leitend ist. Ähnlich wie im flüssigen äußeren Erdkern entsteht daher auch in der Sonne durch den sogenannten *Dynamoeffekt* ein Magnetfeld, das analog zum Erdmagnetfeld (↓) meist annähernd eine Dipolstruktur ähnlich wie bei einem Stabmagneten aufweist. Während sich das Erdmagnetfeld in unregelmäßigen Abständen im Mittel ungefähr alle 250000 Jahre umpolt, geschieht dies bei der Sonne wesentlich schneller: ungefähr alle elf Jahre, so beispielsweise im Jahr 2000.

Während der Umpolungsphase werden Magnetfeldlinien (↓) ineinander verdrillt und Magnetflussschläuche ragen bogenförmig über die Photosphäre hinaus, sodass es zu starker Sonnenaktivität kommt – man spricht vom *Solaren Maximum*. Da die Magnetschläuche eng



links:  
Das Innere der  
Sonne

Foto der Sonnenkorona während der Sonnenfinsternis am 11. August 1999

Plasma → S. 194

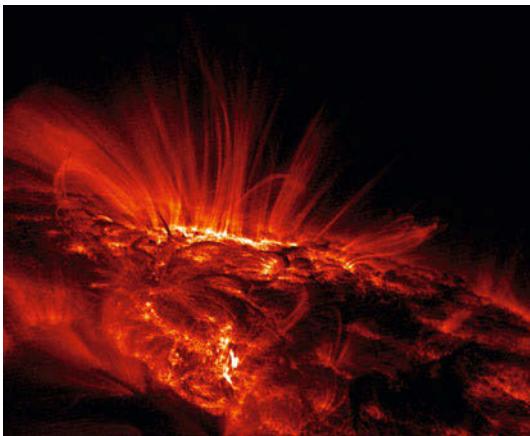
Der Erdkern als Quelle des Erdmagnetfeldes → S. 268

Vektorfelder und Feldlinien → S. 54

mit dem elektrisch leitenden Plasma verkoppelt sind, behindern sie an den Ein- und Austrittsstellen das Aufsteigen heißen Sonnenplasmas, sodass diese Stellen auf rund 4000 Kelvin abkühlen können und im Vergleich zur heißeren Umgebung im sichtbaren Licht als dunkle Sonnenflecken erscheinen. Außerdem kann Plasma in die bogenförmigen Magnetschläuche aufsteigen und bei deren Zerreißern in den Weltraum hinausgeschleudert werden – man spricht dann von *Sonneneruptio-*nen oder *Flares*.

Die Struktur der Magnetfelder in der Chromosphäre und Korona kann man gut auf den Bildern erkennen, die die Sonne im extrem ultravioletten Spektralbereich ihres Lichts zeigen, das von sehr heißem Plasma ausgesendet wird. Das Bild unten rechts stammt von der SOHO-Sonnenforschungssonde und zeigt die extrem ultraviolette Strahlung der Sonne an dem Tag, an dem dieser Artikel entstand (unter <http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/> kann man sich im Internet jederzeit die jeweils aktuellen SOHO-Bilder der Sonne ansehen).

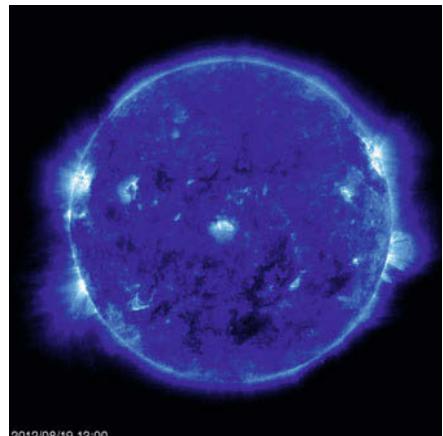
rechts:  
Die Sonne im extrem  
ultravioletten Spekt-  
ralbereich



links:  
UV-Aufnahme des  
Sonnenflecks AR  
9169 im September  
2000 nahe am Son-  
nenhorizont



UV-Aufnahme einer Sonneneruption im Juli 2002



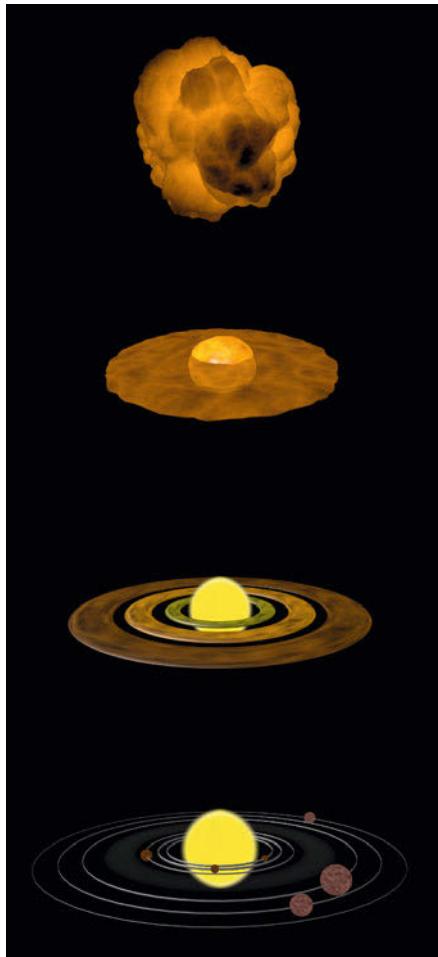
Erdmagnetfeld und Polarlichter → S. 270

SOHO (Solar & Heliospheric Observatory) *SOHO Home* <http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>



# Die Entstehung des Sonnensystems

## Akkretionsscheiben und Protoplaneten



Aus einer sich zusammenziehenden Gas- und Staubwolke wird ein Planetensystem.

Die Frage, wie die Planeten und Monde unseres Sonnensystems genau entstanden sind, ist nicht bis ins letzte Detail geklärt. Allerdings stimmen die verfügbaren Modelle zum Geburtsvorgang des Sonnensystems in vielen wichtigen Punkten überein, und zeichnen ein etwa zusammenhängendes Bild.

Demnach begann sich vor etwa 4,6 Milliarden Jahren eine Wolke aus Wasserstoff und Helium sowie interstellarem Staub aufgrund der Gravitation zu verdichten, möglicherweise verursacht durch Störungen, die nach einer nahen Supernovaexplosion ( $\downarrow$ ) in Form von Dichtewellen durch das interstellare Medium wanderten. Dabei zerfiel die Gas- und Staubwolke in viele kleinere Wolkenklumpen, die sich weiter zusammenzogen und zu Brutstätten vieler neuer Sterne werden sollten.

Dieses Zusammenziehen geschah aber nicht in alle Richtungen gleichmäßig: Da der Teil der Wolke, aus der unser Sonnensystem entstand, mit einer gewissen Geschwindigkeit um ihre eigene Achse rotierte, war die Kontraktion parallel zur Rotationsachse stärker als in der Ebene senkrecht dazu, denn in dieser Ebene wirkte die Fliehkraft (Scheinkräfte  $\downarrow$ ) der gegenseitigen Anziehung entgegen. So verdichtete sich die Wolke in Form eines rotierenden Pfannkuchens, auch *Akkretionsscheibe* genannt.

Im Zentrum war die Scheibe am dichtesten und zog sich dort unter dem Einfluss des eigenen Gewichtes immer weiter zusammen bis Dichte und Temperatur so groß wurden, dass der Wasserstoff zu Helium verschmolzen konnte – der Kernfusionsprozess zündete, und unsere Sonne entstand. Der Strahlungsdruck der bei der Fusion frei werdenden Strahlung wirkte dabei dem weiteren Kollaps der Sonne entgegen und stabilisierte sie. Außerdem pustete sie das Gas, das sich noch nicht verdichtet hatte, aus dem Inneren der Akkretionsscheibe hinaus.

Das übrige das Zentrum umkreisende Gas und der interstellare Staub hatten sich an einigen Stellen jedoch bereits so verdichtet, dass sie in der Akkretionsscheibe verblieben. Eine moderne Theorie der Sonnensystementstehung besagt, dass diese protoplanetare Materie durch gravitative Instabilitäten in Form von Spiralarmen die Sonne umkreiste, ähnlich wie die galaktischen Spiralarme das Zentrum der Milchstraße.

In diesen Spiralarmen verdichtete sich die Materie nun einerseits genauso wie im Zentrum der Scheibe: Dort, wo die Materie bereits ein wenig dichter war als anderswo, sorgte die Schwerkraft dafür, dass sich dieser Bereich schneller verdichtete. Andererseits begannen die Staubteilchen sich durch Verklumpung aneinander anzulagern und trugen so ebenfalls zur Bildung der einzelnen Planeten bei. Die Masse der entstehenden Himmelskörper war allerdings nicht groß genug, um einen Fusionsprozess zu starten.

Bei diesem Prozess spielte der Abstand zur Sonne eine entscheidende Rolle: Die Planeten, die in der Nähe der Sonne entstanden, bestanden fast ausschließlich aus Staubteilchen, weil das interstellare Gas durch den

In den ca. 7000 Lichtjahre entfernten „Bergen der Entstehung“ des W5 Nebels entstehen ständig neue Sterne und Planetensysteme.



Künstlerische Darstellung eines Planetensystems

Sonnenwind (siehe Artikel zum Rand des Sonnensystems ↓) bereits aus ihrer Umgebung gefegt worden war. Deswegen sind heute Merkur, Venus, Erde und Mars vergleichsweise kleine feste Gesteinsplaneten, während die äußeren Planeten wie Jupiter und Saturn zusätzlich noch einen Großteil des Wasserstoff- und Heliumgases einfangen konnten und zu Gasriesen wurden.

Der Teil der Materie, der nicht von den Planeten eingefangen wurde, verdichtete sich zu kleineren Objekten, wie zum Beispiel den Asteroiden im Asteroidengürtel, einem Band aus kleinen interplanetaren Objekten zwischen Mars und Jupiter. Einigen Theorien zufolge war es gerade die Nähe des Jupiters mit seinem gravitativen Einfluss, der verhinderte, dass sich diese Objekte zu einem Planeten verdichteten.

Trotz dieses relativ umfassenden Bildes gibt es noch immer viele ungeklärte Fragen zum genauen Entstehungsmechanismus des Sonnensystems, die auch gerade durch die Entdeckung immer neuer Exoplaneten (↓) in anderen Sternensystemen aufgeworfen werden.



## Die Entstehung des Mondes

### Wie der Einschlag des Planeten Theias den Mond erschuf

In unserem Sonnensystem besitzt nur die Erde einen vergleichsweise großen Mond, wenn man ihn in Relation zu seinem Planeten setzt: Der Monddurchmesser liegt bei rund 0,27 Erddurchmessern. Merkur und Venus haben dagegen gar keine Monde, der Mars besitzt zwei kleine Monde (Phobos und Deimos), die eigentlich nur zehn bis dreißig Kilometer große unregelmäßig geformte Felsbrocken sind, und Jupiter sowie die anderen Gasriesen sind deutlich größer als alle ihre Monde. Nur der Zwergplanet Pluto besitzt mit Charon noch einen ebenfalls vergleichsweise großen Mond.

Anders als die Erde scheint der Mond dabei nur einen relativ kleinen eisenhaltigen Kern zu besitzen, denn seine mittlere Dichte ist mit  $3,34 \text{ g/cm}^3$  deutlich geringer als die Dichte der Erde, die bei  $5,51 \text{ g/cm}^3$  liegt, sodass er trotz seiner Größe



Größenvergleich zwischen  
Erde und Mond



Künstlerische Darstellung des Einschlags von Theia auf der Erde

nur rund  $1/81$  der Erdmasse aufweist. Zugleich besitzt das Gestein der Mondoberfläche aber dennoch eine sehr ähnliche Zusammensetzung wie die Gesteine der Erdkruste.

Die Ursache für beide Auffälligkeiten muss in der Entstehungsgeschichte des Mondes liegen. Am wahrscheinlichsten scheint heute das folgende Kollisions-szenario zu sein: Als sich vor rund 4,6 Milliarden Jahren das Sonnensystem und seine Planeten aus einer Gas- und Staubwolke formten ( $\downarrow$ ), bildete sich in

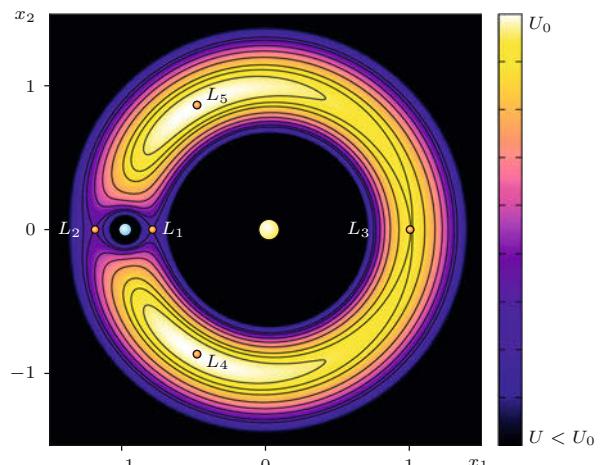
Die Entstehung des Sonnensystems → S. 6

J. Baez *The Earth – For Physicists* <http://math.ucr.edu/home/baez/earth.html>

YouTube *How the Moon was born* <http://www.youtube.com/watch?v=dPJG5oVjvME> oder .../watch?v=gVrJidulTJc

derselben Umlaufbahn neben der Erde an einem der sogenannten *Lagrange-Punkte* L4 oder L5 ein weiterer Kleinplanet, der meist *Theia* genannt wird – in der antiken griechischen Mythologie war die Titanin Theia übrigens die Mutter der Mondgöttin Selene. In den Lagrange-Punkten L4 und L5 addieren sich Gravitations- und Fliehkräfte gerade so, dass ein nicht zu schweres Objekt dort in konstantem Abstand zur Erde die Sonne umrunden kann; ein Planet, der dem unse- ren immer ein wenig voraus oder hinterher lief.

Als Theia jedoch ungefähr zehn bis fünfzehn Prozent der Erdmasse erreicht hatte und damit ungefähr die Größe des Mars aufwies, wurde ihre Position im Lagrange-Punkt instabil, und sie begann, langsam auf die Erde zuzudriften. Einige zehn Millionen Jahre nach der Entstehung des Sonnensystems kollidierte sie schließlich seitlich streifend mit der frühen Erde, die zu dieser Zeit etwa 90 Prozent ihrer heutigen Masse aufwies. Bei diesem Streifschuss wurden Teile Theias sowie große Materiemengen aus der Erdkruste und dem Erdman-

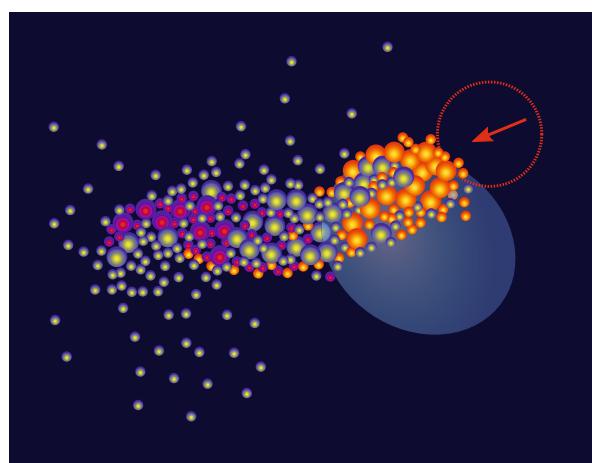


Die Lagrange-Punkte im Erde-Sonne-System. Die Sonne befindet sich in der Mitte, die blaue Kugel entspricht der Erde.

tel in den Weltraum geschleudert, wo sich aus ihnen innerhalb nur einiger hundert Jahre in einem Abstand von nur drei bis fünf Erdradien der Mond bildete. Der Großteil Theias, insbesondere der schwere Eisenkern, vereinigte sich dagegen mit der Erde.

Im Lauf der Zeit übertrugen die Gezeitenkräfte ( $\downarrow$ ) immer mehr Rotationsenergie von der Erde auf den Mond, sodass sich seine Entfernung zu uns seit seiner Entstehung ungefähr verzehnfacht hat. Sie wächst auch heute noch um knapp vier Zentimeter pro Jahr an. Zugleich nahm die Rotationsgeschwindigkeit der Erde ab – in der Frühzeit der Erde waren die Tage also deutlich kürzer als heute.

Position der herausgeschlagenen Materie rund fünfzig Minuten nach dem Beginn der Kollision der Erde mit Theia (angedeutet durch den roten Kreis) in Anlehnung an eine Computersimulation von Robin M. Canup.



Die Gezeiten → S. 92

R. M. Canup *Simulations of a late lunar forming impact* Icarus, 168, 2004, S. 433-456,  
<http://www.boulder.swri.edu/~robin/c03finalrev.pdf>



# Die Kepler'schen Gesetze

## Wie sich die Planeten bewegen



Johannes Kepler (1571 – 1630)

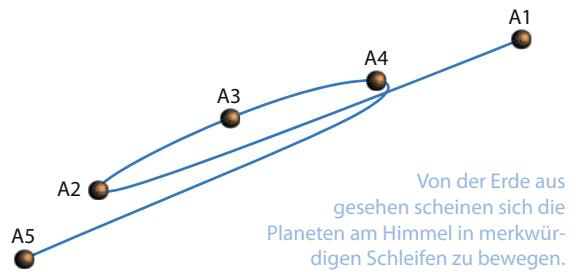
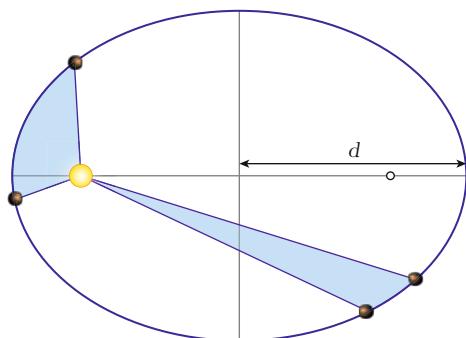
Im Jahr 1609 veröffentlichte der damalige kaiserliche Hofmathematiker Johannes Kepler in seinem Werk *Astronomia Nova (Neue Astronomie)* die Gesetze, welche die Bahnen der Planeten um die Sonne beschreiben (siehe Kasten rechts).

Erst nach jahrelangen mühsamen Berechnungen auf Basis detaillierter Beobachtungsdaten seines Vorgängers Tycho Brahe (1546 – 1601) und nach manchem Irrweg war es Kepler gelungen, diese beiden Gesetze zu ermitteln. Im Lauf der nächsten zehn Jahre entdeckte er durch eingehende Analyse der Bahndaten ein drittes Gesetz und veröffentlichte es im Jahr 1619 in seinem Werk *Harmonices mundi libri V* (auch als *Weltharmonik* bekannt).

### Die Kepler'schen Gesetze

1. Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Die Verbindungslinie von der Sonne zum Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleich große Flächen.
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten  $T$  der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen (Kuben) der großen Bahnhalbachsen  $d$ , d. h. der Term  $T^2/d^3$  ist für alle Planeten gleich groß.

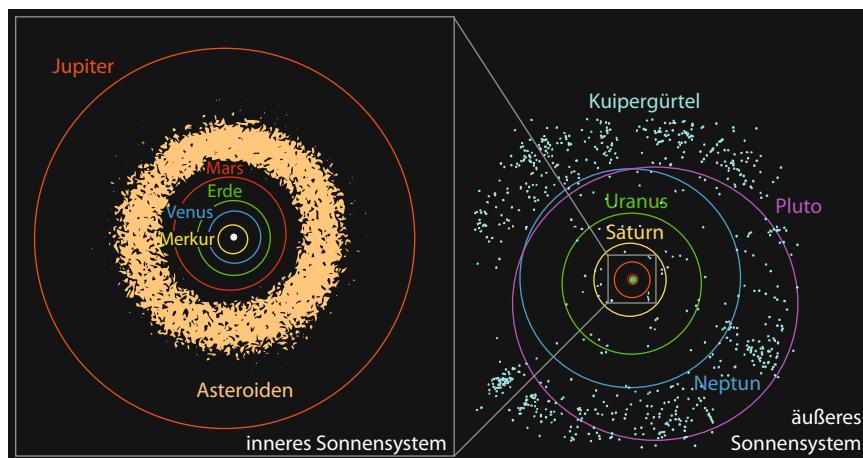
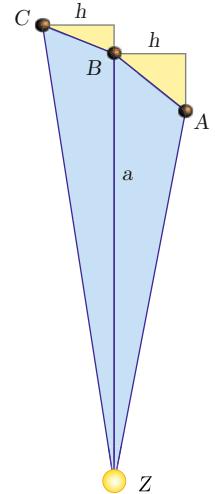
So benötigt beispielsweise der Jupiter 11,863 Erdenjahre für einen Umlauf, und die große Halbachse seiner Bahn ist entsprechend  $11,863^{2/3} = 5,2$ -mal so groß wie die der Erde.



Als einer der Ersten versuchte Kepler, die von ihm gefundene Planetenbewegung auf physikalische Gesetze zurückzuführen. Ohne das Konzept der Trägheit ( $\downarrow$ ) und ohne das Gravitationsgesetz ( $\downarrow$ ) war er jedoch nicht in der Lage, die physikalisch korrekte Lösung zu finden. So vermutete er, dass die Rotation der Sonne wie bei einem Schaufelrad über eine magnetische Kraftströmung (*anima motrix*, übersetzt Seele des Bewegers) die Planeten mitreißen und in Bewegung hält, wobei dieser Einfluss der Sonne mit wachsendem Abstand immer schwächer wird. Erst im Jahr 1686, also 56 Jahre nach Keplers Tod, gelang es dem englischen Physiker Isaac Newton, die richtige physikalische Erklärung zu formulieren.

Das erste Kepler'sche Gesetz ist nach Newton eine Folge der umgekehrt quadratischen Abhängigkeit der Gravitationskraft von der Entfernung zur Sonne, wobei erst die konkrete Lösung der Newton'schen Bewegungsgleichung die Ellipsenform der Planetenbahn enthüllt.

Das zweite Kepler'sche Gesetz ergibt sich direkt aus der Drehimpulserhaltung. Man kann es anschaulich herleiten, indem man die ellipsenförmige Bahnbewegung in viele winzig kleine gerade Teilstücke zerlegt, die gleichen Zeitintervallen entsprechen. An den Ecken lenkt die Gravitation dabei den Planeten punktuell in Richtung Sonne ab – in der Grafik wirkt diese Ablenkung im Punkt  $B$  also senkrecht nach unten. Nach dem Trägheitsgesetz bleibt die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Ablenkungsrichtung unverändert, sodass die Höhe  $h$  der beiden blauen Dreiecke  $ZAB$  und  $ZBC$  über der gemeinsamen Grundseite  $a$  identisch ist und beide Dreiecke denselben Flächeninhalt  $a \cdot h / 2$  besitzen.



Das dritte Kepler'sche Gesetz ergibt sich schließlich aus der Balance zwischen Fliehkraft und Gravitation, nach der ein Planet sich beispielsweise bei  $2^2 = 4$ -facher Vergrößerung der Bahn nur noch halb so schnell bewegt und deshalb für den viermal längeren Weg die  $2^3 = 8$ -fache Zeit benötigt.

Das innere und äußere Sonnensystem: Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen.



# Satelliten mit geosynchronen Orbits

Kunstvolle Schleifen am Himmel



Satelliten werden für die unterschiedlichsten Zwecke benutzt: zum Telefonieren, um Bilder für Google Maps aufzunehmen oder um das Wetter vorherzusagen. Die Satelliten umkreisen dabei ständig die Erde, und überfliegen so zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Punkte auf der Erdoberfläche.

Es gibt jedoch eine bestimmte Sorte von besonders stabilen und langlebigen Umlaufbahnen, die deswegen gerne für Kommunikations- und Wettersatelliten benutzt werden: Dies sind Satelliten auf sogenannten *geosynchronen Orbits*. Sie umfliegen die Erde pro Tag genau einmal, d.h. heißt, sie befinden sich nach einem Sternentag (ca. 23 Stunden, 56 Minuten und 4 Sekunden) wieder genau über demselben geografischen Punkt der Erde.

Ein Spezialfall hiervon ist der *geostationäre Orbit*: Der Satellit bewegt sich dabei auf einer Kreisbahn in der Äquatorebene um die Erde. Weil sich die Erde genau mit dem Satelliten mitdreht, befindet der sich im-

mer über demselben Punkt auf dem Äquator. Für einen Beobachter auf der Erde steht der geostationäre Satellit also scheinbar bewegungslos am Himmel, obwohl er tatsächlich mit über 11 000 km/h um die Erde rast.

Im Allgemeinen kann eine geosynchrone Bahn aber auch elliptisch sein, und/oder in einer Ebene stattfinden, die relativ zur Äquatorebene geneigt ist ( $\downarrow$ ). Um sich zu veranschaulichen, wie eine solche Satellitenbahn einem Beobachter am Erdboden erscheint, kann man sich zuerst zwei extreme Fälle vorstellen:

Ein Satellit, der sich auf einer Ellipse in der Äquatorebene um die Erde bewegt, steht immer noch zu jedem Zeitpunkt seiner Bahn über dem Äquator, allerdings nicht immer über demselben Punkt. Wenn sich der Satellit weiter von der Erde weg befindet, fliegt er langsamer, und ein Punkt auf dem Äquator überholt ihn

so – für einen erdfesten Beobachter driftet der Satellit also nach Westen ab. Genauso bewegt er sich scheinbar nach Osten, wenn er sich näher an der Erde befindet, z. B. wenn er durch das Perigäum seiner Bahn geht. Ein solcher geosynchroner Satellit erweckt für einen erdfesten Beobachter also den Eindruck, entlang des Äquators hin- und herzuwackeln (und dabei manchmal näher, und manchmal weiter entfernt zu sein).

Der zweite anschauliche Fall ist ein Satellit auf einer Polarbahn, d. h. auf einem Kreis um die Erde, der allerdings in einer Ebene senkrecht zur Äquatorebene liegt. Steht ein solcher Satellit mittags über einem Punkt am Äquator und bewegt sich von da direkt zum Nordpol, sieht ein an diesem Punkt stehender Beobachter, weil er sich selbst auf der Erde nach Osten wendet, den Satellit nach Nordwesten verschwinden. Wenn beim Beobachter die Sonne untergeht, erreicht der Satellit genau den (geografischen) Nordpol. Um Mitternacht steht er noch einmal direkt über dem Beobachter, der ihn von Nordosten ankommen und nach Südwesten verschwinden sieht. Nach weiteren (knapp) zwölf Stunden erreicht der Satellit – scheinbar von Südosten her kommend – wieder seinen Ausgangspunkt. Die vom Boden aus zu sehende Bahn gleicht also einer Schleife, die der Satellit über den Himmel zieht.

Der allgemeinste Fall einer geosynchronen Bahn ist eine geneigte Ellipse, und sie erscheint dem Beobachter am Boden als sogenannte *Analemma*-Figur. Diese ist ebenfalls wie eine Acht geformt, hat aber je nach Abplattung der Satellitenbahn zwei unterschiedlich große Schlaufen. Welche Bahn man genau für einen geostationären Satelliten aussucht, hängt also stark davon ab, über welchen Gebieten der Erde er hauptsächlich stehen soll.



### Clarke-Orbits

Die erste veröffentlichte Idee für einen geostationären Satelliten stammte vom Science-Fiction-Author Arthur C. Clarke. Er schlug 1945 vor, mit drei ständig die Welt umkreisenden geostationären Satelliten eine drahtlose, weltweite Kommunikation zu etablieren. Belächelte man seine Idee anfangs noch, wurde 19 Jahre später, am 19. August 1964, der erste geostationäre Satellit, SYNCOM 3, in die Umlaufbahn gebracht, und übertrug von dort die Olympischen Spiele 1964 aus Japan in die USA. Geostationäre Umlaufbahnen tragen daher auch den Namen *Clarke-Orbits*.



Ist die Bahnkurve ein wenig geneigt, verzerrt sich die scheinbare Bahnkurve, die dann auch Analemma genannt wird.

A. C. Clarke The 1945 Proposal by Arthur C. Clarke for Geostationary Satellite Communications  
<http://lakdiva.org/clarke/1945ww/>; englisch



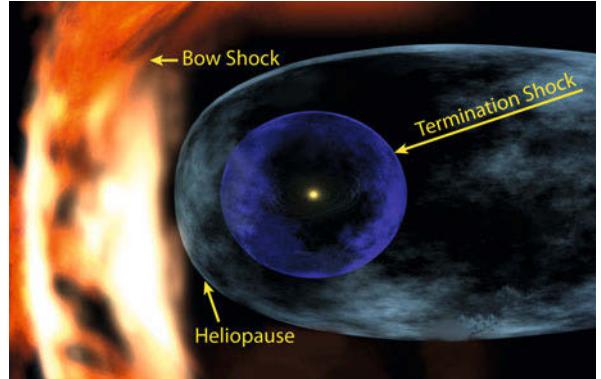
# Der Rand des Sonnensystems

Wo genau zieht man die Grenze?

Wie groß ist das Sonnensystem? Wo hört es auf? Und wo beginnt das „Draußen“, der interstellare Raum? Diese Fragen sind gar nicht einfach zu beantworten, denn die Antwort hängt davon ab, was man genau als *Rand des Sonnensystems* bezeichnet. Um sich die unterschiedlichen Möglichkeiten genauer vor Augen führen zu können, ist es sehr hilfreich, in sogenannten *astronomischen Einheiten* (engl. astronomical unit oder AU) zu rechnen. Eine AU ist die mittlere Entfernung zwischen Erde und Sonne und beträgt knapp 150 Millionen Kilometer.

Oft liest man, dass das Sonnensystem aus der Sonne und ihren Planeten besteht – hört es also einfach hinter dem äußersten Planeten auf? Obwohl das eine mögliche Wahl wäre, den Rand des Sonnensystems zu definieren, ist sie nicht besonders zweckmäßig. Nicht nur, weil die Definition davon abhängt, was genau ein „Planet“ ist, und sich mit der Zeit ändern kann, wie man am Beispiel von Pluto gut sieht, sondern auch, weil es jen-

Bow Shock um einen jungen Stern im Orionnebel



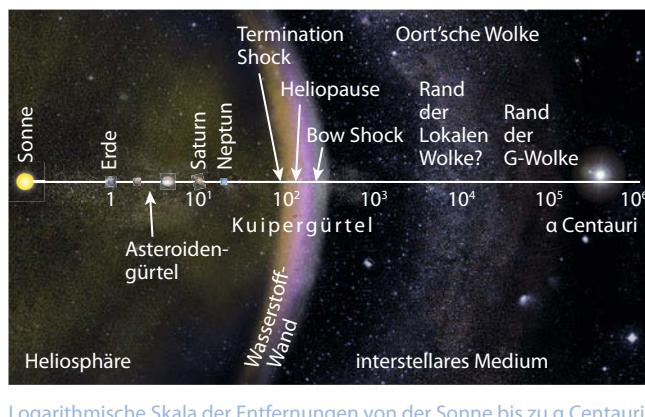
Unser Sonnensystem durchflügt das interstellare Medium.

seits des äußersten Planeten Neptun – ca. 30 AU von der Sonne entfernt – Unmengen von Zwergplaneten, Gesteinskörpern und Staubbrocken unterschiedlicher Größe gibt, die höchstwahrscheinlich Überbleibsel der Entstehung der Sonne und ihrer Planeten sind. Diese *Kuipergürtel* genannte Schicht erstreckt sich jenseits des Neptuns etwa bis zu einer Entfernung von 50 AU.

Der Einfluss der Sonne reicht jedoch viel weiter: Durch das nukleare Feuer in ihrem Inneren angeheizt, schleudert sie unablässig einen Strom von geladenen Teilchen – den *Sonnenwind* – ins All hinaus, vor dem wir auf der Erde glücklicherweise durch unser Erdmagnetfeld geschützt werden. Wie ein ständiger, von der Sonne weg gerichteter Fön, hält der Sonnenwind das interstellare Gas, das größtenteils aus Wasserstoff und Helium besteht und den Raum zwischen den Sternen durchzieht, davon ab in unser Sonnensystem einzudringen.

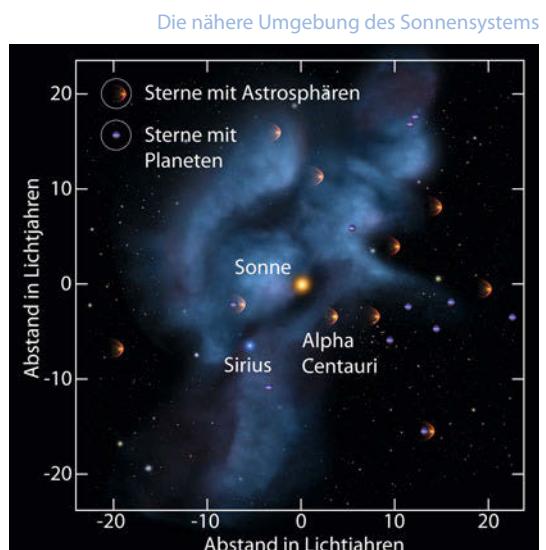
Die Stärke des Sonnenwindes nimmt zwar mit zunehmender Entfernung von der Sonne ab, er reicht aber immer noch bis weit jenseits des Kuipergürtels. Dort, wo der Sonnenwind und das interstellare Gas aufeinander treffen, durchmischen sie sich und formen eine Hülle um das Sonnensystem, den sogenannten *Heliosheath* (übersetzt in etwa: Sonnenumhüllung). Dieser ist – je nach momentaner Stärke des Sonnenwindes – höchstwahrscheinlich 20 AU bis zu 60 AU dick. Der innere, der Sonne zugewandte Rand des Heliosheaths wird *Termination Shock* genannt und befindet sich ca. 80 AU bis 90 AU von der Sonne entfernt.

Die beiden Sonden Voyager 1 und Voyager 2 haben 2004 bzw. 2007 den Termination Shock durchquert und befinden sich zur Zeit des Buchdruckes im Heliosheath. Das weiß man, weil sie zum Zeitpunkt der Durchquerung des Termination Shock einen rapiden Temperaturanstieg der sie umgebenden Materie auf fast 200 000 Kelvin gemessen haben – eine Folge des Aufeinanderprallens von Sonnenwind und interstellarem Gas. Zum Glück ist das heiße Gas dort extrem dünn, sodass es die Sonde nicht sonderlich aufheizt.



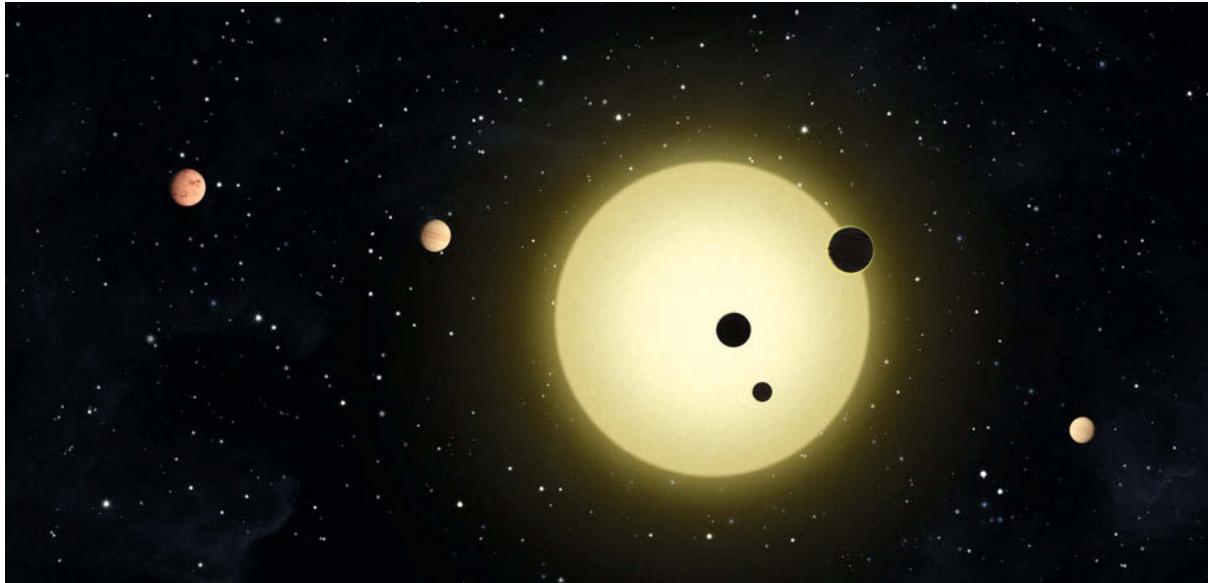
Voyager 1 befindet sich zurzeit in einer Entfernung von ca. 120 AU von der Sonne und nähert sich damit der äußeren Grenze des Heliosheaths, der *Heliopause*, und wird diese bis 2014 überschreiten. Damit wird sie den Einflussbereich des Sonnenwindes, *Heliosphäre* genannt, verlassen, und nur noch von interstellarem Medium umgeben sein.

Obwohl man die Heliopause mit einer Entfernung von ca. 130 bis 150 AU durchaus als Rand des Sonnensystems bezeichnen könnte, kann man den Einfluss der Schwerkraft der Sonne noch sehr viel weiter spüren: Die sogenannte *Hill-Sphäre*, die den merklichen Einflussbereich der Schwerkraft der Sonne kennzeichnet, reicht noch bis über 200 000 AU in den Weltraum hinaus. Damit ist man allerdings schon fast beim nächsten Stern, Proxima Centauri, angelangt, der etwa 4,2 Lichtjahre (260 000 AU) von uns entfernt ist.



## Extrasolare Planeten

Die Suche nach Planeten jenseits des Sonnensystems



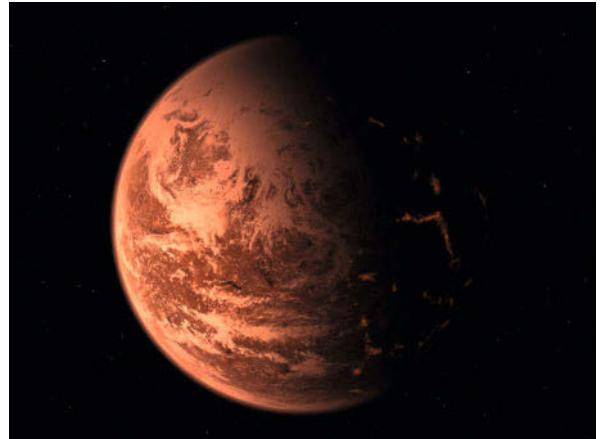
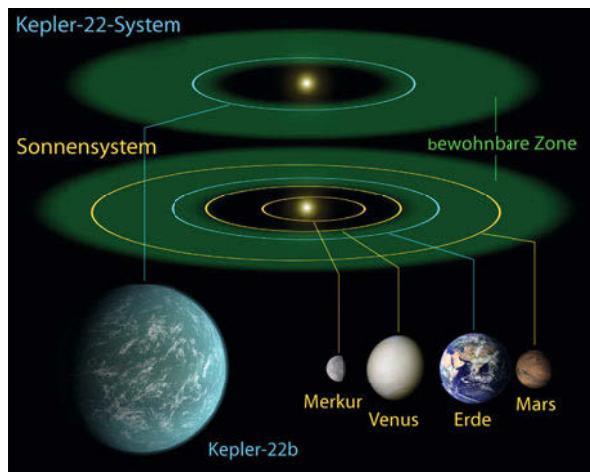
Kepler-11 ist ein sonnenähnlicher Stern, der von sechs Planeten umkreist wird.

Es galt lange Zeit als fast aussichtslos, ferne Planeten aufzuspüren, die andere Sterne als unsere Sonne umkreisen. Denn Planeten sind sehr viel kleiner als Sterne und werden von deren Licht vollkommen überstrahlt, sodass sie in Teleskopen kaum auszumachen sind. Dennoch ist es seit den neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts gelungen, mit ausgeklügelten Methoden mehrere hundert dieser *Exoplaneten* (extrasolaren Planeten) aufzuspüren, und es kommen ständig neue hinzu.

In den Anfangsjahren von etwa 1995 bis 2005 fand man die meisten Planeten mithilfe der sogenannten *Radialgeschwindigkeitsmethode*. Da Stern und Planet um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen, bewegt sich nicht nur der Planet, sondern auch der Stern. Diese Bewegung verrät sich durch eine kleine periodische Rot- und Blauverschiebung im Spektrum des Sternenlichtes, wenn der Stern von uns fort oder auf uns zu „eiert“. Am einfachsten lassen sich auf diese Weise große Gasplaneten nachweisen, die ihren Stern sehr eng umkreisen, wie beispielsweise der Gasriese TrES-4, der ungefähr den 1,7-fachen Durchmesser von Jupiter besitzt und

in nur etwa 3,5 Tagen seinen Heimatstern umrundet. Später ließen sich auch kleinere Planeten auf diese Weise aufspüren, wie der Gesteinsplanet Gliese 876 d, der rund sieben Erdmassen aufweist und den nur 15 Lichtjahre entfernten roten Zwergstern Gliese 876 in zwei Tagen einmal umkreist. Solche großen Gesteinsplaneten bezeichnet man auch als *Supererden*. Aufgrund der Nähe zu seinem Heimatstern dürfte Gliese 876 d allerdings heiß wie ein Backofen sein und damit für die Entstehung von Leben, wie wir es kennen, nicht infrage kommen.

Seit dem Jahr 2005 ist die sogenannte *Transitmethode* für die Suche nach Exoplaneten immer wichtiger geworden. Dabei nutzt man aus, dass ein direkt vor dem Stern vorbeiziehender Planet einen kleinen Teil des Sterns verdeckt, sodass für die Zeit des Transits etwas weniger Sternenlicht die Erde erreicht. Diesen winzigen Effekt kann man mit modernen Teleskopen wie dem im März 2009 gestarteten Kepler-Weltraumteleskop nachweisen.



Künstlerische Darstellung von Gliese 876 d

In jüngster Zeit gelingt mit dieser Methode zunehmend auch der Nachweis von Gesteinsplaneten, die ihren Stern im richtigen Abstand (d. h. in der bewohnbaren Zone) umkreisen, in der die Temperatur flüssiges Wasser auf der Planetenoberfläche erlaubt. Auf solchen Planeten könnte sich Leben entwickelt haben. Ein Beispiel ist der mit 2,4 Erddurchmessern schon relativ erdähnliche Exoplanet Kepler-22b, der den etwa 600 Lichtjahre entfernten sonnenähnlichen Stern Kepler-22 alle 290 Tage einmal umkreist. In naher Zukunft hofft man, im Licht solcher Sterne und Planeten das Vorkommen von Wasser, Sauerstoff und Methan in der Planetenatmosphäre spektroskopisch nachzuweisen, das als Hinweis für die Existenz von Leben gilt. Dies könnte beispielsweise mit dem James Webb Space Teleskop der NASA gelingen, das im Jahr 2018 in den Weltraum gestartet werden soll.

Vergleich des Kepler-22-Systems mit unserem Sonnensystem. Die bewohnbare Zone ist grün gekennzeichnet.



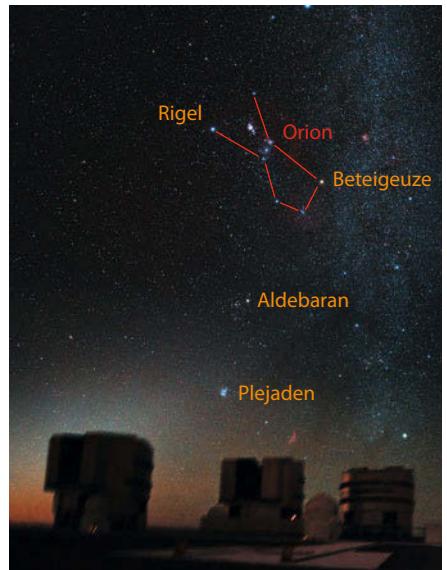
## Der Sternenhimmel

### Sterne, Planeten und die Milchstraße

In unseren modernen Zeiten machen künstliche Lichtquellen und die Dunstglocke der Städte es oft schwierig, den nächtlichen Sternenhimmel zu betrachten. Unsere Vorfahren hatten es da wesentlich leichter. Entsprechend groß war die Bedeutung der Sterne beispielsweise zur Navigation, zur Bestimmung der Jahreszeiten oder auch ihre mystische Interpretation, wie man sie noch heute in der Astrologie antrifft. Zur besseren Orientierung verband man markante Sterne mithilfe gedachter Linien zu Sternbildern. Eines der bekanntesten von ihnen ist das Orion-Sternbild mit seinen drei Gürtelsternen, das man bei uns in klaren Winternächten beobachten kann.

Wenn man eine länger belichtete Aufnahme des Nachthimmels anfertigt, so stellt man fest, dass die Sterne scheinbar um einen Punkt in nördlicher Richtung rotieren. Heute wissen wir, dass es die Erdrotation ist, die den Eindruck eines rotierenden Sternenhimmels vortäuscht.

Das Sternbild Orion am Himmel über dem Very Large Telescope (VLT) der ESO (European Southern Observatory) in der Atacamawüste im Norden Chiles. Da sich dieses Teleskop auf der Südhalbkugel der Erde befindet, steht das Sternbild gleichsam auf dem Kopf.



Die Sterne selber bewegen sich hingegen so langsam, dass sie scheinbar unverrückbar am Himmelszelt angeordnet sind – wir nennen sie daher *Fixsterne*. Es gibt jedoch auch einige Objekte, die ihre Position am Himmel ständig verändern – die *Planeten*, was *Wanderer* bedeutet.

Rotation des südlichen Sternenhimmels über dem 3,6-Meter-Teleskop der ESO bei La Silla in der chilenischen Atacama-Wüste



Dieses Bild der Clementine Star Tracker Camera zeigt von rechts nach links den Mond, die dahinter aufgehende Sonne und die Planeten Saturn, Mars und Merkur. Man erkennt, dass die Sonne und die drei Planeten ungefähr in einer Ebene liegen – der Ekliptik.

Sie bewegen sich in scheinbar komplizierten Schleifen innerhalb eines schmalen Streifens (der Ekliptik) am Himmel. Erst im Jahr 1609 gelang es Johannes Kepler, die wahre Natur dieser Bewegungen in mühsamen Berechnungen zu entschlüsseln: Die Planeten bewegen sich ebenso wie die Erde auf Ellipsenbahnen um die Sonne, wobei diese Bahnen alle ungefähr in derselben Ebene liegen (↓).

In dunklen klaren Nächten kann man ein milchig schimmerndes Band am Himmel sehen, das den gesamten Himmel überzieht: die *Milchstraße* (↓). Erst mit Teleskopen gelingt es, die wahre Natur dieses Bandes aufzudecken: Tatsächlich ist die Milchstraße eine scheibenför-

Das Zentrum der Milchstraße über dem 3,6-Meter-Teleskop der ESO bei La Silla (Chile)

mige Ansammlung aus mehreren hundert Milliarden Sternen sowie Gas und Staubnebeln und besitzt einen Durchmesser von etwa 100 000 Lichtjahren. Da wir Teil dieser Scheibe sind, sehen wir sie gleichsam von innen heraus als Band am Himmel.

Wenn man genau hinsieht, so stellt man noch etwas fest: nämlich dass die Sterne farbig sind (↓). Besonders gut sieht man das sogar mit bloßem Auge bei den Sternen Betelgeuze und Rigel im Orion-Sternbild. Während Betelgeuze ein rötlich leuchtender roter Überriese ist, dessen Durchmesser ungefähr das 700-fache des Sonnendurchmessers beträgt, ist Rigel ein blauer Riese, der etwa doppelt so heiß und 70 Mal größer als unsere Sonne ist. Viele Sterne, die wir am Himmel sehen, sind solche heißen und sehr leuchtkräftigen Sterne, da diese viel weiter zu sehen sind als die wesentlich häufigeren, aber zugleich kleineren und deutlich leuchtschwächeren Sterne.



Die Kepler'schen Gesetze → S. 10  
Das Schicksal der Milchstraße → S. 48  
Spektralklassen → S. 22



## Die Geburt von Sternen

### Wie kontrahierende Gaswolken zu Sternen werden

Sterne entstehen aus Gas- und Staubwolken, die sich unter dem Einfluss der Schwerkraft immer weiter zusammenziehen. Dabei entstehen aus einer Wolke meist viele Sterne gleichzeitig, die nach ihrer Entstehung einen Sternhaufen bilden. Die mit zehn bis zwölf Milliarden Jahren ältesten Sternhaufen findet man im kugelförmigen Außenbereich (Halo) der Milchstraße und anderer Galaxien: die sogenannten *Kugelsternhaufen*. Unsere Milchstraße enthält rund 150 dieser Kugelsternhaufen.

Der Kugelsternhaufen M80 (NGC 6093) ist etwa 28000 Lichtjahre von der Erde entfernt. Die rötlich leuchtenden Punkte sind rote Riesensterne.



Die Plejaden

Jüngere (sogenannte *offene*) Sternhaufen findet man dagegen in der Scheibe der Milchstraße, da sich nur dort noch immer genug Gas für ihre Bildung befindet. Sie sind kleiner als die Kugelsternhaufen und lösen ihren Verbund anders als diese im Lauf der Zeit auf. Der bekannteste offene Sternhaufen sind die Plejaden, die man bei uns im Winter im Sternbild Stier beobachten kann.

Die Plejaden sind nur rund 125 Millionen Jahre alt. Zum Vergleich: Unsere Sonne ist mit einem Alter von 4,6 Milliarden Jahren rund 35 Mal älter, sodass sich der zu ihr gehörende offene Sternhaufen längst aufgelöst hat. Da die Plejaden nur etwa 400 Lichtjahre von uns entfernt sind, kann man mit bloßem Auge meist sieben ihrer hellsten Sterne gut erkennen, weshalb man auch vom Siebengestirn spricht. In Wahrheit umfassen die Plejaden jedoch mehr als 1000 junge Sterne.



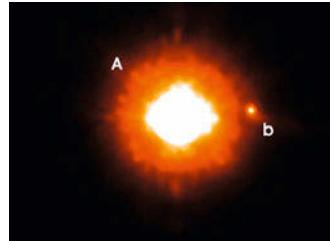
Der Orionnebel

Auch heute entstehen noch neue Sterne in großen Gaswolken. Ein Beispiel für ein solches Sternentstehungsgebiet ist der Orionnebel – ein großer Komplex aus Gas und Staubwolken, der das gesamte Orionsternbild durchzieht. Den optisch sichtbaren Teil des Orionnebels zeigt das obige Bild.

Im Orionnebel kann man tatsächlich einzelne rotierende Gasscheiben nachweisen, die entstehen, wenn sich ein neues Sonnensystem bildet (↓). Man nennt sie *protoplanetare Scheiben*, da sich aus ihnen auch die Planeten formen.



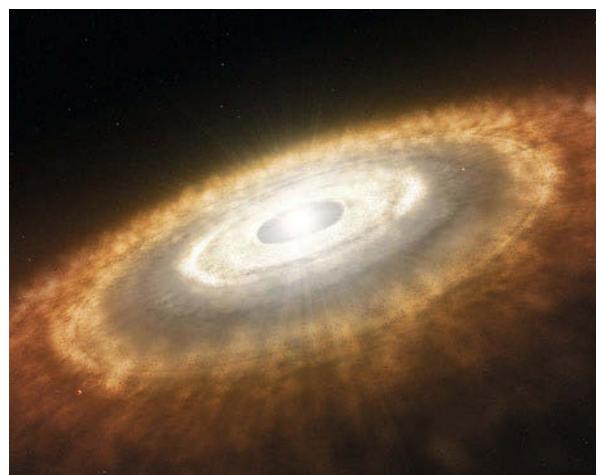
Protoplanetare  
Scheiben im  
Orionnebel



Der T-Tauri-Stern GQ Lupi

Im Zentrum dieser Gasscheiben bildet sich zunächst ein sogenannter *T-Tauri-Stern*. Dieser Stern sammelt immer mehr Masse aus seiner Gasscheibe auf, kontrahiert zunehmend und wird dabei immer heißer, sodass er für einige Millionen Jahre sogar heller als gleich heiße Hauptreihensterne leuchtet. Erst wenn in seinem Zentrum die Temperatur einige Millionen Grad überschreitet, zündet dort die Kernfusion, und ein neuer Hauptreihenstern ist geboren.

Künstlerische Darstellung eines jungen Sterns mit protoplanetarer Scheibe



Die Entstehung des Sonnensystems → S. 6

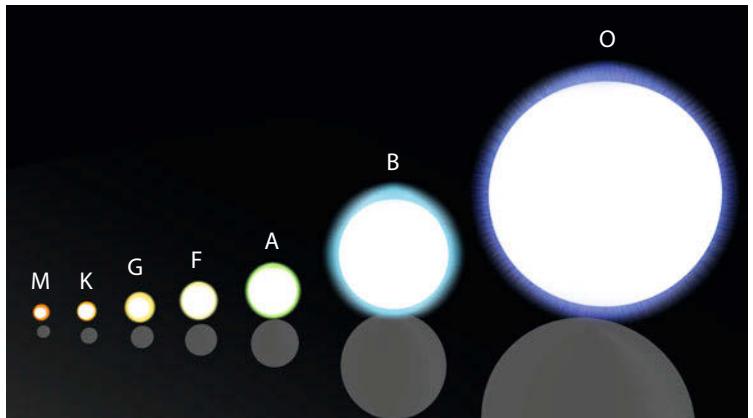
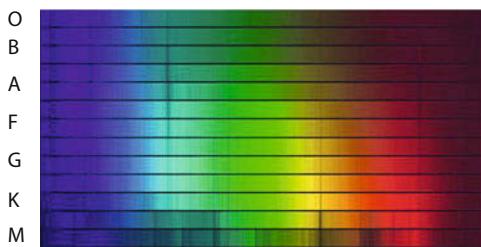


## Spektralklassen

### Welche Farbe haben Sterne?

Im Weltall ist Stern nicht gleich Stern. Sie unterscheiden sich nicht nur nach Größe oder Temperatur, sondern auch durch die Details der Fusionsprozesse, die in ihrem Inneren ablaufen, beziehungsweise welche Elemente man in ihnen findet.

Innerhalb eines Sterns können die Photonen, die durch Fusion entstehen, verschiedene Energien besitzen. Die statistische Verteilung dieser Photonenergien entspricht annähernd der eines schwarzen Strahlers einer gewissen Temperatur. Es erreichen jedoch nicht alle Photonen im Inneren des Sterns auch seine Oberfläche. Der Grund hierfür sind gewisse, häufig vorkommende Elemente. Diese haben ganz charakteristische quantenmechanische Übergänge, zu denen jeweils eine ganz bestimmte Energie gehört. Die Photonen, die genau diese Energie haben, werden von den Atomen des entsprechenden Elements absorbiert, während alle Photonen mit anderen Energien einfach von ihnen abprallen.



Je heißer ein Stern ist, desto größer ist er auch.

Das Licht, das von einem Stern abgestrahlt wird, verrät also etwas über seine chemische Zusammensetzung. Zerlegt man das Sternenlicht in seine spektralen Bestandteile, zum Beispiel mit einem Prisma (siehe Artikel zu Regenbogen ↓), so erhält man nicht ganz das Spektrum eines schwarzen Strahlers einer gewissen Temperatur, sondern es fehlen einige Wellenlängen. Je nachdem welche Linien genau im Spektrum fehlen, enthält der Stern also die entsprechenden Elemente im Übermaß. Anhand dieser Linien unterteilt man dabei Sterne in Kategorien, auch **Spektralklassen** genannt.

Die Klasse eines Sterns wird von seinem Spektrum bestimmt  
(Spektralklassen von oben nach unten: O6,5, B0, B6, A1, A5, F0, F5, G0, G5, K0, K5, M0, M5).

Diese Kategorien folgen dem Schema O-B-A-F-G-K-M (eine historische Bezeichnungsweise. Merksatz: „Oh Be A Fine Girl Kiss Me“) von sehr heißen, großen Sternen der Klasse O bis hin zu kleinen, kälteren Sternen der Klasse M. Obwohl die Einteilung anhand der vorhandenen oder fehlenden Spektrallinien geschieht, gibt es einen starken Zusammenhang mit der Häufigkeit gewisser Elemente und der Temperatur (und damit auch der Farbe) des entsprechenden Sterns.

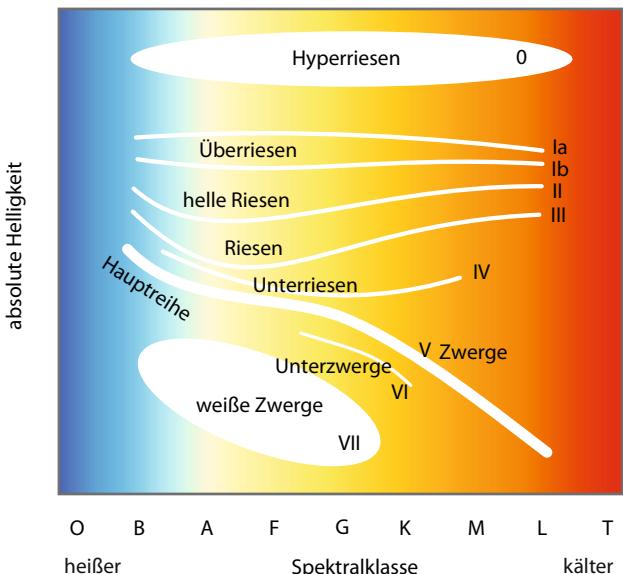
Weil die Messmethoden seit der Einführung dieser Klassifikation im Jahre 1912 immer genauer wurden, hat man begonnen, die Skala weiter zu unterteilen. So gibt es zwischen B- und A-Sternen zum Beispiel Sterne der Spektralklasse B2, B3, B5, und so weiter.



Das Hertzsprung-Russell-Diagramm → S. 24

J. S. Schlimmer *Epsilon-Lyrae: Sternspektren-Galerie*

<http://www.epsilon-lyrae.de/Spektroskopie/Sternspektren/SternspektrenGalerie.html>



Die Spektralklasse eines Sterns hängt von der Position im Hertzsprung-Russell-Diagramm ab.

Das System der Spektralklassen wird heutzutage noch um die Information der Leuchtkraftklasse erweitert. Dies ist eine zumeist römische Ziffer von 0 (Hyperriesen), I (Riesen) über V (Hauptreihensterne) bis VII (weiße Zwerge), und gibt den Entwicklungsstand des Sterns an.

Unsere Sonne ist nach dieser Klassifizierung ein Stern der Klasse G2V, also ein kleiner, gelber Stern im Hauptast des Hertzsprung-Russell-Diagramms (↓).

Mintaka, Alnilam und Alnitak, die drei Sterne des Orionsgürtels, haben die Spektralklasse B0.

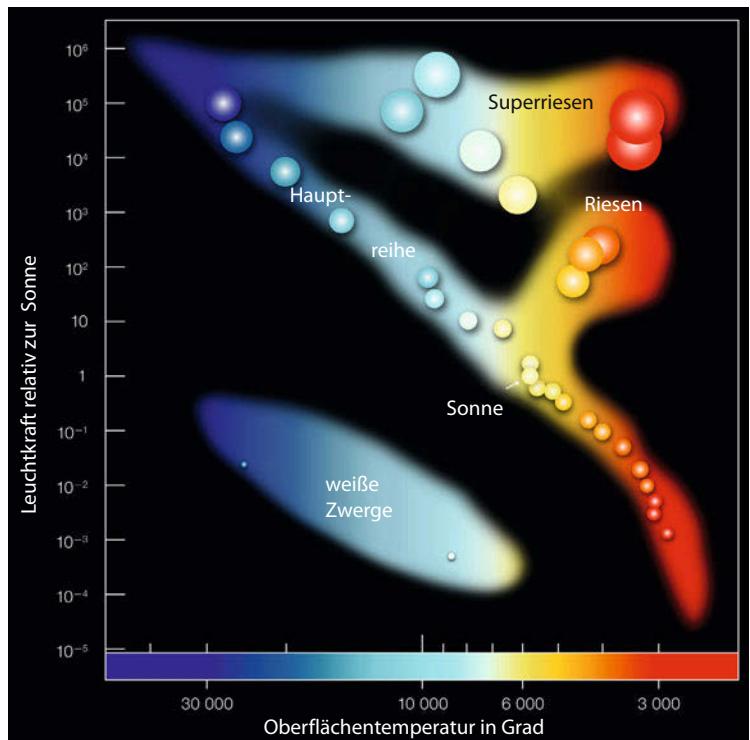


# Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

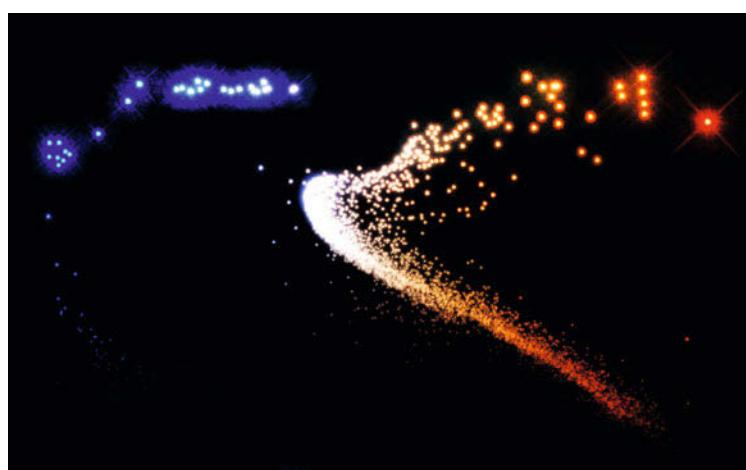
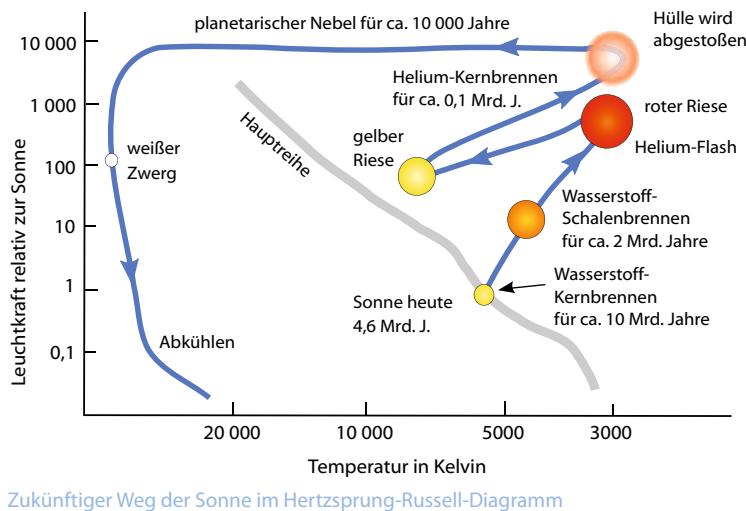
## Temperatur, Leuchtkraft und Lebensweg der Sterne

Sterne können sehr unterschiedlich sein. Manche Sterne sind sehr viel heißer und heller als unsere Sonne, viele sind dagegen kühler und leuchtschwächer und manche sind sogar heller, aber zugleich kühler. Einen Überblick erhält man, indem man die Sterne als Punkte in ein sogenanntes *Hertzsprung-Russell-Diagramm* einzeichnet. Dabei trägt man heißere und damit blauer leuchtende Sterne weiter links und hellere Sterne weiter oben ein, d.h. die x-Koordinate steht für die Temperatur (mit steigender Temperatur nach links) und die y-Koordinate für die Leuchtkraft des Sterns.

Wenn man sehr viele Sterne in ein solches Diagramm einträgt, so versammeln sich die meisten von ihnen entlang einer Linie, die von kühlen leuchtschwächen zu heißen leuchtstarken Sternen reicht. Man bezeichnet diese Linie als *Hauptreihe*. Etwa achtzig Prozent seines Lebens verbringt ein Stern auf dieser Hauptreihe und gewinnt dabei seine Energie aus der Kernfusion von Wasserstoff zu Helium. Je massereicher er dabei ist, umso heißer und heller ist er und umso schneller verbraucht er seinen Wasserstoff. Während die Sonne rund zehn Milliarden Jahre lang mit ihrem Wasserstoffvorrat auskommen wird, reicht er bei sehr massereichen Sternen nur für rund zehn Millionen Jahre.



Ist der Wasserstoff im Sternzentrum in Helium umgewandelt, so wandert die Zone der Wasserstofffusion in eine Schale um das Zentrum, während dieses unter dem Einfluss der starken Gravitation kontrahiert, bis darin schließlich die Fusion von Helium zu Kohlenstoff zündet. Dabei erzeugt der Stern sehr viel mehr Energie als zuvor, sodass sich seine Hülle enorm aufblähen und zugleich abkühlen.



Hertzsprung-Russell-Diagramm vom Zentrum  
des Kugelsternhaufens Omega Centauri

- Weiße Zwerge → S. 30
- Neutronensterne → S. 36
- Planetarische Nebel → S. 28
- Kollaps-Supernovae → S. 34

Ein roter Riese entsteht, der sehr viel heller ist als der Stern zuvor, aber zugleich auch außen abkühlt und damit rötlicher strahlt. Diese Sterne verlassen die Hauptreihe und wandern im Diagramm nach rechts oben zu den kälteren und helleren Sternen. Weitere Brennphasen können sich für kurze Zeiten anschließen und den Stern im Diagramm hin- und herwandern lassen, bis er schließlich an seinem Lebensende seine äußeren Hälften absprengt oder wegbläst und sein ausgebranntes Zentrum zu einem weißen Zwerg, einem Neutronenstern oder gar einem schwarzen Loch kollabiert (siehe Supernovae ↓).

Bei Sternhaufen, deren Sterne zeitgleich entstanden sind, kann man das Alter am sogenannten *Abknickpunkt* (englisch: *turn-off point*) im Diagramm erkennen – das ist der Punkt auf der Hauptreihe, an dem die Sterne ihren Wasserstoffvorrat im Zentrum fast verbraucht haben und kurz davor stehen, die Hauptreihe nach rechts oben zu verlassen. Links oberhalb dieses Punktes ist die Hauptreihe also bereits entvölkert. Je älter der Sternhaufen ist, umso weiter wandert dieser Punkt nach rechts unten.



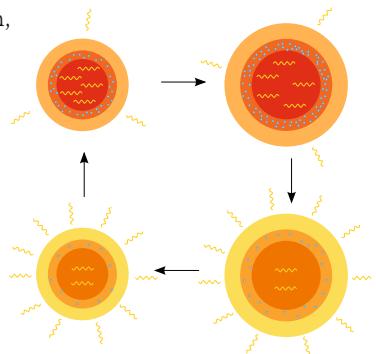
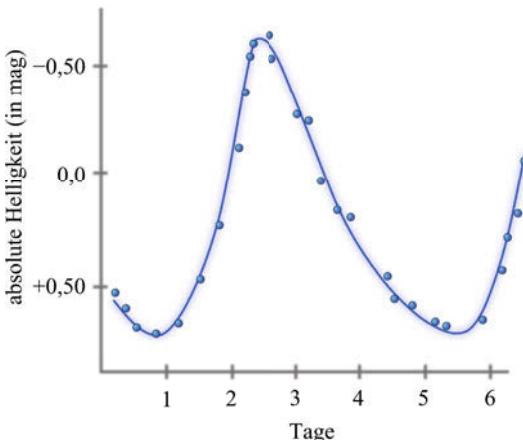
## Cepheiden

### Sterne mit Herzschlag

Sterne sind nicht konstant und unveränderlich: Im Laufe ihres Lebens wandern sie durch das Hertzsprung-Russell-Diagramm (↓). Ihre Größe, Temperatur und ihre Leuchtkraft verändern sich so im Lauf der Jahrtausende.

Es gibt jedoch auch einige Sterne, die sich innerhalb von nur wenigen Tagen radikal verändern, und zwar, indem sie rhythmisch pulsieren. Sie werden *Cepheiden* genannt, nach dem Prototypen des pulsierend veränderlichen Sterns  $\delta$  Cephei. Über eine Periode von wenigen Tagen bis zu drei Monaten kann die Leuchtkraft bis zum vierfachen Wert ansteigen und wieder abfallen. Dabei schwint der Stern auch ein wenig an und wieder ab, gerade wie ein schlagendes Herz.

Die Helligkeit eines Cepheiden schwankt regelmäßig innerhalb weniger Tage.



Der Pulsationszyklus eines Cepheiden

Um zu verstehen, warum Cepheiden ein so ungewöhnliches Verhalten zeigen, sollte man sie sich jedoch weniger wie ein schlagendes Herz als wie einen unter Druck stehenden Kochtopf vorstellen. Es ist der sogenannte

*Kappa-Mechanismus*, der die Cepheiden (und auch die deutlich kleineren RR-Lyrae-Sterne) zum Pulsieren bringt. Diese Sterne sind nämlich sehr leuchtkräftige Riesensterne, d.h. der ursprüngliche Wasserstoff im Inneren ist bereits vollständig in Helium umgewandelt. Ein Teil dieses Heliums bildet eine Schicht aus, in der es zwar im plasmaförmigen Aggregatzustand (↓) vorliegt, aber die Temperatur im Stern einfach nicht groß genug ist, um beide Elektronen vom Kern abzulösen. Es ist also nur einfach ionisiert, d.h. nur ein Elektron wurde vom Kern getrennt und kann sich frei bewegen. Erhöht sich die Temperatur allerdings, so wird das Helium vollständig ionisiert. Damit befinden sich dann deutlich mehr freie Elektronen im Plasma, sodass dieses sehr viel undurchlässiger für Strahlung wird. Diese Undurchlässigkeit für Strahlung wird *Opazität* genannt und besitzt das Formelzeichen  $\chi$  (ein griechisches Kappa), was dem Prozess seinen Namen gegeben hat.



Der Cepheid V1 in der Andromedagalaxie M31

Weil also die Strahlungsdurchlässigkeit in der Heliumschicht im Stern bei höherer Temperatur sinkt, kommt es nun zum Pulsieren: Im Sterneninneren finden die Fusionsprozesse statt, durch die Strahlung freigegeben wird, die durch den Stern an die Oberfläche wandert und dort in den Weltraum abgegeben wird. Weil die Schicht aus vollständig ionisiertem Helium aber durch die hohe Opazität einen Teil der Strahlung abblckt, kann diese nicht aus dem Stern entkommen. Es baut sich im Inneren folglich ein Überdruck und eine erhöhte Temperatur auf, die den Stern expandieren lässt. Die Heliumschicht wird dabei nach außen gedrückt. Dadurch ist sie nicht mehr so nah am Kern, weswegen sie einer geringeren Schwerkraft ausgesetzt ist – sie ist damit nicht mehr so stark zusammengepresst und kühlt sich ab. Dadurch sinkt aber wiederum die Opazität der Schicht: Weil sich ein Teil der freien Elektronen mit den Heliumkernen verbindet, wird die Schicht durchlässiger, und der Stern kann die innere aufgestaute Strahlung nach außen abgeben. Er leuchtet also plötzlich sehr viel heller – der Druck im Kochtopf wird so groß, dass sich der Deckel anhebt und Dampf entweichen kann.

Wenn die aufgestaute Strahlung abgegeben wurde, sinkt der Strahlungsdruck im Sterneninneren wieder – die Schwerkraft kann die Sternmaterie und damit auch die Heliumschicht wieder stärker zusammenziehen, weswegen sich das Helium wieder aufheizt. Als Folge davon wird es wieder vollständig ionisiert und die Opazität steigt wieder. Der Topfdeckel schließt sich, und der Kreislauf beginnt von Neuem.

Cepheiden – die sich ebenso wie die weniger leuchtkräftigen RR-Lyrae-Sterne im Hertzsprung-Russell-Diagramm im sogenannten *Instabilitätsstreifen* befinden – sind besonders gut geeignet um Entfernungen zu bestimmen: Weil es einen strikten Zusammenhang zwischen der Pulsperiode und der absoluten Helligkeit des Sterns gibt, kann man Letztere gut abschätzen. Vergleicht man die auf der Erde gemessene Helligkeit mit diesem absoluten Wert, kann man daraus errechnen, wie weit entfernt der Stern von der Erde ist. Diese Methode funktioniert zwar nur bei Entfernungen bis zu 20 Megaparsec (ungefähr 65 Millionen Lichtjahre) wirklich gut. Trotzdem sind die Cepheiden damit für die Vermessung der näheren Umgebung der Milchstraße sehr wertvoll und zählen zu den sogenannten Standardkerzen (↓).



Der Nebel um den Cepheidenstern RS Pup. Der schwarze Balken in der Mitte verhindert eine Überbelichtung der Kamera.

Standardkerzen → S. 40

A. Unsöld, B. Baschek *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik* Springer Verlag, 7. Auflage 2002  
G. Mühlbauer *Cepheiden: Meilensteine im Universum* In: Sterne und Weltraum – Astronomie in der Schule. Nr. 10, 2003;  
<http://www.sterne-und-weltraum.de/alias/pdf/suw-2003-10-s048-pdf/833982?file>



## Planetarische Nebel

### Das Ende gewöhnlicher Sterne

Sterne gewinnen ihre Energie die meiste Zeit ihres Lebens durch die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium in ihrem Zentrum. Doch was geschieht, wenn dieser Brennstoff dort schließlich verbraucht ist?

Zunächst frisst sich eine Wasserstofffusions-Schale langsam weiter nach außen und nutzt den dort noch vorhandenen Wasserstoff. Der Stern bläht sich dabei zu einem roten Riesen auf und steigert seine Leuchtkraft um mehr als das Tausendfache. Nach und nach presst die Gravitation die Sternmaterie im Zentrum jedoch unbarmherzig immer dichter zusammen, bis dort eine neue Energiequelle zündet: die Fusion von Helium

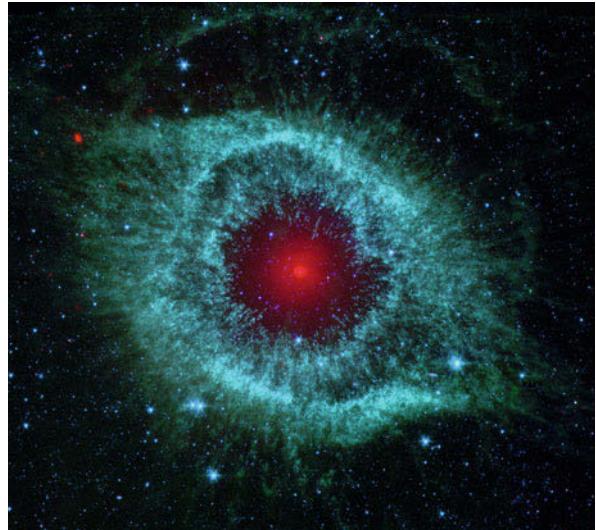
zu Kohlenstoff. Der Stern wird dadurch wieder kleiner und heißer – ein gelber Riese entsteht. Aber auch das Helium geht nach rund 100 Millionen Jahren im Sternzentrum zur Neige, worauf sich eine Heliumfusions-Schale nach außen frisst. Die äußeren Sternschichten blähen sich dabei erneut auf, und der Stern verwandelt sich zum zweiten Mal in einen roten Riesen. Zugleich zieht sich das ausgebrannte Sternzentrum bis auf Erdgröße zusammen und stabilisiert sich schließlich, sofern der Stern weniger als rund acht Sonnenmassen aufweist (andernfalls zünden weitere Fusionsprozesse und der Stern explodiert zuletzt als Supernova ↓).

Der Katzenaugennebel ist einer der schönsten und bekanntesten planetarischen Nebel (links). Er ist weiter außen von einem etwa drei Lichtjahre großen blassen Halo umgeben (rechts).



Die nach außen wandernden Fusionsschalen lassen die aufgeblähte Sternhülle immer instabiler werden – die Fusion beginnt gleichsam zu flackern, wodurch die Sternhülle innerhalb einiger hunderttausend Jahre in mehreren Schüben in den Weltraum geblasen wird und das nackte, nur noch erdgroße und bis zu hunderttausend Grad heiße Sternzentrum freigelegt wird.

Noch gut zehntausend Jahre lang lässt das gleißende Licht des sich langsam abkühlenden Sternzentrums die weggewehten Sternhüllen als planetarischen Nebel in leuchtenden Farben erstrahlen, bis sich diese in den Tiefen des Weltalls verlieren und das immer noch mehrere zehntausend Grad heiße Sternzentrum als weißen Zwerg (↓) zurücklassen. Planetarische Nebel gehören zu den schönsten Himmelserscheinungen überhaupt, wobei der Begriff historisch bedingt ist und nichts mit Planeten zu tun hat.



Der Helixnebel, Infrarotaufnahme des Spitzer Space Telescopes



Jedes Jahr erleidet etwa ein Stern in unserer Milchstraße dieses Schicksal, sodass wir mehrere tausend von ihnen zeitgleich in den unterschiedlichsten Entwicklungsstadien in unserer Milchstraße beobachten können.

Der rote  
Spinnennebel

Weisse Zwerge → S. 30

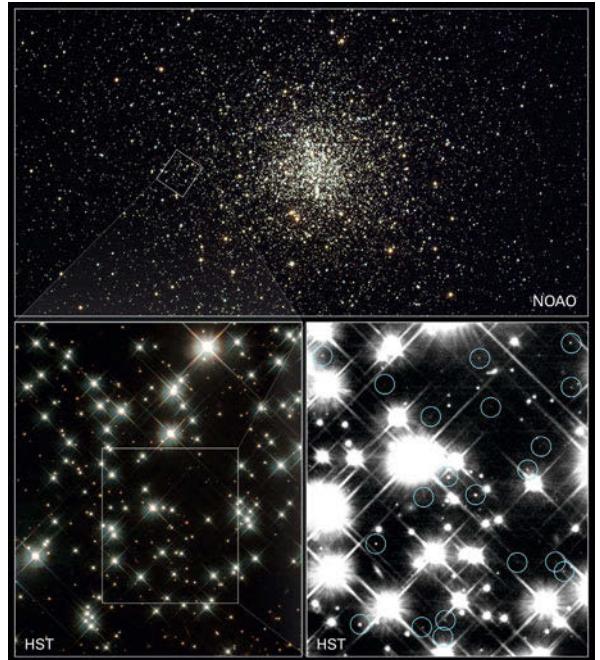
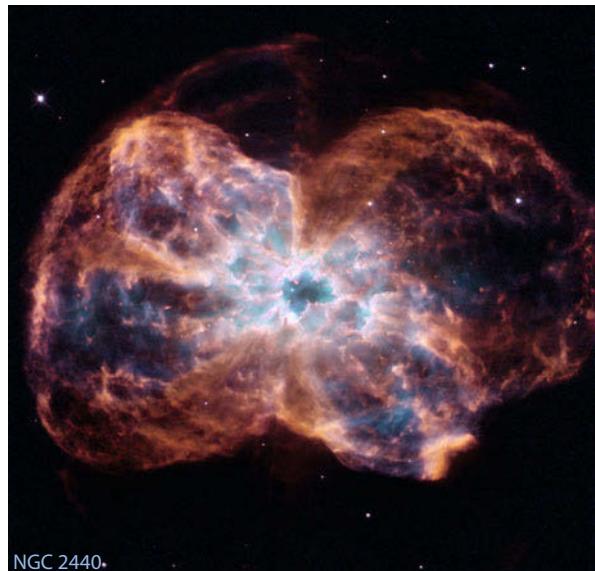
B. Balick *Planetary Nebulae and the Future of the Solar System*  
<http://www.astro.washington.edu/users/balick/WFPC2/index.html>



## Weiße Zwerge

### Ausgebrannte gewöhnliche Sterne

Wenn Sterne wie unsere Sonne am Ende ihres Lebens ihre äußersten Hälften abgestoßen haben, bleibt ihr kompaktes Zentrum als sogenannter *weißer Zwerg* zurück (siehe Planetarische Nebel ↓). Solche Objekte sind nur etwa so groß wie die Erde und damit viel kleiner als die ursprünglichen Sterne. Die meisten von ihnen weisen zwischen 0,5 und 0,7 Sonnenmassen auf – ihre mittlere Dichte ist also sehr groß und liegt bei rund einer Tonne pro Kubikzentimeter. Ein Teelöffel Weißen-Zwerg-Materie wiegt ungefähr so viel wie ein Auto und besteht in den meisten Fällen aus Kohlenstoff und Sauerstoff, die sich als Endprodukte der Fusionsprozesse im Sternzentrum gebildet haben.



Im rund 12 Milliarden Jahre alten Kugelsternhaufen M4 wimmelt es nur so vor weißen Zwergen (markiert durch die hellblauen Kreise).



Zu Beginn ist ein solches freigelegtes Sternzentrum viele zehntausend Kelvin heiß. Der mit rund 200 000 Kelvin heißeste bekannte weiße Zwerg befindet sich im Inneren des planetarischen Nebels NGC 2440, der die expandierende Hülle des ursprünglichen Sterns darstellt.



Künstlerische Darstellung des Sirius-Doppelsternsystems mit Sirius A (links) und dem weißen Zwerp Sirius B (rechts)

Da weiße Zwerge in ihrer extrem kompakten Materie sehr viel Wärmeenergie speichern können und zugleich nur eine kleine Oberfläche besitzen, zieht sich ihre allmähliche Abkühlung über viele Milliarden Jahre hin. Einer der bekanntesten weißen Zwerge in unserer Nachbarschaft ist Sirius B – der kleine Begleiter des hellsten Sterns am Nachthimmel (Sirius A). Sirius B ist nur rund 8,6 Lichtjahre von uns entfernt, knapp eine Sonnenmasse schwer und etwas kleiner als die Erde. Seit etwa 120 Millionen Jahren kühlt er langsam ab und ist immer noch rund 25 000 Kelvin heiß.

Die Schwerkraft auf der Oberfläche eines weißen Zwerges ist enorm: Sie ist mehrere hunderttausendmal so groß wie die Schwerkraft auf der Erdoberfläche. Damit der weiße Zwerp nicht zusammengedrückt wird, muss ein entsprechender Gegendruck existieren. Er wird vom quantenmechanischen Pauli-Prinzip ( $\downarrow$ ) erzeugt, nach dem Elektronen es vermeiden, einander zu nahe zu kommen. Genau dieses Prinzip sorgt beispielsweise auch dafür, dass sich ein Stück Metall nicht

ohne Weiteres zusammendrücken lässt. Man kann sich die Materie eines weißen Zwerges tatsächlich so ähnlich wie sehr heißes, extrem dichtes flüssiges Metall vorstellen. Man spricht auch von entarteter Materie und vom *Entartungsdruck*.

Je mehr Masse ein weißer Zwerp besitzt, umso kleiner ist er, da ihn die stärker werdende Schwerkraft zunehmend zusammendrückt. Nimmt ein weißer Zwerp beispielsweise von einem Begleitstern immer mehr Masse auf, so kann ab etwa 1,4 Sonnenmassen (der sogenannten *Chandrasekhar-Grenze*) das Pauli-Prinzip nicht mehr genug Gegendruck erzeugen, und der weiße Zwerp beginnt zu kollabieren, wodurch in den meisten Fällen explosionsartig die Fusion des in ihm enthaltenen Kohlenstoffs gestartet wird und eine thermonukleare Supernova ( $\downarrow$ ) den weißen Zwerp komplett zerreißt.

Größenvergleich zwischen Sirius B und der Erde



# Thermonukleare Supernovae

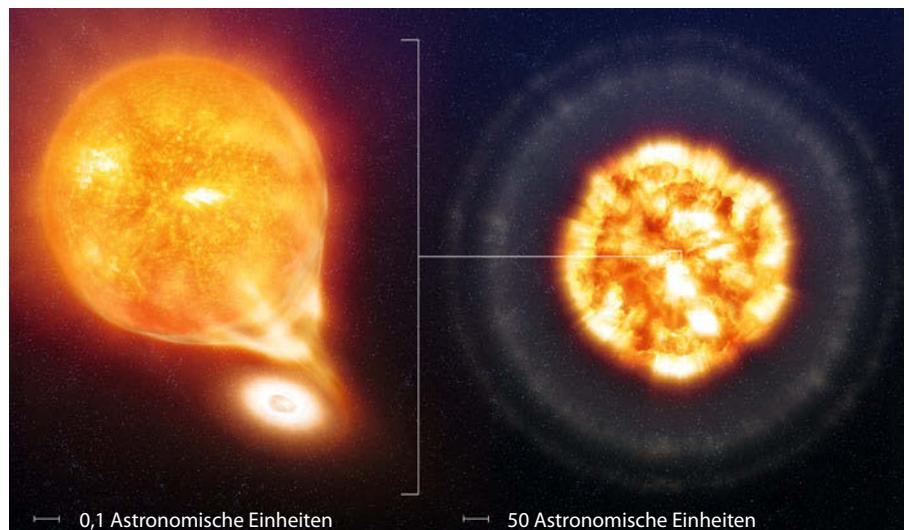
Wenn weiße Zwerge zu nuklearen Bomben werden

Sobald ein Stern mit weniger als rund acht Sonnenmassen seinen Fusionsbrennstoff verbraucht hat, bläst er seine äußeren Hälften als planetarischen Nebel ( $\downarrow$ ) in den Weltraum hinaus, wobei sein etwa erdgroßes Zentrum als weißer Zwerg ( $\downarrow$ ) übrig bleibt. Normalerweise geschieht mit diesem weißen Zwerg dann nichts Spektakuläres mehr – er kühlt einfach nur sehr langsam ab.

Wenn jedoch der weiße Zwerg in einem Doppelsternsystem einen nahegelegenen Nachbarstern besitzt und sich dieser an seinem Lebensende zu einem roten Riesen aufbläht, dann kann Gas aus dessen ausgedehnter Hülle auf den weißen Zwerg herabfallen. Der weiße Zwerg wird dadurch immer massereicher, bis eine kritische Massengrenze erreicht ist: die *Chandrasekhar-Grenze*, die bei rund 1,4 Sonnenmassen liegt. Oberhalb dieser Grenze besitzt der weiße Zwerg nicht mehr genug Gegendruck, um seiner eigenen Gravitation standzuhalten. Er beginnt zu kollabieren, wobei Dichte und Temperatur steil ansteigen.

Künstlerische Darstellung der Supernova 2006X, kurz vor (links) und 20 Tage nach der Explosion (rechts)

Anders als die Sternzentren massereicher Sterne besteht ein weißer Zwerg jedoch nicht aus Eisen, sondern er enthält meist große Mengen Kohlenstoff, die als Fusionsbrennstoff dienen können. Daher kollabiert ein solcher weißer Zwerg nicht zu einem Neutronenstern, sondern seine anwachsende Dichte und Temperatur zünden schließlich die Fusion von Kohlenstoff zu schwereren Atomkernen. Dieser Fusionsprozess läuft explosionsartig ab und zerstört den weißen Zwerg schließlich komplett. Er verwandelt sich dabei in eine erdgroße Atombombe. Eine thermonukleare Supernova (Typ Ia genannt) entsteht, deren Explosion ähnlich großen Energiemengen freisetzt wie eine Kollaps-Supernova ( $\downarrow$ ).





Supernova SN 1994D (heller Punkt unten links)

Die Supernova leuchtet so hell wie eine ganze Galaxie, wie die Aufnahme der Supernova 1994D am Rand der Galaxie NGC 4526 zeigt.

Die Leuchtkraftentwicklung ist bei allen thermonuklearen Supernovae recht ähnlich, sodass sich daraus ihre Entfernung gut ablesen lässt – man nennt sie daher *Standardkerzen* (↓). In den 1990er Jahren fand man mit ihrer Hilfe heraus, dass unser Universum mit der

Zeit immer schneller expandiert. Für diese Entdeckung erhielten Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt und Adam G. Riess im Jahr 2011 den Physik-Nobelpreis.

Die bekannteste thermonukleare Supernova ereignete sich vor über tausend Jahren am 1. Mai des Jahres 1006. Aufgrund der relativ geringen Entfernung von rund 7000 Lichtjahren war sie so hell, dass man nachts in ihrem Licht sogar lesen konnte. Das Bild unten links zeigt den Überrest dieser Supernova, dessen Durchmesser heute bei rund 70 Lichtjahren liegt. Eine andere bekannte thermonukleare Supernova ist SN 1572, die am 11. November 1572 erschien und von dem bekannten dänischen Astronom Tycho Brahe detailliert beobachtet wurde. Sie machte den Menschen der damaligen Zeit deutlich, dass auch Fixsterne sich verändern. Das Bild in der Mitte unten zeigt den Überrest von SN 1572 als rötliche Wolke oben links.

Thermonukleare Supernovae können sehr wahrscheinlich auch durch das Verschmelzen zweier weißer Zwerge entstehen. In diesem Fall bleibt nach der Supernova kein Partnerstern übrig, so wie bei Supernova-Überrest SNR 0509–67.5, der sich in der Großen Magellan'schen Wolke befindet.

Röntgenaufnahme von SN 1006 (Chandra)



Tycho Supernova SN 1572 (rote Wolke oben links im Bild)



SNR 0509–67.5 in der Großen Magellan'schen Wolke



Standardkerzen → S. 40

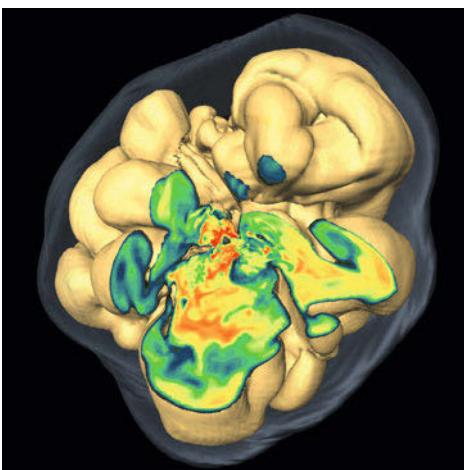
A. W. A. Pauldrach *Dunkle kosmische Energie* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010



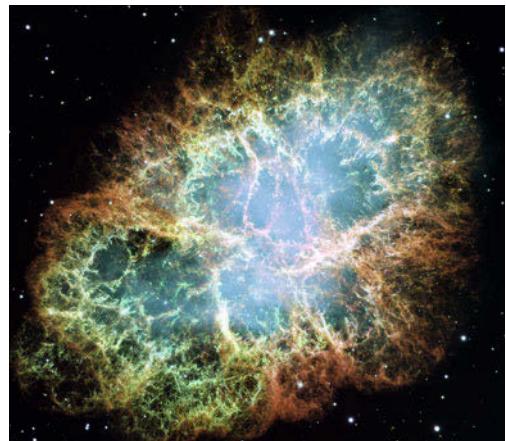
## Kollaps-Supernovae

### Das Ende massereicher Sterne

Erlischt bei einem Stern mangels Brennmaterial die Kernfusion in seinem Zentrum, so zieht die dort wirkende sehr starke Gravitation dieses Sternzentrum immer dichter zusammen. Bei massereichen Sternen mit mehr als etwa acht Sonnenmassen ist die Schwerkraft im Sterninneren so stark, dass sie die Elektronen der Atomkerne in die Protonen hineindrückt, sodass diese sich dabei in Neutronen umwandeln, wobei pro Neutron ein sogenanntes Elektron-Neutrino ( $\downarrow$ ) entsteht. Das Sternzentrum verliert dadurch seinen Gegendruck, der zuvor noch von den Elektronen erzeugt wurde, und kollabiert innerhalb von Millisekunden im freien Fall zu einem nur wenige Kilometer großen Neutronenstern ( $\downarrow$ ). Dabei entsteht ein unsichtbarer Blitz aus Neutrinos, die fast die gesamte Energie des Kollapses mit sich forttragen. Eine Supernova bahnt sich an.



Simulation einer Supernova



Der Krebsnebel, ein Supernovaüberrest

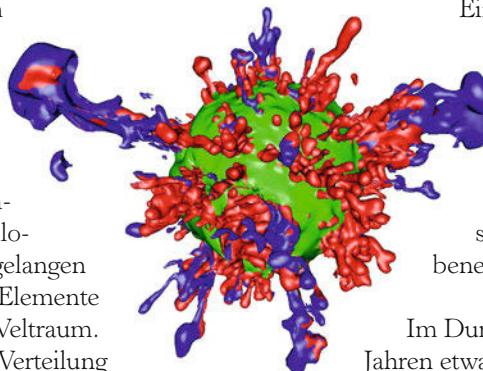
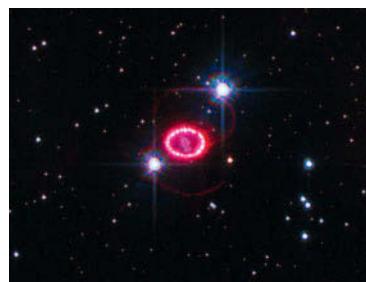
Die Sternschichten außerhalb des Zentrums fallen nun als Stoßwelle auf den Neutronenstern herab. Diese Stoßwelle wird an dem kompakten Neutronenstern reflektiert und läuft dann von innen nach außen durch den Stern hindurch. Dabei wird die Sternmaterie so stark verdichtet, dass selbst viele der im Zentrum entstandenen geisterhaften Neutrinos in ihr hängenbleiben und sie zusätzlich anheizen.

Mittlerweile gelingt es, die dabei ablaufenden turbulenten Prozesse in aufwendigen Computerberechnungen mit immer besserer Genauigkeit zu simulieren. Die Simulation links zeigt das Zentrum einer Supernova etwa 0,5 Sekunden nach dem Kollaps des Kerns. Die schwach bläulich dargestellte Stoßfront hat einen Radius von etwa 1900 Kilometern.

Erst einige Stunden nach dem zentralen Kollaps wird eine Supernova von außen sichtbar, denn erst dann erreicht die energiegeladene Stoßwelle die Sternoberfläche und sprengt die äußeren Sternschichten mit mehreren Millionen Kilometern pro Stunde ab. Dabei gelangen auch große Mengen schwerer Elemente aus dem Sternzentrum in den Weltraum. In der Simulation rechts ist die Verteilung der schweren Elemente Kohlenstoff (grün), Sauerstoff (rot) und Nickel (blau) in einer Supernova gezeigt, kurz nachdem die Stoßwelle die (nicht dargestellte) Sternoberfläche durchbrochen hat, was etwa zweieinhalb Stunden nach dem Kollaps geschieht.

Nach ihrem Erscheinen leuchtet eine Supernova für einige Wochen so hell wie eine ganze Galaxie und verblasst dann allmählich. Im Jahr 1987 gelang es zufällig, in großen unterirdischen Neutrinos detektoren etwa 30 Neutrinos nachzuweisen, die beim Kernkollaps der etwa 150 000 Lichtjahre entfernten Supernova SN 1987A in der Großen Magellan'schen Wolke (einer kleinen Nachbargalaxie der Milchstraße) entstanden waren. Erst rund drei Stunden später konnte man die Supernova auch optisch erkennen.

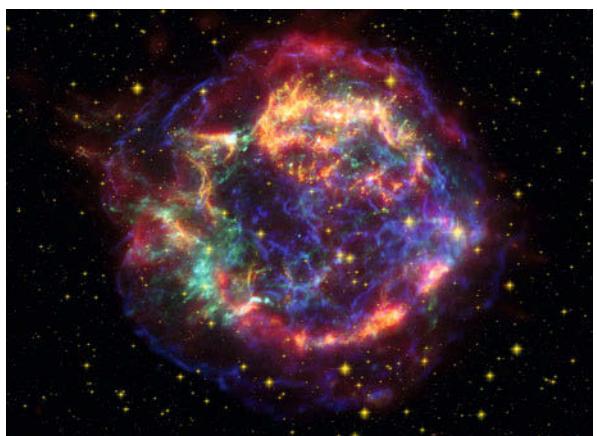
Die Supernova 1987 A, aufgenommen vom Hubble Space Telescope im Jahr 2010



Eine berühmte Supernova in unserer eigenen Galaxis wurde im Jahr 1054 beobachtet. Ihre mit 1500 km/s weiterhin expandierenden Überreste bilden heute den etwa 6300 Lichtjahre entfernten Krebsnebel, in dessen Zentrum sich der übrig gebliebene Neutronenstern befindet.

Im Durchschnitt ereignen sich in hundert Jahren etwa ein bis zwei Supernovae in unserer Milchstraße. Einer der jüngsten Supernovaüberreste in unserer Galaxis ist in rund 11 000 Lichtjahren Entfernung Cassiopeia A, deren Licht unsere Erde etwa im Jahr 1680 erreicht hätte, wenn sie nicht von großen interstellaren Staubwolken verdunkelt worden wäre. In dem folgenden Falschfarbenbild von Cassiopeia A ist infrarote Strahlung rot, sichtbares Licht gelb und Röntgenstrahlung grün und blau dargestellt. Der blaugrüne Punkt im Zentrum ist der übrig gebliebene Neutronenstern.

Cassiopeia A



## Neutronensterne

### Ausgebrannte massereiche Sterne

Neutronensterne sind die kollabierte Zentren ausgebrannter massereicher Sterne und damit die Überreste sogenannter Kollaps-Supernovae (↓). Ihre Masse liegt über der Chandrasekhar-Grenze von etwa 1,4 Sonnenmassen, sodass der Entartungsdruck der Elektronen nach dem Pauli-Prinzip nicht mehr ausreicht, den Kollaps des Sternzentrums nach dem Ende der Fusionsprozesse aufzuhalten. Anders als beim Kollaps weißer Zwerge (↓) zündet dabei aber keine thermonukleare Explosion, da die Materie bereits in Form des stabilsten Atomkerns vorliegt: als Eisen. Die Elektronen werden stattdessen beim Kollaps gleichsam in die Protonen hineingedrückt, die dadurch in Neutronen umgewandelt werden. Erst der Entartungsdruck dieser Neutronen genügt dann wieder, um den Neutronenstern



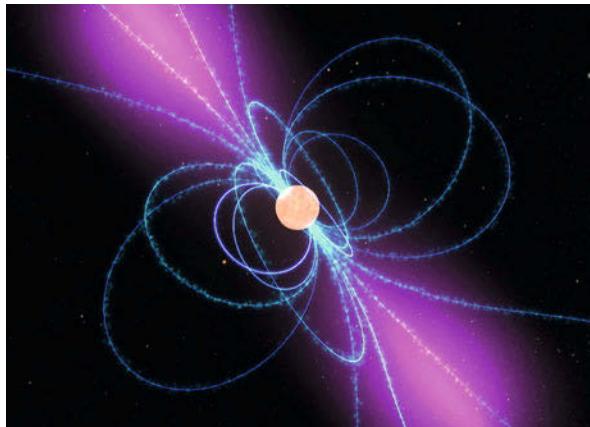
Kollaps-Supernovae → S. 34  
 Thermonukleare Supernovae → S. 32  
 Weiße Zwerge → S. 30



Die Umgebung des Pulsars im Krebsnebel. Sichtbares Licht ist rot und Röntgenlicht blau dargestellt.

bis zur sogenannten Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Massengrenze zu stabilisieren, die bei rund 1,5 bis 3 Sonnenmassen liegt. Noch schwerere Sternzentren kollabieren zu einem schwarzen Loch.

Mit einem Durchmesser von rund zwanzig Kilometern sind Neutronensterne absolut winzig im Vergleich zu dem Stern, aus dem sie entstanden sind. Sie sind nur so groß wie eine Großstadt. Ungefähr so wie im Bild links würde es aussehen, wenn ein Neutronenstern über der Stadt New York schwebt, wobei weder New York noch die Erde das lange überleben würden – der Neutronenstern würde alles innerhalb von Sekundenbruchteilen verschlingen.



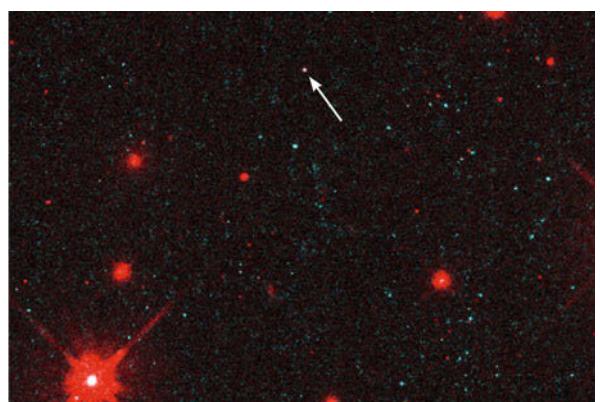
Geladene Teilchen bewegen sich entlang der Magnetfeldlinien (blau) eines Pulsars, wodurch ein Gammastrahl entsteht (lila).

Neutronensterne sind die extremsten stabilen Objekte im Universum, die wir kennen – man kann sie sich als stadtgroße Atomkerne mit der Masse mehrerer Sonnen vorstellen. Ihre Materie ist mit einer Dichte von rund hundert Millionen Tonnen pro Kubikzentimeter die dichteste bekannte stabile Materieform, und die Schwerkraft auf ihrer Oberfläche ist hundert Milliarden Mal größer als die Schwerkraft auf der Erdoberfläche.

Junge Neutronensterne besitzen unglaublich starke Magnetfelder von rund hundert Millionen Tesla. Zugleich rotieren sie meist mehrere Male pro Sekunde – der größte bisher gemessene Wert liegt bei rund 700 Umdrehungen pro Sekunde (Pulsar PSR J1748-2446ad). Wenn die Achse des Magnetfeldes gegen die Rotationsachse geneigt ist, so wird Radiostrahlung in der Richtung der Magnetachse ausgesandt, ähnlich dem Lichtstrahl eines rotierenden Leuchtturms. Die Sendeleistung kann dabei die Strahlungsleistung der Sonne um das Hunderttausendfache übertreffen.

Trifft der Radiostrahl bei jeder Rotation die Erde, so empfängt man eine sehr gleichmäßig gepulste periodische Radiostrahlung, die Forscher anfangs fälschlicherweise für außerirdische Signale hielten – man spricht heute daher auch von *Pulsaren*. Neben Radiowellen senden Pulsare auch andere elektromagnetische Wellen aus, u.a. intensive Röntgen- und Gammastrahlung. Die abgestrahlte Energie stammt aus der Rotationsenergie des Pulsars, der dadurch innerhalb einiger Millionen Jahre weitgehend abgebremst wird.

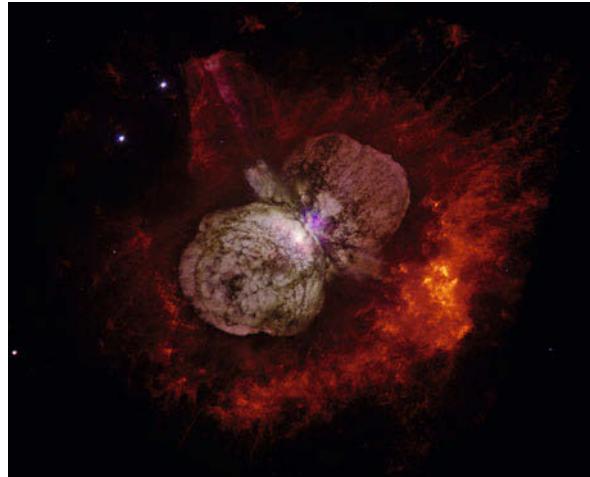
Einer der bekanntesten Pulsare liegt im Krebsnebel in rund 6000 Lichtjahren Entfernung. Das Licht der zugehörigen Kollaps-Supernova erreichte die Erde im Jahr 1054 – wir sehen den Pulsar also heute in einem Alter von rund tausend Jahren. Er rotiert etwa 30 Mal in der Sekunde. Auf dem Bild links sehen wir die unmittelbare sehr dynamische Umgebung dieses Pulsars, wobei sichtbares Licht rot und Röntgenstrahlung blau dargestellt ist.



Aufnahme des Neutronensterns RX J185635-3754 im sichtbaren Licht (Pfeil). Mit rund 500 Lichtjahren Entfernung ist er der uns am nächsten liegende bekannte Neutronenstern.

# Monstersterne und Hypernovae

Das kurze Leben und explosive Ende sehr massereicher Sterne



Der Monsterstern  $\eta$  Carinae mit dem Homunkulus-Nebel

Beenden extrem schwere Sterne mit über 15 bis 20 Sonnenmassen ihr kurzes Leben, so kann das kollabierende Sternzentrum so viel Masse besitzen, dass auch der starke Gegendruck eines Neutronensterns der mörderischen Gravitation nicht standhalten kann. Man vermutet, dass das Sternzentrum dann direkt zu einem sehr schnell rotierenden schwarzen Loch kollabiert ( $\downarrow$ ). Eine normale Kollaps-Supernova ( $\downarrow$ ) kann in diesem Fall nicht entstehen, da die nach innen laufende Stoßwelle nicht mehr an einem Neutronenstern reflektiert werden kann.

Vermutlich entsteht bei diesem Kollaps anstelle einer Supernova eine sogenannte *Hypernova*. Die in das rotierende schwarze Loch spiralförmig hineinstürzende



Künstlerische Darstellung der Entstehung eines Gammablitzes

Materie setzt dabei enorme Energiemengen frei, die über sich verdrillende starke Magnetfelder zur Ausbildung zweier Jets entlang der Rotationsachse führen. In diesen Jets werden Teilchen fast mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum geschleudert, wobei für einige Minuten auch sehr energiereiche Gammastrahlung entsteht.

Zeigt dieser Jet wie der Strahl eines Leuchtturms zufällig in unsere Richtung, so können wir ihn auch bei einer viele Milliarden Lichtjahre entfernten Hypernovae noch als *Gammablink* am Himmel messen. Jeden Tag erreichen uns etwa zwei bis drei dieser Gammablitze aus den Tiefen des Universums.

Sterne, die genügend Masse für eine Hypernova besitzen, sind selten – je schwerer, umso seltener. Ein wahrer Monsterstern ist mit gut hundert Sonnenmassen der Stern  $\eta$  Carinae, der sich in knapp zehntausend Lichtjahren Entfernung von uns befindet.

Je schwerer ein Stern ist, umso schneller verbraucht er seinen Fusionsbrennstoff, um der starken Gravitation genügend Druck entgegenzusetzen.  $\eta$  Carinae leuchtet fast fünf Millionen Mal so hell wie die Sonne und ist mit rund 40 000 Kelvin Oberflächentemperatur fast siebenmal heißer. Immer wieder kommt es zu supernovaartigen Ausbrüchen. Bei einem solchen Ausbruch in den 1840er Jahren entstand der hantelförmige Hohmunkulusnebel, der in der Abbildung auf der vorhergehenden Seite zu sehen ist.

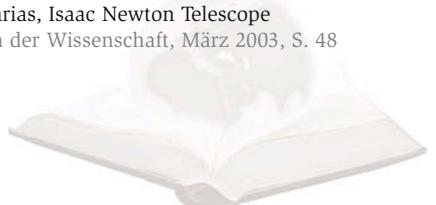
Da  $\eta$  Carinae seinen Fusionsbrennstoff sehr schnell verbraucht, beträgt seine Lebensdauer nur wenige Millionen Jahre. Die Ausbrüche zeigen, dass er bereits jetzt beginnt, instabil zu werden. Er könnte schon innerhalb der nächsten hunderttausend Jahre als Hypernova explodieren.

Massereiche Sterne, die zeitlich nicht mehr weit von dem Kollaps ihres Zentrums entfernt sind, erscheinen oft als sogenannte *Wolf-Rayet-Sterne*. Diese sehr heißen Sterne haben bereits das Rote-Riesen-Stadium hinter sich gelassen und sind dabei, ihre äußeren Hälften in den Weltraum hinauszublasen und ihr massives Zentrum freizulegen. Im Bild unten sehen wir die abgestoßene Hülle des Wolf-Rayet-Sterns WR 136, die den sogenannten Sichelnebel (NGC 6888) bildet.



Der Sichelnebel  
NGC 6888  
(Crescent  
Nebula)

Bild mit freundlicher Genehmigung von Daniel López, Instituto de Astrofísica de Canarias, Isaac Newton Telescope  
N. Gehrels, L. Piro, P.J.T. Leonard *Die stärksten Explosionen im Universum* Spektrum der Wissenschaft, März 2003, S. 48



# Standardkerzen

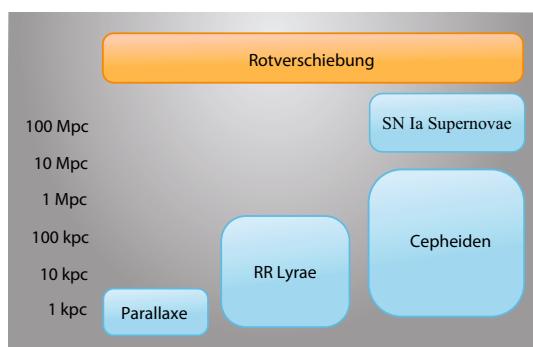
## Leuchttürme im All

Wie weit sind Sterne von uns entfernt? Diese Frage ist gar nicht so leicht zu beantworten: Wenn wir mit dem Teleskop ein schwaches Leuchten am Himmel entdecken, handelt es sich dann um einen kleinen, nahen, nicht besonders hellen Stern? Oder vielleicht doch um ein sehr helles Objekt, das einfach nur sehr weit von uns entfernt ist und uns deshalb so leuchtschwach erscheint? Und wie können wir solche Objekte unterscheiden?

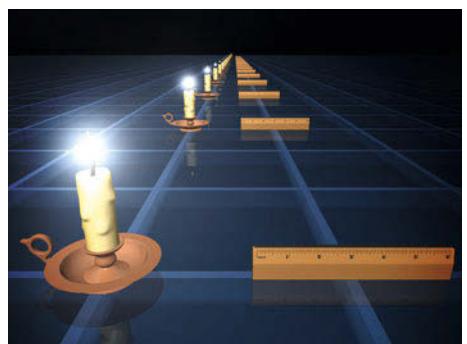
Nun gibt es zwar einige Methoden zur Entfernungsbestimmung astronomischer Objekte, die nichts mit der Leuchtkraft zu tun haben. Diese sind aber, wie zum Beispiel die Parallaxenmethode, nur innerhalb unserer Milchstraße mit zuverlässiger Genauigkeit, oder aber, wie die Rotverschiebung, erst für wirklich große Distanzen jenseits unserer eigenen Galaxiengruppe anwendbar. Für den Bereich dazwischen, also um zum Beispiel die Entfernung zu einigen der benachbarten Galaxien genau zu messen, benötigt man sogenannte **Standardkerzen**.

Standardkerzen sind Sterne oder andere astronomische Objekte, bei denen man davon ausgehen kann, dass sie eine bekannte, feste absolute Helligkeit haben. Aus der scheinbaren Helligkeit, also derjenigen, die man auf der Erde misst, kann man dann zurückrechnen, wie weit die Standardkerze entfernt ist. Je schwächer sie erscheint, desto weiter entfernt muss sie sein (wenn man weiß, dass sich zwischen der Standardkerze und der Erde nicht zufällig größere Mengen interstellaren Staubes befinden, die einen Teil der Strahlung verschlucken und damit die scheinbare Helligkeit weiter herabsetzen).

Wie findet man diese genormten Sterne? Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten: Zum einen kann man nach Sternen Ausschau halten, deren Helligkeit rhythmisch pulsiert. In diese Klasse fallen die Cepheiden ( $\downarrow$ ) und die RR-Lyrae-Sterne. Bei diesen Sternen besteht ein genauer Zusammenhang zwischen der Dauer eines „Pulsschlags“ und ihrer absoluten Helligkeit: Je langsamer sie pulsieren, desto heller strahlen sie.

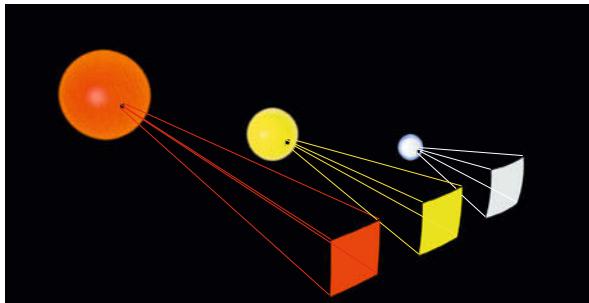


Verschiedene Methoden zur Entfernungsbestimmung sind für verschiedene Bereiche anwendbar.



Cepheiden → S. 26

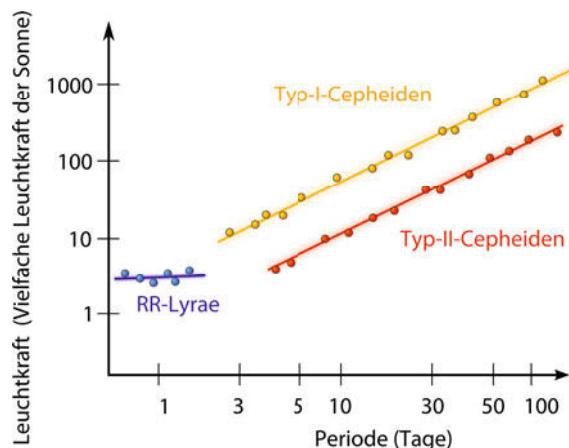
A. Unsöld, B. Baschek *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik* Springer Verlag, 7. Auflage 2002  
[Astronews.com Kosmische Entfernungsmesser](http://www.astronews.com/news/artikel/2007/02/0702-007.shtml) <http://www.astronews.com/news/artikel/2007/02/0702-007.shtml>



Die von uns wahrnehmbare, scheinbare Helligkeit eines Sterns wird von seiner absoluten Helligkeit und seiner Entfernung zur Erde bestimmt.

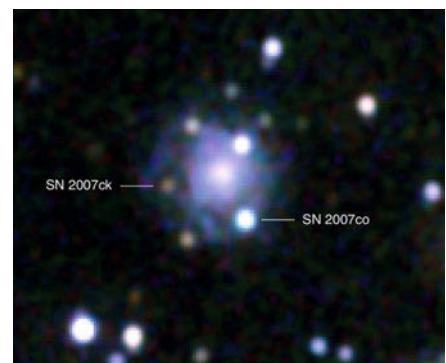
Damit eignen sie sich hervorragend als Standardkerzen. Sie sind leuchtstark genug, sodass man sie auch noch jenseits der Milchstraße erkennen kann. So waren es Cepheiden, mit denen man im Jahre 1923 zum ersten Mal wirklich bestätigen konnte, dass der Andromedanebel sich außerhalb der Milchstraße befinden muss – und damit eine eigene Galaxie darstellt.

Zwischen der Leuchtkraft und der Pulsdauer vieler pulsationsveränderlicher Sterne gibt es eine feste Beziehung.



Außer den pulsierenden Sternen werden auch thermonukleare Supernovae (↓) als Standardkerzen verwendet. Da Supernovae enorme Energiemengen freisetzen, eignen sie sich auch noch für sehr weite Entfernungen von mehreren Milliarden Lichtjahren. In diesen Supernovaexplosionen geht man davon aus, dass die Menge der bei der Explosion freigesetzten Energie immer fast gleich groß ist. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass weiße Zwerge, also diejenigen Objekte, die diese Supernovaexplosionen verursachen, alle eine ähnliche Masse besitzen und sich ihre Zusammensetzung kaum unterscheidet. Damit sind sie, wenn sie dann explodieren, auch immer ungefähr gleich hell und können als Standardkerzen verwendet werden.

Gerade letztere Methode besitzt aber noch Unsicherheiten. Um diese auszuräumen müsste man die genauen Mechanismen der Explosion noch besser verstehen, was Gegenstand intensiver, aktueller Forschung ist. Trotzdem ist es mithilfe des Einsatzes von Supernovae als Standardkerzen gelungen, nachzuweisen, dass sich das Universum gegenwärtig wohl deutlich schneller ausdehnt als bisher angenommen, was ein starker Hinweis auf die geheimnisvolle dunkle Energie (↓) ist.



Thermonukleare Supernovae → S. 32  
Beschleunigte Expansion und dunkle Energie → S. 152

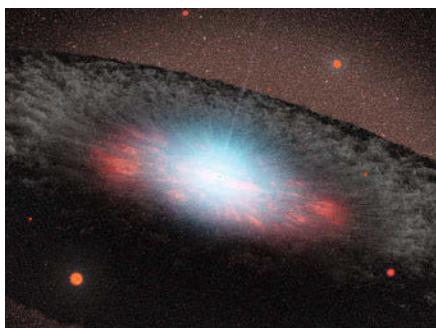


# Supermassive schwarze Löcher

## Schwerkraftmonster in den Zentren der Galaxien

Beim Kollaps besonders massereicher Sterne entstehen stellare schwarze Löcher mit Massen im Bereich zwischen 2,5 und einigen zehn Sonnenmassen (↓). Es gibt aber wesentlich massereichere schwarze Löcher, die mehrere

Millionen oder gar Milliarden Sonnenmassen aufweisen. Man nennt sie *supermassive* oder auch *supermassereiche schwarze Löcher*. Sie befinden sich in den Zentren der meisten Galaxien und können dort zur Freisetzung extremer Energiemengen führen, wenn genügend viel Materie auf Spiralbahnen in einer *Akkretionsscheibe* in sie hineinstürzt und sich dabei extrem aufheizt.



Künstlerische Darstellung eines supermassiven schwarzen Lochs im Zentrum einer Galaxie

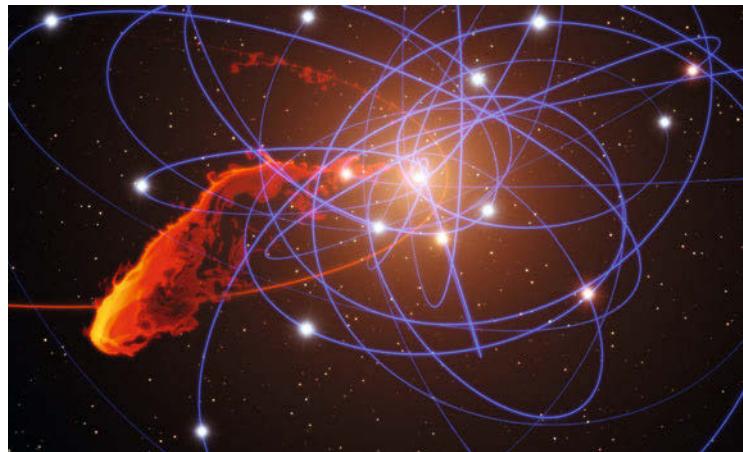


Umgebung des supermassiven schwarzen Lochs Sgr A\* im Zentrum der Milchstraße, aufgenommen im Röntgenlicht

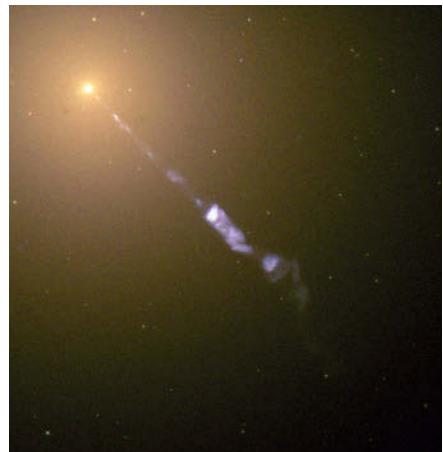
Galaxien mit besonders großer Energiefreisetzung in ihrem Zentrum nennt man *aktive Galaxien*, wobei das Zentrum selbst auch als *Quasar* bezeichnet wird. Aufgrund ihrer großen Leuchtkraft lassen sich Quasare auch in extrem großen Entfernung noch nachweisen. Bereits knapp eine Milliarde Jahre nach dem Urknall leuchteten die ersten Quasare auf. Supermassive schwarze Löcher müssen also bereits im frühen Universum entstanden sein, als die Materiedichte noch sehr viel größer war als heute. Vermutlich spielten dabei die damals recht häufigen Kollisionen von Galaxien (↓) eine wichtige Rolle.

Auch unsere Milchstraße besitzt ein supermassives schwarzes Loch in ihrem Zentrum: Sagittarius A\* (Sgr A\*), das rund vier Millionen Sonnenmassen aufweist. Allerdings hungrig Sgr A\* heutzutage meist – es stürzt also normalerweise nur wenig Materie in dieses schwarze Loch, sodass es im Zentrum der Milchstraße meistens relativ ruhig zugeht.

Es ist mittlerweile gelungen, die elliptischen Bahnkurven von einzelnen Sternen um Sgr A\* herum zu beobachten und so nachzuweisen, welche große Masse sich dort im Brennpunkt der Bahnkurven (blaue Linien im Bild auf der folgenden Seite links oben) befinden muss. Besonders interessant ist, dass im Jahr 2013 eine größere Gaswolke auf einer elliptischen Bahn (rote Linie) Sgr A\* in engem Abstand passiert, sodass wir in der Gegenwart Zeuge davon sind, wie größere Materiemengen in das zentrale schwarze Loch unserer Milchstraße stürzen – ein Vorgang, der in unserer Heimatgalaxie so noch nie beobachtet werden konnte.



Simulierte Position der Gaswolke für das Jahr 2021, nachdem sie im Jahr 2013 das schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße passiert hat



Die Galaxie M87 mit Jet

Besonders massereiche schwarze Löcher findet man im Zentrum elliptischer Riesengalaxien. So enthält die etwa 54 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie M87 ein schwarzes Loch, das mit rund 7 Milliarden Sonnenmassen über tausendmal schwerer als Sgr A\* ist. Das schwarze Loch stößt einen Jet aus extrem energiereichen Teilchen aus, der mindestens 5000 Lichtjahre weit in den Weltraum hinaus reicht (siehe auch aktive Galaxien ↓).

In rund 3,5 Milliarden Lichtjahren Entfernung befindet sich im Zentrum des Quasars OJ 287 ein außergewöhnlich schweres schwarzes Loch mit achtzehn Milliarden Sonnenmassen. Dieses extrem massive schwarze Loch wird von einem deutlich kleineren schwarzen Loch mit hundert Millionen Sonnenmassen auf einer stark elliptischen Bahn alle zwölf Jahre umlaufen, wobei das kleinere schwarze Loch pro Umlauf zweimal relativ kurz hintereinander die Akkretionsscheibe des größeren schwarzen Lochs durchdringt, was zu hellen Strahlungsausbrüchen führt. Damit konnte man die Umlaufbahn des kleineren schwarzen Lochs recht genau bestimmen und nachweisen, dass es große Mengen an Bahnenergie in Form von Gravitationswellen (↓)

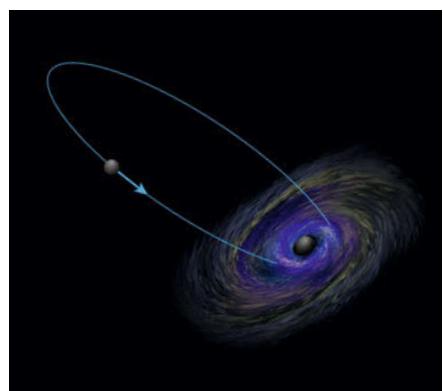


Illustration zum Quasar OJ 287

abstrahlt, und zwar genau in dem Ausmaß wie von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (↓) vorhergesagt. In nur 10000 Jahren werden die beiden schwarzen Löcher voraussichtlich miteinander verschmelzen.

Aktive Galaxien → S. 44

Gravitationswellen → S. 166

Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie → S. 130

ESO Video News Release 36 *A Black Hole's Dinner is Fast Approaching* (eso1151b) <http://www.eso.org/public/videos/eso1151b/>



## Aktive Galaxien

### Intergalaktische magnetische Energieschleudern



Centaurus A, mit einer Entfernung von elf Millionen Lichtjahren die uns nächste aktive Galaxie

Man nimmt heute an, dass in den meisten Galaxien ein rotierendes, supermassives schwarzes Loch ( $\downarrow$ ) zu finden ist. Einige davon – so wie zum Beispiel Sagittarius A\*, das schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße – sind „ruhend“. Das bedeutet, sie werden von einer Vielzahl von Sternen auf relativ stabilen Bahnen umkreist, und sie emittieren nur eine moderate Menge an Strahlung.

Im Zentrum anderer Galaxien wiederum geht es dagegen hoch her: Die dort enthaltenen supermassiven schwarzen Löcher sind extrem massereich und ziehen deshalb eine enorme Menge an Sternen und interstellarem Gas aus ihrer Umgebung an.

Die Sterne verlieren dabei durch die starken Gravitationskräfte ihren Zusammenhalt und werden auseinandergerissen. Um das schwarze Loch herum bildet sich ein unentrinnbarer Strudel aus Sternenplasma, Gas und Staub, die sogenannte *Akkretionsscheibe*. Diese versorgt das schwarze Loch unablässig mit Materie, die schlussendlich im schwarzen Loch verschwindet.

Bei einem solchen Vorgang heizt sich die Materie durch innere Reibung und frei werdende Gravitationsenergie extrem stark auf und gibt diese Hitzeenergie als extrem hochenergetische Strahlung ab. Diese Strahlung kann man in einigen Fällen noch Milliarden von Lichtjahren entfernt messen; das hat Galaxien mit einem derart turbulenten Kern den Namen *aktive Galaxien* eingebracht. Man spricht auch von *active galactic nuclei* (AGN, aktive galaktische Kerne).

Die zwölf Millionen Lichtjahre entfernte „Zigarrengalaxie“ M82, mit einem extrem stark im Infraroten strahlenden aktiven Kern



Ein Großteil der Energie, die von der Akkretionsscheibe abgegeben wird, wird jedoch nicht in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt: Sie wird in Form von geladenen Teilchen mit Wucht aus der Galaxie herausgeschleudert, und zwar senkrecht zu ihrer Rotationsebene. Diese sogenannten *Jets* sind selbst bis zu Tausende von Lichtjahren lang, und enthalten wahrscheinlich extrem hochenergetische Elektronen, Positronen und Protonen, die durch eine Verdrillung der Magnetfelder in der Nähe des schwarzen Loches nach außen katapultiert werden.

Man teilt AGN in verschiedene Typen ein, abhängig von ihrem Strahlungsspektrum. Es scheint jedoch, dass es sich bei einigen der unterschiedlichen Typen in Wahrheit um dieselbe Sorte von Galaxien handelt. Die auf der Erde gemessene Strahlung erscheint uns nur deshalb so unterschiedlich, weil wir sie aus unterschiedlichen Blickrichtungen betrachten.

Schauen wir nämlich von der Erde aus senkrecht auf eine Galaxie mit Jet, dann liegen wir in der Flugbahn des Jets, und die Galaxie erscheint uns sehr hell und aktiv. Sehen wir die Galaxie allerdings von der Seite,

Röntgenaufnahme des Jets von Centaurus A



Die aktive Galaxie NGC 7742, eine Seyfertgalaxie vom Typ I

scheint sie uns viel schwächer strahlend. Zum Beispiel gibt es die sogenannten *Seyfertgalaxien* vom Typ I und vom Typ II, die man ursprünglich für verschiedene AGN hielt. Heutzutage geht man jedoch davon aus, dass es sich hierbei um dieselbe Sorte AGN handelt, nur dass wir auf Typ I eine Draufsicht haben und sehr viel von der Strahlung des Jets messen, während Galaxien vom Typ II fast senkrecht zu uns liegen, sodass der Staub in der Ebene der Seyfertgalaxien einen Großteil der höherfrequenten Strahlung verschluckt.

Die sogenannten *Quasare* sind die energiereichsten AGN und zählen zu den hellsten Objekten im Universum – die sie enthaltenden Galaxien verblassen im Vergleich völlig. In den leuchtstärksten bekannten Quasaren verschlingt das supermassive schwarze Loch geschätzt eine Masse, die 600 Erden in der Minute entspricht – das sind bis zu 1000 Sonnenmassen pro Jahr. Und das in einem Gebiet, das kaum größer als unser eigenes Sonnensystem ist!



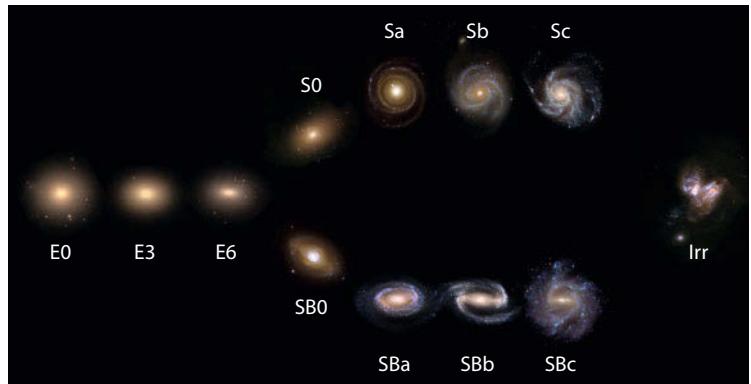
## Galaxientypen

### Die Vielfalt der Galaxien

Galaxien sind durch ihre eigene Schwerkraft gebundene Ansammlungen aus Milliarden von Sternen, angereichert mit Gas und Staub und in der Regel eingebettet in einen annähernd kugelförmigen Halo aus dunkler Materie (↓). Sie lassen sich aufgrund ihrer Struktur und Form grob in drei Klassen einteilen: elliptische Galaxien, Spiralgalaxien und unregelmäßige Galaxien. Diese Einteilung hatte auch Edwin Hubble 1926 vorgenommen, als er seine Beobachtungen in einem *Hubble-Diagramm* zusammenfasste.

Hier sind links die *elliptischen Galaxien* (E) angeordnet, die sich durch eine rundliche, elliptische Form und einfache Struktur auszeichnen. Je nach der Stärke ihrer Abplattung werden sie mit E0 (kreisrund) bis E7 (stark langgezogen) bezeichnet, was allerdings auch vom Beobachtungswinkel abhängen kann.

Elliptische Galaxien bestehen aus Milliarden bis Billionen Sternen und enthalten kaum Gas (oder nur sehr heißes), sodass nur wenig oder gar keine neuen Sterne entstehen können und nur noch langlebige alte, rote Sterne vorhanden sind. Diese Sterne bewegen sich auf völlig ungeordneten, zufälligen Bahnen, was der Galaxie ihre strukturmässige Erscheinung verleiht. Vor allem die großen elliptischen Galaxien sind meist in den Zentren von Galaxienhaufen zu finden, wo sie durch Verschmelzungen aus anderen Galaxien entstanden sind.



Hubble-Diagramm (auch Hubble-Sequenz oder Stimmgabel-Diagramm genannt) zur Klassifikation von Galaxien

Auf der rechten Seite des Hubble-Diagramms befinden sich die *Spiralgalaxien* (S, oben) und die *Balkenspiralgalaxien* (SB, unten). Sie unterscheiden sich durch einen sogenannten *Balken* in der Mitte, eine rechteckige Verdichtung, an der die Spiralarme ansetzen. Mehr als die Hälfte der Spiralgalaxien (u. a. die Milchstraße) besitzen einen solchen Balken.

Im Allgemeinen bestehen Spiralgalaxien aus einem runden Zentralbereich (Bulge) und einer Scheibe, in der sich Spiralarme als *Dichtewellen* im interstellaren Gas ausbilden. Durch diese Verdichtungen kann es immer wieder zu neuer Sternentstehung kommen, was die Spiralarme bläulich aufleuchten lässt. Die Sterne in der Scheibe bewegen sich auf regelmässigen Bahnen um das Zentrum und gelangen dabei immer wieder in die Dichtewellen hinein und auch wieder hinaus.

Je weiter rechts eine Spiralgalaxie im Hubble-Diagramm angeordnet ist, umso mehr nimmt das Verhältnis von Bulge zu Scheibe ab und umso mehr vergrößert sich der Öffnungswinkel ihrer Spiralarme.

Am Übergangspunkt von elliptischen zu Spiralgalaxien befinden sich die S0 und SB0-Galaxien, die auch als *Linsengalaxien* bezeichnet werden. Sie besitzen zwar keine Spiralstruktur, aber einen Bulge und eine Scheibe und werden deshalb auch als gesonderte Klasse betrachtet.

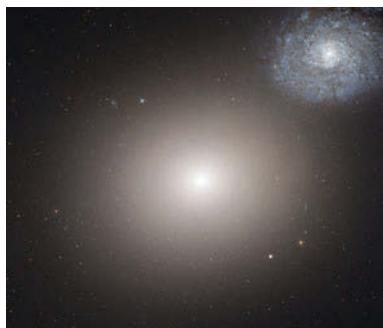
Die meisten anderen Galaxien fallen einfach in die Kategorie der *irregulären Galaxien* (Irr). Bei einem Großteil handelt es sich dabei tatsächlich um Galaxien, die gerade mit anderen wechselwirken oder bereits eine Galaxienverschmelzung (↓) hinter sich haben und noch keinen neuen Gleichgewichtszustand erreicht haben. Die wesentlich kleineren Zwerggalaxien hingegen haben meist auch irreguläre oder elliptische Gestalt (Typ dIrr oder dE, mit „d“ für „dwarf“), sind aber nicht das Verschmelzungsprodukt, sondern der Überrest ei-

ner bereits zerrissenen Galaxie. Man findet sie in unmittelbarer Nachbarschaft zu ihrer Hauptgalaxie, wie z. B. um die Milchstraße oder Andromedagalaxie.

Obwohl die Einteilung der Galaxien in der Hubble-Sequenz allein auf phänomenologischen Kriterien beruht, passt sie auch zu einigen physikalischen Eigenschaften: Von links nach rechts besitzen die Galaxien einen höheren Gas- und Staubanteil, mehr junge Sterne und höhere Sternentstehungsraten. Sie werden blauer, und die Bahnen der Sterne folgen geordneteren Bahnen.

Früher glaubte man an eine zeitliche Entwicklung von elliptischen zu Spiralgalaxien, weshalb sich die Bezeichnungen „früher“ und „später Typ“ als Synonym für elliptisch und spiralförmig verbreitet haben. Heute jedoch geht man eher von einer umgekehrten Entwicklung aus: Spiralgalaxien können sich durch Wechselwirkungen mit anderen Galaxien zu strukturlosen elliptischen Galaxien entwickeln. Wobei die Entwicklung von Galaxien im Einzelnen sehr viel komplexer ist und noch längst nicht alle Fragen geklärt sind.

M60 ist eine typische elliptische Galaxie vom Typ E2. Oben erkennt man die kleinere Spiralgalaxie NGC 4647. Beide Galaxien befinden sich im Virgo-Galaxienhaufen.



M74, eine Spiralgalaxie vom Typ Sc. Die jungen blauen Sterne und rote Wolken ionisierten Wasserstoffgases in den Spiralarmen deuten auf aktive Sternentstehung hin.



NGC 1313, eine Galaxie am Übergang vom spiralförmigen Typ Sd zu irregulärer Form. Sie gehört zu den „Starburst“-Galaxien, mit sehr hoher Sternentstehungsrate.



Verschmelzende Galaxien → S. 50

Spitzer-Teleskop Poster: *Hubble Sequenz mit 75 Galaxien der näheren Umgebung*

<http://www.spitzer.caltech.edu/images/2095-sig07-025-Lifestyles-of-the-Galaxies-Next-Door>



## Das Schicksal der Milchstraße

Wenn Milchstraße und Andromedagalaxie sich treffen



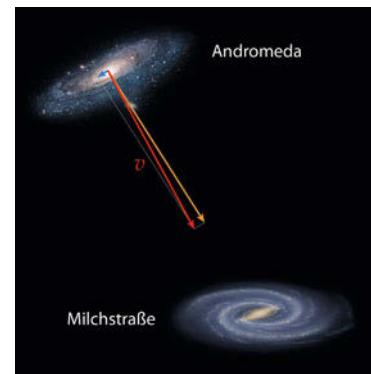
So könnte der Sternenhimmel in drei bis vier Milliarden Jahren aussehen, wenn Andromedagalaxie und Milchstraße das erste Mal zusammentreffen.

Wer in klaren, dunklen Nächten (↓) das schwache weiße Band der Milchstraße betrachtet, wird kaum ahnen können, welch großartiges Schauspiel unserer Heimatgalaxie bevorsteht: eine Kollision mit der Andromedagalaxie!

Die Andromedagalaxie ist selbst wie die Milchstraße eine Spiralgalaxie mit hunderten Milliarden Sternen und noch etwa 2,5 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Doch sie kommt näher: Geschwindigkeitsmessungen ihrer Sterne haben ergeben, dass sich unser Nachbar mit 110 km/s auf uns zu bewegt, was etwa 400 000 km/h entspricht. Trotz dieser enormen Geschwindigkeit ist unsere Heimatgalaxie jedoch zunächst sicher: Erst in etwa drei bis vier Milliarden Jahren wird es zu einem ersten Kontakt kommen.

Auf Kollisionskurs: Der transversale Anteil der Geschwindigkeit (blau) ist sehr gering im Vergleich zur radialem Geschwindigkeit (orange), so dass sich die Andromedagalaxie auf direktem Kollisionskurs befindet.

Ob die Andromedagalaxie die Milchstraße dann nur am Rande streift, ganz verfehlt oder direkt durch ihr Zentrum jagen wird, hängt von der genauen Bewegungsrichtung der Andromedagalaxie ab. Die radiale Geschwindigkeitskomponente entlang der Sichtlinie des Beobachters lässt sich relativ einfach über die Dopplerverschiebung in den Spektrallinien der Sterne bestimmen. Doch erst kürzlich wurden genaue Messungen der Seitwärtsbewegung der Andromedagalaxie veröffentlicht. Dazu wurden über mehrere Jahre hinweg die Positionen der Sterne mit dem Hubble-Weltraumteleskop vermessen und miteinander verglichen. Die neuen Daten lassen keinen Zweifel mehr zu: Ein Zusammenstoß ist unausweichlich, ein Frontalzusammenprall sogar sehr wahrscheinlich!



Der Sternenhimmel → S. 18

NASA NASA's Hubble Shows Milky Way is Destined for Head-On Collision  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/hubble/science/milky-way-collide.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/milky-way-collide.html)



An den Schockfronten der Gaswolken würden neue Sterne entstehen.

Computersimulationen der Kollision zeigen, dass sich die beiden Galaxien nach dem ersten Zusammenstoß noch einmal kurz trennen werden, bevor sie erneut aufeinander zufliegen und dabei weiter stark zerrissen werden. Die Gasmassen werden dabei durcheinander gewirbelt, an den Schockfronten verdichtet sich das Gas und neue Sterne entstehen. Die größten unter ihnen werden ihren Wasserstoffvorrat schnell aufgebraucht haben und bald in Supernovae explodieren, sodass es mehrere Supernovae pro Jahr am Himmel zu sehen geben wird, die die Nacht hell erleuchten lassen. Zum Vergleich: In unserer Milchstraße heute ist es nur eine Supernova-Explosion in fünfzig Jahren.

Einige Milliarden Jahre nach dem ersten Zusammentreffen werden Andromeda und Milchstraße zu einer einzigen Galaxie verschmolzen sein und vermutlich eine neue elliptische Galaxie (↓) bilden. Unser Sonnensystem wird von alldem wenig mitbekommen, da es bei Galaxienverschmelzungen (↓) extrem unwahr-

scheinlich ist, dass einzelne Sterne miteinander kollidieren. Die Sonne mit ihren Planeten würde wahrscheinlich nur eine neue Bahn am Rande der neuen Galaxie einnehmen. Allerdings wird unsere Sonne zu diesem Zeitpunkt ohnehin bereits ihren Wasserstoffvorrat aufgebraucht haben und die Erde unbewohnbar geworden sein. Falls wir dann einen neuen Heimatplanet gefunden haben sollten, so würden wir statt des vertrauten milchigen Bandes am Himmel eine große Scheibe sehen, die wie der neblige Lichtschein aus einer fremden Welt erscheint.



Kurz nach dem ersten Zusammenstoß: Beide Galaxien trennen sich kurz, sehen aber schon sehr mitgenommen aus.

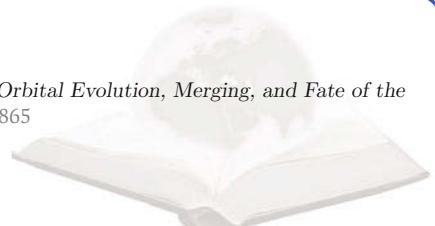
So könnte die elliptische Galaxie am Nachthimmel aussehen, die am Ende des Verschmelzungsprozesses entstanden ist.



Galaxientypen → S. 46

Verschmelzende Galaxien → S. 50

van der Marel, R. P. et al. *The M31 Velocity Vector. III. Future Milky Way-M31-M33 Orbital Evolution, Merging, and Fate of the Sun* *Astrophysical Journal*, Vol. 753, 1, 2012, S. 21ff; Preprint auch unter arXiv:1205.6865



## Verschmelzende Galaxien

### Kollision der Giganten

Galaxienverschmelzungen waren im frühen Universum an der Tagesordnung: Das Universum war sehr dicht, die Abstände zwischen den Galaxien noch recht klein. Doch auch heute gibt es genügend Galaxien in Gruppen oder Galaxienhaufen, die eindeutig mit ihren Nachbarn in Wechselwirkung stehen.

Solche Wechselwirkungen treten auf, sobald sich zwei (oder mehr) Galaxien nahe genug kommen, sodass sie den Einfluss ihrer gegenseitigen Anziehungskraft zu spüren bekommen. Ähnlich wie bei Erde und Mond entstehen Gezeitenkräfte ( $\downarrow$ ), die von mehreren Seiten an den beteiligten Galaxien zerren und sie deformieren. Ausgedehnte Schweife oder „Gezeitenarme“ können entstehen, die die wechselwirkenden Galaxien miteinander zu verbinden scheinen.

Stephan's Quintett, eine Gruppe wechselwirkender Galaxien, zusammengesetzt aus einem optischen Bild und einer Röntgenaufnahme (heißes Gas, blau, Sternentstehungsgebiet in der Mitte)



Wenn die Relativgeschwindigkeiten der Galaxien zu groß sind, so fliegen sie mit nur leichten Verformungen auseinander und treffen sich nie wieder. Sind die Galaxien jedoch zu langsam, so können sie einander nicht entrinnen. Nach dem ersten Zusammenstoß trennen sie sich zwar oft zunächst noch einmal, aber dann überwiegt die Gravitation erneut, und sie fallen wieder aufeinander zu, um sich immer enger zu umkreisen und zu zerreißen, bis sie völlig miteinander verschmolzen sind.

Die wechselwirkenden Galaxien Arp 273



Die Gezeiten → S. 92

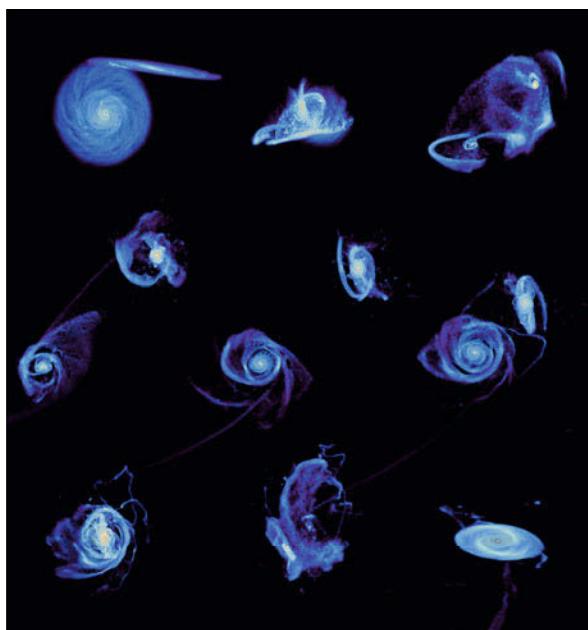
F.J. Summers *Galaxy collisions: Simulations vs Observations* <http://www.youtube.com/watch?v=D-0GaBQ494E>

Wikipedia Wechselwirkende Galaxien [http://de.wikipedia.org/wiki/Wechselwirkende\\_Galaxien](http://de.wikipedia.org/wiki/Wechselwirkende_Galaxien)

C. Mihos et al. *Galaxy Crash* <http://burro.astr.cwru.edu/JavaLab/GalCrashWeb/>; Interaktives Java Applet

Zu Kollisionen einzelner Sterne kommt es dabei nur äußerst selten, da die Abstände zwischen den Sternen millionen- bis milliardenfach größer als ihr Durchmesser sind. Sie werden nur durch die Änderung der Massenverteilung und damit des Gravitationspotentials auf völlig neue Bahnen geschleudert.

Das Gas hingegen macht wesentlich drastischere Änderungen mit: Gaswolken treffen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander, Schockfronten bilden sich und dort, wo sich das Gas genug verdichtet hat und kollabiert, werden in jungen Sternhaufen neue Sterne geboren (↓). Deshalb sieht man auf Aufnahmen von wechselwirkenden Galaxien sehr häufig bläuliche Gebiete mit jungen, sehr massereichen und dadurch sehr heißen und blau-weiß strahlenden Sternen.



Die Geburt von Sternen → S. 20  
 Gravitationslinsen → S. 164  
 Dunkle Materie → S. 150



Das zentrale Gebiet der Antennengalaxie, zusammengesetzt aus einer Röntgenaufnahme (blau, heiße Gaswolken), einem optischen (gold) und einem infraroten Bild (rot, warme Staubwolken)

Gas- und Sternkomponenten können bei Galaxienkollisionen also durchaus eigene Wege gehen. Das sieht man besonders deutlich bei einigen Aufnahmen von verschmelzenden Galaxienhaufen (z.B. Bullet-Cluster), bei denen die Massenverteilung (bestimmt mithilfe des Gravitationslinseneffekts ↓) sich deutlich von der Verteilung des Gases unterscheiden. Zusätzlich zu den sichtbaren Sternen muss es dabei noch einen großen Anteil an dunkler Materie (↓) geben, der sich genauso kollisionsfrei wie die Sterne verhält.

Nach den ersten paar Zusammenstößen wird sich das System allmählich wieder beruhigen und in eine Relaxationsphase eintreten, die einige Milliarden Jahre andauern kann. In dieser Zeit wird das Gleichgewicht innerhalb der neu entstandenen Galaxie wieder hergestellt. Zumeist handelt es sich dann um eine elliptische Galaxie, deren Gas weitgehend aufgebraucht ist und in der daher nur noch wenige neue Sterne entstehen.

Verschiedene Zeitpunkte der Verschmelzung zweier Scheibengalaxien in einer Computersimulation, von links oben bis rechts unten. Dargestellt ist nur die Gaskomponente. Am Ende entsteht hier eine neue Scheibengalaxie.



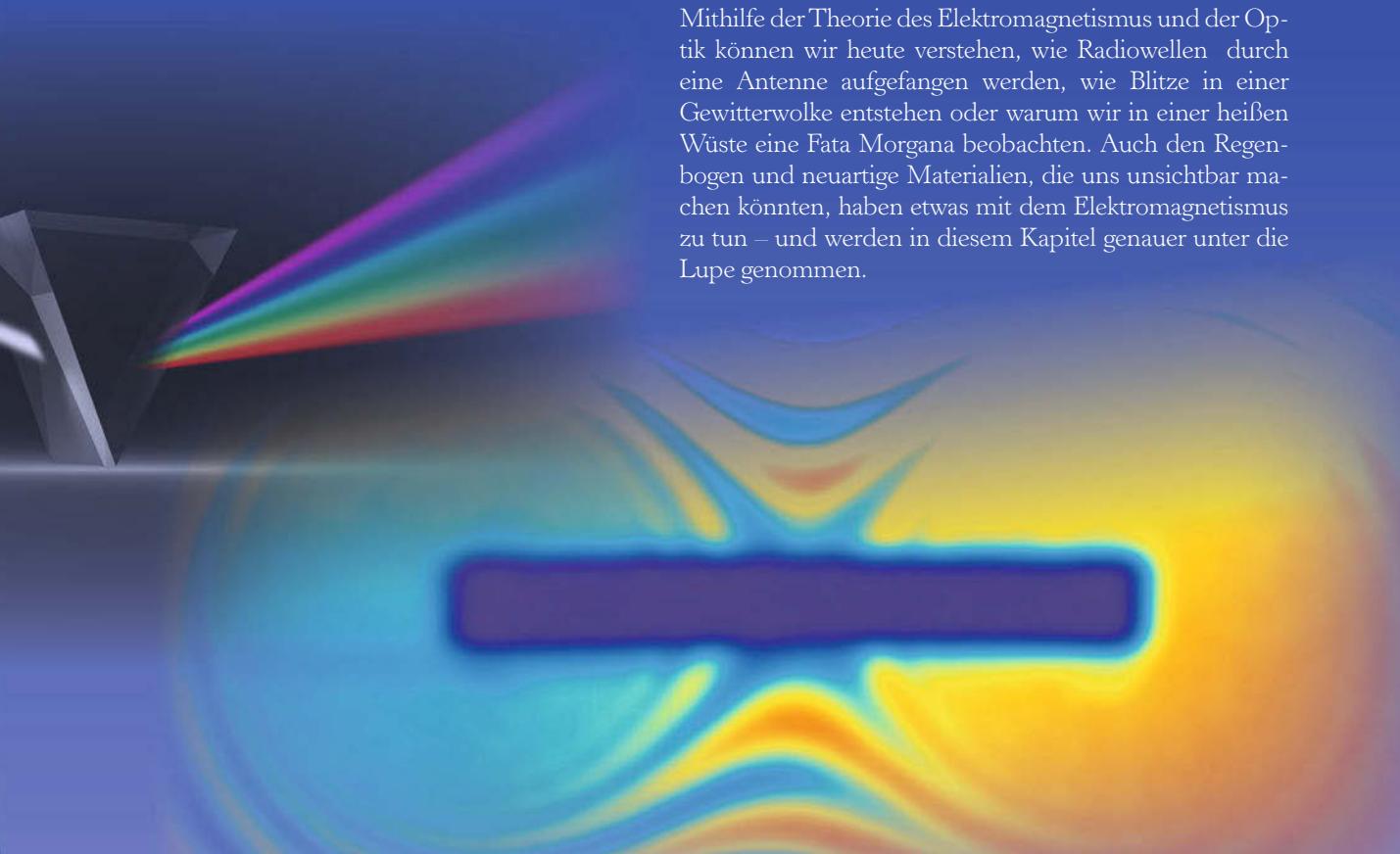


## 2 Elektromagnetismus und Licht

Was haben ein Magnet, ein elektrisch aufgeladenes Katzenfell und Licht gemeinsam? Viel mehr als man zunächst meinen möchte. Denn Licht, Ladung und Magnetismus sind eng miteinander verbunden.

So gehen beispielsweise von elektrischen Strömen Magnetfelder aus – und umgekehrt entsteht in einem sich durch ein Magnetfeld bewegenden Leiter ein elektrischer Strom: Das eine bedingt das andere. Physiker wissen heute, dass elektrische und magnetische Phänomene verschiedene Aspekte einer einzigen physikalischen Kraft sind: der elektromagnetischen Wechselwirkung. Diese ist eine der vier Grundkräfte der Natur – die anderen drei Grundkräfte sind die Gravitation sowie die starke und die schwache Wechselwirkung, die wir später in diesem Buch noch kennenlernen.

Mithilfe der Theorie des Elektromagnetismus und der Optik können wir heute verstehen, wie Radiowellen durch eine Antenne aufgefangen werden, wie Blitze in einer Gewitterwolke entstehen oder warum wir in einer heißen Wüste eine Fata Morgana beobachten. Auch den Regenbogen und neuartige Materialien, die uns unsichtbar machen könnten, haben etwas mit dem Elektromagnetismus zu tun – und werden in diesem Kapitel genauer unter die Lupe genommen.



# Vektorfelder und Feldlinien

## Richtungsweisende Hilfszeichnungen

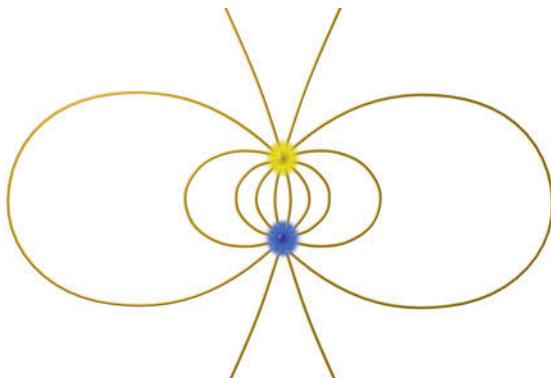
Der Begriff „Feld“ wird in der Physik häufig benutzt, um anzugeben, dass eine physikalische Größe von Ort zu Ort verschiedene Werte annehmen kann. So kann man zum Beispiel vom „Temperaturfeld“ sprechen, und meint damit, dass man überall die Temperatur messen kann, das Messresultat aber davon abhängt, wo genau man gemessen hat.

Eine besondere Bedeutung haben die Felder, deren entsprechende physikalische Größe nicht einfach nur eine Zahl ist, wie beispielsweise die Temperatur, sondern ein Vektor. Ein Vektor hat nicht nur einen Betrag, sondern auch eine Richtung, die man in einem Pfeil kombiniert. So entspricht zum Beispiel die Windgeschwindigkeit einem Vektor, der in die Richtung zeigt, in die der Wind bläst, und dessen Länge die Windstärke darstellt.

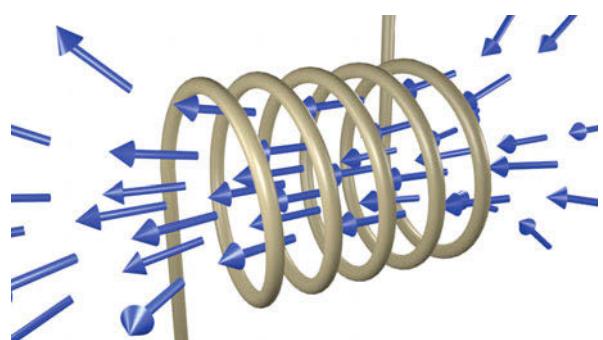
Ein **Vektorfeld** beschreibt demnach eine Vektorgröße, die von Ort zu Ort variieren kann. Die Windstärke ist hier wieder ein gutes Beispiel, aber auch das elektrische und das magnetische Feld sind Paradebeispiele für Vektorfelder in der Physik. Die Strömungsgeschwindigkeit in einer Flüssigkeit ( $\downarrow$ ) oder die Schwerkraft ( $\downarrow$ ) werden ebenfalls durch sie beschrieben.

Um Vektorfelder grafisch darzustellen, wäre es zu unübersichtlich, alle möglichen Vektoren zu zeichnen. Stattdessen benutzt man das Konzept der **Feldlinien**. Eine Feldlinie ist eine Linie, die genau so verläuft, dass sie an jedem ihrer Punkte parallel zum Vektor an diesem Punkt ist. Zeichnet man mehrere Feldlinien in gewissem Abstand nebeneinander, so bekommt man eine gute Vorstellung davon, in welche Richtungen die Vektoren des entsprechenden Feldes zeigen.

Elektrische Feldlinien beginnen in positiven, und enden in negativen Ladungen.



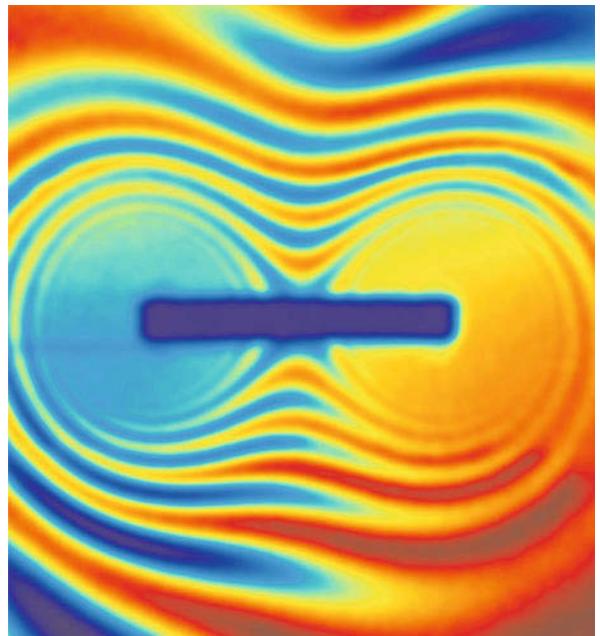
Innerhalb einer Spule kann man ein fast homogenes Magnetfeld erzeugen.



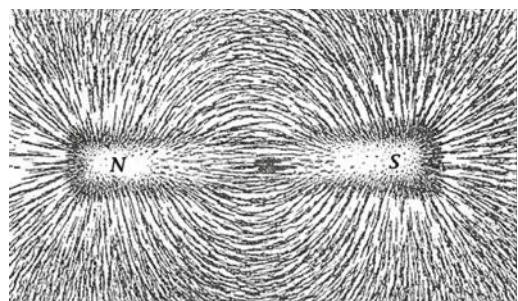
Für viele Vektorfelder kann man mithilfe der Feldlinien aber nicht nur die Richtung, sondern auch die Länge der Vektoren ablesen. Dafür muss man mehrere Feldlinien nebeneinander zeichnen – dort, wo die Feldliniendichte größer ist, sich die einzelnen Linien also näher kommen, sind die Vektoren entsprechend länger als dort, wo sie einen größeren Abstand voneinander haben. Zwischen zwei Feldlinien könnte man natürlich noch immer weitere Feldlinien einzeichnen, wovon man aber wegen der Übersichtlichkeit meist absieht.

Die Maxwell'schen Gesetze (siehe elektromagnetische Wechselwirkung ↓), die die Statik und Dynamik des elektrischen und magnetischen Feldes beschreiben, lassen sich auch anschaulich in der Sprache der Feldlinien formulieren. So besagt zum Beispiel das Gauß'sche Gesetz für Magnetfelder, dass magnetische Feldlinien keinen Anfang und kein Ende besitzen dürfen, sondern in sich geschlossen sein müssen. Es gibt also keine Quellen für das magnetische Feld – anders als beim elektrischen Feld, dessen Feldlinien in positiven Ladungen starten und in negativen Ladungen enden dürfen.

Es gibt einfache Methoden, um Feldlinien in der Natur sichtbar zu machen. Streut man zum Beispiel feine Eisenspäne auf ein Blatt Papier, so beginnen sie sich in Richtung der magnetischen Feldlinien auszurichten, sobald sie einem hinreichend starken Magnetfeld ausgesetzt sind. Der Grund dafür ist, dass die stabförmigen Eisenteilchen entlang der Feldlinien magnetisiert werden, also selbst zu kleinen Magneten werden. Weil sich immer Nordpol an Südpol anlagert, bilden diese Späne lange Ketten, die entlang der Feldlinien verlaufen. So kann man auch gut erkennen, wo die magnetische Kraft am stärksten ist, denn dort häufen sich die Eisenspäne.



Seitenansicht eines stromdurchflossenen Ringes. Das Magnetfeld wurde mithilfe der Neutronentomographie sichtbar gemacht.



Eisenfeilspäne auf Papier, die sich entsprechend dem Feld eines darunter befindlichen Stabmagneten ausgerichtet haben, zeigen die Richtung der magnetischen Feldlinien.

Die elektromagnetische Wechselwirkung → S. 56

The TEAL/Studio Physics Project A Visual Tour of Electromagnetism

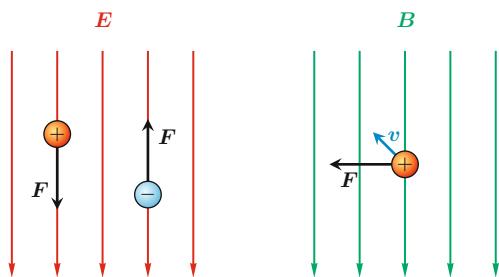
<http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/guidedtour/Tour.htm>; Onlinekurs vom MIT; englisch



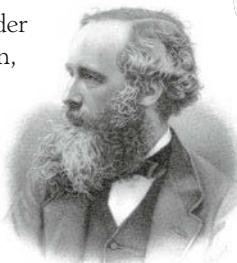
# Die elektromagnetische Wechselwirkung

## Maxwells Gleichungen der elektromagnetischen Felder

Wenn man die komplizierte physikalische Wechselwirkung zwischen elektrisch geladenen Objekten beschreiben will, so bietet sich dafür die Verwendung von elektrischen und magnetischen Feldern ( $\downarrow$ ) an. Nur mit diesem Feldmodell gelingt es, eine lokale Beschreibung zu erreichen, bei welcher der Wert der Felder an jedem Ort angibt, welche Kraft  $\mathbf{F}$  auf eine Ladung  $q$  an diesem Ort wirkt:  $\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ . Dabei sind  $\mathbf{E}$  das elektrische und  $\mathbf{B}$  das magnetische Feld,  $\mathbf{v}$  ist die Geschwindigkeit der Ladung und  $\times$  das Vektor-Kreuzprodukt. Man bezeichnet  $\mathbf{F}$  auch als *Lorentzkraft*.



Elektrische und magnetische Felder hängen eng miteinander zusammen, sodass man sie gemeinsam unter der **elektromagnetischen Wechselwirkung** zusammenfasst. Die genauen Zusammenhänge zwischen diesen Feldern hat James Clerk Maxwell im Jahr 1864 mathematisch in seinen **Maxwellgleichungen** formuliert.



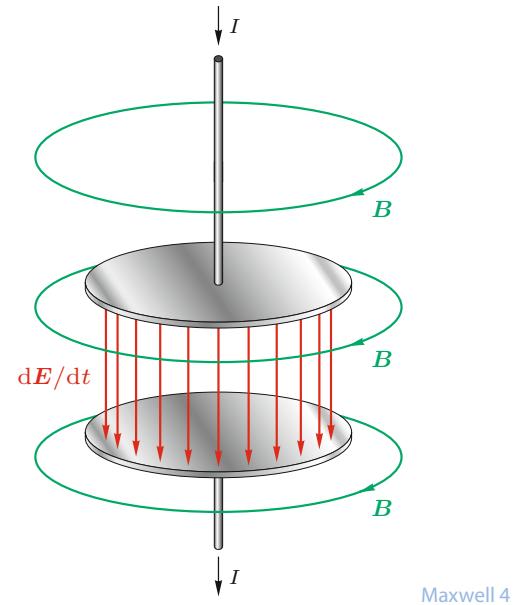
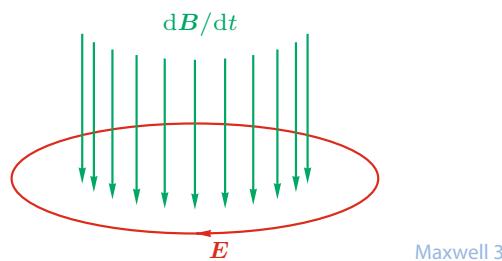
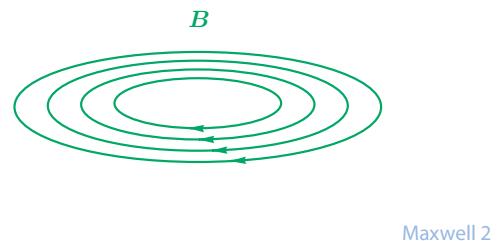
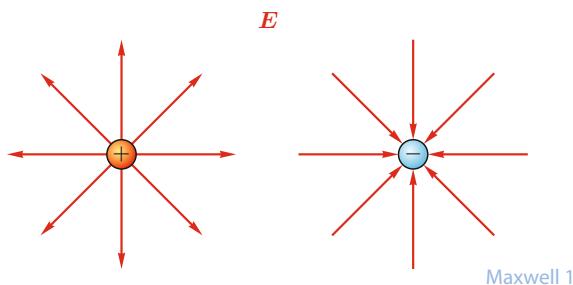
James Clerk Maxwell  
(1831–1879)

Hier ist der physikalische Inhalt dieser Gleichungen in Kurzform:

### Maxwellgleichungen

1. Elektrische Ladungen bilden Quellpunkte des elektrischen Feldes. (*Gauß'sches Gesetz*)
2. Magnetische Felder haben keine Quellpunkte, sondern nur Wirbel. (*Gauß'sches Gesetz für Magnetfelder*)
3. Veränderungen in Magnetfeldern erzeugen elektrische Wirbelfelder und können so in elektrischen Leitern Ströme induzieren. (*Induktionsgesetz*)
4. Elektrische Ströme, sowie Veränderungen in elektrischen Feldern, erzeugen magnetische Wirbelfelder. (*Ampère'sches Gesetz mit Verschiebungsstrom*)

Interessant ist dabei, dass nicht allein Ladungen und Ströme elektrische und magnetische Felder hervorrufen, sondern dass auch Veränderungen in einem Magnetfeld ein elektrisches Feld erzeugen (das ist die Grundlage des Dynamos), sowie umgekehrt Veränderungen in einem elektrischen Feld (der sogenannte *Verschiebungsstrom*) ein Magnetfeld hervorrufen kann. Es war eine besondere Leistung



von Maxwell, die Existenz dieses Verschiebungsstroms erkannt zu haben, ohne den das System der Maxwell-Gleichungen nicht mit der Erhaltung der elektrischen Ladung in Einklang zu bringen ist.

Induktionsgesetz und Verschiebungsstrom führen dazu, dass sich bei schwingenden Ladungen elektrische und magnetische Felder von diesen Ladungen lösen und als elektromagnetische Wellen im leeren Raum ausbreiten können (Hertz'scher Dipol ↓). Dabei erhalten sie sich gewissermaßen gegenseitig am Leben. Auch Licht ist eine solche elektromagnetische Welle, ebenso wie Radiowellen, Mikrowellen oder Röntgenstrahlen.

Die innere Ursache für die Zusammenhänge zwischen elektrischen und magnetischen Feldern liegt in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie (↓) begründet. Daher bewegen sich elektromagnetische Wellen gerade mit der maximal möglichen Geschwindigkeit für physikalische Wirkungen, also mit *Lichtgeschwindigkeit*.

Hertz'scher Dipol → S. 58

Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie → S. 124



## Hertz'scher Dipol

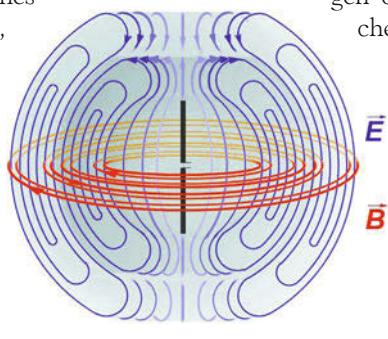
### Schwingen und streuen

Eine ruhende elektrische Ladung erzeugt ein elektrisches Feld, aber kein Magnetfeld, während ein konstanter Strom (also sich bewegende Ladungen) ein Magnetfeld aber kein elektrisches Feld erzeugt. Was also geschieht nun, wenn eine elektrische Ladung hindurchschwingt?

Man überlegt sich leicht, dass eine harmonisch oszillierende Ladung sowohl ein elektrisches als auch ein magnetisches Feld erzeugt. Da nach den Maxwell-Gleichungen ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld wieder ein elektrisches Feld erzeugt, sowie ein sich änderndes elektrisches wieder ein Magnetfeld, wird die von der schwingenden Ladung erzeugte Störung sich wellenförmig von der schwingenden Ladung entfernen und ausbreiten. Tatsächlich breitet sich eine elektromagnetische Welle senkrecht zur Schwingungsachse aus. Die Frequenz der Welle entspricht dabei der Schwingungsfrequenz der Ladung.

Zuerst wurde dieses Prinzip von Heinrich Hertz experimentell erforscht, weswegen eine solche schwingende Ladungsdichte *Hertz'scher Dipol* genannt wird.

Das umgekehrte Prinzip funktioniert ebenso: Trifft eine elektromagnetische Welle im richtigen Winkel auf einen Dipol, so werden die elektrischen Ladungen darin zum Schwingen in der entsprechenden Frequenz angeregt.

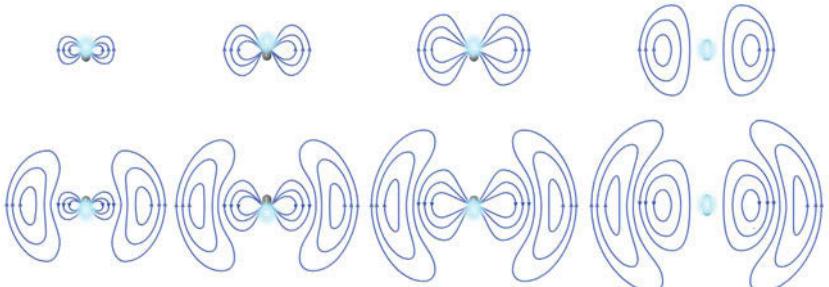


Elektrische Feldlinien (blau) und magnetische Feldlinien (rot) um einen Hertz'schen Dipol

Nach diesem Prinzip werden *Radioantennen* konstruiert: Diese bestehen im Wesentlichen aus einem Metalldraht, durch den man einen Wechselstrom einer bestimmten Frequenz schickt. Der so schwingende Strom erzeugt eine abgestrahlte Welle derselben Frequenz. Trifft diese Welle auf eine andere Antenne, so wird in ihr wiederum ein Wechselstrom induziert, den man schließlich messen kann.

Indem man entweder die Amplitude der Welle (AM) oder die Frequenz der Welle (FM) moduliert, kann man so ein Signal von einem Ort zum anderen übertragen.

Feldlinien eines strahlenden Dipoles



Die Moleküle in der Luft verhalten sich in vielerlei Hinsicht wie Dipole, beziehungsweise kleine Antennen: Trifft Licht (das auch eine elektromagnetische Welle ist) auf diese Moleküle, so werden sie zum Schwingen angeregt – und als Dipole strahlen sie auch wieder Licht derselben Frequenz ab, aber in alle möglichen Richtungen. Diesen Vorgang nennt man *Rayleigh-Streuung*.

Wie stark ein Dipol von einer Welle zum Schwingen angeregt wird (und wie viel vom Licht damit seitlich weggestreut wird), hängt stark von der Frequenz des Lichtes ab. Aus den Maxwellgleichungen ( $\downarrow$ ) folgt, dass der Streuquerschnitt sich proportional zur vierten Potenz der Frequenz des einfallenden Lichtes verhält.



Blaues Licht (Frequenz: 700 THz) wird deswegen stärker gestreut als rotes (Frequenz: 450 THz), und zwar um den Faktor  $(700/450)^4 \approx 5,86$ , also fast sechsmal so stark.

Autorücklichter sind unter anderem deswegen rot, weil rotes Licht durch z.B. Nebel am wenigsten gestreut wird



Bei Sonnenuntergang erscheinen Sonne und Himmel rötlicher.

Und das erklärt die blaue Farbe des Himmels: Blaues Licht wird viel stärker an den Luftmolekülen gestreut und trifft von allen Seiten in unser Auge. Die Sonne selbst erscheint gelb, weil von ihrem weißen Licht ein Anteil blau weggestreut wurde (weiß minus blau gleich gelb). Bei Sonnenuntergang erscheint der Himmel rötlicher, weil das Licht wegen des flachen Blickwinkels einen weiten Weg durch die Atmosphäre zurücklegen musste, es wird also fast das gesamte Licht bis auf die sehr langwelligen, also roten, Anteile seitlich weggestreut.



## Gewitter

### Blitze, Elmsfeuer und Rote Kobolde

Gewitter entstehen, wenn in der Atmosphäre die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe genügend stark abnimmt (negativer Temperaturgradient), sodass eine starke Konvektion mit entsprechenden Auf- und Abwinden entsteht. Ein aufsteigendes Luftpaket kühlt sich dann aufgrund des kleiner werdenden Luftdrucks zwar ab, bleibt aber wärmer als die Umgebung, sodass sich sein Aufstieg weiter fortsetzt. Sobald die Temperatur des Luftpaketes unter den sogenannten *Taupunkt* fällt, kondensiert zudem die darin enthaltene Luftfeuchtigkeit zu kleinen Tröpfchen und setzt Kondensationswärme frei, die den Aufstieg weiter vorantreibt – daher entstehen Gewitter besonders häufig dann, wenn sich in Bodennähe viel feuchtwarme Luft befindet.

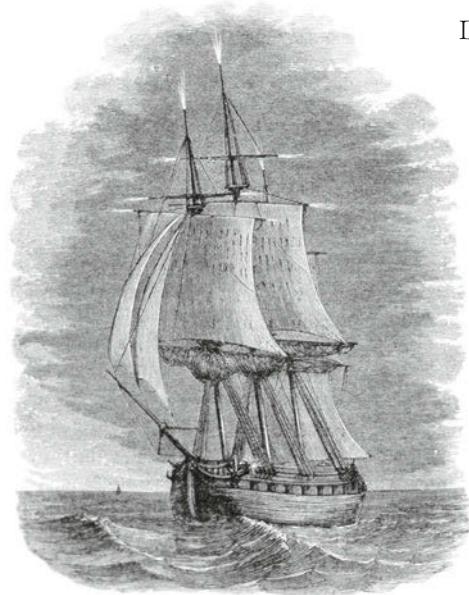


Erst beim Erreichen der sogenannten *Tropopause*, die sich in Mitteleuropa in rund zehn Kilometern Höhe befindet, fällt die dortige Temperatur der Atmosphäre von rund  $-50^{\circ}\text{C}$  mit zunehmender Höhe nicht mehr weiter ab, sodass der Aufstieg des Luftpaketes zum Erliegen kommt. Bei einer Gewitterwolke bildet sich in dieser Höhe der sogenannte *Amboss* aus, der die Wolke nach oben begrenzt.

Die starken Aufwinde in einer Gewitterwolke tragen die zu Graupel- und Hagelkörnern gefrorenen Wassertropfen immer weiter nach oben, wobei diese ständig weiter wachsen, bis sie zu schwer werden und schließlich nach unten fallen. Im Fallen kollidieren sie mit kleineren noch aufsteigenden Eispartikeln und nehmen elektrisch negativ geladene Elektronen von diesen auf. Der obere Teil der Gewitterwolke lädt sich dadurch meist positiv auf, während sich der untere Teil negativ auflädt und durch elektrische Abstoßung der negativen Ladungen im Erdboden darunter eine positive Aufladung des Bodens bewirkt.

Diese Spannungsunterschiede entladen sich in Form von Blitzen, die sich sowohl innerhalb der Wolke als auch zwischen Wolke und Erdboden ausbilden können. Dabei entstehen zunächst kleinere Vorentladungen, die

Mehrere schwere Gewitter über Brasilien, fotografiert aus dem Space Shuttle (1984). Man erkennt die scharfe Begrenzung der Wolkentürme nach oben durch die Tropopause.  
einen rund ein Zentimeter breiten ionisierten Blitzkanal schaffen, in dem sich dann der Hauptblitz mit Stromstärken von typischerweise 20 000 Ampère mehrfach entlädt.



Die Spannungsunterschiede bei Gewitterlagen können nicht nur Blitze, sondern eine Reihe weiterer elektrischer Entladungsvorgänge hervorrufen. Bekannt ist beispielsweise das *Elmsfeuer*, eine Funkenentladung, die gelegentlich an der Spitze von Antennen- oder Schiffsmasten auftritt und die als Vorentladung einen Blitz nach sich ziehen kann.

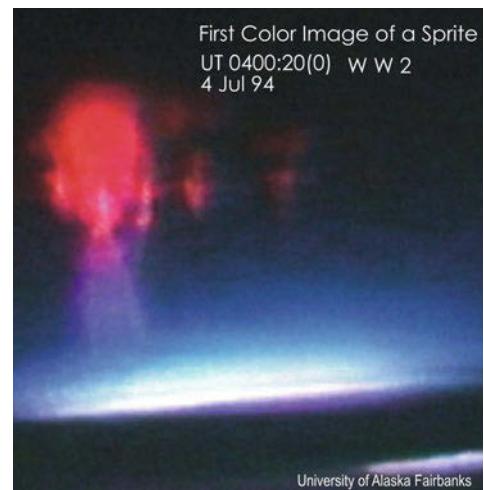
Oberhalb von besonders großen Gewitterwolken hat man in siebzig bis neunzig Kilometern Höhe besonders schöne Entladungsvorgänge beobachtet, die wie rötliche Ringe (*Elfen* genannt) oder wie aufsteigende Stichflammen oder Atompilze (*Kobolde*, engl. Sprites genannt) aussehen können. Piloten kannten diese Phänomene schon lange – allerdings glaubte ihnen früher kaum jemand.

Elmsfeuer an den  
Mastspitzen eines  
Schiffes

Erste Farbaufnahme eines Roten Kobolds von 1994.  
Die rote Farbe entsteht durch die Fluoreszenz von  
Stickstoff, der durch Blitze des darunterliegenden Ge-  
witters angeregt wurde.



Blitze über Las Cruces, New Mexico.



University of Alaska Fairbanks

NASA Earth Observatory Elusive Sprite Captured from the International Space Station  
<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=78487>



# Farben

## Wie bunt ist die Welt?

Elektromagnetische Wellen, deren Wellenlänge zwischen rund 400 und 800 Nanometern liegt, können wir mit unseren Augen als Licht wahrnehmen, wobei wir verschiedene Wellenlängen als unterschiedliche Farben empfinden.

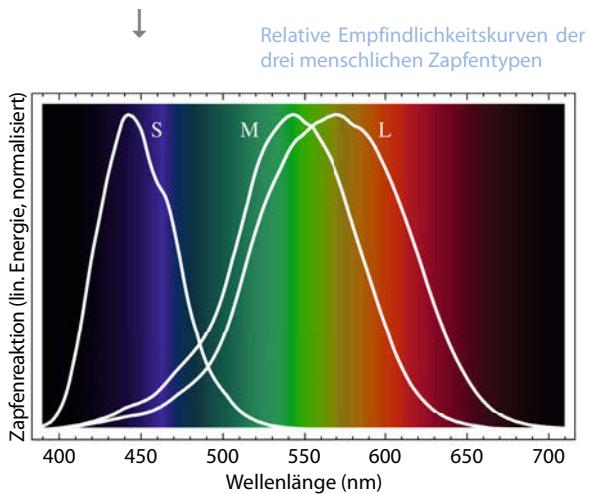
Unsere Augen können jedoch das genaue Wellenspektrum einer Lichtquelle nicht ermitteln, denn verschiedene Spektren können bei uns denselben Farbeindruck hervorrufen – man nennt das *Metamerie*. Das liegt daran, dass sich jeder Farbeindruck bei uns Menschen durch die Überlagerung von nur drei Grundfarben erzeugen lässt. Wir können nicht unterscheiden, ob eine Lichtquelle rein violettes Licht bei nur einer festen Wellenlänge oder rotes sowie blaues Licht bei insgesamt zwei Wellenlängen aussendet – daher kann ein Maler violette Farbe aus den beiden Grundfarben Rot und Blau zusammenmischen. Farbe ist also keine physikalische Eigenschaft des Lichtes, sondern sie entsteht erst in unserer Wahrnehmung. „Rays are not coloured“ soll schon Isaac Newton gesagt haben.

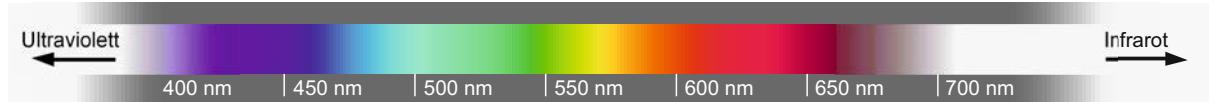


Additive Farbsynthese bei einem leuchtenden Bildschirm im RGB-Farbraum

Für jede der drei Grundfarben existiert ein eigener Sinneszellentyp in unserer Netzhaut: die sogenannten *Zapfen*. Zusätzlich gibt es noch die sogenannten *Stäbchen*, die für das Schwarz-Weiß-Sehen bei nur wenig Licht zuständig sind. Jeder Zapfentyp besitzt eine charakteristische Empfindlichkeitskurve, welche die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass Photonen der entsprechenden Wellenlänge von diesem Zapfentyp wahrgenommen werden.

Wie man in der Abbildung unten sieht, überdecken diese Empfindlichkeitskurven große Wellenlängenbereiche und überlappen sich stark. Um einen Farbeindruck zu gewinnen, muss unser Gehirn die Anregung der drei verschiedenen Zapfentypen daher präzise miteinander vergleichen.



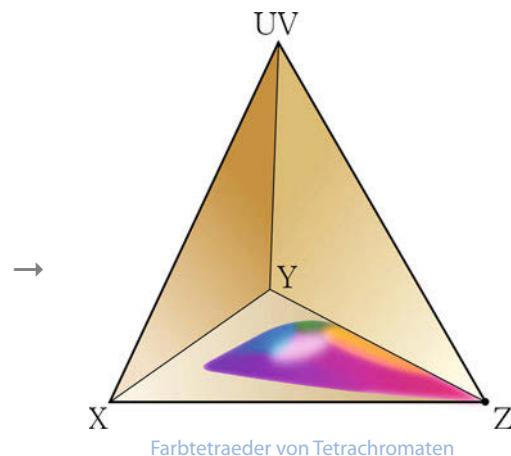


Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)

Nicht alle Tiere haben drei verschiedene Zapfentypen und sind damit sogenannte *Trichromaten*. Die meisten Vögel, Eidechsen, Schildkröten, Amphibien, Fische und viele Insekten haben noch einen vierten Zapfentyp, mit dem sie nahe UV-Licht als vierte Grundfarbe wahrnehmen können – sie sind also *Tetrachromaten*. Ihre Farbenwelt muss deutlich bunter sein als unsere. Man braucht zu ihrer Darstellung das Innere eines Tetraeders, während die von uns wahrnehmbaren Farben auf dem Boden des Tetraeders Platz finden.

Die meisten Säugetiere besitzen nur zwei Zapfentypen; sie sind also *Dichromaten*. Vermutlich haben im Erdmittelalter die frühen Säugetiere sich angesichts der vorherrschenden Dinosaurier nur nachts hinauswagen können, sodass sie zwei der vier Zapfentypen ihrer Vorfahren eingebüßt haben – diese waren in der Dunkelheit oder Dämmerung nutzlos geworden. Die Vögel besitzen als Nachfahren der Dinosaurier dagegen auch heute noch alle vier Zapfentypen.

Nach dem Ende der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren sind einige Säugetiere zur tagaktiven Lebensweise zurückgekehrt, insbesondere die sogenannten *Altweltaffen*, bei denen vor rund 40 Millionen Jahren erneut ein dritter Zapfentyp entstanden ist. Da auch wir biologisch zu den Altweltaffen gehören, können wir ebenfalls wieder dreifarbig sehen, auch wenn unsere Welt damit wohl noch lange nicht so bunt ist wie die Welt der Dinosaurier oder der heutigen Vögel.



Farbtetraeder von Tetrachromaten



Trichromaten wie wir können rote und grüne Früchte problemlos unterscheiden (links), im Gegensatz zu Dichromaten (rechts).

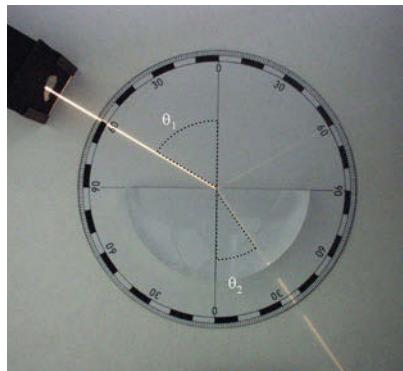


# Lichtbrechung

## Licht auf krummen Touren

Obwohl die *Lichtgeschwindigkeit* von rund 300 000 Kilometern pro Sekunde eine universelle Naturkonstante ist, bewegt sich Licht nur im absoluten Vakuum so schnell. Sobald es sich durch Materie bewegt, wird es für gewöhnlich verlangsamt.

Der Grund hierfür ist der folgende: Sobald Licht durch Materie hindurchgeht, geben die elektromagnetischen Wellen ( $\downarrow$ ) einen Teil ihrer Energie an die Atome ab, und regen diese zum Schwingen an. Aufgrund dieser Oszillation geben die Atome wiederum ihrerseits Strahlung derselben Frequenz ab. Diese überlagert sich mit der ursprünglichen Welle, und die resultierende Schwingung behält zwar dieselbe Frequenz  $f$ , jedoch eine kleinere Wellenlänge  $\lambda$ . Die Phasengeschwindigkeit im Material  $v = f\lambda$  ist deswegen geringer als die ursprüngliche Lichtgeschwindigkeit. Den Faktor, um den die Lichtgeschwindigkeit im Material kleiner ist als im Vakuum, nennt man *Brechungsindex*  $n$ , der von Material zu Material verschieden sein kann.



Aus dem Snellius'schen Brechungsgesetz folgt:  
Sind die Brechungsindizes zweier Materialien unterschiedlich, so müssen sich die Winkel der Lichtstrahlen ebenfalls unterscheiden.

Lichtbrechung an Wassertropfen

Für die Ausbreitung von Licht gilt das sogenannte *Fermat'sche Prinzip*: Ein Lichtstrahl bewegt sich auf derjenigen Bahn von Punkt  $A$  nach Punkt  $B$ , auf der er am wenigsten Zeit benötigt. Weil sich die Geschwindigkeit des Lichtstrahls von Medium zu Medium unterscheidet, ist dies nicht immer der räumlich kürzeste Weg, also eine gerade Linie. Stattdessen werden Lichtstrahlen beim Übergang zwischen zwei Medien leicht abgelenkt – umso mehr, je unterschiedlicher die jeweiligen Brechungsindizes sind. Die Winkel  $\theta_1$  und  $\theta_2$  zwischen den Lotrechten und den Lichtstrahlen folgen das *Snelliussche Brechungsgesetz*:  $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$ .

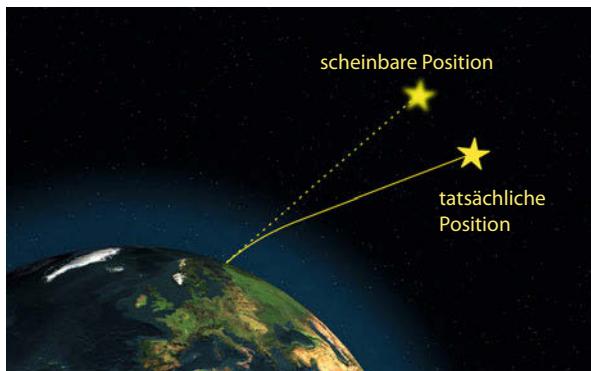
Beim Übergang von Luft (Brechungsindex  $n \approx 1$ ) und Wasser ( $n = 1,33$ ) wird ein Lichtstrahl daher immer um einen gewissen Winkel abgelenkt, weswegen es auch so schwer ist, einen Fisch in einem Fluss mit bloßen Händen zu fangen: Dort, wo unser Auge den Fisch sieht, befindet er sich nicht genau, denn das Licht vom Fisch fällt nicht auf einer geraden Linie in unser Auge.





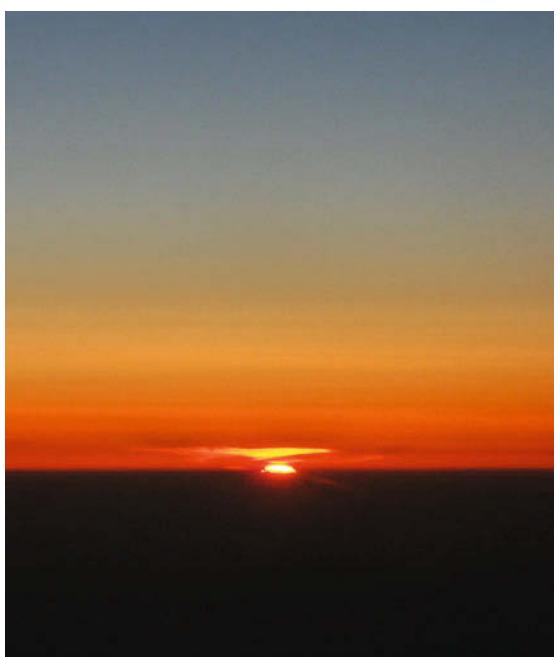
Eine Meeresschildkröte (*chelonia mydas*) und ihre Totalreflexion

Trifft Licht aus einem Medium auf eine Grenzfläche zu einem optisch dünneren Medium (also mit kleinerem Brechungsindex), so gibt es ab einem gewissen Winkel keinen Durchgang mit Richtungsablenkung mehr, sondern der Lichtstrahl wird nach dem Prinzip „Einfallswinkel gleich Ausfallwinkel“ an der Grenzschicht zurückreflektiert. Man spricht in diesem Fall von *Totalreflexion*. Glasfaserkabel nutzen diesen Effekt aus, sodass das durch das Kabel transportierte Licht in den Glasfasern gefangen bleibt.



Obwohl sich Luft mit einem Brechungsindex von ca.  $n = 1,00029$  in optischer Hinsicht kaum vom Vakuum unterscheidet, genügt dies, um Lichtstrahlen, die vom Weltraum aus auf die Atmosphäre treffen, leicht zur Erde hin abzulenken. Diesen Effekt nennt man *astronomische Refraktion*, und er sorgt dafür, dass z. B. die Sterne scheinbar ein wenig höher am Himmel stehen, als sie es in Wahrheit sind. Obwohl sich dieser Effekt normalerweise nur im Bereich von einem halben bis einem Grad bewegt, ist er z. B. für astronomische Messungen, die eine hohe Genauigkeit erfordern, von entscheidender Bedeutung.

Sonnenuntergang über der Ägäis, etwa 10-fach vergrößert.  
Ohne astronomische Refraktion stünde die Sonne schon um 120% ihres Durchmessers tiefer.



C. Huygens *Abhandlungen über das Licht* Verlag Harri Deutsch, 4. Auflage 2011; Originalabhandlung zum Thema Lichtausbreitung aus dem 17. Jahrhundert; ins Deutsche übersetzt

P. Wagner *Erläuterungen zur Strahlenoptik* <http://www.scandig.info/Strahlenoptik.html>

D. Welz *Simulation der Totalreflexion* <http://www.zum.de/dwu/depotan/apop101.htm>



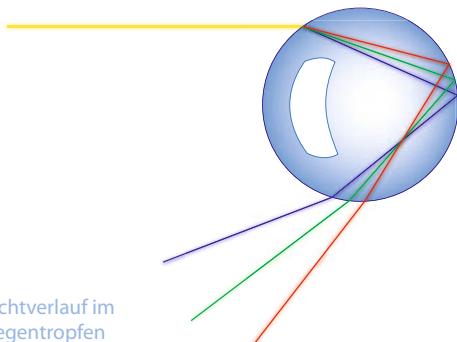
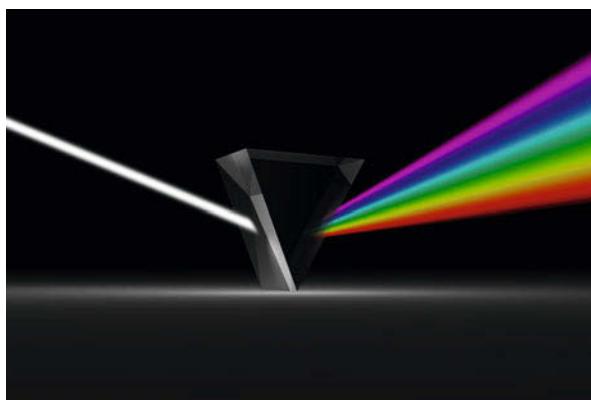
## Regenbogen

### Ästhetische Lichtbrechung an Wassertropfen

In vielen Materialien ist der Brechungsindex – und damit der Winkel, um den Licht abgelenkt wird – von der Wellenlänge des Lichtes abhängig ( $\downarrow$ ). Dieses Phänomen wird als *Dispersion* bezeichnet und ist dafür verantwortlich, dass man zum Beispiel mithilfe eines Prismas einfallendes Sonnenlicht in seine spektralen Bestandteile zerlegen kann.

Ein eindrucksvollen Beispiel für Dispersion in der Natur ist der *Regenbogen*. Er entsteht, wenn Sonnenlicht auf Wassertropfen, z. B. in einer Regenwand oder in Wolken trifft. Beim Eintritt in einen (näherungsweise) kugelförmigen Regentropfen wird das Licht wie beim Prisma in seine Spektralfarben zerlegt, und aufgrund der Totalreflexion an der Rückwand des Tropfens reflektiert.

Ein Prisma spaltet einen weißen Lichtstrahl in die Farben des Regenbogens auf.



Das austretende Licht hat einen festen Winkel zum einfallenden Sonnenlicht. Er beträgt für blaues Licht  $40,7^\circ$ , und für rotes Licht  $42,4^\circ$ . Deswegen sehen wir das Sonnenspektrum in Bogenform: Es befindet sich auf dem Rand eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von ca.  $41^\circ$ , wenn sich die Sonne hinter uns und die Regenwand vor uns befindet. D.h., jeder sieht seinen persönlichen Regenbogen, und zwar an einer leicht anderen Stelle.

Das Licht kann unter einem gewissen Winkel im Wassertropfen auch mehrfach gebrochen werden. So entstehen die sogenannten *Nebenregenbögen*. Der erste Nebenregenbogen entsteht durch zweimalige Reflexion im Inneren des Regentropfens. Da bei jeder Reflexion nicht immer 100 % des Lichtes reflektiert werden, sondern ein Teil den Regentropfen verlässt, sind die Nebenregenbögen deutlich lichtschwächer als der Hauptregenbogen.

Lichtbrechung → S. 64

M. Vollmer *Lichtspiele in der Luft. Atmosphärische Optik für Einsteiger* Spektrum Akademischer Verlag 2005

M. Minnaert *Licht und Farbe in der Natur* Birkhäuser Verlag 1992



Glorie aus einem Flugzeug gesehen

Es gibt den Regenbogen in vielfältigen Varianten: Bei Tröpfchengrößen von unter fünfzig Mikrometern überlagern sich die reflektierten Strahlen derart, dass sie das menschliche Auge als weiß wahrnimmt (den sogenannten Nebelbogen).

Beim *Taubogen* findet die Lichtbrechung an Tautropfen (zum Beispiel auf einer Wiese oder an Spinnweben) statt, während der *Mondregenbogen* hingegen durch die Reflexion des Mondlichtes entsteht. Weil das Mondlicht selbst bei Vollmond knapp eine halbe Million Mal schwächer als das Sonnenlicht ist, ist der Mondregenbogen meistens sehr lichtschwach und gerade bei Luftverschmutzung schlecht zu sehen. Auch er erscheint dem menschlichen Auge als weiß, da wir nachts Farben (↓) nicht gut wahrnehmen können.

Bei jeder Reflexion kehrt sich darüber hinaus die Reihenfolge der Farben um: Während beim Hauptregenbogen (und dem zweiten, vierten, sechsten usw. Nebenregenbogen) das Spektrum von innen nach außen von blau nach rot läuft, ist der erste (dritte, fünfte usw.) Nebenregenbogen innen rot und außen blau gefärbt.

Einen vollständigen, kreisförmigen Regenbogen (auch *Glorie* genannt) kann man zum Beispiel sehen, wenn man vom Flugzeug oder Heißluftballon auf eine Wolkendecke schaut und die Sonne im Rücken hat. Dann umgibt die Glorie den Schatten des Flugzeugs/Balloons auf den Wolken.



Mondbogen, aufgenommen bei den Viktoriafällen, mit einer Belichtungszeit von 30 Sekunden. Beim genauen Hinsehen erkennt man den Nebenregenbogen.

Ein Nebenregenbogen



Farben → S. 62

R. Descartes *Les Météores* Université du Québec à Chicoutimi; Originalabhandlung auf französisch; <http://classiques.uqac.ca/classiques/Descartes/meteores/meteores.html>



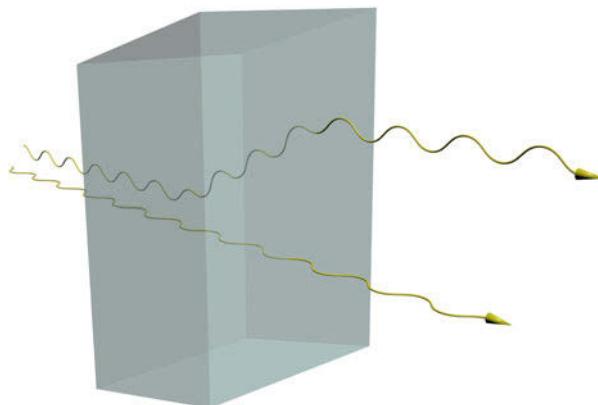
## Anisotrope Medien

Doppelt sehen ohne Alkohol

Anisotrope Medien (vom griechischen  $\alpha\nu$ - un-;  $\iota\sigmao\varsigma$  gleich;  $\tau\rho\pi\omega\varsigma$  Drehung, Richtung) sind solche, bei denen der Brechungsindex ( $\downarrow$ ) nicht nur von der Wellenlänge des Lichtes, sondern auch von der Richtung abhängt, in die sich das Licht im Material bewegt.

Wenn Licht durch ein Medium hindurchgeht, dann regt es die Moleküle im Material zum Schwingen an, weil sich diese wie Hertz'sche Dipole verhalten ( $\downarrow$ ). Normalerweise schwingen diese in dieselbe Richtung wie auch die elektromagnetische Welle ( $\downarrow$ ) – senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Es kommt allerdings vor, z. B. in Kristallen mit besonders unsymmetrischen Strukturen, dass die Schwingungsrichtung der Moleküle und die Schwingungsrichtung des Lichtes (auch *Polarisation* genannt) nicht übereinstimmen.



Zweifach sehen durch Kalkspat

In einem solchen Fall teilt sich der Lichtstrahl, der ursprünglich eine Überlagerung von Wellen aller möglichen Polarisationsrichtungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung enthält, in einen ordentlichen und einen außerordentlichen Strahl auf.

Der ordentliche Strahl folgt dem gewöhnlichen Snellius'schen Brechungsgesetz und enthält alle diejenigen Wellen, die senkrecht zur optischen Achse polarisiert sind. Der außerordentliche Strahl hingegen folgt anderen Regeln: Seine Polarisation steht senkrecht

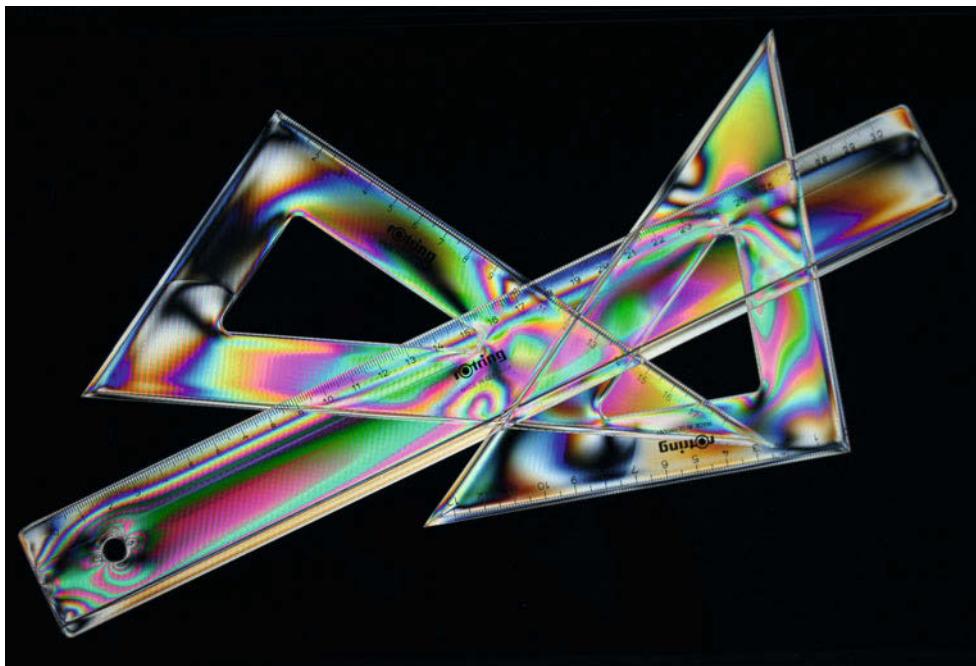
Ein Lichtstrahl wird durch Kalkspat in seine beiden Polarisationen aufgespalten.

zu derjenigen des ordentlichen Strahls, und er wird auch dann abgelenkt, wenn der ursprüngliche Lichtstrahl senkrecht auf das Material trifft, was nach dem Brechungsgesetz eigentlich nicht erlaubt wäre. Beide Teilstrahlen bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch das Medium, weswegen man ihnen einen ordentlichen und einen außerordentlichen Brechungsindex zuordnen kann.

Es gibt viele optisch anisotrope Materialien. Eines der bekanntesten Beispiele ist Kalkspat, auch Doppelspat oder Calcit genannt. Bei senkrechtem Lichteinfall auf den Calcitkristall haben ordentlicher und außeror-

dentlicher Strahl einen Winkel von  $6,2^\circ$  zueinander. Betrachtet man ein Objekt durch einen hinreichend dicken Calcit, kann man es somit doppelt sehen.

Aber nicht nur Kristalle mit besonderer Molekülstruktur können optisch anisotrop sein: Auch optisch isotrope Medien, also solche, die nur einen einzigen Brechungsindex für alle Richtungen besitzen, können durch Anwendung äußerer mechanischer Spannung, zum Beispiel Scherung oder einseitige Drücke, anisotrop werden. Man spricht hierbei von Spannungsdoppelbrechung und benutzt dieses Phänomen, um mechanische Belastungen in Materialien zu messen.



Spannungsdoppelbrechung im Geodreieck



# Optische Linsen

## Abbildungen und Abbildungsfehler

Nach dem sogenannten *Fermat'schen Prinzip* wählt ein Lichtstrahl immer genau den Weg zwischen zwei Punkten, für den er die kürzeste Zeit benötigt. (Diese Eigenschaft besitzen übrigens nicht nur Lichtwellen, sondern alle Wellen, deren Wellenlänge sehr viel kleiner als die Ausdehnung der beteiligten Objekte ist.)

Dies ist der Grund, weswegen ein Lichtstrahl die Richtung ändert, wenn er die Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes – zum Beispiel Luft und Glas – passiert (↓). Er versucht dabei, so lange wie möglich in der Luft zu laufen – in der er schneller ist – und biegt erst dann in das Glas ein, wenn es nötig wird: ähnlich wie ein Läufer am Strand, der möglichst schnell einen Ball aus dem Wasser holen möchte und dabei auch möglichst lange an Land laufen wird.

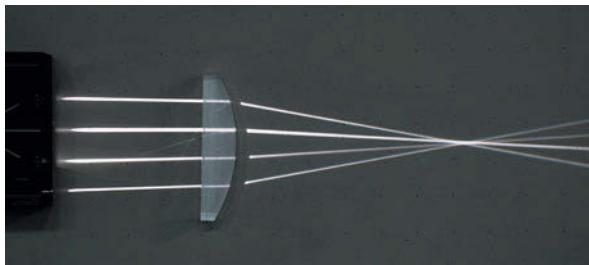
Diese stets gültige Zeitoptimierung des Lichtes bezüglich des Weges erlaubt es, dass man den Verlauf von Lichtstrahlen fast nach Belieben künstlich beeinflussen kann, indem man sie durch speziell geformte Linsen

schickt. So lassen sich parallele Lichtstrahlen mithilfe von konvex geformten Linsen auf einen Punkt (den Brennpunkt) fokussieren, wohingegen man sie mit konkaven Linsen aufweiten kann.

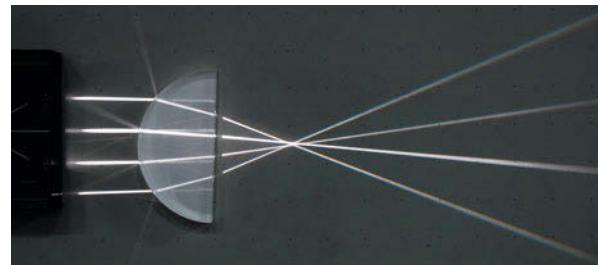
Ein optisches Mikroskop zum Beispiel arbeitet mit zwei konvexen Linsen, die einander gegenüber stehen. Ein Lichtstrahl, der von einem Objekt ausgeht, das vor der einen Linse (dem Objektiv) steht, wird bei seinem Durchgang durch das Mikroskop derart abgelenkt, dass es beim Austritt durch die zweite Linse (dem Okular) einen steileren Winkel im Vergleich zur optischen Achse hat. Ein Auge sieht diesen Strahl also unter einem größeren Winkel, und das dahinterliegende Objekt erscheint demnach größer, als es in Wirklichkeit ist.

Für sehr dünne Linsen kann man den Weg der Lichtstrahlen nach den einfachen Gesetzen der Strahlenoptik berechnen. Leider ist es nur in stark idealisierten Fällen so, dass man das Bild eines kleinen Objektes fehlerfrei vergrößern kann. In der Realität treten bei den meisten Linsen sogenannte *Abbildungfehler* auf.

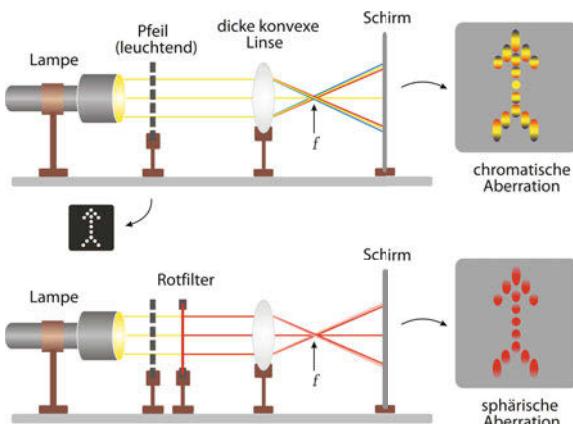
Eine (dünne) plankonvexe Linse fokussiert Strahlen auf einen Punkt.



Lichtstrahlen bei der sphärischen Abberation



Zum einen tritt bei den meisten Linsen die *chromatische Aberration* auf. Ihre Ursache ist, dass reale Materialien über eine Dispersion verfügen, d.h. ihre Brechzahl ist von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängig. Daher wird bei einer Linse, genau wie bei Prismen (siehe Artikel zum Regenbogen ↓), ein weißer Lichtstrahl in seine Bestandteile zerlegt, und diese Bestandteile treffen sich im Auge des Beobachters nicht unbedingt alle im selben Punkt wieder.



Chromatische und sphärische Aberration

Ein Linsenfehler, der hauptsächlich bei der Linse unseres Auges eine Rolle spielt, ist der *Astigmatismus*. Seine Ursache ist, dass schräg auf die Linse einfallendes Licht in der Einfallsebene stärker fokussiert wird als senkrecht dazu. Die Folge ist ein Bild, das zum Rand hin unschärfer ist als im Zentrum.

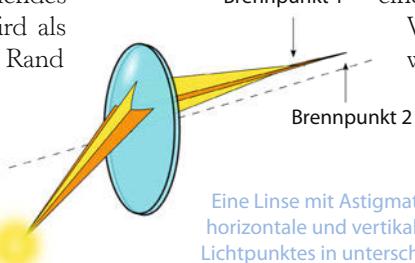
Die *sphärische Aberration* hat zur Folge, dass parallele Strahlenbündel nicht genau in einem Punkt fokussiert werden, sondern sich weiter außen liegende Strahlen vor weit-



ter hinter liegenden treffen. Seinen Namen hat dieser Abbildungsfehler, weil er bei Linsen auftritt, deren Oberflächen Teil einer Kugeloberfläche sind. Durch korrektes, nicht sphärisches Schleifen könnte man diesen Fehler zwar verhindern, aber da Linsen mit Kugeloberflächen zu schleifen deutlich einfacher und kostengünstiger ist, lebt man meist mit diesem Fehler.

Als letzter Abbildungsfehler sei an dieser Stelle die *Verzeichnung* genannt. Dieser Fehler führt zu einer Krümmung der Bildgeometrie. Bei negativer Krümmung spricht man hierbei von *kissenförmiger*, bei positiver Krümmung von *tonnenförmiger* Verzeichnung. Das Bild, das man durch den Spion an einer Haustür sieht, ist ein gutes Beispiel für eine starke tonnenförmige Verzeichnung. In Fotoapparaten tritt dieser Fehler auf, wenn die Blende zu weit vor (bzw. hinter) der Bildebene liegt. Manchmal ist

Brennpunkt 1  
eine extreme tonnenförmige  
Verzeichnung sogar erwünscht, zum Beispiel in  
einer *Fischauge-linse*.



Eine Linse mit Astigmatismus fokussiert horizontale und vertikale Ausdehnung eines Lichtpunktes in unterschiedliche Ebenen.

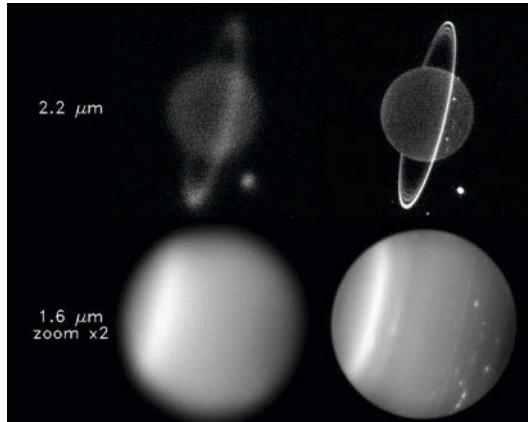


## Adaptive Optiken

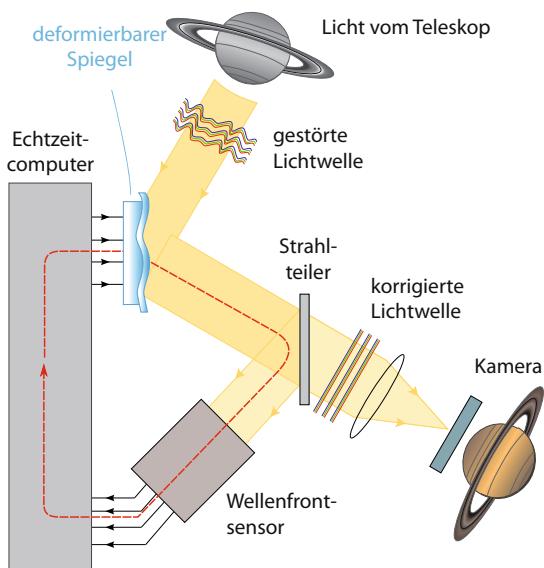
### Intelligente Spiegel

Um mit erde gebundenen Teleskopen detaillierte Bilder des Sternenhimmels abzubilden, setzt man eine Vielzahl von Linsen und Spiegeln ein. Obwohl man die Abbildungsfehler der Linsen (siehe Optische Linsen ↓) häufig mehr oder weniger gut kompensieren kann, gibt es eine andere Fehlerquelle, die die Auflösung der Teleskope stark beeinträchtigen kann und die nichts mit dem Gerät selbst zu tun hat: die Erdatmosphäre.

Die Luft in der Atmosphäre ist eben nicht statisch, sondern es treten ständig kleine Turbulenzen (↓) auf, in denen sich Luft unterschiedlicher Temperatur ver-



Planet Uranus mit Ringen (oben) und in doppelter Vergrößerung (unten). Deutlich erkennt man den Unterschied zwischen einer Aufnahme ohne (links) und mit adaptiver Optik (rechts).



Schematische Darstellung der Funktionsweise einer adaptiven Optik

wirbelt. Weil der Brechungsindex (↓) der Luft von ihrer Temperatur abhängt, ändern sich die Brechungseigenschaften der Atmosphäre ständig – üblicherweise auf Zeitskalen von Sekundenbruchteilen. Deswegen wird ein Lichtstrahl, der die Erdatmosphäre durchquert, ständig zufällig abgelenkt und ändert auf dem Bild daher ununterbrochen ein wenig seine Position. Schon bei geringer Belichtungszeit hat sich der Lichtpunkt daher zu einem leicht verwaschenen Fleck verbreitert. Natürlich sind diese Verbreiterungen zu klein als dass man sie mit bloßem menschlichen Auge erkennen könnte – für die hochpräzisen Beobachtungsinstrumente, mit denen tief ins Weltall geschaut wird, stellt dieses Flimmen jedoch eine wesentliche Beschränkung ihrer Auflösung dar.



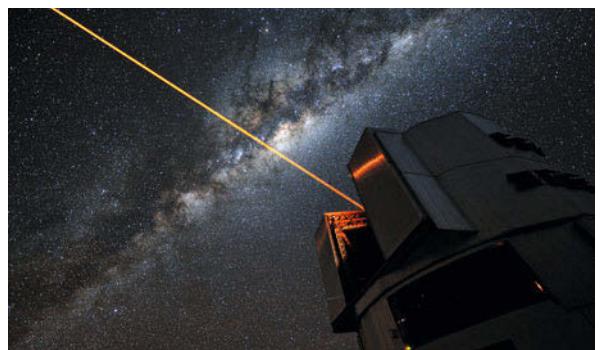
Die Rückseite eines Spiegels mit 672 Steuerelementen

Wie kann man gegen diese Verwischung des aufgenommenen Bildes vorgehen? Hierfür hat man sich ein wahrhaft geniales System einfallen lassen: Das ankommende Licht wird, bevor es in die Teleskoplinse einfällt, an einem Spiegel reflektiert. Dieser Spiegel hat allerdings keine gewöhnliche, statische Oberfläche, sondern ist leicht biegsam. Hinter den Spiegel sind unzählige winzige *Aktuatoren* geschaltet, die sich bei einer angelegten Spannung ausdehnen bzw. zusammenziehen. Obwohl sich die Aktuatoren – die für gewöhnlich im Abstand von wenigen Millimetern voneinander angebracht sind – nur um einige Mikrometer verkürzen oder verlängern, kann man damit den Spiegel sehr genau „verbeulen“. Wenn die verzerrte Wellenfront des einfallenden Lichtes von einem Spiegel mit dem exakt richtigen Profil reflektiert wird, kann man die Verzerrung durch die Luftperturbulzen also kompensieren. Um mit den Luftverwirbelungen mitzuhalten, wird dabei die Spiegeloberfläche im Hundertstelsekundentakt genau angepasst.

Langzeitaufnahme des European Southern Observatory's Very Large Telescope

Woher weiß aber der Spiegel, welche Form er annehmen muss, um die jetzt in diesem Sekundenbruchteil gerade herrschenden atmosphärischen Turbulenzen auszugleichen? Normalerweise sucht man sich dafür einen sogenannten *Referenzstern*, d.h. ein kleines aber helles Objekt, das sich in der Nähe der Stelle befindet, die man beobachten will. Indem man das Hin- und Herzittern des Referenzsterns zeitgenau mitverfolgt, kann man auf die atmosphärischen Turbulenzen zurück schließen und den Spiegel dementsprechend in Echtzeit anpassen.

Oft nimmt man als natürliche Referenzsterne auch Objekte, die gar keine eigentlichen Sterne sind, wie zum Beispiel einen Saturnmond, wenn man eine hochauflösende Aufnahme der Saturnoberfläche haben will. Häufig ist aber gerade kein brauchbares Objekt in der Nähe. In diesem Fall muss man sich eines künstlich erzeugen: So werden künstliche Referenzsterne erzeugt, indem man einen gebündelten Laserstrahl ( $\downarrow$ ) in die Atmosphäre schießt, der so fokussiert ist, dass er erst an einer der höher gelegenen Schichten der Atmosphäre reflektiert wird. An diesem „künstlichen Stern“ kann man sich dann orientieren.



Laser → S. 214

A. Unsöld, B. Baschek *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik* Springer Verlag, 7. Auflage 2002  
Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg *Adaptive Optik Online*  
[http://www.mpa.de/homes/hippler/AOonline/ao\\_online\\_inhalt.html](http://www.mpa.de/homes/hippler/AOonline/ao_online_inhalt.html)



# Luftspiegelungen

## Fliegende Holländer, Fata Morganas und Phantominseln

Durch die Jahrhunderte haben Reisende zu Land und zu Wasser immer wieder von rätselhaften Erscheinungen am Horizont berichtet. Auf dem Land – insbesondere in der Wüste – erweckten diese oft den Eindruck einer Wasserfläche in einiger Entfernung. Auf dem Wasser hingegen gab es viele Berichte über Sichtungen von Landmassen oder Schiffen am Horizont, die verzerrt aussahen und geisterhaft flackerten.

Gemeinsam war diesen Phänomenen, dass es sich nicht um Halluzinationen oder Wahnvorstellungen handelte: Mehrere gleichzeitige Beobachter stimmten in ihren Aussagen über die Sichtungen überein. In modernerer Zeit war es sogar möglich, die Erscheinungen zu fotografieren.

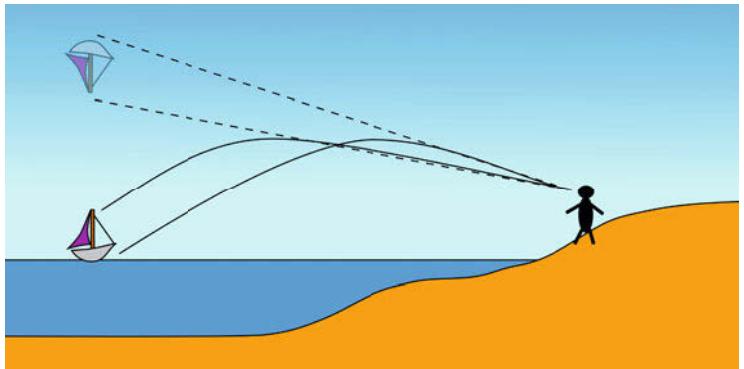
Alle diese Erscheinungen entstehen aufgrund von Lichtablenkung an verschiedenen warmen – und damit optisch unterschiedlich dichten – Luftsichten. Sie werden daher auch *Luftspiegelungen* genannt. Alle Luftspiegelungen beruhen auf dem Prinzip, dass warme Luft einen niedrigeren Brechungsindex ( $\downarrow$ ) besitzt als kalte.

Die bekannteste Luftspiegelung ist die Fata Morgana. Sie tritt auf, wenn Luftsichten am Boden sehr viel wärmer sind als die darüberliegenden. Lichtstrahlen, die im flachen Winkel vom Himmel aus auf den Boden treffen, werden in diesen Schichten reflektiert und fallen in

das Auge des Beobachters. Auf diesem Weg entsteht der Eindruck einer klaren himmelsfarbenen Fläche auf dem Boden in weiter Entfernung. Diese Fläche wird oft mit einer Wasserlache verwechselt. Die Fata Morgana kann man zum Beispiel in der Wüste beobachten oder an heißen, sonnigen Tagen über einer Straße, die sich und die über ihr liegende Luft aufgrund ihrer dunklen Farbe aufheizt.

Der umgekehrte Effekt tritt auf, wenn die Luftsicht am Boden deutlich kälter ist als die Luft darüber. Dies tritt unter anderem auf dem offenen Meer auf und auch häufig in arktischen Gebieten, in denen Eisflächen die Luft über ihnen stetig abkühlen.

In diesen Fällen werden Strahlen, die von einem Objekt in Richtung des Himmels abgegeben werden, an oberen warmen Luftsichten reflektiert und wieder zurück in Richtung des Bodens geworfen. Auf diese



Weise kann man Objekte – auf dem Kopf stehend – am Himmel abgebildet sehen, die sich eigentlich sehr viel weiter entfernt befinden. Bei entsprechenden Beobachtungswinkeln kann somit der Eindruck entstehen, dass sich ein weit entferntes Schiff durch die Luft bewegt. Es wird vermutet, dass die vielen Sichtungen des sagenumwobenen Geisterschiffes *Fliegender Holländer* auf diese Sorte Luftspiegelungen zurückzuführen sind. In der Tat sind die Bedingungen für solche Luftspiegelungen am Kap der guten Hoffnung – wo der Fliegende Holländer der Legende nach sein Unwesen treiben soll – besonders gut, denn dort treffen kalte auf warme Meeresströmungen, und damit auch kalte auf warme Luftmassen.



Fata Morgana auf dem Highway

Fata Morgana am Chott el Djerid



Doch nicht nur Spiegelungen von Schiffen hat man auf diese Weise gesehen. Ganze Landmassen wurden übereinstimmenden Berichten zufolge an Stellen ausgemacht, an denen man später bei einer genaueren Erforschung nichts fand. Eines der frappierendsten Beispiele für eine solche *Phantominsel* war Crocker Land, das im Jahr 1906 vom Entdecker Robert Peary für einen achten Kontinent im Nordpolarmeer gehalten wurde. Die Expedition, um die Landmasse zu erforschen, endete nicht nur ergebnislos, fast die gesamte Besatzung kam bei der Jagd nach der (wie man heute vermutet) Luftspiegelung ums Leben.



## Tarnvorrichtungen

### Metamaterialien und der Traum von der Unsichtbarkeit

Lichtstrahlen bewegen sich aufgrund des Prinzips von Fermat nicht immer auf geraden Linien. Stattdessen ändern sie ihre Richtung, wenn sich der Brechungsindex des umgebenden Mediums ändert (Lichtbrechung ↓).

Dies eröffnet die Möglichkeit, den Lauf von Lichtstrahlen gezielt zu beeinflussen. Im Jahre 2006 veröffentlichten Forscher der Duke University in North Carolina, USA, eine Studie, bei der sie eine Form einer „Tarnvorrichtung“ konstruiert hatten. Diese bestand aus einem Hohlzylinder, dessen Brechungsindex von Ort zu Ort auf besondere Weise variierte. So wurden elektromagnetische Wellen (↓), die seitlich auf den Zylinder trafen, um den Hohlraum in der Mitte herum geleitet, und traten auf der gegenüberliegenden Seite wieder aus, als sei nichts gewesen. Man konnte also einen Gegenstand in den Innenraum des Zylinders legen, und die von außen einstrahlenden Wellen konnten weder von ihm reflektiert noch absorbiert werden. Man konnte diesen Gegenstand also weder sehen, noch warf er einen Schatten.

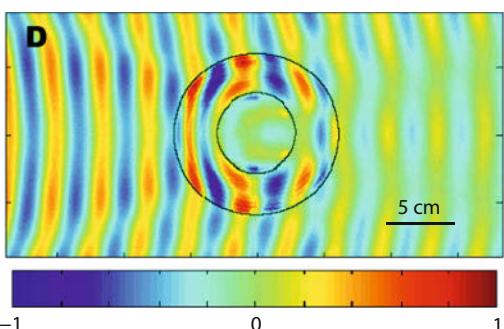
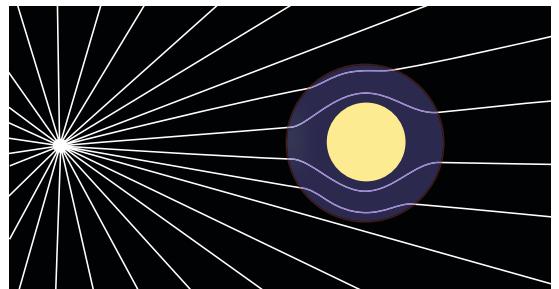


Bild links unten aus D. Schurig et al. *Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies* Science, 2006, Vol. 314, Nr. 5801, <http://www.sciencemag.org/content/314/5801/977>  
Lichtbrechung → S. 64  
Die elektromagnetische Wechselwirkung → S. 56



Lichtstrahlen werden um ein Objekt herumgeleitet – dieses wird so unsichtbar.

Auch wenn diese Tarnvorrichtung nur für Wellenlängen im Mikrowellenbereich funktionierte und nicht für sichtbares Licht, so stellte dieses einen gewaltigen Schritt zur Entwicklung eines echten „Unsichtbarkeitsmantels“ dar, der Gegenstände des alltäglichen Lebens für uns unsichtbar machen könnte. Auch Harry Potters Tarnumhang könnte also womöglich eines Tages Realität werden.

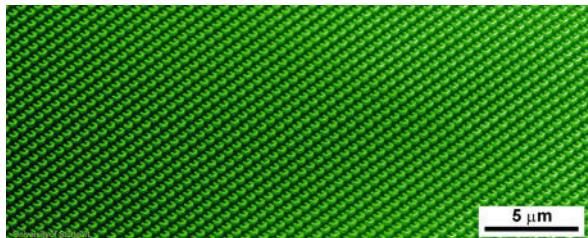
Bei der Konstruktion dieses Zylinders stieß man schnell auf das folgende Problem: In der Natur vorkommende Materie hat für gewöhnlich einen Brechungsindex, der größer ist als 1, wobei das reine Vakuum einen Brechungsindex von genau 1 besitzt. Überschreitet ein Lichtstrahl die Grenze zwischen zwei Materialien mit

Der erste „Unsichtbarkeitsmantel“ für Mikrowellen wurde im Jahre 2006 an der Duke University in North Carolina, USA, realisiert.

unterschiedlichen Brechungsindizes, so wird er zum Lot hin gebrochen, wenn dabei der Brechungsindex steigt, und vom Lot weggebrochen, wenn dabei der Brechungsindex sinkt. Um die Strahlen genau um den Zylinder herum zu leiten, war es daher nötig, an einigen Stellen Materialien zu verwenden, die optisch dünner sind als das Vakuum, also einen Brechungsindex von kleiner als 1 oder sogar negative Brechungsindizes besaßen. Solche Materialien kommen in der Natur jedoch nicht vor und so musste man sie künstlich erzeugen, weshalb man sie *Metamaterialien* taufte.

Metamaterialien, die einen negativen Brechungsindex für elektromagnetische Wellen besitzen, bestehen aus einer periodischen Anordnung von winzigen Strukturen. Ihre Wechselwirkung mit elektromagnetischen Wellen sorgt dafür, dass sich das Material effektiv so verhält, als hätte es einen negativen Brechungsindex. Dafür müssen die Strukturen jedoch sehr viel kleiner sein als die Wellenlänge des betreffenden Lichtes. Für Mikrowellenstrahlung reichen dafür Größen von wenigen Millimetern aus, während man für sichtbares Licht auf wenige Nanometer hinuntergehen müsste, was die Konstruktion deutlich erschwert.

Metamaterialien bestehen aus kleinsten Bausteinen, die auf spezielle Art und Weise mit dem Licht wechselwirken.



Gewöhnliche Wasserwellen → S. 100  
Besondere Wasserwellen → S. 102  
Erdbeben und seismische Wellen → S. 266

Methoden, um negative Brechungsindizes auch für seismische oder Wasserwellen (↓) zu erzeugen, werden zurzeit ebenfalls entwickelt. Der Nutzen liegt auf der Hand: Wer zum Beispiel würde Inseln nicht gerne „unsichtbar“ – oder genauer: unerreichbar – für Tsunamiwellen machen und sie so vor deren verheerenden Auswirkungen schützen?

In Materialien mit negativem Brechungsindex werden Lichtstrahlen auf ungewöhnliche Weise gebrochen (Illustration von Nariyuki Yoshihara).

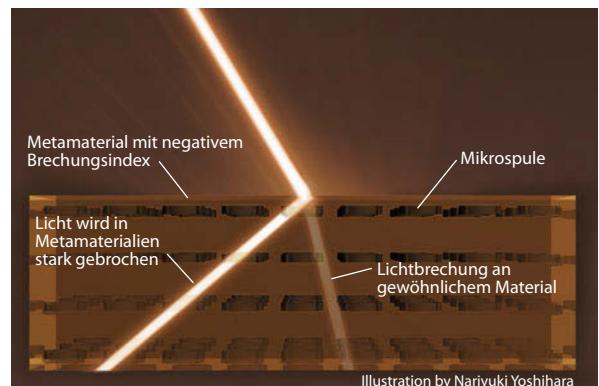
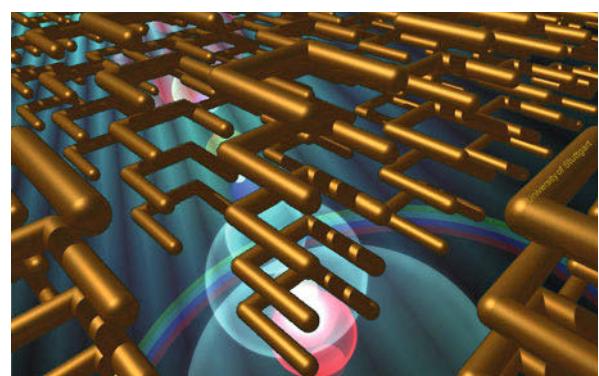
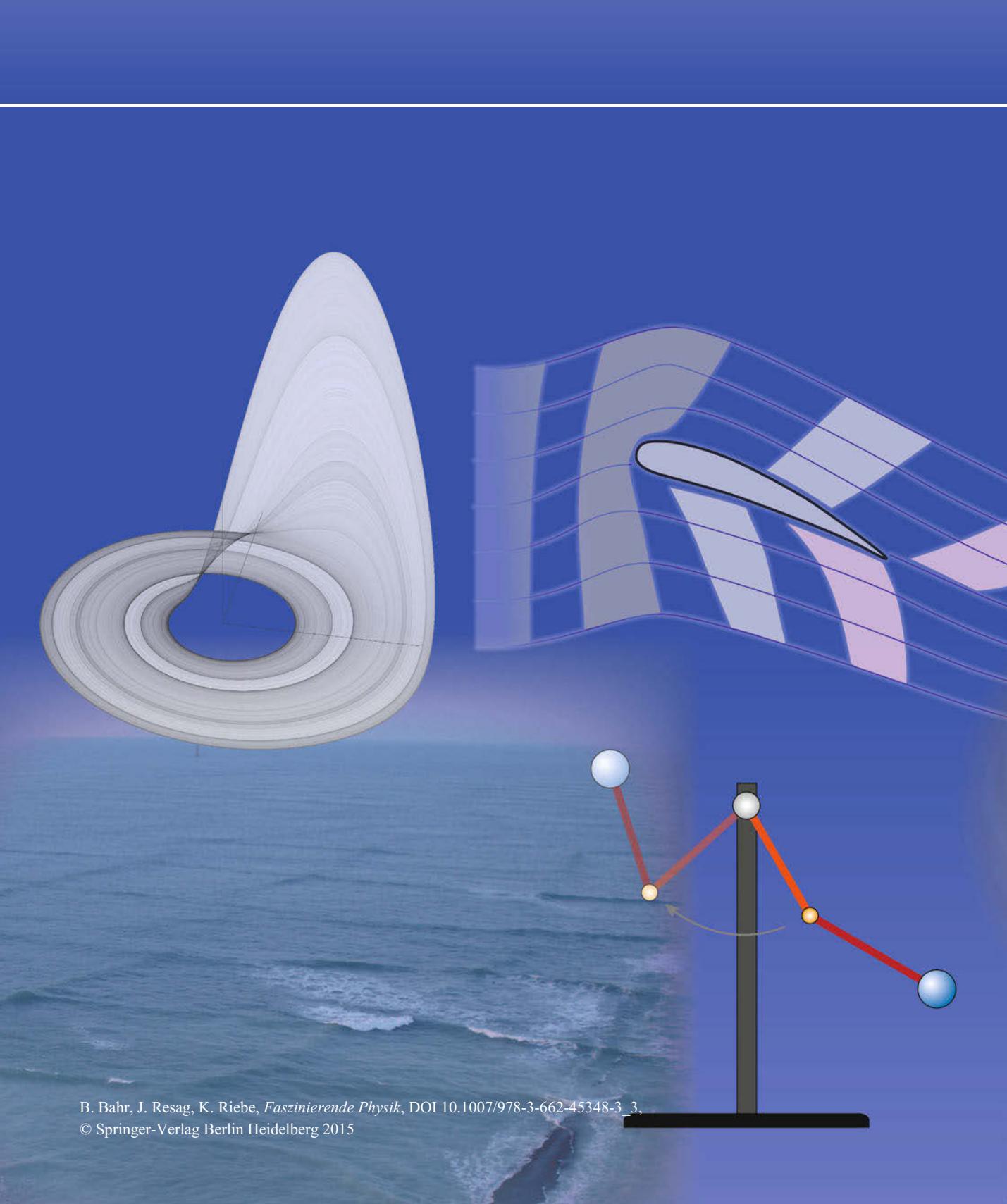
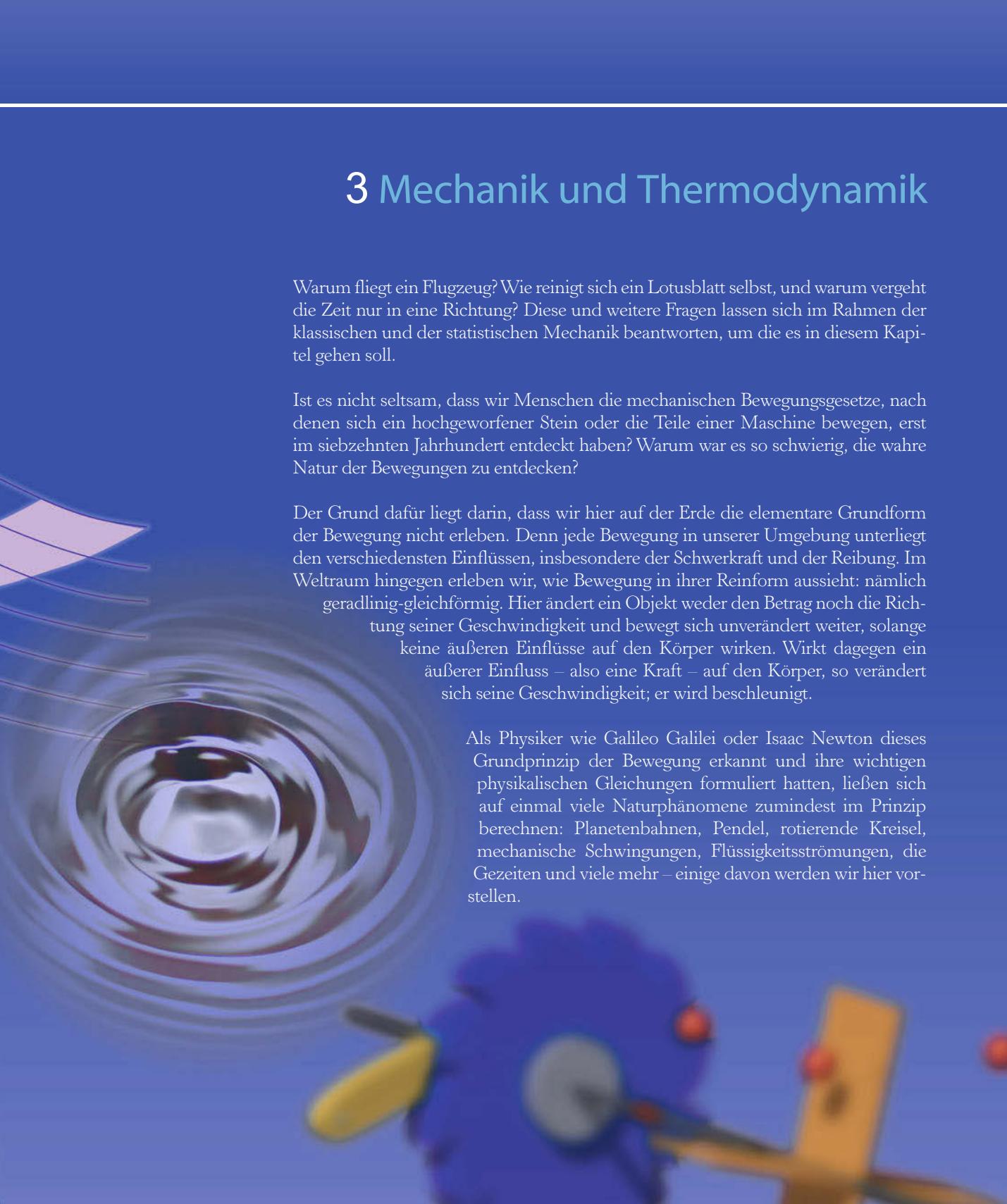


Illustration by Nariyuki Yoshihara





# 3 Mechanik und Thermodynamik



Warum fliegt ein Flugzeug? Wie reinigt sich ein Lotusblatt selbst, und warum vergeht die Zeit nur in eine Richtung? Diese und weitere Fragen lassen sich im Rahmen der klassischen und der statistischen Mechanik beantworten, um die es in diesem Kapitel gehen soll.

Ist es nicht seltsam, dass wir Menschen die mechanischen Bewegungsgesetze, nach denen sich ein hochgeworfener Stein oder die Teile einer Maschine bewegen, erst im siebzehnten Jahrhundert entdeckt haben? Warum war es so schwierig, die wahre Natur der Bewegungen zu entdecken?

Der Grund dafür liegt darin, dass wir hier auf der Erde die elementare Grundform der Bewegung nicht erleben. Denn jede Bewegung in unserer Umgebung unterliegt den verschiedensten Einflüssen, insbesondere der Schwerkraft und der Reibung. Im Weltraum hingegen erleben wir, wie Bewegung in ihrer Reinform aussieht: nämlich geradlinig-gleichförmig. Hier ändert ein Objekt weder den Betrag noch die Richtung seiner Geschwindigkeit und bewegt sich unverändert weiter, solange keine äußeren Einflüsse auf den Körper wirken. Wirkt dagegen ein äußerer Einfluss – also eine Kraft – auf den Körper, so verändert sich seine Geschwindigkeit; er wird beschleunigt.

Als Physiker wie Galileo Galilei oder Isaac Newton dieses Grundprinzip der Bewegung erkannt und ihre wichtigen physikalischen Gleichungen formuliert hatten, ließen sich auf einmal viele Naturphänomene zumindest im Prinzip berechnen: Planetenbahnen, Pendel, rotierende Kreisel, mechanische Schwingungen, Flüssigkeitsströmungen, die Gezeiten und viele mehr – einige davon werden wir hier vorstellen.

# Newtons Gesetze der Mechanik

## Warum bewegt sich ein Körper?

Im Jahr 1687 formulierte Isaac Newton die folgenden Gesetze der Mechanik und stellte damit erstmals die Physik bewegter Körper auf eine solide Grundlage:



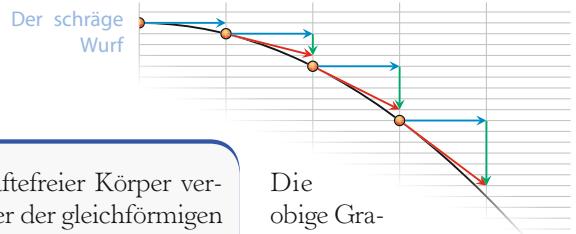
Sir Isaac Newton, gemalt von Godfrey Kneller im Jahr 1689

**1. Trägheitsprinzip:** Ein kräftefreier Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung.

**2. Aktionsprinzip:** Die Beschleunigung  $\mathbf{a}$  einer Masse  $m$  erfolgt proportional und in Richtung der bewegenden Kraft:  $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ .

**3. Wechselwirkungsprinzip:** Übt ein Körper  $A$  auf einen anderen Körper  $B$  eine Kraft aus (*actio*), so wirkt eine gleich große, aber umgekehrt gerichtete Kraft von Körper  $B$  auf Körper  $A$  (*reactio*).

Dabei ist das Trägheitsprinzip eigentlich im Aktionsprinzip bereits enthalten, denn die Beschleunigung eines kräftefreien Körpers ist null. Dennoch hat Newton es einzeln aufgeführt, denn seine Gültigkeit widerspricht zunächst unserer Erfahrung, nach der ein sich selbst überlassener Körper immer langsamer wird und schließlich zur Ruhe kommt. Galilei hatte im Jahr 1632 in seinem „Dialog über die beiden Weltsysteme“ bereits ein ähnliches Trägheitsgesetz formuliert, wobei er allerdings annahm, ein Körper bewege sich aufgrund seiner Trägheit natürlicherweise auf einer Kreisbahn um den Mittelpunkt der Erde bzw. Sonne, so wie die Planeten das näherungsweise tun.



Die obige Grafik illustriert zugleich das erste und zweite Gesetz: Die nach rechts gerichtete Geschwindigkeitskomponente eines Körpers (blaue Pfeile) ändert sich unter dem Einfluss der nach unten wirkenden Schwerkraft nicht, während die nach unten gerichtete Geschwindigkeitskomponente (grün) gleichmäßig mit der Zeit an-

wächst. Das Bild auf der nächsten Seite zeigt, wie es auf einer mehrfach belichteten Aufnahme aussieht, wenn ein leuchtender Stift fallen gelassen wird und eine solche Bewegung real ausführt.

Es ist gar nicht so einfach, sich die enorme Bedeutung der Newton'schen Gesetze klar zu machen und zu ermessen, wie schwierig es war, sie in dieser Klarheit zu erkennen und zu formulieren. Was zum Beispiel ist denn eigentlich eine *Kraft*? Richard Feynman hat dazu einmal scherhaft folgendes hypothetisches Bewegungsgesetz formuliert: „Ein Körper bewegt sich nur dann, wenn eine Schmaft auf ihn einwirkt.“



Bewegung eines leuchtenden Stiftes unter dem Einfluss der Schwerkraft: er „hüpft“ auf Parabeln.

Dieses Schmaut-Gesetz entspricht – bei allem Scherz – eher unserer Anschauung als Newtons Gesetze. Vor Newton nahm beispielsweise Johannes Kepler noch an, dass die Sonne eine Art Schmaut auf die Planeten ausübt und sie so wie ein Schaufelrad auf ihren Bahnen umso stärker antreibt, je näher sie um die Sonne

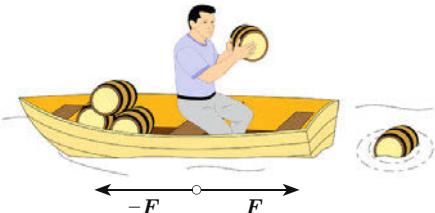


Illustration des dritten Newton'schen Gesetzes

kreisen ( $\downarrow$ ). In der zweiten Hälfte des siebzehnten Jahrhunderts fand man dann heraus, dass man auf dieser Grundlage keine vernünftige Physik aufbauen kann. Das ist beim Begriff der *Kraft* anders: Hier findet man physikalische Gesetze wie beispielsweise das Gravitationsgesetz ( $\downarrow$ ), die es einem erlauben, Kräfte zwischen Körpern konkret anzugeben und so über Newtons Gesetze ihre Bewegung zu berechnen – in Übereinstimmung mit ihrer realen Bewegung. Der Begriff der *Kraft* lässt sich also mit physikalischer Bedeutung verstehen, während der Begriff der *Schmaut* sich letztlich als ein physikalisch sinnloses Konstrukt erwiesen hat.

Newton's drittes Gesetz verbindet man oft mit dem Begriff des *Rückstoßes*. Dadurch gelingt es, einen Körper (beispielsweise ein Boot oder ein Space Shuttle) in eine Richtung zu beschleunigen, indem man einen anderen Körper (ein Fass bzw. Abgase) in die andere Richtung wegstoßt.

Startendes Space Shuttle



Foto oben links mit freundlicher Genehmigung von Caleb Charland <http://calebcharland.com>  
Die Kepler'schen Gesetze → S. 10  
Newtons Gravitationsgesetz → S. 88

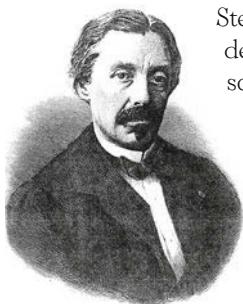


## Das Foucault'sche Pendel

### Der Nachweis der Erdrotation

Wenn man ein sehr langes frei bewegliches Pendel in eine gleichmäßige Schwingung versetzt, so scheint sich die Schwingungsebene des Pendels im Lauf des Tages langsam zu drehen. Wenn es beispielsweise morgens noch in Nord-Süd-Richtung pendelte, so schwingt es abends möglicherweise in Ost-West-Richtung.

Dieses bereits im Jahr 1661 vom italienischen Physiker Vincenzo Viviani durchgeführte Experiment zeigte der französische Physiker Jean Bernard Léon Foucault im Jahr 1851 einer breiten Öffentlichkeit und demonstrierte damit für jeden sichtbar die Existenz der Erdrotation. Man spricht daher vom *Foucault'schen Pendel*. Solche Pendel findet man heute beispielsweise im Deutschen Museum in München oder im Kölner Odysseum.



Jean Bernard Léon Foucault

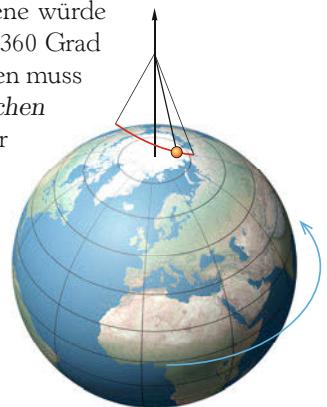
Stellt man ein Foucault'sches Pendel am Nordpol auf, so ist die scheinbare Drehung der Pendelebene unmittelbar einleuchtend: Die Pendelebene bleibt unverändert, während sich die Erde in 24 Stunden einmal ganz unter dem Pendel dreht. Für einen Beobachter am Nordpol entsteht so der



Foucault'sches Pendel in Valencia

Eindruck, die Pendelebene würde sich einmal am Tag um 360 Grad drehen (genau genommen muss man von einem *siderischen* Tag sprechen, also einer Umdrehung der Erde gegenüber dem Fixsternhimmel).

Stellt man das Pendel dagegen am Äquator auf, so beobachtet man überhaupt keine Drehung der Pendelebene.



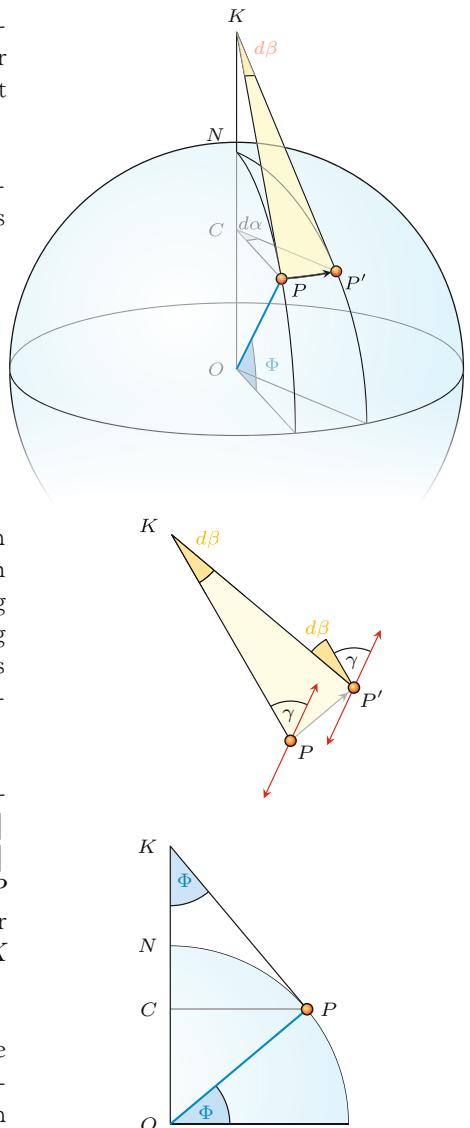
Allgemein gilt am Breitengrad  $\Phi$ , dass die scheinbare Drehgeschwindigkeit der Pendelebene gegenüber der Erdoberfläche um den Faktor  $\sin \Phi$  gegenüber der Drehgeschwindigkeit am Nordpol verringert ist (am Äquator ist  $\Phi = 0$ , am Nordpol ist  $\Phi = 90$  Grad).

Man kann sich dieses allgemeine Drehverhalten der Pendelebene anschaulich anhand der nebenstehenden Abbildung klar machen: Das Pendel befindet sich dabei zunächst am Ort  $P$  beim Breitengrad  $\Phi$  und bewegt sich aufgrund der Erdrotation nach kurzer Zeit zum nahegelegenen Punkt  $P'$ . Blicken wir in den Punkten  $P$  und  $P'$  parallel zur Erdoberfläche nach Norden, so treffen sich die entsprechenden Sichtlinien im Punkt  $K$  auf der Rotationsachse der Erde und bilden dort einen sehr kleinen Winkel  $d\beta$  (wie üblich kennzeichnen wir sehr kleine Größen durch ein vorangestelltes  $d$ ).

Die Punkte  $K$ ,  $P$  und  $P'$  liegen in einer Ebene, die bei  $P$  und  $P'$  praktisch parallel zur Erdoberfläche ist, sodass die Pendelspitze sich in dieser Ebene bewegt. Bei der Bewegung von  $P$  nach  $P'$  verändert sich die Pendelrichtung nicht, während ihr Winkel  $\gamma$  zur Nordrichtung sich um den sehr kleinen Winkel  $d\beta$  vergrößert, wie die Darstellung dieser Ebene (rechts) zeigt (Achtung: Dies ist kein dreidimensionales Bild!). Zugleich hat sich die Erde um den ebenfalls sehr kleinen Winkel  $d\alpha$  weitergedreht.

Da  $d\beta$  sehr klein ist, ist im Bogenmaß dieser Winkel gleich der Entfernung  $|PP'|$  zwischen  $P$  und  $P'$ , dividiert durch den Abstand  $|PK|$  zwischen  $P$  und  $K$ :  $d\beta = |PP'| / |PK|$ . Analog ist  $d\alpha = |PP'| / |PC|$  und damit  $d\beta = d\alpha \cdot |PC| / |PK|$ . Da nun das Dreieck  $OPK$  bei  $P$  rechtwinklig ist, finden wir den Winkel  $\Phi$  beim Punkt  $O$  nach einer 90-Grad-Drehung auch beim Punkt  $K$  zwischen den Strecken  $PK$  und  $CK$ , sodass  $\sin \Phi = |PC| / |PK|$  ist.

Damit ergibt sich  $d\beta = d\alpha \cdot \sin \Phi$ . Der Winkel  $d\beta$ , um den sich die Pendelebene relativ zur Nordrichtung dreht, ist also gleich dem Rotationswinkel  $d\alpha$  der Erde in diesem Zeitintervall, reduziert um den Faktor  $\sin \Phi$ .

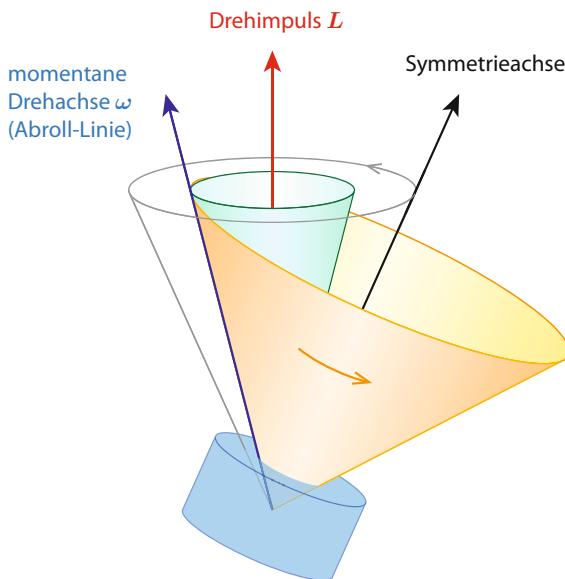
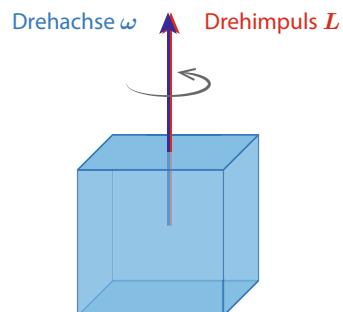


## Kräftefreie Kreisel

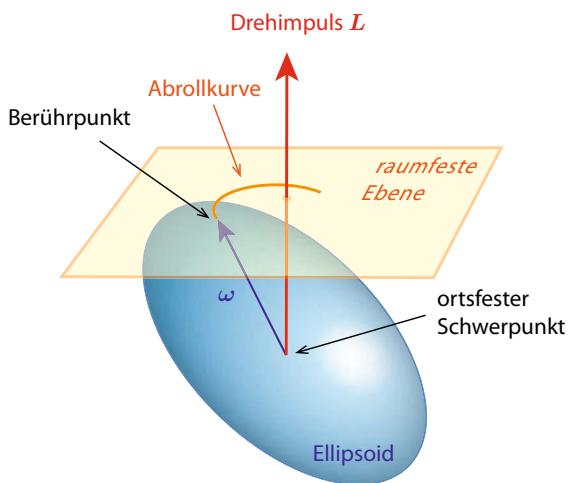
### Frei rotierende Körper in der Schwerelosigkeit

Kräftefreie Kreisel sind frei rotierende Körper, auf die keine nennenswerten äußeren Drehmomente einwirken. Beispiele dafür sind antrieblos dahingleitende Satelliten oder Asteroiden.

Der einfachste Fall ist der *sphärische Kreisel* (beispielsweise eine Kugel oder ein Würfel). Bei ihm ist die momentane Drehachse  $\omega$  konstant und immer parallel zum konstanten Drehimpuls  $\mathbf{L}$ .



Etwas komplizierter ist der *achsensymmetrische Kreisel*, wie zum Beispiel ein Diskus oder ein Quader mit quadratischer Grundfläche, den man „schräg andreht“. Die Symmetriechse des Kreisels liegt dann immer in derselben Ebene wie Drehimpuls und momentane Drehachse, und beide bewegen sich synchron auf Kegeln um die konstante Drehimpulsachse. Diese schwankende Drehbewegung nennt man *Nutation* (von lateinisch *nutare* = nicken oder schwanken). Ein im Schwerpunkt mit dem Kreisel fest verbundener Kegel um die Symmetriechse würde dabei auf demjenigen raumfesten Kegel abrollen, den die momentane Drehachse beschreibt. Die Berührungsstelle ist dabei gerade die momentane Drehachse  $\omega$ , denn bei der Abrollbewegung kommen die Materieteilchen des Kreisels genau entlang dieser Linie für einen kurzen Moment zum Stillstand.



Bei einem unregelmäßigen Körper kann die Drehbewegung recht komplex werden. Sie kann durch die Bewegung eines körperfesten Ellipsoids dargestellt werden, dessen Mittelpunkt man in festem Abstand von einer Ebene fixiert, sodass er die Ebene berührt und ohne zu gleiten auf der Ebene abrollt (Poinsot-Konstruktion). Der Berührungsrand mit der Ebene ist dabei der Endpunkt von  $\omega$  und legt so die momentane Drehachse fest.

Analysiert man diese Bewegungen, so findet man, dass Rotationsachsen dann besonders stabil sind, wenn die rotierenden Massen möglichst weit von der Rotationsachse entfernt liegen, sodass sie ein großes Trägheitsmoment erzeugen. Auf diese Weise rotieren beispielsweise die meisten Asteroiden.

Im Bild unten sieht man Aufnahmen der Galileo-Raumsonde, die die Rotation des Asteroiden 243 Ida zeigen, an dem sie im August 1993 vorbeiflogen ist.

Einigermaßen stabil ist auch die Rotation um die Achse, bei der die rotierenden Massen möglichst weit innen liegen, das Trägheitsmoment also möglichst klein ist. Instabil sind dagegen die meisten anderen Rotationsachsen mit mittlerem Trägheitsmoment. Der Körper taumelt und überkugelt sich dann und hat eine starke Tendenz, bei kleinen Störungen die Rotationsachse so zu verändern, dass die Massen möglichst weit außen rotieren. Der Asteroid 4179 Toutatis rotiert auf diese ungewöhnliche instabile Weise. Im Internet gibt es viele Videos zu rotierenden Asteroiden, beispielsweise unter: <http://www.youtube.com/watch?v=OPiKLq-CHdo>.

Neun Ansichten des Asteroiden Ida,  
in naturgetreuer Farbdarstellung



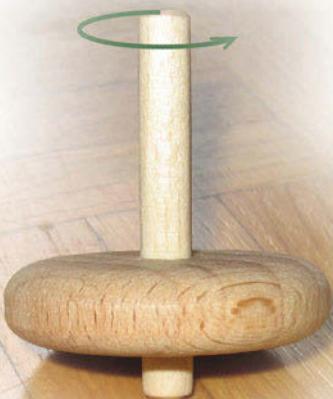
# Kreisel mit äußerem Drehmoment

## Präzession und Nutation

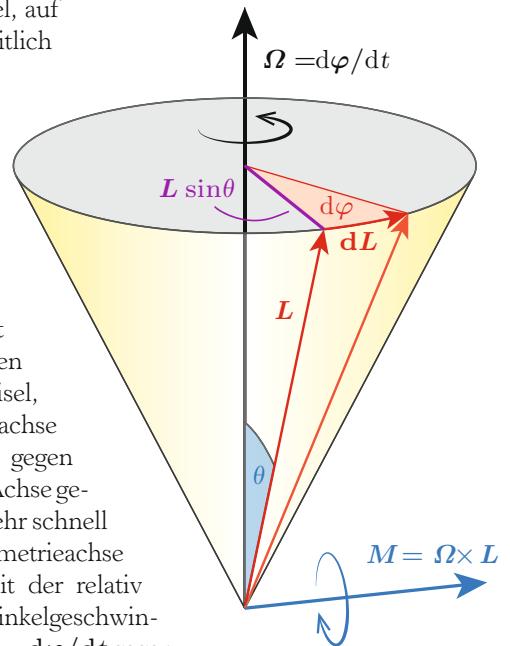
Anders als bei einem kräftefreien Kreisel ( $\downarrow$ ) ist bei einem Kreisel, auf den ein äußeres Drehmoment wirkt, der Drehimpuls  $\mathbf{L}$  nicht zeitlich konstant. Ein bekanntes Beispiel ist ein schräg stehender rotierender Kinderkreisel, auf den die Schwerkraft einwirkt. Ohne seine Eigenrotation würde er aufgrund der Schwerkraft umkippen. Rotiert er dagegen schnell genug, so kippt er keineswegs um, sondern seine Rotationsachse dreht sich auf einem Kegelmantel um die Senkrechte – man spricht von einer *Präzession* des Kreisels.

Man kann sich leicht überlegen, dass ein äußeres Drehmoment eine solche Präzession hervorrufen kann. Dazu betrachten wir einen achsensymmetrischen Kreisel,

dessen Symmetriechse um den Winkel  $\theta$  gegen die senkrechte  $z$ -Achse gekippt ist. Er soll sehr schnell um seine Symmetriechse rotieren und mit der relativ kleinen Winkelgeschwindigkeit  $\Omega = d\varphi/dt$  gegen den Uhrzeigersinn um die  $z$ -Achse präzidieren.



Präzession eines Kreisels



Für den Drehimpuls können wir den Beitrag durch die relativ langsame Präzession vernachlässigen, sodass er ungefähr in Richtung der Symmetriechse des Kreisels zeigt. Da sich die Symmetriechse in der kurzen Zeit  $dt$  um den kleinen Winkel  $d\varphi$  um die  $z$ -Achse bewegt, dreht sich der Drehimpulsvektor  $\mathbf{L}$  derweil um den Vektor  $d\mathbf{L}$  mit Betrag  $d\mathbf{L} = \mathbf{L} \cdot \sin \theta \cdot d\varphi$ . Wir teilen durch  $dt$  und erhalten  $d\mathbf{L}/dt = \mathbf{L} \cdot \sin \theta \cdot d\varphi/dt = \Omega \cdot \mathbf{L} \cdot \sin \theta$ .

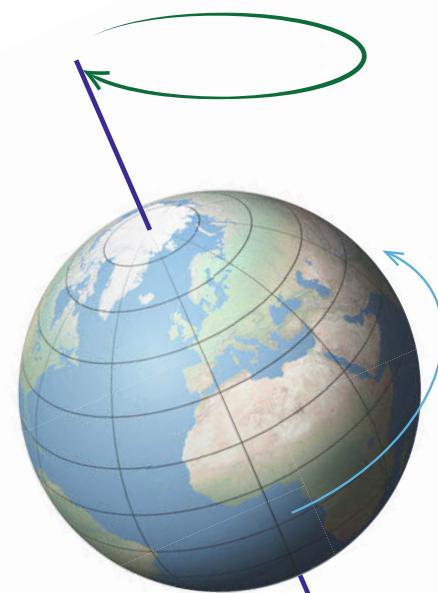
Die zeitliche Drehimpulsänderung ist andererseits gleich dem äußeren Drehmoment  $\mathbf{M}$ , sodass wir  $\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt = \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{L} \cdot \sin \theta$  erhalten. Aus der Grafik lesen wir außerdem ab, dass der Vektor  $d\mathbf{L}$  und damit auch  $\mathbf{M}$  in Richtung des Vektorproduktes  $\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{L}$  zeigt, sodass wir insgesamt  $\mathbf{M} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{L}$  erhalten. Das ist genau das Drehmoment, das den Kreisel aufgrund der Schwerkraft umkippen lassen möchte, aber wegen der

Kreiselrotation zur Präzession des Kreisels führt.

Die gleichmäßige Präzession der Symmetriechse ist allerdings nur eine der möglichen Bewegungsformen, die ein achsensymmetrischer Kreisel bei diesem äußeren Drehmoment ausführen kann. Je nach Anfangsbedingungen ist der Präzession noch eine kleine, schnelle Schlingerbewegung (Nutation) der Symmetriechse überlagert, die allerdings meist recht schnell durch Reibung gedämpft wird, sodass nach kurzer Zeit nur noch die gleichmäßige Präzession übrig bleibt.

Hält man beispielsweise den anfangs erwähnten schrägen rotierenden Kinderkreisel zunächst an seiner Spitze fest und lässt ihn dann los, so kippt er im ersten Moment wie erwartet senkrecht nach unten, um dann seitlich abzubiegen und wieder nach oben zu steigen, worauf sich diese Nutationsbewegung mehrfach wiederholt und dabei aufgrund der Reibung abklingt.

Da unsere Erde wegen ihrer Rotation leicht abgeplattet ist, wirkt auf sie im Schwefeld der Sonne und des Mondes ein geringes mittleres Drehmoment, das ihre Achse senkrecht zur Ebene der Erdbahn kippen möchte. Dieses Drehmoment führt zu einer Präzession der Erdachse mit einer Umlaufperiode von knapp 26 000 Jahren. Der Polarstern, auf den der Nordpol der Erdachse gegenwärtig ungefähr zeigt, ist also nur vorübergehend der Ort, um den der bei uns sichtbare Sternenhimmel ( $\downarrow$ ) während der Nacht zu kreisen scheint. Diese Stelle wandert am Himmel weiter und wird in rund 12 000 Jahren beim Stern Wega im Sternbild Leier liegen.



Präzession der Erdachse



## Newton's Gravitationsgesetz

### Von fallenden Äpfeln und kreisenden Planeten

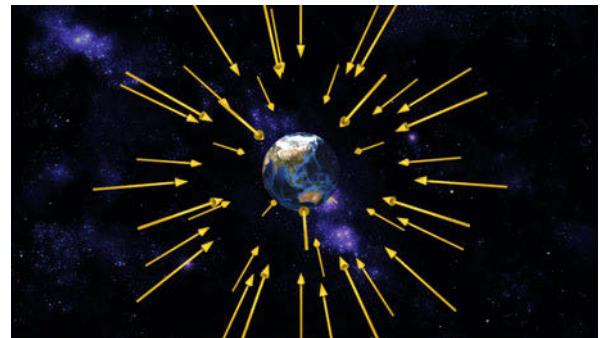
Wie stark ziehen Erde und Sonne sich aufgrund der Gravitation gegenseitig an? Isaac Newton gelang es im Jahr 1686, dieses Rätsel zu lösen und sein allgemeines Gesetz für die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern zu formulieren:

Die Gravitationskraft  $F$  zwischen zwei Körpern ist proportional zum Produkt ihrer Massen  $m_1$  und  $m_2$  und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstandes  $r$ . Sie wirkt anziehend entlang der Verbindungsgeraden zwischen den beiden Körpern. Die genaue Formel lautet:

$$F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$$

mit der Gravitationskonstanten

$$G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$$

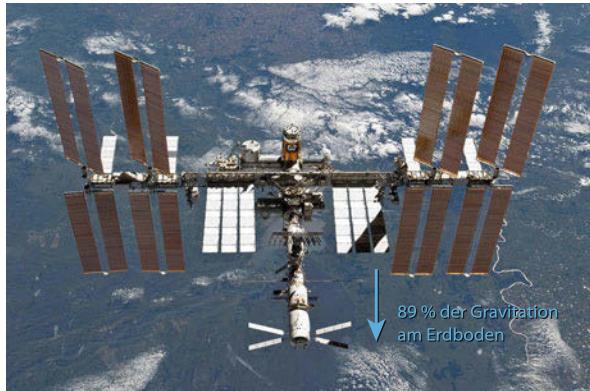


Das Gravitationsfeld einer Kugel

Die Anziehungskraft auf eine Raumstation, die in 6370 km Höhe über dem Erdboden die Erde umkreist, ist also nur ein Viertel so stark wie die Anziehungskraft auf dieselbe Raumstation, wenn sie sich auf dem Erdboden befände, denn der Erdradius beträgt rund 6370 km.



Dabei müssen die Körper normalerweise sehr viel kleiner sein als ihr Abstand voneinander; sonst muss man die Körper in kleine Teile zerlegen und Kräfte aufsummieren. Bei kugelsymmetrischen Körpern kann man diese Bedingung auch weglassen, wenn man den Abstand zwischen ihren Mittelpunkten verwendet. Die quadratische Abnahme der Kraft mit zunehmendem Abstand entspricht der anschaulichen Verdünnung der radialen Feldlinien (Pfeillinien auf dem Bild rechts oben).



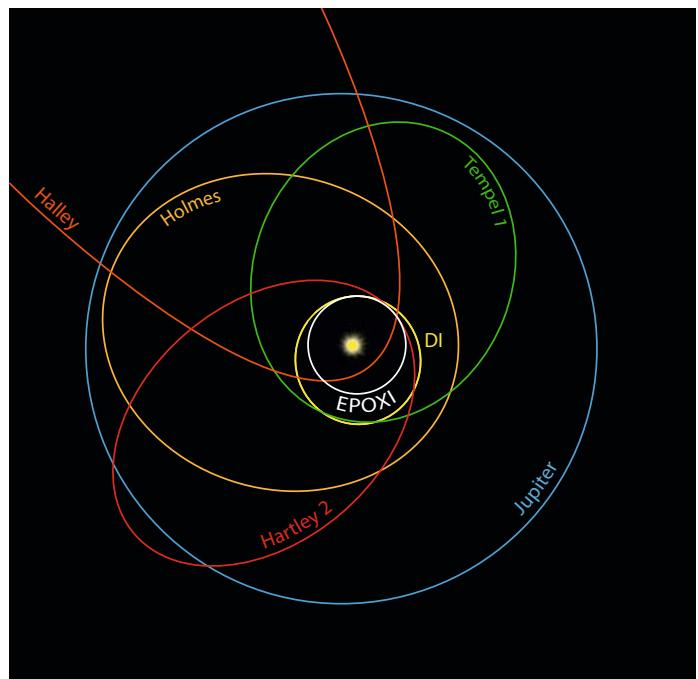
Die Internationale Raumstation ISS

Bei der Internationalen Raumstation ISS, die in nur 380 km Höhe über dem Erdboden kreist, beträgt die Schwerkraft sogar noch 89% ihres Wertes am Erdboden, da der Abstand der ISS vom Erdmittelpunkt nur um den Faktor  $(6\,370 + 380) / 6\,370 \approx 1,06$  größer als der Erdradius ist und der quadrierte Kehrwert dieses Faktors den Wert 0,89 ergibt.

Eine im Weltall um die Erde kreisende Raumstation unterliegt also dort sehr wohl der Schwerkraft der Erde – sie ist nur deshalb innerhalb der Raumstation nicht spürbar, da sich diese im freien Fall um die Erde herum befindet.

Die elliptischen Bahnen einiger Kometen, des Jupiters sowie der Deep Impact und EPOXI Mission der NASA

Man erzählt sich die Anekdote, ein von einem Baum herabfallender Apfel hätte Newton auf die Idee gebracht, dass dieselbe Kraft, die einen Apfel zu Boden fallen lässt, auch für die Bewegung der Planeten um die Sonne verantwortlich ist. Ob wahr oder nicht, Newton konnte jedenfalls nachweisen, dass sich Planeten und Kometen unter dem Einfluss seines Gravitationsgesetzes tatsächlich auf Ellipsenbahnen bewegen müssen, in deren einem Brennpunkt sich die Sonne befindet. Die Form der Planetenbahnen hatte bereits knapp achtzig Jahre zuvor (im Jahr 1609) Johannes Kepler anhand von Beobachtungen herausgefunden – nur dass Kepler noch nicht wusste, warum die Planetenbahnen so aussehen.



Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie → S. 130  
Die Kepler'schen Gesetze → S. 10



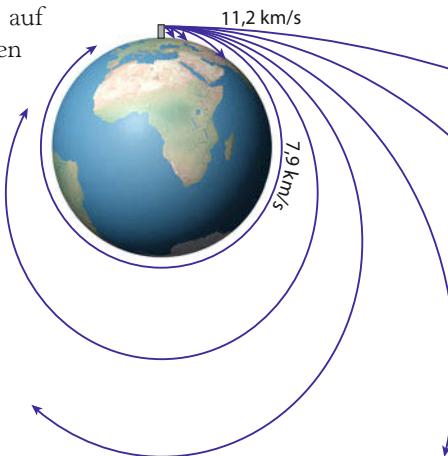
## Kosmische Geschwindigkeiten

### Aufstieg und Absturz im Schwerkfeld der Himmelskörper

Schießt man eine Kanonenkugel in horizontaler Richtung ab, so fällt sie auf einer annähernd parabelförmigen Flugbahn nach unten, bis sie den Erdboden trifft. Doch was geschieht, wenn man die Kanonenkugel mit immer größerer Geschwindigkeit abschießt, wobei wir den bremsenden Einfluss der Atmosphäre ignorieren wollen (der Mond wäre ein passendes Versuchsfeld dafür)? Da die Kugel immer weiter kommt, bevor sie den Boden berührt, macht sich schließlich die Erdkrümmung bemerkbar, was den Flug der Kugel weiter verlängert.

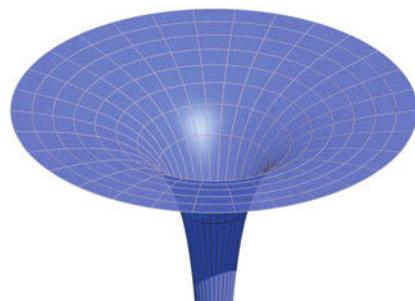
Ab der sogenannten *ersten kosmischen Geschwindigkeit* kann die fallende Kugel den unter ihr zurückweichenden Boden gar nicht mehr erreichen und fällt auf einer Kreisbahn gleichsam um die Erde herum. Auf Höhe der Erdoberfläche liegt diese Geschwindigkeit bei 7,9 km/s, während sie auf der Mondoberfläche nur rund 1,7 km/s beträgt. Ein Körper, der sich so schnell bewegt, würde also nicht mehr zu Boden fallen.

Bei noch höheren Geschwindigkeiten verformt sich die Flugbahn zu einer Ellipse, die immer weiter in den Raum hinausreicht. Ab der sogenannten *zweiten kosmischen Geschwindigkeit* (Fluchtgeschwindigkeit) folgt die Kugel auch keiner Ellipsenbahn mehr, fällt



also gar nicht mehr zur Erde zurück, sondern entkommt in den Weltraum – die Ellipse öffnet sich zu einer Parabel und bei noch höheren Geschwindigkeiten zu einer Hyperbel. Von der Erdoberfläche aus müsste man die Kugel ohne Luftwiderstand dafür mit mindestens 11,2 km/s abschießen, während von der Mondoberfläche aus rund 2,3 km/s ausreichte.

Man kann sich das Gravitationsfeld der Erde als Potentialtopf vorstellen, der nach außen immer flacher wird. Bei 11,2 km/s ist ein Objekt schnell genug, dass es diesem Topf komplett entkommen kann, wobei man es nicht unbedingt horizontal abschießen muss – schräg oder senkrecht nach oben geht beispielsweise genauso.





Künstlerische Darstellung des Einschlags eines Planetoiden auf der ursprünglichen Erde, als das Leben gerade entstand

Umgekehrt würde ein Objekt, das sich zunächst sehr langsam der Erde nähert und schließlich immer schneller auf sie herabstürzt, ohne Luftwiderstand mit 11,2 km/s auf der Erdoberfläche aufschlagen, was enorme Energiemengen freisetzt. Vor 65 Millionen Jahren rief der Einschlag eines herabfallenden Asteroiden mit etwa zehn Kilometern Durchmesser vermutlich ein globales Massensterben hervor, dem auch die Dinosaurier zum Opfer fielen.

Im Jahr 1994 schlugen mehrere bis zu zwei Kilometer große Bruchstücke des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf dem Planeten Jupiter ein. Da das Gravitationsfeld des Jupiters sehr viel stärker als das der Erde ist, erreichten die herabfallenden Bruchstücke eine Geschwindigkeit von über 60 km/s und setzten bei ihren Einschlägen Energien von vielen Millionen Atombomben frei. Bei einem Einschlag auf der Sonne wären sie mit über 600 km/s sogar noch zehnmal schneller und damit hundertmal energiereicher gewesen.



UV-Bild der Shoemaker-Levy-9-Einschläge auf dem Jupiter



So könnte die Aussicht von einem der Shoemaker-Levy-9-Bruchstücke beim Sturz auf den Jupiter ausgesehen haben.

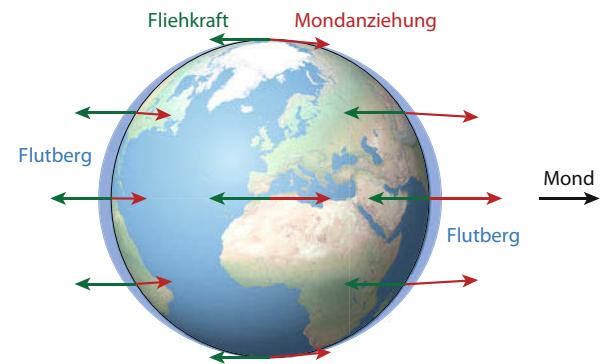
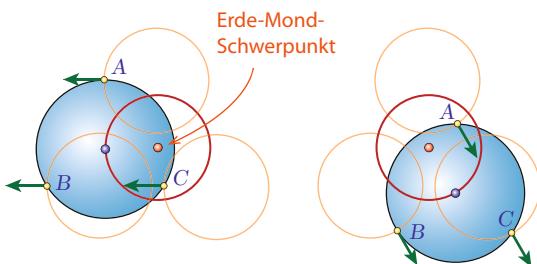


# Die Gezeiten

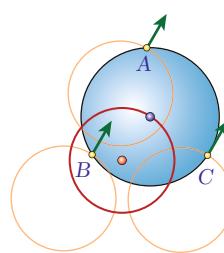
## Wie der Mond Ebbe und Flut hervorbringt

Die Gezeiten kommen durch das Zusammenwirken zweier Kräfte zustande: Der Anziehungskraft zwischen Erde und Mond und der ihr entgegengesetzten Fliehkraft ( $\downarrow$ ) bei der Drehbewegung des Erde-Mond-Systems um den gemeinsamen Schwerpunkt. Wegen des großen Massenunterschieds von Erde und Mond von etwa 81 zu 1 befindet sich der Erde-Mond-Schwerpunkt noch innerhalb der Erde, rund 4700 km vom Erdmittelpunkt entfernt (der Erdradius beträgt 6370 km).

Die Fliehkraft aufgrund der Erdbewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt ist überall gleich stark und vom Mond weg gerichtet (grüne Pfeile). Das versteht man am besten, wenn man sich die Erde ohne jegliche Eigenrotation vorstellt, da diese Eigenrotation ebenso wie die Schwerkraft der Erde keinen Beitrag zur Entstehung der Gezeiten liefert. Der Erdmittelpunkt bewegt sich dabei annähernd auf der roten Kreisbahn um den Erde-Mond-Schwerpunkt, und jeder andere Punkt der Erde bewegt sich synchron dazu auf gleich großen, aber verschobenen Kreisbahnen (orange).



Im Erdmittelpunkt heben sich Fliehkraft (grüne Pfeile) und Mondanziehung (rote Pfeile) gegenseitig auf und halten diesen so stabil auf seiner Kreisbahn um den Erde-Mond-Schwerpunkt. Auf der mondnahen Seite überwiegt dagegen etwas die Schwerkraft des Mondes, während auf der mondfernen Seite die Fliehkraft leicht überwiegt (in der Grafik übertrieben dargestellt).



Beide Kräfte zusammen bewirken, dass die Erde entlang der Verbindungsachse zwischen Erde und Mond um einige Zentimeter in die Länge gezogen wird, wobei sich zwei Flutberge in den Ozeanen ausbilden: einer auf der mondnahen und einer auf der mondfernen Seite der Erde.

Da die Erde pro Tag nahezu einmal unter diesen beiden Flutbergen hindurchrotiert, kommt es annähernd zweimal täglich zu dem bekannten Wechsel von Ebbe und Flut, wobei die Form der Küstenlinien einen starken Einfluss auf die Höhe dieser Flutberge (den *Tidenhub*) hat, die an manchen Küsten mehrere Meter erreichen kann.

Auch die Sonne erzeugt auf dieselbe Weise Gezeitenkräfte entlang der Verbindungsline zwischen Erde und Sonne, die allerdings nur knapp halb so stark sind wie die durch den Mond hervorgerufenen Gezeitenkräfte und diese je nach Mondstand verstärken oder abschwächen können (Springtide und Nipp tide).

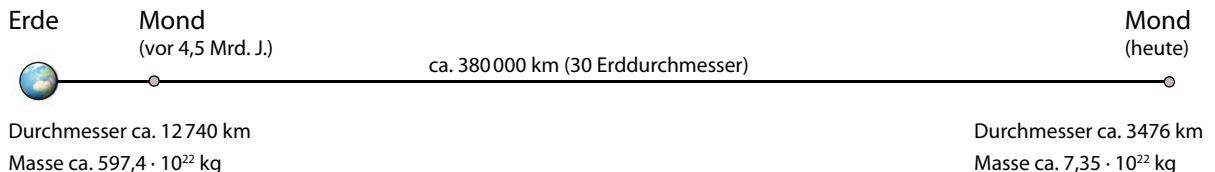
Die in den Flutbergen steckende Energie stammt aus der Rotationsenergie der Erde, sodass diese Rotation langsam abgebremst wird und die Dauer eines Erdtages jedes Jahr um 16 Mikrosekunden zunimmt. Man kann an den Wachstumsringen von 500 Millionen Jahre alten Korallen nachweisen, dass zu dieser Zeit ein Jahr rund 400 Tage umfasste, was ungefähr einem 22-Stunden-Tag entspricht. Analog wurde auch die Eigenrotation des Mondes in der Vergangenheit abgebremst, sodass der Mond mittlerweile der Erde sogar immer dieselbe Seite zuwendet (gebundene Rotation).



Die nordfranzösische Felseninsel Mont Saint-Michel bei Ebbe im Jahr 2005. Bis zum Bau eines Damms im Jahr 1879 war sie bei Flut komplett vom Festland abgeschnitten. Der Tidenhub beträgt hier bis zu vierzehn Meter.

Bei der Abbremsung der Erdrotation wird Drehimpuls auf die Bahnbewegung des Mondes übertragen, dessen Abstand zur Erde dadurch jedes Jahr um rund vier Zentimeter wächst. Als der Mond vor rund 4,5 Milliarden Jahren entstand, war seine Entfernung zur Erde mit wenigen 10000 km rund zehnmal geringer als heute (ca. 380 000 km). Ebbe und Flut müssen in der Frühzeit der Erde deutlich stärker als heute gewesen sein!

#### Maßstabgetreue Darstellung des Erde-Mond-Systems



# Das archimedische Prinzip

Oder warum Schiffe im Bermuda-Dreieck untergehen können



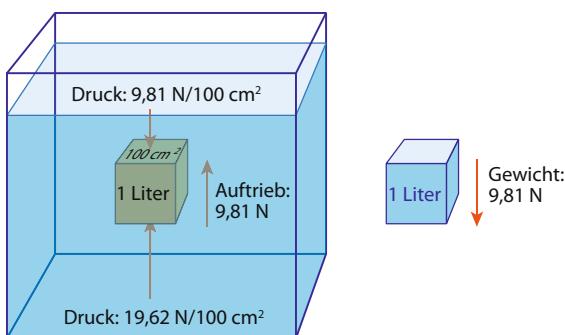
Darstellung von Archimedes auf der Fields-Medaille (eine der höchsten Auszeichnungen für Mathematiker)

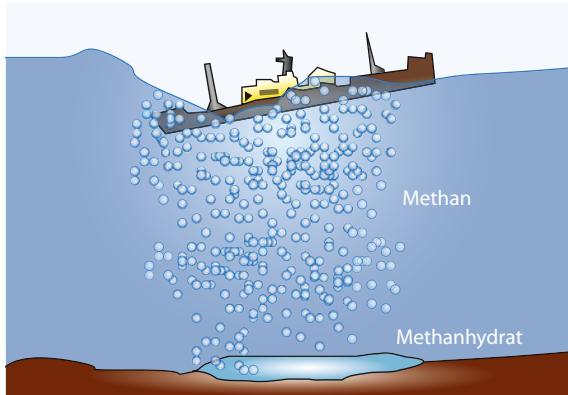
In einer Flüssigkeit erfährt jeder Körper eine bestimmte Auftriebskraft. Bereits vor über 2000 Jahren erkannte im antiken Griechenland der Gelehrte Archimedes, dass diese Auftriebskraft genau der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit entspricht – man spricht daher vom archimedischen Prinzip.

Diese Auftriebskraft entsteht letztlich dadurch, dass die Flüssigkeit ein Eigengewicht besitzt und daher ihr Druck mit wachsender Tiefe und zunehmend von oben drückender Wassermenge ansteigt. Summiert man alle Druckkräfte auf die Außenflächen des eingetauchten Körpers, so ergibt sich gerade das archimedische Prinzip.

Ist die Dichte eines Körpers geringer als die Dichte der Flüssigkeit, so taucht er nur so tief ein, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit seinem Eigengewicht entspricht. In dichteren Flüssigkeiten taucht ein Körper also weniger tief ein als in weniger dichten Flüssigkeiten. Daher trägt uns das salzreiche und entsprechend dichte Wasser des Toten Meeres deutlich besser als normales Süßwasser, sodass man dort auf dem Rücken treibend sogar Zeitung lesen kann.

Kritisch wird es für Schiffe beispielsweise, wenn sehr viele aufsteigende Gasblasen die mittlere Wasserdichte so stark erniedrigen, dass die Auftriebskraft nicht mehr ausreicht und das Schiff sinkt. Kurz gesagt: In Schaum kann man nicht schwimmen! Solche Gasblasen können beispielsweise durch die Zersetzung von Methanhydrat am Meeresboden entstehen. Es ist durchaus denkbar, dass dieser Mechanismus beispielsweise für so manches verschwundene Schiff im Bermuda-Dreieck verantwortlich ist.



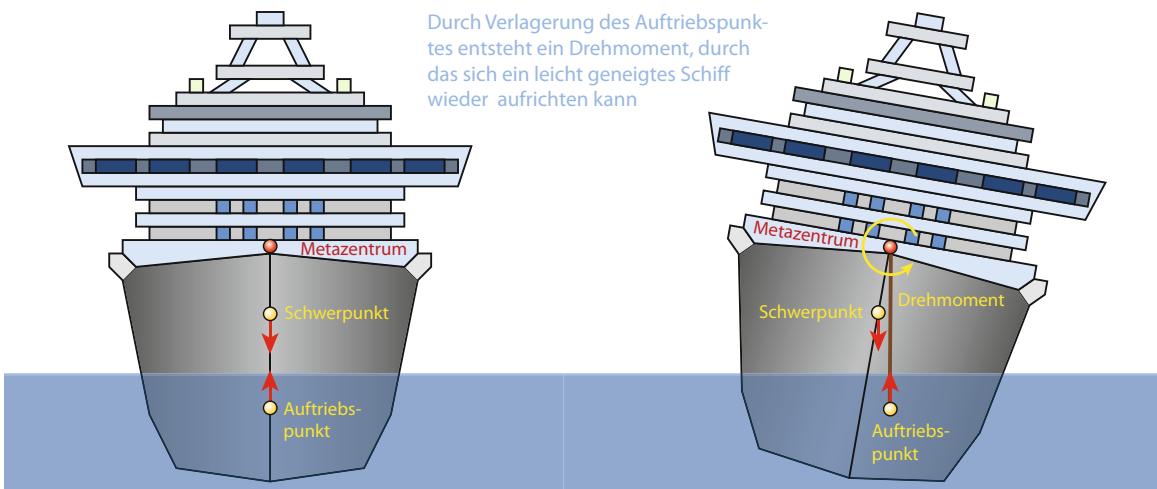


Aufsteigendes Methangas könnte für das Sinken einiger Schiffe am Bermuda-Dreieck verantwortlich sein

Die Gewichtskraft greift bei einem Körper an seinem Schwerpunkt an. Analog greift die Auftriebskraft am Schwerpunkt des verdrängten Wassers an, den man auch *Formschwerpunkt* oder *Auftriebspunkt* nennt.

Meist liegt der Schwerpunkt eines schwimmenden Schiffs höher als der Auftriebspunkt, sodass man meinen könnte, das Schiff müsse kentern. Dennoch bleibt es normalerweise stabil aufgerichtet, denn anders als der körperfeste Schwerpunkt wandert der Auftriebspunkt im Schiffskörper, wenn sich dieses zur Seite neigt, sodass bei stabiler Ausgangslage und kleinen Neigungswinkeln ein Drehmoment entsteht, welches das Schiff wieder aufrichtet. Dabei dreht sich der Schiffsrumpf um einen körperfesten Punkt, den man *Metazentrum* nennt und der bei kleinen Neigungswinkeln immer senkrecht über dem Auftriebspunkt liegt. In der stabilen Ausgangslage liegt zusätzlich der Schwerpunkt senkrecht unter dem Metazentrum.

Bei großen Neigungswinkeln gilt diese Überlegung jedoch nicht mehr, denn dann verändert sich auch das Metazentrum. Das Schiff kann dann kentern und in einer anderen stabilen Lage zur Ruhe kommen.



Wikipedia Metazentrum <http://de.wikipedia.org/wiki/Metazentrum>

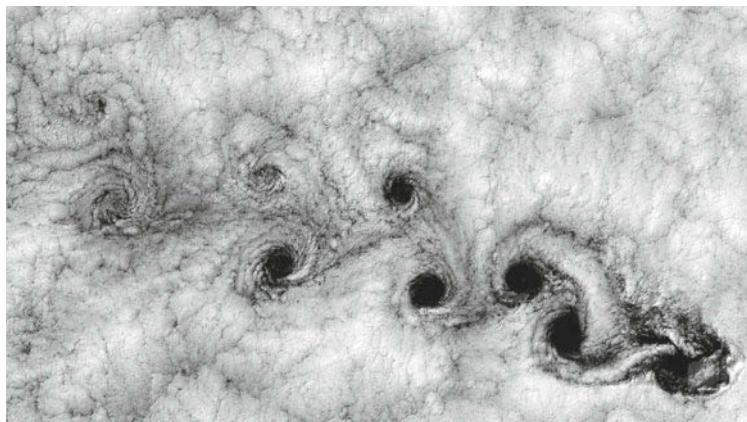


# Die Physik der Strömungen

## Wirbel und Turbulenzen

Die Physik der Strömungen (Strömungsmechanik) befasst sich mit dem Verhalten fließender Flüssigkeiten oder Gasen. Mathematisch lässt sich dieses Verhalten durch die *Navier-Stokes-Gleichungen* beschreiben, die ein kompliziertes System nichtlinearer partieller Differentialgleichungen zweiter Ordnung darstellen. Bis heute sind diese nicht final erforscht; so ist beispielsweise nicht bekannt, ob diese Gleichungen bei einem gegebenen glatten Anfangs-Strömungsfeld für alle Zeiten ein gutes nicht singuläres Strömungs- und Druckfeld als Lösung besitzen. Das Clay Mathematics Institute zählt dieses Problem zu den sieben wichtigsten mathematischen Problemen des neuen Jahrtausends (Millennium-Prize-Problems) und hat im Jahr 2000 zu seiner Lösung einen Preis von einer Million Dollar ausgeschrieben.

Satellitenaufnahme mit einer Wirbelstraße bei den Juan-Fernández-Inseln



Wirbelschleppen hinter einem Flugzeug, mit farbigem Rauch sichtbar gemacht.

Das Problem liegt darin, dass Strömungen ein sehr komplexes Verhalten zeigen können. Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten fließt ein Gas oder eine Flüssigkeit noch meist recht gleichmäßig – man spricht von laminarer Strömung. Bei größeren Geschwindigkeiten bilden sich jedoch Wirbel, die zunächst noch ein einigermaßen reguläres Verhalten zeigen können. Ein Beispiel dafür sind die *Wirbelstraßen*, die sich hinter einem Hindernis wie einem Fahnenmast, aber auch hinter einer kompletten Insel



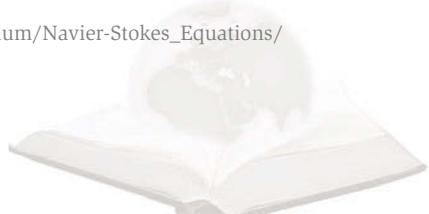
Turbulente Wolkenstrukturen im Carinanebel, aufgenommen vom Hubble-Weltraumteleskop

ausbilden können. Auch kleine Rauchringe oder Wirbelschleppen hinter Flugzeugen sind schöne Beispiele für recht stabile Wirbel.

Wirbelstürme können ebenfalls über längere Zeit stabil sein, wenn sie über warmen Ozeanen genügend Energie zugeführt bekommen. Ein besonders stabiler Wirbelsturm ist der Große Rote Fleck auf dem Gasplaneten Jupiter, der bereits seit mindestens 300 Jahren bekannt ist. Dieser Wirbelsturm ist mit gut 20 000 km Länge und über 10 000 Kilometer Breite größer als unsere Erde.

Bei größeren Geschwindigkeiten neigen die Wirbel zu unkontrolliertem Verhalten – man spricht von *Turbulenz*. Wirbel entstehen und zerfallen dabei zugleich auf ganz unterschiedlichen Größenskalen und verwirbeln das Medium in kaum vorhersagbarer Weise. Hier machen sich die Nichtlinearitäten in den Navier-Stokes-Gleichungen bemerkbar, die zu starken Rückkopplungen in der Strömung führen. Turbulenz gehört daher zu den schwierigsten und am wenigsten verstandenen physikalischen Phänomenen. Mathematisch könnte Turbulenz möglicherweise nach einiger Zeit zu Singularitäten (*Blow-Ups*) im Strömungsfeld führen. Ob es solche Blow-Ups tatsächlich gibt, ist genau der Gegenstand des Millennium-Prize-Problems.

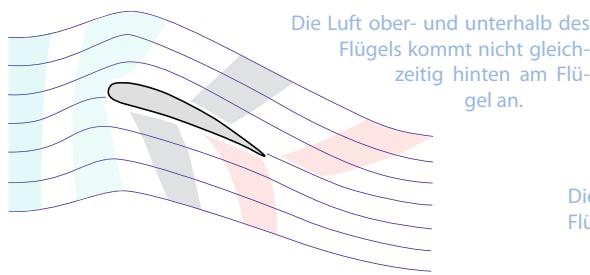
Blick von der Sonde Voyager 1 im Jahr 1979 auf den Jupiter mit seinen turbulenten Wolkenbändern und dem Großen Roten Fleck



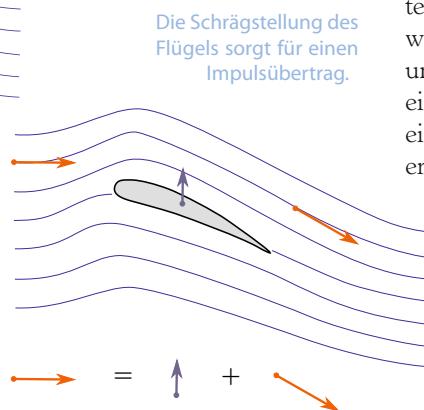
# Warum fliegt ein Flugzeug?

## Bernoulli oder Newton?

Die Frage, was ein Flugzeug in der Luft hält, wird oft gestellt und auch oft beantwortet. Leider ist die populäre Antwort, die man in der Schule oder in Büchern vorgesetzt bekommt, unvollständig.

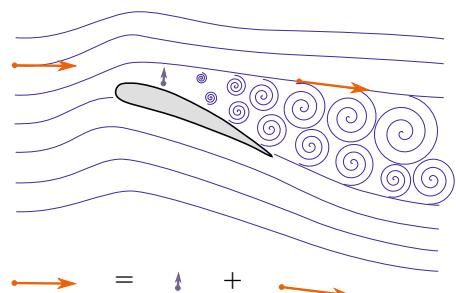


Diese trotzdem sehr beliebte Erklärung benutzt das *Prinzip von Bernoulli*, das besagt, dass Luft, wenn sie sich schnell bewegt, weniger dicht ist, was an sich korrekt ist. Es wird mit dem asymmetrischen Profil der Flügel argumentiert: Wenn ein Luftstrom im Flug auf den Flugzeugflügel treffe, so teile er sich in zwei Hälften, die jeweils über und unter den Flügel entlanggleiten und sich dahinter trafen. Und weil die obere Strecke länger ist als die untere, müsse sich die Luft oberhalb des Flügels schneller bewegen – was nach Bernoullis Prinzip einen Unterdruck an der Oberseite gegenüber der Unterseite erzeuge, der den Flieger nach oben „sauge“.



$\rightarrow = \uparrow + \rightarrow$

Wird die Strömung turbulent, kann nicht mehr genug Impuls übertragen werden: Das Flugzeug gerät dann in Gefahr abzustürzen.



So anschaulich diese Erklärung ist, sie ist unvollständig: Zuerst einmal geht sie stillschweigend davon aus, dass die beiden geteilten Luftströme sich hinter dem Flügel wieder genau treffen. Das ist aber nicht der Fall – in der Tat kommt der obere Luftstrom aufgrund der etwas längeren Strecke etwas später an als der untere. Dieser Effekt wird zur Flügelspitze immer schwächer, weswegen sich Wirbel ausbilden.

Und selbst wenn die Luft sich hinter dem Flügel wieder trafe, dann wäre der Effekt durch den Druckunterschied deutlich zu klein: Für ein typisches kleines Flugzeug wie eine Cessna zum Beispiel kann man errechnen, dass sich in dem hypothetischen Fall, dass sich die Luftströme hinter dem Flügel wieder trafen, der Weg entlang der Oberseite um 50% länger sein müsste, um bei einer normalen Flugge-

schwindigkeit den benötigten Auftrieb zu erzeugen. Bei dem Modell Cessna 172 zum Beispiel ist die Oberseite des Flügels nur ca. 2 % länger als die Unterseite. Mit dieser Differenz müsste das Flugzeug eine Geschwindigkeit von über 400 km/h haben, bevor es abheben könnte. Bernoullis Prinzip reicht also nicht aus, um zu erklären, warum ein Flugzeug fliegt.

In der Tat ist die Frage, was ein Flugzeug in der Luft hält, ein Zusammenspiel von verschiedenen Faktoren. Obwohl es erfolgreiche strömungsmechanische Modelle gibt, die zu guten Ergebnissen kommen, gibt es nicht nur eine einzige, anschauliche Erklärung. Das Prinzip von Bernoulli trägt – wenn auch in geringem Ausmaß – zum Auftrieb bei, allerdings ist ein weiterer wichtiger Faktor die *Impulserhaltung*. Dadurch, dass der Flügel nämlich leicht schräg gestellt ist, wird die an ihm vorbeiströmende Luft nach unten abgelenkt.

Die Schweizer 1-36, ein Forschungsflugzeug der NASA zur Untersuchung des Strömungsabrisse



In der Natur benutzen Vögel den Strömungsabriss, um schnell an Höhe zu verlieren.

Weil sie also einen Impuls nach unten erfährt, muss nach dem dritten Newton'schen Gesetz ( $\downarrow$ ) – actio gleich reactio – der Flügel einen Impuls nach oben erhalten. So wie eine schräg gestellte Hand, die man aus einem fahrenden Auto hält, wird auch der Flügel nach oben gedrückt.

Damit nach der Newtonschen Erklärung das Flugzeug genug Aufwärtsimpuls übertragen bekommt, ist es von entscheidender Bedeutung, dass die oberhalb des Flügels entlanggleitende Luft immer nah am Flügel bleibt. Das tut sie, solange die Strömung laminar ist. Wird die Strömung hingegen turbulent ( $\downarrow$ ), so verwirbelt sie, anstatt die Oberseite des Flügels herunterzugleiten. Das geschieht zum Beispiel, wenn man den Anstellwinkel zu steil wählt: Bei diesem *Strömungs-* oder *Luftabriß* genannten Phänomen verringert sich der Auftrieb signifikant. Kommt es kurz vor einer Landung zum Luftabriß, zum Beispiel wenn die Nase des landenden Flugzeuges zu steil steht, so kann es leicht abstürzen.



## Gewöhnliche Wasserwellen

... und ihre besonderen physikalischen Eigenschaften

Oberflächenwellen an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft sind sicher die bekanntesten Wellen. Anders als beispielsweise Lichtwellen weisen sie jedoch ein komplexes physikalisches Verhalten auf, das vom Wechselspiel zwischen Oberflächenspannung, Schwerkraft, Massenträgheit und den Fließeigenschaften des Wassers bestimmt wird. Meist führen die Wassermoleküle beim Durchgang einer Welle dabei eine annähernd ellipsenförmige Bewegung aus.

Bei sehr kleinen Wellen mit Wellenlängen unterhalb eines Zentimeters (sogenannten *Kapillarwellen*) ist die Oberflächenspannung als Rückstellkraft entscheidend. Kapillarwellen breiten sich umso schneller aus, je kleiner ihre Wellenlänge ist. Man nennt das *anormale Dispersion*. Wenn man an einer Stelle Kapillarwellen auslöst, so findet man kurz darauf kreisförmige Wellen mit nach außen schrumpfender Wellenlänge, da die kürzeren Kapillarwellen den längeren gleichsam davonlaufen.

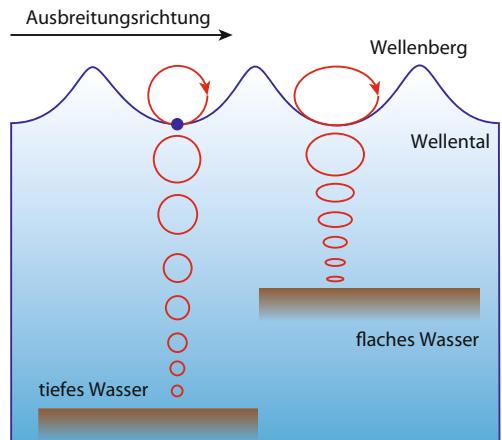
Kapillarwellen auf dem Wasser (Roger Mc Lassur)

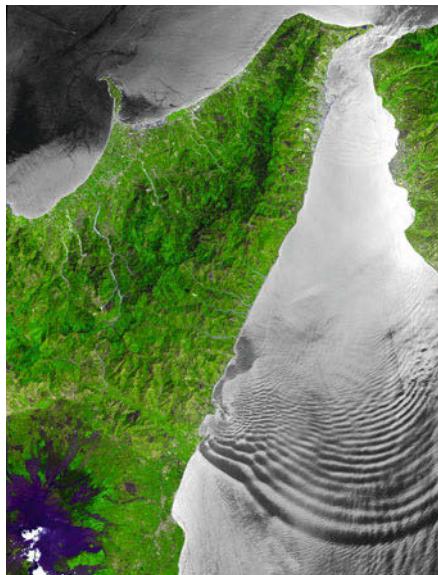


Bewegung des Wassers bei einer durch Wind erzeugten Welle

Genau umgekehrt ist es bei größeren Wellen, bei denen die Schwerkraft die entscheidende Rolle spielt – man spricht daher von *Schwerewellen*. Wirft man beispielsweise einen Stein in einen See, dessen Wasser deutlich tiefer ist als die typischen Wellenlängen, so breiten sich hier große Wellenlängen schneller als kleine Wellenlängen aus (*normale Dispersion*), sodass man weiter außen die großen Wellenlängen findet. Man erkennt dieses Verhalten gut auf dem Bild auf der nächsten Seite links oben, das von Gezeitenströmen erzeugte Schwerewellen in der Straße von Messina zwischen Sizilien und dem italienischen Festland zeigt.

Wellen mit großer Wellenlänge können auf dem offenen Ozean recht schnell werden. So liegt bei einer Wellenlänge von 100 Metern die Ausbreitungsgeschwindigkeit bereits bei 50 km/h.





Wellen in der Straße von Messina bei Sizilien, aufgenommen vom Terra-Satelliten der NASA



Zwei sich kreuzförmig überlagernde Dünungs-Wellenfelder, fotografiert vom Leuchtturm *Phare des Baleines* an der französischen Westküste

Solche Wellen können bei Stürmen entstehen und sich noch in weiter Entfernung als langwellige *Dünung* bemerkbar machen. Die ebenfalls durch den Sturm erzeugten kürzeren Wellen können sich dagegen nicht so schnell aus dem Sturmgebiet entfernen und werden auch stärker gedämpft, also abgeschwächt.

Natürlich weisen Wasserwellen neben ihren besonderen Eigenschaften auch die typischen Welleneigenschaften auf: Sie können miteinander interferieren, sich also überlagern, sie können an Hindernissen gebeugt werden und die Laufrichtung von Wellenfronten kann sich ändern, wenn sie in einen Bereich mit anderer Laufgeschwindigkeit eindringen (*Refraktion*) – daher richten sich bei flachen Stränden die Wellenfronten

meist zunehmend parallel zum Strand aus, je näher sie ihm kommen. Besonders schön kann man das Zusammenspiel von normaler Dispersion und Interferenz bei vorbeifahrenden Schiffen beobachten, wo sie zur Ausbildung eines keilförmigen Wellensystems führen.



Bugwellen



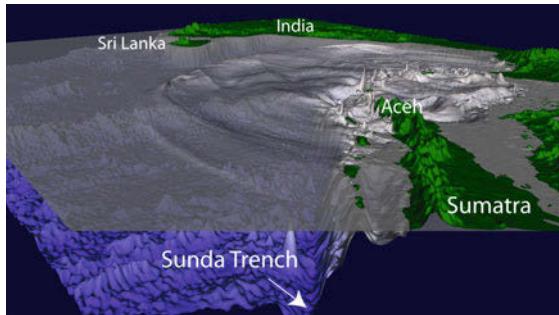
## Besondere Wasserwellen

### Tsunamis, Solitonen, Monsterwellen

In besonderen Situationen können sehr ungewöhnliche Wasserwellen auftreten, die nur wenig Ähnlichkeit mit den üblichen, meist vom Wind erzeugten Wasserwellen haben.

Ein solcher Extremfall sind *Tsunamis*, die meist durch Seebäben ausgelöst werden, bei denen sich Erdplatten ruckartig anheben oder ab senken, sodass große Wassermengen schlagartig in Bewegung versetzt werden. Dabei entstehen Wellen mit sehr langen Wellenlängen von 100 bis 500 Kilometern, bei denen sich die komplette Wassersäule bis zum Grund des Ozeans bewegt, sodass diese Wellen enorme Energiemengen transportieren. Bei normalen vom Wind erzeugten Wasserwellen bewegt sich dagegen nur der oberflächennahe Teil der Wassersäule.

Da die Wellenlänge von Tsunamis sehr viel größer als die Wassertiefe ist, ist ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit unabhängig von der Wellenlänge (keine Dispersion) und wächst mit zunehmender Wassertiefe. Im tiefen Ozean erreichen Tsunamis Geschwindigkeiten von 800 km/h, sind also ähnlich schnell wie Flugzeuge. Dabei fallen sie im offenen Ozean kaum auf, denn ihre Wellenhöhe liegt dort bei weniger als einem Meter, so dass es nur zu einer langsamten Auf- und Ab-Bewegung der Wasseroberfläche kommt.



Wellenfeld des Tsunamis vor Sumatra vom 26. Dezember 2004 etwa eine Stunde nach dem Beben

In Küstennähe muss sich jedoch die gesamte Wellenenergie auf eine zunehmend kleinere Wassersäule konzentrieren, sodass schließlich Wellenhöhen von mehreren zehn Metern erreicht werden. Wir alle erinnern uns noch an die zerstörerische Wirkung des Tsunamis vom 26. Dezember 2004 im Indischen Ozean, bei dem über 230 000 Menschen ihr Leben verloren, sowie an den Tsunami vom 11. März 2011, der mit Wellenhöhen von bis zu 20 Metern die Ostküste Japans traf und neben über 10 000 Toten auch die Explosion der Kernkraftwerke von Fukushima verursachte.

Der Tsunami von 2004 trifft auf Ao Nang (Thailand)





Blick auf den vom Tsunami von 2011 verwüsteten Hafen von Sendai (Japan)

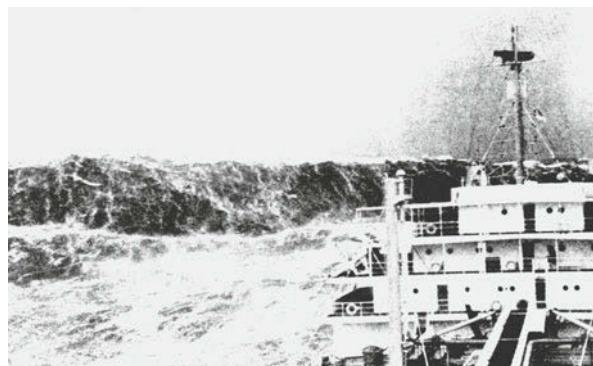
Ein anderer Typ ungewöhnlicher Wellen sind die sogenannten *Solitonen*. Diese Wellen haben oft nur einen einzigen Wellenberg – man spricht auch von einem *Wellenpaket*. Da ein solches Wellenpaket aus einer Überlagerung vieler Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen besteht, zerfließt es normalerweise im Lauf der Zeit, wenn diese Wellenanteile unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten haben und sich dadurch auseinanderbewegen. Nichtlineare Effekte können jedoch manchmal Wellen mit verschiedenen Wellenlängen ineinander umwandeln und so ein Gleichgewicht zwischen langsamem und schnellen Wellenanteilen herstellen, sodass das Wellenpaket stabil bleibt und ein Soliton entsteht. Eine solche Situation kann beispielsweise in engen Wasserkänen entstehen, sodass eine Soliton-Wasserwelle sich über viele Kilometer stabil durch einen solchen Kanal bewegen kann. Auch in atmosphärischen Grenzschichten kann es zu soliton-artigen Luftwellen kommen (siehe Bild rechts oben).

Monsterwelle im Golf von Biskaya nahe Frankreich um 1940



Eine soliton-artige Morning Glory Cloud nahe Burketown im Norden Australiens

Nichtlinearitäten bei der Überlagerung von Wellen sind vermutlich auch die Ursache für die sogenannten *Monsterwellen*, die man früher noch für Seemannsgarn hielt. Monsterwellen sind einzelne bis zu 25 Meter hohe Ozeanwellen. Anders als bei Tsunamis ist bei ihnen nur der obere Teil der Wassersäule in Bewegung. Wegen ihrer kurzen Wellenlänge sind diese Wellen sehr steil, sodass ihnen bereits so manches Schiff zum Opfer gefallen ist.



Gewöhnliche Wasserwellen → S. 100

UC Santa Barbara Geography *Morning Glory Clouds*

<http://www.geog.ucsb.edu/events/department-news/621/morning-glory-clouds/>



## Der Lotuseffekt

### Tauziehen zwischen Kohäsion und Adhäsion



Lotusblüte

Schon vor 2000 Jahren war die Lotusblume als Symbol der Reinheit und Unverfälschtheit bekannt: Der alte Name *padmapatramivambhasa* aus dem Hinduistischen Epos *Bhagavad Gita* bezeichnet die Eigenschaft der Lotusblume, kaum Schmutz aufzunehmen.

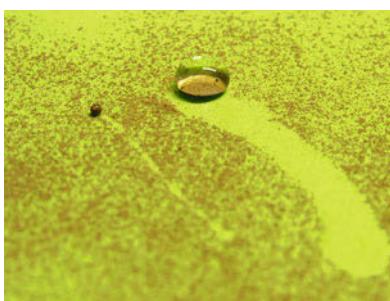
Seit dem Aufkommen des Elektronenmikroskops (↓) in den 1970er Jahren weiß man, dass die schmutzabweisende Fähigkeit der Lotusblume ihren Ursprung in Oberflächeneffekten hat. Die Blätter der Lotuspflanze sind mikrostrukturiert, d. h. die Oberfläche ist nicht glatt, sondern besitzt unzählige nanometergroße Erhebungen.

Der Kontakt zwischen einer Oberfläche (zum Beispiel dem Blatt einer Pflanze) und einem Wassertropfen wird durch das Wechselspiel zwischen der Kohäsion

(dem Zusammenhalt der Wasserteilchen untereinander) und der Adhäsion (dem Haften der Wasserteilchen am Blatt) bestimmt. Wasser versucht aufgrund der Oberflächenspannung für gewöhnlich, seine Oberfläche so klein wie möglich zu halten.

Ein intensiver Kontakt zwischen Wassertropfen und Lotusblatt würde aufgrund der starken Oberflächenstrukturierung zu einer sehr großen Wasseroberfläche führen. Das ist jedoch energetisch sehr ungünstig für den Wassertropfen. Deswegen zieht die Oberflächen-

spannung des Wassers den Wassertropfen fast zu einer Kugel zusammen, um so möglichst wenig Kontakt zur Pflanzenoberfläche zu haben. So sind weniger als 1% der Wasseroberfläche im Kontakt mit dem Lotusblatt. Es wird daher auch *superhydrophob* genannt.



Ein Wassertropfen auf einem Lotusblatt nimmt Staubteilchen auf.

Aufgenommener Staub auf einem Wassertropfen

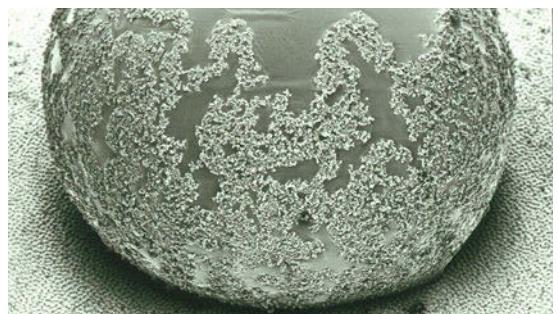


Bild in der Mitte mit freundlicher Genehmigung von ITV Denkendorf

Foto unten und auf der gegenüberliegenden Seite rechts unten mit freundlicher Genehmigung von W. Barthlott *Lotus-Effect*

<http://www.lotus-effect.de>

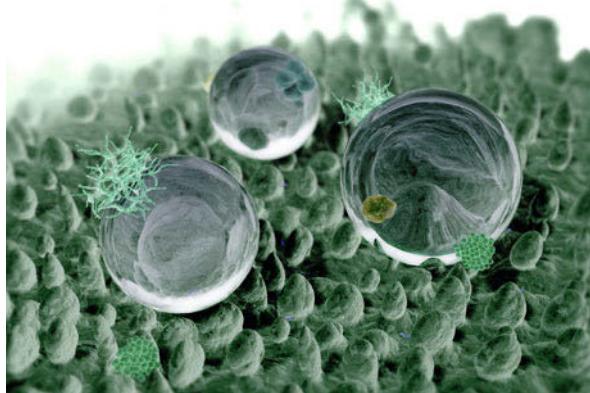
Elektronenmikroskopie → S. 208

Nanowelten → S. 212

Die Selbstreinigungskräfte des Lotusblattes haben nun zwei Ursachen: Zum einen haften Schmutzpartikel, ähnlich wie Wasser, nur sehr schlecht an mikrostrukturierteren Oberflächen. Zum zweiten fließt Wasser am Lotusblatt nicht entlang, es rollt in Tropfen herunter. Dabei nimmt es Staub und Schmutz in sich auf und hinterlässt so eine gereinigte Oberfläche. Derselbe Effekt findet sich auch auf Schmetterlingsflügeln, die ebenfalls mikrostrukturiert sind. Deren Selbstreinigungsfähigkeiten sind extrem wichtig, da sich ein Schmetterling seine Flügel nicht selber putzen kann.

Dieser sogenannte *Lotuseffekt* findet heutzutage weite technische Anwendungen, vor allem in der Konstruktion schmutzabweisender Oberflächen. Es gibt mikrostrukturierte Beschichtungen für Glasoberflächen von Geschwindigkeitssensoren auf Autobahnen, die daher durch Autoabgase weniger verdrecken. Ebenso existieren mit Nanopartikeln versetzte Wandfarben, um Häuserwände wasserabweisend zu machen. Der Effekt wird auch benutzt um superhydrophobe Keramikbeschichtungen zu erzeugen. Mit diesen versucht man zum Beispiel in Urinalen Spülwasser zu sparen.

Computergrafik: Wassertropfen auf einer mikrostrukturierten Oberfläche



Der Lotuseffekt lässt sich nicht nur mit Nanopartikeln, sondern auch mit nanometerbreiten Fasern erzielen.



Auf einer glatten Oberfläche fließt Wasser hinab. Auf einer mikrostrukturierten Oberfläche zieht sich das Wasser zu einem Tropfen zusammen und rollt hinunter, wobei es Schmutzpartikel mitnimmt.

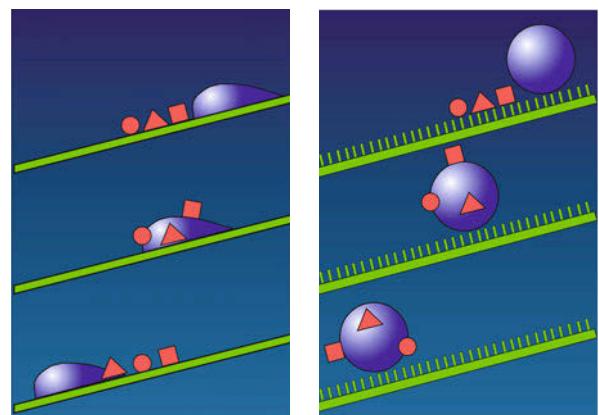


Bild unten links mit freundlicher Genehmigung von William Thielicke w.th@gmx.de

P. Forbes *Selbstreinigende Materialien* Spektrum der Wissenschaft, August 2009

Z. Cerman, A. K. Stosch, W. Barthlott *Der Lotus-Effekt* Biologie unserer Zeit, 34. Jahrgang 2004, Nr. 5, Wiley-VCH Verlag



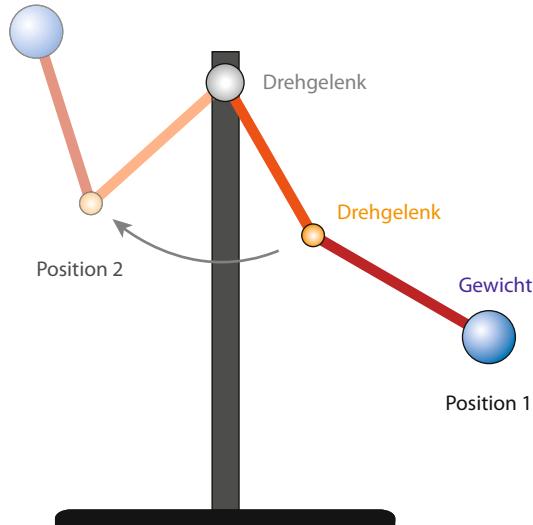
## Chaotische Bewegungen

Deterministisch, aber unvorhersehbar

In der klassischen Mechanik ist die Bewegung eines Objektes für alle Ewigkeit eindeutig festgelegt und vorhersagbar, wenn man die wirkenden Kräfte genau kennt und weiß, wo sich das Objekt zum Startzeitpunkt befindet und welche Anfangsgeschwindigkeit es dabei besitzt. Würde demnach ein allwissendes Wesen die Orte und Geschwindigkeiten aller Teilchen im Universum genau kennen, so könnte es die zukünftige Entwicklung der Welt präzise vorhersagen.

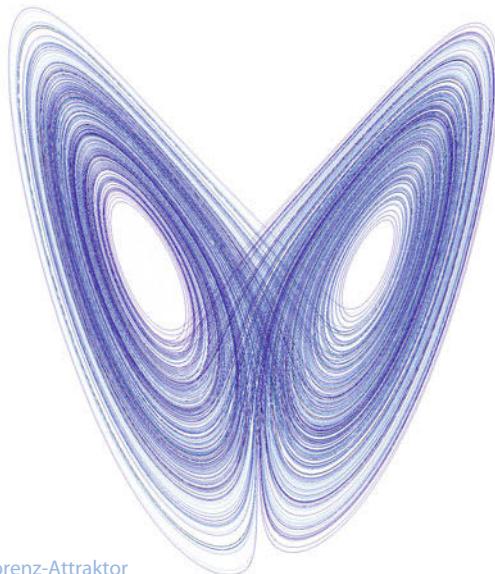
Die Quantenmechanik ( $\downarrow$ ) hat dieses deterministische Weltbild im ersten Drittel des zwanzigsten Jahrhunderts ins Wanken gebracht. Doch auch der Determinismus der klassischen Mechanik täuscht, denn bereits einfache nichtlineare klassische Systeme können ein sogenanntes *chaotisches Verhalten* zeigen, bei dem sich selbst kleinste Unterschiede in den Anfangsbedingungen exponentiell verstärken und nach kurzer Zeit zu vollkommen anderen Bewegungen führen. Da man die Anfangsbedingungen immer nur mit einer gewissen Genauigkeit kennt, wird eine langfristige Vorhersage der Bewegung damit unmöglich.

Zwei Positionen des Doppelpendels



Ein bekanntes Beispiel für chaotisches Verhalten ist das Doppelpendel, bei dem man am Ende eines drehbar gelagerten Pendels ein zweites Pendel anbringt. Setzt man das Doppelpendel mit genügend Schwung in Bewegung, so erscheint die Pendelbewegung fast wie zufällig. Das folgende langzeitbelichtete Foto macht mithilfe einer LED am Pendelende diese chaotische Bewegung sichtbar:





Der Lorenz-Attraktor

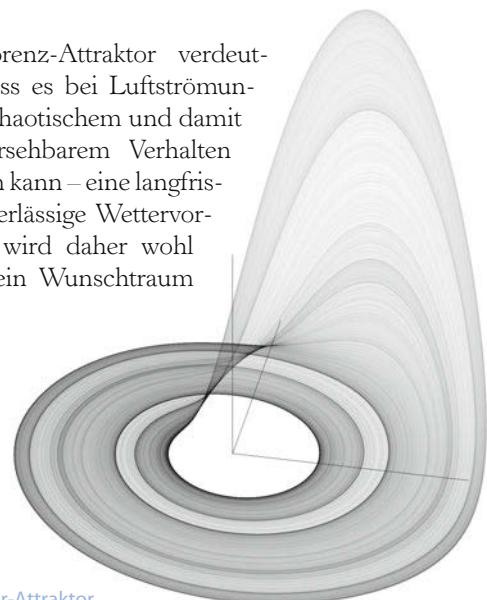
Bei besonders einfachen Systemen mit nur drei dynamischen Variablen kann man sich die Ursache für das chaotische Verhalten auch grafisch veranschaulichen, indem man die Werte der drei Variablen als Koordinaten eines Punktes verwendet, dessen Bahn im dreidimensionalen Raum die zeitliche Entwicklung des Gesamtsystems darstellt. Dabei nähern sich die verschiedenen Bahnen häufig sehr schnell einer bestimmten Kurve oder Fläche im Raum an, auf der sie dann weiterlaufen. Man spricht von einem *Attraktor*.

Bei periodischen Bewegungen ist der Attraktor einfach eine geschlossene Kurve. Im chaotischen Fall ist der Attraktor dagegen weder eine Kurve noch eine Fläche, sondern ein fraktales Gebilde. Ein chaotischer Attraktor zieht auf ihm liegende benachbarte Punkte immer mehr auseinander, ähnlich wie man sich das Ausrollen

von Teig vorstellen kann, und faltet dann die Bahnkurven wie Teig wieder übereinander. So wandert beim so genannten *Rössler-Attraktor* ein Punkt spiralförmig in der x-y-Ebene nach außen, bis er schließlich nach oben gehoben wird und anschließend umso weiter innen landet, je weiter außen er zuvor gewesen war.

Der Rössler-Attraktor ist eine vereinfachte Version des *Lorenz-Attraktors*, auf den man bei der mathematischen Modellierung von Luftströmungen (↓) stieß. Beim Lorenz-Attraktor kreisen die Punkte in der linken Attraktorhälfte im Uhrzeigersinn und rechts gegen den Uhrzeigersinn, wobei sich die Abstände zwischen benachbarten Punkten bei jedem Umlauf verdoppeln und bei der Abwärtsbewegung in der Mitte des Attraktors die Bahnen wie zufällig zwischen den beiden Attraktorhälften hin- und herwechseln.

Der Lorenz-Attraktor verdeutlicht, dass es bei Luftströmungen zu chaotischem und damit unvorhersehbarem Verhalten kommen kann – eine langfristige zuverlässige Wettervorhersage wird daher wohl immer ein Wunschtraum bleiben!



Der Rössler-Attraktor



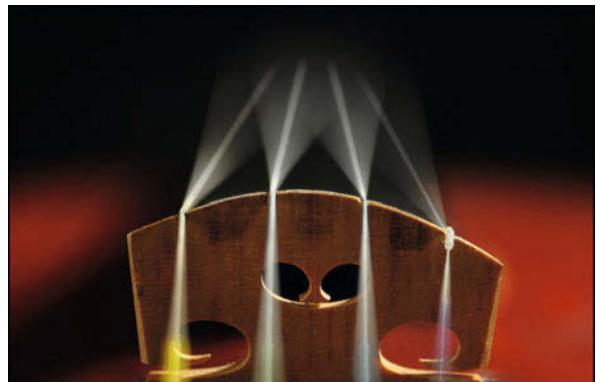
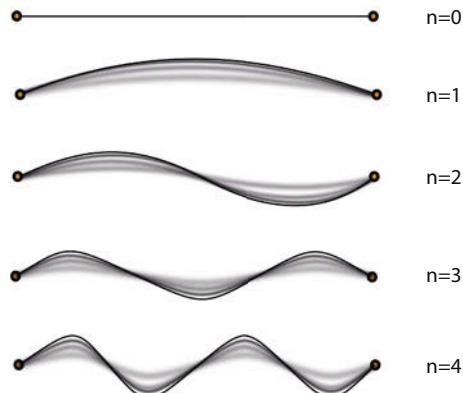
# Schwingende Saiten und Platten

## Kann man Töne sehen?

Wird eine gespannte Gitarrensaite in Schwingung versetzt, so bildet sich eine stehende Welle aus, d. h., dass gewisse Bereiche der Saite stark schwingen, während andere in Ruhe bleiben (Letztere sind die sogenannten *Knotenpunkte*). Die Schwingungsfrequenz hängt dabei außer von Material und Gewicht von zwei Dingen ab: Zum einen von der Spannung der Saite, weshalb man ihren Ton verändern kann, indem man an den Stimmwirbeln dreht und sie so fester oder lockerer spannt. Zum anderen von der Länge der Saite, weshalb man unterschiedliche Töne erzeugen kann, je nachdem wo man die Saite abdrückt.

Schlägt man eine Gitarrensaite mit der Hand an, so erzeugt man hauptsächlich die Grundschwingung, d.h., es gibt keine Schwingungsknoten (außer den beiden eingespannten Endpunkten der Saite). Es gibt aber auch theoretisch unendlich viele weitere stehende

### Grund- und die ersten Oberschwingungen einer eingespannten Saite



Schwingungsknoten auf Geigensaiten

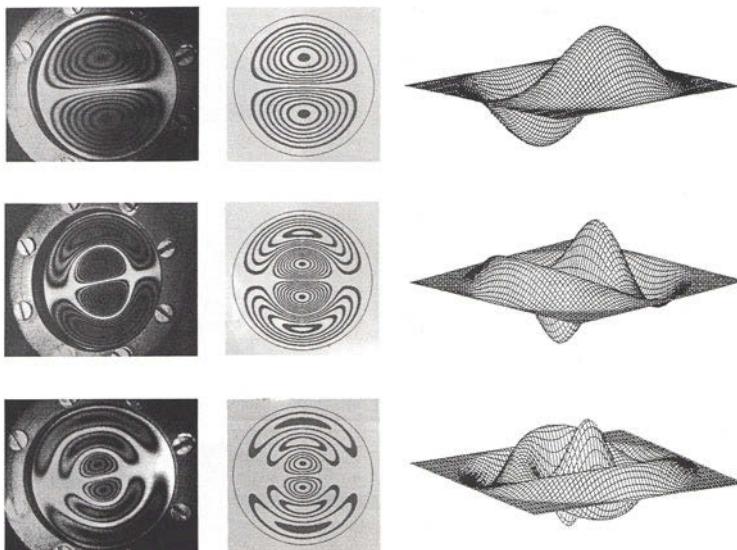
Wellen, die sich auf der schwingenden Saite ausbilden könnten, je nachdem wie viele weitere Schwingungsknoten sie besitzt. Diese *Obertöne* würden auch anders klingen: Für jeden weiteren Schwingungsknoten steigt der vom menschlichen Ohr wahrgenommene Ton um eine Oktave. Man kann also die genaue Form der Schwingung hören.

Bei einem zweidimensionalen schwingenden Körper, wie zum Beispiel einer eingespannten Platte, ist das allerdings schon deutlich komplizierter. Anders als eine eingespannte Saite hat eine Platte nämlich eine zweidimensionale Form, und deshalb gibt es viele komplizierte Möglichkeiten, auf die eine Platte in Schwingung versetzt werden kann. Auf einer Platte können die Stellen, an denen sie bei einer Schwingung in Ruhe ist, nicht nur punktförmig sein (wie die Schwingungsknoten bei einer schwingenden Saite), sondern auch linienförmig.

Bild rechts oben mit freundlicher Genehmigung von Dieter Biskamp

Davidson Physics *Chladni Figures and Vibrating Plates*

<http://www.phy.davidson.edu/StuHome/jimn/Java/modes.html>; englisch; Java App zu Chladnischen Klangfiguren



Holografische Interferogramme, berechnete Interferogramme und D-Simulationen der Eigenschwingungsformen einer runden Platte

Man kann diese *Knotenlinien* sehr schön sichtbar machen, indem man die Platte mit Sand bedeckt. Fängt sie an zu schwingen, so wird der Sand überall dort, wo die Platte sich bewegt, heruntergeschleudert. Auf den Knotenlinien bleibt der Sand jedoch liegen, weil sich dort die Platte eben nicht bewegt.

Betrachten wir das Beispiel einer kreisförmig eingespannten Platte. Eine Möglichkeit der Schwingung besteht darin, dass die Knotenlinien die Platte wie ein Kreuz in vier gleich große Teile teilen. Je zwei gegenüberliegende Viertel schwingen dann genau in die entgegengesetzte Richtung im Vergleich zu den beiden anderen Vierteln. Andererseits kann eine kreisrunde Platte auch durch einen Kreis mit halbem Radius in zwei Teile geteilt werden. Der innere Kreis und der äußere Ring schwingen dann gegenläufig.

Als erstes machte diese Knotenlinien der Physiker Ernst Florens Friedrich Chladni sichtbar, weshalb sie auch *Chladnische Klangfiguren* genannt werden. Für Platten von beliebiger gegebener Form ist es bis heute ein ungelöstes Problem, alle Knotenlinien und alle Schwingungsfrequenzen zu berechnen. Bis vor nicht allzu langer Zeit nahm man noch an, dass man wenigstens umgekehrt aus der Kenntnis aller von einer Platte erzeugten Töne ihre Form rekonstruieren könne. Marc Kac stellte hierzu 1966 die Frage: „Kann man die Form einer Trommel hören?“ Im Jahre 1992 wurde diese Frage durch ein Gegenbeispiel gelöst: Es gibt unterschiedliche Flächen, die durch Schwingungen exakt dieselben Töne erzeugen. Ihre Chladnischen Figuren sind aber aufgrund ihrer unterschiedlichen Form nicht dieselben.

Bilder mit freundlicher Genehmigung von Jörg Schlimmer Vergleich von *holografisch-interferometrisch* und *speckle-interferometrisch* ermittelten Plattenschwingungsformen mit *rechnerisch simulierten Interferogrammen* 1993  
T. Driscoll *Isospectral drums* <http://www.math.udel.edu/~driscoll/research/drums.html>; englisch



# Resonanz

## Wenn man beim Schwingen die richtige Note trifft

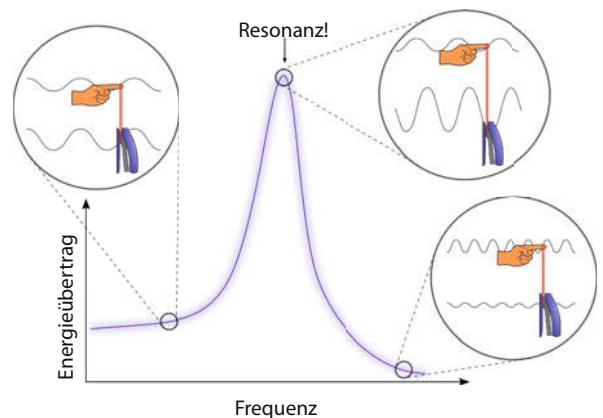
Die meisten Objekte der realen Welt können auf die eine oder andere Art und Weise in Schwingung versetzt werden. Seien es die Saiten einer Gitarre durch die Gitarrenspielerin, eine von Wasserwellen hin- und hergeschwungene Boje auf dem Meer oder Züge, die durch das ständige Rattern der Räder über die Gleise zum Vibrieren gebracht werden.

In all diesen Fällen gibt es eine Wechselwirkung zwischen zwei Systemen, in denen eine äußere, antreibende Kraft einen Teil ihrer Energie auf das in Schwingung befindliche Objekt überträgt. Dabei passt sich die Schwingungsfrequenz des Objektes immer der Frequenz der antreibenden Kraft an, beide Systeme schwingen nach einiger Zeit also gleich schnell. Wie viel Energie dabei übertragen wird, hängt jedoch stark davon ab, wie weit diese Frequenz von der sogenannten Resonanz- oder Eigenfrequenz des Objektes entfernt ist. Diese ist eine Eigenschaft von schwingungsfähigen Körpern, die individuell von Form und Beschaffenheit abhängt.

Bei der Energieübertragung durch Schwingungen kann man zwei Extremfälle unterscheiden, die man sich zum Beispiel mit einem hängenden Gummiband veranschaulicht, das man am einen Ende in der Hand hält und an dessen anderem Ende ein schwerer Gegenstand, z. B. ein Tacker befestigt. Bewegt man nun die Hand sehr langsam auf und ab – also deutlich langsamer als die Resonanzfrequenz – so hat das Gummiband immer genug Zeit, seine Länge anzupassen, und der Tacker bewegt sich immer im Gleichschritt mit der

Hand mit. Es wird ein wenig Energie übertragen, aber nicht viel. Bewegt man die Hand allerdings mit sehr hoher Geschwindigkeit auf und ab – höher als die Resonanzfrequenz – so hat das Gummiband überhaupt keine Zeit sich rechtzeitig anzupassen. Es wird einfach mit hoher Geschwindigkeit gestreckt und gestaucht, und der Tacker verbleibt weitgehend dort, wo er ist. Wenn man genau hinschaut, kann man erkennen, dass er ein ganz klein wenig schwingt, und zwar genau gegenphasig zur Hand. Hierbei wird so gut wie keine Energie übertragen.

Zwischen diesen beiden Extremfällen liegt der Resonanzfall, also der Fall, dass man ganz genau mit der Resonanzfrequenz des Gummibandes schwingt.



**Resonanz zum Selbermachen:** Mit Gummiband und Tacker kann man selbst ausprobieren, wie Frequenz und Energieübertrag zusammenhängen.

Während Hand und Tacker bei sehr kleiner Frequenz im Gleichtakt schwingen und bei sehr hoher entgegengesetzt, ist im Resonanzfall die Hand dem Tacker immer eine Viertelschwingung voraus. Das hat zur Folge, dass, wann immer die Hand maximal ausgelenkt ist, der Tacker gerade seine höchste Geschwindigkeit hat und umgekehrt. Genau wenn der Tacker also besonders schnell nach oben oder unten saust, gibt die Hand, indem sie das Gummiband stark spannt, noch mehr Energie an den Tacker ab, der dadurch noch schneller wird. Dies ist derselbe Effekt wie bei einer Kinderschaukel: Der beste Weg, besonders hoch zu schaukeln, ist, an ihrem tiefsten Punkt, also wenn sie am schnellsten ist, Schwung zu geben. An diesem Punkt ist der Energieübertrag am effektivsten.

Weil in der Resonanz die übertragene Energie am höchsten ist, ist die Auslenkung der angeregten Schwingung hier auch maximal. Das kann in vielen alltäglichen Situationen zu Problemen führen. Wenn die Schwingung nur schwach gedämpft ist, so kann der Fall der *Resonanzkatastrophe* eintreten. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Broughton-Suspension-Bridge: Am 12. April 1831 marschierten 74 britische Soldaten über diese Brücke, die durch den Gleichschritt in Resonanz versetzt wurde und einstürzte.

Ebenfalls durch eine Resonanzkatastrophe zerstört werden können Gläser, wenn man sie mit der richtigen Frequenz beschallt. Schreiende oder singende Menschen sind hierzu bei handelsüblichen Weingläsern allerdings nicht in der Lage. Hierfür bedarf es eines Tongenerators, um den entsprechenden Schalldruck und die Reinheit des Tons zu gewährleisten.



Stimmgabeln sind so konstruiert, dass ihre Resonanzfrequenz genau festgelegt ist – hier bei exakt 659 Hertz, was dem Ton „E“ entspricht.

Das Konzept der Resonanz tritt auch in vielen anderen Bereichen der Physik auf. Zum Beispiel kann man so die diskreten Energieniveaus der Atome im Wellenbild ( $\downarrow$ ) sehr gut verstehen: Photonen können ihre Energie nur dann an Atome abgeben, wenn ihre Frequenz genau einer der Resonanzfrequenzen der Atome entspricht. Bei allen anderen Frequenzen kann das Lichtteilchen so gut wie keine Energie übertragen.



Entgegen weitläufiger Meinung spielte Resonanz beim Einsturz der Tacoma-Narrows-Bridge im Jahre 1940 eine weitaus geringere Rolle als das durch den Wind hervorgerufene aerodynamische Flattern.



## Scheinkräfte

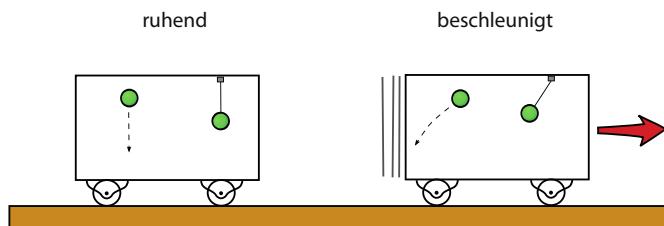
Wenn wir Kräfte spüren, ohne eine Ursache zu finden

Das zweite Newton'sche Gesetz ( $\downarrow$ ) besagt, dass ein Körper eine Beschleunigung  $\mathbf{a}$  erfährt, die proportional zur Summe der auf ihn einwirkenden Kräfte  $\mathbf{F}$  ist. Wenn man allerdings nur Kräfte betrachtet, die ihre Ursache in physikalischen Prozessen haben, also z.B. die Schwerkraft, Reibung oder elektromagnetische Wechselwirkung, so stimmt dieses Gesetz nur für Beobachter, die sich auf geraden Linien mit konstanter Geschwindigkeit bewegen, die sich also in Inertialsystemen befinden. Wird ein Beobachter hingegen beschleunigt, so spürt er eine Beschleunigung in entgegengesetzter Richtung in Form eines Rückstoßes, zu der es keine Kraft zu geben scheint. Newtons zweites Gesetz scheint in solchen Fällen also nicht zu gelten.

Die fiktiven Kräfte, die zu diesen scheinbaren Beschleunigungen gehören, nennt man *Scheinkräfte*. Zu ihnen gehören zum Beispiel auch die Zentrifugalkraft oder *Fliehkraft*: Beobachtet man einen geostationären Satelliten ( $\downarrow$ ) von der Erde aus, so scheint er am Himmel still zu stehen. Aus der Sicht des Erdbewohners muss die Schwerkraft der Erde also von einer nach außen gerichteten Kraft aufgehoben werden – der Zen-

trifugalkraft. Diese Kraft existiert aber nicht wirklich – die Tatsache, dass sich der Satellit nicht beschleunigt, obwohl die Schwerkraft auf ihn wirkt, ist eine Folge der Erddrehung, durch die sich der erdfeste Beobachter in einem beschleunigten Bezugssystem befindet. Ein Beobachter in einem Intertialsystem, der sich nicht mit der Erde mit dreht, sieht den Satelliten sich auf einer Kreisbahn um die Erde bewegen – statt auf einer geraden Bahn durchs Weltall fliegen – weil er eben von ihrer Schwerkraft angezogen wird. Für diesen Beobachter gilt  $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$ , ohne dass er Scheinkräfte postulieren muss.

Ein weiteres bekanntes Beispiel ist die sogenannte *Corioliskraft*. Genau wie die Zentrifugalkraft scheint sie in rotierenden Bezugssystemen zu wirken. Die Corioliskraft steht immer senkrecht zur Bewegungsrichtung und ist proportional zum Sinus des Winkels zwischen Bewegungsrichtung und Rotationsachse des Bezugssystems. Bewegt man sich zum Beispiel auf der Nordhalbkugel der Erde in irgendeine Richtung, so spürt man eine Beschleunigung nach rechts relativ zur Bewegungsrichtung. Aus diesem Grund sind großräumige



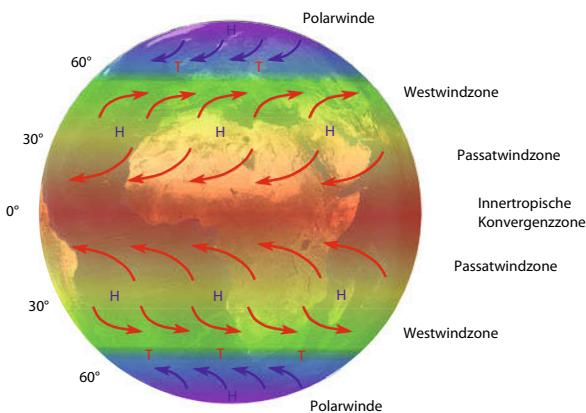
In einem beschleunigten Zugwagon spürt man eine entgegengesetzt wirkende Scheinkraft.

Wolkenformationen über Tiefdruckgebieten meist wie Strudel geformt: Die Luft strömt in des Tiefdruckgebiet hinein, wird (auf der Nordhalbkugel) aber nach rechts abgelenkt, sodass sich ein Strudel entgegen dem Uhrzeigersinn ergibt. Auf der Südhalbkugel verhält es sich genau umgekehrt.

Tornados hingegen sind so klein, dass die Corioliskraft sehr viel weniger Einfluss hat als lokale Luftströmungen. Dies gilt umso mehr für die Richtung des Strudels in einer abfließenden Badewanne: Hier hält sich hartnäckig das Gerücht, dass die Corioliskraft die Strudelrichtung bestimme, aber in Wirklichkeit hängt sie hauptsächlich von der genauen Art ab, wie der Stöpsel aus der Badewanne gezogen wird.

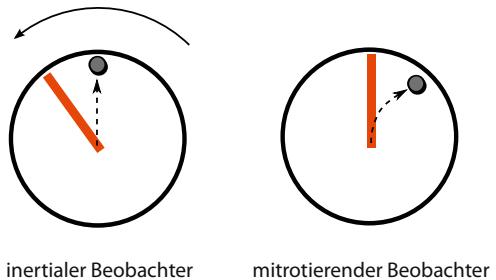
Die Corioliskraft zeigt sich in vielerlei Situationen: Zieht ein Kran seine Last zu sich heran während er sich dreht, so wird diese Last gemäß der Corioliskraft abge-

**Die Erdrotation und die resultierende Corioliskraft prägen die Windrichtungen auf dem Planeten entscheidend mit.**



lenkt. Auf der Nordhalbkugel führt sie dazu, dass bei geraden Zugstrecken diejenige Schiene, die in Fahrt-Richtung rechts liegt, geringfügig stärker belastet wird als die linke Schiene. Allerdings, selbst wenn es sich um einen schnellen ICE handelt, ist dieser Einfluss immer noch um Größenordnungen kleiner als zum Beispiel die Fliehkraft, wenn der Zug um eine Kurve fährt.

Die Corioliskraft tritt in rotierenden Bezugssystemen auf.



Ein Tiefdruckgebiet über Island. Die von außen hineinströmende Luft formt einen Wirbel aufgrund der Corioliskraft.

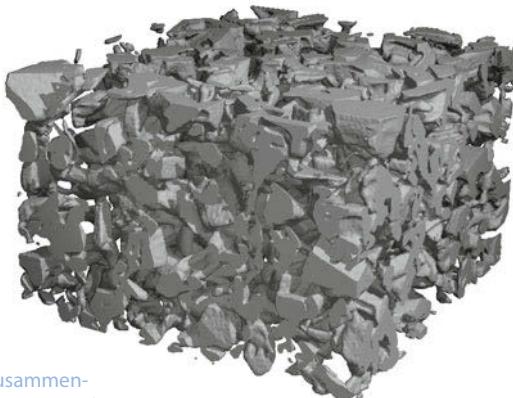


## Granulare Materie

### Flüssig und fest zugleich

Obwohl Stoffe in der Natur normalerweise in einem bestimmten Aggregatzustand vorkommen, ist ihr Verhalten häufig sehr viel komplexer, als dass man ihn nur als „fest“ oder „flüssig“ bezeichnen könnte. Ein gutes Beispiel hierfür sind die *granularen* (also „körnigen“) Materialien, in der Industrie als „Schüttgut“ bezeichnet. Diese bestehen – wie z. B. Sand oder Mehl – aus unzähligen kleinen Körnern, die selbst zwar alle Festkörper sind, aber die sich im Kollektiv bisweilen wie Flüssigkeiten verhalten können.

Wichtig ist hierbei, dass die Größe der beteiligten „Körper“ – seien es nun Reiskörner, Staubkörner oder Schneeflocken – makroskopisch ist, d. h., es treten keinerlei Quanteneffekte auf. Dann wird die Wechselwirkung der Körner untereinander nur von der Reibung und eventuell von Kohäsionseffekten bestimmt.



In zusammengepresstem Schnee ist immer noch viel Zwischenraum.



Wasser kann Verbindungen zwischen Schneekristallen durch Adhäsion verstärken, aber auch auflösen und so schwächen.

Sand zum Beispiel kann sich wie ein Festkörper verhalten – man kann Steine auf ihm platzieren, die nicht untergehen – oder auch wie eine Flüssigkeit – Sand nimmt die Form des ihn enthaltenden Gefäßes an und kann „ausgegossen“ werden.

Die „Fließeigenschaften“ eines Granulates hängen ganz entscheidend von der Korngröße und auch -form ab. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der sogenannte *Paranuss-Effekt*. Dieses Phänomen tritt immer in gemischten granularen Materialien auf, in denen beide Mischungspartner unterschiedliche Korngrößen besitzen – wie Paranüsse in Frühstücksflocken. In einem solchen Gemisch liegen die größeren Körner vermehrt an der Oberfläche, und durch zusätzliches



Künstlich ausgelöste Staublawine im Versuchsgelände des WSL-Instituts für Schnee- und Lawinenforschung SLF

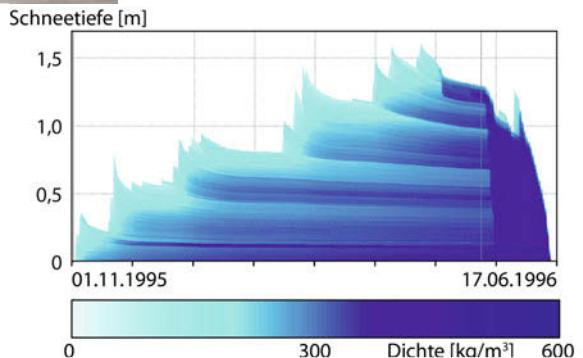
Schütteln kann man die größeren und die kleineren immer weiter trennen, bis die großen Körner ganz obenauf liegen. Die Erklärung hierfür ist sehr anschaulich: Durch das Schütteln entstehen zwischen den Körnern kleine Zwischenräume, die besser von kleineren als von den größeren Körnern gefüllt werden können. Die kleineren Körner wandern also langsam nach unten, während die größeren dadurch immer weiter nach oben gedrückt werden.

Allen granularen Materialien gemein ist, dass sie sogenannte *Schüttkegel* ausformen, wenn sie ausgegossen werden. In dieser Form befinden sie sich gerade an einem kritischen Punkt zwischen zwei „Phasen“: Während sich zum Beispiel ein Sandhaufen an sich wie ein Festkörper verhält, bedeutet schon eine kleine Störung, wie zum Beispiel die Zugabe von ein wenig mehr Sand, dass sich Lawinen ausbilden, d. h., dass der Sand wie



eine Flüssigkeit den Hang hinunter rieselt, und zwar so lange, bis sich wieder ein stabiles Gleichgewicht eingestellt hat. Dabei hat ein Schüttkegel einen spezifischen Hangneigungswinkel, den man auch *Böschungswinkel* nennt. Die genaue Größe dieses Böschungswinkels hängt von der Korngröße und vor allem von ihrer Form ab: Nicht nur lassen sich Sandburgen deutlich leichter mit dem aus eckigeren Körnern bestehenden Flussand bauen. Auch lassen sich mit Langkornreis steilere Haufen formen als aus Reis mit runderen Körnern.

Die Tendenz, sich von einem Zustand des Nichtgleichgewichtes (dem Ausschütten) von selbst zu einem kritischen Punkt (dem Schüttkegel) hin zu entwickeln, wird *selbstorganisierte Kritikalität* genannt, eine Eigenschaft, die granulare Materie mit vielen anderen komplexen Systemen wie Waldbränden, Verkehrsstaus oder sogar Städtewachstum teilt.



Numerische Simulation von Schneedichte und -tiefe, aufgetragen über die Zeit. Lawinen sind als scharfe Spitzen zu erkennen.

Bild links oben von WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos

Bild rechts unten aus Perry Bartelt, Michael Lehning [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00074-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00074-5)

S. M. Weber, Physikdidaktik *Granulare Materie I*

[http://www.physikdidaktik.uni-bayreuth.de/projekte/piko/GranulareMaterie1\\_WeberSM.pdf](http://www.physikdidaktik.uni-bayreuth.de/projekte/piko/GranulareMaterie1_WeberSM.pdf)



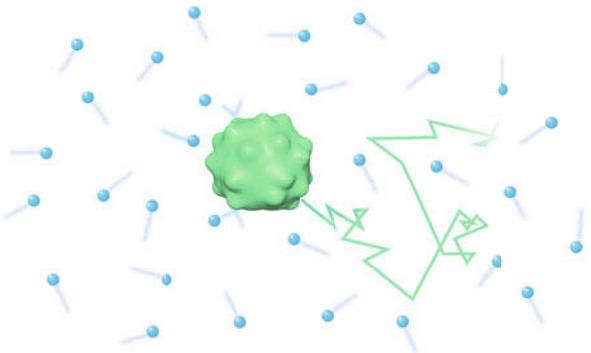
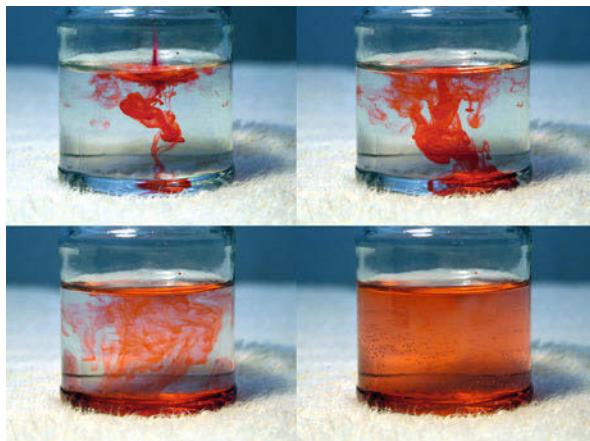
## Brown'sche Bewegungen

### Das unvorhersagbare Verhalten von Staubkörnern, Pollen und Börsenkursen

Ein Gas oder eine Flüssigkeit ist eine Ansammlung von unzähligen Atomen oder Molekülen, die in schneller Abfolge zusammenstoßen und voneinander abprallen. Zumeist interessiert man sich nur für grobe Eigenschaften, wie zum Beispiel den Druck eines Gases oder die Temperatur einer Flüssigkeit. Hierfür muss man die Bahnen der einzelnen Moleküle nicht kennen.

Was aber, wenn man sich für die Bahn eines einzelnen Teilchens inmitten all der anderen interessiert? Es ist schwer, ein individuelles Luftmolekül die ganze Zeit über im Auge zu behalten, deshalb stelle man sich vor, dass man ein einzelnes Staubkörnchen in der Luft, oder ein winziges Pollenkorn in Wasser verfolgen möchte.

Ein Tropfen Farbe verteilt sich im Wasserglas aufgrund der Brown'schen Bewegung.



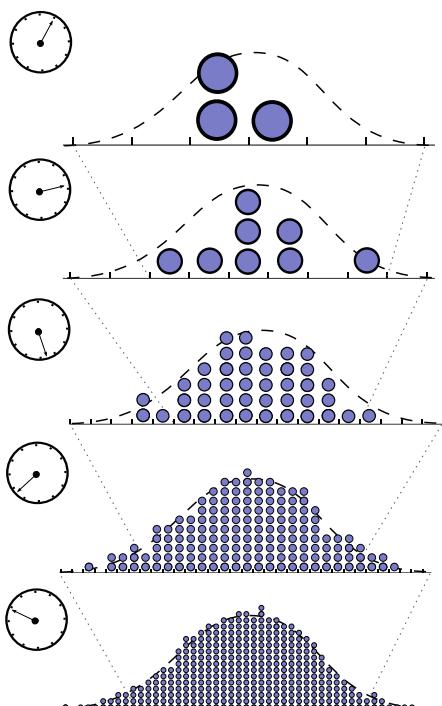
Pollenkorn inmitten von Wassermolekülen

Die ersten Beobachtungen unter dem Mikroskop dieser Art wurden 1785 von Jan Ingenhouz durchgeführt. Die Experimente von Robert Brown ca. 40 Jahre später haben den beobachteten Teilchenbewegungen ihren Namen gegeben: die *Brown'sche Molekularbewegung*. Sie sieht extrem zufällig und unregelmäßig aus. Das ist kein Wunder, denn anders als Ingenhouz oder Brown wissen wir heute, dass ein Teilchen in Luft pro Sekunde ca. fünf Milliarden Zusammenstöße mit Luftmolekülen erfährt, wobei es jedes Mal zufällig seine Richtung ändert.

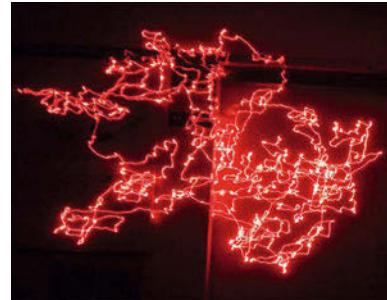
Kann man also die Bahn eines einzelnen Teilchens vorhersagen? Nun, auf jeden Fall nicht exakt, zumindest wenn man nicht gleichzeitig die Bahnen aller anderen Teilchen im Gas kennt, was natürlich illusorisch ist. Trotzdem erlaubt die extreme Zufälligkeit, zumindest einige Eigenschaften von typischen Teilchenbahnen vorherzusagen.

A. Einstein Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen Annalen der Physik, Vol. 322, Nr. 8, 1905, S. 549–556,  
[http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905\\_17\\_549-560.pdf](http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905_17_549-560.pdf)

Mathematisch modellieren kann man die Brown'sche Molekularbewegung hervorragend mit dem Modell des *Random Walker* (auf deutsch etwa: Zufallsläufer). Man stelle sich dazu zum Beispiel ein unendlich großes, quadratisches Gitter vor. Auf einem der Knotenpunkte sitzt der Random Walker. In regelmäßigen Zeitschritten macht dieser Läufer einen Schritt in eine zufällige Richtung, also entweder nach oben, unten, rechts oder links, und setzt sich auf den entsprechenden benachbarten Knotenpunkt im Gitter.



Lässt man viele Random Walker über lange Zeit laufen, nähert sich ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit einer Gauß'schen Verteilung an.



Brown'sche Bewegung mit einem Laserstrahl

Wenn man nun den Zeitschritt sehr klein wählt (also zum Beispiel mehrere Milliarden Schritte pro Sekunde) und die Schrittlänge auf einige wenige Nanometer setzt, so ist ein typischer Pfad des Zufallsläufers kaum von einem Pfad eines Pollenkorns auf einer Wasseroberfläche zu unterscheiden. Führt man den Random Walk auf einem dreidimensionalen Gitter aus, so stimmen die beobachteten Pfade ziemlich gut mit den Wege, die ein Pollenkorn bei seinem Flug durch (windstille) Luft nimmt, überein.

Obwohl es sich bei dem Random Walker nur um ein sehr einfaches Modell handelt, so kann man doch eine Menge daraus für das Verhalten von realen Phänomenen lernen. Er beschreibt nämlich nicht nur die Diffusionsbewegung einzelner Teilchen in einem Gas oder einer Flüssigkeit, man benutzt ihn auch zur Modellierung von Preisentwicklungen, zum Beispiel an der Börse. In der Tat scheinen – zumindest für kurze Zeit – die Bahnen eines eindimensionalen Random Walkers, aufgetragen gegen die Zeit, nicht nur an Pollen, sondern auch an Börsenkurse zu erinnern. Zumindest solange es keine einschneidenden Begebenheiten in der Finanzwelt gibt.

Bild rechts oben mit freundlicher Genehmigung von BInf. MPhil. (Arch) Justin James Clayden <http://justy.me>  
 B(R)G Ried Brownsche Bewegung [http://schulen.eduhi.at/riedgym/physik/10/waerme/temperatur/brownsche\\_bewegung.htm](http://schulen.eduhi.at/riedgym/physik/10/waerme/temperatur/brownsche_bewegung.htm)  
 Wikimedia Brownian Motion Beads in Water Spim, Video  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brownianmotion\\_beads\\_in\\_water\\_spim\\_video.gif?uselang=de](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brownianmotion_beads_in_water_spim_video.gif?uselang=de)



# Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

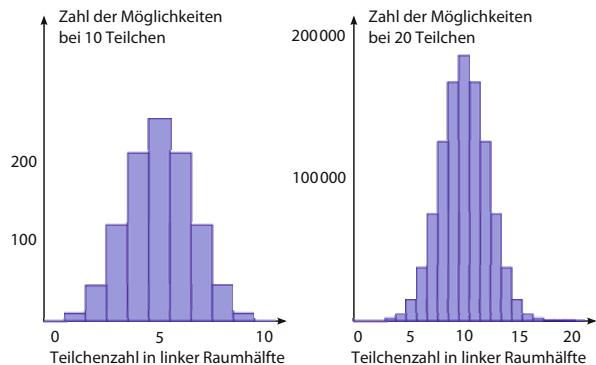
## Was der Zeit eine Richtung gibt

Die Entropie  $S$  zählt in logarithmischer Weise, wie viele Mikrozustände (beispielsweise Quantenzustände) eines makroskopischen Systems von außen betrachtet praktisch gleichwertig aussehen, sodass man sie zu einem Makrozustand zusammenfasst:

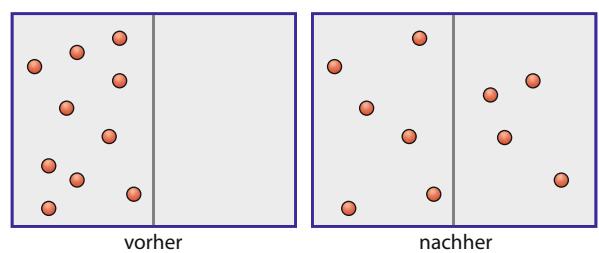
$$S = k_B \ln \Omega$$

Dabei ist  $\Omega$  die Zahl der Mikrozustände und  $k_B$  ist die Boltzmannkonstante.

Betrachten wir als Beispiel ein Zimmer, das wir in Gedanken in zwei Hälften aufteilen. Wir verteilen nun zufällig viele kleine Luftmoleküle im Zimmer. Die genaue Aufteilung der einzelnen Moleküle auf die beiden Hälften entspricht dann jeweils einem einzelnen Mikrozustand, während uns bei einem Makrozustand hier nur interessiert, wie viele Moleküle sich insgesamt in der rechten beziehungsweise linken Hälfte befinden. Es gibt nun sehr viel mehr mögliche Aufteilungen (Mikrozustände), bei denen sich die Luftmoleküle relativ gleichmäßig auf beide Hälften verteilen, als Aufteilungen, bei denen sich die meisten Moleküle in der linken oder rechten Zimmerhälfte befinden. Entsprechend ist die Entropie der Makrozustände mit gleichmäßiger Aufteilung größer als mit ungleichmäßiger Aufteilung. Dies wird umso ausgeprägter, je mehr Moleküle sich im Zimmer befinden. Und ein reales Zimmer enthält immerhin mehr als  $10^{26}$  Moleküle!



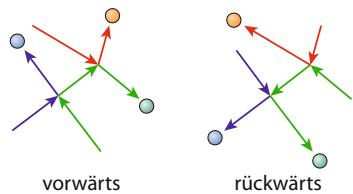
In einem Zimmer, in dem sich die Moleküle frei bewegen können, werden diese sich im Lauf der Zeit relativ gleichmäßig verteilen, selbst wenn sie anfangs alle in der linken Zimmerhälfte waren. Das System nimmt mit der Zeit also Makrozustände mit immer höherer Entropie an, bis schließlich die maximale Entropie erreicht ist, und sich die Moleküle gleichmäßig verteilt haben.



Das ist genau die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik:

### Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik:

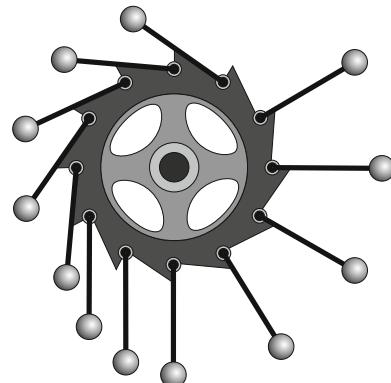
In einem abgeschlossenen makroskopischen System nimmt die Entropie mit der Zeit zu und erreicht im thermischen Gleichgewicht ihr Maximum.



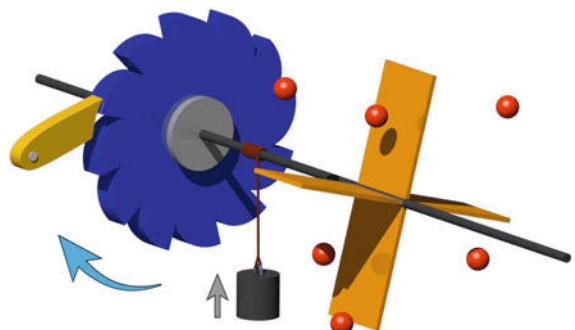
Letztlich verleiht dieses Gesetz der Zeit erst eine Richtung, denn die mikroskopischen Bewegungen der einzelnen Moleküle sind im Detail zeitlich umkehrbar: Lassen wir einen Molekülzusammenstoß zeitlich rückwärts ablaufen, so sehen wir wieder einen physikalisch möglichen Prozess. Der zweite Hauptsatz ist demnach nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage: Es ist genau genommen bei sehr vielen Teilchen nur extrem unwahrscheinlich, dass die Entropie von alleine signifikant abnimmt, aber absolut unmöglich ist es nicht.

Kugeln rechts müssten auf den ersten Blick wegen des längeren Hebelarms das Rad im Uhrzeigersinn drehen. Die größere Anzahl an Kugeln auf der linken Seite kompensiert jedoch diesen Effekt, sodass sich das Rad nicht von alleine dreht.

Im thermischen Gleichgewicht ist die Energie zufällig auf die einzelnen Moleküle verteilt. Ein *Perpetuum Mobile* versucht nun, ohne Eingreifen von außen diese Energie lokal zu konzentrieren und in Form von Arbeit nutzbar zu machen. Ein solcher Makrozustand mit lokalisierter Energie ist jedoch sehr viel unwahrscheinlicher als der Gleichgewichtszustand, und seine Entropie ist sehr viel kleiner. Daher lautet eine andere Formulierung des zweiten Hauptsatzes: *Es gibt kein Perpetuum Mobile!*



Versuch für ein mechanisches Perpetuum Mobile. Die Kugeln rechts müssten auf den ersten Blick wegen des längeren Hebelarms das Rad im Uhrzeigersinn drehen. Die größere Anzahl an Kugeln auf der linken Seite kompensiert jedoch diesen Effekt, sodass sich das Rad nicht von alleine dreht.



Die molekulare Ratsche ist ein gedachtes winziges Perpetuum-Mobile, bei dem Gasteilchen von verschiedenen Richtungen auf das Flügelrad rechts treffen und so das Rad mal links und mal rechts herum antreiben. Die Sperre am Zahnräder links lässt allerdings nur Drehungen in eine Richtung zu, sodass das Rad nach und nach ein Gewicht anhebt. Richard Feynman hat gezeigt, warum diese Ratsche nicht funktionieren kann: Auch die mikroskopische Sperre führt thermische Zufallsbewegungen aus, sodass sie das Zahnräder nicht zuverlässig blockieren kann.



# Negative absolute Temperaturen

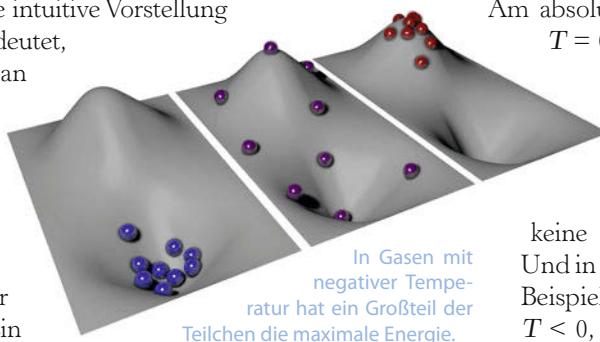
## Heißer als heiß

Im Alltag haben wir eine gute intuitive Vorstellung davon, was Temperatur bedeutet, denn als Mensch kann man heiß und kalt einfach durch Anfassen unterscheiden.

Für Systeme wie zum Beispiel Gase oder Flüssigkeiten definiert man die Temperatur über die Energieverteilung: Ein System, das aus sehr vielen einzelnen Bausteinen besteht (wie zum Beispiel Moleküle in einem Gas), hat die Temperatur  $T$ , wenn die statistische Wahrscheinlichkeit  $P$  für einen Baustein, die Energie  $E$  zu haben, proportional ist zu

$$P \sim e^{-E/(k_B T)}.$$

Hier bezeichnet  $k_B = 1,3 \cdot 10^{-23}$  Joule/Kelvin wieder die *Boltzmannkonstante*. Teilchen mit sehr hohen Energien  $E$  kommen also (exponentiell) unwahrscheinlich vor. Je größer allerdings die Temperatur  $T$  ist, desto langsamer fällt die Wahrscheinlichkeit  $P$  mit höherer Energie  $E$  ab. Das bedeutet: Wenn das System eine hohe Temperatur  $T$  hat, dann sind Teilchen mit hohen Energien wahrscheinlicher, was auch der Anschauung entspricht. Weil diese Definition eine Aussage über Wahrscheinlichkeiten – und somit über Häufigkeiten – ist, macht es zum Beispiel keinen Sinn, einem einzelnen Atom in einem Gas eine Temperatur zuzuordnen.



Am absoluten Temperaturnullpunkt  $T = 0$  Kelvin haben jedoch alle Teilchen exakt die Energie  $E = 0$  Joule. Man könnte also meinen, noch niedriger könnte es nicht gehen, da es keine negativen Energien gäbe. Und in der Tat: Hätte ein Gas zum Beispiel eine negative Temperatur  $T < 0$ , dann würde nach unserer obigen Formel die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen mit einer hohen Energie anzutreffen, exponentiell steigen. Da Moleküle aber theoretisch beliebig viel Energie haben könnten und folglich immer schneller würden, stiege die Wahrscheinlichkeit für immer größere Energien über alle Grenzen bis zur Unendlichkeit – vor allem über 100%, was für eine Wahrscheinlichkeitsaussage keinen Sinn ergibt.

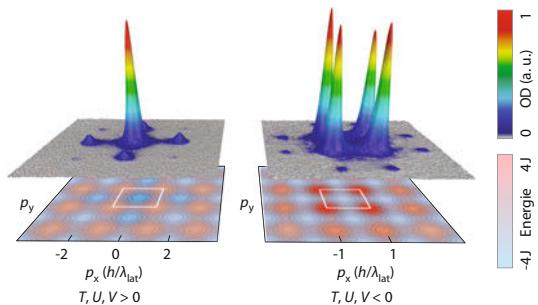
llichkeit, ein Teilchen mit einer hohen Energie anzutreffen, exponentiell steigen. Da Moleküle aber theoretisch beliebig viel Energie haben könnten und folglich immer schneller würden, stiege die Wahrscheinlichkeit für immer größere Energien über alle Grenzen bis zur Unendlichkeit – vor allem über 100%, was für eine Wahrscheinlichkeitsaussage keinen Sinn ergibt.



Entgegen der Intuition sind Zustände mit negativer Temperatur heißer als solche mit positiver Temperatur.

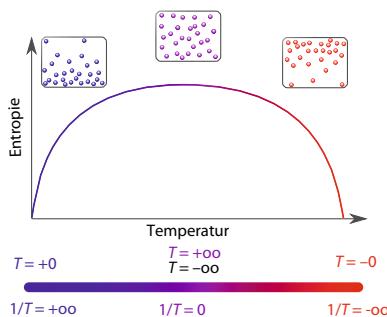
Und doch sind negative absolute Temperaturen in der Natur möglich, wie Forscher der Ludwig-Maximilians-Universität in München im Jahre 2012 gezeigt haben: Dafür betrachteten sie einige hunderttausend auf einem optischen Gitter angeordnete Kaliumatome. Aufgrund der Welleneigenschaften der Atome (Welle-Teilchen-Dualismus  $\downarrow$ ) war die Geschwindigkeit, mit der die Atome von Gitterpunkt zu Gitterpunkt springen konnten – und damit die kinetische Energie – nach oben hin begrenzt. Durch geschicktes Anpassen der anderen Parameter des Experiments konnten auch die potentielle und die Wechselwirkungsenergie beschränkt werden. Damit war der Gesamtenergie der Teilchen eine obere Grenze gesetzt, und negative Temperatur-Zustände führten nicht zu Wahrscheinlichkeiten oberhalb von 100 %.

In der Tat konnte auf diese Weise ein System mit negativer Temperatur hergestellt werden, bei dem die meisten Teilchen die Maximalenergie hatten und nur exponentiell wenige mit niedrigen Energien zu finden waren. Obwohl das System eine negative Temperatur hatte, war es dennoch heißer als jedes System mit positiver Temperatur. Die Temperaturskala hört nämlich



Geschwindigkeitsverteilung der Kaliumatome im optischen Gitter. Ist das Gas sehr kalt (links), beträgt die mittlere Geschwindigkeit fast null; ist es sehr heiß (rechts), beträgt sie fast das Maximum.

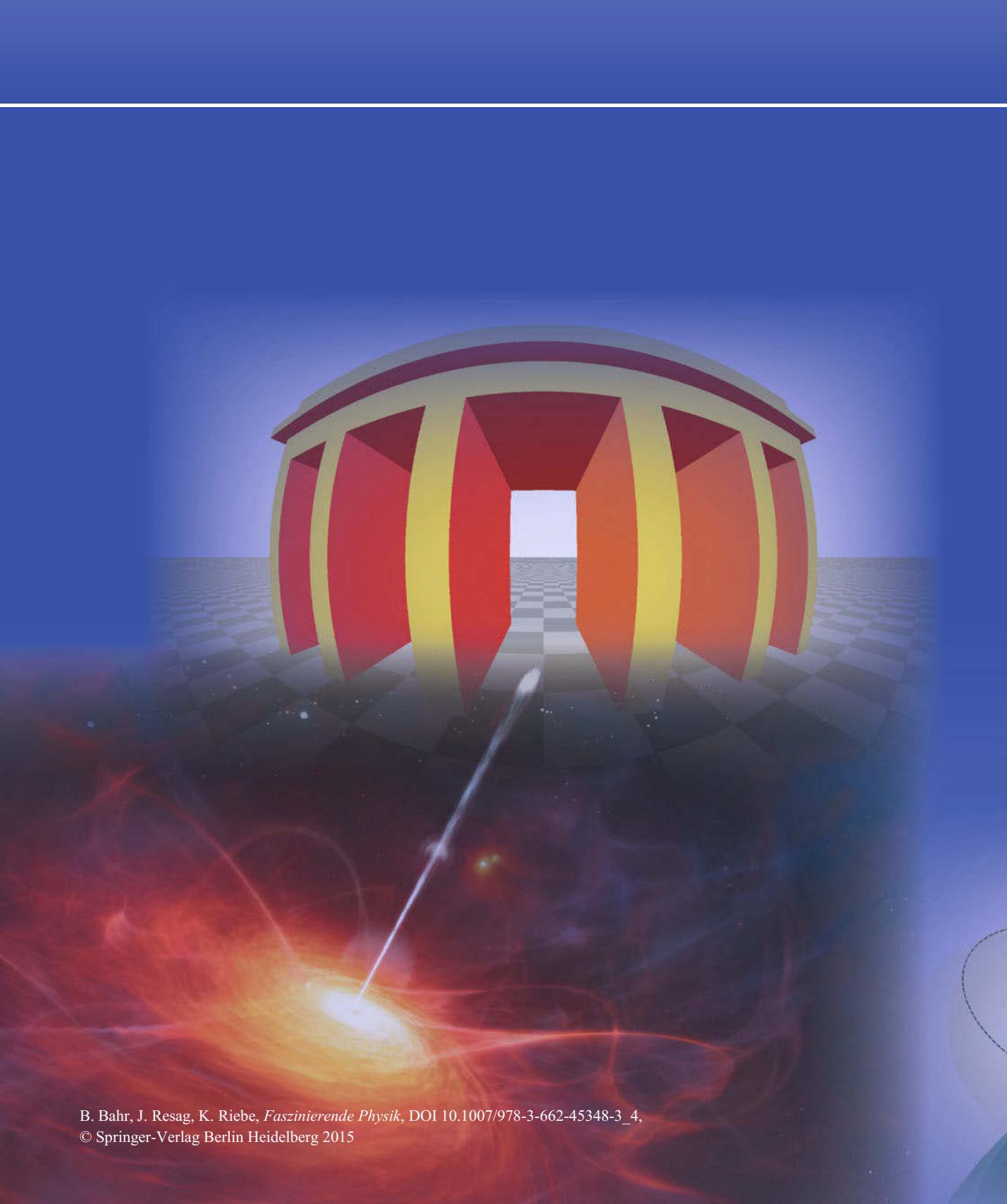
bei  $T = \text{unendlich}$  nicht einfach auf, sondern man konnte die Atome durch weitere Energiezufuhr auf  $T = \text{minus unendlich}$  springen lassen, wo die negative Temperaturskala beginnt. Am Besten versteht man das, wenn man statt der Temperatur  $T$  deren Kehrwert  $1/T$  betrachtet, denn dann erfolgt der Übergang zwischen positiven und negativen Werten wie üblich bei Null. Ganz allgemein ist dabei immer derjenige Zustand heißer, der den kleineren Temperatur-Kehrwert  $1/T$  besitzt, wobei bei thermischem Kontakt immer Energie vom heißeren zum kälteren System fließt.



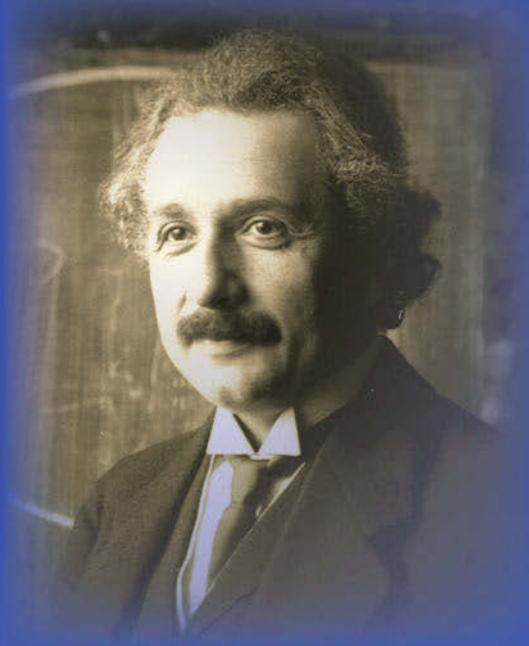
Führt man einem System mit negativer Temperatur noch mehr Energie zu, so sinkt seine Entropie

Systeme mit negativer Temperatur haben einige sehr merkwürdige Eigenschaften: Zum Beispiel können sie Entropie ( $\downarrow$ ) verlieren, indem sie Energie aufnehmen, denn je heißer sie werden, desto geordneter sind sie auch. Wenn sich zum Beispiel  $1/T$  dem Wert minus unendlich nähert, befinden sich so gut wie alle Teilchen im selben – dem energetisch höchsten – Zustand, und wären damit fast vollkommen geordnet. Theoretisch wären mit solchen Systemen – zumindest für kurze Zeit – Wärmetransportprozesse mit einem Wirkungsgrad von mehr als 1 erlaubt.





## 4 Relativitätstheorie

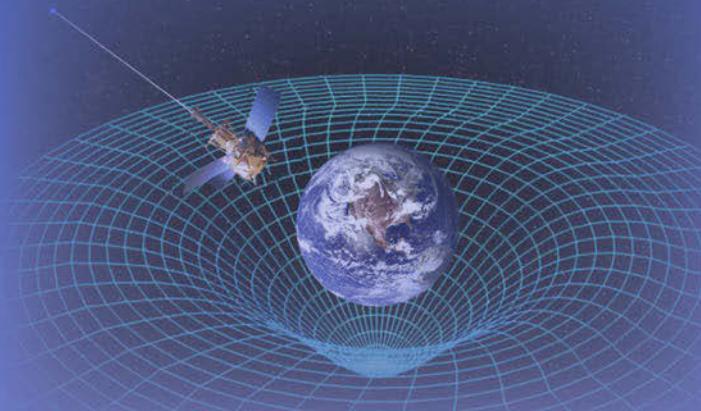


Was bedeutet  $E=mc^2$ ? Wie können wir uns rotierende schwarze Löcher vorstellen? Und wie funktioniert das GPS? Diese und andere spannende Fragen lassen sich mithilfe der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie beantworten, die Albert Einstein zu Beginn des 20. Jahrhunderts formuliert hat.

Die Grundlage der Speziellen Relativitätstheorie ist der Gedanke, dass Licht immer gleich schnell ist – ganz gleich, wie schnell man sich selbst bewegt. Das ist überraschend – denn es bedeutet, dass wir Licht nie einholen können. Aus dieser Tatsache ergeben sich viele verblüffende Konsequenzen.

In Einsteins 1915 erschienener Allgemeiner Relativitätstheorie wurde auch die Gravitation mit einbezogen – eine Meisterleistung an physikalischer Einsicht und mathematischer Eleganz, die bis heute ihresgleichen sucht. In dieser Theorie wird deutlich, wie Gravitationskräfte durch die Krümmung von Raum und Zeit entstehen – und wie wiederum der Raum gekrümmt wird durch Materie und Energie. Isaac Newton wäre sicher sehr erstaunt darüber gewesen, was aus seinem Gravitationsgesetz geworden ist!

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt selbst bizarre Objekte wie Wurmlöcher und macht gar einen futuristischen Warp-Antrieb denkbar. Was Albert Einstein wohl zu einer Folge von Star Trek gesagt hätte?

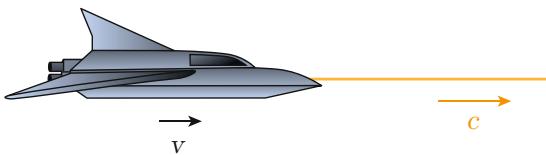


# Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie

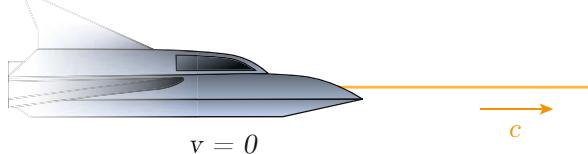
## Licht kann man nicht überholen

Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts hatte man ein Problem: Man stellte fest, dass die Physik elektromagnetischer Felder nicht davon abhängt, ob man ruht oder sich gleichförmig bewegt. Die Folge davon ist, dass sich eine elektromagnetische Welle (beispielsweise ein Lichtstrahl) aus der Sicht *jedes* gleichförmig bewegten Beobachters immer mit derselben Geschwindigkeit bewegt, nämlich mit Lichtgeschwindigkeit. Man kann somit einen Lichtstrahl niemals einholen. Sendet beispielsweise ein schnell fliegendes Raumschiff einen Lichtstrahl in Flugrichtung aus, so bewegt sich dieser sowohl aus Sicht eines außenstehenden Beobachters als auch aus Sicht des Raumschiffs immer mit Lichtgeschwindigkeit. Nach klassischem Verständnis hätte sich der Lichtstrahl aus Sicht des hinterherfliegenden Raumschiffs aber langsamer bewegen müssen.

von außen betrachtet



vom Raumschiff aus betrachtet

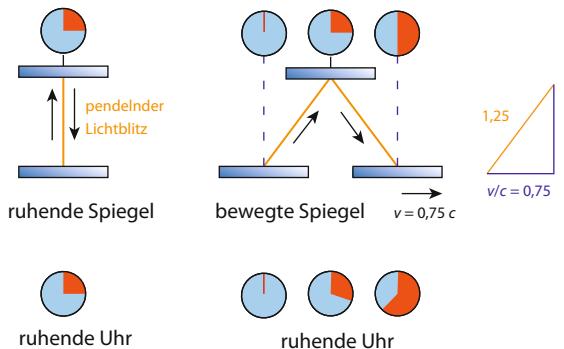


Erst Albert Einstein erkannte im Jahr 1905, dass sich diese scheinbar paradoxe Situation nur dann zufriedenstellend auflösen lässt, wenn sich Raum und Zeit anders als ursprünglich gedacht verhalten. Er formulierte die Grundlagen dafür im Rahmen seiner *Speziellen Relativitätstheorie* in den folgenden beiden Postulaten:

### Postulate der Speziellen Relativitätstheorie

1. Die physikalischen Gesetze haben in jedem Inertialsystem (also im System eines sich gleichmäßig bewegenden oder ruhenden Beobachters) dieselbe Form.
2. Die Lichtgeschwindigkeit bildet eine obere Grenze für die Ausbreitungsgeschwindigkeit physikalischer Wirkungen.

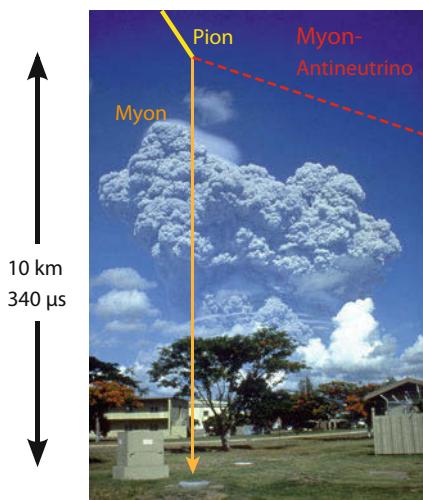
Als Folge davon wird zwar die Lichtgeschwindigkeit von verschiedenen sich gleichförmig bewegenden Beobachtern immer gleich beurteilt, nicht aber Raum- und Zeitintervalle. Für Zeitintervalle können wir uns das am Beispiel einer Lichtuhr gut veranschaulichen (siehe Bild auf der nächsten Seite links oben). Das Ticken der Lichtuhr wird durch einen Lichtblitz gesteuert, der zwischen zwei Spiegeln hin- und herpendelt.



Wir synchronisieren zwei Lichtuhren und setzen die eine anschließend mit 75% der Lichtgeschwindigkeit in Bewegung. Für den ruhenden Beobachter tickt diese Lichtuhr nun um den Faktor 1,25 langsamer als die ruhende Uhr, da der Lichtblitz einen 1,25-mal längeren

Weg zwischen den sich bewegenden Spiegeln zurücklegen muss. Würden wir jedoch mit der Lichtuhr mitfliegen, so würde diese für uns genauso schnell ticken wie zuvor, während die andere Uhr nun für uns langsamer tickt, da sie sich relativ zu uns bewegt.

Eine Lichtuhr ist nun nichts Besonderes, sondern genauso gut wie jede andere Uhr. Die Zeit vergeht für einen Beobachter auf einer relativ zu ihm bewegten Uhr also generell langsamer – man spricht hier von **Zeitdilatation**. Tatsächlich lebt beispielsweise ein instabiles Teilchen aus der Sicht eines Beobachters länger, wenn es sich relativ zu diesem schnell bewegt. Die fast lichtschnellen instabilen Myonen, die durch die kosmische Höhenstrahlung ( $\downarrow$ ) in rund zehn Kilometer Höhe entstehen, leben vom Erdboden aus betrachtet rund zehn- bis zwanzigmal länger als ruhende Myonen – nur deshalb gelingt es vielen von ihnen überhaupt, den Erdboden zu erreichen, wo man sie tatsächlich messen kann. Die Zeitdilatation ist also ein ganz realer Effekt. Aus Sicht der Myonen bleibt deren Lebensdauer dagegen unverändert. Für sie ist aber die Strecke zu dem sich schnell nähernden Erdboden rund zehn- bis zwanzigmal kürzer als vom Erdboden aus betrachtet, so dass sie ihn deshalb erreichen können – das nennt man die **relativistische Längenkontraktion (Lorentzkontraktion)** bewegter Strecken.



Die kosmische Höhenstrahlung → S. 234

Längenkontraktion beim Myon. Hintergrundbild: Ausbruch des Pinatubo am 12. Juni 1991, gesehen von der Clark Air Base



Myon ruht,  
Erboden bewegt sich nach oben

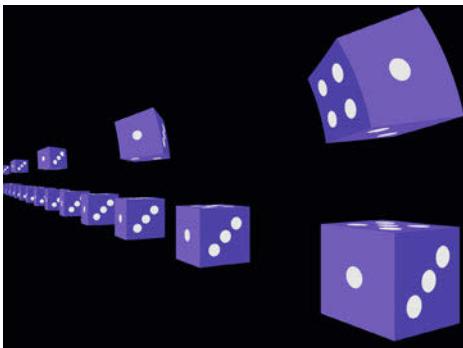


## Terrellrotation

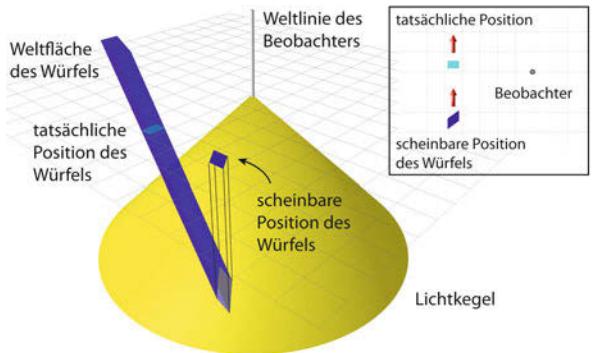
### Von hinten durch die Brust ins Auge

Raum und Zeit sind relativ – sie sind nicht starr und fest, sondern hängen zum Beispiel davon ab, wie schnell man sich bewegt. Das ist ein Resultat der Speziellen Relativitätstheorie (↓), und nach ihr sind insbesondere bewegte Körper für einen ruhenden Beobachter *kürzer*. Man kann diese Verkürzung jedoch nicht direkt beobachten: Das was *ist*, ist nicht unbedingt das, was man *sieht*, und zwar einfach deshalb, weil Lichtstrahlen sich nur mit einer endlichen Geschwindigkeit ausbreiten.

Hierzu ein Beispiel: Betrachten wir den geradlinigen Flug eines extrem schnellen Würfels mit einem Meter Kantenlänge. Nehmen wir an, der Würfel bewege sich mit halber Lichtgeschwindigkeit relativ zu einem ruhenden Beobachter, den der Würfel im Abstand von einigen Metern passiert.



Würfel, in einer Reihe aufgestellt (unten) und sich mit 90 % der Lichtgeschwindigkeit auf den Beobachter zubewegend (oben). Alle Würfel sind gleich ausgerichtet (die drei ist in Flugrichtung vorn).



Raum-Zeit-Diagramm eines sich sehr schnell bewegenden Würfels  
(die Zeit verläuft nach oben)

Um sich zu veranschaulichen, was der Beobachter zu einem gewissen Zeitpunkt  $T$  sieht, zeichnen wir ein sogenanntes *Raum-Zeit-Diagramm*. In diesem bilden wir zwei der drei Raumdimensionen (die  $x$ - und die  $y$ -Achse), sowie die Positionen des Beobachters und des Würfels zu jedem Zeitpunkt ab. Der Verlauf der Zeit (die  $t$ -Achse) wird nach oben hin dargestellt, sodass sich ein räumliches Bild ergibt.

Der ruhende (punktformige) Beobachter erscheint im Diagramm daher als senkrechte, gerade Linie. Der rasende Würfel (der, weil wir uns im Bild die  $z$ -Achse sparen mussten, nur ein rasendes Quadrat ist), hat dagegen eine gewisse Schräglage, seine Figur im Raum-Zeit-Diagramm wird *Weltfläche* genannt. Die Einheiten sind im Bild so gewählt, dass Lichtstrahlen immer gerade Linien mit einem Winkel von  $45^\circ$  gegenüber der Vertikalen sind.

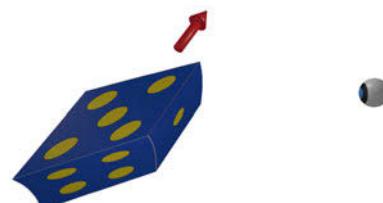
Was kann der Beobachter also zu einem gewissen Zeitpunkt  $T$  sehen? Um diese Frage zu beantworten, zeichnen wir den sogenannten *Rückwärtslichtkegel* ein, der aus allen Lichtstrahlen besteht, die zum Zeitpunkt  $t = T$  beim Beobachter eintreffen. Dort wo dieser Kegel die Weltfläche des Würfels schneidet, befinden sich die Punkte auf dem Würfel, die einen Lichtstrahl aussenden, der zum Zeitpunkt  $t = T$  in das Auge des Beobachters fällt.

Es ergibt sich ein interessantes Phänomen: In dem Moment, in dem uns der Würfel passiert, sehen wir ihn nicht direkt neben uns, sondern noch einige Meter entfernt. Das selbst ist nicht verwunderlich, denn wir sehen jetzt ja die Lichtstrahlen, die vor *einigen Augenblicken* vom Würfel ausgesandt wurden, als er noch ein wenig von uns entfernt war. Weiterhin allerdings sehen wir den Würfel verzerrt, sodass wir auch seine Rückseite erkennen können. Die Lichtstrahlen, die von der Rückseite eines langsam bewegten Würfels ausgestrahlt worden wären, hätten unser Auge nicht erreicht, denn der Würfel selbst wäre noch im Weg gewesen. Ist er allerdings vergleichbar schnell wie das Licht, kann er rechtzeitig für die rückwärtigen Lichtstrahlen „Platz machen“, wenn diese ein wenig schräg abgestrahlt werden.

James Terrell und Roger Penrose fanden heraus, dass für einen Beobachter die Verzerrung exakt derart erscheint, als wäre der Würfel ihm gegenüber *gedreht*. Dies würde allerdings nur ein Beobachter wahrnehmen, der nicht räumlich sehen kann, sondern nur zweidimensional (wie zum Beispiel eine einfache Fernsehkamera). Nimmt man auch die Tiefeninformation wahr, wie es zum Beispiel eine Kinect-Kamera von Microsoft tut, so kann man die Verzerrung, die *Terrellrotation* genannt wird, gut erkennen.



Blick auf einen sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegenden Würfel, mit Flugrichtung. Die Vier befindet sich auf der Rückseite.



Räumliche Wahrnehmung des Würfels, sowie der Beobachter (Auge). Man erkennt, dass sich die Vier tatsächlich in Flugrichtung auf der Rückseite befindet.



Fliegt man mit hoher Geschwindigkeit auf ein Gebäude zu, nimmt man es aufgrund der Terrellrotation stark verzerrt wahr.



## $E=mc^2$

### Masse ist eingesperre Energie

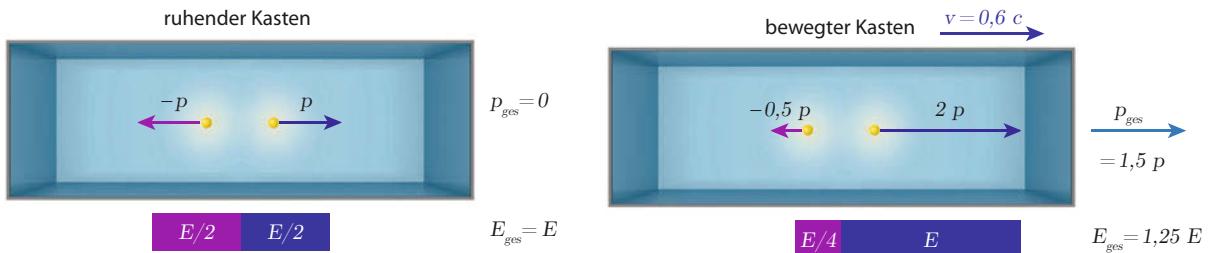
Eine der berühmtesten Folgerungen aus Albert Einsteins Spezieller Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) ist die Äquivalenz von Masse  $m$  und Energie  $E$  nach der Formel  $E = m c^2$  (dabei ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit). Diese Äquivalenz ist oft missverstanden worden, da in der nichtrelativistischen Physik Masse und Energie zwei völlig verschiedene Dinge sind. Bei Berücksichtigung der speziellen Relativitätstheorie ist das anders: Masse ist dann von eingesperrter Energie nicht mehr zu unterscheiden, während Licht quasi freigelassene Energie ist.

Dass das so ist, und was man unter freigelassener und eingesperrter Energie versteht, kann man sich an folgendem Gedankenexperiment überlegen: Wir sperren zwei masselose Lichtteilchen (Photonen) in eine innen verspiegelte ruhende Kiste ein, sodass die Photonen ständig sehr schnell hin- und her reflektiert werden, wobei jeweils immer eines der Photonen nach rechts und das andere nach links fliegen soll. Die Masse der Kiste wollen wir dabei vernachlässigen. Beide Photonen sollen dieselbe Energie  $E/2$  tragen, aber jeweils entgegengesetzte Impulse  $p$  und  $-p$ . Wir haben damit die Gesamtenergie  $E$  der Photonen in einer ruhenden Kiste eingesperrt. Man könnte nun meinen, eine mas-

selose Kiste mit darin eingesperrten masselosen Photonen ergäbe insgesamt ein masseloses (also trägeheitsloses) Objekt. Doch das ist nicht der Fall!

Um das zu sehen, wollen wir die Kiste aus einem gleichmäßig nach links bewegten Bezugssystem betrachten, sodass wir eine Kiste sehen, die sich nach rechts mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt (in der Abbildung wurden 60 Prozent der Lichtgeschwindigkeit gewählt). Entscheidend ist nun: In der bewegten Kiste sind nach den Regeln der Relativitätstheorie Energie und Impuls des nach rechts fliegenden Photons mehr gewachsen, als sie für das nach links fliegende Photon geschrumpft sind. Addiert man die beiden Photonenenergien und Impulse, so ergeben sie genau die Energie und den Impuls eines Objekts mit Masse  $m = E/c^2$ , das sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt.

Gibt man der Kiste also einen Schubs, um sie in Bewegung zu versetzen, so setzt sie allein aufgrund der darin enthaltenen Photonen einer Beschleunigung eine entsprechende Trägheit (Masse) entgegen, denn die Photonen müssen auf eine höhere Gesamtenergie und einen größeren Gesamtimpuls gebracht werden.



Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie → S. 124

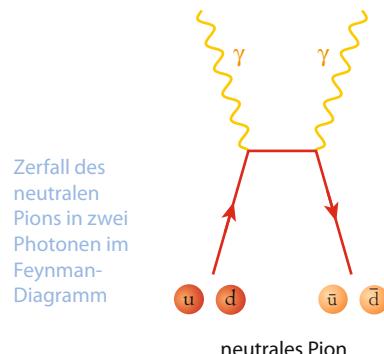
A. Einstein Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Annalen der Physik 18, 1905, S. 639–643, an vielen Stellen im Internet zu finden

Von außen ist die Kiste mit den darin eingespererten Photonen dabei nicht von einem Objekt zu unterscheiden, dessen Masse sich über  $E = m c^2$  aus der in der ruhenden Kiste enthaltenen Photonenergie ergibt.

Wenn man Energie einsperren kann, dann kann man sie auch wieder freilassen. So zerfällt ein neutrales Pion innerhalb von Sekundenbruchteilen in zwei hochenergetische Photonen, welche die in der Pionmasse gespeicherte Energie komplett mitnehmen.

Generell ist in der Natur jede Energiefreisetzung mit einem entsprechenden Massenverlust (*Massendefekt*) verbunden. Dabei bestimmt die Stärke der wirkenden Kräfte, wie groß diese Energiefreisetzung ist. Bei chemischen Prozessen werden nur Milliardstel der Masse der beteiligten Teilchen als Energie freigesetzt, bei der Kernspaltung von Uran sind es bereits 0,08 Prozent, und bei der Kernfusion von Wasserstoff zu Helium liegen wir bei rund 0,8 Prozent.

Atombombentest auf dem Bikini-Atoll



Künstlerische Darstellung des Quasars ULAS J1120+0641

Feynman-Diagramme → S. 222  
Supermassive schwarze Löcher → S. 42  
Aktive Galaxien → S. 127



# Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie

## Einstiens Theorie der Gravitation

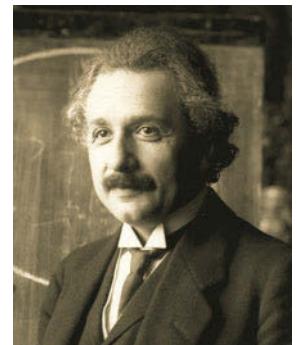
Newton's Gravitationsgesetz ( $\downarrow$ ) beruht auf dem Gedanken, dass die Masse eines Körpers ohne jede Zeitverzögerung gravitativ auf die Masse anderer Körper wirkt. Nach Einstiens Spezieller Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) aus dem Jahr 1905 kann sich eine physikalische Wirkung jedoch maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten – auch die Wirkung der Gravitation. Newtons Gravitationsgesetz kann also nur eine Näherung sein, die für jene Körper gilt, die sich sehr viel langsamer als das Licht bewegen und für die man daher keine relativistische Beschreibung braucht.

Albert Einstein versuchte, die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gravitation konsistent zu berücksichtigen. Dieses Vorhaben erwies sich jedoch als äußerst schwierig, und es dauerte bis zum Jahr 1915, bis ihm dies im Rahmen seiner *Allgemeinen Relativitätstheorie* vollständig gelang. Die Kernidee dabei ist das **Äquivalenzprinzip**, nach dem die Schwerkraft

gleichwertig zu einer Scheinkraft ist, wie sie in einem beschleunigten Bezugssystem auftritt:

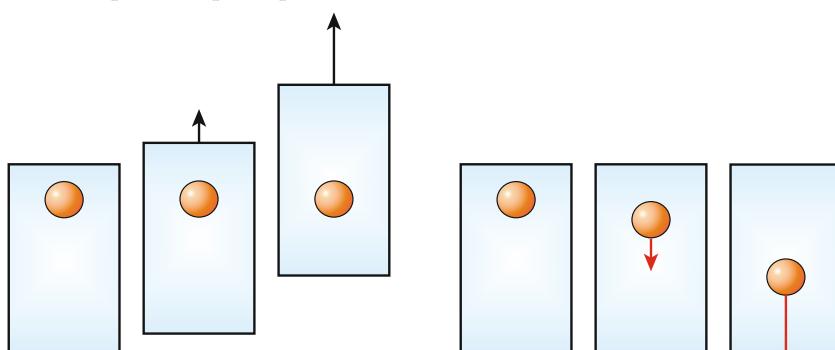
### Äquivalenzprinzip

Gravitation ist lokal äquivalent zu einem beschleunigten Bezugssystem.



Albert Einstein im Alter von 42 Jahren

Daraus folgt unmittelbar, dass es keinen Unterschied zwischen schwerer und träger Masse gibt. Fällt also innerhalb einer fensterlosen Raumkapsel ein Gegenstand zu Boden, so weiß man grundsätzlich nicht, ob die Raumkapsel bewegungslos auf dem Erdboden steht oder weit draußen im Weltraum gerade von Raketen beschleunigt wird. Anders ausgedrückt: Lässt man sich fallen, so spürt man die Schwerkraft nicht mehr. Im Inneren einer antriebslos die Erde umkreisenden Raumstation herrscht also Schwerelosigkeit, auch wenn die Schwerkraft sehr wohl auf die Raumstation einwirkt und sie auf ihre Kreisbahn zwingt.



Das Äquivalenzprinzip: Beschleunigtes Bezugssystem und Gravitation haben denselben Effekt.

Newton's Gravitationsgesetz → S. 88

Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie → S. 124

R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands *Feynman Vorlesungen über Physik, Band II: Elektromagnetismus und Struktur der Materie* Oldenburg Wissenschaftsverlag 1991



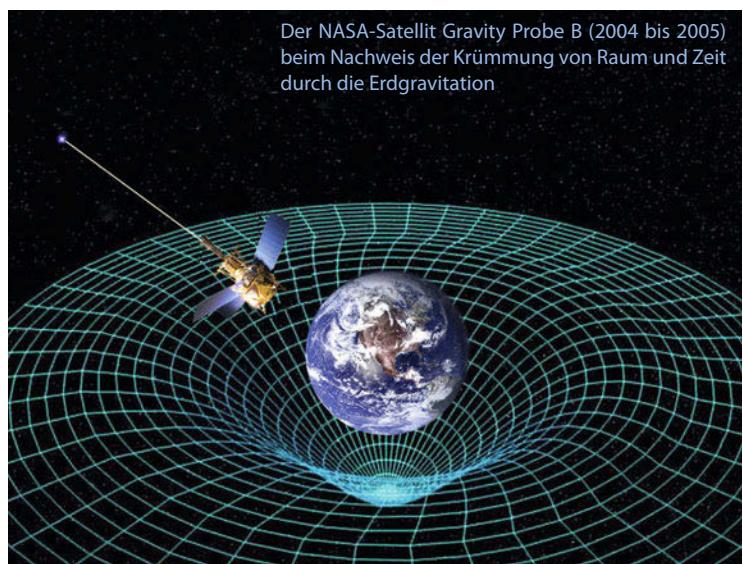
Schwerelosigkeit in der Internationalen Raumstation ISS

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Gravitation mathematisch durch die Krümmung von Raum und Zeit. Für die Zeit bedeutet das beispielsweise, dass in einem Space Shuttle in 300 Kilometer Höhe pro Jahr etwa eine Millisekunde mehr vergeht als auf dem Erdboden. Das liegt daran, dass die Erdmasse die sie umgebende Raumzeit krümmt wie eine Kugel, die in ein Tuch einsinkt – und die Zeit weiter oben etwas schneller läuft als weiter unten in diesem Raumzeit-Tuch. Würde man beim Global Positioning System (GPS ↓) diesen Effekt nicht berücksichtigen, so hätte Ihr Navigationsgerät Schwierigkeiten, den richtigen Weg zu finden.

Die Krümmungen von Raum und Zeit bestimmen zusammen, wie sich ein frei fallender Körper bewegt. Er tut dies zwischen zwei Raum-Zeit-Punkten so, dass

auf einer mitgeführten Uhr die größtmögliche Zeitdauer vergeht – man spricht hier auch manchmal vom *Trödelprinzip*.

Wie stark die Gravitationskrümmung der Raumzeit ausgeprägt ist, wird durch die darin enthaltene Materie festgelegt. Nicht nur Massen, sondern auch Energien und Drücke üben eine Gravitationswirkung aus, wobei negativer Druck (also Materie, die sich sehr stark zusammenziehen will) gravitativ abstoßend wirkt. Man nimmt an, dass unser Universum heute von einer geheimnisvollen *dunklen Energie* (↓) durchdrungen ist, die einen solchen negativen Druck besitzt und durch ihre abstoßende Gravitation das Universum immer stärker auseinandertreibt. Auch der Urknall könnte durch eine sehr starke abstoßende Gravitation verursacht worden sein (Stichwort *Inflationäre Expansion* ↓).



GPS → S. 140

Beschleunigte Expansion und dunkle Energie → S. 152

Urknall und inflationäre Expansion → S. 154



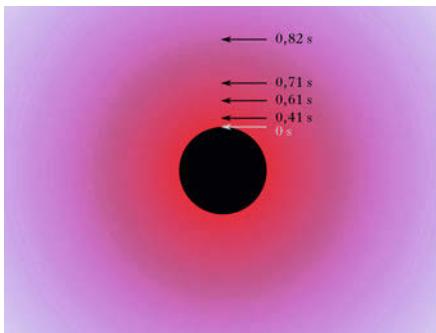
# Die Raumzeit nicht-rotierender schwarzer Löcher

## Im Sog von Raum und Zeit

Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) krümmt Materie die sie umgebende Raumzeit, wodurch andere Massen abgelenkt und beschleunigt werden; diese Wechselwirkung bezeichnen wir als Gravitation. Wenn sich dabei sehr viel Materie auf sehr kleinem Raum versammelt, so kann die Gravitation so stark werden, dass die Materie zu einem Punkt kollabiert und ein schwarzes Loch entsteht. Raum und Zeit sind in der Nähe eines schwarzen Lochs extrem stark gekrümmt, was eine Reihe interessanter Effekte zur Folge hat, die wir uns hier zunächst für ein nicht-rotierendes schwarzes Loch ansehen wollen.

Die Krümmung der Zeit bewirkt, dass – aus sicherer Entfernung betrachtet – physikalische Prozesse umso langsamer ablaufen, je näher sie am schwarzen Loch stattfinden. Bei einem bestimmten Abstand zum

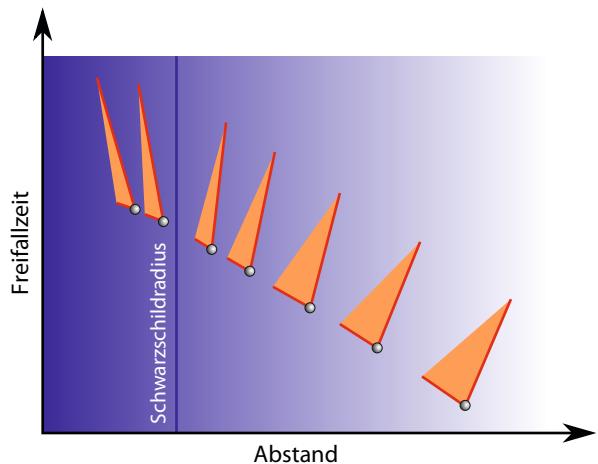
Farbliche Darstellung der Zeitdehnung in der Nähe eines schwarzen Lochs. Die angegebenen Zeiten vergehen auf Uhren am jeweiligen Ort (Pfeil) aus der Sicht eines weit entfernten Beobachters, auf dessen Uhr eine Sekunde verstreicht.

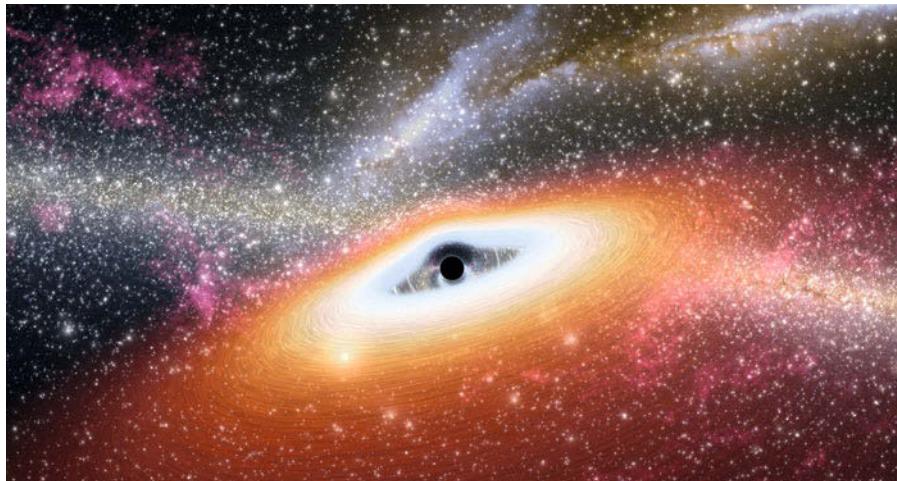


schwarzen Loch, dem *Schwarzschild-Radius*, bleibt die Zeit von außen betrachtet sogar stehen, d.h., unterhalb dieses Abstandes verschwinden Objekte aus der Welt eines außenstehenden Beobachters.

Für das Objekt selbst vergeht die Zeit dagegen ganz normal. Kommt es dem schwarzen Loch jedoch näher als der Schwarzschild-Radius, so kann nichts mehr seinen Absturz in das schwarze Loch verhindern. Selbst Licht fällt dort in das schwarze Loch hinein.

Mögliche Richtungen (hell-orangefarbene Bereiche – sogenannte Lichtkegel) in einem Raum-Zeit-Diagramm, die sich aus Sicht verschiedener Raumschiffe in der Nähe eines schwarzen Lochs prinzipiell einschlagen lassen. Die orangefarbenen Begrenzungslinien entsprechen den Wegen von Lichtstrahlen, die vom Ort des jeweiligen Raumschiffs ausgehen, das sich im Schnittpunkt der Linien befindet (grauer Punkt). Unterhalb des Schwarzschild-Radius führt jede beliebige Bewegung näher an das schwarze Loch heran – die Lichtkegel sind dort nach links gekippt.





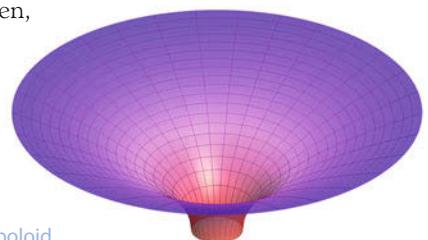
Künstlerische Darstellung eines schwarzen Lochs mit Akkretionsscheibe

Der Bereich innerhalb des Schwarzschild-Radius erscheint von außen betrachtet daher wie eine schwarze Kugel, aus der kein Licht nach außen dringt. Bei einem schwarzen Loch von einer Sonnenmasse hätte diese Kugel nur einen Durchmesser von rund sechs Kilometern, wäre also nur so groß wie eine Kleinstadt. Man kann sich kaum vorstellen, wie groß die Schwerkraft in der Nähe dieses schwarzen Lochs sein muss, wo sich eine komplette Sonnenmasse in nur wenigen Kilometern Entfernung befindet.

Auch der Raum wird in der Nähe eines schwarzen Lochs stark gekrümmmt. Betrachtet ein weit außen stehender Beobachter irgendeine zweidimensionale Schnittebene mit dem schwarzen Loch in der Mitte (beispielsweise die Äquatorebene), so kann er die Raumkrümmung dieser zweidimensionalen Schnittfläche durch eine gekrümmte Trichterfläche (ein *Flamm'sches Paraboloid*) veranschaulichen.

Die zentrale Öffnung dieses Trichters befindet sich beim Schwarzschild-Radius, sodass der Trichter nur die Verhältnisse außerhalb darstellt. Der Abstand  $r$  von der Symmetriechse ( $z$ -Achse) in der Trichtergrafik bestimmt den Umfang  $U$  des zugehörigen Kreises auf der Trichterfläche über  $U = 2 \cdot \pi \cdot r$ . Dabei ist  $r$  aber nicht der Abstand dieses Kreises vom schwarzen Loch, denn räumliche Abstände in der zweidimensionalen Schnittfläche entsprechen Strecken auf der Trichterfläche. Man muss also beispielsweise die Strecke bis zur Trichteröffnung auf der Fläche abmessen, um den Abstand vom Schwarzschild-Radius zu ermitteln.

*Flamm'sches Paraboloid*

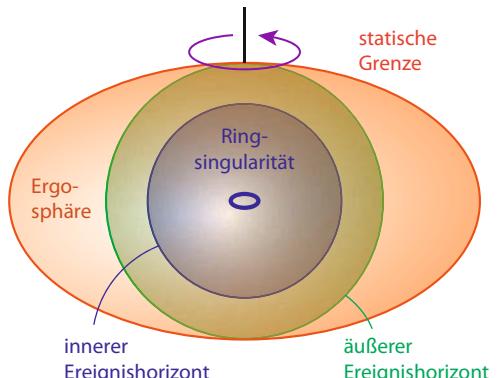


# Die Raumzeit rotierender schwarzer Löcher

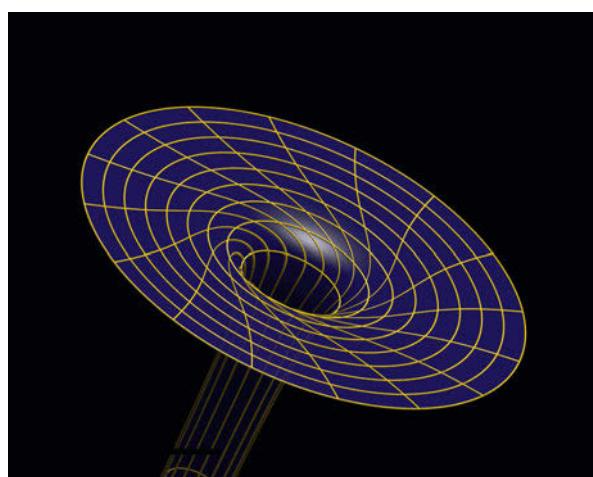
## Im Strudel von Raum und Zeit

Man vermutet, dass viele schwarze Löchern – analog zu neu entstandenen Neutronensternen – extrem schnell rotieren. Dies liegt daran, dass sie meist durch den Kollaps rotierender Materie entstehen, wobei deren Drehimpuls weitgehend erhalten bleibt. Die Rotation des schwarzen Lochs schlägt sich in den Eigenschaften der Raumzeit nieder, die das schwarze Loch umgibt. Es gibt hier nicht nur einen Schwarzschild-Radius (äußerer Ereignishorizont) wie bei nicht-rotierenden schwarzen Löchern, sondern weiter außen zusätzlich eine sogenannte *statische Grenze*.

Objekte in der sogenannten *Ergosphäre* zwischen äußerem Ereignishorizont und statischer Grenze fallen zwar noch nicht unbedingt in das schwarze Loch, aber sie werden von der Rotation des schwarzen Lochs un-



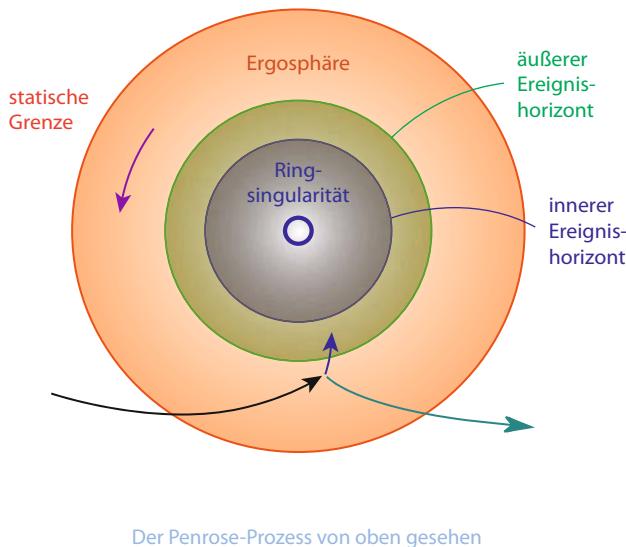
Raumzeit eines rotierenden schwarzen Lochs von der Seite gesehen



barmherzig mitgerissen – selbst Licht bildet da keine Ausnahme. Nichts kann sich der Rotation des schwarzen Lochs dort entgegenstemmen. Der Raum selbst scheint wie bei einem Strudel mit dem schwarzen Loch mit zu rotieren und von ihm aufgesogen zu werden.

Unterhalb des äußeren Ereignishorizonts gehen allerlei merkwürdige Dinge vor sich: Das schwarze Loch selbst ist kein Punkt mehr, sondern eine Ringsingularität. Es gibt einen weiteren inneren Ereignishorizont, Zeitschleifen und ähnliche Absonderlichkeiten. Gut, dass man davon außen nichts mitbekommt.

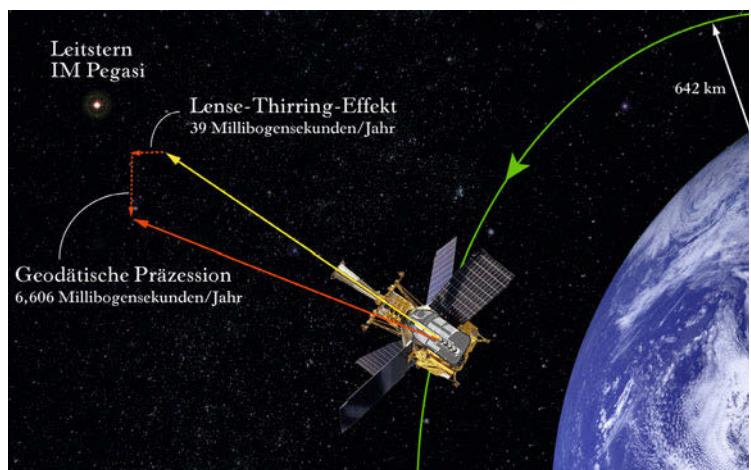
Strudel der Raumzeit



Es ist theoretisch möglich, die enorme Rotationsenergie eines sich drehenden schwarzen Lochs anzuzapfen, und zwar über den sogenannten *Penrose-Prozess*. Dazu schießt man einen kleinen Körper auf einer geeigneten Bahn in die Ergosphäre des schwarzen Lochs hinein, wo er gezwungen ist, mitzurotieren, so dass ein kleiner Teil der Rotationsenergie des schwarzen Lochs auf ihn übertragen wird. Dort teilt er sich dann in zwei kleinere Körper auf, die man so auseinan-

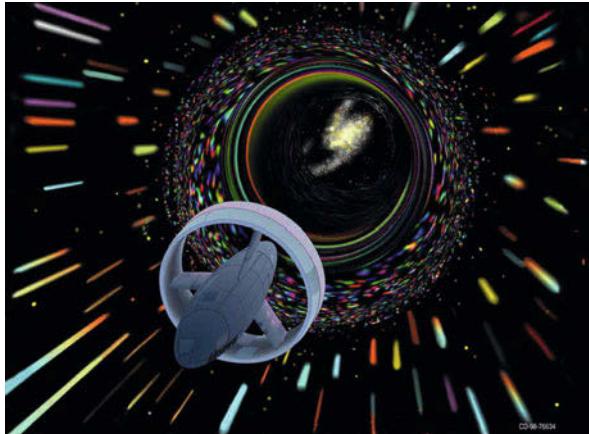
derschießen kann, dass einer der Körper hinter dem äußeren Horizont mit formal negativer Energie auf Nimmerwiedersehen verschwindet, während der andere Körper mit größerer Energie als der Startkörper zuvor die Ergosphäre wieder verlässt.

Auch ganz normale rotierende Sterne und Planeten ziehen den sie umgebenden Raum gleichsam mit, wenn auch in viel geringerem Maße als schwarze Löcher dies tun. Man spricht hier vom *Lense-Thirring-Effekt* (engl. *frame-dragging*). Der experimentelle Nachweis dieses winzigen Effekts ist u.a. durch den NASA-Satelliten *Gravity Probe B* gelungen, der zwischen den Jahren 2004 und 2005 die Erde umkreiste und vier hochpräzise Kreisel (↓) an Bord hatte, deren äußerst geringe Präzession aufgrund des Thirring-Effekts nachgewiesen wurde.



## Der Warp-Antrieb

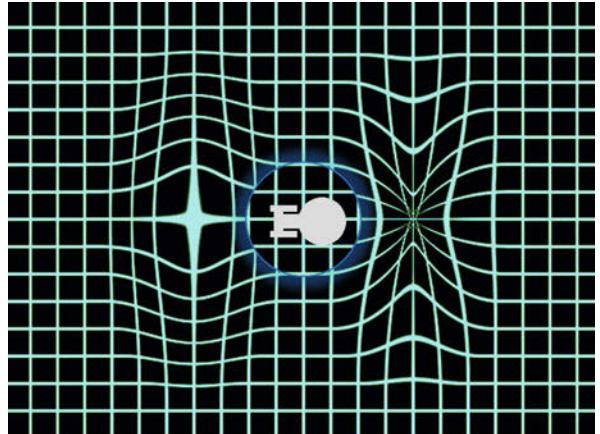
Wie man schneller als das Licht sein könnte



Raumschiff beim Übergang zur Warpgeschwindigkeit

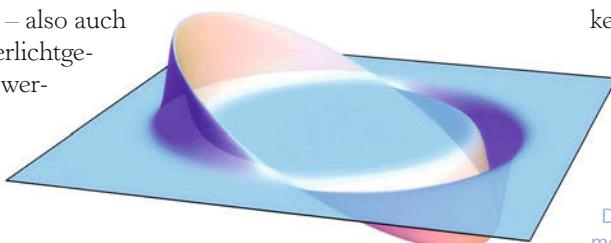
Wenn Captain James T. Kirk in der Fernsehserie Star Trek (Raumschiff Enterprise) den Befehl „Warp 3“ ausspricht, so verlangt er etwas, was nach heutigem Wissen physikalisch unmöglich erscheint: Er befiebt, mit Überlichtgeschwindigkeit zu fliegen, also schneller als rund 300 000 km/s.

Nach Einsteins Spezieller Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) kann nämlich nichts – also auch kein Raumschiff – auf Überlichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.



Raumkrümmung durch den Warp-Antrieb

Ein Warp-Antrieb wie in Star Trek könnte das Problem allerdings umgehen, indem er sich die Allgemeine Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) zunutze macht, nach der Raum und Zeit gekrümmt werden können. Tatsächlich kann man so theoretisch Raumblasen konstruieren, die das Raumschiff gleichsam einschließen, während der Raum vor der Blase kontrahiert und dahinter expandiert, sodass sich die Blase mit Überlichtgeschwindigkeit auf ihr Ziel zubewegt.



Darstellung der Warp-Raummetrik nach Miguel Alcubierre

Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie → S. 124

Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie → S. 130

Wikipedia Warp-Antrieb <http://de.wikipedia.org/wiki/Warp-Antrieb>

Innerhalb der Raumblase ruht das Raumschiff, sodass es die Gesetze der Speziellen Relativitätstheorie nicht verletzt. Das Raumschiff surft gleichsam auf einer Welle aus verzerrtem Raum. Dabei wirkt die Raumkrümmung der Warp-Raumblase als Gravitationslinse ( $\downarrow$ ), sodass ein Hintergrundbild entsprechend verzerrt erscheint. So wie im Bild unten sähe es beispielsweise aus, wenn ein Raumschiff mit Warp-Antrieb vor der leuchtenden Erdkugel vorbeifliegt.

Um eine solche Raumblase zu erzeugen, braucht man allerdings sehr viel sogenannte *exotische Materie*, die negative Masse bzw. Energie aufweist. Keine Materieform, die wir kennen, kommt dafür infrage, noch nicht einmal die geheimnisvolle dunkle Energie ( $\downarrow$ ), die unser Universum vermutlich durchdringt, denn diese hat zwar einen negativen Druck, aber eine positive Energiedichte. Nach heutigem Wissen scheint ein Warp-Antrieb also kaum realisierbar zu sein. Aber man kann ja nie wissen, was die Zukunft noch bringen wird!

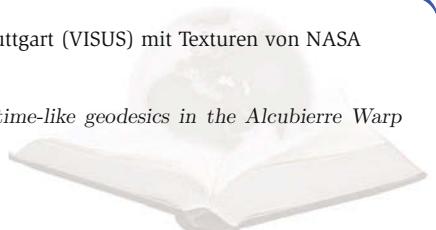
Vorbeiflug eines Raumschiffs mit Warp-Antrieb



Bilder von Thomas Müller, Daniel Weiskopf, Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart (VISUS) mit Texturen von NASA  
Gravitationslinsen → S. 164

Beschleunigte Expansion und dunkle Energie → S. 152

Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart (VISUS) *Detailed study of null and time-like geodesics in the Alcubierre Warp spacetime* <http://www.vis.uni-stuttgart.de/~muelleta/Warp/>



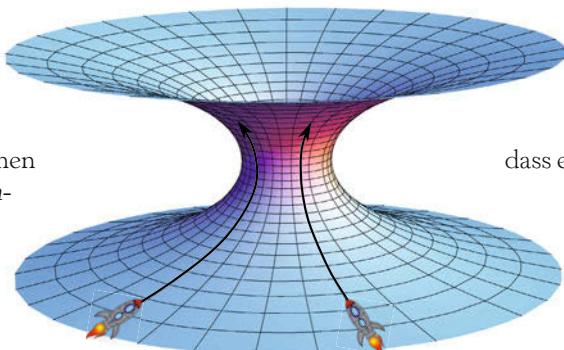
## Wurmlöcher

### Abkürzungen durch Raum und Zeit

Die Gesetze der Allgemeinen Relativitätstheorie (↓) beschreiben die Geometrie der vierdimensionalen Raumzeit. Dabei werden sowohl Raum als auch Zeit von Materie verbogen und gekrümmt. Diese Raum-Zeit-Krümmung ist die Ursache für die anziehende Schwerkraft: Objekte bewegen sich deshalb aufeinander zu, weil sie sich durch die gekrümmte Raumzeit bewegen.

Die erlaubten Arten und Weisen, auf die die Raumzeit gekrümmt sein kann, ist durch die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (*Einstein-Gleichungen*) festgelegt. Was allerdings nicht durch sie festgelegt wird, ist die sogenannte *Topologie* der Raumzeit. Damit meint man die Form des Universums, die unabhängig von stetigen Verformungen ist, also zum Beispiel die Anzahl der „Löcher“.

In der Tat gibt es nicht nur Lösungen der Einsteingleichungen für ein Universum, das wie eine unendlich ausgedehnte Tischdecke aussieht. Es ist beispielsweise auch erlaubt, dass zwei weit voneinander getrennte Bereiche des Universums oder auch zwei verschiedene Universen durch einen „Schlauch“ miteinander verbunden sind.



Ein Wurmloch verbindet zwei voneinander getrennte Bereiche im Universum oder sogar zwei verschiedene Universen

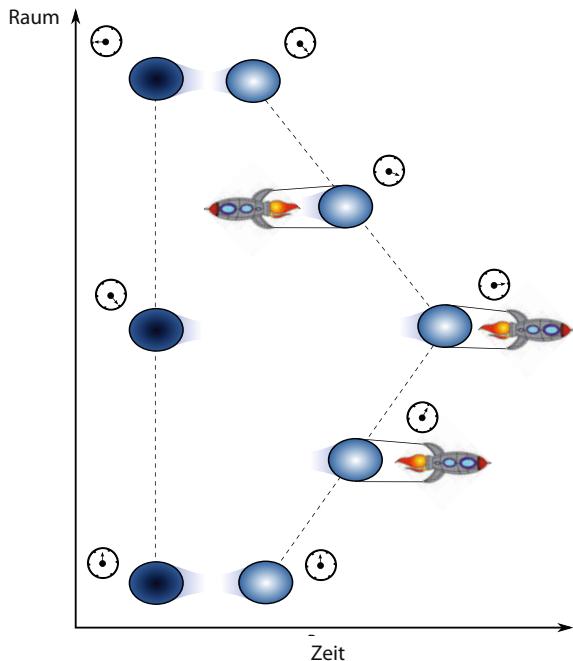
Diese Tunnel zwischen zwei getrennten Bereichen der Raumzeit werden *Wurmlöcher* genannt. Das bekannteste Beispiel ist die sogenannte *Einstein-Rosen-Brücke*. Diese sieht von außen aus wie zwei nicht rotierende schwarze Löcher (↓), die jedoch im Inneren miteinander verbunden sind. Dieses Beispiel wurde zuerst von Albert Einstein und seinem Mitarbeiter Nathan Rosen berechnet. Im Jahre 1962 fanden John A. Wheeler und Robert Fuller durch Berechnungen heraus, dass ein solches Wurmloch so instabil wäre, dass es in sich selbst kollabieren und damit seine beiden Ausgänge voneinander trennen würde, bevor auch nur ein einzelnes Photon es durchqueren könnte.

Es gibt allerdings auch durch die Einsteingleichungen erlaubte Lösungen, die zu stabilen und passierbaren Wurmlöchern gehören. Obwohl diese Raumzeitgeometrien durch die Allgemeine Relativitätstheorie erlaubt sind, kann man sich jedoch schnell davon überzeugen, dass sie die sogenannte „starke Energiebedingung“ verletzen müssen, d. h., dass sie Bereiche enthalten, die eine negative Energiedichte besitzen müssen. Damit ähneln sie den Raumzeiten, die Warpblasen beschreiben (Warp-Antrieb ↓).

Es ist vorstellbar, dass man das Wurmloch mit einer exotischen Form von Materie füllt, die negative Energiedichte besitzt und die so das Wurmloch „offen hält“. Obwohl es theoretisch möglich ist, dass man irgendwann einmal eine solche exotische Materieform entdeckt, hat man bisher in der Natur noch kein Beispiel dafür gefunden, genauso wenig wie für stabile Wurmlöcher. Vielleicht bietet die Quantenphysik hierfür eine Möglichkeit – beispielsweise ist im Inneren zwischen zwei Leiterplatten durch den Casimir-Effekt (Quantenvakuum ↓) die Energiedichte im Vakuum gegenüber dem normalen Nullpunkt abgesenkt. Dort kann man also künstlich negative Energiedichten erzeugen, leider nicht in dem Ausmaße, dass man damit ein Wurmloch öffnen oder gar stabil halten könnte.



Ein simulierter Blick durch ein Wurmloch



Hätte man Zugang zu einem stabilen Wurmloch, dessen Ein- und Ausgang man relativ zueinander bewegen könnte, dann wäre es übrigens ein Leichtes, eine Zeitmaschine zu bauen: Dafür müsste man zum Beispiel nur den Eingang mit einem Raumschiff auf eine Rundreise durchs All schicken, bei dem es sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Kehrt das Raumschiff dann wieder zur Erde zurück, ist der Eingang zum Wurmloch, genau wie beim Zwillingsparadoxon der Speziellen Relativitätstheorie (↓), jünger als der Ausgang. Beim Durchqueren würde man also in die Vergangenheit reisen. Die Zukunft wäre ebenfalls erreichbar: Man müsste nur anstatt des Einganges den Ausgang auf die Reise schicken.

Ein bewegtes Wurmloch wird durch die Zeidilatation zur Zeitmaschine.

Bild rechts oben von Corvin Zahn, Institut für Physik, Universität Hildesheim, Tempolimit Lichtgeschwindigkeit Quantenvakuum → S. 206

Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie → S. 124

K.S. Thorne *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* W.W. Norton & Company 1995

C. Zahn *Flug durch ein Wurmloch* <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/wurmlochflug/wurmlochflug.html>

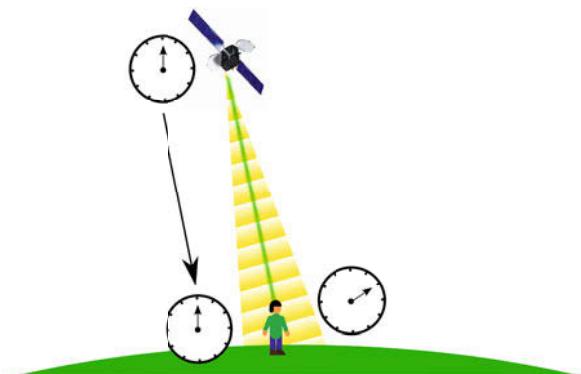


# GPS

## Ortsbestimmung durch Satellitensignale

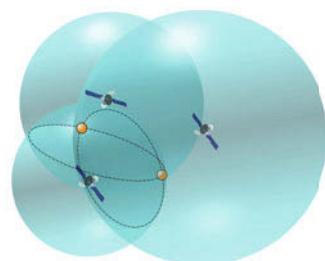
Heute, zu Beginn des 21. Jahrhunderts, kann im Prinzip jeder Besitzer eines Smartphones oder Navigationsgeräts den eigenen Aufenthaltsort jederzeit auf wenige Meter genau bestimmen. Diese vor wenigen Jahrzehnten völlig utopisch erscheinende Meisterleistung der Technik wird durch das *Global Positioning System (GPS)* ermöglicht.

Das GPS besteht aus 24 Satelliten, die in einem subsynchronen Orbit um die Erde kreisen – d.h., sie umrunden die Erde auf einer Kreisbahn in etwa 20 000 Kilometer Höhe pro Tag fast genau zweimal (geosynchrone Orbits ↓). Jeder dieser Satelliten trägt eine Atomuhr in sich, die die Uhrzeit an Bord bis auf wenige Nanosekunden genau bestimmt. Diese Uhrzeit wird, zusammen mit der eigenen Position, von jedem Satelliten per Antenne auf Frequenzen im Mikrowellenbereich in alle Richtungen gesendet.

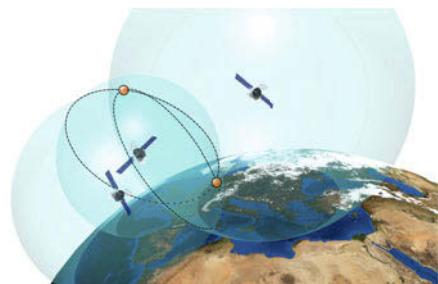


Durch Zeitmessung errechnet ein GPS-Empfänger die Entfernung zu den GPS-Satelliten.

Jede beliebige Antenne, die nun von mindestens drei GPS-Satelliten ein Signal empfängt, kann die entsprechenden Uhrzeiten mit der eigenen Uhrzeit vergleichen; und weil sich die Satellitensignale mit der sehr genau bekannten Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, kann aus diesen drei Laufzeiten und den Satellitenpositionen die eigene Position im dreidimensionalen Raum (z.B. geografische Länge, Breite, und Höhe über dem Meeresspiegel) berechnet werden. Soweit die Theorie – wie immer ist die Realität ein wenig komplizierter.



Zwei Kugeln mit gegebenem Radius schneiden sich in einem Kreis.  
Drei Kugeln schneiden sich in zwei Punkten.



Sind die genauen Entfernungen zu mindestens drei Satelliten bekannt, so kann man die eigene Position genau bestimmen.

Denn erstens haben Smartphones bisher noch keine Atomuhren, die die eigene Zeit Nanosekundengenau messen können, um sie mit der genauen Bordzeit der Satelliten vergleichen zu können. Man benötigt also die Signale eines vierten Satelliten, um die fehlende Information berechnen zu können. Daher funktionieren die meisten handelsüblichen GPS-Empfänger nur, wenn sie die Signale von mindestens vier GPS-Satelliten empfangen.

Außerdem spielen die Effekte der Relativitätstheorie bei der Zeitmessung eine große Rolle – interessanterweise wirken die Effekte von Spezieller (SRT ↓) und Allgemeiner Relativitätstheorie (ART ↓) beim GPS einander entgegen: Weil die Schwerkraft am Erdboden stärker ist als im Orbit, vergeht die Zeit für einen im Orbit ruhenden Beobachter laut der ART ein wenig *schneller* als am Boden. Andererseits bewegen sich die GPS-Satelliten mit einer Geschwindigkeit von über 13 000 km/h, und deswegen vergeht die Zeit an Bord ein wenig *langsamer* als für einen ruhenden Beobachter.

Wenn man genau rechnet, stellt man fest dass der Effekt der ART stärker ist als der der SRT, sodass die Atomuhr an Bord eines GPS-Satelliten pro Tag um 38 Mikrosekunden *schneller* tickt als eine Atomuhr am Erdboden. Obwohl das nach nicht viel klingt, ist dies eine riesige Ungenauigkeit, wenn man auf die Nanosekunde genau messen will! Würden die Effekte der Relativitätstheorie nicht berücksichtigt werden, könnte das GPS pro Tag um bis zu zehn Kilometer daneben liegen! Das GPS ist damit nicht nur nützlich zur Navigation, sondern auch eine beeindruckende Bestätigung von Einsteins Relativitätstheorie.

### Zivile und militärische Nutzung des GPS

Die 24 NAVSTAR Satelliten, die man für die heutigen GPS-Empfänger benutzt, werden von der US-amerikanischen Regierung unterhalten und gleichzeitig sowohl für militärische als auch für zivile Zwecke verwendet. Die Satelliten senden ihre Daten deshalb auf zwei verschiedenen Frequenzen: der L1 genannten Frequenz von 1575,42 MHz, die von handelsüblichen GPS-Empfängern benutzt wird, sowie der L2 genannten Frequenz von 1227,60 MHz, die verschlüsselt ist und damit nur von militärischen Empfängern verwendet werden kann. Diese können durch die Nutzung zweier unterschiedlicher Frequenzen Laufzeitunterschiede in der Ionosphäre berücksichtigen und damit die Genauigkeit der Positionsrechnung erhöhen. Die europäische Variante der Satellitennavigation, Galileo genannt, soll 2019 fertiggestellt werden.



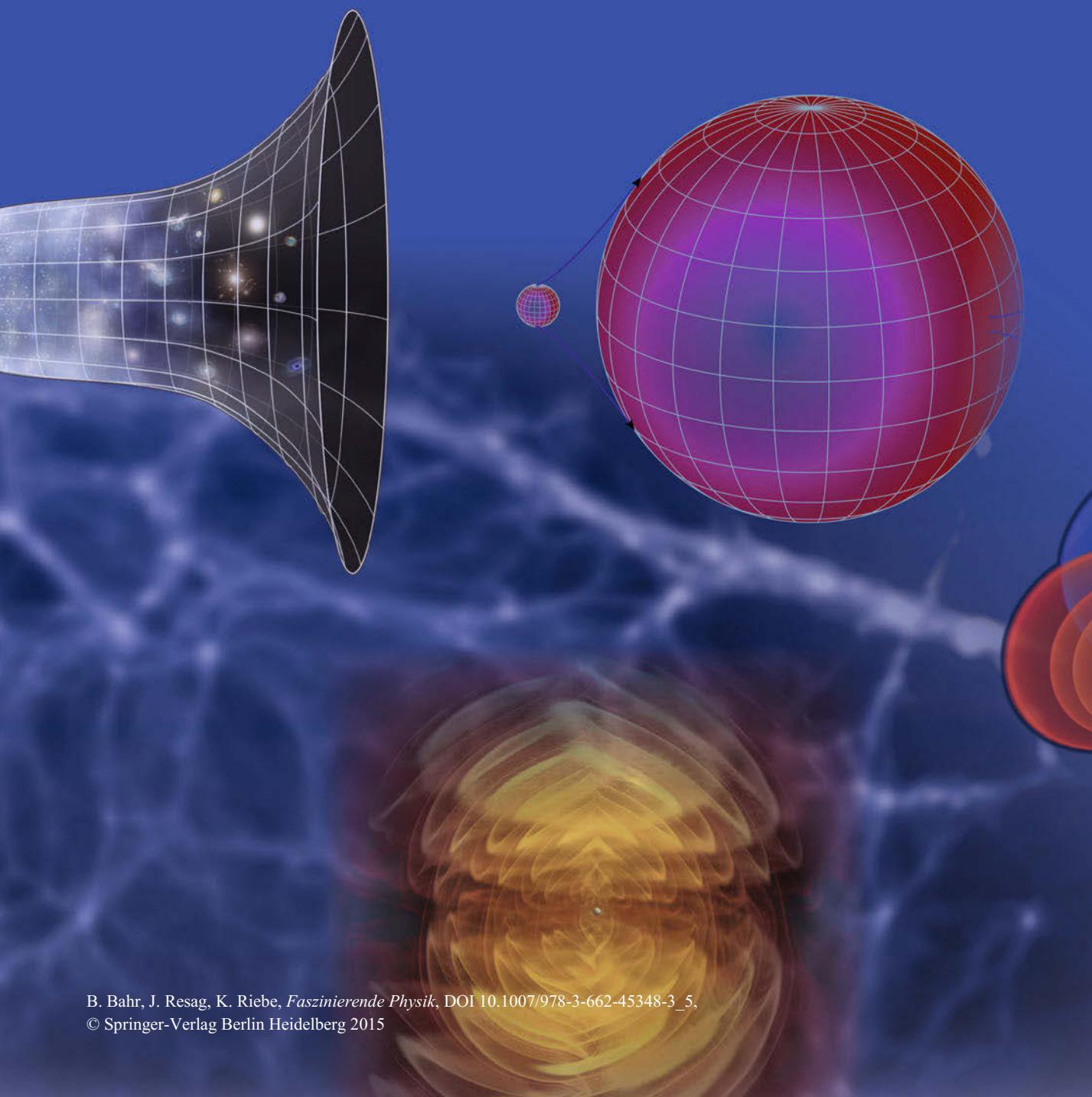
Künstlerische Darstellung eines GPS-Satelliten

Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie → S. 124

Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie → S. 130

M. Nathansen NAVSTAR Technik <http://gpso.de/technik/navstar.html>





# 5 Kosmologie

Wie tief in den Raum können wir blicken? Und wie weit zurück in der Zeit? Wie ist das Universum entstanden, und was können wir aus der kosmischen Hintergrundstrahlung herauslesen? Mit solchen Fragen und dem Blick auf die großen Strukturen im Kosmos beschäftigt sich die Kosmologie.

Eines der weithin berühmtesten Modelle der Kosmologie ist der Urknall – eine Theorie, die 1964 eine eindrucksvolle Bestätigung erhielt, als zufällig eine schwache Wärmestrahlung von knapp 3 Kelvin entdeckt wurde, die unser Universum durchdringt und uns von jeder Stelle des Himmels erreicht: die kosmische Hintergrundstrahlung. Sie stammt aus der Frühzeit des Universums, als dieses erst rund 380 000 Jahre alt und noch rund 3000 Kelvin heiß war.

In den folgenden Jahrzehnten haben Physiker das Universum mit stets wachsender Präzision vermessen und eine sehr gute Vorstellung davon entwickelt, wie es aussieht und wie es sich in den knapp 14 Milliarden Jahren seit dem Urknall entwickelt hat. Und doch bleiben noch viele Rätsel bestehen: Wir wissen, dass Atome nur rund 5 % der Materie im Universum ausmachen können. Woraus besteht der Rest? Derzeitige Theorien gehen davon aus, dass schwere noch unbekannte Teilchen (dunkle Materie genannt) mit 25 % den Raum durchdringen und dass vermutlich eine rätselhafte dunkle Energie die restlichen 70 % der Materie bereitstellt. Damit müssen wir allerdings auch zugeben, dass uns noch 95 % der Materie im Universum unbekannt sind – es warten also noch einige Überraschungen auf uns!



# Ein tiefer Blick ins Universum

## Wenn das Hubble-Teleskop in die Vergangenheit schaut

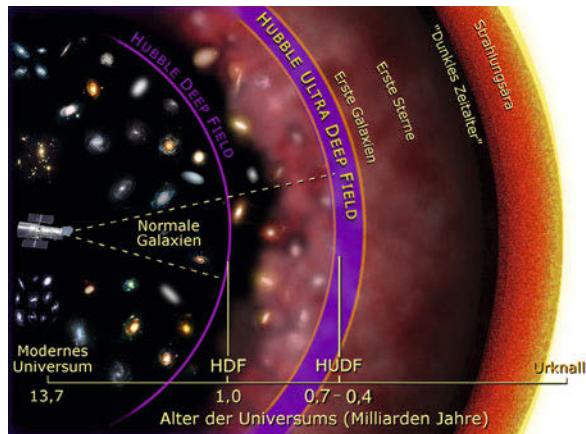
Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, umso länger ist ihr Licht bis zu uns unterwegs. Je weiter wir also in das Universum hinausschauen, umso länger ist es her, dass das Licht, das uns heute erreicht, ausgesendet wurde – und umso weiter blicken wir folglich in die Vergangenheit. Dabei wird die Wellenlänge des Lichtes auf dem Weg zu uns durch die Expansion des Raums immer mehr gedehnt und damit in den roten Spektralbereich verschoben (*Rotverschiebung*).

Wie weit kann man heute in das Universum hinausschauen? Die Grenze des prinzipiell für uns sichtbaren Universums ist heute ungefähr 42 Milliarden Lichtjahre entfernt und somit mehr als die 13,7 Milliarden Jahre, die unser Universum alt ist – denn die Wegstrecke, die das Licht bereits hinter sich hat, dehnt sich ständig weiter aus. Tatsächlich reicht die elektromagnetische Strahlung aber nicht ganz so weit. Die am weitesten entfernte Materie, deren elektromagnetische Strahlung zu uns gelangt, ist das Wasserstoff-Helium-Plasma, kurz bevor es sich nur etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall in durchsichtiges Wasserstoffgas verwandelt hat. Dieses Plasma sehen wir mit den entsprechenden Instrumenten in sehr weiter Ferne überall am Himmel – seine Strahlung ist die kosmische Hintergrundstrahlung (↓).

Hubble Ultra Deep Field (HUDF)

Etwa 200 bis 300 Millionen Jahre nach dem Urknall haben sich vermutlich die ersten Sterne und Galaxien gebildet. Wenn man mit sehr guten Teleskopen weit in das Weltall hinaus- und damit tief in die Vergangenheit hineinschaut, sollte man diese ersten Galaxien in weiter Ferne noch erkennen können. Mit dem Hubble-Weltraumteleskop hat man dazu einen winzigen Himmelsausschnitt von der Größe eines Zehntels des





Der Blick in die Ferne ist auch ein Blick zurück in der Zeit

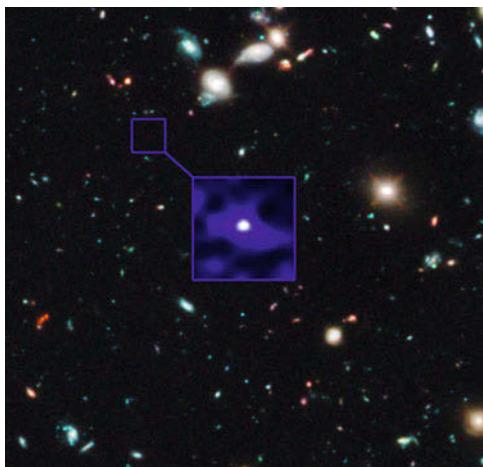
Monddurchmesser mit einer Gesamtbelichtungszeit von mehreren Tagen aufgenommen. Dies ist der bisher tiefste Blick in das Universum. Man bezeichnet dieses Bild als *Hubble Ultra Deep Field* (HUDF).

Auf dem Bild erkennt man etwa 10 000 Galaxien, die wir je nach Entfernung in allen möglichen Altersstufen und Entwicklungsstadien sehen. Die entferntesten und damit ältesten noch erkennbaren Galaxien – deren Licht also am längsten gebraucht hat, ehe es uns erreichte – erscheinen als winzige rötliche Punkte. Ihr damaliges Lebensalter liegt bei rund 500 bis 800 Millionen Jahren, d.h. wir sehen sie so, wie sie vor gut dreizehn Milliarden Jahren aussahen. Diese sehr jungen Galaxien sind noch deutlich kleiner und unregelmäßiger als beispielsweise unsere Milchstraße. Die jüngste bisher im HUDF gefundene Galaxie ist UDFj-39546284, deren Rotverschiebung bei  $z = 10$  liegt, d.h. wir sehen sie etwa 480 Millionen Jahre nach dem Urknall – seitdem hat sich das Universum um das 11-Fache ausgedehnt.



Das Hubble-Weltraumteleskop

Um noch jüngere Galaxien sehen zu können, brauchen wir weiter verbesserte Beobachtungsmöglichkeiten, wie sie beispielsweise mit dem als Hubble-Nachfolger geplanten James Webb Space Telescope vorgesehen sind.



Die Galaxie UDFj-39546284

NASA Hubble Digs Deeply, Toward Big Bang [http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/hubble\\_UDF.html](http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/hubble_UDF.html)  
T. Darnell Hubble Ultra Deep Field 3D <http://www.deepastronomy.com/hubble-deep-field-3d.html> oder YouTube

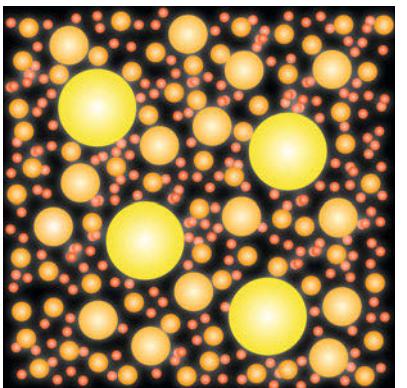


# Das expandierende Universum

## Warum ist der Nachthimmel dunkel?

Kann unser Universum unendlich groß, statisch und dabei gleichmäßig mit ewig leuchtenden Sternen angefüllt sein? Wäre das so, so müsste man an jedem Punkt des Himmels einen Stern sehen, und das Licht der Sterne hätte das Universum bereits auf Sterntemperatur aufgeheizt. Der gesamte Himmel würde so hell leuchten wie die Sonne. Man spricht vom *Olbers'schen Paradoxon*.

Warum also ist der Himmel nachts dunkel? Des Rätsels Lösung liegt darin, dass das für uns sichtbare Universum weder statisch noch unendlich groß ist: In den Jahren zwischen 1922 und 1927 entdeckten der russische Physiker Alexander Alexandrowitsch Friedmann und der belgische Physiker und Theologe Georges Lemaître unabhängig voneinander, dass nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) unser Universum nicht statisch sein kann, sondern expandieren oder kontrahieren muss.

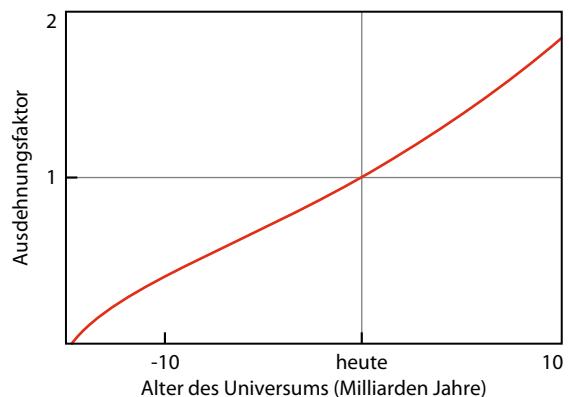


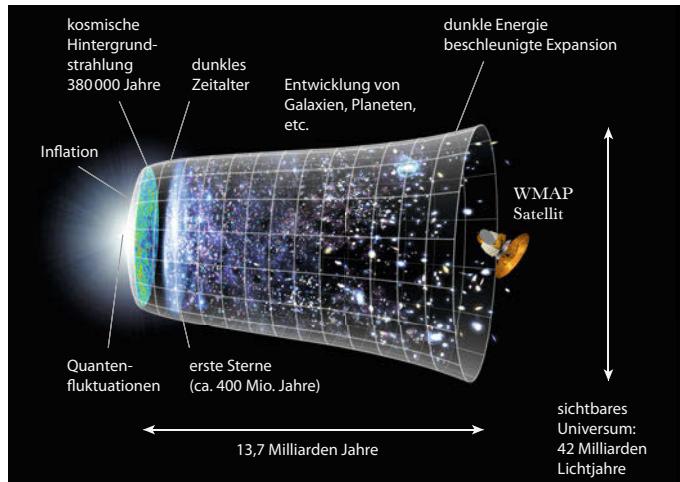
Olbers'sches  
Paradoxon

Im Jahr 1929 bestätigte Edwin Hubble diese Hypothese, indem er feststellte, dass das Licht weit entfernter Galaxien umso mehr zu langen Wellenlängen hin verschoben ist, je weiter diese Galaxien von uns entfernt sind (*Hubble-Gesetz*). Diese *Rotverschiebung* konnte man durch die ständig fortschreitende Expansion des Raumes erklären:

Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, umso schneller wächst ihr Abstand zu uns, wobei die Galaxien selbst sich nur relativ wenig im Raum bewegen – der Raum selbst ist es, der sich ausdehnt, ähnlich wie sich die Oberfläche eines sehr großen Luftballons beim Aufblasen vergrößert. Dabei wird auch die Wellenlänge des Lichtes umso mehr gedehnt, je länger es unterwegs ist.

Zeitliche Entwicklung des Ausdehnungsfaktors des Universums, relativ zu heute. In den ersten Jahrtausenden wurde die Ausdehnung abgebremst, während sie sich mittlerweile wieder beschleunigt.



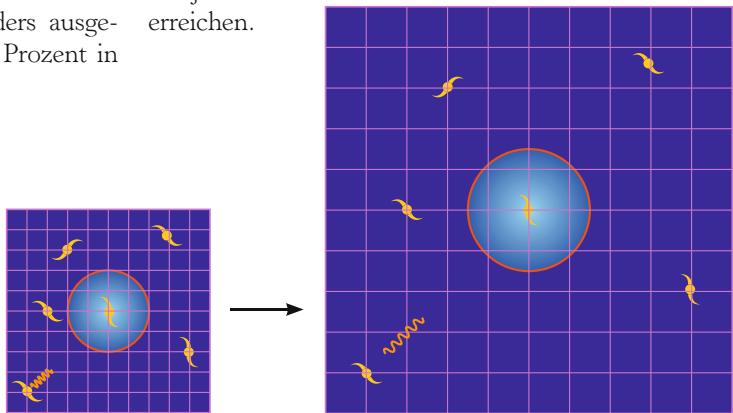


Die Ausdehnungsrate der Expansion bezeichnet man als *Hubble-Parameter*. Sie liegt im heutigen Universum bei rund 70 km/s pro Megaparsec (Mpc), wobei ein Megaparsec etwa 3,26 Millionen Lichtjahren entspricht. Ein Abstandsintervall von 3,26 Millionen Lichtjahren (etwa das Dreißigfache des Milchstraßen-durchmessers) wächst also in der Gegenwart mit der Geschwindigkeit von rund 70 km/s. Anders ausgedrückt: Es wächst gegenwärtig um sieben Prozent in einer Milliarde Jahren.

Je weiter wir heute in das Universum hinaussehen, umso länger ist das Licht von dort zu uns unterwegs gewesen und umso mehr ist seine Wellenlänge gedehnt worden. Von ganz weit draußen empfangen wir die tausendfach gedehnte Wärmestrahlung des heißen Plasmas aus dem sehr frühen Universum (kosmische Hintergrundstrahlung ↓).

Es gibt einen kritischen Abstand, ab dem Licht und alle anderen physikalischen Information keine Chance mehr haben, uns seit dem Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren zu erreichen – die Strecke bis zu uns expandiert schneller, als dass sie das Licht bis heute zurücklegen konnte. Dies ist die Grenze des für uns sichtbaren Universums. Sie liegt heute ungefähr 42 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt – also nicht 13,7 Milliarden Lichtjahre, wie das Alter des Universums vermuten lassen könnte, denn der Raum, den das Licht auf dem Weg zu uns bereits zurückgelegt hat, expandiert ja ständig weiter. Wahrscheinlich ist nur ein winziger Teil des gesamten Universums für uns sichtbar.

Es gibt noch einen weiteren wichtigen Horizont (↓): den *Ereignishorizont* (in der Grafik als hellblauer Bereich dargestellt, wobei wir in der Mitte sitzen). Er liegt momentan in einer Entfernung von rund sechzehn Milliarden Lichtjahren. Licht, das heute außerhalb dieses Bereichs ausgesendet wird, hat keine Chance mehr, uns jemals zu erreichen.



Die kosmische Hintergrundstrahlung → S. 148  
Kosmische Horizonte → S. 158



# Die kosmische Hintergrundstrahlung

## Mikrowellen aus der Frühzeit des Universums

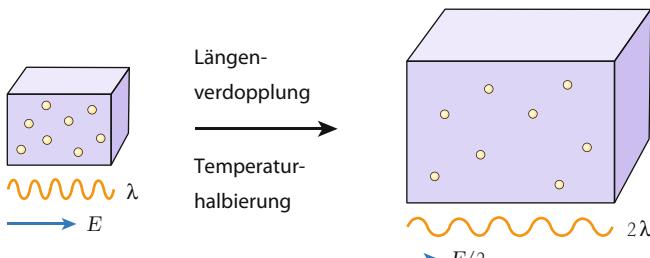
Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall erreichte das expandierende Universum einen wichtigen Punkt in seiner Entwicklung: Die Temperatur des darin enthaltenen dünnen heißen Plasmas ( $\downarrow$ ) aus Protonen, Heliumkernen und Elektronen unterschritt die Temperatur von rund 3000 Kelvin und war damit so weit abgekühlt, dass sich Elektronen und Protonen zu Wasserstoffatomen verbinden konnten. Anders als das Plasma zuvor ist Wasserstoffgas im Wesentlichen durchsichtig, sodass sich die Wärmestrahlung des zuvor glühenden Plasmas von nun an ungehindert im Universum ausbreiten konnte. Seitdem hat sich das Universum um gut das Tausendfache ausgedehnt, sodass sich zugleich die Temperatur dieser Wärmestrahlung um gut ein Tausendstel auf heute etwa 2,7 Kelvin abgekühlt hat und ihre typischen Wellenlängen heute im unsichtbaren Mikrowellenbereich liegen.

Diese schwache Wärmestrahlung durchdringt noch heute das gesamte Universum. Sie wurde im Jahr 1964 von Penzias und Wilson zufällig entdeckt und gilt heute als einer der wichtigsten Belege für den Urknall.



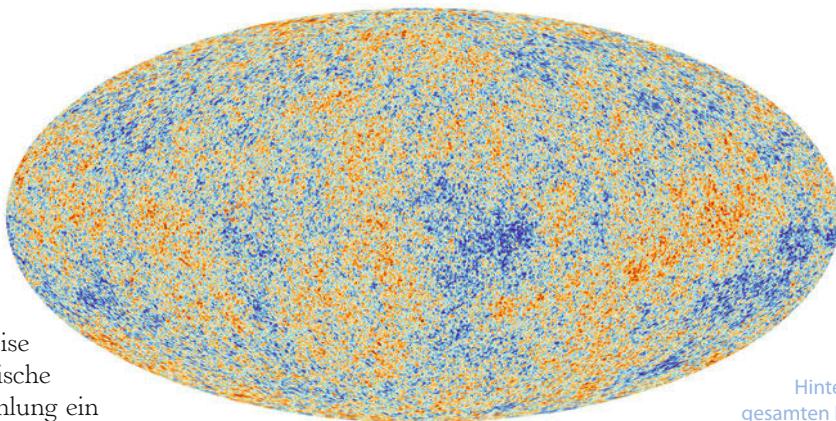
Robert Wilson (links) und Arno Penzias (rechts) vor der Hornantenne, mit der sie die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt haben

Man bezeichnet sie als *kosmische Hintergrundstrahlung*. Von jeder Stelle des Himmels dringt sie zu uns. Im Grunde sehen unsere Messinstrumente am scheinbar leeren Himmel das glühende Plasma in dem Moment, in dem es sich in durchsichtiges Wasserstoffgas verwandelt hat, wobei seine Strahlung durch die kosmische Expansion in den Mikrowellenbereich rotverschoben wurde. Dies ist die älteste elektromagnetische Strahlung, die zu uns dringt. Weiter hinaus und damit zurück in die Vergangenheit können wir mithilfe elektromagnetischer Strahlung nicht schauen.



Die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung fällt umgekehrt proportional zur Expansion des Universums ab. Die gelben Punkte sind die zugehörigen Photonen, deren Wellenlänge und Energie jeweils unten dargestellt sind.

Die kosmische Hintergrundstrahlung erscheint aufgrund der Eigenbewegung der Erde in Bewegungsrichtung am Himmel um rund 0,1 % wärmer als auf der gegenüberliegenden Himmelseite (Dopplereffekt). Daraus kann man ableiten, dass sich unser Sonnensystem mit rund 370 km/s gegenüber der kosmischen Hintergrundstrahlung bewegt.

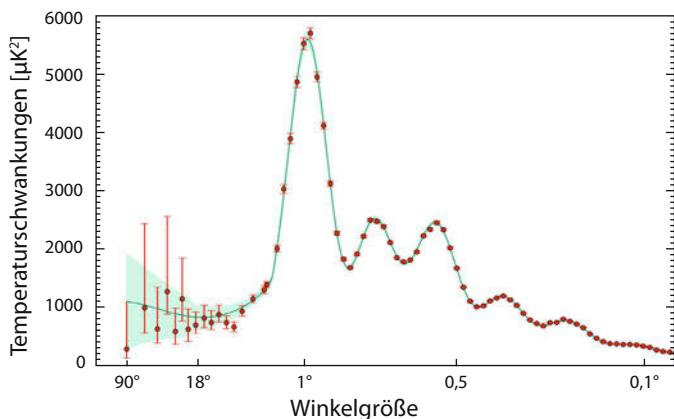


Auf diese Weise liefert die kosmische Hintergrundstrahlung ein universelles Bezugssystem für die Bewegungen aller Himmelskörper im Universum!

Darüber hinaus zeigt die Hintergrundstrahlung viele winzige Unregelmäßigkeiten von etwa 0,001%, die man mithilfe moderner Satelliten wie WMAP und Planck seit einigen Jahren sehr genau vermisst.

Unregelmäßigkeiten in der kosmischen Hintergrundstrahlung am gesamten Himmel, nach neuesten Messungen von Planck, veröffentlicht im März 2013. Der Einfluss durch Sterne und Galaxien sowie durch die Eigenbewegung der Erde (Dopplereffekt) wurden zuvor aus den Messdaten herausgerechnet.

Diese Unregelmäßigkeiten entsprechen kleinen Dichteschwankungen im damaligen Plasma, wobei Schwankungen mit einer Größe von einem Winkelgrad am Himmel (das entspricht etwa dem doppelten Monddurchmesser) am intensivsten sind.



Diese Schwankungen haben ihre Ursache sehr wahrscheinlich in winzigen Quantenschwankungen des sogenannten *Inflatonfeldes*, die durch die inflationäre Expansion ( $\downarrow$ ) in den ersten Sekundenbruchteilen des Universums zu gigantischer Größe aufgebläht wurden. Vergleicht man ihre sichtbare Größe und Intensität mit Modellrechnungen, so kann man daraus grundlegende Informationen über das Universum gewinnen.

Diese Grafik zeigt, wie stark ausgeprägt heißere oder kältere Flecken verschiedener Größe in der kosmischen Hintergrundstrahlung sind.



# Dunkle Materie

## Das Universum ist schwerer als es aussieht

Wieviel Materie gibt es im Universum? Diese Frage ist nicht leicht zu beantworten. Recht gut lässt sich heute abschätzen, wie viel Materie im Universum leuchtet (Sterne, Galaxien), bzw. Licht absorbiert (interstella rer Staub). Eine alternative Methode besteht darin, die Schwerkraft ( $\downarrow$ ) selbst zu benutzen, um die vorhandene Masse im Universum zu schätzen. Zum Beispiel kann man aus den Flugbahnen von Sternen, Galaxien oder ganzen Galaxienhaufen die Masse der Objekte errechnen, die sie umkreisen, bzw. die sich in ihrer näheren Umgebung befinden. Eine weitere Möglichkeit bietet der ebenfalls auf der Schwerkraft beruhende Gravitationslinseneffekt ( $\downarrow$ ), der eine verlässliche Methode ist, die Massendichte im All zu messen.

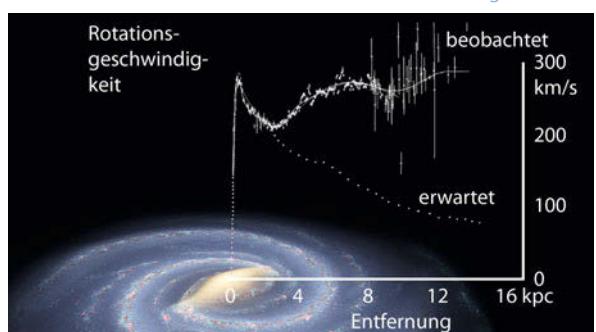
Mysteriöserweise führen die beiden Messmethoden jedoch zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen: Es gibt demnach im All etwa sechsmal so viel Schwerkraft, wie man leuchtende oder Licht absorbierende Masse sehen kann. Die Astrophysiker nennen seither den großen Teil der Materie im Universum, der sich nur durch seine Gravitationswirkung auf seine Umgebung bemerkbar macht, *dunkle Materie*.

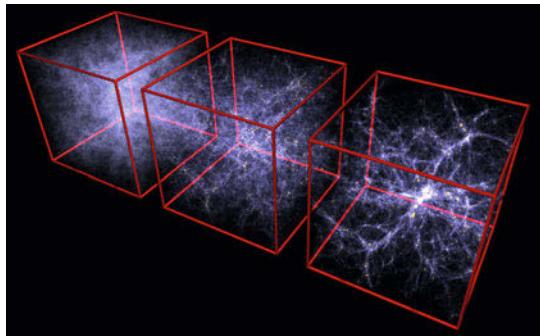


Man nimmt an, dass sich die dunkle Materie (blau dargestellt) als Halo um die Galaxien herum anordnet.

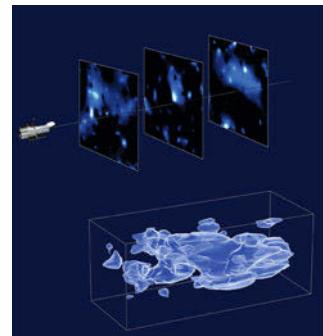
Es gibt viele unabhängige Hinweise auf die Existenz der dunklen Materie: Gäbe es zum Beispiel in Galaxien nur diejenige Materie, die man auch sehen kann, würden diese völlig anders um sich selbst rotieren: Weiter außen liegende Bereiche müssten sich deutlich langsam er um das Galaxienzentrum drehen als die inneren Bereiche (so, wie zum Beispiel Jupiter deutlich länger für eine Sonnenumrundung benötigt als die Erde). Jedoch beobachtet man, dass sich die äußersten Spiralarme von Galaxien sehr viel schneller drehen, als sie das eigentlich sollten. Erklären lässt sich dies, wenn man annimmt, dass die sichtbare Materie der Galaxien in einen kugelförmigen *Halo* – einer riesigen Sphäre aus unsichtbarer, dunkler Materie – eingebettet ist. Durch die zusätzliche Masse müssen die Spiralarme schneller rotieren, um nicht in das Galaxienzentrum zu stürzen. Diese Vermutung wird am eindrucksvollsten durch Aufnahmen von Zusammenstößen von Galaxien bestätigt.

Die sichtbare Materie in der Milchstraße allein reicht nicht aus, um zu erklären warum die Rotationskurve zum Galaxienrand hin nicht abnimmt. Dunkle Materie könnte hierfür eine Erklärung liefern.





Entwicklung der sichtbaren Materie im Universum. Ohne dunkle Materie könnte man die starke Ausformung der Filamentstruktur nicht erklären.



Schlussendlich ist auch die Verteilung der sichtbaren Materie im Universum nicht zu erklären, wenn man keine zusätzliche Schwerkraft annimmt: Während sich das Universum in den letzten dreizehn Milliarden Jahren ausdehnte, haben sich die Galaxien und Galaxienhaufen in einer faserartigen Struktur (sogenannten *Filamenten*) zusammengezogen, die man auch heute mit Teleskopen beobachten kann (Strukturen im Kosmos ↓). Allein die eigene Schwerkraft der sichtbaren Materie reicht hierfür bei Weitem nicht aus, es gibt dafür schlicht zu wenig im Universum. Dies ist ein weiterer Hinweis auf die Existenz der dunklen Materie.

Wenn es sie jedoch gibt, muss dunkle Materie sehr merkwürdig sein: Sie darf nur äußerst schwach elektromagnetisch wechselwirken, muss also durchsichtig und durchlässig sein. Einige Zeit glaubte man, dass Neutrinos die Bausteine der dunklen Materie sein könnten, heutzutage ist man sich allerdings relativ sicher, dass es dafür nicht genug Neutrinos im Universum gibt. Eine weitere beliebte Vermutung ist, dass dunkle Materie aus recht schweren supersymmetrischen Teilchen (Neutralinos, Supersymmetrie ↓) besteht.

Neuere Messungen belegen, dass die Verteilung der dunklen Materie im Universum mit dessen Alter aufgrund der eigenen Schwerkraft immer strukturierter wird und Filamente ausbildet.

Es gibt verschiedene Ansätze, die „überschüssige“ beobachtete Schwerkraft nicht ad hoc durch eine mysteriöse zusätzliche Materieform zu erklären, sondern durch eine Abänderung der Gesetze der Schwerkraft. Das beliebteste Beispiel hierfür ist MOND (MOdified Newtonian Dynamics), die eine winzige Änderung an Newtons Kraftgesetz postuliert. Obwohl diese (und andere) Vorschläge zwar einzelne Hinweise auf dunkle Materie, wie z. B. die abnorme Rotationskurve der Galaxien, erklären können, gibt es keinen einfachen Vorschlag, der alle Phänomene auf einmal erklärt. Daher gehen die meisten Physiker weiterhin von der Existenz der dunklen Materie aus, auch wenn ihre Zusammensetzung immer noch ein Rätsel ist.

Der sogenannte „Bullet Cluster“, bestehend aus zwei miteinander zusammenstoßenden Galaxienhaufen. Während die sichtbare, kollidierende Materie im Röntgenbereich leuchtet (rot), fliegen die Halos der dunklen Materie unbehelligt weiter (blau).



Bild oben links mit freundlicher Genehmigung von Volker Springel, Universität Heidelberg  
Strukturen im Kosmos → S. 160

Supersymmetrie → S. 276

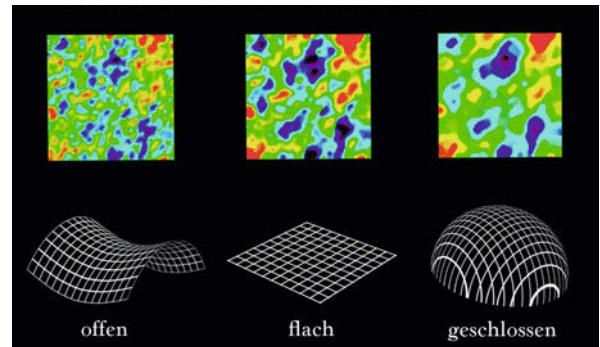
D. Hooper *Dunkle Materie: Die kosmische Energielücke* Spektrum Akademischer Verlag 2009



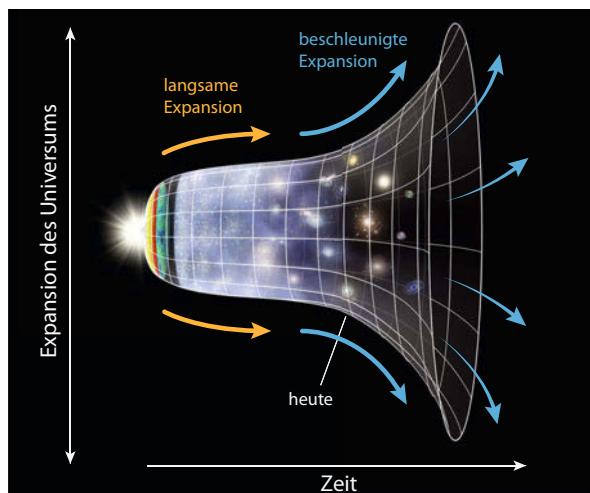
# Beschleunigte Expansion und dunkle Energie

## Die fehlende Materieform im Universum

Aus der Analyse der kosmischen Hintergrundstrahlung ist es Physikern in den letzten Jahren gelungen, einige wichtige Eigenschaften des Universums präzise zu vermessen. Wir wissen daher heute, dass das Universum flach ist, also großräumig keine messbare Raumkrümmung aufweist: In einem negativ gekrümmten Universum (im nebenstehenden Bild links) würden die schwachen Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung ( $\downarrow$ ) räumlich kleiner, in einem positiv gekrümmten Universum (rechts) dagegen größer erscheinen, als wir sie am Himmel messen.



Da die Raumkrümmung mit der mittleren Materie- und Energiedichte im Universum zusammenhängt, können wir daraus schließen, dass diese mittlere Dichte gleich der sogenannten *kritischen Dichte* sein muss, die bei



rund sechs Protonmassen pro Kubikmeter liegt. Die mittlere Dichte von allem, was sich im Raum verteilt, muss also in Summe diese Größenordnung annehmen.

Wenn wir nun die Dichte der gewöhnlichen Materie aus Atomen und subatomaren Teilchen bestimmen, finden wir, dass diese nur knapp 5 % der benötigten kritischen Dichte ausmacht. Nehmen wir noch die sogenannte *dunkle Materie* ( $\downarrow$ ) hinzu, die aus noch unbekannten schweren Teilchen bestehen muss, so ist diese mit rund 25 % der kritischen Dichte im Universum verteilt. Die dunkle Materie wirkt wie die gewöhnliche Materie ebenfalls gravitativ anziehend. Leichte Teilchen wie Neutrinos und Photonen sind hier fast bedeutungslos. Addieren wir diese beiden Dichten, erreichen wir jedoch bei Weitem noch nicht die benötigte kritische Dichte. Wo also sind die fehlenden rund 70 %? In den 1990er Jahren lieferte die Beobachtung weit entfernter thermonuklearer Supernovae einen wichtigen Hinweis, für den im Jahr 2011 der Physik-Nobelpreis

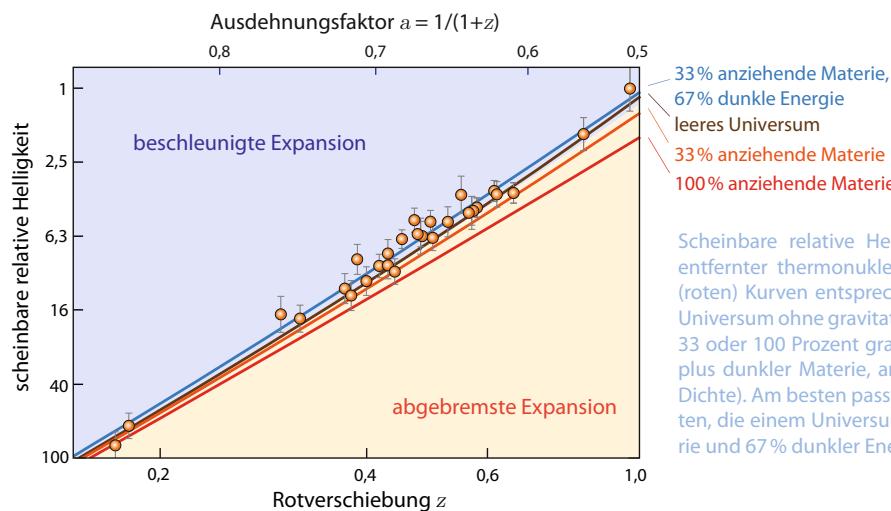
Die kosmische Hintergrundstrahlung → S. 148

Dunkle Materie → S. 150

A. W. A. Pauldrach *Dunkle kosmische Energie* Spektrum Akademischer Verlag 2010

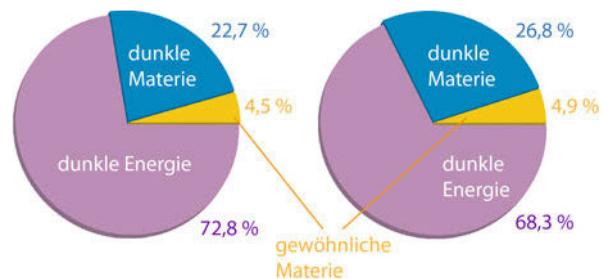
verliehen wurde: Die Supernovae leuchten bei großen Rotverschiebungen weniger hell als gedacht. Daraus konnte man ableiten, dass sich die Expansion des Universums nicht wie vermutet aufgrund anziehender Gravitationskräfte langsam abschwächt, sondern seit rund fünf Milliarden Jahren zunehmend beschleunigt.

Was aber beschleunigt die Expansion? Es gibt eine Kraft, die dies bewirken kann, nämlich die Gravitation. Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (↓) wirken Materie- und Energiedichten sowie normaler Druck gravitativ anziehend, während negativer Druck (also starke innere Zugkräfte) gravitativ abstoßend wirken. Man vermutet daher, dass die fehlenden 70 % der Materiedichte von sogenannter *dunkler Energie* geliefert werden, die den Raum gleichmäßig durchdringt und die einen starken negativen Druck besitzt, so dass ihre abstoßende Gravitationswirkung die anziehende Gravitation der normalen plus der dunklen Materie seit rund fünf Milliarden Jahren übertrifft.



Vermutlich ist die dunkle Energie eine Eigenschaft des Raumes selbst, also eine Art konstante Raumenergie. Möglicherweise liefern die allgegenwärtigen virtuellen Teilchen des Vakuums (↓) diese Energiedichte, doch die dafür berechneten Werte sind bisher viel zu groß. Und obwohl es hierzu derzeit sehr viele Theorien und Modelle gibt, weiß noch niemand zweifelsfrei, was sich hinter der dunklen Energie wirklich verbirgt.

Materieanteile im heutigen Universum gemessen von den Satelliten WMAP (links) und Planck (rechts, Stand März 2013)



Scheinbare relative Helligkeit und Rotverschiebung weit entfernter thermonuklearer Supernovae. Die unteren drei (roten) Kurven entsprechen den erwarteten Werten für ein Universum ohne gravitativ abstoßende dunkle Energie mit 0, 33 oder 100 Prozent gravitativ anziehender Materie (Atome plus dunkle Materie, angegeben in Prozent der kritischen Dichte). Am besten passt die oberste blaue Kurve zu den Daten, die einem Universum mit rund 33 % anziehender Materie und 67 % dunkler Energie entspricht.



# Urknall und inflationäre Expansion

## Warum der Raum flach und der Hintergrund überall gleich kalt ist

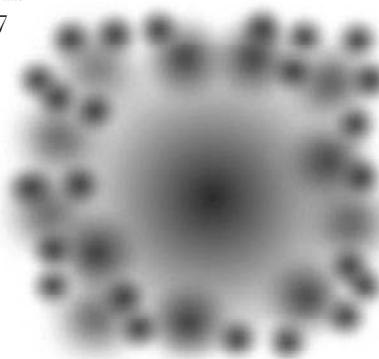
Betrachtet man das für uns sichtbare Universum in einem rückwärts laufenden Film, so rücken alle Galaxien darin immer enger zusammen, je weiter man in der Zeit zurückgeht, bis schließlich alle Abstände gegen Null zu schrumpfen scheinen.

Dieser Zeitpunkt liegt rund 13,7 Milliarden Jahre zurück. Man bezeichnet ihn als *Urknall*.

Nach den Regeln der Quantentheorie kann aber das Universum zu Beginn nicht wirklich ein Punkt gewesen sein (↓). Was also geschah am Anfang wirklich? Was knallte im Urknall?

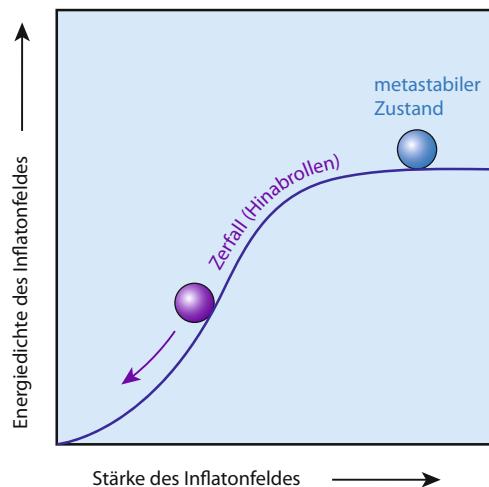
Eine gängige Vorstellung ist, dass sich in einer Art waberndem Raumzeit-Quantenschaum in einem winzigen Raumbereich von vielleicht  $10^{-10}$  fm Durchmesser (das entspricht etwa einem Zehnmilliardstel des Protondurchmessers) ein sogenanntes *Inflatonfeld* bildete (im Zentrum der obigen Grafik als dunkler Grauton dargestellt).

Was genau dieses Inflatonfeld sein soll, wissen wir nicht – entscheidend ist nur, dass es sich um ein Feld handelt, das den winzigen Raumbereich gleichmäßig ausfüllte und sich dabei in einem metastabilen, sehr hochenergetischen Zustand befand, ähnlich einer untermühlten Flüssigkeit.



In diesem Zustand besitzt es einen enorm starken negativen Druck, ähnlich wie eine straffe Gummihaut, die sich zusammenziehen möchte. Paradoxerweise ruft dieser negative Druck nach Einsteins Gravitationsgesetz (↓) eine stark abstoßende Gravitation hervor, die das winzige Raumgebiet blitzartig exponentiell aufbläht.

Modellrechnungen zeigen, dass sich so der ursprünglich winzige Raumbereich innerhalb eines winzigen Augenblicks von vielleicht  $10^{-33}$  Sekunden Länge um das  $10^{30}$ - bis  $10^{50}$ -Fache ausdehnen kann. Aus den anfänglichen  $10^{-10}$  fm werden so hundert Kilometer oder mehr.

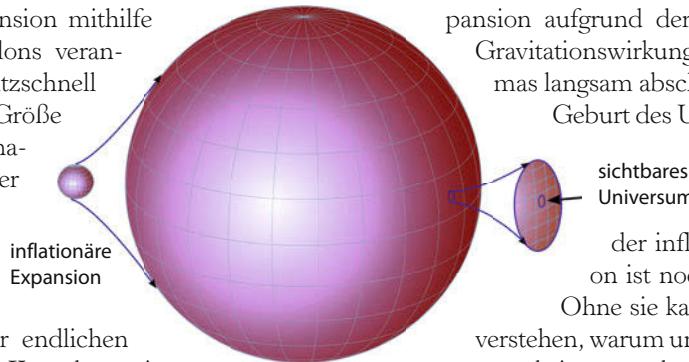


Man kann sich diese Expansion mithilfe eines subatomaren Luftballons veranschaulichen, den man blitzschnell auf hundert Kilometer Größe aufbläst. Der dreidimensionale Raum entspricht dabei der zweidimensionalen Gummihaut des Luftballons. Die meisten Raumpunkte verlieren bei dieser heftigen Expansion wegen der endlichen Lichtgeschwindigkeit jeden Kontakt zueinander und können daher auch keine Lichtsignale mehr untereinander austauschen, sodass nur ein kleiner Ausschnitt des expandierten Raumbereichs unser heute sichtbares Universum bildet.

Dieses enorme Aufblähen ist der eigentliche Urknall. Dabei verdünnt sich das Inflatonfeld nicht, sondern sein negativer Druck sorgt dafür, dass es sich ständig nachbildet, wobei die dafür notwendige Energie aus der gravitativen Abstoßung stammt.

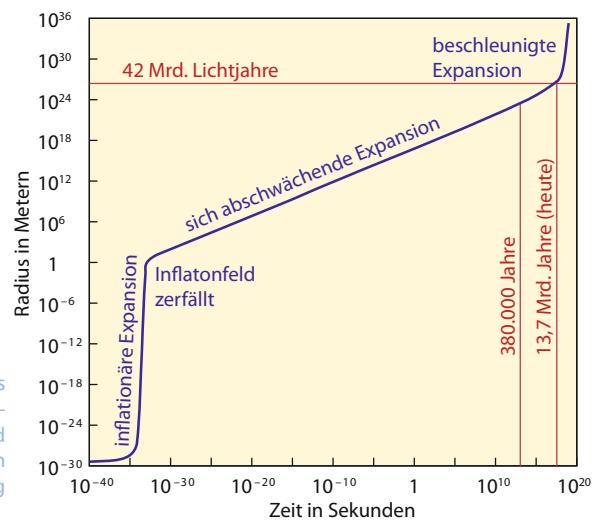
Am Ende der extrem kurzen, aber ebenso heftigen Inflationsphase rutscht das Inflatonfeld dann aus seinem metastabilen Zustand heraus und zerfällt, d. h. es rollt in der Grafik auf der vorhergehenden Seite gewissermaßen den Potentialberg nach links hinunter. Dabei wandelt sich seine Energie in ein extrem heißes Teilchenplasma um, das zusammen mit dem Universum weiter expandiert und sich dabei abkühlt, wobei sich die Ex-

Radius des expandierenden Raumbereichs, der heute unser sichtbares Universum darstellt, in doppelt logarithmischer Darstellung. In der Gegenwart beträgt dieser Radius rund 42 Milliarden Lichtjahre, während er am Ende der inflationären Expansion bei nur einem Meter gelegen haben könnte. Die Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung 380 000 Jahre nach dem Urknall ist ebenfalls eingetragen.



pansion aufgrund der nun anziehenden Gravitationswirkung des Teilchenplasmas langsam abschwächt. Dies ist die Geburt des Universums, das wir kennen.

Diese Idee der inflationären Expansion ist noch recht spekulativ. Ohne sie kann man aber kaum verstehen, warum unser sichtbares Universum keine messbare mittlere Raumkrümmung aufweist, sondern flach ist, und warum die kosmische Hintergrundstrahlung ( $\downarrow$ ) überall fast exakt dieselbe Temperatur aufweist. Bei der inflationären Expansion ergeben sich beide Eigenschaften ganz automatisch: Die enorme Ausdehnung zu Beginn lässt den für uns heute sichtbaren Raum flach werden, und zuvor konnte sich die Temperatur im winzigen Ausgangsgebiet überall angleichen.



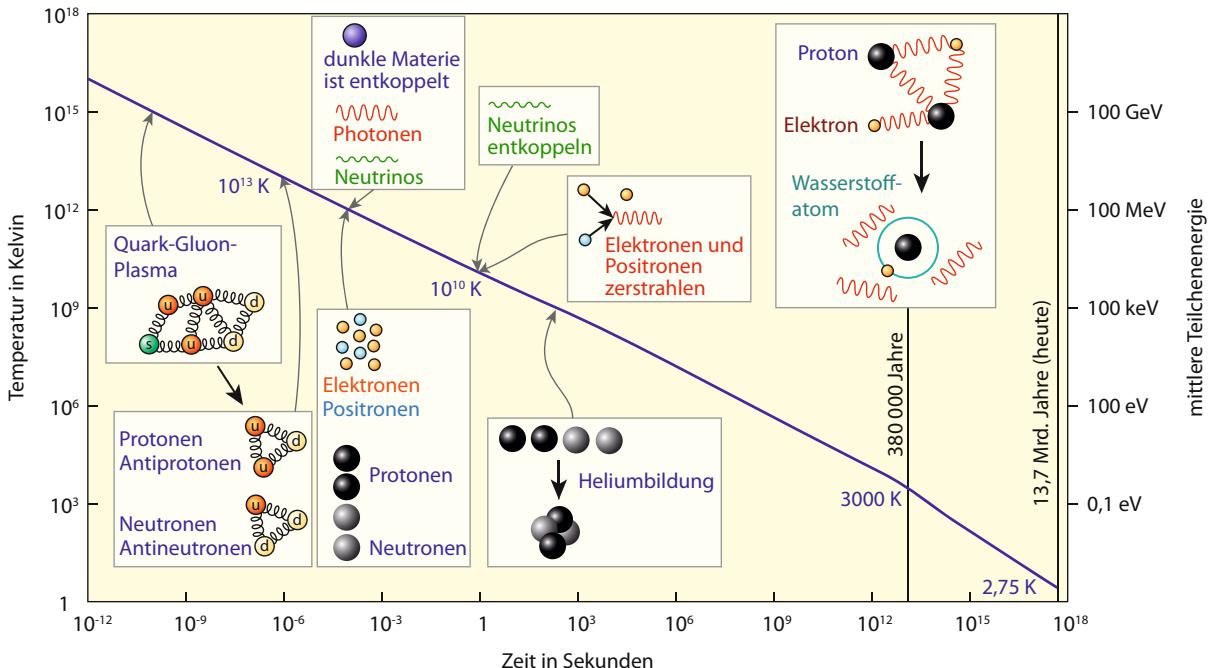
Die kosmische Hintergrundstrahlung → S. 148

B. Greene *Die verborgene Wirklichkeit: Paralleluniversen und die Gesetze des Kosmos* Siedler Verlag 2012



# Die Entstehung der Materie

Was ab  $10^{-10}$  Sekunden nach dem Urknall geschah



Wie entstand aus der Energie des zerfallenden Inflatonfeldes ( $\downarrow$ ) die Materie, die wir heute im Universum beobachten?

Auch wenn wir die Entwicklung in den allerersten Sekundenbruchteilen nach heutigem Wissen nur grob erraten können, so wissen wir doch mittlerweile immerhin recht genau, was sich ab etwa  $10^{-10}$  Sekunden nach dem Urknall abgespielt haben muss:

## $10^{-10}$ Sekunden (Temperatur: $10^{15}$ Kelvin)

Ein sehr heißes dichtes Teilchenplasma aus Quarks und Antiquarks, Leptonen (Elektronen, Myonen, Tauonen, Neutrinos) und Antileptonen, Gluonen, Photonen, W- und Z-Bosonen ( $\downarrow$ ) sowie dunkler Materie durchdringt das Universum. Das Higgs-Feld ( $\downarrow$ ) hat kurz zuvor vielen dieser Teilchen ihre Masse verliehen und damit elektromagnetische und schwache Wechselwirkung voneinander getrennt.

**$10^{-6}$  Sekunden (Temperatur:  $10^{13}$  Kelvin)**

Quarks, Antiquarks und Gluonen (auch Quark-Gluon-Plasma genannt) verbinden sich zu Protonen, Neutronen und deren Antiteilchen.

 **$10^{-4}$  Sekunden (Temperatur:  $10^{12}$  Kelvin)**

Protonen und Antiprotonen sowie Neutronen und Antineutronen vernichten sich gegenseitig, wobei ein winziger Protonen- und Neutronenüberschuss von etwa einem Milliardstel übrig bleibt. Die noch unbekannten schweren Teilchen der dunklen Materie ( $\downarrow$ ) führen mittlerweile ein unabhängiges Eigenleben, d. h. sie entkoppeln von der übrigen Materie.

**1 Sekunde (Temperatur:  $10^{10}$  Kelvin)**

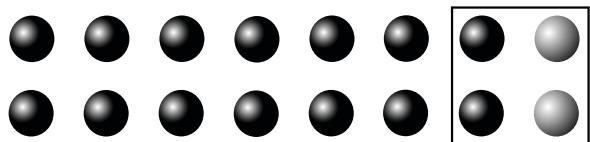
Die sehr zahlreichen geisterhaften Neutrinos ( $\downarrow$ ) entkoppeln ebenfalls von der übrigen Materie und bilden bis heute eine Neutrino-Hintergrundstrahlung, die aber zu flüchtig ist, als dass man sie bisher nachweisen konnte. Kurz darauf vernichten sich Elektronen und Positronen gegenseitig und heizen dadurch das Plasma noch einmal deutlich auf. Ein winziger Überschuss an Elektronen bleibt übrig.

**3 Minuten (Temperatur:  $10^9$  Kelvin)**

Viele Neutronen sind mittlerweile zu Protonen zerfallen, sodass auf sieben Protonen nur noch ein Neutron kommt. Diese Neutronen beginnen, mit Protonen zu Deuterium und dann weiter zu Heliumkernen zu fusionieren.

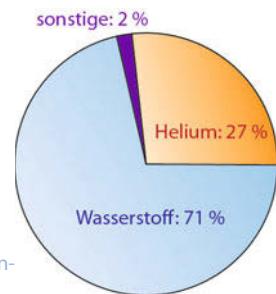
**1 Stunde (Temperatur: 200 Millionen Kelvin)**

Alle Neutronen haben sich mit Protonen zu Heliumkernen vereinigt, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen. Dadurch liegt nun ein Viertel aller Nukleonen (Protonen sowie Neutronen) in Form von Heliumkernen vor.



Schwerere Elemente als Helium bilden sich praktisch nicht – sie entstehen erst später im nuklearen Fusionsofen der Sterne. Noch heute besteht die atomare Materie des Universums zu knapp drei Vierteln aus Wasserstoff und gut einem Viertel aus Helium (bezogen auf das Gewicht), während alle anderen Elemente nur wenige Prozent ausmachen.

Elementhäufigkeiten im Sonnensystem (Gewichtsanteile)

**380000 Jahre (Temperatur: 3 000 Kelvin)**

Elektronen und Atomkerne bilden stabile Atome. Das Universum wird für einen Großteil der Photonen durchsichtig, sodass diese seitdem als kosmische Hintergrundstrahlung ( $\downarrow$ ) weitgehend ungehindert das Universum durchqueren.

Quark-Gluon-Plasma → S. 232

Dunkle Materie → S. 150

Neutrinos → S. 228

Die kosmische Hintergrundstrahlung → S. 148

J. Resag Zeitpfad – Die Geschichte unseres Universums und unseres Planeten Spektrum Akademischer Verlag 2012



# Kosmische Horizonte

## Oder wie weit wir durch Raum und Zeit sehen können

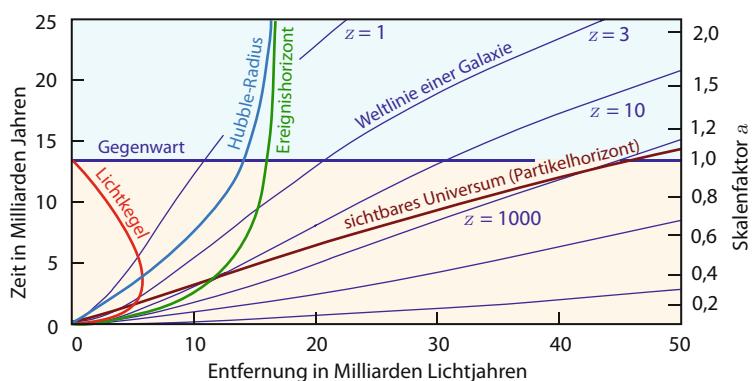
Bei der Expansion des Universums ( $\downarrow$ ) bewegen sich die Galaxien nicht wie Raketen von uns weg, sondern der Raum selbst ist es, der sich ausdehnt, während die Galaxien darin nahezu ruhen und sich synchron mit ihm mitbewegen (ihre geringe Eigenbewegung können wir hier vernachlässigen).

Die Grafik unten rechts zeigt im Detail, was bei der Expansion unseres Universums nach heutigem Wissen geschieht. Die Zeit, wie sie in den Galaxien wahrgenommen wird, läuft dabei von unten nach oben, wobei als Startpunkt das Ende der inflationären Expansion ( $\downarrow$ ) gewählt wurde – diese allerersten Sekundenbruchteile lassen wir also hier außer Acht.

Von links nach rechts ist die reale Entfernung (engl.: *proper distance*) zwischen uns und den anderen Galaxien eingezeichnet – wir selbst befinden uns also am linken Rand der Grafik. Könnten wir die Expansion des Universums stoppen, so würden wir anschließend genau diese Entfernung messen, beispielsweise indem wir Lichtsignale im nun statischen Universum zwischen den Galaxien und uns hin- und herschicken.

Die dünnen blauen Linien zeigen, wie sich die Entfernung zu den Galaxien im Lauf der Zeit vergrößert. Man spricht von den *Weltlinien* der Galaxien. Der  $z$ -Wert gibt dabei die heute beobachtete Rotverschiebung der entsprechenden Galaxie an. So bedeutet beispielsweise der Wert  $z = 1$ , dass sich die Wellenlänge des Lichtes auf dem Weg zu uns um 100 % vergrößert hat – der Skalenfaktor  $a$  des Universums (also die Größe der Galaxienabstände relativ zu heute) lag zu dem Zeitpunkt, als das Licht ausgesendet wurde, also bei  $a = 0,5$ , sodass es sich seitdem um den Faktor 2 ausgedehnt hat (allgemein gilt  $z + 1 = 1/a$ ).

Die rote Linie (der heutige Lichtkegel) zeigt den Weg, den ein Lichtstrahl durch Raum und Zeit nimmt, sodass wir ihn heute sehen können. Wenn wir hinaus in den Weltraum schauen, so folgen wir dabei diesem Lichtkegel in die Vergangenheit, denn ein Blick in die Ferne ist zugleich ein Blick zurück in der Zeit ( $\downarrow$ ). Der Lichtkegel markiert damit diejenigen Ereignisse der Vergangenheit, die wir heute am Himmel sehen können. Außerhalb des blau eingezeichneten Hubble-Radius wächst der Abstand der Galaxien zu uns mit Überlichtgeschwindigkeit – dies ist keine Verletzung der Relativitätstheorie, da die Ausdehnung des Raumes für die Überlichtgeschwindigkeit verantwortlich ist

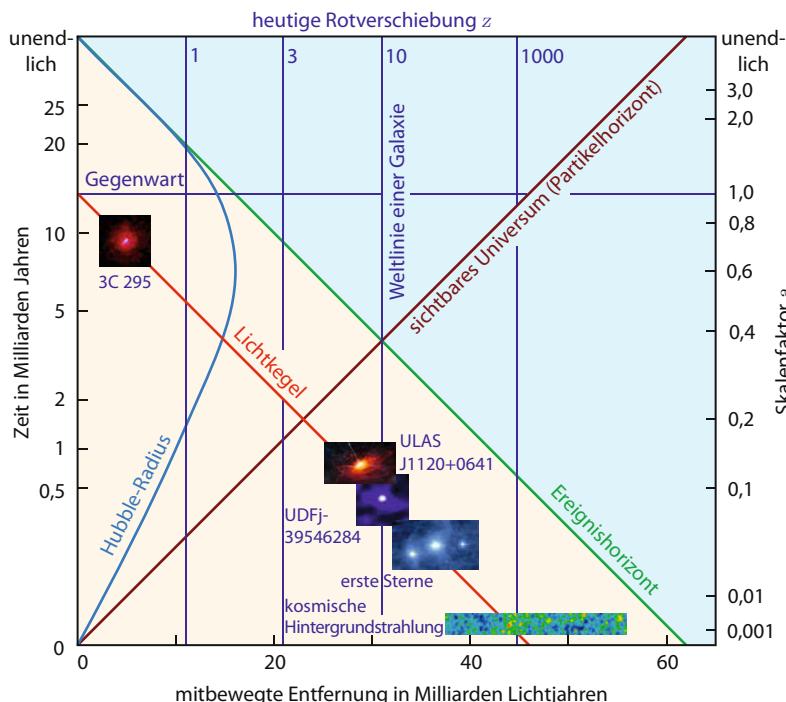


und nicht die Bewegung der Galaxien im Raum. Da der Lichtkegel im frühen Universum außerhalb des Hubble-Radius verläuft, können wir diese überlichtschnellen Galaxien dennoch heute sehen, denn die sich damals abbremsende Expansion lässt ihr Licht wieder in den Bereich innerhalb des Hubble-Radius vordringen.

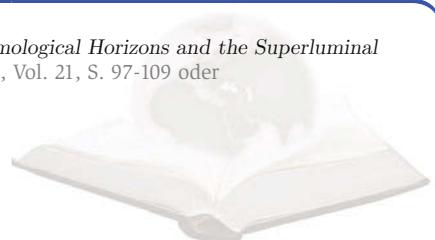
Dem Licht von Ereignissen, die sich außerhalb des grün eingezzeichneten Ereignishorizontes befinden, gelingt es dagegen niemals, bis zu uns zu gelangen. Irgendwann überschreitet jede Galaxie diesen Ereignishorizont, sodass wir ihren weiteren Lebensweg nicht beobachten können. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Galaxie plötzlich von unserem Nachthimmel verschwindet.

Während wir in die Zukunft voranschreiten, erscheint ihr Licht stattdessen immer stärker rotverschoben und ist immer schwieriger messbar. Zugleich scheint die Zeit auf ihr immer langsamer zu vergehen, sodass sie für uns den Zeitpunkt des Übertritts nie erreicht.

Die Grenze des sichtbaren Universums ist für die verschiedenen Zeiten durch den dunkelrot eingezzeichneten *Partikelhorizont* gegeben. Er ist die maximale Entfernung aller Objekte, deren irgendwann nach der inflationären Expansion ausgesendetes Licht uns zu dieser Zeit erreicht, d. h. die Weltlinien der Objekte innerhalb des Partikelhorizonts schneiden alle unseren jeweiligen Lichtkegel für diese Zeit.



Für die Lesbarkeit der Grafik ist es oft günstig, statt der realen Entfernung die sogenannte *mitbewegte Entfernung* auf der x-Achse einzutragen – das ist die heutige Entfernung der Galaxien. Die Weltlinien sind dann einfach senkrechte Linien, wobei man für die reale Entfernung zu einer bestimmten Zeit die mitbewegte Entfernung mit dem rechts angegebenen Skalenfaktor multiplizieren muss. Zusätzlich werden die Zeitmarken so entlang der y-Achse angeordnet, dass die unendlich ferne Zukunft ganz oben zu liegen kommt und der Lichtkegel eine schräg nach rechts unten verlaufende gerade Linie bildet.

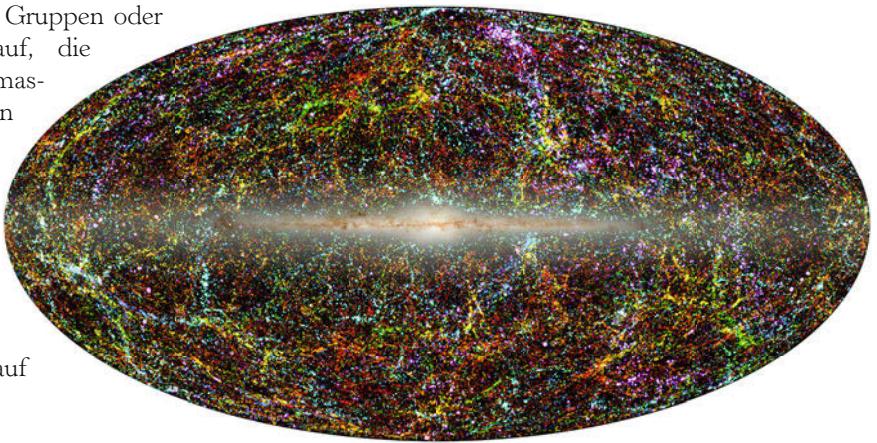


## Strukturen im Kosmos

### Ein Netzwerk aus Materie

Galaxien treten oft in kleinen Gruppen oder größeren *Galaxienhaufen* auf, die Massen von über  $10^{14}$  Sonnenmassen und eine Ausdehnung von mehreren Millionen Lichtjahren erreichen können. Galaxienhaufen sind damit die größten gravitativ gebundenen, also von ihrer eigenen Schwerkraft zusammengehaltenen, Systeme im Kosmos. Doch gibt es auch Strukturen auf noch größeren Skalen?

In den letzten Jahrzehnten wurden mehrere Beobachtungsprogramme durchgeführt, um die großräumige Verteilung der Galaxien und Galaxienhaufen genauer zu untersuchen. Das Bild oben stammt vom Extended Source Catalog (XSC) des Two Micron All Sky Survey (2MASS) und zeigt die Verteilung von 1,6 Millionen Galaxien an der Himmelskugel. Dabei entspricht ein Punkt einer Galaxie.



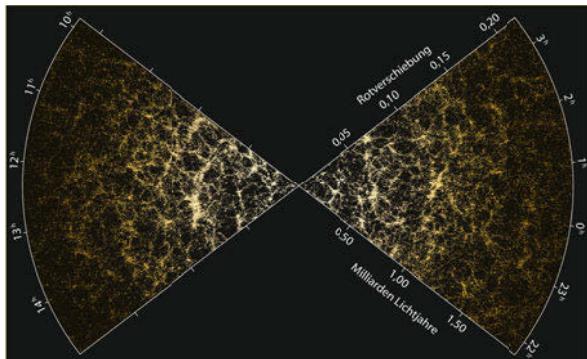
Himmelskarte der Galaxieverteilung in unserer Umgebung (2MASS XSC) im infraroten Bereich  
Die Farbe der Punkte kennzeichnet die Rotverschiebung der Galaxien bzw. ihre Entfernung: Rot ist weit weg, blau am nächsten.  
Das Band in der Mitte entspricht den Sternen der Milchstraße.

Um einen dreidimensionalen Eindruck von der Galaxienverteilung zu erhalten, wurden in anderen Himmelsdurchmusterungen, wie z. B. dem 2dF Galaxy Redshift Survey, in einem schmalen Himmelsausschnitt die Position der Galaxien und ihre Entfernung aus der kosmischen Rotverschiebung der Spektrallinien bestimmt (Hubble-Gesetz ↓). Dadurch lässt sich ihre Verteilung in die Tiefe des Universums hinein darstellen. Das Bild auf der nächsten Seite links zeigt für einen solchen nur sechs Grad dicken Bereich des Himmels die Rektaszension (den Längengrad an der Himmelskugel) und die Entfernung bzw. Rotverschiebung. Auch hier entspricht ein Punkt wieder einer einzelnen Galaxie.

Hubble-Gesetz, Das expandierende Universum → S. 146

SDSS-Kollaboration *The Sloan Digital Sky Survey* <http://www.sdss.org/>

T. H. Jarrett *Large Scale Structure in the Local Universe: The 2MASS Galaxy Catalog* Publications of the Astronomical Society of Australia, 2004, Vol. 21, S. 396



Ein Blick in die Tiefe: die Verteilung der Galaxien in einem schmalen Ausschnitt des Universums, mit ihrer Rektaszension und Entfernung aufgetragen. Jeder Punkt entspricht einer Galaxie.

Auf solchen Karten erkennt man, dass die Galaxien und Galaxienhaufen keineswegs gleichmäßig oder zufällig verteilt sind. Sie ordnen sich in noch größeren Strukturen an, den *Galaxiensuperhaufen*, die hunderte bis tausende Galaxien enthalten und sich bis zu 150 Millionen Lichtjahre erstrecken. Dünne, faserartige *Filamente* durchziehen das Universum, auf denen sich Galaxien wie Perlen an einer Schnur aufreihen. Die Filamente umschließen große, leere Räume, die sogenannten *Voids*. Diese erstrecken sich ebenfalls bis zu hunderte Millionen Lichtjahre im Durchmesser und enthalten, wenn überhaupt, dann nur wenige Galaxien.

Geschwindigkeitsmessungen der Galaxien haben ergeben, dass sich die Galaxien bevorzugt entlang der Filamente auf die Knotenpunkte des kosmischen Netzes zu bewegen, an denen sich die größten Galaxiensuperhaufen befinden. Die Milchstraße ist Teil der Lokalen Gruppe und liegt am Rande des Virgo-Galaxienhaufens. Er bewegt sich zusammen mit anderen Galaxienhaufen der Umgebung mit 1 bis 2 Millionen km/h

auf eine Region zu, die von uns aus gesehen hinter der Milchstraßenebene verborgen liegt. Wegen ihrer großen Anziehungskraft wurde sie *Great Attractor* genannt. Staub und Sterne der Milchstraße verhinderten lange die direkte Beobachtung.

Doch Galaxienhaufen enthalten viel heißes Gas, das Röntgenlicht aussendet und den Staub der Milchstraße durchdringen kann. Mit dem Röntgensatelliten ROSAT entdeckte man in den letzten Jahren, dass der Great Attractor aus weit weniger massereichen Galaxiensuperhaufen besteht als angenommen. Tatsächlich sind die Galaxiensuperhaufen in der Nähe der dahinter liegenden Shapley-Konzentration und des Hydra-Centaurus-Komplexes für den größeren Teil der Anziehungskraft verantwortlich. Wir werden diese über 600 Millionen Lichtjahre entfernten Objekte jedoch nie erreichen, da die Expansion des Universums auf diesen Skalen die Anziehungskraft überwiegt.

*Verteilung der Galaxienhaufen bis 800 Millionen Lichtjahre von der Milchstraße entfernt. Jeder blaue Kreis entspricht einem Galaxienhaufen. Die Pfeile deuten die Anziehungskräfte des Great Attractors und des Shapley-Superhaufens an.*

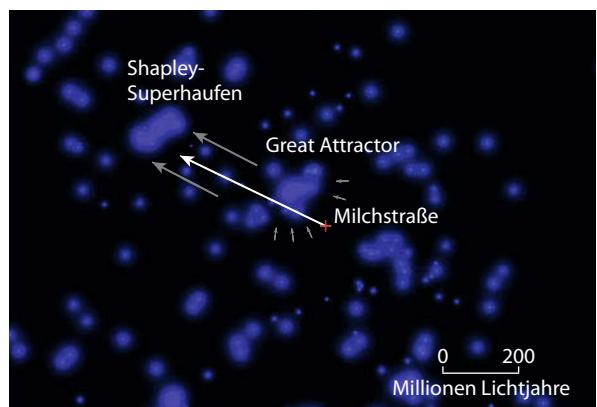
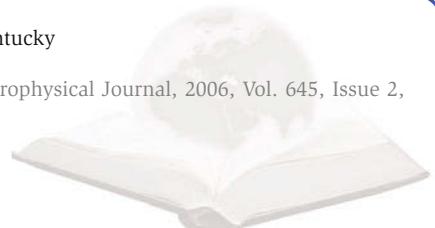


Bild rechts unten mit freundlicher Genehmigung von Dale Kocevski, University of Kentucky  
Entstehung kosmischer Strukturen → S. 162

D. D. Kocevski, H. Ebeling *On the Origin of the Local Group's Peculiar Velocity* Astrophysical Journal, 2006, Vol. 645, Issue 2, S. 1043



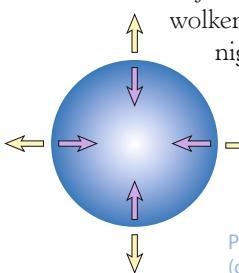
# Entstehung kosmischer Strukturen

## Die Macht der Gravitation

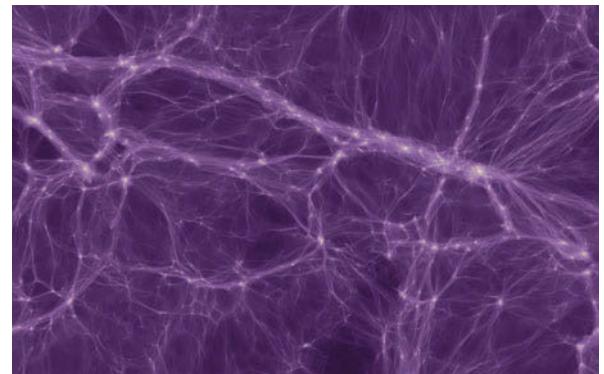
Aus der Gleichförmigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung ( $\downarrow$ ) lässt sich schließen, dass die Materie zu Beginn des Universums sehr gleichmäßig verteilt gewesen sein muss, mit nur winzigen Dichteschwankungen. Doch schon diese kleinsten Unregelmäßigkeiten reichten aus, dass sich Strukturen bilden konnten: Ist einmal eine überdichte Region vorhanden, so dehnt sie sich zwar mit der Expansion des Universums ( $\downarrow$ ) aus, zieht aber dennoch aufgrund der Gravitation mehr Materie an als ihre Umgebung und wird noch massereicher. Ein Effekt, der sich immer weiter aufschaukelt. Sobald dann eine kritische Masse erreicht ist, macht die Materiewolke die Expansion des Raumes nicht mehr mit und fällt in sich zusammen (gravitativer Kollaps).

Als das Universum noch sehr jung und heiß war, konnte sich zunächst nur dunkle Materie zusammenballen, wobei die ersten Dunkle-Materie-Halos entstanden. Für das Gas war der Strahlungsdruck zu dieser Zeit noch zu groß. Erst nach und nach kühlte sich das Universum ab, bis sich auch das Gas in den dichtesten Dunkle-Materie-Klumpen sammeln konnte. Durch Verschmelzen der Materieklumpen zu immer größeren

Objekten wuchsen nun auch die Gaswolken an und konnten schließlich einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall die ersten Sterne bilden. Durch weitere



Kurz vor dem Kollaps: Gravitation (lila Pfeile) und Expansion des Universums (gelb) halten sich die Waage.



Dunkle-Materie-Filamente in einer kosmologischen Simulation. Die Galaxien sitzen in den dichtesten Gebieten (helle Punkte).

Verschmelzungsprozesse entstanden etwa eine halbe bis eine Milliarde Jahre nach dem Urknall die ersten Galaxien. Ohne die dunkle Materie hätten sich die Galaxien erst sehr viel später bilden können, was übrigens einer der Hinweise auf die Existenz dieser mysteriösen Materieform ist.

Diesen Prozess der Strukturentstehung von kleinen Objekten zu größeren Gebilden nennt man *hierarchische Strukturbildung*.



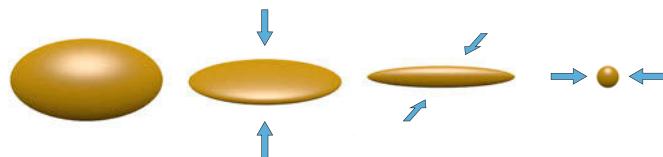
Hierarchische Strukturbildung: Kleine Objekte verschmelzen zu immer größeren.

Doch wo bleiben in diesem Bild die Filamente und Voids (↓), die man im kosmischen Netz beobachtet?

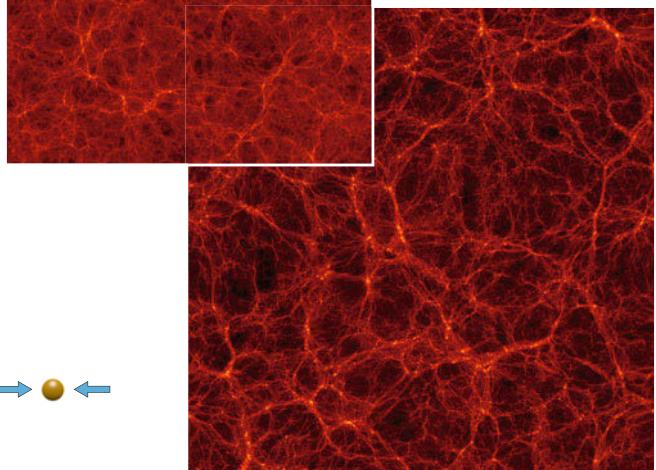
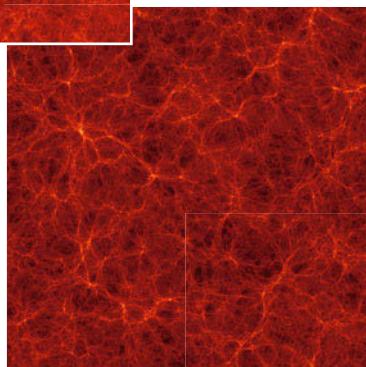
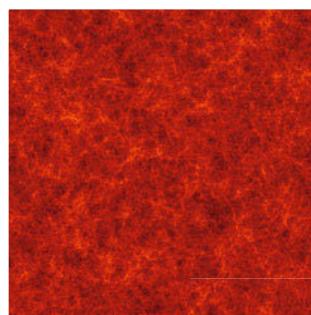
Um das zu verstehen, betrachtet man eine Materiewolke in Form eines Rotationsellipsoids mit den Achsen  $a > b > c$ . Der gravitative Kollaps erfolgt dann zunächst entlang der kürzesten Achse  $c$  – die Wolke wird zu einer flachen 2D-Struktur zusammengepresst, die *Wall* (Wand) oder *Sheet* genannt wird. Danach zieht sich die Wand entlang der mittleren Achse  $b$  zusammen, und ein Filament entsteht. Zuletzt geschieht der Kollaps entlang der längsten Achse  $a$ , wodurch sich ein annähernd kugelförmiges Objekt bildet.

Da kleine Regionen früher in sich zusammenfallen können als große, herrschen auf kleinen Skalen kugelige, schon längst kollabierte Objekte vor (die Galaxien), während die großräumigen Strukturen durch Wände und Filamente geprägt sind.

Kollaps eines Ellipsoids zu einer Wand, einem Filament und schließlich zu einer Kugel



Momentaufnahmen aus einer Computersimulation des Universums (Bolshoi-Simulation, ca. eine Milliarde Lichtjahre Kantenlänge) für 0,5; 6 und 13,7 Millarden Jahre nach dem Urknall (von oben nach unten)



Die Entstehung der Strukturen im Universum kann man in kosmologischen Simulationen besonders gut beobachten. Hier spielt sich innerhalb von Tagen oder Monaten an Rechenzeit ab, was in der Realität Milliarden von Jahren benötigt. Setzt man verschiedene kosmologische Modelle und Parameter an, so ergeben sich Unterschiede in den Eigenschaften des Universums: im Zeitpunkt der Entstehung der ersten Galaxien und Galaxienhaufen, der Konzentration der Galaxienhaufen oder ihrem Anteil an sichtbarer und dunkler Materie. Durch Vergleiche von Beobachtungen mit den Simulationsdaten können so Rückschlüsse auf die Anfangsbedingungen, die grundliegenden Gesetze und die Entwicklung unseres Universums gezogen werden.

Simulationsbilder von Stefan Gottlöber, Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam

Dunkle Materie → S. 150

Strukturen im Kosmos → S. 160

HIPACC *The Bolshoi Simulation* <http://hipacc.ucsc.edu/Bolshoi>

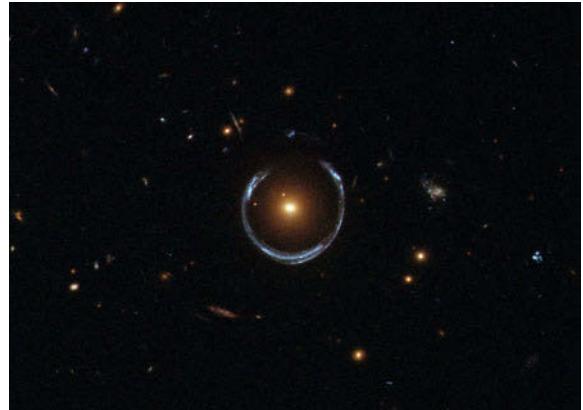


# Gravitationslinsen

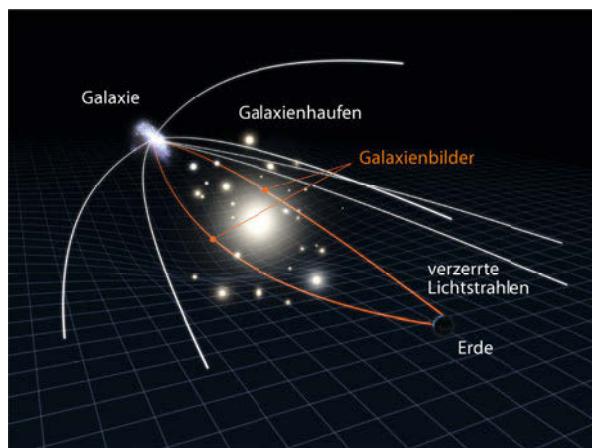
## Wie man mit scheinbar verzerrten Galaxien das Universum wiegt

Lichtstrahlen werden durch die Schwerkraft astronomischer Objekte abgelenkt. Weil das Universum voll von solch extrem massereichen Objekten ist, sehen wir beim Blick durch das Teleskop von manchen weit entfernten Galaxien nur ein sehr verzerrtes Bild. In ihm besitzen Sterne und Galaxien scheinbar veränderte Positionen, erscheinen ringförmig verzerrt oder sind doppelt oder sogar mehrfach zu sehen.

Weil die Lichtablenkung durch massive interstellare Objekte zu ähnlichen Effekten wie die Lichtbrechung in Materialien führt, spricht man hierbei auch vom **Gravitationslinseneffekt**. Durch ihre hohe Masse können sowohl Neutronensterne, als auch schwarze Löcher, Galaxien und sogar Galaxienhaufen als Gravitationslinsen wirken.



Das Bild einer entfernten, blauen Galaxie wird durch die Galaxie LRG 3-757 verzerrt.



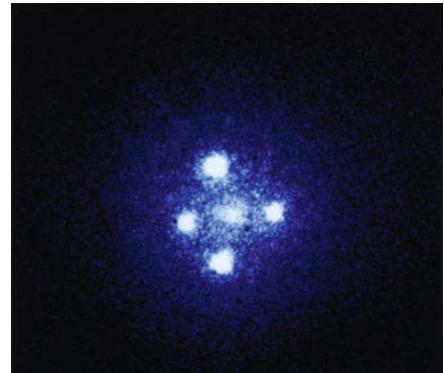
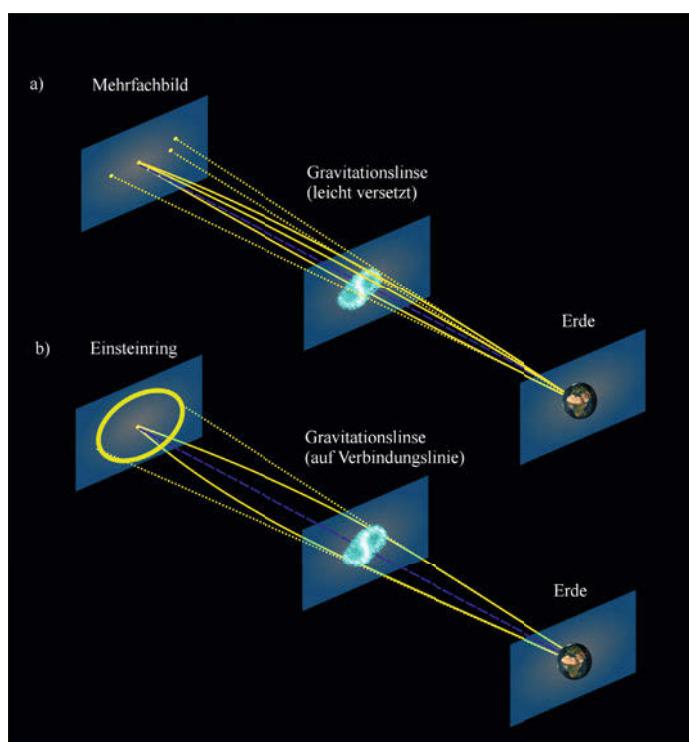
Lichtstrahlen weit entfernter Galaxien erreichen uns aufgrund der Raumverzerrung nicht auf geraden Linien.

Obwohl schon vor der Entstehung der Relativitätstheorie theoretisch vermutet, sind die ersten realistischen Berechnungen zum Gravitationslinseneffekt erst von Einstein im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie (↓) durchgeführt worden. Die Ablenkung von Sternenlicht nahe unserer Sonne konnte im Mai 1919 von Sir Arthur Eddington während einer Sonnenfinsternis nachgewiesen werden, was Einstein über Nacht zu Weltruhm verhalf.

Es dauerte jedoch noch bis März 1979, bis Walsh, Carswell und Weymann den Doppelquasar Q0957+561 im Sternbild Ursa Major erstmals als ein linsenerzeugtes Doppelbild ein und desselben Quasars identifizierten.

Später fand man nicht nur Mehrfachabbildungen von Sternen und Galaxien, wie beispielsweise das wunderschöne Einsteinkreuz, sondern auch die ersten sogenannten *Einsteinringe*. Diese entstehen, wenn sich – von der Erde aus gesehen – ein ausgedehntes astronomisches Objekt, wie z. B. eine Galaxie oder ein Galaxienhaufen, genau hinter einer Gravitationslinse befindet. Man sieht dann das Objekt nicht nur mehrfach, sondern als verzerrten Ring um die Gravitationslinse herum.

Befinden sich Beobachter, Linse und Objekt nur näherungsweise auf einer Linie, kann man die verzerrten Objekte oft noch als sogenannte *Giant Luminous Arcs* erkennen.



Das Einsteinkreuz, ein Mehrfachbild des Quasars QSO 2237+0305

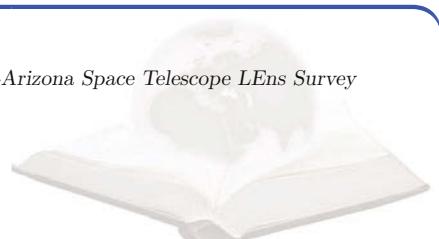
Im 21. Jahrhundert ist der Gravitationslinseneffekt zum unschätzbarren Hilfsmittel in der Astrophysik geworden. Durch präzise Beobachtung schon leichter Lichtablenkungen weit entfernter Galaxien kann man nämlich sehr genau Rückschlüsse auf die Verteilung – und die Gesamtmenge – der Materie im Weltall ziehen. Daher wissen wir zum Beispiel inzwischen, dass das Universum sehr viel mehr Masse enthalten muss, als sich durch bloße Messung von Strahlung vermuten ließe. Diese sogenannte *dunkle Materie* ( $\downarrow$ ) gibt den Astronomen bis heute Rätsel auf.

a) Sind das weit entfernte Objekt, die Gravitationslinse und die Erde nicht genau auf einer Linie, sieht man das Objekt mehrfach.

b) Befinden sie sich alle genau auf einer Linie, sieht man das Objekt als Einsteinring verzerrt.

Dunkle Materie → S. 150

C. S. Kochanek, E. E. Falco, C. Impey, J. Lehar, B. McLeod, H.-W. Rix Galerie des CfA-Arizona Space Telescope LEnS Survey (CASTLES) <http://www.cfa.harvard.edu/castles/>



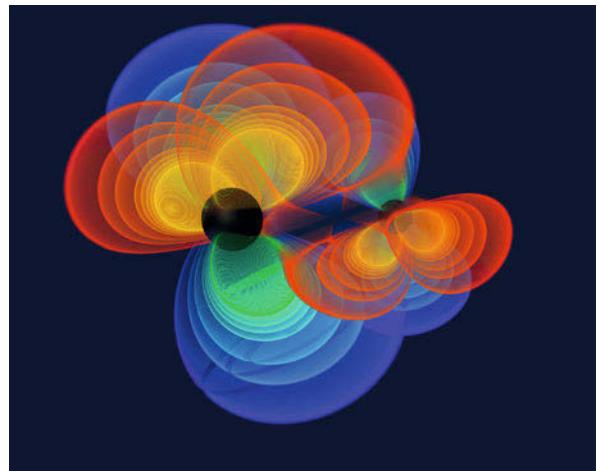
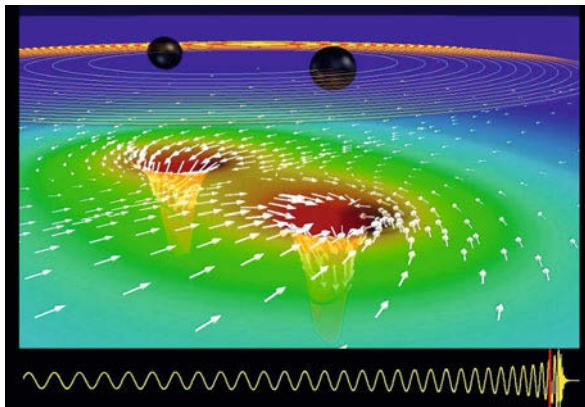
# Gravitationswellen

## Rhythmische Verzerrungen von Raum und Zeit

Seit den Arbeiten von Johannes Kepler ist bekannt, wie sich zwei interstellare Körper umkreisen. Dieses sogenannte *Zweikörperproblem* kann exakt mit den Gesetzen der Newton'schen Mechanik ( $\downarrow$ ) berechnet werden und stimmt hervorragend mit den beobachteten Bewegungen z. B. der Erde um die Sonne überein.

Das Zweikörperproblem ist also gelöst – oder doch nicht? Seit Einstein wissen wir, dass das Newton'sche Gravitationsgesetz und die daraus folgenden Kepler-ellipsen nur dann näherungsweise gelten, wenn die beteiligten Körper nicht allzu schwer, allzu schnell oder allzu nahe beieinander sind. Und im Vergleich zu – sagen wir einmal – zwei sich eng umkreisenden Neutronensternen oder schwarzen Löchern sind Erde und Sonne geradezu lahme Fliegengewichte. Wie also bewegen sich zwei schwarze Löcher, wenn sie einander sehr nahe kommen oder sogar miteinander verschmelzen?

Verzerrte Raumzeit zweier sich umkreisender schwarzer Löcher



Kurz bevor sich zwei schwarze Löcher vereinigen, senden sie hochfrequente Gravitationswellen aus.

Diese Frage zu klären erweist sich als erstaunlich schwierig, denn die Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ), die man hierfür zu Rate ziehen muss, sind extrem kompliziert. So kompliziert, dass sie sich nur mithilfe modernster Computer lösen lassen.

Erstaunlicherweise bewegen sich z. B. zwei einander umkreisende schwarze Löcher nicht mehr auf stabilen Keplerbahnen. Denn während in der Newton'schen Mechanik die Energie zweier Körper während des Umkreisens erhalten bleibt, ist dies laut der Relativitätstheorie bei zwei sehr schweren Objekten nicht mehr der Fall. Vor allem dann nicht, wenn sie sich sehr nahe kommen und dabei fast Lichtgeschwindigkeit erreichen.

Bild rechts oben von M. Koppitz (AEI/ZIB), C. Reisswig (AEI), L. Rezzolla (AEI)

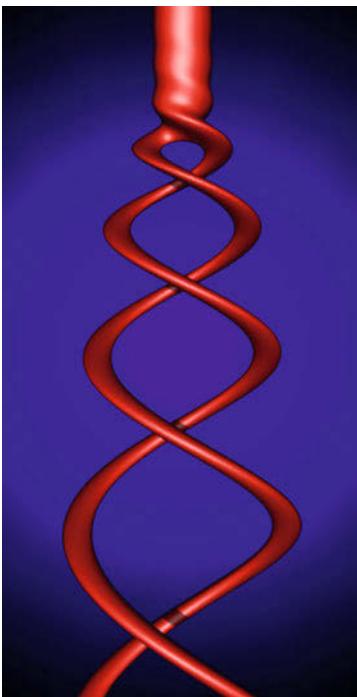
Newton's Gesetze der Mechanik → S. 80

Die Kepler'schen Gesetze → S. 10

Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie → S. 130

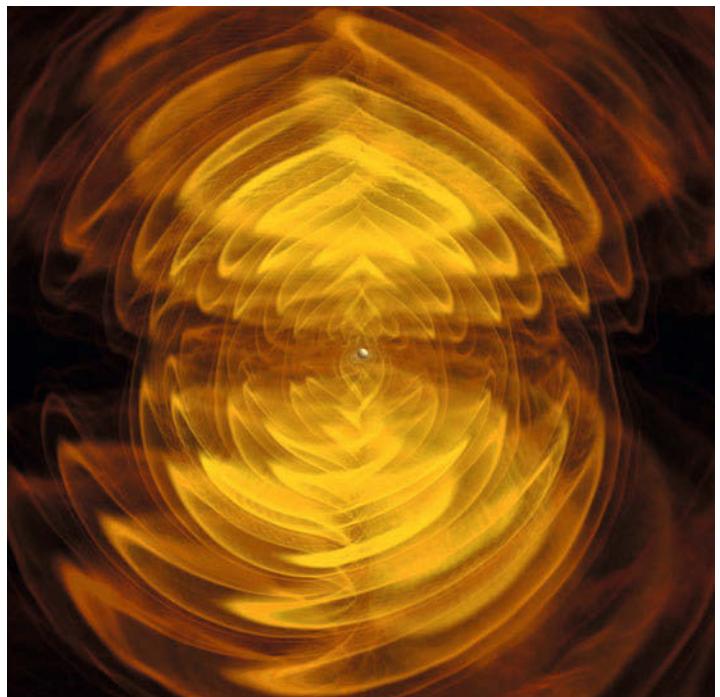
Das liegt daran, dass ein Teil der Bewegungsenergie der beiden schwarzen Löcher zur Verzerrung der sie umgebenden Raumzeit aufgewendet und in Form von Gravitationswellen abgestrahlt wird. Ihr Abstand wird dadurch kontinuierlich geringer, bis sie einander so nahe kommen, dass sich ihre Ereignishorizonte überlappen. Dann geschieht alles sehr schnell: Blitzartig vereinigen sich die beiden schwarzen Löcher, und ein Großteil der verbleibenden Rotationsenergie wird durch eine expandierende Gravitationswelle ins All geschleudert. Zurück bleibt ein einzelnes, rotierendes schwarzes Loch, das so gut wie keine Gravitationsstrahlung mehr abgibt.

Raumzeitdiagramm zweier sich umkreisender und verschmelzender schwarzer Löcher. Die Zeitachse zeigt nach oben.



Die periodischen Verzerrungen der Raumzeit, die durch die Verschmelzung zweier schwarzer Löcher verursacht und als Gravitationswellen abgestrahlt werden, versucht man heutzutage mittels extrem empfindlicher Experimente nachzuweisen (↓). Die erdgebundenen Interferometer LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, Caltech) und Geo600 (am Albert Einstein Institut in Hannover) werden hierbei wahrscheinlich bald vom satellitengestützten eLISA (Laser Interferometer Space Antenna) ergänzt werden.

Polarisation der abgestrahlten Gravitationswellen kurz nach der Vereinigung zweier schwarzer Löcher



Gravitationswellen → S. 166

A. Orth Wenn Schwarze Löcher verschmelzen <http://www.raumfahrer.net/news/astronomie/21042006215145.shtml>

J. Centrella et al. Computing Cosmic Cataclysms IOP Publishing 2008

SXS Project Movies of Extreme Spacetime <http://www.black-holes.org/explore2.html>; Simulationen kollabierender schwarzer Löcher



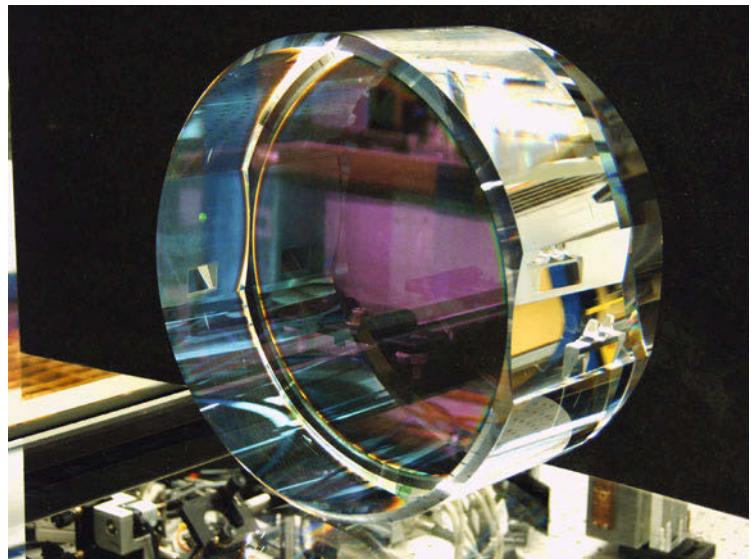
# Gravitationswellendetektoren

## Die Vermessung der schwingenden Raumzeit

Laut der Allgemeinen Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) krümmen massive Objekte die sie umgebende Raumzeit. Und wenn diese Objekte auch noch stark beschleunigt werden, dann breiten sich, wie bei der Beschleunigung eines Körpers im Wasser, Wellen aus – hier: *Gravitationswellen* ( $\downarrow$ ) – die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen.

Die Existenz dieser Wellen wurde von Einstein schon 1916 vermutet, es dauerte jedoch bis 1974, bis man sie wenigstens indirekt nachweisen konnte: Es zeigte sich nämlich, dass der aus zwei sich umkreisenden Neutronensternen bestehende Doppelpulsar PSR1916+13 mit der Zeit immer schneller rotiert. Der Grund hierfür ist, dass sich die beiden Neutronsterne immer näher kommen, und die

Airbild des Gravitationswellendetektors Geo600 bei Hannover



Die Spiegel, die im Detektor Geo600 zum Einsatz kommen, sind Wunderwerke der Technik.

freiwerdende potentielle Energie dabei genau der theoretisch durch Abstrahlung von Gravitationswellen vorhergesagten Energie entspricht. Eine direkte Messung ist jedoch bisher nicht gelungen und heutzutage arbeiten Wissenschaftler fieberhaft an einem solchen Nachweis.

Das Problem hierbei ist, dass Gravitationswellen so extrem schwach sind: Läuft eine Gravitationswelle, die z. B. von einer Kollaps-Supernova ausgesandt worden ist, durch die Erde hindurch, so sorgt die dadurch verursachte Verzerrung der Raumzeit dafür, dass der Durchmesser der Erde nur um einige wenige Atomkernradien schwankt, und das mehrmals pro Sekunde: Eine solche Störung ist natürlich äußerst schwer messbar!

Selbst Einstein hielt es nicht für möglich, jemals mit einer solchen Genauigkeit zu messen. Heutzutage ist dieses Ziel jedoch in greifbare Nähe gerückt: Zurzeit befinden sich mehrere erdgebundene Gravitationswellendetektoren im Betrieb, die mit hochpräzisen Methoden Strecken von einigen Kilometern überwachen. Man hofft, mit ihnen Gravitationswellen zu messen, die von verschmelzenden schwarzen Löchern oder Supernovae ausgesandt worden sind. Die Instrumente sind hierbei so genau, dass z. B. das Experiment Geo600 vom Albert-Einstein-Institut in Hannover die in Bremerhaven einfahrenden Schiffe auf ihren Instrumenten „spürt“.

Der mittlere der drei eLISA/NGO-Satelliten wird ständig den Abstand zu den beiden anderen Satelliten durch das Aussenden von Laserstrahlen messen.

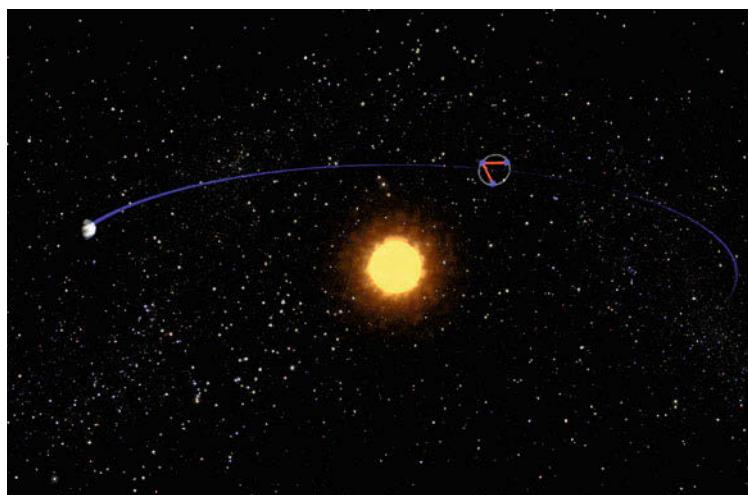


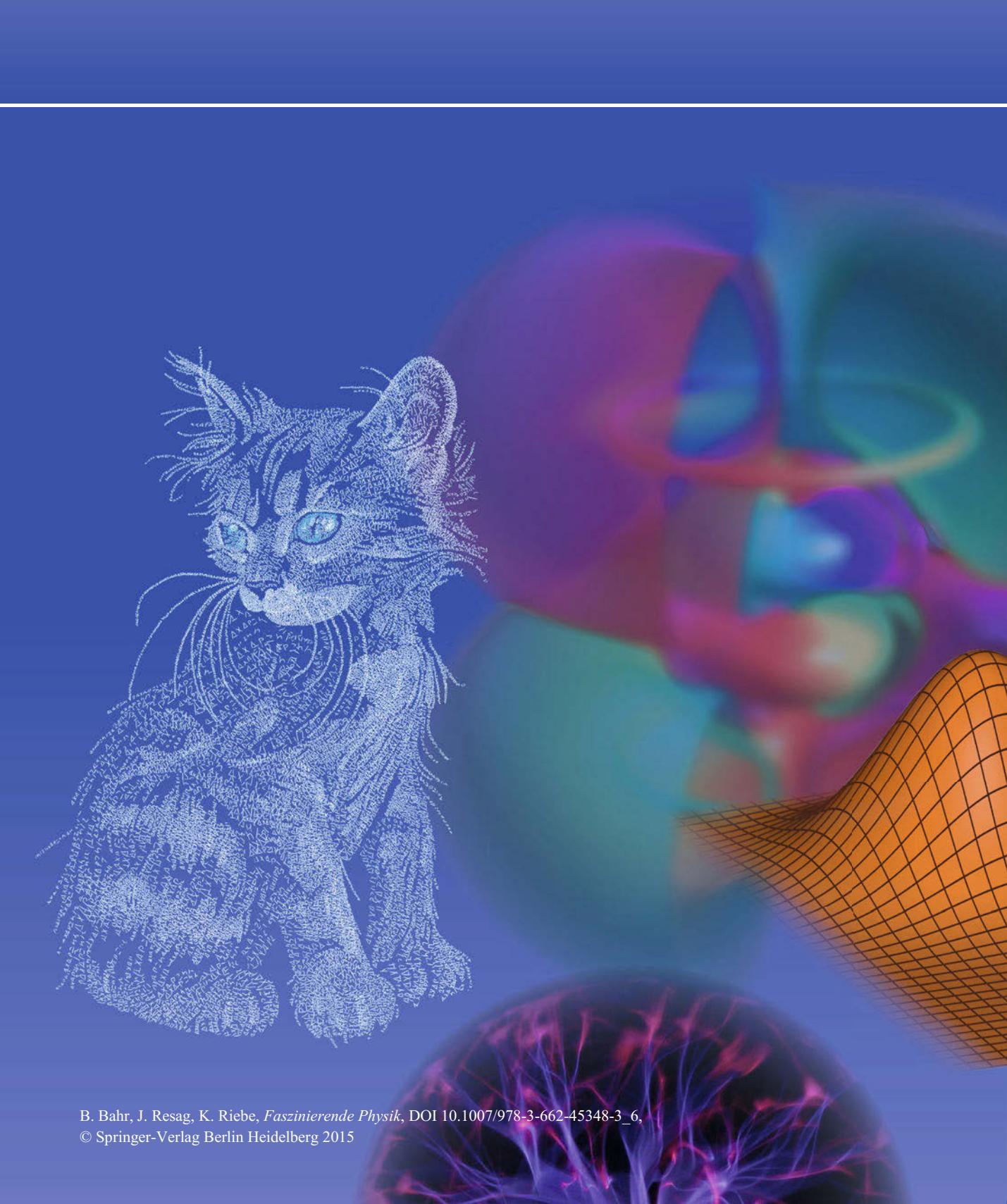
Die größte Hoffnung der Physiker liegt jedoch im Weltall: Schon seit mehr als 10 Jahren befindet sich ein extrem ambitioniertes Raumfahrtprojekt in Planung: das von der ESA geleitete Experiment eLISA/NGO (evolved Laser Interferometer Space Antenna / New Gravitational wave Observatory). Es besteht aus drei Satelliten, die die Spitzen eines Dreiecks mit einer Kantenlänge von über einer Million Kilometern bilden. Dieses Experiment ist damit in der Ausdehnung fast so groß wie die Sonne!

eLISA/NGO soll Gravitationswellen mit extremer Genauigkeit messen. Anders als elektromagnetische Wellen werden Gravitationswellen auf ihrer Reise von nichts aufgehalten, sodass man hofft, mithilfe des neu entstehenden Gebietes der Gravitationswellenastronomie weiter und tiefer ins All schauen zu können als je zuvor.

Der Start von eLISA/NGO ist für 2020 geplant.

Die drei eLISA/NGO-Satelliten sollen die Erde auf ihrer Umlaufbahn verfolgen und dabei einen Abstand von knapp einem Sonnendurchmesser voneinander haben.





# 6 Atome und Quantenmechanik

Was ist die Wellenfunktion und was die Unschärferelation? Was ist das Quantenvakuum und wie verhalten sich Supraflüssigkeiten? Und werden wir bald Quantencomputer verwenden? Diese und andere Fragen lassen sich mithilfe der Quantenmechanik behandeln und teilweise auch beantworten.

Die Quantenmechanik verblüfft uns bis heute mit ihren vielen rätselhaften Facetten. Da verhalten sich Teilchen wie Wellen und Wellen wie Teilchen, da nehmen Elektronen scheinbar mehrere Wege auf einmal, und das Vakuum ist nicht mehr leer. Teilchen überwinden Barrieren, obwohl sie eigentlich nicht genügend Energie dafür haben, und der Zufall entpuppt sich als fundamentales Prinzip der Natur. Unsere klassische Intuition wird hier auf den Kopf gestellt.

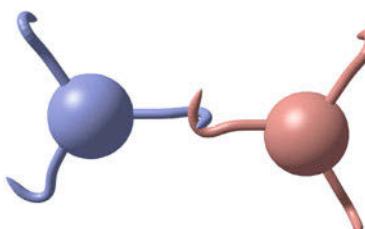
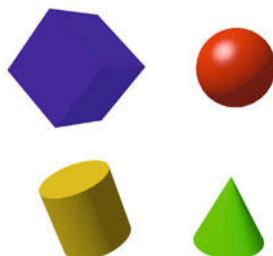
In diesem Teil des Buches schauen wir uns an, warum Materie stabil ist, was der Spin des Elektrons ist und warum er sich nur sehr unvollständig als Eigenrotation verstehen lässt. Auch makroskopische Phänomene wie Supraleitung oder Suprafluidität wollen wir vorstellen. Nicht zuletzt werden wir den Laser genauer betrachten und auch den Quantencomputer. Alle diese Phänomene lassen sich mit der Quantenmechanik präzise beschreiben – doch was die Quantenmechanik für unser Verständnis der physikalischen Realität bedeutet, darüber herrscht auch fast einhundert Jahre nach ihrer Entstehung noch keine Einigkeit.

## Das Bohr'sche Atommodell

### Wie kann man sich ein Atom vorstellen?

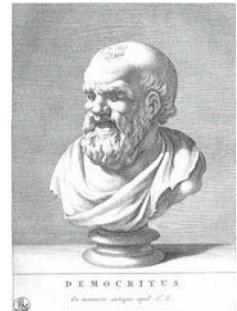
Die Vorstellung, dass die Materie, die uns umgibt, aus kleinen, unteilbaren Bausteinen aufgebaut sei, ist schon über 2400 Jahre alt: Damals waren es der Philosoph Leukipp und sein Schüler Demokrit, die annahmen, dass es unvorstellbar kleine, nicht weiter unterteilbare Bausteine gibt, die sie *Atome* nannten (vom griechischen *ἄτομος*, „das Unteilbare“). Sie stellten sich vor, dass diese Atome, von denen es verschiedene Sorten geben sollte, mit Haken und Ösen ausgestattet sind, sodass sie sich miteinander verbinden, aber sich auch wieder voneinander lösen konnten. So würde z. B. aus lauter winzigen „Steinatomen“ ein fester Stein.

Demokrit und Leukipp stellten sich Atome als geometrische Objekte mit verschiedensten Formen vor.



Nicht nur in der Antike, auch zu Daltons Zeiten stellte man sich vor, dass Atombindungen durch Haken und Ösen realisiert würden.

Natürlich war das zu dieser Zeit reine Spekulation, denn ein Atom hatte noch niemand direkt gesehen. Auch deshalb wurde Demokrit damals von Zeitgenossen (wie Sokrates) verspottet. Und so geriet das Modell für lange Zeit in Vergessenheit.

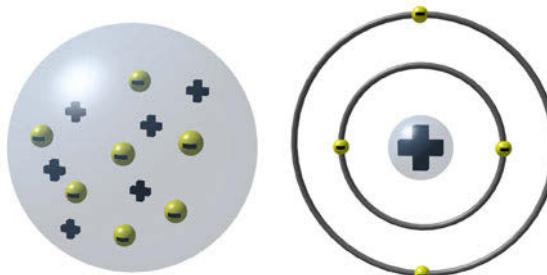


Demokrit

Erst Anfang des 19. Jahrhunderts, mit dem Aufkommen der Chemie, fanden die modernen Naturwissenschaftler zurück zur Atomtheorie. Es war John Dalton, der annahm, dass es zu allen damals bekannten chemischen Stoffen entsprechende Atomsorten gab, die sich nur in ganz bestimmten Verhältnissen miteinander verbinden konnten. Diese Hypothese konnte bereits eine Menge von chemischen Beobachtungen erklären, aber eine wirkliche Vorstellung von Atomen hatte man damit immer noch nicht erlangt.

Erst zu Anfang des 20. Jahrhunderts, als man begann, durch immer genauere Experimente die Struktur des Atoms selbst zu entschlüsseln, fanden Physiker wie J. J. Thomson und Ernest Rutherford heraus, dass das Atom ein positiv geladenes Zentrum besitzt, das von negativ geladenen Elektronen umgeben ist.

Im Jahre 1913 stellte der dänische Physiker Niels Bohr dann sein bis heute berühmtes Atommodell vor: Das Atom besteht dabei aus einem positiv geladenen Kern,



Die Experimente Thomsons zeigten, dass Atome negativ geladenen Teilchen enthalten müssen. Man stellte sich vor, dass diese Elektronen im Atom eingebettet waren wie Rosinen im Kuchen (links). Erst Bohr formte die Vorstellung eines positiv geladenen Kerns, der von den negativ geladenen Elektronen umkreist wird (rechts).

der fast die gesamte Masse in sich vereint und von Elektronen auf stabilen Kreisbahnen umrundet wird – fast wie ein winziges Planetensystem.

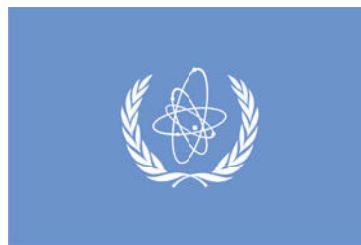
Dabei sind nur ganz bestimmte Abstände zwischen Kern und Elektron erlaubt, und je nach Abstand besitzen die Elektronen unterschiedliche Energien. Alle Elektronen desselben Abstandes gehören zu einer sogenannten *Schale*, und in jede Schale passen nur eine gewisse Anzahl von Elektronen.

Dieses Modell konnte nicht nur das Verhalten einer ganzen Reihe von Atomen (nämlich denen der sogenannten Hauptgruppen) erklären, sondern war auch so anschaulich, dass dieses Bild bis heute unsere Atomvorstellungen prägt. So findet es sich zum Beispiel in der Flagge der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA.

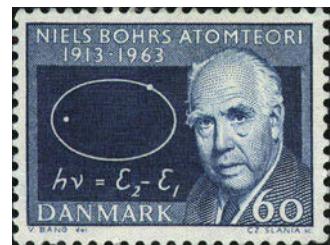
Teilweise konnte das Bohr'sche Atommodell sogar erklären, warum sich z. B. ein Wasserstoff ( $H$ ) und ein Chloratom ( $Cl$ ) zu Salzsäure ( $HCl$ ) verbinden können: Das Wasserstoffatom besitzt ein Elektron – dem Chloratom fehlt genau ein Elektron, um seine äußerste Schale ganz zu füllen – und so ist es energetisch günstig, wenn beide sich verbinden. Zwischen ihnen kann dabei ein Elektron den Besitzer wechseln, und der positiv geladenen Wasserstoffkern ( $H^+$ ) und das negativ geladene Chloratom ( $Cl^-$ ) bleiben einfach aufgrund der elektrostatischen Anziehungskraft aneinander hängen.

Das Bohr'sche Atommodell hatte allerdings immer noch Erklärungslücken: Warum durften die negativ geladenen Elektronen den positiven Kern nur in ganz bestimmten Abständen umkreisen? Und was hinderte sie daran, aufgrund der elektrostatischen Anziehungskraft einfach in der Kern hineinzufallen? Diese Fragen konnten erst später in einer umfassenden quantenmechanischen Beschreibung der Atome geklärt werden (↓). Leider bedeutet die quantenmechanische Behandlung, dass ein gewisser Anteil der Anschauung der Atome verlorengешt.

Die Flagge der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA)



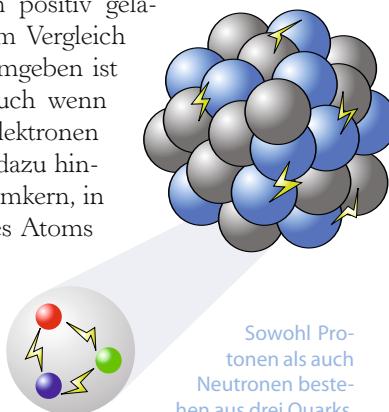
Dänische Briefmarke zum 50-jährigen Geburtstag des Bohr'schen Atommodells



## Atomkerne

Seit hundert Jahren bekannt und doch nicht im Ganzen verstanden

Während viele Physiker um 1900 das Atom noch als eine fundamentale Einheit betrachteten, gelangte man mit den Experimenten von Rutherford im Jahre 1911 zu der Erkenntnis, dass ein Atom selbst auch eine Struktur besitzt und aus einem positiv geladenen Kern besteht, der von im Vergleich dazu sehr leichten Elektronen umgeben ist (Bohr'sches Atommodell ↓). Auch wenn man relativ einfach einzelne Elektronen aus dieser Hülle entfernen oder dazu hinzufügen konnte, so blieb der Atomkern, in dem rund 99,95 % der Masse des Atoms enthalten ist, davon unbeeinflusst. Insofern passte diese Einsicht weiterhin gut mit der Vorstellung der „Unteilbarkeit“ der Atome zusammen

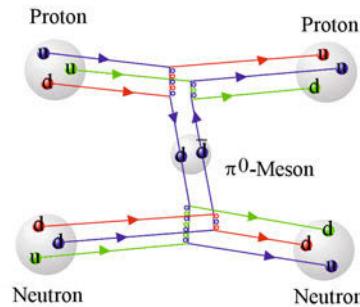


Erst 1917 wies Ernest Rutherford durch weitere Experimente nach, dass auch Atomkerne veränderbar waren, indem er durch Beschuss mit Alphateilchen (Heliumkernen) Stickstoffkerne in Sauerstoffkerne umwandelte. Dass Atomkerne in der Tat nicht ganz unveränderlich waren, hatte man zwar schon durch die Entdeckung der Radioaktivität (↓) einige Jahre zuvor vermutet, aber Rutherford's Experimente waren der erste direkte Nachweis.

Bei dieser Gelegenheit entdeckte Rutherford auch, dass Atomkerne wiederum eine Substruktur besitzen und mehrere Protonen enthalten – und zwar gerade so viele, wie sich Elektronen in der Hülle befinden.

Im Jahre 1932 entdeckte dann James Chadwick den zweiten noch fehlenden Baustein in den Atomkernen: das Neutron. Diese beiden *Nukleonen* formen zusammen den Atomkern.

Doch was genau hält Protonen und Neutronen im Kern zusammen? Letztere sind elektrisch neutral, die Protonen aber sind allesamt positiv geladen, sollten sich also abstoßen. Die Antwort liegt in einer weiteren Substruktur, die die sogenannte *Kernkraft* erzeugt (nicht zu verwechseln mit der Energie, die in Kernkraftwerken aus z. B. Uran gewonnen wird). Diese Kernkraft ist das Überbleibsel der starken Kraft, die zwischen den Bestandteilen der Protonen und Neutronen – den Quarks – wirkt (starke WW ↓).



Die starke Wechselwirkung zweier Nukleonen kann man durch den Austausch eines Mesons veranschaulichen.

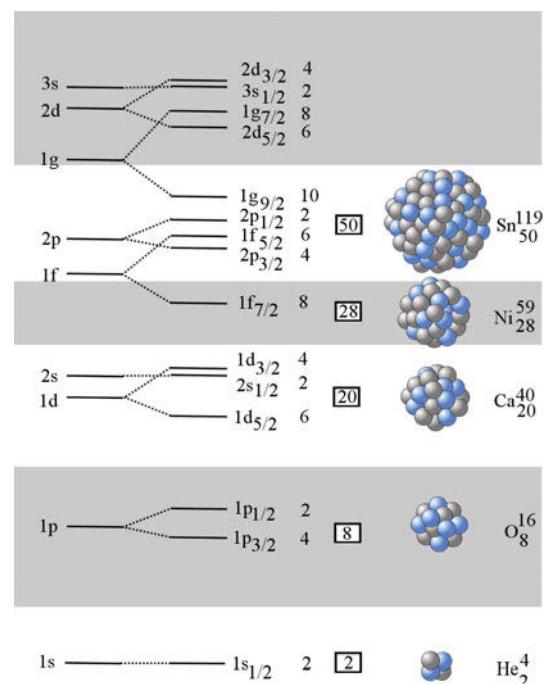
Die Kernkraft führt letztlich zu einer Anziehung der farbneutralen Nukleonen untereinander. Sie hat nur eine sehr kurze Reichweite, ist allerdings deutlich stärker als die abstoßende elektrische Kraft. Daher halten Atomkerne auch zusammen und fliegen trotz der positiven Ladungen der Protonen nicht auseinander.

Obwohl es heute bereits hinreichend gute mathematische Beschreibungen der Kernkraft gibt, ist sie nicht bis ins letzte Detail verstanden. Und so ist die genaue Struktur der Atomkerne, zum Beispiel die Frage wie sich die einzelnen Nukleonen im Kern zueinander anordnen, bis heute nicht vollständig bekannt. Zwar weiß man, dass Atomkerne genau wie auch die Elektronen in der Hülle diskrete Energieniveaus haben, sodass sie zu – im Vergleich zu diesen etwa 1000 bis 10000 Mal energiereicheren – Quantensprüngen angeregt werden können. Aber die exakte Berechnung dieser Energieniveaus gestaltet sich sehr schwierig, denn der Kern als Ganzes ist ein sehr komplexes System aus stark miteinander wechselwirkenden Einzelteilen. So gibt es zwar verschiedenen vereinfachende Modelle, die jeweils gewisse Aspekte der Kerne gut erklären, aber keines ist vollständig und beschreibt den Kern in seiner Gänze.

In dem sogenannten *Tröpfchenmodell* zum Beispiel wird angenommen, dass sich die Nukleonen im Kern wie eine tropfenförmige, positiv geladenen Flüssigkeit verhalten. Obwohl dieses Modell erst einmal sehr naiv anmutet, kann man mit seiner Hilfe recht genau berechnen, welche Atomkerne stabil und welche instabil, also radioaktiv, sind.

Im *Schalenmodell* hingegen wird angenommen, dass sich die Protonen und Neutronen genau wie auch die Elektronen der Hülle auf Schalen anordnen. Ein Kern

nimmt dabei Energie auf, indem ein Nukleon von einer niedrigeren Schale in eine noch nicht vollständig gefüllte höhere Schale übergeht. Obwohl dieses Modell auch mit starken Vereinfachungen arbeitet (im Gegensatz zu den Elektronen spüren die Nukleonen ja kein geladenes Zentrum, um das sie sich herum anordnen müssten), lassen sich hieraus in einigen Fällen passable Werte für die Bindungsenergien und die Energieniveaus im Kern berechnen.



Die Lücken zwischen den Energieniveaus im Atomkern trennen die einzelnen Schalen voneinander. Kerne, deren Protonen und/oder Neutronenzahl „magisch“ ist (die entsprechenden Schalen also vollkommen gefüllt haben) sind besonders stabil.

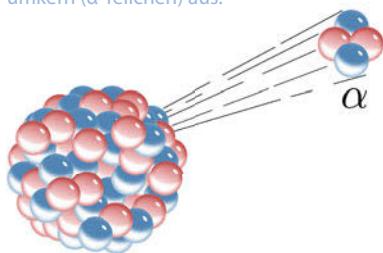
## Radioaktiver Zerfall

### Atomkerne aus dem Gleichgewicht

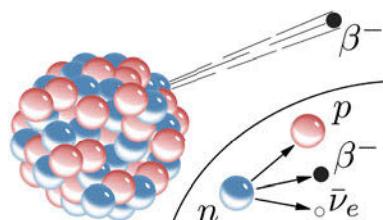
Obwohl sich das Wort „Atom“ vom griechischen  $\alpha\tauομος$  („das Unteilbare“) ableitet, kann man Atome – mit dem entsprechenden Aufwand – in ihre Bestandteile zerlegen oder ineinander umwandeln. Einige Atome sind dazu jedoch auch von allein in der Lage. Ende des 19. Jahrhunderts entdeckte man Elemente, wie Uran oder Thorium, die von sich aus eine ionisierende Strahlung abgeben. Noch bevor Rutherford die Existenz der Atomkerne explizit nachweisen konnte, stellte er daher bereits die Hypothese auf, dass diese *radioaktive Strahlung*, wie Marie Curie sie getauft hatte, durch die Umwandlung einer Atomsorte in eine andere verursacht wird.

Heute wissen wir, dass radioactive Strahlung entsteht, wenn ein instabiler Atomkern ( $\downarrow$ ) in einen stabileren Zustand übergeht. Da die Menge des ursprünglichen Stoffes bei diesem Prozess abnimmt, spricht man hierbei auch von *radioaktivem Zerfall*. Es gibt im Wesentlichen drei Arten radioaktiver Strahlung, entsprechend der drei verschiedenen Arten, auf die ein Atomkern spontan zerfallen kann.

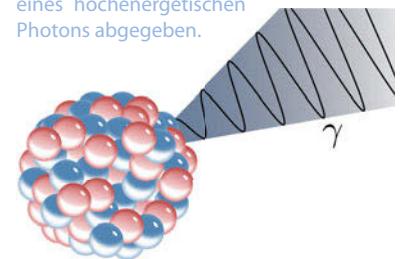
Beim  $\alpha$ -Zerfall sendet der Kern einen Heliumkern ( $\alpha$ -Teilchen) aus.



Beim  $\beta^-$ -Zerfall wandelt sich im Kern ein Neutron in ein Proton, ein Antineutrino und ein Elektron um, wobei die letzteren beiden den Kern als Strahlung verlassen.



Beim  $\gamma$ -Zerfall geht der Kern von einem angeregten in einen stabilen Zustand über – die überschüssige Energie wird in Form eines hochenergetischen Photons abgegeben.



Atomkerne → S. 174

Welle-Teilchen-Dualismus → S. 178

Wellenfunktion → S. 180

Der Tunneleffekt → S. 182

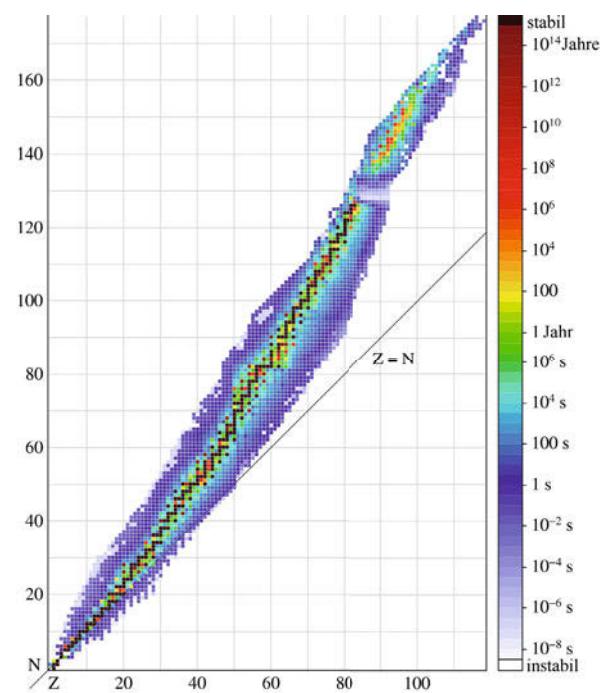
Der so genannte  $\alpha$ -Zerfall tritt bei Atomkernen auf, die sehr schwer sind und eine große Anzahl an Protonen besitzen. Diese positiv geladenen Protonen im Kern müssten sich eigentlich abstoßen, werden jedoch von der kurzreichweiten Kernkraft zusammengehalten, die um einiges stärker ist als die abstoßende elektrische Kraft, wobei Letztere jedoch eine deutlich höhere Reichweite hat. Da durch die Effekte der Quantenmechanik ( $\downarrow$ ) die Nukleonen im Kern keinen festen Ort haben, sondern über einen gewissen Aufenthaltsbereich verschmiert sind, gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Protonen und zwei Neutronen – eine in sich sehr stabile Kombination, entsprechend einem Heliumkern, auch  $\alpha$ -Teilchen genannt – so weit vom Rest der Kernteilchen entfernen, dass sie die anziehende Kernkraft nicht mehr stark genug spüren, sondern hauptsächlich die abstoßende elektrische Kraft. Das  $\alpha$ -Teilchen durchtunnelt dadurch die Potentialbarriere des Kerns und wird mit einer Geschwindigkeit von einigen Prozent der Lichtgeschwindigkeit aus dem Kern ausgestoßen (Tunneleffekt  $\downarrow$ ).

Der  $\beta$ -Zerfall wiederum tritt in Kernen mit einem ungünstigen Verhältnis zwischen Protonen und Neutronen auf. Hat ein Kern einen deutlichen Überschuss an Neutronen, so kann sich eines davon durch die schwache Wechselwirkung spontan in ein Proton, ein Elektron, und ein Antineutrino umwandeln. Wenn dies geschieht, dann verbleibt das Proton im Kern, und Neutrino und Elektron werden abgestrahlt. Diese negativ geladenen Elektronen werden dabei als  $\beta^-$ -Strahlung bezeichnet.

Die Regeln der schwachen Wechselwirkung lassen allerdings auch den (etwas selteneren) spiegelbildlichen Prozess zu: In Kernen mit einem Überschuss an Protonen kann sich eines in ein Neutron, ein Antielektron und ein Elektronen neutrino umwandeln. Das hierbei ausgesendete positiv geladene Antielektron (Positron) bezeichnet man dabei als  $\beta^+$ -Strahlung.

Der  $\gamma$ -Zerfall schließlich bezeichnet den Übergang eines Atomkerns von einem angeregten Zustand in einen stabileren Zustand mit niedrigerer Energie. Die überschüssige Energie wird in Form von energiereichen Photonen abgestrahlt, die man auch als  $\gamma$ -Quanten bezeichnet. Weil angeregte Atomkerne meist eine Folgeerscheinung von Kernspaltungen oder anderen vorangegangenen Zerfällen sind, tritt  $\gamma$ -Strahlung meist in Begleitung von anderen radioaktiven Vorgängen auf.

Die Unterteilung in  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  bezieht sich auf die Eindringtiefe der jeweiligen Strahlung in feste Materie. Während  $\alpha$ -Strahlung bereits nach fünf Zentimetern durch die Luft oder durch ein einfaches Blatt Papier aufgehalten werden kann, benötigt man bei  $\beta$ -Strahlung bereits eine dünne Metallplatte.  $\gamma$ -Strahlung hingegen kann sehr tief in Materie eindringen. Wegen seiner ho-



Halbwertszeiten der bekannten Isotope. Jedes Quadrat entspricht einem Kern mit  $Z$  Protonen und  $N$  Nukleonen (Protonen und Neutronen).

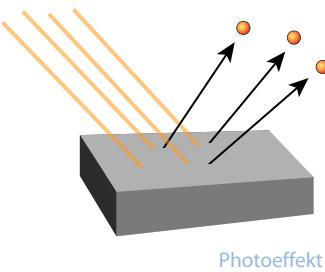
hen Dichte hält Blei dabei die  $\gamma$ -Strahlen am effektivsten auf, es werden jedoch je nach Strahlungsenergie einige Millimeter bis Zentimeter für eine vollständige Abschirmung benötigt. Dies macht gerade Letztere für Lebewesen besonders gefährlich, denn tief in Gewebe eindringende Strahlung kann nicht nur Verbrennungen an der Hautoberfläche, sondern auch Mutationen in den Zellen und der DNA verursachen.



# Welle-Teilchen-Dualismus

## Teilchen bewegen sich in Wellen

Wellen und Teilchen hängen in der Quantenmechanik eng miteinander zusammen. So ist Licht einerseits eine elektromagnetische Welle, wie Interferenzexperimente zeigen, bei denen Lichtwellenberge auf -berge oder -täler treffen und sich verstärken oder auslöschen. Andererseits kann Licht beim sogenannten *Photoeffekt* einzelne Elektronen aus einer Metalloberfläche herausstoßen, wobei dies mit umso größerer Wucht geschieht, je kürzer die Lichtwellenlänge ist – ein Verhalten, das sich nur durch den Teilchencharakter des Lichtes verstehen lässt.



Photoeffekt

Licht besteht also aus einem Strom einzelner Teilchen (sogenannter *Photonen*), welche die Elektronen aus der Oberfläche herausstoßen.

Für die genaue Ausarbeitung dieser Erkenntnis erhielt Albert Einstein im Jahr 1921 den Nobelpreis für Physik – er hatte sie bereits im Jahr 1905 in seiner Doktorarbeit formuliert.

Frequenz  $f$  und Wellenlänge  $\lambda$  der elektromagnetischen Lichtwelle legen dabei die Energie  $E$  und den Impuls  $p$  der Photonen fest:

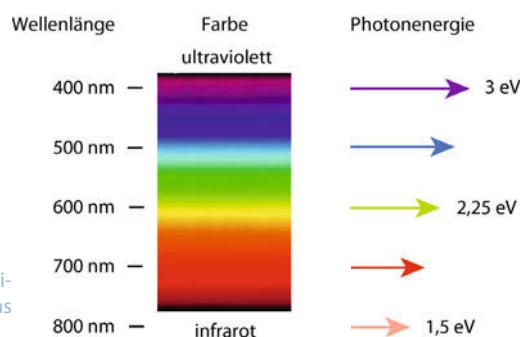
$$E = h \cdot f \text{ und } \lambda = h/p$$

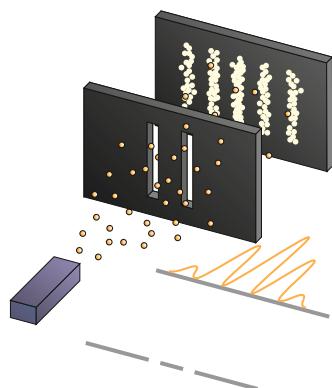
Wellenlängen und zugehörige Photon-Energien für das sichtbare Lichtspektrum

Hier ist  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  eine Naturkonstante, deren Wert im Experiment bestimmt werden muss. Sie heißt *Planck'sches Wirkungsquantum* und verknüpft Teilchen- mit Welleneigenschaften.

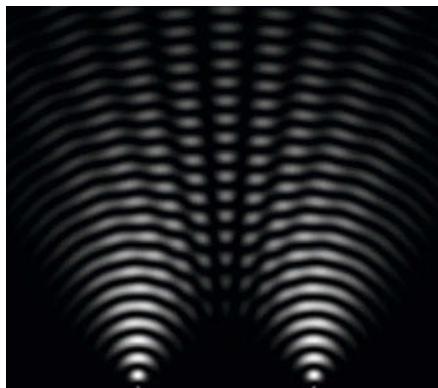
So wie Photonen mit Lichtwellen zusammenhängen, so hängen auch beispielsweise Elektronen mit Elektronenwellen zusammen und zwar nach genau denselben Formeln wie bei den Photonen und auch allen anderen Teilchen. Wenn man beispielsweise einen Elektronenstrahl durch einen sehr feinen Doppelspalt schickt, so findet man auf einer Fläche dahinter ein Interferenzmuster aus Streifen mit vielen und mit wenigen Elektronentreffern, ganz analog zum Intensitätsmuster von Laserlicht hinter einem solchen Doppelspalt.

Offenbar muss man den Durchgang der Elektronen durch den Doppelspalt wie bei Licht durch eine Welle beschreiben, wobei eine hohe Wellenintensität einer hohen Wahrscheinlichkeit entspricht, ein Elektron anzutreffen.





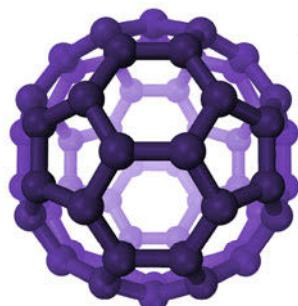
Doppelspalteperiment mit Elektronen



Interferenz von Wellen hinter einem Doppelspalt

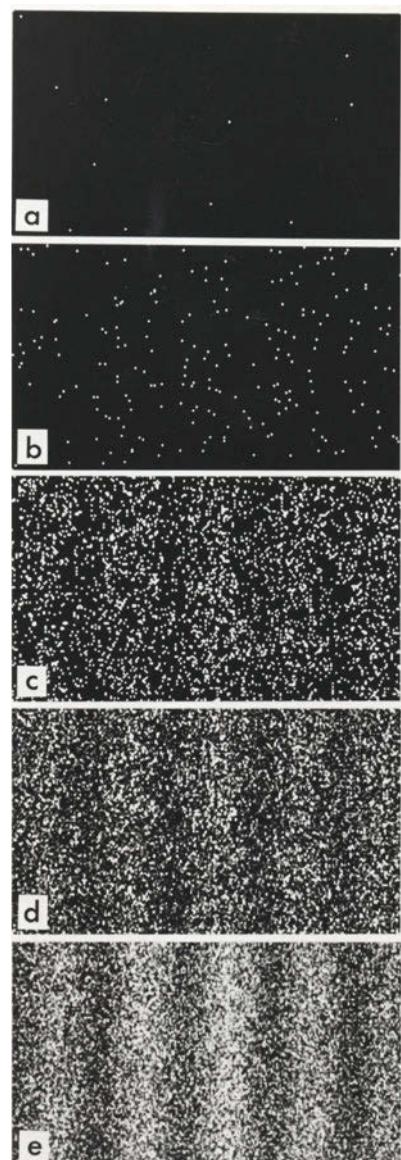
Im Experiment kann man nämlich beobachten, wie auf der Fläche hinter dem Doppelspalt nach und nach immer mehr einzelne Elektronen wie zufällig an verschiedenen Stellen auftreffen, wobei sich schließlich das streifenförmige Interferenzmuster herausbildet.

Teilchenbahnen gibt es dabei nicht mehr. Alles was die Quantenmechanik tun kann, ist die Auftreffwahrscheinlichkeiten für die Elektronen zu berechnen. Der Ort eines einzelnen Elektrons ist dagegen in der Natur grundsätzlich nicht festgelegt, d. h. der Wahrscheinlichkeitscharakter der Quantenmechanik ist grundsätzlicher Natur und hat nichts mit unge nauen Messungen zu tun (siehe Wellenfunktion ↓).

Das Buckminster-Fulleren C<sup>60</sup>

Mittlerweile konnten Interferenzmuster auch beispielsweise für Fullerenmoleküle nachgewiesen werden, die immerhin aus 60 Kohlenstoffatomen bestehen (Anton Zeilinger 1999). Auch für sie gilt also der Welle-Teilchen-Dualismus.

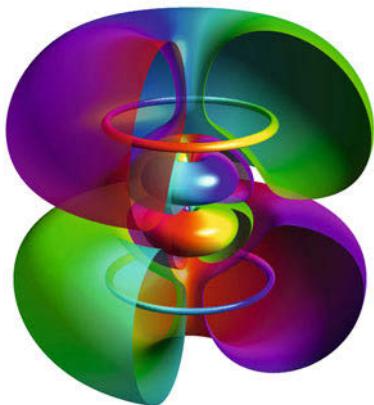
Reales Doppelspalteperiment mit 11 (a), 200 (b), 6000 (c), 40000 (d) und 140000 (e) Elektronen



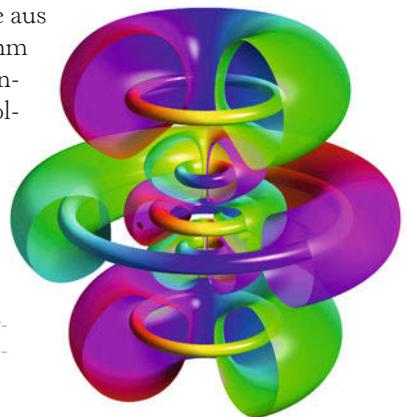
## Wellenfunktion

### Verschmierte Teilchen

Anfang des 20. Jahrhunderts häuften sich die Hinweise, dass die Materie aus kleinen Bausteinen, Elementarteilchen genannt, aufgebaut ist. Zuerst nahm man an, dass die Elementarteilchen kleinen Kugeln ähnelten, die sich, ähnlich wie alle Objekte unserer Erfahrungswelt, auf Flugbahnen bewegen, kollidieren und voneinander abprallen. Als man aber begann, experimentell tiefer in die Bereiche des Mikrokosmos vorzudringen, wurde schnell klar, dass Elementarteilchen ganz anderen Gesetzen folgen als, sagen wir einmal, Murmeln oder Steine.

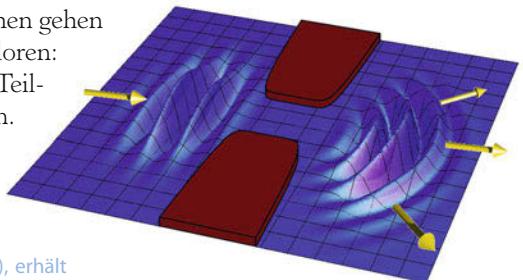


Zwei Schwingungszustände der Wellenfunktion eines Elektrons im Wasserstoffatom. Die Farbe gibt die ortsabhängige Phase der Wellenfunktion an.



Eine Murmel kann man (zumindest im Prinzip) zu jedem Zeitpunkt vollständig durch einige wenige Zahlen beschreiben, zum Beispiel Ort und Geschwindigkeit, Drehimpuls, etc. Bei Elementarteilchen ist dies nicht mehr möglich; stattdessen beschreibt man sie durch ein räumlich ausgedehntes Feld. Die Bewegungsgleichungen für dieses Feld ähneln denen von (zum Beispiel elektromagnetischen) Wellen, weshalb das Feld **Wellenfunktion** genannt wird.

Durch die Wellennatur der Teilchen gehen jedoch typische Teilcheneigenschaften verloren: Man kann über die physikalischen Größen, die ein klassisches Teilchen beschreiben würden, nur noch statistische Aussagen treffen. Außerdem sind gewisse Größen, wie zum Beispiel Ort und Geschwindigkeit des Teilchens, zueinander komplementär.



Eine Wellenfunktion, die senkrecht zu ihrer Flugrichtung im Ort beschränkt wird (z.B. indem man sie durch einen engen Spalt schickt), erhält dadurch eine große Impulsunschärfe in dieselbe Richtung, wodurch sie sich ausbreitet.

Das bedeutet: Je genauer der Ort des Teilchens bekannt ist, desto ungenauer ist seine Geschwindigkeit bestimmt und umgekehrt.

Die Welleneigenschaften der kleinsten Bausteine werden ganz besonders bei den Elektronen deutlich, die sich in einem Atom befinden. Anders als die häufig benutzte Analogie zum Sonnensystem vermuten lässt, umkreisen Elektronen den Atomkern nicht, denn dafür müssten sie gleichzeitig einen scharf definierten Ort

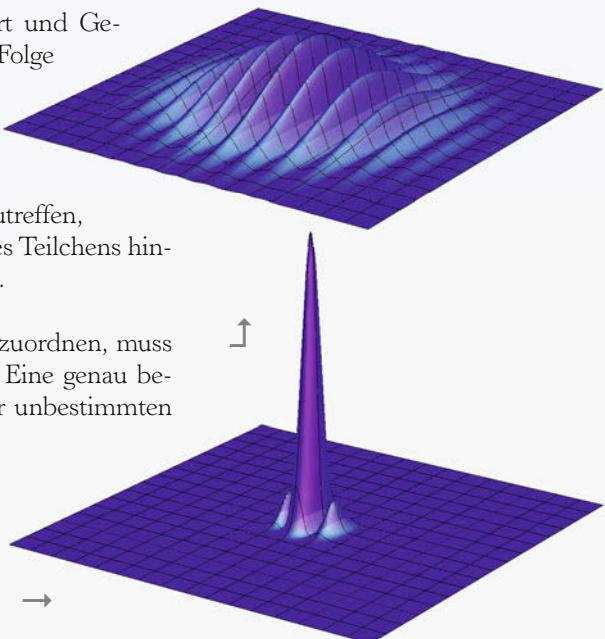
und eine scharfe Geschwindigkeit besitzen. Stattdessen kann man sich die Wellenfunktion des Elektrons als dreidimensionale, stehende Welle vorstellen. Ebenso wie bei einer schwingenden Instrumenten-Saite gibt es im Atom nur bestimmte „erlaubte“ Schwingungsmoden der Wellenfunktion. Deswegen sind für das Elektron im Atom nur bestimmte Energieniveaus erlaubt, zwischen denen es jedoch per „Quantensprung“ hin- und herwechseln kann, wenn es z. B. durch einen Lichtstrahl dazu angeregt wird (Franck-Hertz-Versuch ↓).

### Die Komplementarität von Ort und Impuls

Die Komplementarität von Messgrößen wie Ort und Geschwindigkeit ist nicht, wie oft behauptet, eine Folge von ungenauen Messungen, sondern eine fundamentale Eigenschaft der Wellenfunktionen: An den Stellen, an denen das Betragsquadrat der Wellenfunktion groß ist, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, das Elementarteilchen anzutreffen, wenn man danach sucht. Die Geschwindigkeit des Teilchens hingegen ist mit der Wellenlänge der Welle verknüpft.

Um nun einer Welle eine genaue Wellenlänge zuzuordnen, muss sie über einen großen Bereich ausgebreitet sein. Eine genau bestimmte Geschwindigkeit führt so zu einem sehr unbestimmten Ort.

Je stärker hingegen die Welle an einem Ort konzentriert ist, desto weniger genau kann man ihr eine Wellenlänge zuschreiben, weswegen ein genau bestimmter Ort zu einer sehr ungenau bestimmten Geschwindigkeit führt.



# Der Tunneleffekt

## Teilchen ohne Aufenthaltserlaubnis

Die Konzepte von Energie und Potential sind zentral für das Verständnis der klassischen Physik: Das Potential gibt beispielsweise an, wie viel Energie ein Objekt besitzen muss, um einen bestimmten Raumbereich zu betreten. Hat es genug, so darf es sich an einen bestimmten Punkt im Raum befinden (zum Beispiel auf einem Berg oder in einem Tal), und die überschüssige Energie manifestiert sich dann meist als Geschwindigkeit. Hat es hingegen nicht genug Energie, so darf es den Raumbereich einfach nicht betreten.

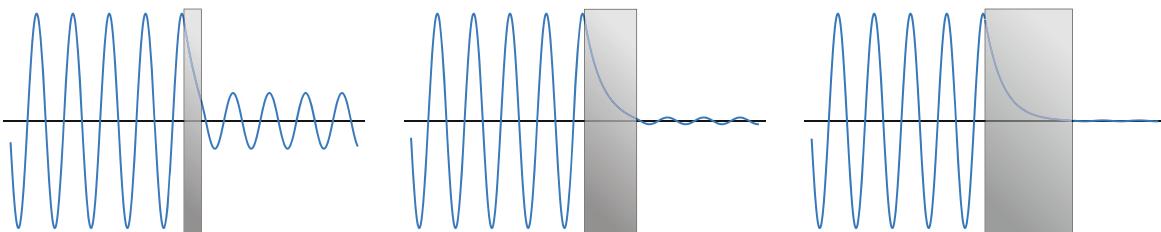
Durch diese Sichtweise kann man zum Beispiel das Verhalten von Kinderschaukeln verstehen. Diese erhalten ihre Energie durch einen Anschwung, und je mehr sie davon besitzen, desto höher schwingen sie. Dabei werden sie immer langsamer, und am höchsten Punkt ihrer Bahn – dem Punkt mit dem höchsten Potential – ist ihre Energie gerade ganz aufgebraucht. Danach fällt die Schaukel wieder in Bereiche mit geringerem Potential zurück, was sie auch wieder schneller werden lässt – da die Gesamtenergie erhalten ist, ist die Schaukel am tiefsten Punkt am schnellsten. Das Schwingen der Schaukel kann man also gut als ständiges Wandeln von Energie und ständiges Anrennen gegen einen Potential-

berg verstehen. Doch nicht nur Schaukeln, sondern auch Planetenbewegungen, das Verhalten von Sprungfedern oder die Flugbahn von Skateboardfahrern kann man mit dem Konzept des Potentials begreifen.

Wie so oft ist allerdings die Physik auf der Ebene der Elementarteilchen ein wenig anders als in unserer klassischen Erfahrung: Die Quanteneigenschaften der Materiebausteine haben zur Konsequenz, dass Objekte nicht als kleine, punktförmige Kugeln mit definierter Flugbahn beschrieben werden können, sondern als über den Raum ausgedehnte Wellenfunktionen ( $\downarrow$ ), die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens angeben. Solange man also nicht nachsieht, ist ein Elementarteilchen somit „an mehreren Orten gleichzeitig“. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen an einem bestimmten Ort anzutreffen, umso geringer, je höher dort das Potential ist: „Ein Teilchen lebt lieber in einem Tal als auf einem Berg.“

Nach den Gesetzen der Quantenwelt sinkt eine Wellenfunktion mit einer bestimmten Energie entgegen der klassischen Intuition an den Stellen, an denen das Po-

*Je breiter eine Potentialbarriere ist, desto geringer ist der Anteil der Wellenfunktion, der hindurchtunnelt.*



Wellenfunktion → S. 180

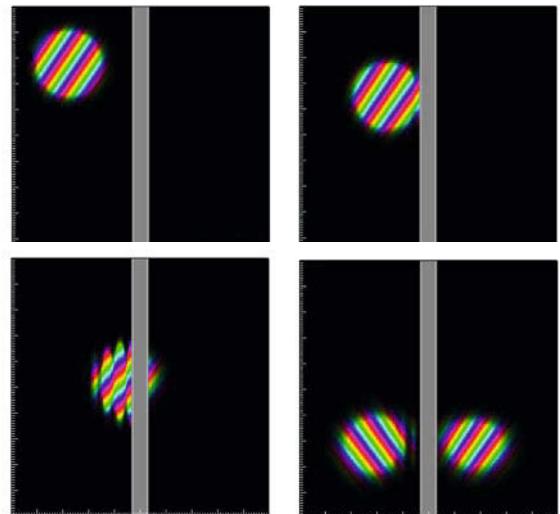
J. Gribbin *Auf der Suche nach Schrödingers Katze: Quantenphysik und Wirklichkeit* Piper Taschenbuch, 8. Auflage 2010  
M. Überacker, MPI für Quantenoptik *Der Tunnelblick* <http://www.wellderphysik.de/gebiete/theorie/quanteneffekte/tunnelblick/>; Versuchsbeschreibung zur Beobachtung von getunnelten Elektronen

tential nach klassischer Vorstellung eigentlich zu hoch wäre, jedoch nicht sofort auf null ab. In den „klassisch verbotenen“ Bereichen sinkt die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen anzutreffen, zwar exponentiell ab, aber sie ist nicht exakt null.

Das führt zu einem interessanten Phänomen bei sogenannten *Potentialbarrieren*, also Orten mit sehr hohem Potential, die zwei Bereiche mit niedrigem Potential voneinander trennen. Befindet sich ein Teilchen mit geringer Energie in einem der beiden Bereiche, so darf es nach den Regeln der klassischen Physik den anderen nie betreten, da es die Potentialbarriere nicht überwinden kann: Die Energie reicht eigentlich nicht aus, über den Berg zu kommen. Nach den Gesetzen der Quantenphysik allerdings geht das schon! Zwar gilt, dass je höher und breiter die Potentialbarriere zwischen den beiden Bereichen ist, desto geringer die Wahrscheinlichkeit dafür; aber trotzdem ist sie nie ganz null. Ein mikroskopisches Teilchen kann also den klassisch verbotenen Grenzbereich „durchtunneln“: Es kann durch den Berg ins nächste Tal gelangen.

Dieser Tunneleffekt ist in der Quantenwelt allgegenwärtig und für eine Vielzahl der ungewöhnlichen Phänomene auf der mikroskopischen Ebene verantwortlich. So misst das Rastertunnelmikroskop (↓) zum Beispiel den Strom von tunnelnden Elektronen, um so die Struktur von Atomoberflächen abzutasten. Der Alpha-Zerfall von radioaktiven Atomkernen (↓), sowie deren Spaltung, sind ebenfalls nur möglich, weil Bausteine aus dem Kerninneren nach außen tunneln.

Warum aber können Quantenobjekte tunneln und klassische Objekte nicht? Letztere sind doch aus einer Vielzahl von Elementarteilchen aufgebaut, die sich alle



Simulation eines Wellenpaketes – der größere Teil wird an der Barriere reflektiert, ein Teil jedoch wird transmittiert.

nach den Regeln der Quantenphysik verhalten! Die Antwort darauf liegt in der Wahrscheinlichkeit begründet: Je mehr Masse ein Objekt hat, desto schneller fällt die Wellenfunktion im klassisch verbotenen Bereich ab, umso weniger weit also „kommt“ das Teilchen durch den Berg; und insbesondere eben nicht mehr bis ins nächste Tal. Es ist also für einen Menschen streng genommen nicht absolut unmöglich, durch eine Tür hindurchzutunnen, also auf der einen Seite zu verschwinden und auf der anderen zu erscheinen, ohne sich durch den Raum dazwischen bewegt zu haben. Es ist nur sehr, sehr unwahrscheinlich: Man müsste schon eine Zeit lang warten – deutlich länger, als es das Universum schon gibt – bevor es eine nennenswerte Wahrscheinlichkeit gibt, dass eine solche makroskopische Tunnelung auch nur einmal irgendwo im Universum vorkommt.

# Der Franck-Hertz-Versuch

## Energiesprünge in Atomen

Als die Physiker zu Beginn des 20. Jahrhunderts experimentell in die Welt der Atome und Moleküle vordrangen, erlitt ihr Weltbild einen ordentlichen Schock: Die mikroskopischen Materiebausteine verhielten sich ganz anders als die makroskopischen Objekte der Alltagswelt, mit denen wir täglich zu tun haben.

Eine der sonderbaren Eigenschaften von Atomen veränderte das Verständnis von Materie grundlegend und hat bis heute weitreichende Konsequenzen für technische Anwendungen: Im Jahre 1914 bewiesen James Franck und Gustav Hertz in einem bis heute berühmten Versuch, dass man einem Atom nicht beliebige Mengen an Energie zuführen (oder wegnehmen) kann, sondern nur in gewissen Paketen festgelegter Größe, den sogenannten *Quanten*.

Das Herzstück des Versuches ist ein Gas (Franck und Hertz benutzten damals Quecksilber), das den Raum zwischen einer negativ geladenen

Glühkathode und einer positiven Anode ausfüllt. An der Kathode treten ständig Elektronen aus, die wegen der angelegten Spannung in Richtung der Anode beschleunigt werden. Auf ihrem Weg dahin durchqueren die Elektronen das Gas, und stoßen dabei ständig mit den Quecksilberatomen zusammen. An der Anode misst man durch die Gegenspannungsmethode die Geschwindigkeit der

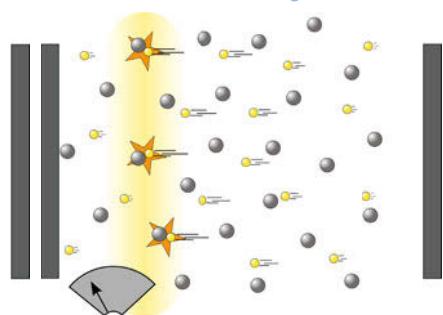
ankommenden Elektronen. So kann man beobachten, um wie viel die Elektronen durch Stöße an den Gasatomen verlangsamt werden.

Franck und Hertz stellten dabei etwas Erstaunliches fest: Legt man nur eine geringe Spannung an, so verlieren die Elektronen auf ihrem Weg von der Kathode zur Anode keinerlei Energie. Das bedeutet, dass sie nur elastisch mit den Atomen zusammenstoßen und dabei nicht an Geschwindigkeit verlieren. Erreicht die Spannung allerdings einen Wert von 4,7 Volt, dann sind die an der Anode ankommenden Elektronen plötzlich fast völlig ohne Energie. In einem dunklen Raum kann man außerdem beobachten, dass das Quecksilbergas dann kurz vor der Anode in einer dünnen Schicht anfängt zu leuchten. Dreht man die Spannung weiter hoch, werden die ankommenden Elektronen wieder allmählich schneller, und die leuchtende Schicht wandert auf die Glühkathode zu, die die Elektronen aussendet.

Solange die Elektronen nicht die richtige Geschwindigkeit erreichen, verlieren sie keine Energie (nur elastische Stöße).



Erst wenn sie die kritische Geschwindigkeit – und damit Energie – erreichen, können sie diese an die Atome abgeben.



Erreicht die Spannung das Doppelte des kritischen Wertes, also 9,4 Volt, sind die Elektronen plötzlich wieder fast völlig ohne Energie und eine zweite leuchtende Schicht entsteht. Dieses Spiel setzt sich fort: Je weiter man die Spannung erhöht, desto mehr Glühschichten entstehen, die alle denselben Abstand voneinander haben.

Dieses Verhalten zeigt, dass auch Atome Energie nur in Portionen gewisser Größe aufnehmen können: Besitzen die Elektronen nicht genug Energie, so können sie diese nicht an die Atome abgeben. Erst wenn ein Elektron genug davon angesammelt hat – im Falle von Quecksilber eine Energie von 4,7 Elektronenvolt – kann diese Energie beim Zusammenstoß vom Elektron auf das Atom übertragen werden. Nach einem solchen Stoß befindet sich das Elektron zuerst einmal in Ruhe und wird dann von der angelegten Spannung wieder aufs Neue beschleunigt. Sobald es ein zweites Mal eine Energie von 4,7 Elektronenvolt angesammelt hat, gibt es diese beim nächsten Zusammenstoß wieder an ein Atom ab usw., bis das Elektron die Anode erreicht hat.

Will man einem Atom Energie zuführen, so muss man also genau den richtigen Betrag zur Verfügung haben. Zu wenig nimmt es nicht an, und ebenso wenig akzeptiert es eine zu große Energiemenge. Die erlaubte Energie ist dabei von Element zu Element verschieden und muss, wie wir heute wissen, genau einem der Übergänge zwischen zwei Energiezuständen in der Elektronenhülle des Atoms entsprechen. Erklären kann man dies mit dem Bohr'schen Atommodell (↓), das zwar zur Zeit von Franck und Hertz bereits entwickelt worden war, aber nur als theoretisches Modell zur Erklärung der Atomspektren galt. Erst der Franck-Hertz-Versuch bewies die physikalische Realität der diskreten Energieniveaus in Atomen.

Die Atome behalten ihre überschüssige Energie übrigens nicht lange, sondern geben sie in Form von Strahlung ab. Nach einem Zusammenstoß senden die Quecksilberatome also ihre eben erhaltene Energie von 4,7 Elektronenvolt in Form eines Photons mit genau dieser Energiemenge wieder aus, was man in der Gasröhre als Leuchten erkennen kann.

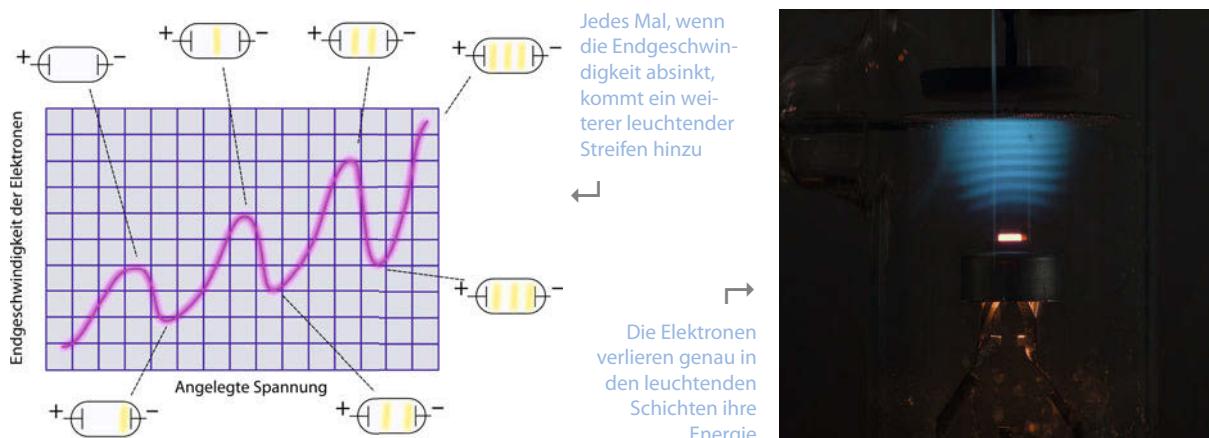


Bild rechts unten mit freundlicher Genehmigung von Ed Lochoki

Das Bohr'sche Atommodell → S. 172

H. Haken, H. C. Wolf *Atom- und Quantenphysik: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen* Springer Verlag 2004

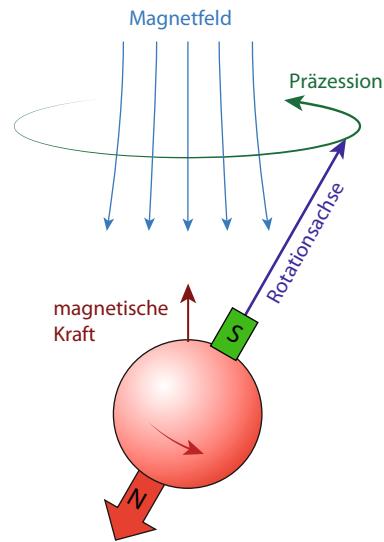
## Der Spin eines Teilchens

### Quantisiertes Kreiseln

Teilchen können nach den Regeln der Quantenmechanik einen Eigendrehimpuls aufweisen, der ein halb- oder ganzzahliges Vielfaches des reduzierten Planck'schen Wirkungsquantums  $\hbar = h/(2\pi)$  betragen muss. Dieser Eigendrehimpuls, den man als *Spin* bezeichnet, besitzt keine Entsprechung in der klassischen Mechanik, sondern er ist ein typisches Phänomen der Quantenmechanik – daher ist es nicht ganz einfach, seine Eigenschaften zu verstehen.

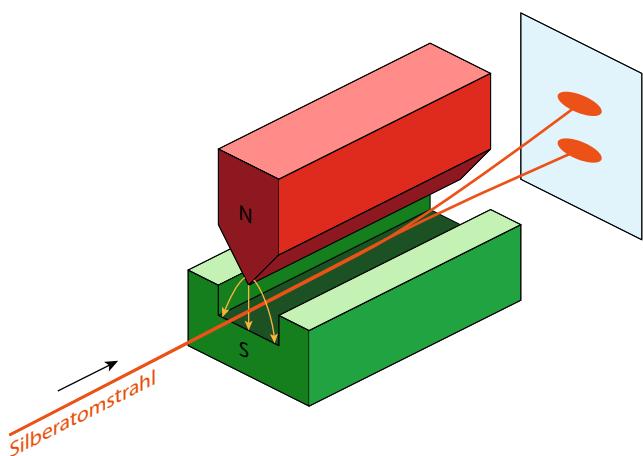
Anders als beim Eigendrehimpuls einer rotierenden Kugel, die sich abbremsen lässt, kann man den Spin eines Elektrons oder Photons nicht abbremsen. Der Spin ist eine charakteristische Eigenschaft des jeweiligen Teilchens: Alle Leptonen (Elektron, Myon, Tauon, Neutrino) und die Quarks besitzen Spin 1/2, Photonen und Gluonen haben Spin 1 (die Einheit  $\hbar$  lässt man zur Vereinfachung meist weg). Auch Atome können einen Spin besitzen.

Bei einer rotierenden Kugel zeigt der Drehimpuls parallel zur Rotationsachse. Wenn die Kugel analog zu einem Atom außen negativ und innen positiv geladen ist, so erzeugt die außen kreisende negative Ladung einen magnetischen Nord- und Südpol wie bei einer Magnetnadel, die parallel zur Rotationsachse liegt. In einem senkrechten inhomogenen Magnetfeld würde diese insgesamt elektrisch neutrale Kugel abhängig von der Lage der Rotationsachse mehr oder weniger stark nach oben oder unten gezogen werden, je nachdem welcher Magnetpol im stärkeren Bereich des äußeren Magnetfeldes liegt. Zugleich würde das Magnetfeld versuchen,



die Rotationsachse in die Senkrechte zu kippen, was aber aufgrund der Eigendrehung stattdessen zu einer Präzession der Drehachse um die Senkrechte führt (siehe Kreisel mit Drehmoment  $\downarrow$ ). Wenn man einen Strahl solcher Kugeln durch ein senkrechtes inhomogenes Magnetfeld schießt, so werden sie demnach je nach dem Winkel zwischen Rotationsachse und Magnetfeld unterschiedlich stark nach oben oder unten abgelenkt.

Im Jahr 1922 führten Otto Stern und Walther Gerlach diesen Versuch mit Silberatomen durch, die wegen eines überzähligen Elektrons einen Gesamtspin von 1/2 aufweisen. Auf einem Schirm hinter dem Magnetfeld schlugen sich die Silberatome nieder.

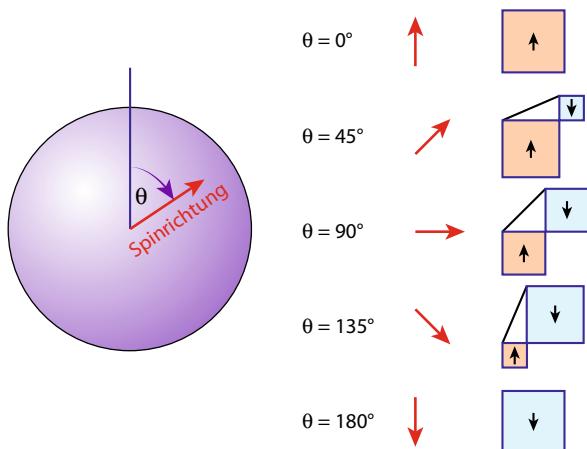


Nach dem Kugelmodell müsste dabei ein senkrechter Silberstreifen auf dem Schirm entstehen, entsprechend einer statistischen Gleichverteilung aller möglichen Rotationsachsen.

Was man stattdessen fand, waren zwei getrennte Silberflecken. Es war so, als ob die Drehachse nur parallel oder antiparallel zum Magnetfeld liegen kann, das Teilchen also im oder gegen den Uhrzeigersinn um die Richtung des Magnetfeldes rotiert, nie aber im Winkel dazu. Bei einer Messung zeigt der Spin also immer in oder gegen die Richtung des Magnetfeldes. Das Bild der rotierenden Kugel liefert somit also nur eine unvollkommene Vorstellung vom Spin eines Teilchens.

Wie sieht dann aber die korrekte quantenmechanische Beschreibung des Spins aus? Angenommen, der Spin zeigt in eine bestimmte Raumrichtung, die um den Winkel  $\theta$  gegen die Senkrechte gekippt ist.

In einem parallel zum Spin ausgerichteten inhomogenen Magnetfeld wird das Teilchen also in dessen Richtung gezogen. Wie verhält sich dieses Teilchen nun in einem senkrecht orientierten inhomogenen Magnetfeld? Es wird mit der Wahrscheinlichkeit  $\cos^2 \theta/2$  nach oben und mit der Wahrscheinlichkeit  $\sin^2 \theta/2$  nach unten gezogen (in der Grafik durch die Größe der Quadrate dargestellt), d. h. der Spin ist nach der Messung mit diesen Wahrscheinlichkeiten entweder nach oben oder nach unten orientiert. Und das ist auch schon im Wesentlichen alles, was gesagt werden kann, denn die Quantenmechanik kann nur Wahrscheinlichkeiten berechnen; sie sagt nichts darüber, wie sich das Teilchen „an sich“ dreht, und es zeigt sich, dass der Begriff der klassischen Rotationsachse in der Quantenmechanik keinen Sinn ergibt (siehe Bell'sche Ungleichung ↓).



## Das Pauli-Prinzip

### Warum Elektronen sich gegenseitig meiden

Das Pauli-Prinzip ist einer der zentralen Aspekte der Quantenmechanik. Es beruht darauf, dass identische Teilchen – beispielsweise die Elektronen in einem Atom – in der Quantentheorie prinzipiell ununterscheidbar sind: Findet man eines der Elektronen an einem bestimmten Ort vor, so weiß man nie, welches man angetroffen hat.

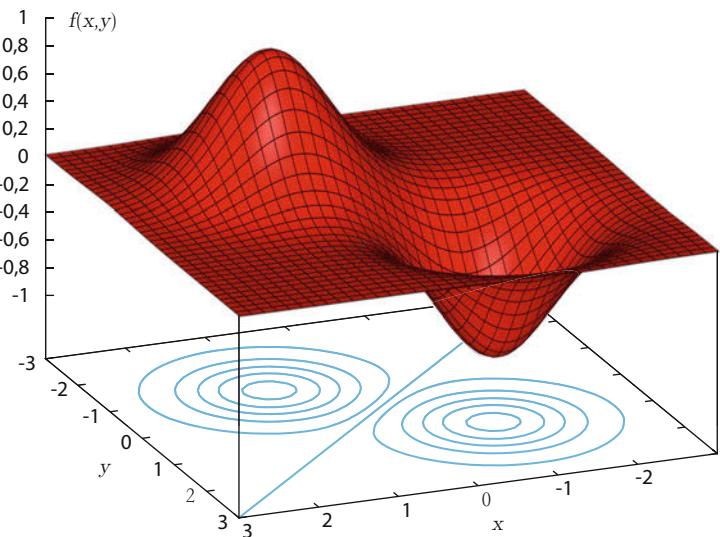
In der Quantenmechanik wird die Wahrscheinlichkeit, ein erstes Elektron an einem Ort  $x$  und ein anderes Elektron zugleich an einem Ort  $y$  zu finden, durch das Betragsquadrat einer Zahl  $f(x,y)$  angegeben, die man auch als *Wahrscheinlichkeitsamplitude*

oder *Zweiteilchen-Wellenfunktion* ( $\downarrow$ ) bezeichnet (genau genommen ist  $f(x,y)$  eine komplexe Zahl, doch das ist hier nicht weiter wichtig). Da beide Elektronen ununterscheidbar sind, darf sich diese Wahrscheinlichkeit nicht ändern, wenn wir die beiden Elektronen miteinander vertauschen, also das erste Elektron am Ort  $y$  und das zweite Elektron am Ort  $x$  finden. Es muss also  $|f(x,y)|^2 = |f(y,x)|^2$  sein.

Die Wahrscheinlichkeitsamplitude  $f(x,y)$  selbst kann beim Vertauschen entweder ebenfalls unverändert bleiben, oder sie wechselt das Vorzeichen, da dieses Vorzeichen beim Quadrieren ja wegfällt:

$$f(x,y) = f(y,x) \text{ oder } f(x,y) = -f(y,x)$$

Haben beide Teilchen dieselbe Spinausrichtung, so tritt der erste symmetrische Fall für Teilchen mit ganzzahligem Spin ( $\downarrow$ , sogenannten *Bosonen*, beispielsweise Photonen) ein, während der zweite antisymmetrische Fall für Teilchen mit halbzahligem Spin (sogenannten *Fermionen*, beispielsweise Elektronen, Quarks, Protonen und Neutronen) zutrifft (bei unterschiedlichen Spinausrichtungen muss man neben dem Ort den Spin zusätzlich als Variable in der Amplitude berücksichtigen). Genau diese Regel nennt man *Pauli-Prinzip*. Die folgende Abbildung zeigt eine solche antisymmetrische Zwei-Fermion-Wahrscheinlichkeitsamplitude:



Für die Wahrscheinlichkeitsamplitude, mit der sich zwei Fermionen derselben Sorte mit derselben Spinausrichtung am selben Ort befinden, ergibt sich  $f(x,x) = -f(x,x)$ , sodass  $f(x,x) = 0$  sein muss, wie man in der Grafik auf der linken Seite sieht. Zwei Fermionen mit derselben Spinausrichtung können sich somit nicht am selben Ort aufhalten.

Allgemeiner kann man sagen, dass sich Fermionen derselben Sorte gegenseitig meiden. Sie können nicht denselben Quantenzustand einnehmen. Kühlt man beispielsweise eine Wolke aus Bosonen (im Bild rechts Atome eines bestimmten Lithium-Isotops) sehr weit ab, so rücken sie recht eng zusammen, während Fermionen (hier Atome eines anderen Lithium-Isotops) größere Abstände beibehalten.

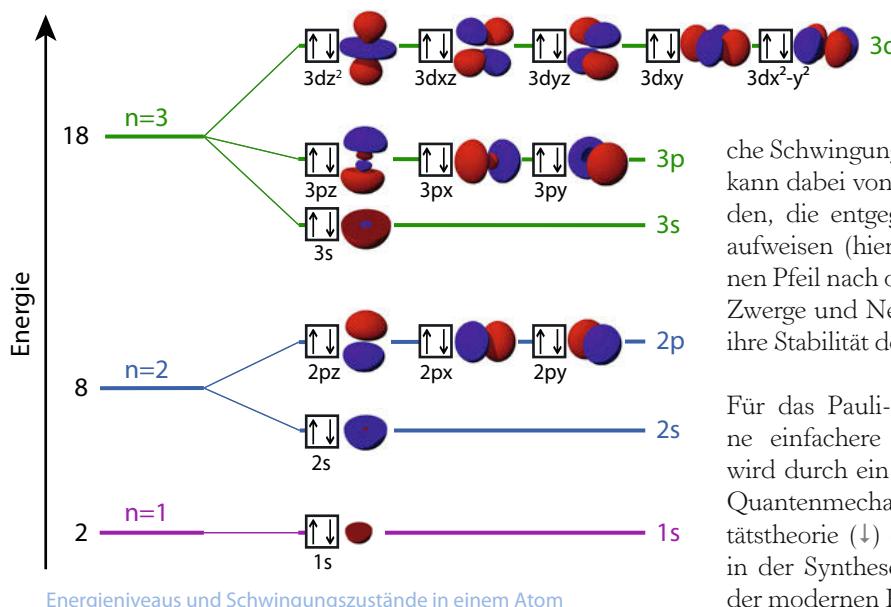
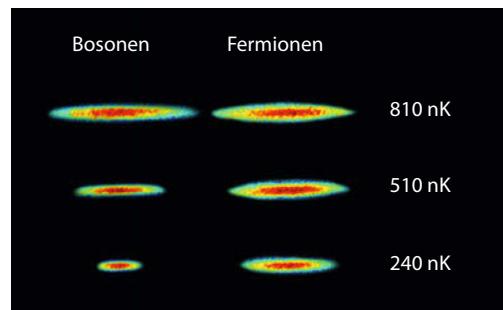


Bild rechts oben von Andrew Truscott, Kevin Strecker, Randall Hulet, Rice University  
Neutronensterne → S. 36

$E=mc^2$  → S. 128



Wolke aus Bosonen (links) und Fermionen (rechts) für verschiedene Temperaturen (Andrew Truscott, Kevin Strecker, Randall Hulet, Rice University)

Das Pauli-Prinzip stellt sicher, dass sich in der Elektronenhülle der Atome eine stabile Schalenstruktur ausbildet. Jeder mögliche Schwingungszustand der Wellenfunktion kann dabei von zwei Elektronen besetzt werden, die entgegengesetzte Spinausrichtung aufweisen (hier dargestellt durch einen kleinen Pfeil nach oben oder unten). Auch weiße Zwerge und Neutronensterne ( $\downarrow$ ) verdanken ihre Stabilität dem Pauli-Prinzip.

Für das Pauli-Prinzip gibt es letztlich keine einfache anschauliche Erklärung. Es wird durch ein subtiles Zusammenspiel von Quantenmechanik und spezieller Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) erzwungen und ist damit tief in der Synthese dieser beiden Grundpfeiler der modernen Physik begründet.



# EPR-Experiment und Bell'sche Ungleichung

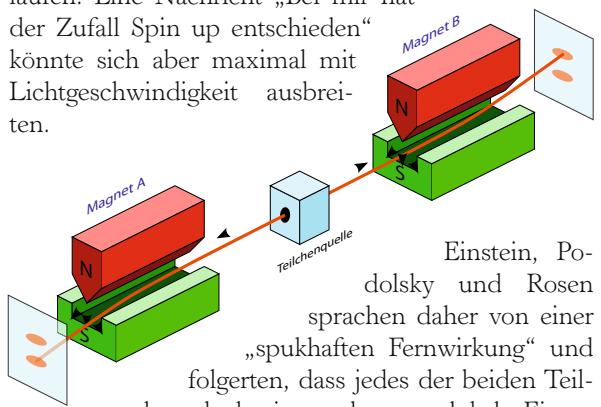
## Ist die Quantenmechanik unvollständig?

In der klassischen Physik sind wir es normalerweise gewöhnt, dass eine physikalische Theorie eindeutige Vorhersagen macht. Die Quantenmechanik bricht mit diesem Anspruch: Sie macht grundsätzlich nur noch Aussagen über Wahrscheinlichkeiten, wie wir am Beispiel des Spins in einem anderen Artikel (↓) gesehen haben.

Albert Einstein konnte sich damit niemals abfinden und hielt die Quantenmechanik für unvollständig, d.h. er ging von einer tiefer liegenden verborgenen Realitätsebene aus, die von der Quantenmechanik nur unvollständig erfasst wird. „Gott würfelt nicht“, soll er gesagt haben. Zur Untermauerung seines Standpunktes betrachtete er im Jahr 1935 zusammen mit Boris Podolsky und Nathan Rosen folgendes Phänomen (kurz *EPR-Experiment* genannt; wir diskutieren hier die überarbeitete Version von David Bohm):

Man erzeugt dabei zunächst in speziellen Teilchenquellen Teilchenpaare, die in entgegengesetzte Richtungen ausgesendet werden und deren Spin jeweils entgegen gesetzt zueinander orientiert ist. Das bedeutet: Lässt man die Teilchen anschließend durch ein senkrecht orientiertes inhomogenes Magnetfeld laufen, so wird immer eines der beiden Teilchen nach oben und sein Partnerteilchen nach unten abgelenkt. Welches der beiden Teilchen nach oben bzw. unten abgelenkt wird – welches also Spin ‚up‘ oder ‚down‘ besitzen wird –, ist nach den Regeln der Quantenmechanik purer Zufall. Sicher ist lediglich, dass sie sich entgegengesetzt zueinander verhalten werden.

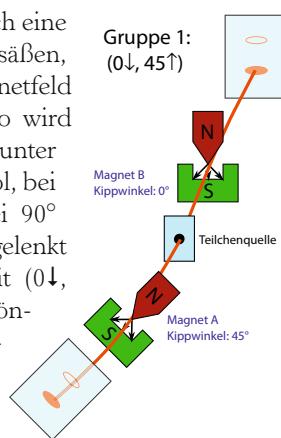
Die Quantenmechanik sagt aus, dass jedes der beiden Teilchen vor einer Messung gar keine definierte Spinausrichtung hat – und die Frage „Spin Up oder Down?“ sich also erst beim Durchlauf durch das Magnetfeld zufällig entscheidet. Doch woher weiß dann das eine Teilchen, wie sich sein Partnerteilchen beim Durchlaufen des Magnetfeldes entschieden hat? Eine Nachricht kann es nicht erhalten haben, denn beide Teilchen könnten sich prinzipiell Lichtjahre voneinander entfernt befinden, bevor sie durch den Magneten laufen. Eine Nachricht „Bei mir hat der Zufall Spin up entschieden“ könnte sich aber maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.



Einstein, Podolsky und Rosen sprachen daher von einer „spukhaften Fernwirkung“ und folgerten, dass jedes der beiden Teilchen doch eine verborgene lokale Eigenschaft wie beispielsweise eine Rotationsachse besitzen müsse, die seine Ablenkungsrichtung bereits im Voraus festlegt. Ihr entgegengesetztes Verhalten wäre dann einfach durch eine entsprechende gegensätzlich ausgeprägte Teilcheneigenschaft begründet. Da die Quantenmechanik diese verborgene lokale Teilcheneigenschaft jedoch nicht berücksichtigt, könne sie die physikalische Realität nur unvollständig erfassen.

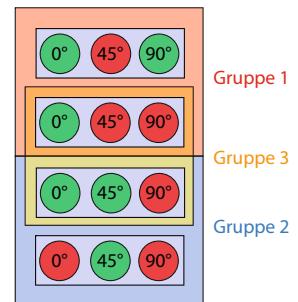
Haben Einstein, Podolsky und Rosen nun recht, und ist die Quantenmechanik unvollständig? Dem nordirischen Physiker John Steward Bell gelang es im Jahr 1964, das EPR-Experiment so abzuwandeln, dass sich diese Frage tatsächlich messtechnisch klären lässt – ein Geniestreich, auf den fast dreißig Jahre lang niemand gekommen war! Die Kernidee besteht darin, die Magnete einzeln um verschiedene Winkel gegen die Senkrechte zu kippen und zu messen, wie häufig beide Teilchen beispielsweise in Richtung Südpol abgelenkt werden. Drei verschiedene Kippwinkel genügen – sagen wir:  $0^\circ$  (also ungekippt),  $45^\circ$  und  $90^\circ$ .

Wenn die Teilchen nun doch eine lokale innere Eigenschaft besäßen, die ihr Verhalten im Magnetfeld von vornherein festlegte, so wird es beispielsweise einige darunter geben die bei  $0^\circ$  zum Südpol, bei  $45^\circ$  zum Nordpol und bei  $90^\circ$  ebenfalls zum Nordpol abgelenkt würden, sodass wir sie mit  $(0\downarrow, 45\uparrow, 90\uparrow)$  kennzeichnen können. Die zugehörigen Partikelteilchen würden sich dabei genau entgegengesetzt verhalten.



Nun bilden wir drei Gruppen: Gruppe 1 sind alle Teilchenpaare, bei denen ein Teilchen zugleich die beiden Kennzeichnungen  $0\downarrow$  sowie  $45\uparrow$  besitzt, d.h. es würde beispielsweise wegen  $0\downarrow$  im ungekippten Magneten zum Südpol abgelenkt, während sein Partner teilchen im um  $45^\circ$  gekippten Magneten ebenfalls zum Südpol abgelenkt wird, da es sich ja entgegengesetzt zu  $45\uparrow$  verhält.

Analog bilden wir Gruppe 2 als alle die Teilchenpaare, bei denen ein Teilchen zugleich die beiden Kennzeichnungen  $45\downarrow$  sowie  $90\uparrow$  besitzt, sowie Gruppe 3 als alle die Teilchenpaare, bei denen ein Teilchen zugleich die beiden Kennzeichnungen  $0\uparrow$  sowie  $90\uparrow$  besitzt.



Wie wir in der Grafik sehen, gehören alle Teilchenpaare von Gruppe 3 zugleich auch zu Gruppe 1 oder 2. Also müssen die zu Gruppe 1 und 2 gehörenden Ablenk-wahrscheinlichkeiten in passend gekippten Magneten zusammen mindestens so groß sein wie diejenige passend zu Gruppe 3 (*Bell'sche Ungleichung*).

Berechnet man jedoch die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten in der Quantenmechanik, so ergibt sich ein anderes Bild: Für Gruppe 3 ist die Wahrscheinlichkeit größer als für Gruppe 1 und 2 zusammen, d.h. die Quantenmechanik verletzt die Bell'sche Ungleichung! Da die quantenmechanische Rechnung vollkommen mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt, kann es die geforderte lokale innere Teilcheneigenschaft nicht geben. Einstein, Podolsky und Rosen wurden widerlegt!

Die Verletzung der Bell'schen Ungleichung zeigt, dass die Quantenmechanik eine nichtlokale Beschreibung erfordert, die beide Teilchen zu einem einzigen übergreifenden Quantensystem miteinander verschrankt, egal wie weit sie voneinander entfernt sind. Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile!



# Die Interpretation der Quantenmechanik

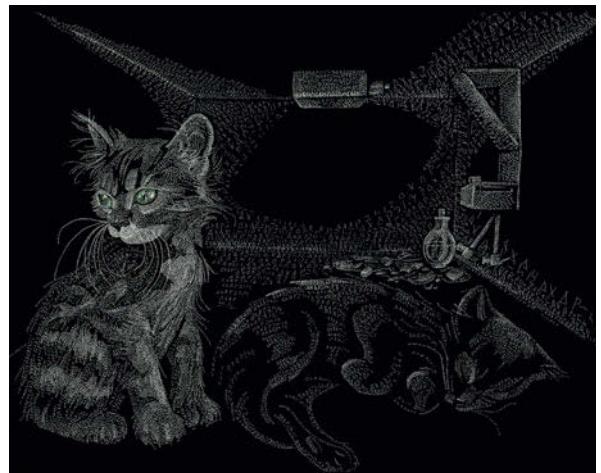
## Schrödingers Katze und Everett's viele Welten

Die Quantenmechanik ist neben der Relativitätstheorie die zweite tragende Säule für die physikalische Beschreibung unserer Welt. Anders als die Relativitätstheorie wirft die Interpretation der Quantenmechanik jedoch bis heute Fragen auf, die noch nicht wirklich zufriedenstellend beantwortet sind.

Laut Quantenmechanik erfolgen Prozesse in der Natur grundsätzlich zufällig, und lediglich ihre Wahrscheinlichkeit ist einer physikalischen Beschreibung zugänglich. Das zeigt sich auch darin, dass jedes physikalische Objekt stets durch die Summe aller möglichen Entwicklungen beschrieben wird, die jeweils mit der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens gewichtet werden. Einen instabilen radioaktiven Atomkern, wie beispielsweise Tritium  ${}^3\text{H}$ , beschreibt man quantenmechanisch also durch eine Wellenfunktion, die eine Überlagerung aus dem noch intakten Tritium und seinen Zerfallsproduk-



Teilnehmer der Solvay-Konferenz von 1927 zur Quantentheorie

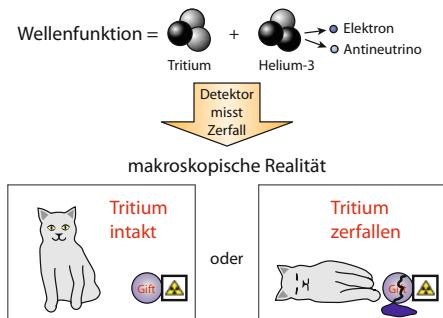


Das Experiment zu Schrödingers Katze, gezeichnet von Sienna Morris. Statt aus einfachen Linien wurde die Zeichnung aus der Formel für Heisenbergs Unschärferelation,  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ , aufgebaut.

ten  ${}^3\text{He}$  plus Elektron plus Antineutrino ist. Nach der sogenannten *Kopenhagener Interpretation*, die 1927 u. a. von Niels Bohr und Werner Heisenberg ausgearbeitet wurde, entscheidet erst die Messung darüber, welche der beiden Alternativen (intaktes Tritium oder dessen Zerfall) realisiert wird, wobei die Wellenfunktion die Eintrittswahrscheinlichkeit der beiden Alternativen festlegt. Die Messung verändert dabei sprunghaft die Wellenfunktion (man spricht von ihrem *Kollaps*), sodass diese nicht länger durch die Summe aller Möglichkeiten, sondern durch den eindeutig realisierten Zustand beschrieben wird. Das Messgerät wird dabei nach den Regeln der klassischen Physik beschrieben, da es ja stets einen eindeutigen Messwert anzeigen wird.

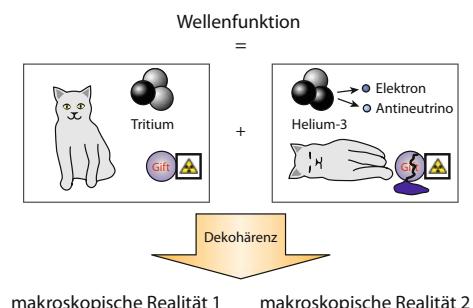
Doch wann genau findet eine solche Messung statt? Müssen wir dazu persönlich nachschauen? Erwin Schrödinger hat sich im Jahr 1935 ein etwas drastisches Gedankenexperiment ausgedacht, um dieses Problem zu verdeutlichen. Dazu stellte er sich eine Katze vor, die zusammen mit einem radioaktiven Atom in einer Kiste eingeschlossen ist. Der Zerfall des Atoms entscheidet dabei über Leben und Tod der Katze, indem ein Detektor auf den Zerfall reagiert und ein Fläschchen mit Blausäure zertrümmert. Befindet sich Schrödingers Katze zusammen mit dem Atom in einem merkwürdigen Schwebezustand zwischen Leben und Tod, der erst beendet wird, wenn wir die Kiste öffnen und nachschauen? Wohl kaum, doch wo genau wird aus der quantenmechanischen Beschreibung des Atoms die klassische Realität der Katze?

Die künstliche Trennung der Welt in einen quantenmechanischen und einen klassischen Teil erscheint heute tatsächlich nicht mehr adäquat. Experimente haben gezeigt, dass auch größere Systeme den Regeln der Quantenmechanik gehorchen, wobei nirgends eine prinzipielle Grenze für deren Gültigkeit in Sicht ist. Folgt man den Regeln der Quantenmechanik konsequent bis in den makroskopischen Bereich, so ergibt sich daraus die sogenannte *Viele-Welten-Interpretation*.



Die Quantenmechanik beschreibt das instabile Atom weiterhin zusammen mit der Katze durch eine gemeinsame Wellenfunktion, die zwei Anteile als Superposition beinhaltet: „Atom zerfällt und Katze stirbt“ sowie „Atom bleibt stabil und Katze lebt“. Da die Katze jedoch ein makroskopisches System ist, führt die unvermeidliche Wechselwirkung mit der Umgebung in Sekundenbruchteilen nicht zum Kollaps, sondern zur sogenannten *Dekohärenz* dieser Wellenfunktion: Beide Anteile besitzen keine spürbare Wechselwirkung mehr untereinander und entwickeln sich praktisch unabhängig voneinander weiter. Sie wissen quasi nichts mehr voneinander, sodass man sie als verschiedene Zweige der Realität ansehen kann, die parallel zueinander existieren. In dem einen Realitätszweig zerfällt der Atomkern, und die Katze stirbt, in dem anderen nicht.

In diesem Sinne spaltet letztlich die Wellenfunktion des ganzen Universums sich ständig in unzählige Zweige auf, die parallele makroskopische Wirklichkeiten verkörpern. Obwohl die Viele-Welten-Interpretation zunächst auf großen Widerstand stieß, wird sie mittlerweile durchaus ernst genommen, denn sie erlaubt im Prinzip eine quantenmechanische Beschreibung des gesamten Universums ohne willkürliche Trennung zwischen Mikro- und Makrokosmos.



Welle-Teilchen-Dualismus → S. 178

Wellenfunktion → S. 180

P. Byrne *Die Parallelwelten des Hugh Everett* Spektrum der Wissenschaft, April 2008, S. 24



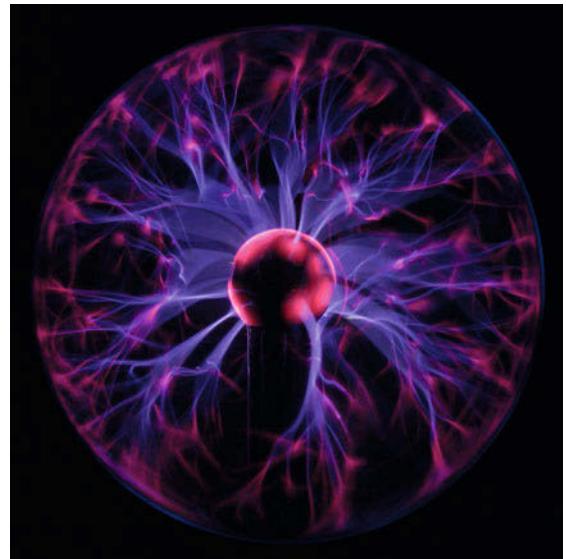
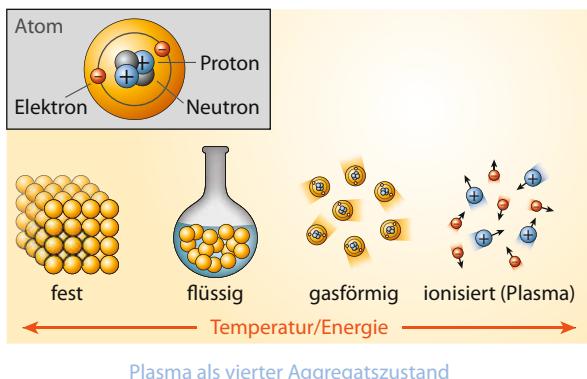
# Plasma

## Der vierte Aggregatzustand

Auf der Erde kommt Materie meistens in einer der drei gängigen Formen vor: fest, flüssig und gasförmig. Diese **Aggregatzustände** unterscheiden sich danach, ob die enthaltenen Atome relativ zueinander eher mehr oder eher weniger beweglich sind.

Jenseits der Erde hingegen sind diese drei Materieformen eher selten anzutreffen. Die Atome der Sterne, sowie eines Großteils des interstellaren Mediums, sind derart hohen Energien ausgesetzt, dass sich ein Teil der Elektronen von ihren Atomrumpfen trennt. Die Materie ist stark ionisiert und enthält frei bewegliche positive und negative Ladungsträger. Dieser Zustand wird *Plasma* (vom griechischen  $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$  = Gebilde, Geschöpf) genannt.

Obwohl auf den ersten Blick einem Gas sehr ähnlich, verhält sich diese Form der Materie in vielen Belangen ganz anders, weswegen man hier berechtigterweise von einem vierten Aggregatzustand sprechen kann.



Plasmalampe, in der man komplexe filamentartige Strukturen im Plasma erkennt.

Im Plasma sind die negativen und positiven Ladungsträger zwar getrennt, aber meist nicht allzu weit voneinander entfernt. Äußerlich ist ein Plasma also elektrisch neutral, es hat jedoch eine extrem hohe elektrische Leitfähigkeit. Wie ein Gas hat Plasma keine stabile Form, es reagiert jedoch stark auf die Einwirkung äußerer elektromagnetischer Felder, die es lenken, verformen und sogar einsperren können. Die Bahnen der geladenen Teilchen winden sich mit Vorliebe spiralförmig um magnetische Feldlinien ( $\downarrow$ ) herum, was zum Beispiel benutzt wird um das Plasma in Fusionsreaktoren einzusperren ( $\downarrow$ ).

Bild oben rechts von Luc Viatour, [www.lucnix.be](http://www.lucnix.be)

Vektorfelder und Feldlinien → S. 54

Fusionsreaktoren → S. 196

J. Janek Wenn Elektronen zu heiß werden [http://www.bunsen.de/bunsen\\_media/Downloads/JdCh2003/20\\_Woche.pdf](http://www.bunsen.de/bunsen_media/Downloads/JdCh2003/20_Woche.pdf)

Die Bewegungen der elektrisch geladenen Teilchen im Plasma erzeugen jedoch auch selbst Felder, die auf die Teilchenbahnen rückwirken und so ein äußerst komplexes dynamisches Verhalten erzeugen können. Bei Eruptionen unserer Sonne zum Beispiel kann man gut erkennen, wie sich das herausgeschleuderte Plasma entlang von Magnetfeldlinien anordnet (↓). Das Sonnenplasma bezeichnet man auch als *thermal*: Sowohl Elektronen als auch Atomrumpfe haben hier Temperaturen von Tausenden Grad Celsius, die eine Rekombination verhindern.

Ein Plasma kann jedoch auch durch die Einwirkung von starken elektrischen Feldern auf Gase entstehen. Die durch das Feld übertragene Energie verteilt sich gleichmäßig auf Elektronen und Atomrumpfe des Gases, weil diese bis auf das Vorzeichen dieselbe Ladung haben. Da Elektronen aber um die zehntausendmal leichter als Atomkerne sind, werden sie deutlich stärker beschleunigt! Die Elektronen sind daher sehr viel heißer als die Rumpfe. Ein solches Plasma befindet sich nicht im thermalen Gleichgewicht und wird *nichtthermal* genannt.

Plasmaentladung auf der Sonne, Aufnahme vom Februar 2012 während der SDO Mission

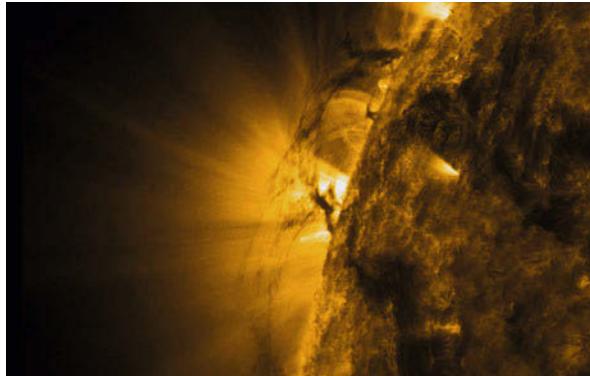
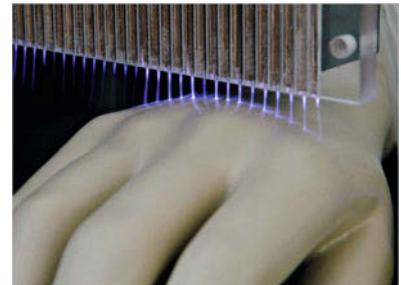


Bild oben rechts von Michael Kong et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 174018  
Die Sonne und ihr Magnetfeld → S. 4  
Gewitter → S. 60

Nichtthermales Plasma ist nicht nur ungefährlich, Forscher testen sogar seine technische Anwendung als Desinfektionsmittel.



Während die Elektronen in nichtthermalem Plasma Temperaturen von vielen tausend Grad Celsius haben, können die Atomrumpfe hingegen relativ kalt sein und zum Beispiel nur Zimmertemperatur haben. Funkenüberschläge, das Nordlicht, Elmsfeuer und Gewitterblitze (↓) sind Beispiele natürlicher nichtthermaler Plasmen.

Künstlich erzeugte nichtthermale Plasmen finden sich in Plasmabildschirmen, Gasentladungslampen und sogar in einfachsten Glühbirnen. Manche dieser Plasmen kann man sogar anfassen.

Ein Plasmastrom sucht sich seinen Weg entlang einer Kopfschmerztablette.



## Fusionsreaktoren

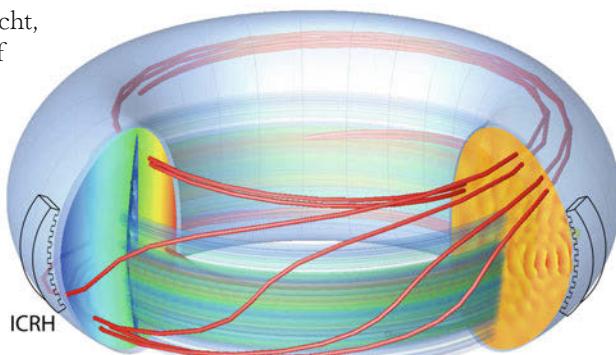
### Hightech-Energie aus dem Sonnenfeuer

Die Sonne gewinnt ihre Energie durch den Prozess der Kernfusion. Anders als bei der Kernspaltung werden bei der Fusion zwei (oder mehr) Atomkerne zu einem größeren zusammengefügt. Nimmt man hierfür sehr leichte Bausteine wie Wasserstoff- oder Heliumkerne, so ist die Energieausbeute deutlich höher als bei der Kernspaltung. Deshalb wird seit Langem versucht, diese Prozesse auch auf der Erde zur Energiegewinnung zu nutzen.

Um zwei Kerne zu verschmelzen, muss man sie extrem nahe zusammenführen. Dies geschieht am ehesten, wenn sich die Elemente im vierten Aggregatzustand – in einem Plasma ( $\downarrow$ ) – befinden: Als aufgeheiztes Plasma besitzen die positiv geladenen Atomkerne genug Energie, um ihre elektrische Abstoßung zu überwinden und sich nahe genug zu kommen, damit die starke Kernkraft greift und sie zusammenschweißt.

Unsere Sonne besteht vollständig aus Plasma, und in ihrem Inneren laufen aufgrund der hohen Temperatur und des extremen Druckes die Fusionsprozesse ab. Da die Sonne rund 300000 Mal mehr Masse als die Erde hat, ist es recht schwer, die in der Sonne herrschenden

Drücke in irdischen Fusionsreaktoren bereitzustellen. Deutlich leichter ist es, hohe Temperaturen zu erzeugen und damit den fehlenden Druck zu kompensieren. Tatsächlich sind die Temperaturen im Inneren der heutigen experimentellen Fusionsreaktoren mit 150 Millionen Grad etwa zehnmal so hoch wie im Inneren der Sonne.



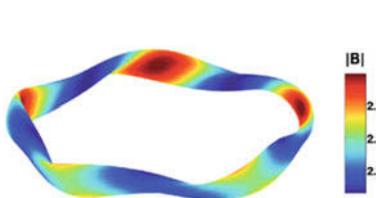
Bahnen von schnellen Ionen im Tokamak JET, die zu Instabilitäten im Plasma führen können

Damit die geladenen Teilchen des Plasmas – man verwendet hierfür meistens Deuterium und Tritium, weil diese Materialien in Überfluss vorhanden oder leicht herzustellen sind und bei ihnen die Energieausbeute sehr hoch ist – nicht in Kontakt mit den Reaktorwänden gelangen und diese sofort zum Schmelzen bringen, werden sie durch extrem starke Magnetfelder eingesperrt.

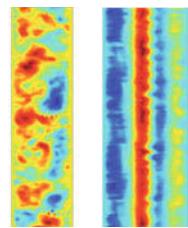
Es gibt im Wesentlichen zwei Bauprinzipien für Forschungsreaktoren: Während die Reaktoren vom Typ *Tokamak* wie ein Torus (donutförmig) aufgebaut sind, sind die sogenannten *Stellaratoren* deutlich komplizierter: Ihre Architektur ist das Resultat aufwendiger Berechnungen, was zu einem deutlich stabileren Plasma führt.

Das gezündete Plasma im Reaktorinneren ist extrem empfindlich: Bereits kleinste Verunreinigungen oder Störungen können es aus dem Gleichgewicht und damit zum Verlöschen bringen. Der 1983 gestartete JET (Joint European Torus), ein experimenteller Fusionsreaktor in der Nähe von Oxford, kann die Fusion im Plasma zwar bereits bis zu einer Minute aufrechterhalten, bevor sie ausgeht, aber das reicht nicht zur Energiegewinnung.

Die nächste Generation von Forschungsreaktoren befindet sich bereits im Bau: Der Stellarator Wendelstein 7-X wird in Greifswald gebaut und soll voraussichtlich 2014 fertiggestellt werden. In ihm soll die Kernfusion bereits bis zu dreißig Minuten lang aufrechterhalten werden können. Der Tokamak ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), unter Konstruktion im südfranzösischen Cadarache, wird voraussichtlich 2019 fertiggestellt werden. ITER wird das fusionierende Plasma bis zu acht Minuten stabil halten



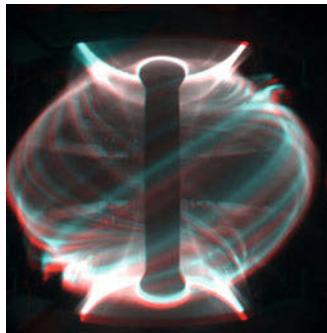
Farbliche Darstellung der magnetischen Feldstärke im Forschungsreaktor Wendelstein 7-X (Greifswald)



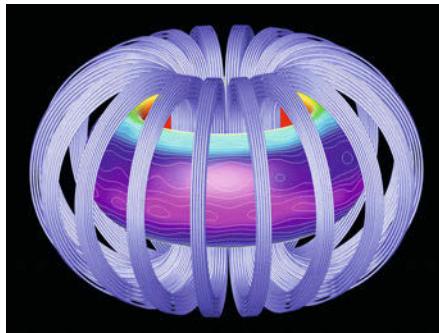
Turbulenzen in der Plasmarandschicht für einen typischen Tokamak (links) und den Stellarator Wendelstein 7-X (rechts)

können, und soll in der Lage sein, bis zu zehnmal so viel Energie zu liefern, wie zur Erzeugung des Plasmas aufgewendet werden muss. Damit wäre ITER als erster Reaktor in der Lage, Energie im wirtschaftlich verwertbaren Maßstab zu erzeugen.

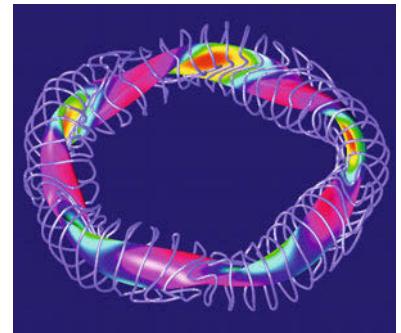
Es ist jedoch noch ein weiter Weg, bis die Fusionsenergie unsere Energieprobleme lösen wird: Bis zur wirtschaftlichen Nutzung der Kernfusion wird es schätzungsweise noch mindestens bis 2050 dauern.



3D-Aufnahme des Plasmas im Forschungsreaktor MAST (Mega Ampere Spherical Tokamak) in Culham, Oxfordshire



Simulation eines stabilen Plasmas in einem toroidalen Tokamakreaktor



Simulation des Plasmaverlaufes im Stellarator Wendelstein 7-X, zusammen mit den unregelmäßig geformten Magnetspulen



# Bose-Einstein-Kondensate

## Atome im quantenmechanischen Gleichschritt

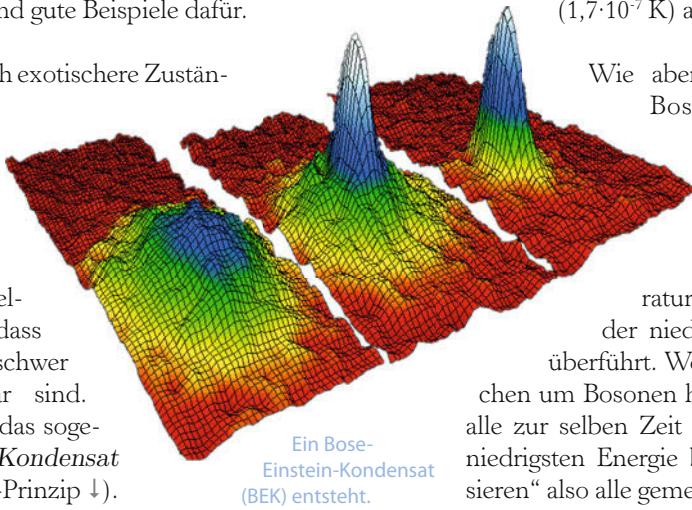
Die drei bekanntesten Aggregatzustände sind fest, flüssig und gasförmig, und so gut wie die gesamte Materie unserer Umgebung befindet sich in einer dieser drei Phasen. Unter extrem hohen Temperaturen kann man Materie jedoch auch in ein sogenanntes Plasma ( $\downarrow$ ) überführen – die Materie in der Sonne oder im Inneren eines Gewitterblitzes sind gute Beispiele dafür.

Es gibt jedoch auch noch exotischere Zustände der Materie, deren Erreichen nicht nur extreme äußere Bedingungen erfordert, sondern die in ihrer Art so sehr auf der Quantennatur der einzelnen Atome beruhen, dass sie für Menschen nur schwer anschaulich vorstellbar sind. Ein Beispiel hierfür ist das sogenannte *Bose-Einstein-Kondensat* (BEK, siehe auch Pauli-Prinzip  $\downarrow$ ).

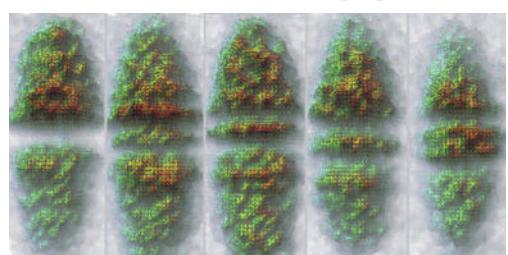
Dieser quantenhafte Materiezustand wurde 1924 von Satyendra Nath Bose und Albert Einstein theoretisch vorhergesagt. Um ihn zu erreichen, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Zum einen müssen die einzelnen Teilchen, aus denen der Stoff besteht, Bosonen sein. Das bedeutet, dass sie im Gegensatz zu Fermionen, die der Diracstatistik unterliegen, notwendigerweise Teilchen mit ganzzahligem Spin sind. Zum anderen muss der Stoff auf ultratiefen Temperaturen ge-

runtergekühlt werden – deswegen dauerte es noch bis ins Jahr 1995, bis das erste Bose-Einstein-Kondensat im Labor erzeugt werden konnte. Vorher war es technisch einfach nicht möglich gewesen, die Rubidiumatome, aus denen das erste Kondensat bestand, auf die erforderlichen 170 Nanokelvin ( $1,7 \cdot 10^{-7}$  K) abzukühlen.

Wie aber muss man sich ein Bose-Einstein-Kondensat vorstellen? Zunächst werden alle einzelnen Atome im Stoff durch die extrem niedrigen Temperaturen in den Zustand mit der niedrigstmöglichen Energie überführt. Weil es sich bei den Teilchen um Bosonen handelt, können sie sich alle zur selben Zeit im selben Zustand der niedrigsten Energie befinden. Sie „kondensieren“ also alle gemeinsam in den Grundzustand.



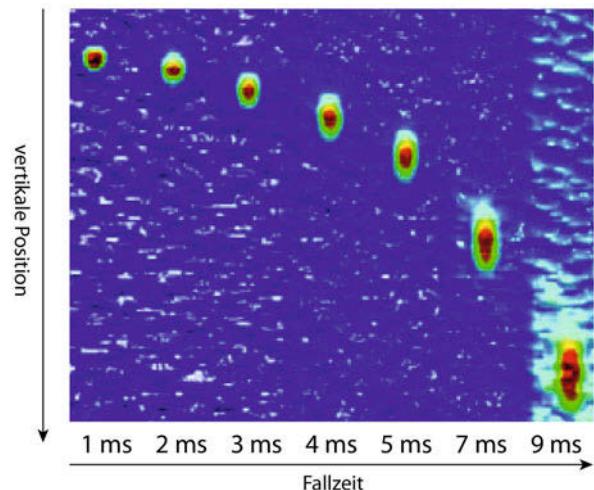
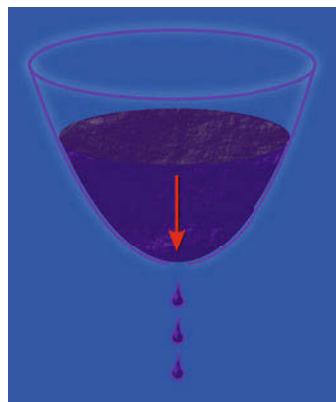
Eine stehende Welle (Solitonenschwingung) in einem BEK



In einem Bose-Einstein-Kondensat ist die Identität der Teilchen somit vollständig aufgehoben: Alle Atome befinden sich im selben Zustand. Genauer gesagt, ist die Wellenfunktion für jedes Atom identisch – man findet also an jedem Ort jedes Atom mit derselben Wahrscheinlichkeit. Sie ist außerdem weit ausgebreitet; ein Bose-Einstein-Kondensat verhält sich mit anderen Worten wie ein einzelnes, makroskopisch großes Atom.

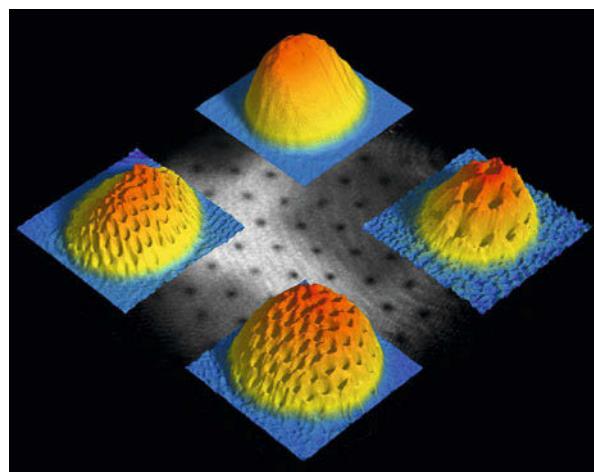
Eine der faszinierenden technischen Anwendungen für Bose-Einstein-Kondensate ist die Konstruktion von sogenannten *Atomlasern*. Während in normalen Lasern kohärente Lichtwellenpakete ausgesandt werden, sind es bei einem Atomlaser kohärente Materiewellenpakete. Hierzu fängt man ein Bose-Einstein-Kondensat in einer (zum Beispiel magnetischen) Falle ein. Durch eine gezielte Überlagerung des Käfigs mit einer elektromagnetischen Welle wird ein „Leck“ im Magnetkäfig erzeugt, sodass einzelne Atome entweichen können. Da sich die Atome vorher alle im selben Zustand befunden haben, sind auch die emittierten Atome alle noch stark kohärent (zueinander ähnlich) und haben damit vergleichbare Eigenschaften wie ein Laserstrahl.

Im Atomlaser werden kohärente Pakete eines BEKs abgestrahlt.



Auch Bose-Einstein-Kondensate genügen dem Galilei'schen Fallgesetz – und verbreitern sich dabei

Genau wie in Suprafluiditäten (↓) können sich auch in rotierenden BEKs Vortizes ausbilden



Suprafluiditäten → S. 204

Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn BEC <http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/bec/index.html>

Z. Merali *Chilled light enters a new phase* <http://www.nature.com/news/2010/101124/full/news.2010.630.html>, Nature-Artikel über BEK mit Photonen; englisch



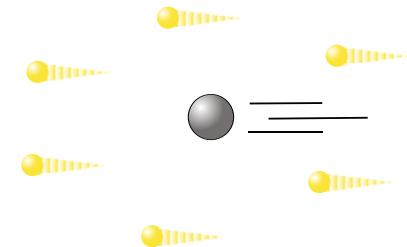
## Laserkühlung

### Warum Gase kälter werden können, wenn man sie mit Licht bestrahlt

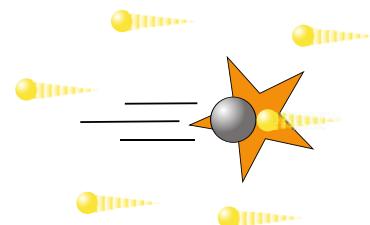
In Kinofilmen und Computerspielen werden Laser ( $\downarrow$ ) meistens dazu benutzt Dinge zu zerstören, indem man sie auf extrem hohe Temperaturen erhitzt. Da erscheint es geradezu paradox, dass in den meisten Forschungslaboren der realen Welt Laser für das genaue Gegenteil benutzt werden: nämlich, um Atome in Gasen extrem abzukühlen! Diese technische Meisterleistung erreicht man durch eine geschickte Kombination zweier physikalischer Effekte: des Dopplereffektes und der quantisierten Energieniveaus der Atome (Franck-Hertz-Versuch  $\downarrow$ ).

In einem Gas bewegen sich die einzelnen Atome schon bei Zimmertemperatur mit Geschwindigkeiten in Größenordnungen von 500 km/h, sie sind also sehr schnell. Dabei stoßen sie ständig aneinander und ändern so ihre Richtung (Brown'sche Bewegung  $\downarrow$ ). Aufgrund der Quantenphysik besitzen Atome außerdem diskrete Energieniveaus, d. h., dass die Hüllelektronen durch die Zuführung von genau der richtigen Energie menge in einen angeregten Zustand überführt werden können. Das kann zum Beispiel durch Absorption eines Photons exakt dieser Energie geschehen. Derart angeregte Zustände existieren nicht sehr lange: Üblicherweise schon nach wenigen Nanosekunden geht das angeregte Elektron wieder in seinen ursprünglichen Zustand über und gibt ein Photon mit wieder genau der selben Energie in eine zufällige Richtung ab.

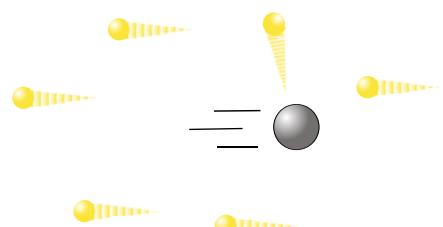
Das macht man sich bei der Laserkühlung zunutze: Ein Gas wird dabei von allen Seiten mit Laserlicht bestrahlt. Die Wellenlänge des Lasers – und damit die Energie der einzelnen Photonen – wird dabei genau so eingestellt, dass sie ein wenig geringer als die Energie ist, die man zur Anregung des Atoms benötigt.



Die Frequenz des Laserlichtes ist so eingestellt, dass in dieselbe Richtung fliegende Atome dessen Energie nicht aufnehmen können.



Erst wenn die Atome den Laserphotonen entgegen fliegen, können sie von diesen getroffen werden.



Die Atome sind nach einem solchen Stoß ein wenig langsamer: Die gestreuten Photonen haben ihnen Energie entzogen.

Laser → S. 214

Der Franck-Hertz-Versuch → S. 184

Brown'sche Bewegungen → S. 116

H. Haken, H. C. Wolf *Atom- und Quantenphysik: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen* Springer Verlag 2004

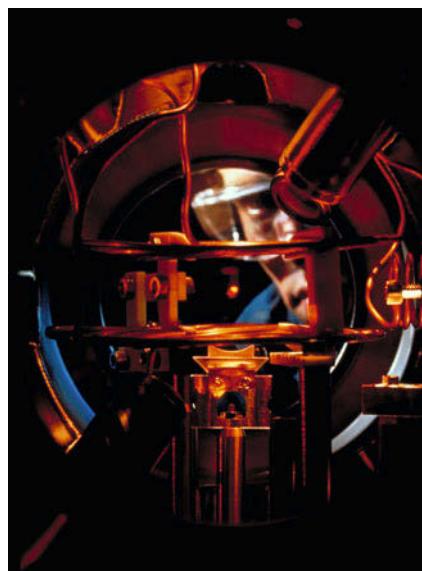
Befänden sich also alle Atome in Ruhe, würde gar nichts passieren, denn die Photonen hätten ganz knapp nicht genug Energie, um die Elektronen im Atom in einen angeregten Zustand zu versetzen.

Weil das Gas allerdings eine gewisse Temperatur hat, bewegen sich die Atome darin mit einer gewissen Geschwindigkeit zufällig in alle möglichen Richtungen. Wenn sich nun ein Atom gerade zufällig entgegen einer der Laserstrahlen bewegt, dann sieht das Atom aufgrund des Dopplereffektes die ihm entgegenkommenden Photonen mit einer leicht kürzeren Wellenlänge. Nach den Regeln der Quantenmechanik entspricht das aber einer etwas höheren Energie, und diese reicht dann gerade aus, um das Atom anzuregen, wenn Photon und Atom frontal zusammenprallen. Das Atom geht dabei kurz in einen angeregten Zustand über, und kehrt kurze Zeit später wieder unter Abgabe eines Pho-

tons in seinen Ausgangszustand zurück. Weil dieses Photon aber genau die Energie tragen muss, die dem Übergangsniveau im Atom entspricht, hat es ein wenig mehr Energie als die restlichen Photonen.

Wo hat das Photon diese Energie her? Die einzige Möglichkeit ist, sie der Bewegungsenergie des Atoms zu entnehmen. Von außen sieht es also so aus, als hätte man ein Photon gerade so vom Atom abprallen lassen, dass das Atom nach dem Stoß ein bisschen weniger, und das Photon aber ein bisschen mehr Energie hat. Das Atom ist also langsamer geworden – und das Gas insgesamt ein bisschen kälter.

Zum Einsatz kommt die Laserkühlung vor allem dann, wenn es darum geht, geringe Mengen Gas auf extrem niedrige Temperaturen nahe des absoluten Nullpunktes abzukühlen, zum Beispiel zur Herstellung eines Bose-Einstein-Kondensates ( $\downarrow$ ).



Materie in der Magnetfalle...

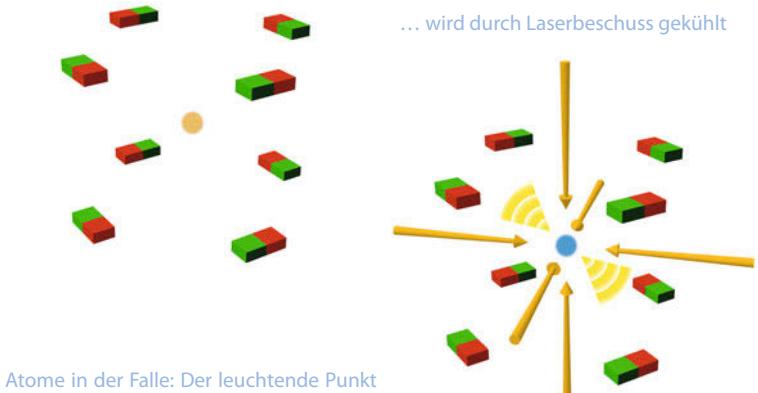


Bild links mit freundlicher Genehmigung von H. M. Helfer/NIST

Bose-Einstein-Kondensate → S. 198

A. Jüde *BEC-anschaulich - Wie kühlst man Atome?* <http://www.mpg.de/bec-anschaulich/html/laserkuhlung.html>

Physikalisch-Technische Bundesanstalt *Grundlagen der Laserkühlung* <http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt4/fb-44/ag-441/realisierung-der-si-sekunde/die-fontaenen-atomuhr-csf1-der-ptb/grundlagen-der-laserkuehlung.html>



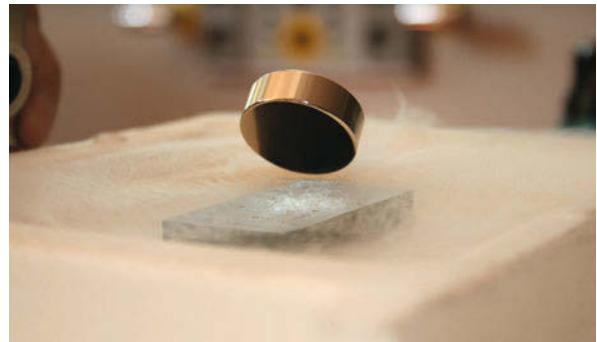
## Supraleitung

### Widerstand ist zwecklos

Anfang des 20. Jahrhunderts war hinreichend gut bekannt, dass Metalle elektrischen Strom immer besser leiten, der Widerstand also sinkt, wenn man sie abkühlt. Niemand war jedoch auf die Entdeckung gefasst, die Heike Kamerlingh Onnes 1911 machte, als er mit flüssigem Helium gekühltes Quecksilber untersuchte: Sobald die Temperatur auf unter 4,2 Kelvin sank, verlor das Quecksilber schlagartig jeglichen elektrischen Widerstand – seine Leitfähigkeit wurde also unendlich groß! Heute wissen wir, dass die meisten Metalle bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt *supraleitend* werden, also elektrischen Strom ohne auch nur die geringsten Leistungsverluste leiten.

Dieses Phänomen, für dessen Entdeckung Kamerlingh Onnes im Jahre 1913 den Nobelpreis für Physik erhielt, ist mit klassischer Physik nicht zu erklären: es ist ein reines Quantenphänomen. Obwohl ein solches supraleitendes Verhalten lange Zeit vermutet wurde, und es phänomenologische Erklärungsversuche wie das Landau-Ginzburg-Modell gab, gelang eine erste befriedigende Erklärung der Supraleitung mithilfe der Quantenfeldtheorie erst im Jahre 1957, durch John Bardeen, Leon N. Cooper und John R. Schrieffer (BCS).

Nach der BCS-Theorie findet im Metall eine ständige Wechselwirkung zwischen den Elektronen und dem Gitter aus Atomrumpfen statt. Elektronen können durch Stöße mit den Atomen dieses Gitter zum Schwingen anregen. Diese Schwingungen – *Phononen* genannt – bewegen sich durch das Metall und können an einem anderen Ort wieder Energie an ein anderes



Ein Neodym-Magnet schwiebt über einem YBCO Hochtemperatur-Supraleiter.

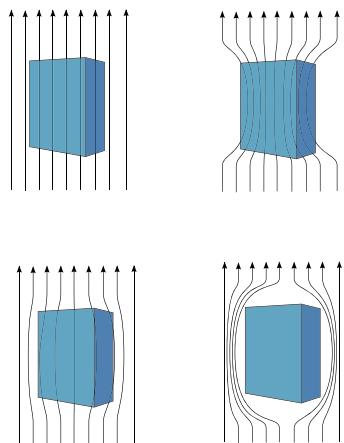
Elektron abgeben. Dadurch fangen die Elektronen effektiv auch an, miteinander über diese Phononen zu wechselwirken. BCS errechneten, dass diese Wechselwirkung bei sehr niedrigen Temperaturen, wenn die beteiligten Teilchen selbst nur sehr langsam sind, leicht anziehend sein kann. Auf diese Weise finden immer zwei Elektronen zueinander und bilden ein sogenanntes *Cooper-Paar*.

Während normale Elektronen einen Spin von  $1/2$  besitzen, haben Cooper-Paare entweder Spin 0 oder Spin 1, je nachdem ob die beiden Spins der beteiligten Elektronen in dieselbe oder in entgegengesetzte Richtungen zeigen (siehe Spin  $\downarrow$ ). Damit sind sie aber auf jeden Fall Bosonen, und dürfen deshalb in beliebig großer Zahl in demselben Zustand sein (Pauli-Prinzip  $\downarrow$ ). Bei niedrigen Temperaturen „kondensieren“ also die Elektronen zu Cooper-Paaren, die im Metall alle dieselbe makros-

kopisch große Wellenfunktion einnehmen, ähnlich wie die Atome im Bose-Einstein-Kondensat (BEC  $\downarrow$ ). Damit finden keine Stromverluste mehr durch Stöße der Elektronen untereinander statt, weil die Cooper-Paare einander einfach durchdringen können. Das Metall wird supraleitend.

Supraleiter haben eine weitere interessante Eigenschaft: Sie verdrängen magnetische Feldlinien ( $\downarrow$ ) aus ihrem Inneren. Dies liegt daran, dass, wenn magnetische Feldlinien auf ein supraleitendes Material treffen, sich in einer dünnen Schicht an der Oberfläche Ströme ausbilden, die ein genauso starkes, entgegengesetztes Magnetfeld verursachen. Bis auf diese – oft nur wenige Nanometer dicke – Randschicht ist das Innere des Supraleiters also vollkommen frei von magnetischen Feldlinien.

Dieses Phänomen – *Meißner-Ochsenfeld-Effekt* genannt – hat erstaunliche Konsequenzen: So beginnt zum Beispiel ein auf einem Magnet platziertes Sup-

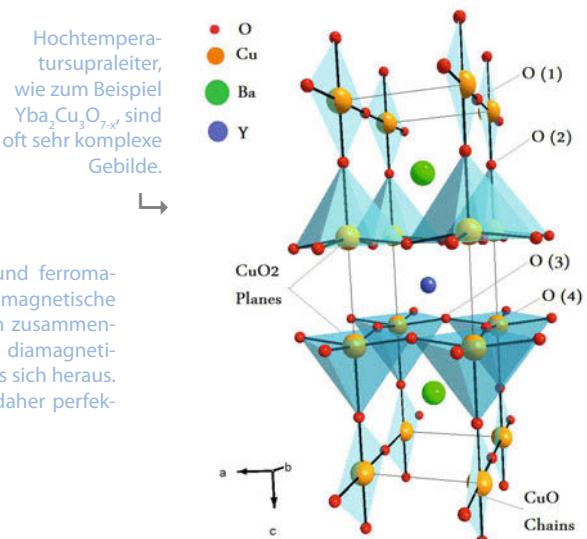


Während para- und ferromagnetische Stoffe magnetische Feldlinien in sich zusammenziehen, drängen diamagnetische Stoffe sie aus sich heraus. Supraleiter sind daher perfekte Diamagnete.

raleiter zu schweben: Er reitet auf dem externen Magnetfeld, um die Magnetfeldlinien aus seinem Inneren herauszuhalten.

Leider benötigt man für das Erreichen des supraleitenden Zustandes extrem niedrige Temperaturen. Es wurden in den 1980er Jahren allerdings auch sogenannte *Hochtemperatursupraleiter* entdeckt. Diese werden je nach Stoff schon ab etwa 70–100 Kelvin supraleitend, was technische Anwendungen deutlich erleichtert. Meist sind diese Hochtemperatursupraleiter keine Metalle, sondern Keramiken, weswegen es zum Beispiel schwer ist, aus ihnen formbare Drähte zu konstruieren.

Bis zum Drucktermin dieses Buches, also über 25 Jahre nach seiner Entdeckung, gibt es noch keine zufriedenstellende Erklärung für den geheimnisvollen Effekt der Hochtemperatursupraleitung.



Bose-Einstein-Kondensate → S. 198

Vektorfelder und Feldlinien → S. 54

A. G. Lebed *The Physics of Organic Superconductors and Conductors* Springer Verlag 2008; englisch

W. Prusseit *Supraleitung – Ein kurzer Überblick* <http://theva.biz/user/eesy.de/theva.biz/dwn/Supraleitung.pdf>

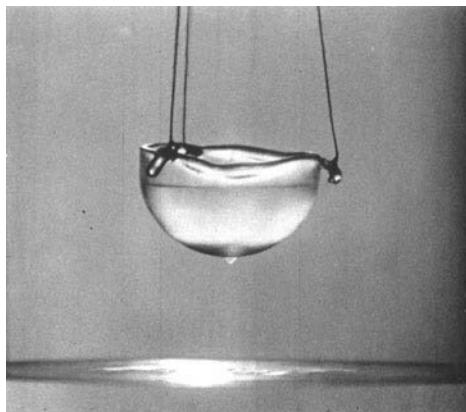


# Supraflüssigkeiten

## Nasser als nass

Als Heike Kamerlingh Onnes im Jahre 1911 Helium auf eine Temperatur von unter 4,2 Kelvin abkühlte, staunte er nicht schlecht: Das Helium verflüssigte sich erwartungsgemäß; aber unterhalb von 2,2 Kelvin begann ein Teil des flüssigen Heliums, langsam die Behälterwände empor- und aus dem Behältnis herauszufließen!

Kamerlingh Onnes wurde damals Zeuge eines makroskopischen Quanteneffektes, den man *Supraflüssigkeit* (auch *Suprafluidität*) nennt. Neben dem „normal“ flüssigen Helium gibt es demnach auch eine suprafluide Form, die nicht mehr den Regeln klassischer Flüssigkeiten gehorcht. Man könnte sie als weitere thermodynamische Phase – neben fest, flüssig, gasförmig etc. – bezeichnen, auch wenn es bis heute nur bei verschiedenen Heliumisotopen und Lithium-7 gelungen ist, diese in die supraflüssige Phase zu überführen.



Eine Supraflüssigkeit läuft von selbst aus einem Behältnis heraus.



Supraflüssigkeiten verhalten sich in mancher Hinsicht wie normale Flüssigkeiten, besitzen jedoch auch Eigenschaften, die den Gesetzen der klassischen Physik zu widersprechen scheinen. Daher stellt man sie sich am besten als Gemisch aus zwei Flüssigkeiten vor: einer klassischen und einer „Quantenflüssigkeit“.

Zum Beispiel besitzen Supraflüssigkeiten keinerlei innere Reibung, ihre Viskosität ist demnach exakt null. Sie üben – wenn man sie nicht zu schnell bewegt – auch keinerlei Reibung auf ihre Umgebung aus. So würde ein Boot, das auf einem suprafluiden Meer fährt, nicht langsamer werden. Es würde solange in dieselbe Richtung gleiten, bis es irgendwo gegen Land stieße.

Supraflüssigkeiten haben auch eine verschwindend geringe Oberflächenspannung. Dies ist der Grund, aus dem sie Behälterwände emporkriechen können. Die Teilchen aller Flüssigkeiten erfahren eine Anziehung durch die Atome im Behälter (die Adhäsion), und normalerweise ist es die Oberflächenspannung, die verhindert, dass eine Flüssigkeit von sich aus die Behälterwände benetzt – denn das würde die Oberfläche vergrößern, und wäre damit energetisch ungünstiger (siehe Lotuseffekt ↓). Verschwindet aber die Oberflächenspannung, so gewinnt das Suprafluid an Energie, wenn es die Behälterwände emporfließt. Zumindest solange, bis sich Adhäsion und Gravitationskraft in der Waage befinden. Bis es soweit ist, ist

Der Lotuseffekt → S. 104

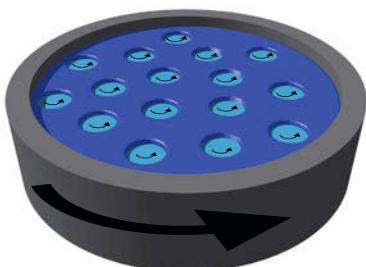
D. Einzel Supraflüssigkeiten

<http://www.wmi.badw-muenchen.de/teaching/Talks/Suprafluessigkeiten%20Einzel%202005.pdf>; Physikalischer Vortrag zu Supraflüssigkeiten

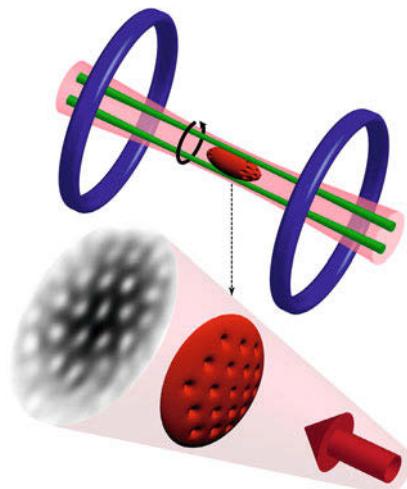
die Supraflüssigkeit jedoch meistens schon aus dem Behälter herausgeflossen – bis heute ein Albtraum für alle technischen Anwendungen mit flüssigem Helium!

Der „quantenhafte“ Anteil einer Supraflüssigkeit besitzt insbesondere keinerlei Entropie – denn ähnlich wie die Atome im Bose-Einstein-Kondensat oder die Elektronenpaare im supraleitenden Metall befinden sich alle (annähernd) im selben quantenmechanischen Zustand. Schwankungen von Dichte und Temperatur innerhalb der Supraflüssigkeit werden also extrem schnell ausgeglichen – sie hat also auch eine so gut wie unendlich große Wärmeleitfähigkeit.

Versetzt man eine Supraflüssigkeit in Rotation (was gar nicht so einfach ist – beginnt man einfach, den sie enthaltenden Behälter zu rotieren, bleibt sie aufgrund ihrer verschwindenden Viskosität einfach in Ruhe), so rotiert nicht die gesamte Flüssigkeit. Im Gegenteil bilden sich kleine Wirbel (Vortizes) innerhalb der Flüssigkeit aus, die jeder für sich einen kleinen Strudel von wenigen Zehntel Millimetern Durchmesser darstellen. Die Supraflüssigkeit zwischen den Vortizes jedoch bleibt in Ruhe.

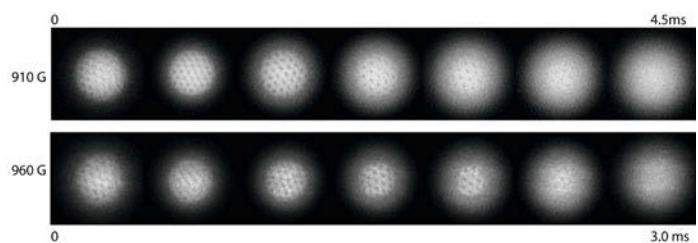


Vortizes in einem rotierenden Suprafluid



Ein Suprafluid wird durch ein Magnetfeld in Rotation versetzt.

Im Labor ist es äußerst schwierig, eine reine Supraflüssigkeit zu erzeugen – bei fast absolutem Temperaturnullpunkt sind gerade einmal 8 % des flüssigen Heliums in der supraflüssigen Phase.



Eine auseinanderdriftende, rotierende Supraflüssigkeit: Sinkt die Dichte zu weit ab, bricht die Suprafluidität zusammen – die Vortizes verschwinden.



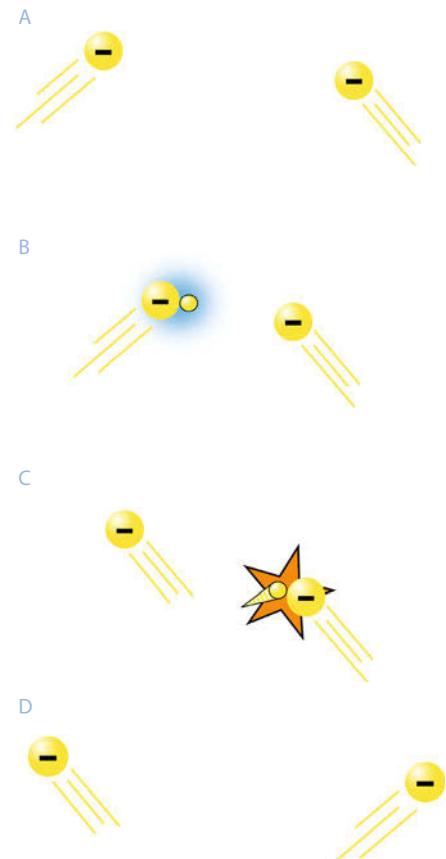
## Quantenvakuum

### Wie stark drückt das Nichts?

Gemeinhin bezeichnet „Nichts“ die Abwesenheit von jeglicher Materie, also leer Raum, ohne Teilchen. Für die menschliche Anschauung ist das noch halbwegs gut vorstellbar, wenn man sich den Raum wie eine Bühne vorstellt und die Teilchen wie kleine Kugeln, die als Schauspieler auf dieser Bühne hin- und herflitzen. Das Nichts ist dann also z. B. ein Bereich des Raumes, in dem sich gerade keine Teilchen aufhalten. Täglich versuchen Physiker in ihren Laboren diesem Zustand nahezukommen, indem sie zum Beispiel mit gigantischen Pumpen die gesamte Luft aus einer Kammer absaugen, um dann im Ultrahochvakuum Experimente durchzuführen.

Es ist eine Folge der Quantenphysik, dass diese Vorstellung vom Vakuum aber nicht ganz korrekt ist: Teilchen sind eben keine kleinen Kugeln, sondern werden durch Wellenfunktionen ( $\downarrow$ ) beschrieben. Die Wechselwirkungen der Teilchen untereinander geschieht durch den in Feynman-Diagrammen ( $\downarrow$ ) schematisch dargestellten Austausch von *virtuellen Teilchen*. So stoßen sich, vereinfacht ausgedrückt, zwei Elektronen deshalb ab, weil das eine – quasi aus dem Nichts heraus – ein Photon erzeugt und aussendet, das irgendwo auf ein weiteres Elektron trifft, welches durch den Rückstoß abgelenkt wird. Dieses Photon wird auch *virtuell* genannt, denn es ist ihm – zumindest für kurze Zeit – erlaubt, die Energie-Impulsbeziehung der Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) zu verletzen.

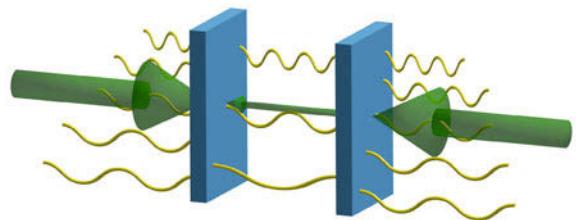
Eine der merkwürdigen Konsequenzen der Quantenphysik aber ist, dass diese spontane Entstehung und Vernichtung der virtuellen Teilchen ständig passiert, auch wenn keine realen Teilchen in der Nähe sind! Selbst, wenn sich also alle Wellenfunktionen weit weg befinden, brodet das Vakuum nur so von virtuellen Teilchen, die ständig von alleine entstehen und verschwinden. Dieses Brodeln wird von den Physikern *Vakuumfluktuationen* genannt.



Elektrische Abstoßung durch virtuelle Photonen:  
 (A) Annäherung, (B) Aussenden eines Photons,  
 (C) Empfang eines Photons und (D) Auseinanderfliegen

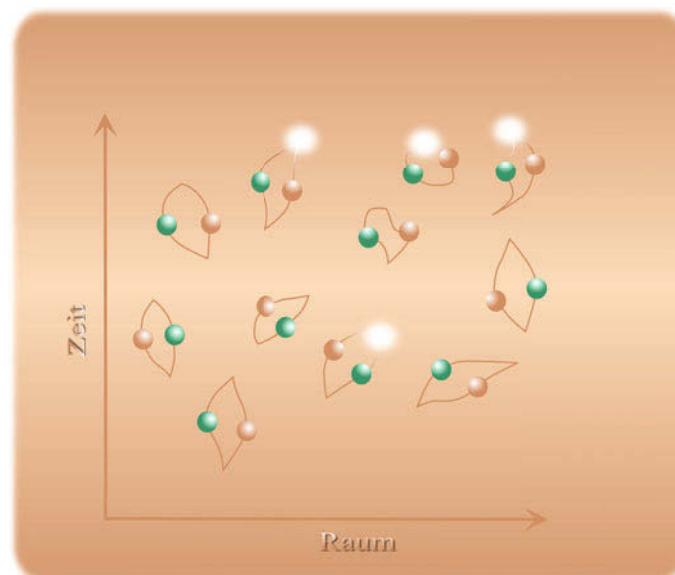
Man kann diese virtuellen Teilchen nur sehr schwer direkt nachweisen, aber es gibt eine indirekte Möglichkeit, ihre Existenz zu belegen: den sogenannten *Casimir-Effekt*, benannt nach Hendrik Casimir, der ihn 1948 theoretisch vorhersagte. Der Casimir-Effekt macht sich auf ingenöse Weise sowohl die Vakuumfluktuationen als auch die Wellennatur der Elementarteilchen zunutze.

Man stelle sich zwei parallele Metallplatten vor, die einander so nahe sind, dass sich ihre Flächen fast berühren. Außerhalb dieser Platten finden wie gewohnt die Vakuumfluktuationen statt, und virtuelle Teilchen jeglicher Sorte und Energie entstehen und vergehen. Im Zwischenraum der beiden Platten entstehen ebenfalls virtuelle Teilchen, und nach den Gesetzen der Quan-



Zwischen den beiden Platten werden Quantenfluktuationen unterdrückt.

tenphysik haben diese jeweils eine ihnen zugeordnete De-Broglie-Wellenlänge. Diese darf nun aber zwischen den Platten – anders als außerhalb – nicht jeden Wert annehmen, sondern muss derart sein, dass die Welle auch als stehende Welle in den Zwischenraum „passt“. Der Plattenabstand muss also ein ganzzahliges Vielfaches der De-Broglie-Wellenlänge des virtuellen Teilchens sein.



Im Vakuum entstehen und vergehen unablässig virtuelle Teilchenpaare.

Im Innenraum zwischen den beiden Platten entstehen somit also nicht alle möglichen, sondern nur einige virtuelle Teilchen, und somit weniger als außerhalb, einfach weil nicht alle Wellenlängen (und damit Energien) erlaubt sind. Damit entsteht im Inneren der beiden Platten im Vergleich zu außerhalb ein Unterdruck: Der Druck der von außen stoßenden Teilchen ist stärker und drückt die Platten zusammen. Diese Kraft, so winzig sie auch sein mag, kann man in der Tat messen. So hat man einen beeindruckenden Nachweis der quantenhaften Eigenschaften des Nichts gefunden – und gezeigt, dass ein teilchenleerer Raum bei Weitem nicht leer ist.



## Elektronenmikroskopie

### Mikroskope für den Nanometerbereich

Bei Mikroskopen jeder Art gibt es eine natürliche Auflösungsgrenze: Benutzt man Strahlung einer gewissen Wellenlänge, um ein Objekt abzubilden, dann kann man nichts erkennen, was kleiner als eben genau diese Wellenlänge ist: Kleinere Objekte gleiten einem dann quasi „durch die Finger“. Da bei Licht kleinere Wellenlängen gleichbedeutend mit höherer Energie sind, gibt es hier eine gewisse technische Grenze: Verkleinert man die Wellenlänge des benutzten Lichtes immer weiter, so begibt man sich irgendwann in Bereiche, bei denen man das zu beobachtende Objekt verschmort anstatt es abzubilden.

Ein hervorragender Ausweg ist daher, von Licht- auf Materiewellen auszuweichen: Aufgrund der Prinzipien der Quantenmechanik verhalten sich zum Beispiel auch Elektronen wie Wellen (↓). Deren sogenannte *De-Broglie-Wellenlänge* bewegt sich je nach Energie in der Größenordnung von Bruchteilen von Nanometern. Obwohl metallische Bauteile im Mikroskop den Verlauf von Elektronenwellen störend beeinflussen und man deswegen diese theoretisch mögliche Auflösung nicht erreicht, ermöglicht ein Elektronenstrahl-Mikroskop immer noch eine rund tausendfach höhere Vergrößerung als normale Lichtmikroskope.

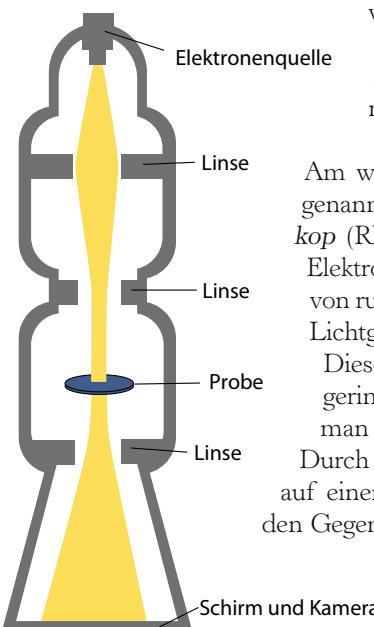
Praktischerweise kann man Elektronenstrahlen fast genauso manipulieren wie Lichtstrahlen: Man kann sie ablenken, reflektieren – und mit einer geschickten

Anordnung von magnetischen Feldern sogar wie bei einer optischen Linse fokussieren. Die Brennweite solcher Elektronenlinsen lässt sich spontan verändern, indem man die Magnetfelder neu einstellt.

Am weitesten verbreitet ist das sogenannte *Rasterelektronenmikroskop* (REM): In einem REM werden Elektronen durch eine Spannung von rund 100 000 Volt auf etwa halbe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

Diese hohen Energien führen zu geringen Wellenlängen, wodurch man eine hohe Auflösung erzielt. Durch Magnetspulen werden sie auf einen Punkt des zu beobachtenden Gegenstandes fokussiert. Wenn der

Gegenstand elektrisch leitfähig ist, dann katapultieren die einschlagenden Elektronen sogenannte *Sekundärelektronen* aus der Oberfläche heraus, die ein Detektor wahrnehmen kann.



Der Strahlengang im Elektronenmikroskop

Der Punkt, auf den der Elektronenstrahl fokussiert wurde, wird nun in schneller Abfolge über die gesamte zu beobachtende Probe gefahren. Sie wird also, wie der Name schon vermuten lässt, abgerastert. Aus der Energie und der Verteilung der so gemessenen Sekundärelektronen kann man dann mit hoher Präzision auf die Beschaffenheit der Oberfläche schließen.

Ist der zu beobachtende Gegenstand nicht von sich aus elektrisch leitend, so muss man zumindest seine Oberfläche künstlich leitend machen – so werden zum Beispiel organische Proben mit einem dünnen Metallfilm überzogen, bevor man sie mit dem REM beobachten kann.

All dies muss übrigens in fast perfektem Vakuum geschehen – die hohe Auflösung der Elektronenmikroskope würde empfindlich leiden, wenn die beschleunigten Elektronen ständig mit Luftmolekülen zusammenstoßen würden.

Aus all diesen Gründen ist ein Elektronenmikroskop eine technisch sehr aufwendige Angelegenheit – aber auch eine erfolgreiche und spannende Erfindung, die aus der modernen Technik nicht mehr wegzudenken ist.

Diese Fliegen mussten erst mit einer Schicht aus Metall überzogen werden, damit sie mit dem Elektronenmikroskop abgebildet werden konnten.



Gestieltes Blütenköpfchen beim Marienblatt  
(*Tanacetum Balsamita*)

Sogar regelmäßige Atomstrukturen kann man mithilfe der Elektronenmikroskopie ausmachen.

Nahaufnahme von roten Blutkörperchen

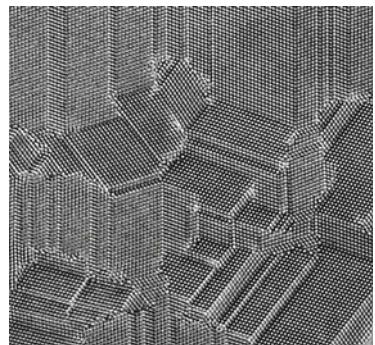
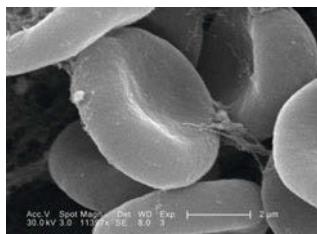


Bild oben rechts mit freundlicher Genehmigung von Stefan Diller – Wissenschaftliche Photographie – Würzburg 2008

Bild unten links von Janice Carr, CDC; mit freundlicher Genehmigung von NISE Network

Bild unten Mitte von Jürgen Berger, mit freundlicher Genehmigung des Max-Planck-Instituts für Entwicklungsbiologie, Tübingen

Bild unten rechts mit freundlicher Genehmigung des National Center for Electron Microscopy, Lawrence Berkeley National Laboratory

## Rastertunnelmikroskopie

### Wie man einzelne Atome sichtbar macht

Oberflächenphänomene von Festkörpern sind rätselhaft: Wo lagern sich Atome auf einer Oberfläche an? In welchem Tempo laufen chemische Prozesse an der Grenzschicht zwischen Metall und Luft ab? Und wie viele Goldatome klumpen sich auf einer Siliziumoberfläche zu einem Haufen zusammen?

Um all diese Fragen zu beantworten, reicht ein einfaches Elektronenmikroskop (↓) oft nicht mehr aus: Um Abstände aufzulösen, die kleiner als ein Atom sind, müsste man die Energie der gestreuten Elektronen so weit erhöhen, dass sie das zu beobachtende Objekt beim Beschuss zerstören würden. Zum Auffinden eines einzelnen Goldatoms auf einer Eisenoberfläche ist Elektronenmikroskopie also eher ungeeignet.

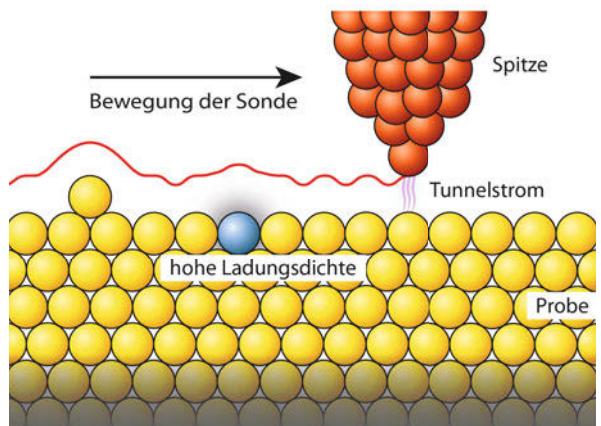
Um kleinste Abstände bis hin zur Größe einzelner Atome abzubilden, macht man sich deswegen die geheimnisvollen Effekte der Quantenwelt zunutze. Sie kommen im Rastertunnelmikroskop (RTM) zur Anwendung.

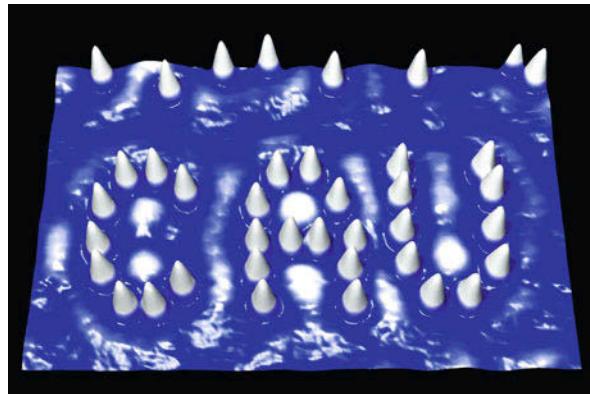
Das Kernstück des RTM ist eine extrem feine Metallspitze, die an ihrem Ende nicht mehr als einige wenige Atome breit ist. Sie wird bis auf wenige Nanometer an eine – ebenfalls leitende – Oberfläche herangebracht. Dann wird eine kleine Spannung zwischen Spitz und Oberfläche angelegt. Weil sich die beiden nicht berühren, dürfte nach der klassischen Physik eigentlich kein Strom fließen. Aber im Mikrokosmos gelten die Gesetze der klassischen Welt nicht mehr, sondern es herrschen die Regeln der Quantenphysik: die Wellen-

funktionen (↓) der Elektronen der Metallspitze reichen bis in die Oberfläche hinein. Es besteht also eine geringe Chance, dass das Elektron tunneln – also plötzlich aus der Spitz verschwindet und zeitgleich in der Oberfläche auftaucht (siehe Tunneleffekt ↓). Wenn das geschieht, dann fließt ein winziger Strom, den man nachweisen kann.

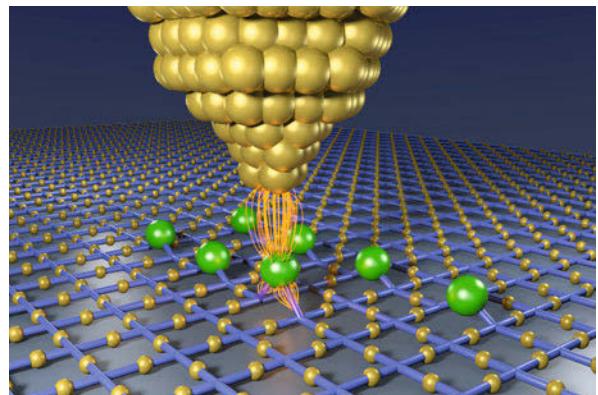
Die Häufigkeit, mit der ein solches Quantentunnellen zwischen Spitz und Oberfläche vorkommt, ist extrem stark – nämlich exponentiell – abhängig vom Abstand zwischen Spitz und Oberfläche. Nähern sie sich um nur einen Atomabstand aneinander an, so steigt die Stärke des fließenden Stromes bereits messbar an.

Die Spitz des Rastertunnelmikroskops tastet die Oberfläche der Probe so ab, dass der Tunnelstrom dabei konstant bleibt.





Manganatome auf Silber angeordnet. Aufnahme der Christian-Albrechts-Universität Kiel (CAU)



Mit der Spitze des RTM lassen sich sogar einzelne Atome manipulieren.

Graphen unter dem Rastertunnelmikroskop

Eine Oberfläche kann man daher in einem Rasterverfahren untersuchen. Der Bereich, den die Spitze dabei abrastert, ist allerdings um ein Vielfaches kleiner als beim Elektronenmikroskop.

Mit diesem Verfahren kann man einzelne Atome (genauer gesagt: ihre Elektronenwolken) in der Oberfläche sichtbar machen, Störstellen entdecken und einzelne Fremdatome, die sich auf der Oberfläche abgelagert haben, finden. Das RTM – für das seine Erfinder Gerd Binning und Heinrich Rohrer 1986 den Nobelpreis für Physik erhielten – hat so in den letzten Jahren faszinierende Einblicke in die Physik der Oberflächen geboten.

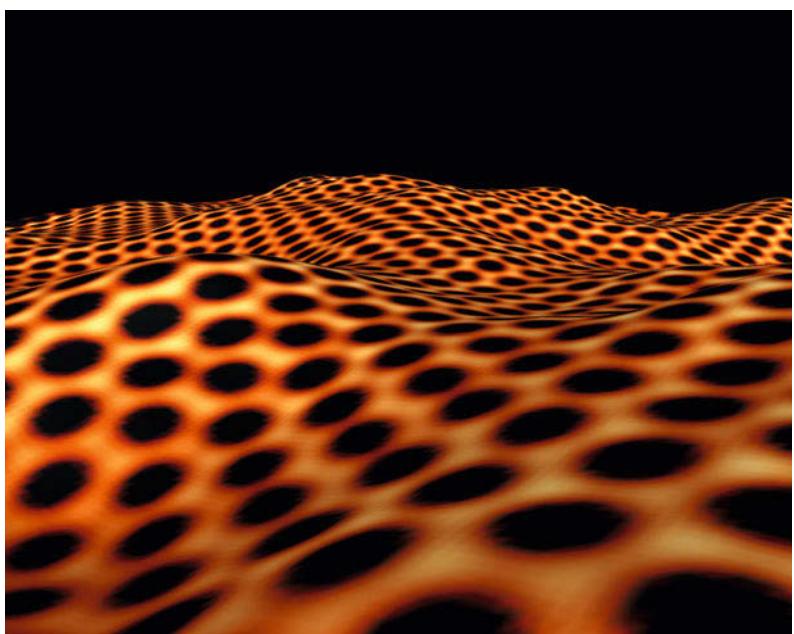


Bild links oben von Kliewer, Rathlev, Berndt, CAU Kiel

Bild rechts oben mit freundlicher Genehmigung von Sebastian Loth, Max Planck Gesellschaft

Bild unten von Dr. Marco Pratzer, II. Phys. Institut B, RWTH Aachen

S. Karamanolis: *Faszination Nanotechnologie* Karamanolis Verlag, 2. Auflage 2006

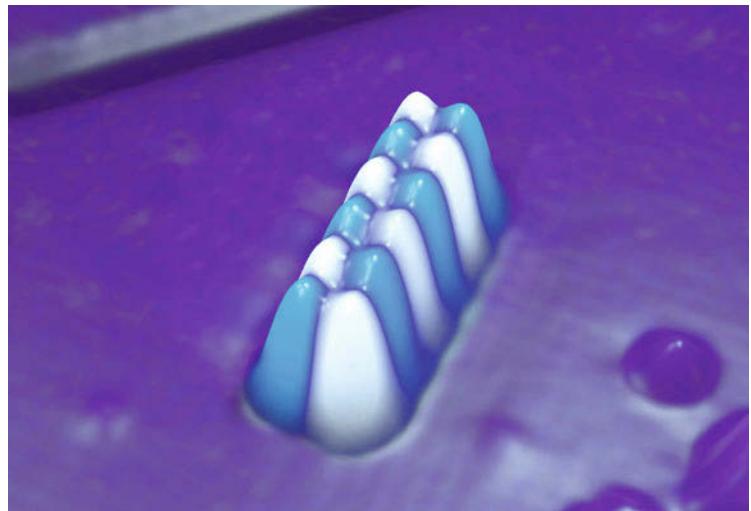
K. Jopp *Nanotechnologie – Aufbruch ins Reich der Zwerge* Gabler Verlag, 2. Auflage 2006



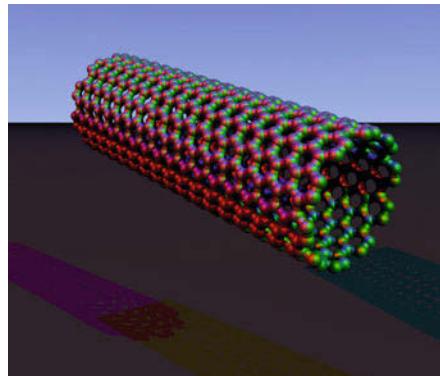
## Nanowelten

Ganz unten ist eine Menge Platz

Nanowelten umfassen Strukturen, die Größen von einigen Nanometern (Milliardstel Meter) aufweisen und damit deutlich kleiner als die Lichtwellenlänge (400 bis 800 Nanometer) sind. Man dringt hier in einen Bereich vor, in dem einzelne Atome sowie Quanteneffekte wichtig werden – die Atome selbst sind einige Zehntel Nanometer groß. Lichtmikroskope sind hier unbrauchbar, sodass man Elektronenmikroskope ( $\downarrow$ ) oder andere Techniken zum Erkennen von Nanostrukturen benötigt. Wenn es gelingt, Materie auf dieser Größenskala zu kontrollieren und zu verändern, so ergeben sich ungeahnte technische Möglichkeiten.



Ein Bit aus 12 Atomen



Kohlenstoffnanoröhre

Einer der Ersten, der sich Gedanken über solche Möglichkeiten machte, war der Physik-Nobelpreisträger Richard P. Feynman, der am 29. Dezember 1959 einen wegweisenden Vortrag mit dem Titel „*There's Plenty of Room at the Bottom*“ (Ganz unten ist eine Menge Platz) hielt. Dort stellte er sich beispielsweise die Frage: „Können wir die komplette Encyclopedia Britannica auf den Kopf eines Nagels schreiben?“ Er kam zu dem Schluss, dass es dann geht, wenn man die Schrift um den Faktor 25 000 verkleinert, sodass die Größe der Buchstaben bei rund acht Nanometern zu liegen kommt – auf dieser Längenskala bietet also selbst ein Nagelkopf eine Menge Platz!

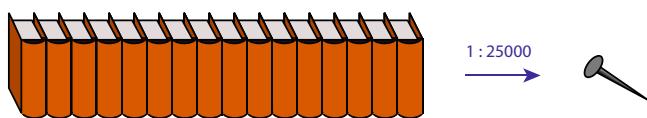


Bild oben mit freundlicher Genehmigung von Sebastian Loth, Max Planck Gesellschaft

Elektronenmikroskopie → S. 208

R. P. Feynman *There's Plenty of Room at the Bottom* <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>

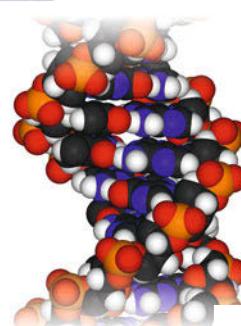


Noch viel mehr Platz erhält man, wenn man nicht nur die Oberfläche, sondern auch das Innere der Materie nutzen kann: Der Inhalt aller existierenden Bücher hätte in dieser Rechnung prinzipiell in einem Staubkorn Platz! Dass solche Informationsdichten auch in der Realität möglich sind, beweist die Natur, wenn sie den kompletten genetischen Code eines Lebewesens in Form eng verpackter DNA-Doppelstränge in jeder einzelnen Zelle unterbringt, wobei sie pro Informations-Bit nur etwa fünfzig Atome benötigt. Dabei liegt der Durchmesser des DNA-Doppelstrangs bei nur rund zwei Nanometern.

Heutige Standardtechniken wie Festplatten benötigen noch deutlich mehr Atome pro Bit; ein typischer Wert für Festplatten liegt bei einigen Millionen Atomen, wobei der technische Fortschritt diesen Wert ständig verringert. Im Labormaßstab konnte in mühsamer Feinarbeit mithilfe eines Rastertunnelmikroskops ( $\downarrow$ ) ein Bit bereits mit nur zwölf Atomen realisiert werden.

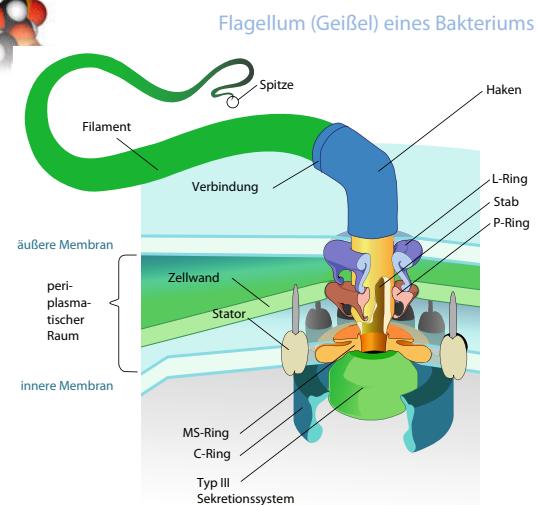
Ein mehrere Zentimeter langer DNA-Faden ist im Chromosom mehrfach eng aufgewickelt und so auf nur wenigen Mikrometern Raum untergebracht.

Im Bereich der Mikroelektronik nähern wir uns also bereits Feynmans Vision, sodass man wohl schon bald von Nanoelektronik sprechen kann. Auch in anderen Bereichen gibt es Fortschritte, beispielsweise bei der Herstellung neuer Oberflächen (Lotuseffekt  $\downarrow$ ) und Materialien wie Fullerenen, Kohlenstoffnanoröhren oder Nano-Schichten (Graphen).



Atomare Struktur der DNA-Doppelhelix

Echte Nanomaschinen oder gar autonome Nanobots sind jedoch noch weitgehend Zukunftsmusik. Die Natur zeigt uns jedoch, was in diesem Bereich prinzipiell möglich ist. So ist jede einzelne lebende Zelle ein Wunderwerk der Nanotechnik. Ein Beispiel ist die Geißel (das Flagellum) von Bakterien, die von einem winzigen Nanomotor mit rotierender Achse wie eine Schiffschaube in Drehung versetzt wird.



Rastertunnelmikroskopie → S. 210

Lotuseffekt → S. 134

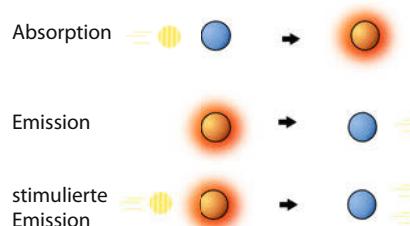
DESY The world's smallest magnetic data storage [https://www.desy.de/information\\_\\_services/press/pressreleases/2012/pr\\_120112/index\\_eng.html](https://www.desy.de/information__services/press/pressreleases/2012/pr_120112/index_eng.html)

# Laser

## Lichtteilchen im Gleichschritt

Laserlicht kommt überall im alltäglichen Leben zum Einsatz – ob als moderne Alternative zum Zeigestock, als Sensor in automatischen Türen oder als Bauteil zum Auslesen der Daten einer DVD: Der Laser ist aus unserem Leben nicht wegzudenken. Doch was ist so besonders am Licht eines Laserstrahls? Was unterscheidet es zum Beispiel vom Licht einer Taschenlampe?

Um dies zu verstehen muss man sich die Eigenschaften von Lichtteilchen (*Photonen*) einmal genauer ansehen: Sie sind laut Quantenmechanik zugleich Lichtwellen – also Schwingungen im elektromagnetischen Feld; je schneller sie dabei oszillieren, desto blauer ist das Licht: Die Schwingungsfrequenz bestimmt also die Farbe des entsprechenden Lichtes. Und wenngleich Laserlicht auch eine Farbe hat, gibt es doch einen wichtigen Unterschied zwischen z. B. normalem roten Licht und rotem Laserlicht. Nur in Letzterem finden die Schwingungen aller Photonen in exaktem Gleichschritt statt. Man spricht davon, dass die Phasen aller beteiligten Photonen in einer festen Beziehung zueinander stehen: Alle schwingen gleichzeitig auf und ab. Und das bleiben sie auch über lange Strecken. Die sogenannte *Kohärenzlänge*, also die Strecke, nach der zwei Photonen im Lichtstahl aufhören, eine feste Phasenbeziehung zueinander zu haben, kann bei Laserlicht viele Kilometer lang sein. Hingegen ist die Kohärenzlänge von Sonnenlicht oder Licht aus einer Glühbirne oft nur wenige Mikrometer lang. Man kann



also mit Fug und Recht behaupten, dass die Photonen in Sonnenstrahlen keinerlei Phasenbeziehung zueinander haben. Den Unterschied zwischen normalem Licht und Laserlicht stellt man sich also am besten wie den zwischen einer Gruppe durcheinanderlaufender Marathonläufer und einem Trupp im Gleichschritt marschierender Soldaten vor.

Wie aber erzeugt man solch kohärentes Laserlicht? Hierfür macht man sich die Existenz der diskreten Energieniveaus (Frank-Hertz-Versuch ↓) in Atomen zunutze. Ein ausgesuchtes Element wird (meist in Gasform, es gibt aber auch

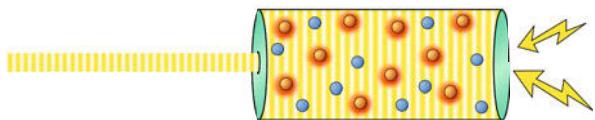
Festkörper- oder Flüssigkeitslaser) in einen Hohlraum zwischen zwei Spiegeln eingeschlossen. In diesen so genannten *Resonator* schickt man dann einzelne Photonen, die genau die Energie eines bestimmten Überganges zwischen zwei diskreten Energieniveaus im entsprechenden Element besitzen.

Trifft ein solches Photon auf ein Atom, so kann es nach den Gesetzen der Quantenmechanik von ihm aufgenommen werden (*Absorption*). Dabei wird das Atom vom niedrigeren in den höheren Energiezustand überführt. Ein solch angeregter Zustand ist allerdings nicht sonderlich stabil; schon nach kurzer Zeit zerfällt er, d. h. das Atom geht unter Abgabe eines Photons der entsprechende Wellenlänge wieder in seinen Grundzustand über (*Emission*). Es gibt allerdings noch eine

Die stimuliert emittierten Photonen zwischen zwei Spiegeln (Kavität) bilden eine stehende Welle aus. Befindet sich in einem der Spiegel ein kleines Loch, so wird ein konstanter Strahl aus kohärenten Photonen abgegeben. Damit der Laser nicht verlischt, muss ständig Energie nachgeliefert werden, um Atome in den ersten angeregten Zustand zu versetzen.

dritte Möglichkeit, und diese ist für einen Laser zentral wichtig: Trifft nämlich ein Photon mit der richtigen Energie auf ein bereits angeregtes Atom, so kann es dieses auch zurück in den Grundzustand befördern (!), wobei es zwei Photonen derselben Wellenlänge abgibt: das ursprüngliche, sowie eines, das die freigewordene Energie des Atoms besitzt (*stimulierte Emission*). Diese beiden Photonen besitzen eine feste Phasenbeziehung zueinander.

Wenn man es nun schafft, dass von den Atomen zwischen den beiden Spiegeln mehr als die Hälfte im angeregten Zustand sind, so erzeugen die Photonen eine Art Lawineneffekt: Sie werden zwischen den beiden Spiegeln hin und her reflektiert und regen dabei ständig Atome an – und auch wieder ab. Dabei werden sie durch die stimulierte Emission nach und nach in eine feste Phasenbeziehung zueinander gebracht. Öffnet man in einem der Spiegel ein kleines Loch, so können dort die kohärenten Photonen austreten und einen



Lichtstrahl mit enormer Kohärenzlänge formen. Diese gestimulierte Emission hat dem LASER auch seinen Namen verliehen, denn der Begriff steht für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, zu deutsch „Lichtverstärkung durch gestimulierte Emission von Strahlung“.

Der Laser erlaubt zum Beispiel, die Entfernung zum Mond präzise zu messen: Man kann das Licht so exakt fokussieren, dass sich ein von der Erde abgeschossener Laserstrahl beim Auftreffen auf die im Mittel 384 000 Kilometer entfernte Mondoberfläche gerade einmal auf sieben Kilometer verbreitert hat. Reflektiert von Spiegeln, die von Astronauten während der Apollomissionen dort installiert wurden, kann man aufgrund der exakt festgelegten Wellenlänge des Laserlichtes die am Erdboden ankommenden Photonen immer noch genau identifizieren. Die Entfernung zwischen Erde und Mond kann so bis auf den Millimeter genau gemessen werden.

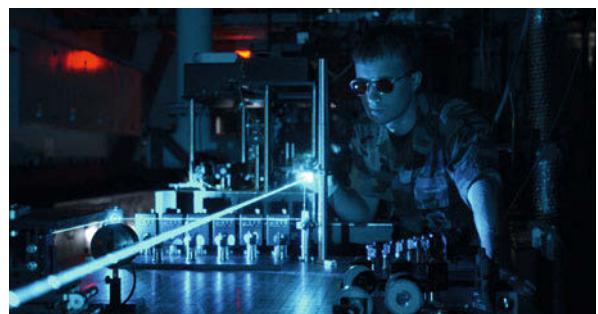
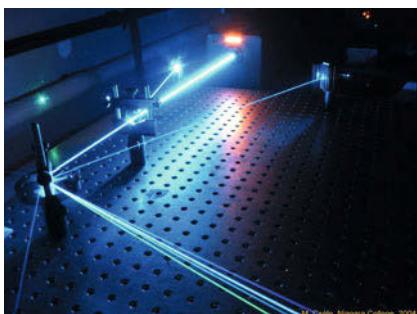


Bild links unten mit freundlicher Genehmigung von Professor Mark Csele, Niagara College  
Laserkühlung → S. 200

T. Murphy APOLLO <http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/apollo/apollo.html>; Bestimmung der Entfernung Erde-Mond

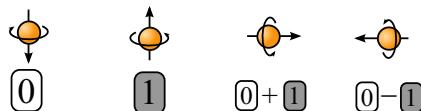


# Quantencomputer

## Quantenbits: Ja, Nein und Vielleicht

Computer sind mächtige Werkzeuge zur Informationsverarbeitung, die aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken sind. Die grundlegenden Bausteine, in denen ein Computer Information darstellt, sind Bits, die den Wert 1 (Strom fließt) oder 0 (Strom fließt nicht) annehmen können.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts kam man überdies zur Erkenntnis, dass man Bits nicht nur mit klassischen physikalischen Größen darstellen kann (z.B. mit fließendem Strom), sondern auch mit quantenmechanischen Größen, wie zum Beispiel dem Spin ( $\downarrow$ ) eines Atoms. Ein *Quantenbit* (kurz: *Qubit*) kann dabei nach den Gesetzen der Quantenphysik nicht nur die Werte 1 (Spin zeigt nach oben) und 0 (Spin zeigt nach unten) annehmen, sondern auch eine beliebige Überlagerung (*Superposition*) dieser beiden.



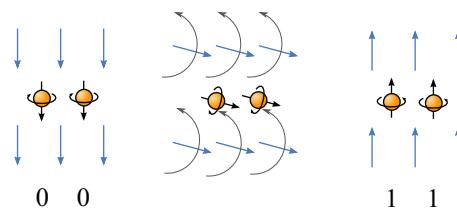
Ein Qubit kann nicht nur die Werte 0 und 1 annehmen, sondern auch beliebige Kombinationen davon.

Man kann dann auch mit solchen Qubits rechnen. Eine fundamentale logische Rechenoperation, aus der man alle komplexeren Operationen wie z.B. Addition oder Negation durch Kombination konstruieren kann, lautet NAND (von „not and“, engl. für „nicht und“). Die NAND-Operation betrachtet zwei Bits und liefert als Resultat entweder eine 0, wenn beide Bits den Wert

1 haben, oder eine 1 in allen anderen Fällen, d.h., wenn beide Bits den Wert 0 besitzen oder eines 0 und eines 1 ist.

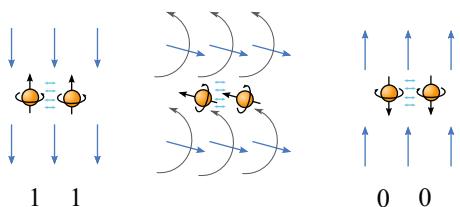
Die NAND-Operation kann man sehr leicht auch mit Qubits realisieren. Hierfür platziert man die beiden Atome, deren Spins die Qubits darstellen, in ein externes Magnetfeld  $\mathbf{B}$ . Um die Rechenoperation NAND nun anzuwenden, ändert man die Richtung des Magnetfeldes langsam von unten nach oben.

Die beiden Spins Q1 und Q2 wollen sich während dieses Vorganges nicht nur nach dem Magnetfeld ausrichten, es gibt auch eine ferromagnetische ( $\downarrow$ ) Wechselwirkung zwischen ihnen. Zeigten sie zu Beginn zum Beispiel beide nach unten – also in dieselbe Richtung wie  $\mathbf{B}$  – so folgen sie beim Umpolungsvorgang gemeinsam der Richtung von  $\mathbf{B}$  und sind am Ende immer noch parallel zueinander und zeigen beide nach oben.

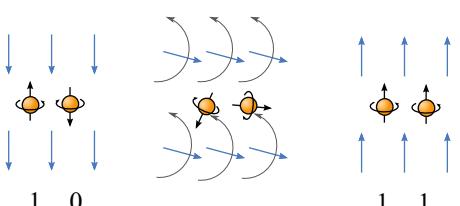


Die Umpolung des externen Magnetfeldes wirkt wie die NAND-Operation auf zwei Qubits.

Sind sie beide parallel zueinander, aber zeigen in die entgegengesetzte Richtung von  $\mathbf{B}$  (beide Qubits also zu Beginn gleich 1), so bleiben sie während der Umpolung aufgrund der ferromagnetischen Wechselwirkung zwischen ihnen ebenfalls parallel, zeigen also nach dem Vorgang nach unten (beide Qubits sind dann gleich 0).

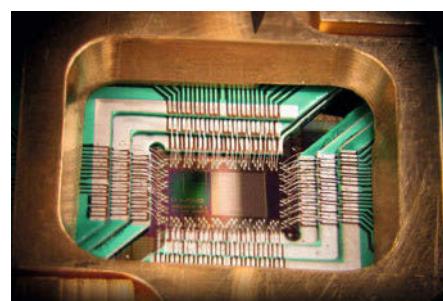


Zeigt einer der beiden Spins nach oben und einer nach unten, so befinden sie sich in einem instabilen Gleichgewicht. Die Umpolung des Magnetfeldes verursacht dann eine Störung der beiden Spins, sodass sie am Ende des Vorgangs im energetisch günstigeren Zustand – nämlich parallel zueinander – sind und dabei in dieselbe Richtung zeigen wie das äußere Magnetfeld, also nach oben (beide Qubits gleich 1).

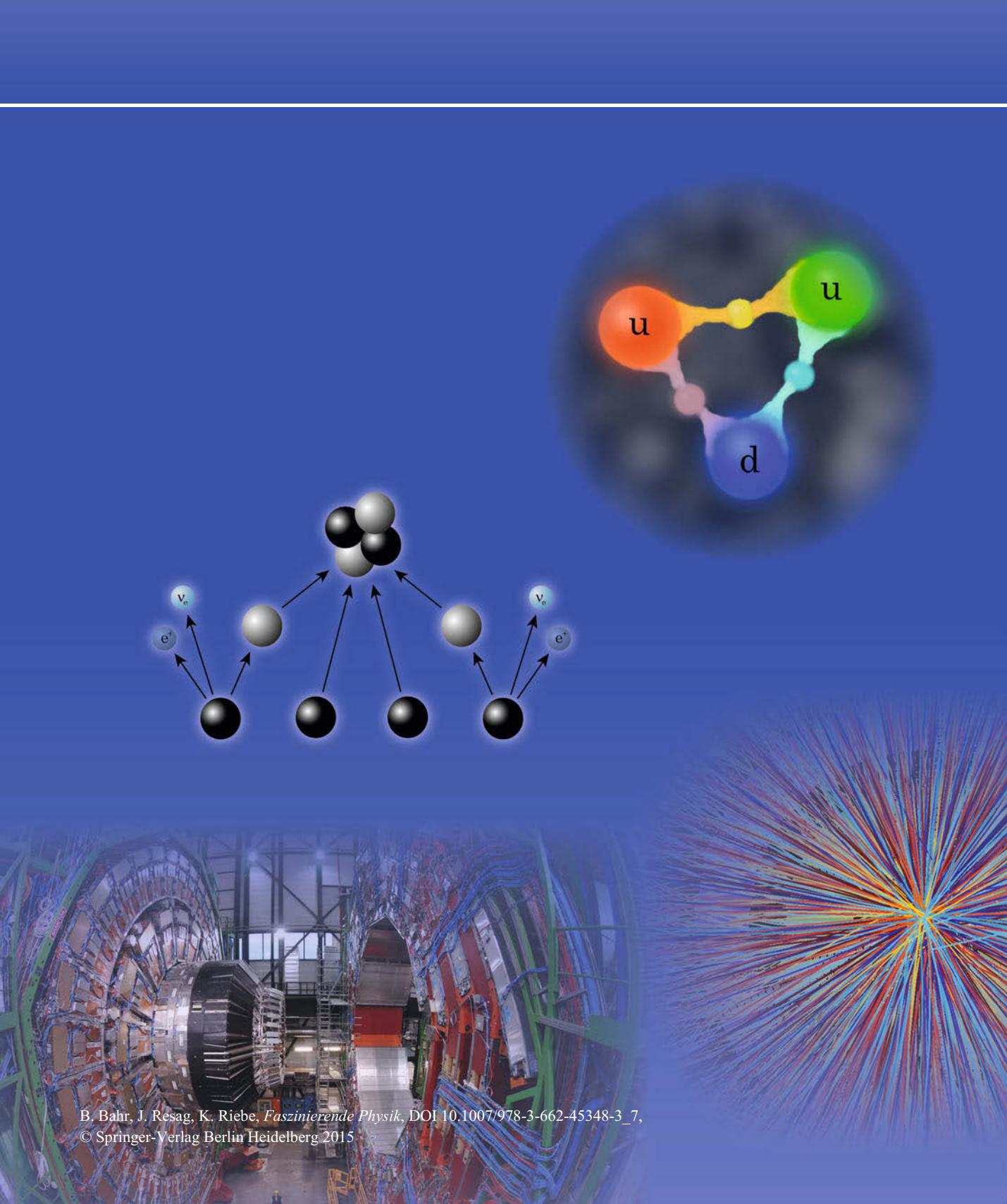


Am Ende der Prozedur sind in allen Fällen also beide Spins gleich. Das gewünschte Ergebnis kann man aus dem Wert der beiden Qubits ablesen. Die Möglichkeiten sind:  $00 \rightarrow 1$ ,  $01 \rightarrow 1$ ,  $10 \rightarrow 1$ ,  $11 \rightarrow 0$ . Und das ist genau die NAND Operation.

Die Mächtigkeit der Berechnungen mit Qubits röhrt daher, dass sie nicht nur die Werte 0 und 1, sondern auch Überlagerungen dieser beiden Werte annehmen können. Prinzipiell kann man so mehrere Rechenschritte parallel ausführen, in denen einzelne Bits unterschiedliche Werte haben. In der Tat haben Quantencomputer viel Aufmerksamkeit erfahren, weil man zeigen konnte, dass sie prinzipiell in der Lage sind, große Zahlen sehr viel schneller in ihre Primfaktoren zu zerlegen, als das klassische Computer jemals könnten. Die Sicherheit der modernen Verschlüsselungstechnologie beruht aber gerade auf der Tatsache, dass normale Computer für diese Faktorisierung Milliarden von Jahren bräuchten. Effektive Quantencomputer wären also der Albtraum für Sicherheitsexperten (zumindest solange, bis man ein besseres Verschlüsselungsverfahren entwickelt hätte). Aber auch davon sind wir noch weit entfernt: Weil quantenmechanische Überlagerungen so unglaublich störanfällig sind, ist die technische Realisierung von sinnvollen Quantencomputern bislang noch Zukunftsmusik. Während dieses Buch geschrieben wird, gibt es noch keine logischen Gatter mit mehr als vierzehn Qubits.



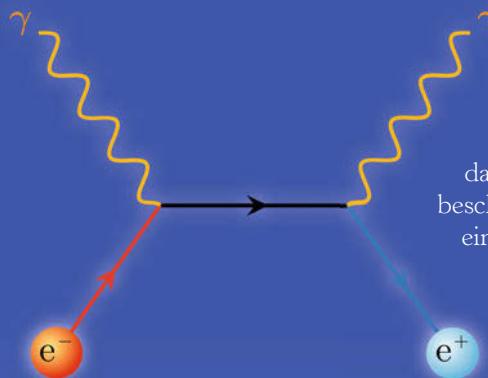
D-Wave One, ein sogenannter *adiabatischer* Quantencomputer: Deutlich langsamer und fehleranfälliger als ein „normaler“ Quantencomputer, dafür allerdings bereits technisch realisierbar und mit 128 Bits, die sich wie Qubits verhalten



B. Bahr, J. Resag, K. Riebe, *Faszinierende Physik*, DOI 10.1007/978-3-662-45348-3\_7,  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

# 7 Welt der Elementarteilchen

Woraus besteht Materie? Was ist das Higgs-Teilchen, was Antimaterie und was genau erforscht man am großen Beschleuniger LHC? Diese Fragen betreffen die Welt der Elementarteilchen.



Auf diesem Gebiet haben Physiker in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte gemacht. Nachdem man zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts gelernt hatte, dass Atome nicht unteilbar sind, zeigten sich zunehmend weitere Substrukturen. Heute gehen Physiker davon aus, dass das sogenannte „Standardmodell der Elementarteilchen“ alle Teilchen beschreibt, aus denen die uns bekannte Materie aufgebaut ist. Dazu gehören einmal die Quarks, aus denen beispielsweise Protonen und Neutronen bestehen. Dann aber auch das Elektron und seine schwereren Geschwister, das Myon und das Tauon, sowie die fast masselosen Neutrinos.

Zwischen diesen Teilchen wirken dazu noch drei Wechselwirkungen, die quantenmechanisch durch Austauschteilchen repräsentiert werden: die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung. Lediglich die Gravitation bleibt im Standardmodell außen vor, da sie sich in einer reinen Teilchentheorie nicht gut mit der Quantenmechanik vereinbaren lässt.

Gekrönt wurde das Standardmodell durch den Nachweis des Higgs-Teilchens im Sommer 2012 am Large Hadron Collider LHC bei Genf. Dieses Teilchen ist gleichsam der Klebstoff, der das gesamte Modell mit seinen drei Wechselwirkungen zusammenhält und für die Massen der Quarks und Leptonen verantwortlich ist – seine Vorhersage in den 1960er Jahren und seine Entdeckung rund 45 Jahre später ist ein Triumph der modernen Physik!

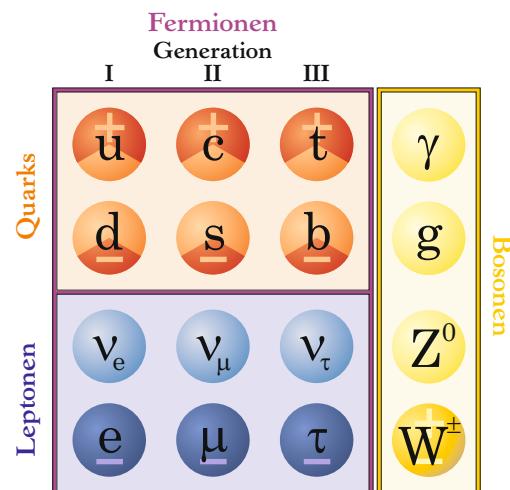
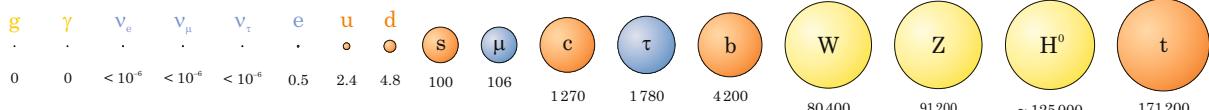
# Das Standardmodell der Teilchenphysik

## Quarks, Leptonen und drei Wechselwirkungen

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist in der Lage, alle heute (2013) bekannten Teilchen und ihre Wechselwirkungen mit sehr hoher Präzision zu beschreiben, wobei es zugleich die Prinzipien der Quantenmechanik und der Speziellen Relativitätstheorie ( $\downarrow$ ) konsistent berücksichtigt. Nur die Gravitation bleibt außen vor, da sie sich trotz aller Versuche bisher nicht mit der Quantenmechanik verträgt. Eine der großen Herausforderungen für die Physik des 21. Jahrhunderts liegt folglich darin, Gravitation und Standardmodell unter dem Dach einer einzigen übergreifenden Theorie miteinander zu vereinen, beispielsweise im Rahmen der String- bzw. M-Theorie oder der Schleifenquantengravitation ( $\downarrow$ ).

Laut Standardmodell ist die gesamte „normale“ Materie (d.h. mit Ausnahme der dunklen Materie und der dunklen Energie) aus zwölf Teilchen aufgebaut: sechs Quarks (up, down, charm, strange, top und bottom genannt, kurz  $u$ ,  $d$ ,  $c$ ,  $s$ ,  $t$  und  $b$ ) und sechs Leptonen (Elektron  $e$ , Myon  $\mu$  und Tauon  $\tau$  sowie drei zugehörige Neutrinos, die man mit  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  abkürzt). Alle diese Teilchen sind sogenannte *Fermionen*, besitzen also Spin 1/2.

Darstellung der Massen der einzelnen Quarks (rot), Leptonen (blau) und Bosonen (gelb), Werte in MeV/ $c^2$

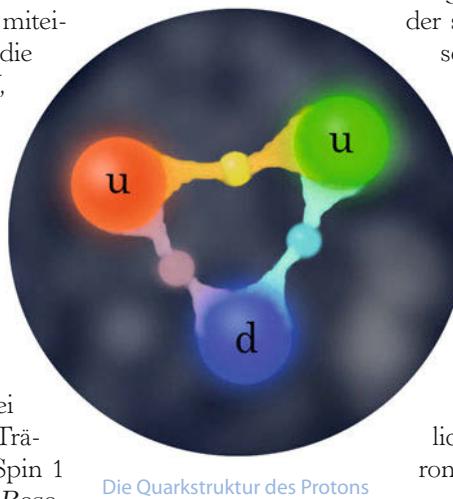


Für den Aufbau der Atome braucht man nur die beiden leichtesten Quarks up und down, aus denen sich die Protonen ( $uud$ ) und Neutronen ( $udd$ ) im Atomkern zusammensetzen, sowie das Elektron, das die Atomhülle bildet.

Die anderen vier Quarks sowie Myon und Tauon sind instabil. Sie zerfallen aufgrund ihrer großen Masse in Sekundenbruchteilen in leichtere Quarks oder Leptonen, wobei die überschüssige Masse als Energie freigesetzt wird.

Die Quarks und Leptonen wirken über drei Wechselwirkungen (kurz „WW“) miteinander: die *elektromagnetische*, die *schwache* und die *starke WW*, wobei nur die schwache WW tatsächlich alle zwölf Teilchen beeinflusst. Die elektromagnetische WW wirkt hingegen nicht auf die drei elektrisch neutralen Neutrinos, und die starke WW wirkt nur auf die sechs Quarks, nicht aber auf die sechs Leptonen. Nach den Regeln der Quantentheorie werden diese drei Wechselwirkungen selbst durch Trägerteilchen beschrieben, die alle Spin 1 aufweisen und daher sogenannte *Bosonen* sind. Die elektromagnetische WW wird durch das Photon (kurz  $\gamma$ ) vermittelt, die starke WW über das Gluon (kurz  $g$ ), und zur schwachen WW gehören die beiden geladenen  $W$ - sowie das neutrale  $Z$ -Boson ( $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$ ). Weitere Details zu diesen Wechselwirkungen finden sich in anderen Abschnitten dieses Buches.

Zusätzlich braucht man noch ein sogenanntes *Higgs-Feld* ( $\downarrow$ ), das den leeren Raum überall durchdringt (als blaue Kreise in der Grafik unten dargestellt).

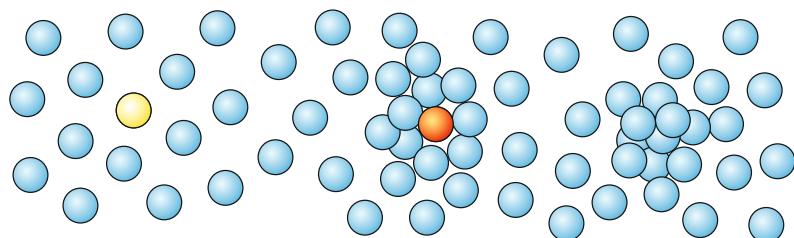


Die Quarkstruktur des Protons

Es erzeugt die Massen aller Teilchen – also der sechs Quarks und sechs Leptonen sowie der  $W$ - und  $Z$ -Bosonen – wobei man sich grob vorstellen kann, dass es sich wie eine massive Hülle um die nackten masselosen Teilchen legt. Außerdem kann man mit seiner Hilfe die schwache und elektromagnetische WW als zwei Aspekte einer einzigen *elektroschwachen WW* auffassen. Das zu diesem Feld zugehörige Higgs-Teilchen wurde sehr wahrscheinlich im Sommer 2012 am Large Hadron Collider LHC nachgewiesen.

So erfolgreich das Standardmodell auch ist, so muss es doch eine Physik jenseits dieses Modells geben, denn die Gravitation passt nicht in das Gebäude hinein, und man weiß mittlerweile, dass nur knapp 5 Prozent der Materie im Universum aus den Teilchen des Standardmodells bestehen. Die dunkle Materie und die dunkle Energie, die rund 25 bzw. 70 Prozent der Materie im heutigen Universum ausmachen, kommen im Standardmodell nicht vor.

Massenerzeugung durch das Higgs-Feld (blau) um ein masseloses Photon (gelb), ein Quark oder Lepton (rot) und um das Higgs-Boson selbst



# Feynman-Diagramme

## Die Sprache der relativistischen Quantenfeldtheorie



Richard P. Feynman  
(1918–1988) am Fermilab

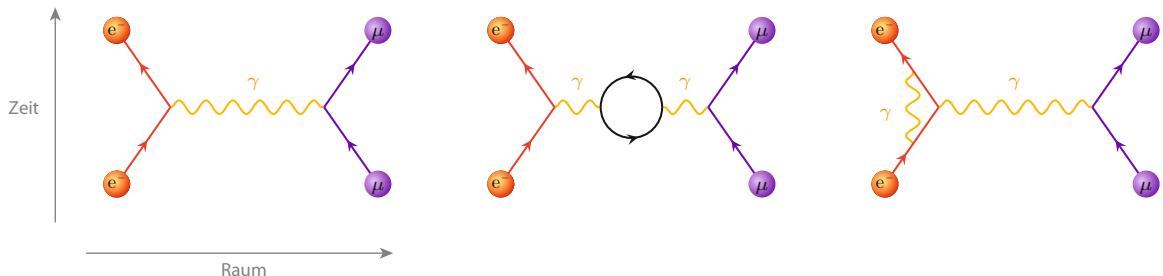
Die moderne Hochenergiephysik und insbesondere das Standardmodell der Teilchenphysik ( $\downarrow$ ) basieren auf zwei Grundpfeilern: der Speziellen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Die Synthese dieser beiden Theorien bezeichnet man als *relativistische Quantenfeldtheorie*.

Aufgrund der Quantenmechanik können Physiker den Ausgang physikalischer Experimente nicht mehr im Detail vorhersagen, sondern nur nach bestimmten Regeln Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Versuchsergebnisse berechnen. Auch wenn die mathematischen Berechnungen kompliziert sind, lassen sie sich mit sogenannten *Feynman-Diagrammen* grafisch darstellen. Jedes Diagramm stellt dabei eine quantenmechanische Möglichkeit dar, über die ein experimentelles Ergebnis eintreten

kann. Die spezielle Relativitätstheorie erlaubt es dabei, dass Energie sich in Masse umwandelt und umgekehrt ( $\downarrow$ ), sodass Teilchen in den Diagrammen erzeugt und vernichtet werden können.

Jeder beliebige Prozess zwischen Teilchen lässt sich in Feynman-Diagrammen in zwei grundlegende Elemente gliedern: die Fortbewegung eines Teilchens, dargestellt durch eine gerade Linie, und das Erzeugen bzw. Vernichten von Teilchen in einem sogenannten Vertex (Knotenpunkt). Wechselwirkungen werden somit durch die Aussendung und die Absorption von bestimmten Teilchen beschrieben. Zur elektromagnetischen Wechselwirkung gehört das *Photon*, zur starken Wechselwirkung gehören acht *Gluonen* und zur schwachen Wechselwirkung gehören das  $W^+$ ,  $W^-$  und *Z-Boson*.

Drei Feynman-Diagramme für die elektromagnetische WW zwischen einem Elektron und einem Myon. Beim einfachsten Diagramm wird nur ein Photon ausgetauscht. Bei den beiden hier dargestellten komplexeren Diagrammen entsteht zusätzlich ein kurzelbiges Elektron-Positron-Paar (die kreisförmige Schleife in der Photonline), oder es wird ein weiteres virtuelles Photon ausgesendet und wieder eingefangen.



Das Standardmodell der Teilchenphysik → S. 220

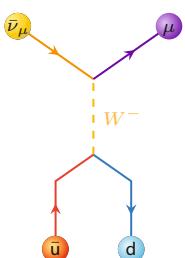
$E=mc^2$  → S. 128

J. Resag *Die Entdeckung des Unteilbaren* Spektrum Akademischer Verlag 2010

R. P. Feynman *QED: Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie* Piper 1992

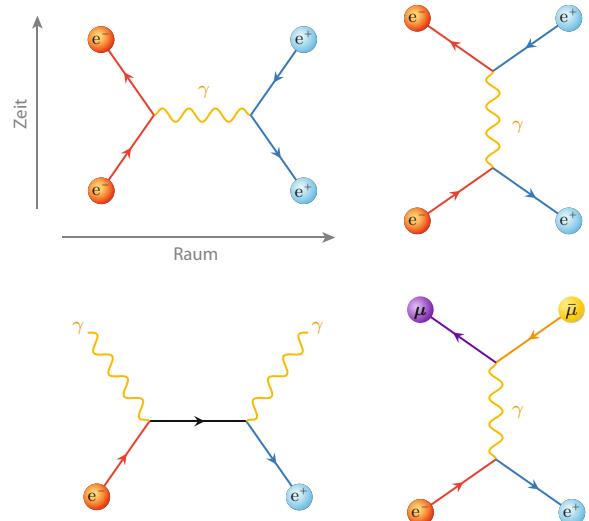
Photonen können nur mit elektrisch geladenen Teilchen einen Vertex bilden (also nur von diesen ausgesendet oder absorbiert werden). In diesem Prozess verändern Photonen das emittierende Teilchen nicht. Gluonen bilden nur mit Quarks sowie untereinander Vertices, wobei sie starke Farbladungen transportieren (↓). W- und Z-Bosonen können mit allen Quarks und Leptonen einen Vertex bilden, wobei die beiden geladenen W-Bosonen Teilchen ineinander umwandeln können und so beispielsweise den Zerfall von Pionen oder den Betazerfall von Neutronen hervorrufen (siehe auch schwache Wechselwirkung ↓). Die Gravitation bleibt hier außen vor, da man zu ihrer Beschreibung über Feynman-Diagramme hinausgehen muss (siehe Stringtheorie sowie Loop-Quantengravitation ↓).

Alle bekannten physikalischen Teilchenprozesse lassen sich so als Feynman-Diagramme darstellen und zumindest im Prinzip berechnen, wobei letztlich für jeden Prozess unendlich viele immer komplexer werdende Diagramme (theoretisch mögliche Interaktionen) berücksichtigt werden müssen – genau darin liegt die Schwierigkeit bei konkreten Rechnungen.



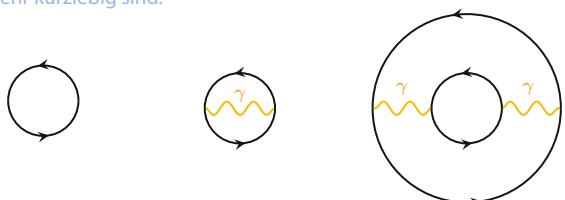
Zerfall des negativen Pions über ein W-Boson in ein Myon und ein Myon-Antineutrino. Auf diese Weise entstehen beispielsweise die Myonen der kosmischen Höhenstrahlung (↓). Das Diagramm ähnelt dem Diagramm zum Neutronzerfall, das wir im Kapitel zur schwachen WW sehen.

- Die starke Wechselwirkung → S. 224
- Die schwache Wechselwirkung → S. 226
- Stringtheorie und M-Theorie → S. 278
- Loop-Quantengravitation → S. 290
- Die kosmische Höhenstrahlung → S. 234



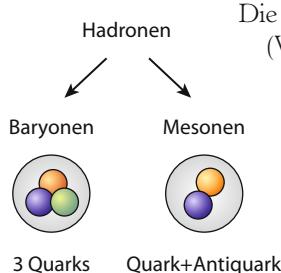
Vier Feynman-Diagramme für die elektromagnetische WW-Zersetzung zwischen einem Elektron und einem Positron (dem Antiteilchen des Elektrons – die Linien von Antiteilchen werden allgemein durch eine umgekehrte Pfeilrichtung dargestellt, da sie mathematisch Teilchen negativer Energie entsprechen, die sich rückwärts in der Zeit bewegen). Im dritten und vierten Diagramm vernichten sich Elektron und Positron gegenseitig und erzeugen zwei Photonen bzw. ein Myon-Antimyton-Paar.

Auch im leeren Raum (dem Vakuum) gibt es Feynman-Diagramme. Das bedeutet, dass der scheinbar leere Raum von einem fluktuierenden See aus ständig entstehenden und wieder vergehenden virtuellen Teilchen durchdrungen ist, wobei der Begriff „virtuell“ ausdrückt, dass diese Teilchen nur sehr kurzelebig sind.



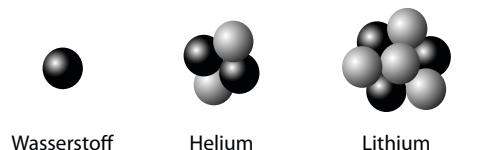
# Die starke Wechselwirkung

Die Kraft, die Quarks verbindet



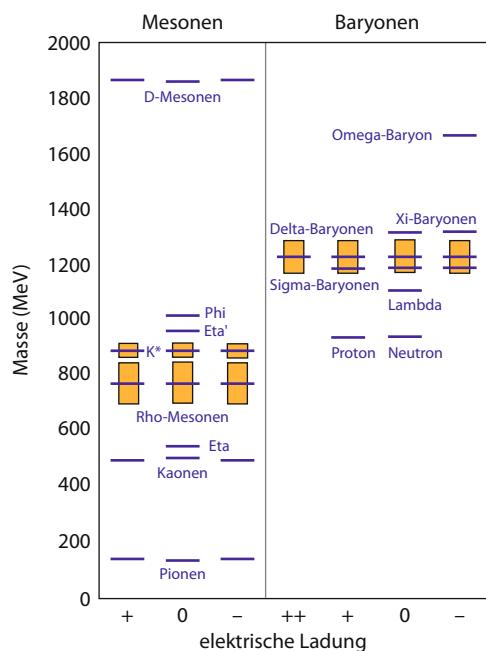
Die starke Wechselwirkung (WW) ist neben der Gravitation, der elektromagnetischen und der schwachen WW die vierte bekannte fundamentale WW. Sie ist rund einhundertmal stärker als die elektromagnetische WW und wirkt ausschließlich zwischen Quarks, wobei sie diese zu sogenannten *Hadronen* zusammenschweißt. Dabei können sich drei Quarks zu sogenannten *Baryonen* zusammenfinden (dazu gehören beispielsweise Protonen und Neutronen), oder ein Quark-Antiquark-Paar kann ein *Meson* bilden, beispielsweise ein Pion.

Es gibt eine große Vielzahl an Hadronen, die sich durch unterschiedlichen Quarkinhalt und unterschiedliche Schwingungs- und Rotationszustände der Quarks unterscheiden. Bis auf das Proton sind alle anderen Hadronen als freie Teilchen instabil. Die orangefarbenen Rechtecke in der Grafik rechts geben bei den extrem instabilen Hadronen die sogenannte *Resonanzbreite* an, die umso größer wird, je instabiler das Hadron ist.



Die häufigsten Atomkerne der drei leichtesten Elemente

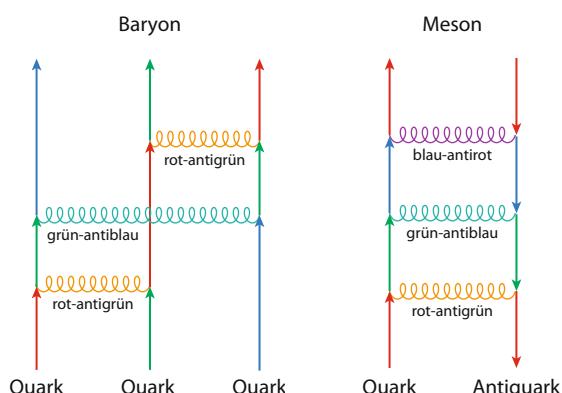
Die starke WW reicht auch geringfügig über den Rand der Hadronen hinaus und erzeugt so die kurzreichweiten Kernkräfte zwischen Protonen und Neutronen, sodass sich diese zu Atomkernen ( $\downarrow$ ) zusammenlagern können. Innerhalb von stabilen Atomkernen zerfallen die sonst instabilen Neutronen nicht. Ein freies Neutron wandelt sich hingegen aufgrund der schwachen WW mit einer Halbwertszeit von rund zehn Minuten in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino um.



Massen und Resonanzbreiten einiger Hadronen

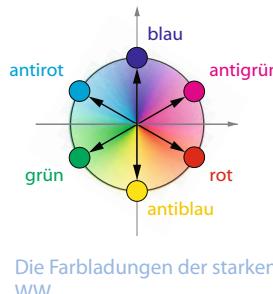
Die starke WW wirkt – anders als die elektromagnetische WW – nicht zwischen zwei Ladungen (plus und minus), sondern zwischen drei sogenannten *Farbladungen*. In Analogie zu Farben bezeichnet man sie meist als rot, grün und blau. Man kann sich diese Farbladungen als Pfeile in der Ebene vorstellen, die auf die Ziffern einer Uhr zeigen, beispielsweise auf 4, 8 und 12 Uhr. Bei Antiquarks hat man die entsprechenden Farbladungen antirot, antigrün und antiblau, die in die entgegengesetzte Richtung zeigen, also auf 10, 2 und 6 Uhr.

Quarks und Antiquarks können sich nur so zu Hadronen verbinden, dass sich ihre Farbladungen gegenseitig zu weiß neutralisieren. Freie Farbladungen kommen hingegen nicht vor; sie sind stets gemeinsam mit anderen „gefangen“. Das Phänomen bezeichnet man daher als *Confinement* („Gefangenschaft“).



Austausch der Farbladungen durch Gluonen im Feynman-Diagramm. Das Antiquark im Meson ist durch die gegen die Zeitrichtung orientierten Pfeile gekennzeichnet.

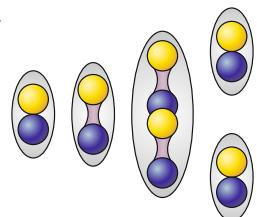
Ein „weißes“ Hadron ist nach außen bezüglich der starken WW ladungsneutral – dies ist die Ursache dafür, dass die starken Kräfte nur wenige Fermi ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ) über das jeweilige Hadron hinreichend ausreichen – es gibt also keine makroskopischen starken Kraftfelder.



Die Farbladungen der starken WW

Die starken Kraftfelder werden nach den Regeln der Quantentheorie durch sogenannte *Gluonen* vermittelt, so wie elektromagnetische Kräfte durch Photonen vermittelt werden. Die Gluonen können Farbladungen zwischen den Quarks hin- und hertransportieren, so dass beispielsweise in einem Proton die Farbladungen ständig zwischen den drei miteinander wechselwirkenden Quarks hin- und herspringen.

Weil sie die Farbladung transportieren können, sind die Gluonen auch selbst farbgeladen. Die von ihnen vermittelten starken Kraftfelder wirken daher auch auf sich selbst zurück und versuchen, sich so eng wie möglich zusammenzuziehen. Versucht sich beispielsweise ein Quark aus einem Hadron zu entfernen, so bildet sich ein starker Kraftfeldschlauch aus, der ab einer gewissen Länge schließlich zerreißen, wobei sich aus der Energie des Feldschlauchs an den freien Enden neue Quarks bilden. Daher kommen einzelne freie Quarks in der Natur nicht vor.



Ausbildung und Zerreißung eines Kraftfeldschlauchs zwischen einem Quark-Antiquark-Paar

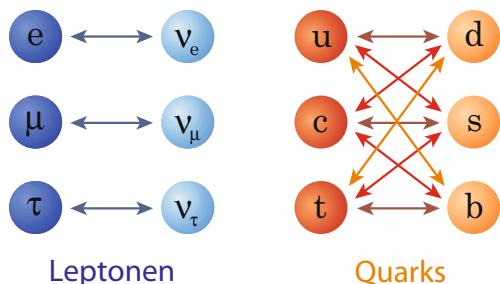
# Die schwache Wechselwirkung

## Teilchenzerfälle, W-, Z- und Higgs-Bosonen

Anders als die Gravitation und die elektromagnetische Wechselwirkung (WW) besitzt die schwache WW eine sehr kurze Reichweite unterhalb von einem Hundertstel Protonendurchmesser. Dafür wirkt sie aber auf sämtliche Quarks und Leptonen und kann dabei Quarks in andere Quarks und Leptonen in andere Leptonen umwandeln.

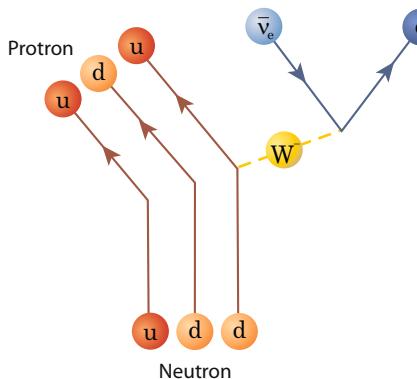
Sie ist auf diese Weise für eine Vielzahl von Teilchenzerfällen verantwortlich, beispielsweise für den Zerfall des Neutrons, sowohl als freies Teilchen als auch als Bestandteil instabiler Atomkerne (radioaktiver Beta-Zerfall).

Ohne die schwache WW könnte unsere Sonne in ihrem Zentrum keine Energie durch Kernfusion produzieren, denn dafür müssen sich zunächst zwei Protonen (Wasserstoffkerne) über die schwache WW in Neutronen

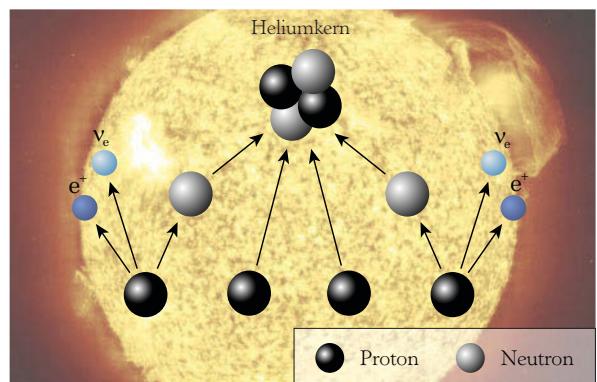


Mögliche Umwandlungen zwischen Quarks bzw. Leptonen durch die schwache WW

umwandeln, bevor sich diese mit zwei weiteren Protonen zu einem Heliumkern vereinigen können. Bei jeder Umwandlung eines Protons in ein Neutron wird dabei u. a. ein Elektron-Neutrino ( $\downarrow$ ) frei.



Zerfall eines Neutrons über die schwache WW in Proton, Elektron und Elektron-Antineutrino



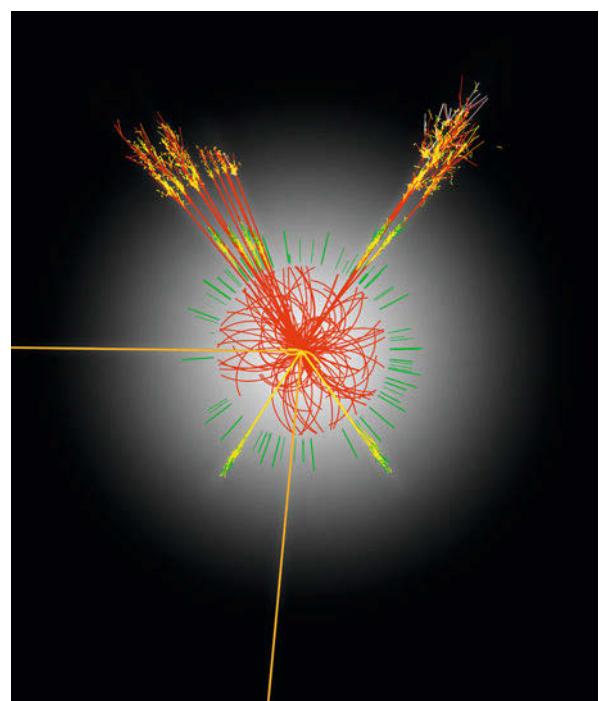
Schematische Darstellung der Kernfusion im Sonnenzentrum. Beim Protonenzerfall entsteht ein Elektron-Neutrino und ein Positron ( $e^+$ ).

Jede Sekunde wird jeder Quadratzentimeter der Erde von vielen Milliarden dieser Neutrinos durchquert, ohne dass wir davon etwas bemerken, denn Neutrinos sind wahre Geisterteilchen. Da sie nur der schwachen WW (und der Gravitation) unterliegen, müssen sie einem anderen Teilchen sehr nahe kommen, damit sich die schwache WW überhaupt auswirken kann. Da Atome aber fast nur aus leerem Raum bestehen, ist die aus ihnen aufgebaute Materie für Neutrinos nahezu transparent.

So wie die elektromagnetische WW durch Photonen und die starke WW durch Gluonen vermittelt wird, so wird die schwache WW durch die folgenden drei Teilchen vermittelt: das positiv geladene  $W^+$ -Boson, das negativ geladene  $W^-$ -Boson und das neutrale Z-Boson. Nur die beiden  $W$ -Bosonen können Quarks bzw. Leptonen umwandeln, nicht aber das Z-Boson, das analog zum Photon den Teilchentyp nicht verändert. Anders als die masselosen Photonen und Gluonen besitzen  $W$ - und Z-Bosonen eine große Masse: Mit 80 bzw. 91 GeV sind sie fast hundertmal so schwer wie das Proton.

Die schwache WW ist eng mit der elektromagnetischen WW verwandt. Bei sehr großen Teilchenenergien von mehr als einigen 100 GeV verschwindet der Unterschied zwischen beiden WW, und sie verschmelzen zur sogenannten *elektroschwachen WW*. Bei niedrigeren Energien besteht dagegen ein Unterschied zwischen den beiden Wechselwirkungen, da sich nach dem Standardmodell dann ein unsichtbares *Higgs-Feld* ( $\downarrow$ ) aufbaut und den Raum vollständig durchdringt. Dieses Higgs-Feld legt, vereinfacht ausgedrückt, massive Hüllen um die  $W$ - und Z-Bosonen (nicht aber um das Photon) und erzeugt so deren Massen.

Aufgrund ihrer großen Masse zerfallen die  $W$ - und Z-Bosonen sehr schnell, sodass die räumliche Wirkung der durch sie vermittelten schwachen WW letztlich durch das allgegenwärtige Higgs-Feld eingedämmt wird – das erklärt die kurze Reichweite der schwachen WW. Am weltgrößten Beschleuniger, dem Large Hadron Collider LHC bei Genf, gelang es mittlerweile sehr wahrscheinlich, das Higgs-Teilchen in großen Detektoren nachzuweisen.



Simulierter Zerfall eines Higgs-Teilchens im ATLAS-Detektor des LHCs



# Neutrinos

## Flüchtige Geisterteilchen

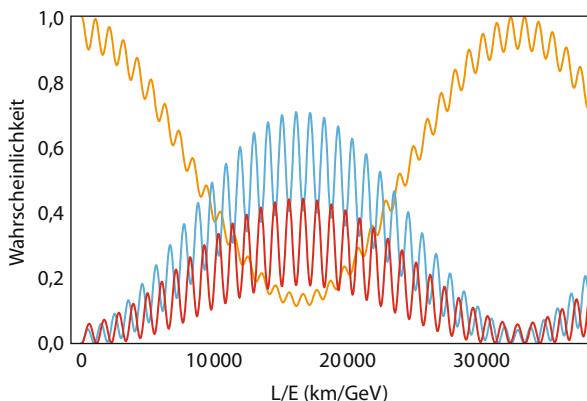
Neutrinos sind geisterhafte Teilchen, die im Universum in großen Mengen vorkommen, und die wir nahezu nicht bemerken. Das liegt daran, dass sie weder elektrisch geladen sind noch eine starke Farbladung aufweisen, sodass sie nur der schwachen Wechselwirkung und – wie alle Teilchen – der Gravitation unterliegen. Da die schwache Wechselwirkung ( $\downarrow$ ) nur eine extrem kurze Reichweite besitzt, können Neutrinos durch Atome – die aus sehr viel leerem Raum bestehen – fast immer kollisionslos hindurchtreten und so beispielsweise die komplette Erde durchqueren, ohne dass sie dadurch nennenswert beeinflusst werden. Viele Milliarden Neutrinos durchqueren so pro Sekunde jeden Quadratzentimeter der Erdoberfläche, ohne dass wir davon etwas bemerken, denn nur ganz selten

kommt ein Neutrino einem Atomkern so nahe, dass die schwache Wechselwirkung zum Zug kommt und das Neutrino abgelenkt oder umgewandelt wird.

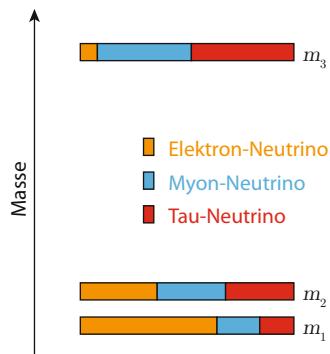
Neutrinos entstehen bei fast allen Kernreaktionen. Es gibt beispielsweise eine sehr niederenergetische Neutrino-Hintergrundstrahlung von etwa 300 Neutrinos pro Kubikzentimeter, die sich ähnlich wie die kosmische Photonen-Hintergrundstrahlung kurz nach dem Urknall gebildet hat und seitdem das Universum durchdringt. Hochenergetische Neutrinos entstehen dagegen beispielsweise beim radioaktiven Betazerfall in Gesteinen oder Kernreaktoren, beim Zerfall von Myonen der kosmischen Höhenstrahlung ( $\downarrow$ ) in der Erdatmosphäre, bei der Kernfusion im Sonnenzentrum oder beim Kollaps massereicher Sternzentren zu Neutronensternen (Kollaps-Supernovae  $\downarrow$ ).

Neutrinos weisen zudem eine sehr interessante Eigenschaft auf: In einem Neutrinostrahl oszillieren die Neutrinos periodisch zwischen den drei verschiedenen Neutrino-Flavors, also beispielsweise von Tau-Neutrino zu Myon-Neutrino und so fort (Neutrinooszillation).

Dieser Effekt entsteht durch die unterschiedliche quantenmechanische Überlagerung der verschiedenen winzigen Neutrino-Massen pro Neutrino-Flavor, wobei die einzelnen Massenanteile geringe Gangunterschiede in den Neutrino-Materiewellen aufweisen. Die schwer messbaren Neutrino-Massen liegen unterhalb von zwei eV und haben damit weniger als ein Hunderttausendstel der Masse des Elektrons von 511 keV.

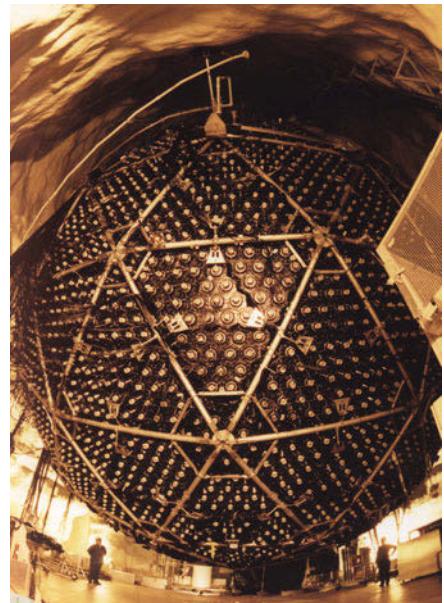


Oszillation der Wahrscheinlichkeiten, in einem anfänglich reinen Elektron-Neutrinostrahl sind mit wachsendem Abstand vom Entstehungsort außer Elektron-Neutrinos (orange) auch Myon-Neutrinos (blau) und Tau-Neutrinos (rot) anzutreffen.



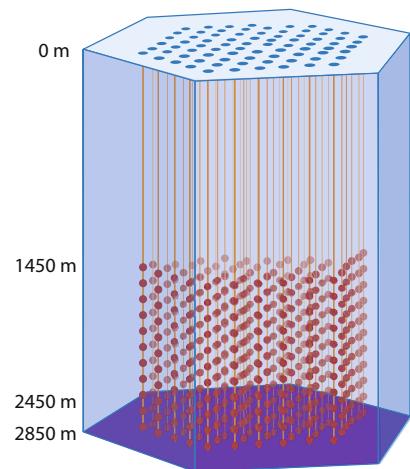
Mischung verschiedener Massenanteile in einer quantenmechanischen Elektron-, Myon- oder Tau-Neutrino-welle. Ein Elektron-Neutrino hat also keine eindeutige Masse, sondern drei verschiedene winzige Massen treten mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten darin auf.

Der Neutrino-Detektor des Sudbury Neutrino Observatory.



Da Neutrinos einen so flüchtigen Charakter haben, können sie uns von überall im Universum nahezu ungestört erreichen. Um sie jedoch nachzuweisen, benötigt man sehr große Detektoren. Beim kanadischen Sudbury Neutrino Observatory (SNO) hat man beispielsweise in einer alten Nickelmine mehr als 2000 Meter unter der Erdoberfläche einen kugelförmigen Tank mit 1000 Tonnen Wasser gefüllt und an den Wänden rund 9600 sehr lichtempfindliche Photomultiplier angebracht. Reagiert ein hochenergetisches Neutrino mit einem Atomkern im Tank, so entsteht ein schwacher Lichtblitz (sogenannte *Tscherenkov-Strahlung*), den die Photomultiplier registrieren.

Der Tank des japanischen Super-Kamiokande-Detektors fasst sogar rund 50 000 Tonnen Wasser. Eine noch wesentlich größere Wassermenge steht dem IceCube-Detektor zur Verfügung, allerdings nicht in flüssiger Form, sondern als natürliches Gletschereis in der Antarktis. In dieses Gletschereis wurden 86 senkrechte Löcher gebohrt, in die jeweils an einem Seil sechzig optische Sensoren in eine Tiefe zwischen 1450 und 2450 Metern hinabgelassen wurden. In der dort herrschenden Finsternis überwachen diese 5160 Sensoren ein Eisvolumen von einem Kubikkilometer und weisen darin die seltenen Neutrinoreaktionen nach.



Das IceCube-Neutrino-Teleskop

Bild oben rechts vom Sudbury Neutrino Observatory (SNO)  
F. Close Neutrino Spektrum Akademischer Verlag 2012



## Antimaterie

### Spiegelbild und Vernichter der Materie

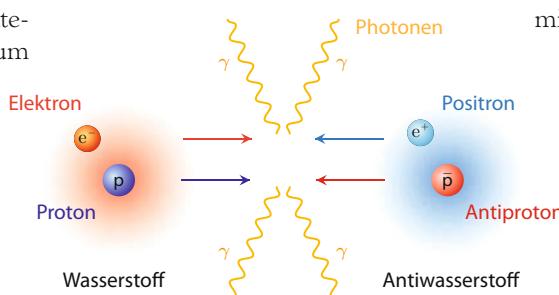
Wenn man ein Stück Antimaterie im absolut leeren Weltraum betrachten könnte, so würde einem zunächst nichts Besonderes auffallen, denn es sähe genau so aus wie gewöhnliche Materie. Sobald Antimaterie jedoch mit normaler Materie in Kontakt kommt, vernichten sich beide gegenseitig und verwandeln sich nach Einsteins Formel  $E=mc^2$  ( $\downarrow$ ) in reine Energie. In einem gigantischen Blitz aus Gammastrahlung würde die Antimaterie und eine gleich große Menge Materie verschwinden. Umgekehrt können Materie und Antimaterie auch zusammen aus Gammastrahlung oder anderen Energieformen wieder entstehen.

Dass es Antimaterie tatsächlich geben muss, wurde zuerst dem britischen Physiker Paul Dirac im Jahr 1928

klar, als er versuchte, die Gesetze der Quantenmechanik mit denen der Speziellen Relativitätstheorie zusammenzubringen.

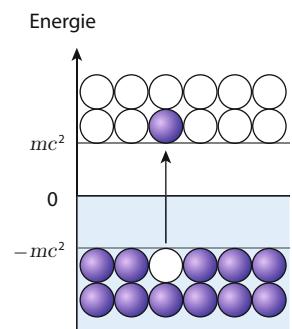
Dabei stellte er in seinen Formeln fest, dass es zu jedem Teilchen mit positiver Energie auch ein Teilchen

Paul Dirac im Jahr 1933



mit negativer Energie geben müsse. Das aber würde bedeuten, dass sich aus dem Nichts heraus ohne Energiezufuhr ständig Paare aus Teilchen mit positiver und negativer Energie bilden könnten – unsere Welt wäre damit vollkommen instabil. Dirac löste das Problem, indem er annahm, dass der scheinbar leere Raum von einem unendlichen See von Teilchen negativer Energie gefüllt sei. In diesem *Dirac-See* seien bereits alle Teilchen-Quantenzustände mit negativer Energie besetzt. Im leeren Raum wäre dann kein Platz mehr für weitere Teilchen mit negativer Energie vorhanden.

Man könnte nun aber ein Teilchen aus einem negativen Energiezustand durch Energiezufuhr in einen positiven Energiezustand anheben. Dadurch entstünde ein Loch im Dirac-See, das sich wie ein entgegengesetzt geladenes Teilchen mit positiver Energie auswirken würde – eben wie ein *Antiteilchen*. Die Energiezufuhr hätte somit ein Teilchen-Antiteilchen-Paar erzeugt.



$E=mc^2 \rightarrow$  S. 128

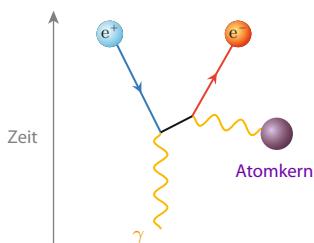
F. Close *Antimaterie Spektrum* Akademischer Verlag 2010

J. Resag *Die Entdeckung des Unteilbaren* Spektrum Akademischer Verlag 2010

NASA NASA's Fermi Catches Thunderstorms Hurling Antimatter into Space

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html)

R. P. Feynman und E. C. G. Stückelberg lieferten ab 1941 eine etwas andere Interpretation der negativen Energien, die ohne den Dirac-See auskommt. Teilchen negativer Energie werden dabei interpretiert als rückwärts in der Zeit laufend, wodurch sie formal gleichwertig werden zu Antiteilchen positiver Energie, die vorwärts in der Zeit laufen (und die wir also im Experiment registrieren würden). Aus diesem Grund werden Antiteilchen in Feynman-Diagrammen (↓) mit einem Pfeil gegen die Zeitrichtung dargestellt.



In der Nähe eines Atomkerns kann ein hochenergetisches Photon ein Elektron-Positron-Paar erzeugen. Der Pfeil des Positrons zeigt gegen die Zeitrichtung.

In den starken elektrischen Feldern eines Gewitters kann eine nach oben laufende Lawine hochenergetischer Elektronen (gelb) entstehen, die wiederum einen Blitz aus Gammastrahlen (magenta) auslösen. Die Photonen dieser Gammastrahlen können sich in der Nähe von Atomkernen in Elektronen und Positronen (grün) umwandeln, die sich entlang der Feldlinien des Erdmagnetfeldes in den Weltraum hinausbewegen.

Feynman-Diagramme → S. 222

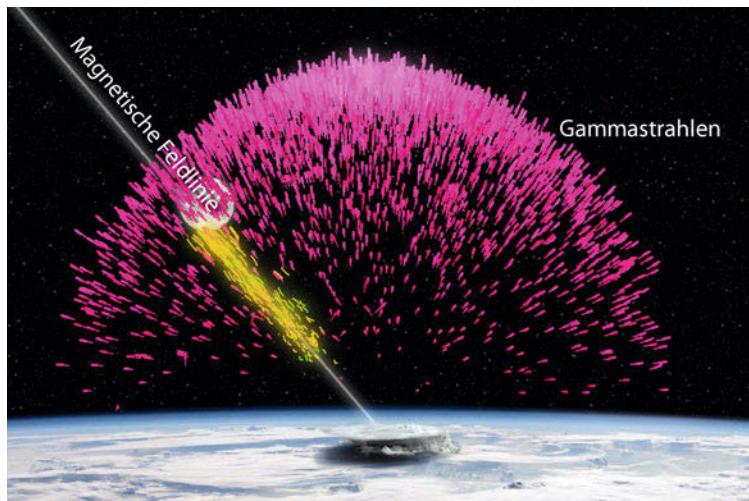
Gewitter → S. 60

Die kosmische Höhenstrahlung → S. 234

Die Entstehung der Materie → S. 156

Im Jahr 1932 gelang es Carl David Anderson erstmals, das Antiteilchen des Elektrons (das *Positron*) in der kosmischen Höhenstrahlung (↓) nachzuweisen. Antiteilchen können in der Natur auf vielfältige Weise entstehen – sogar die elektrischen Felder von Gewitterwolken (↓) genügen bisweilen für ihre Entstehung.

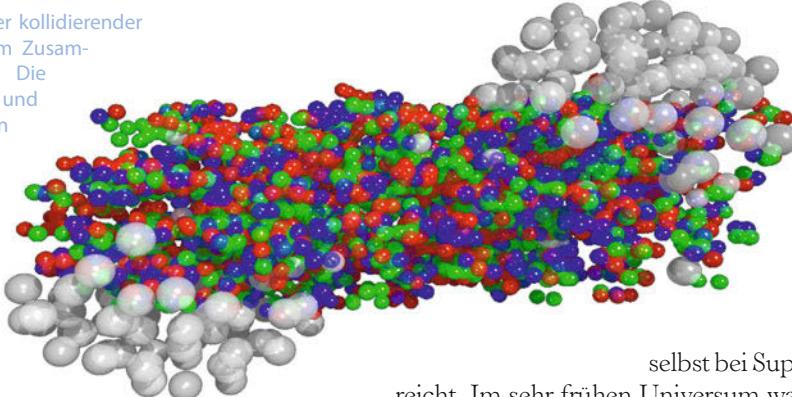
Teilchen und Antiteilchen verhalten sich fast wie identische entgegengesetzt geladene Spiegelbilder – allerdings nicht in jedem Detail, sondern nur fast. Es gibt kleine Unterschiede – Physiker sprechen von der sogenannten *CP-Verletzung*. Diese Unterschiede müssen kurz nach dem Urknall dazu geführt haben, dass sich aus der Energie des Urknalls ein winziger Überschuss von rund einem Milliardstel an Teilchen gegenüber Antiteilchen gebildet hat. Dieser kleine Überschuss ist nach der gegenseitigen Vernichtung von Materie und Antimaterie übrig geblieben und bildet heute die Materie, aus der Planeten, Sterne und wir selbst bestehen.



## Quark-Gluon-Plasma

Wenn Protonen und Neutronen schmelzen

Momentaufnahme zweier kollidierender Bleikerne kurz nach dem Zusammenstoß (Simulation). Die Quarks sind in Rot, Grün und Blau und die Hadronen in Weiß dargestellt.



Quarks und Gluonen sind normalerweise im Inneren von Hadronen eingesperrt, insbesondere in den Protonen und Neutronen der Atomkerne (↓). Doch was geschieht, wenn man die Protonen und Neutronen eines Atomkerns eng zusammendrückt und extrem stark aufheizt?

Sie schmelzen dann gewissermaßen und setzen so die Quarks und Gluonen in ihrem Inneren frei, sodass diese ein sogenanntes *Quark-Gluon-Plasma* bilden. In diesem Plasma sind die Quarks und Gluonen frei beweglich, sodass sich das Plasma ähnlich wie eine sehr heiße, dichte und extrem dünnflüssige Flüssigkeit verhält.

Ein Quark-Gluon-Plasma bildet sich erst bei Temperaturen oberhalb von rund 2000 Milliarden ( $2 \cdot 10^{12}$ ) Kelvin – das entspricht einer Teilchenenergie von ungefähr 200 MeV. Diese extrem hohe Temperatur wird

selbst bei Supernovae kaum erreicht. Im sehr frühen Universum war diese Temperatur kurzfristig vorhanden, wurde jedoch bereits wenige Mikrosekunden nach dem Urknall unterschritten, sodass ab diesem Moment das darin enthaltene Quark-Gluon-Plasma zu einzelnen Hadronen auskondenserte (siehe Artikel zur Entstehung der Materie ↓).

In modernen Teilchenbeschleunigern wie dem Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) nahe New York und dem Large Hadron Collider (LHC ↓) bei Genf gelingt es, die extremen Bedingungen kurz nach dem Urknall wiederherzustellen, indem man schwere Atomkerne auf sehr hohe Energien beschleunigt und sie anschließend miteinander kollidieren lässt. Für einen winzigen Sekundenbruchteil bildet sich in der Kollisionszone der Kerne dann ein Quark-Gluon-Plasma, das wie ein Feuerball schlagartig expandiert und zu tausenden verschiedener Teilchen kondensiert, die nach allen Seiten auseinanderfliegen und von den Detektoren des Teilchenbeschleunigers nachgewiesen werden.

Atomkerne → S. 174

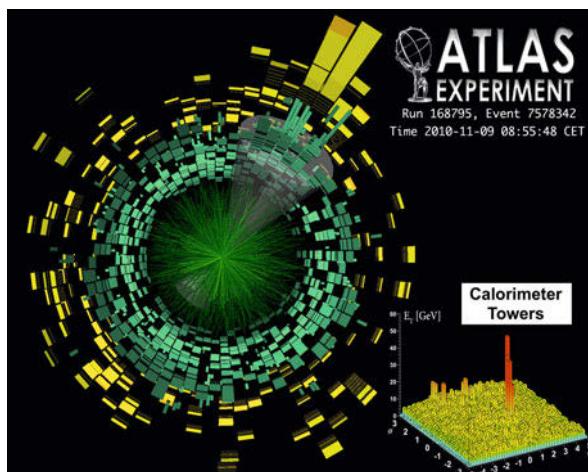
Die starke Wechselwirkung → S. 224

Die Entstehung der Materie → S. 156

Der Large Hadron Collider (LHC) → S. 236

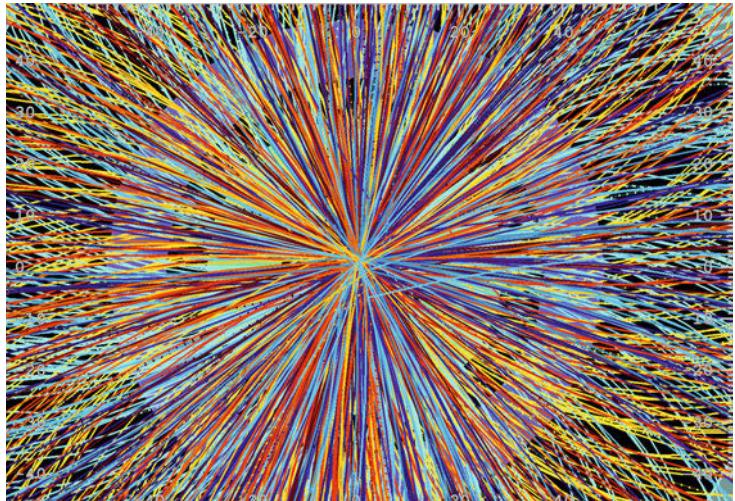
Aus den entsprechenden Messwerten gewinnt man Informationen über die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas. So können beispielsweise zwei Quarks zufällig am Rand des Plasmas mit hoher Energie auseinandergeschossen werden, wobei eines davon das Plasma direkt verlässt und einen sogenannten *Jet* von Teilchen erzeugt, während das andere durch das Plasma läuft und von diesem so stark abgebremst wird, dass es nur noch einen schwachen Teilchenjet auslösen kann (das nennt man *jet quenching*). Auf diese Weise lassen sich das Bremsvermögen und andere Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas bestimmen.

Teilchenspuren im ATLAS-Detektor am LHC nach der Kollision zweier Blekerne. Oben rechts erkennt man einen ausgeprägten Teilchenjet (großer Kegel), unten links einen sehr viel kleineren Teilchenjet (kleiner Kegel). Die gelben Balken geben die Energie an, die die Teilchen in dieser Richtung davontragen.



Das holografische Prinzip → S. 288

BNL Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at Brookhaven National Laboratory <http://www.bnl.gov/rhic/default.asp>  
CERN A Large Ion Collider Experiment (ALICE) at CERN <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>



Darstellung der Teilchenspuren im ALICE-Detektor am LHC nach der Kollision zweier Blekerne

Von der theoretischen Seite her versucht man, die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas im Rahmen der *Quantenchromodynamik* QCD (das ist die Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung) zu berechnen. Leider sind diese Rechnungen wegen der intensiven Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen extrem aufwendig. Das holografische Prinzip (↓) bietet hier eine Alternative, denn es besagt, dass die QCD gleichwertig ist zu einer vierdimensionalen Stringtheorie, in der sich manche Rechnungen einfacher durchführen lassen als in der QCD. Auf diese Weise konnte man beispielsweise zeigen, dass die Viskosität (also die Zähigkeit) des Quark-Gluon-Plasmas extrem gering ist, was gut zu den experimentellen Resultaten passt.

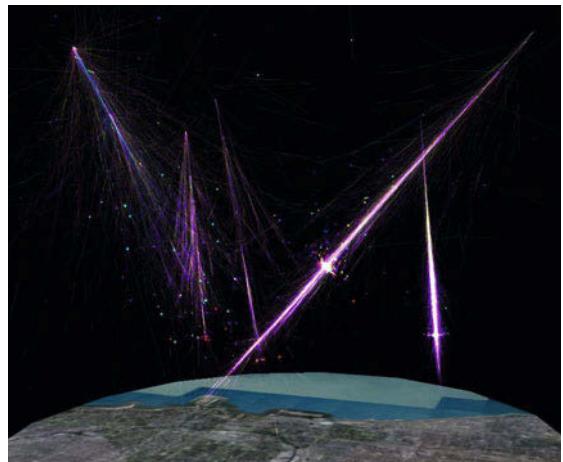


# Die kosmische Höhenstrahlung

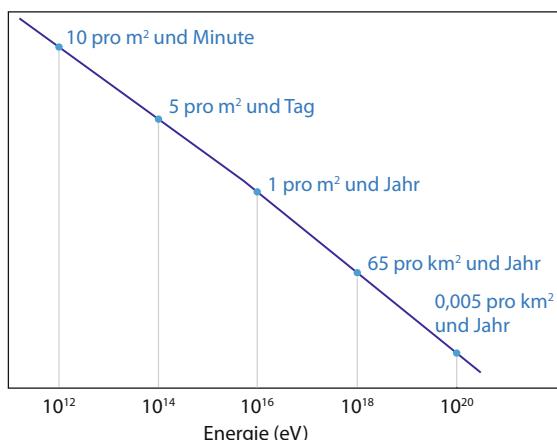
## Energiereicher als im weltgrößten Beschleuniger

Unsere Erde wird ständig von hochenergetischen Atomkernen aus dem Weltall getroffen, die man als *kosmische Höhenstrahlung* bezeichnet, da ihr Einfluss umso stärker spürbar ist, je höher man sich in der Erdatmosphäre befindet. Die ankommenden Atomkerne spiegeln dabei im Wesentlichen die Elementhäufigkeiten im Universum wieder: Wasserstoffkerne (Protonen) sind mit rund 87% am häufigsten. Hinzu kommen etwa 12% Heliumkerne (Alphateilchen) und rund 1% schwerere Atomkerne.

Die Bewegungsenergie der Kerne umfasst einen sehr großen Energiebereich, wobei sie umso seltener sind, je größer ihre Bewegungsenergie ist. Im Bereich von einigen Milliarden Elektronenvolt (einige GeV) treffen jede Sekunde noch viele Teilchen pro Quadratmeter auf die obere Erdatmosphäre. Sie stammen beispielsweise von unserer Sonne.



Simulation sehr hochenergetischer Teilchenschauer



Bei millionenfach größeren Energien von  $10^{16}$  Elektronenvolt (einige PeV) kommt dagegen in einem ganzen Jahr nur noch etwa ein Teilchen pro Quadratmeter an. Diese Teilchenenergie ist bereits einige tausendmal größer als die Energie, die sich am aktuell weltgrößten Beschleuniger (dem Large Hadron Collider LHC (↓) bei Genf) erreichen lässt. Die höchsten jemals gemessenen Energien liegen noch einmal etwa zehntausendmal höher ( $10^{20}$  eV) und sind so selten, dass grob geschätzt nur alle zweihundert Jahre ein Atomkern pro Quadratkilometer mit dieser Energie auftritt.

Energiespektrum der kosmischen Strahlung

Der Large Hadron Collider (LHC) → S. 236

Pierre Auger Observatorium *Homepage des Pierre-Auger-Projekts* <http://www.auger.de/>

Universität Chicago *ARIES Cosmic Ray Showers* Cosmus, University of Chicago, <http://astro.uchicago.edu/cosmus/projects/aires/>

Offenbar gibt es im Universum natürliche Teilchenbeschleuniger, die unsere von Menschenhand gebauten Beschleuniger weit hinter sich lassen. Noch sind hier nicht alle Fragen geklärt, aber man geht davon aus, dass insbesondere die Schockfronten von Supernovaexplosionen (↓) als Teilchenbeschleuniger wirken: Die von diesen Fronten mitgeführten Magnetfelder können dabei Atomkerne einfangen und mitnehmen, sodass diese gleichsam auf der Schockfront surfen.

Besonders starke Schockwellen treten in den hochenergetischen Teilchenjets auf, die von supermassereichen schwarzen Löchern im Zentrum aktiver Galaxien (↓) erzeugt und viele tausend Lichtjahre in den intergalaktischen Raum hinausgeschossen werden. Hier entstehen vermutlich die energiereichsten Teilchen der kosmischen Strahlung.

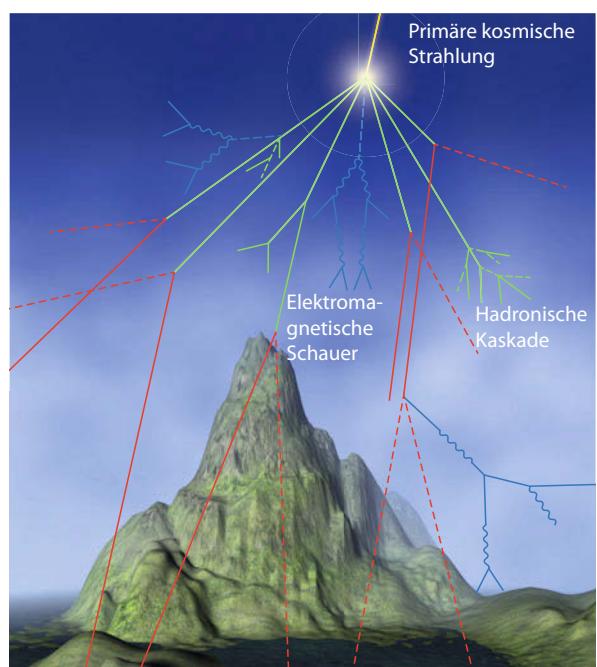
In etwa zwanzig bis dreißig Kilometern Höhe treffen die Kerne der kosmischen Strahlung auf Atomkerne der Luftmoleküle und zertrümmern diese regelrecht, wobei in komplizierten Kaskaden Teilchenschauer mit bis zu mehreren Millionen Sekundärteilchen entstehen. Nur wenige von ihnen erreichen die Erdoberfläche. Eines der häufigsten Sekundärteilchen ist das Myon, das Carl D. Anderson und Seth Neddermeyer im Jahr 1936 in der kosmischen Strahlung entdeckten.

Man versucht unter anderem am Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien auf einer Fläche von rund 3000 km<sup>2</sup> diese am Boden ankommenden Teilchenschauer detailliert zu vermessen und so mehr über die Vorgänge im Universum zu lernen, die zu solch hohen Teilchenenergien führen.

**Teilchenschauer:** Beim Auftreffen der kosmischen Strahlung auf Luftmoleküle entstehen Teilchenschauer aus Sekundärteilchen.



Das schwarze Loch im Zentrum der Galaxie links unten sendet einen Jet aus (blau), der die Nachbargalaxie streift und dann ins Weltall hinausgeschleudert wird.



Kollaps-Supernovae → S. 34

Thermonukleare Supernovae → S. 32

Supermassive schwarze Löcher → S. 42

Aktive Galaxien → S. 44



## Der Large Hadron Collider (LHC)

Der mächtigste Teilchenbeschleuniger, der je gebaut wurde

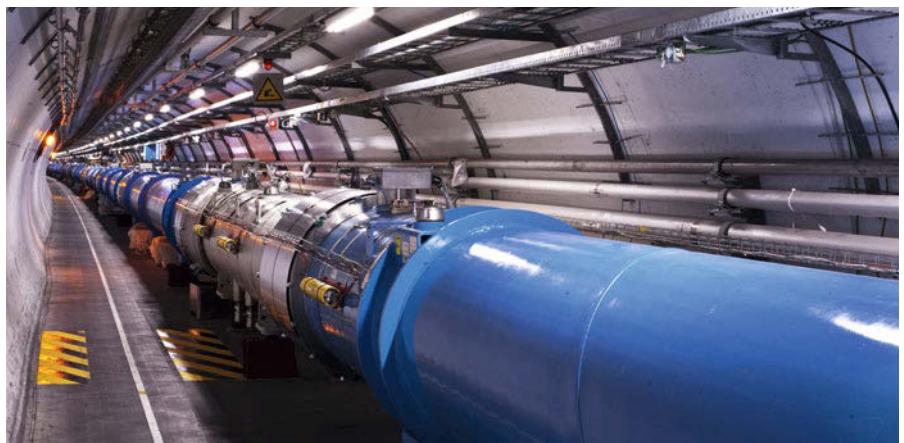


Blick über das CERN-Gelände. Der LHC-Ringtunnel verläuft unterirdisch entlang des eingezeichneten roten Kreises. Im Hintergrund sieht man den Genfer See, die Stadt Genf und am Horizont die Alpen. Die bewaldeten Hügel am unteren Bildrand sind Ausläufer des Französischen Jura.

Blick ins Innere des LHC-Tunnels. Die beiden Protonenstrahlen verlaufen innerhalb der blauen Röhre.

Am Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf ist zu Beginn des Jahres 2010 der mächtigste Teilchenbeschleuniger in Betrieb gegangen, der jemals gebaut wurde: der Large Hadron Collider, kurz LHC. In ihm werden rund hundert Meter unter der Erdoberfläche zwei Protonenstrahlen in einem Ringtunnel von knapp 27 Kilometern Umfang gegenläufig auf Teilchenenergien von bis zu 7 TeV (7000 GeV, also  $7 \cdot 10^{12}$  eV) beschleunigt und an vier Punkten im Tunnel zur Kollision gebracht. Die Protonen bewegen sich bei dieser Energie mit 99,9999991 % der Lichtgeschwindigkeit.

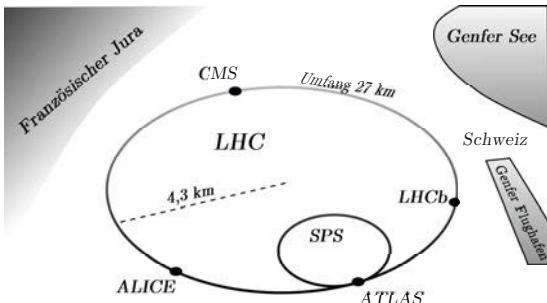
Die Kollision der Protonen erfolgt im Inneren riesiger Teilchendetektoren, die so ausgelegt sind, dass sie möglichst alle Teilchen registrieren können, die bei der Kollision entstehen. Auf diese Weise möchte man auf die Prozesse zurück schließen, die während der Kollision ablaufen.



Der größte Detektor ist mit einer Länge von 46 Metern und einer Höhe von 25 Metern der ATLAS-Detektor (A Toroidal LHC Apparatus). Ungefähr halb so groß sind die Detektoren CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (das b steht für das b-Quark, auf dessen Nachweis dieser Detektor spezialisiert ist) und ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Diese hausgroßen Detektoren befinden sich in riesigen unterirdischen Hallen an den vier Kollisionspunkten des Ringtunnels.

Eines der wichtigsten Ziele des LHC ist es, das letzte noch fehlende Teilchen des Standardmodells zu finden: das *Higgs-Teilchen*. Dieses sehr instabile Teilchen müsste sich durch ein vermehrtes Auftreten seiner Zerfallsprodukte bei derjenigen Energie verraten, die der Masse des Higgs-Teilchens entspricht. Im Dezember 2011 deutete sich erstmals genau dieses Signal bei einer Energie (Higgs-Masse) von rund 125 GeV an, und zwar in den Daten sowohl von CMS als auch von ATLAS. Im Sommer 2012 bestätigten Wissenschaftler dann, dass sie tatsächlich ein Teilchen bei der für das Higgs erwarteten Energie nachgewiesen hätten, und die Auswertung weiterer Datenmengen hat seitdem erhärtet, dass es sich wirklich um das erwartete Higgs handelt.

Lage der vier großen Detektoren am LHC

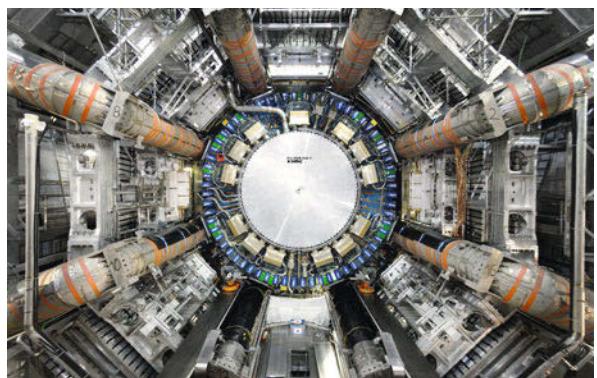


Antimaterie → S. 230

Supersymmetrie → S. 276

Verborgene Dimensionen → S. 280

Darüber hinaus verfolgt der LHC eine Reihe weiterer wichtiger Ziele: Man versucht, den winzigen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie (↓) genau zu vermessen, man sucht nach sogenannten supersymmetrischen (↓) Teilchen, die möglicherweise die dunkle Materie des Universums erklären könnten, und man fahndet nach instabilen schwarzen Mikrolöchern, die verborgene Zusatzdimensionen (↓) des Raumes enthüllen könnten.



Blick ins Innere des ATLAS-Detektors beim Aufbau im Juli 2007

Der CMS-Detektor bei seinem Aufbau im November 2006



# Die Entdeckung des Higgs-Teilchens

## Ein Meilenstein der Teilchenphysik

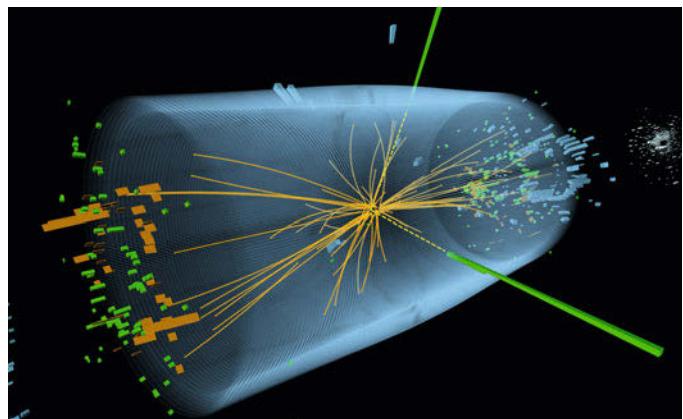
Am 4. Juli 2012 wurde am Large Hadron Collider LHC die Entdeckung eines neuen Teilchens mit einer Masse von rund 125 GeV bekannt gegeben, bei dem es sich sehr wahrscheinlich um das seit Langem gesuchte *Higgs-Boson* handelt. Bestätigt sich dies, so wäre damit endlich der letzte noch fehlende Schlussstein im Standardmodell ( $\downarrow$ ) nachgewiesen. Wie gelang es, dieses neue Teilchen nachzuweisen, das in den vielen Milliarden Proton-Proton-Kollisionen des LHCs, die dort pro Minute stattfinden, nur ungefähr einmal erzeugt wird?

Um dies zu verstehen, muss man wissen, dass das Higgs-Teilchen so instabil ist, dass es praktisch noch an seinem Entstehungsort wieder zerfällt. Die einzige Chance liegt also darin, es anhand seiner Zerfallsprodukte unter den Unmengen an Zerfällen anderer instabiler Teilchen zu erkennen, die ebenfalls in den Proton-Proton-Kollisionen erzeugt werden.



Das Standardmodell der Teilchenphysik → S. 220

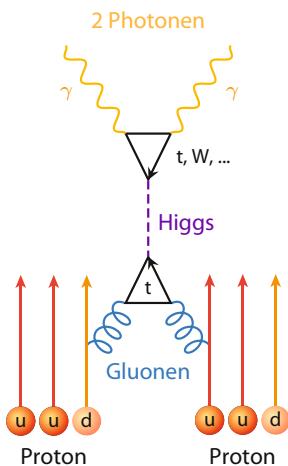
CERN Press Conference Update on the search for the Higgs boson at CERN on 4 July 2012 <http://cdsweb.cern.ch/record/1459604>  
 CERN Press Release *CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson*  
<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases Releases2012/PR17.12E.html>



Kollisionsergebnis im CMS-Detektor mit zwei erzeugten hochenergetische Photonen (grüne Linien nach oben und rechts unten)

Eine Möglichkeit liegt im Zerfall des Higgs-Bosons in zwei sehr energiereiche Photonen. Allerdings können zwei solche Photonen auch auf andere Weise in den Kollisionen entstehen. Man braucht also ein Kriterium, mit dem man die Photonenpaare erkennen kann, die aus einem Higgs-Zerfall stammen könnten. Dazu rechnet man aus den Energien und Impulsen jedes Photonenpaares die Masse  $m_{\gamma\gamma}$  aus, die ein Teilchen haben müsste, wenn es in dieses Photonenpaar zerfallen wäre. Findet man nun bei einer bestimmten Masse besonders viele Photonenpaare, so weiß man, dass dort tatsächlich ein instabiles Teilchen existieren muss, aus dessen Zerfall viele der Photonen stammen. Ganz analog geht man auch bei anderen Zerfallskanälen vor.

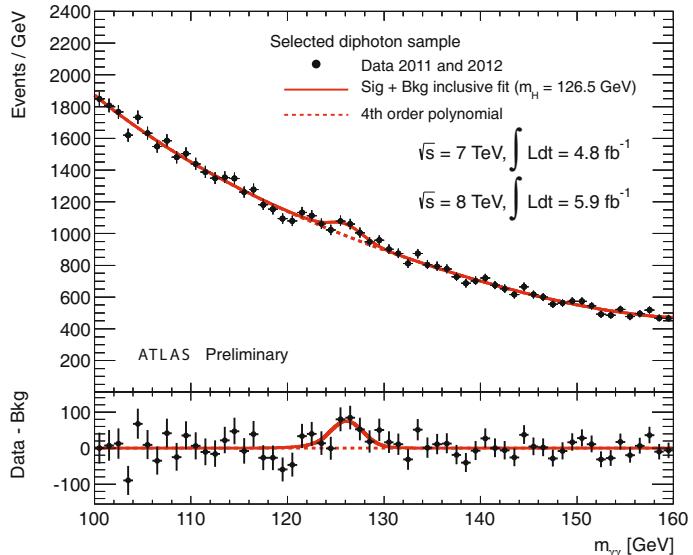
Das Higgs-Seminar am 4. Juli 2012 im CERN, bei dem die mutmaßliche Entdeckung des Higgs-Teilchens bekannt gegeben wurde



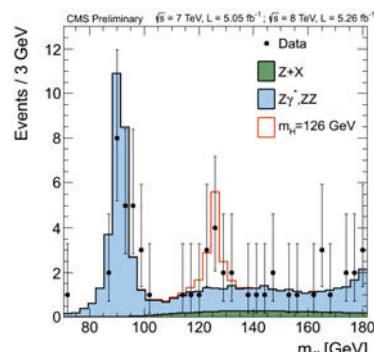
Feynman-Diagramm für die Erzeugung eines Higgs-Bosons in einer Proton-Proton-Kollision und seinem Zerfall in ein Photonenpaar

Im Juli 2012 hatte man endlich genügend viele hochenergetische Photonenpaare am LHC erzeugt, um sicher zu sein, dass man einen solchen Photonenpaar-Überschuss bei 125 GeV gefunden hatte und nicht einer zufälligen Schwankung auf den Leim gegangen war.

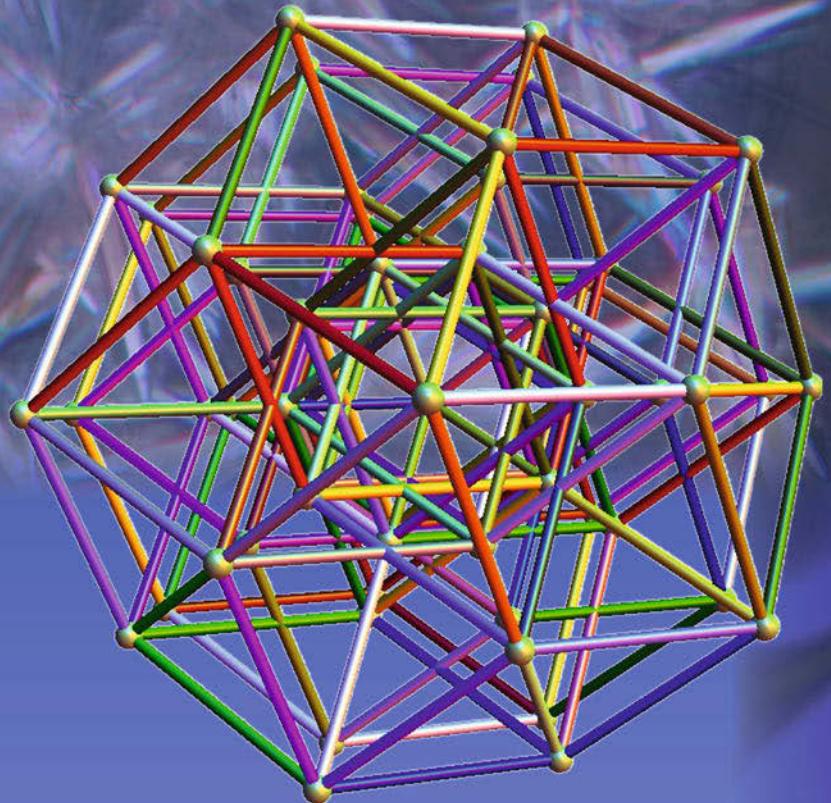
Auch in anderen Zerfallskanälen fand man an den beiden Detektoren ATLAS und CMS ähnliche Signale, beispielsweise im sogenannten goldenen Zerfallskanal, bei dem das Higgs-Teilchen über zwei Z-Bosonen in zwei Elektron-Positron- oder Myon-Antimyton-Paare zerfällt. Der Durchbruch war geschafft: Man hatte tatsächlich bei 125 GeV ein neues Teilchen gefunden, das sehr gute Chancen besaß, das Higgs-Teilchen zu sein.



Ergebnis des ATLAS-Experiments aus dem Juli 2012 für die Häufigkeit von Photonenpaaren mit verschiedenen 2-Photonen-Massen  $m_{\gamma\gamma}$ .



Ergebnis des CMS-Experiments aus dem Juli 2012 für die Häufigkeit von zwei geladenen Lepton-Antilepton-Paaren mit verschiedenen 4-Lepton-Massen  $m_{4l}$  (dies ist die Masse, die ein Teilchen haben müsste, wenn es in diese Leptonen zerfallen wäre)



# 8 Kristalle und andere feste Stoffe

Was haben die Kirchenfenster von Chagall mit Nanoteilchen zu tun? Welche Kristallgitter gibt es, und was sind Quasikristalle? Und wie funktionieren Leuchtdioden?

Festkörper sind ein spannendes Forschungsgebiet der Physik. Während in einem einzelnen Atom das Verhältnis zwischen Atomkern und Elektronen klar geregelt ist – ein Kern in der Mitte, die Elektronen bewegen sich um ihn herum – sieht es in größeren Verbänden von vielen Atomen schon anders aus. In solchen Festkörpern können Elektronen von Kern zu Kern gereicht werden, sich mit anderen Elektronen zusammenschließen oder sich gar – ganz den Gesetzen der Quantenmechanik folgend – über einen großen Bereich ausdehnen, sodass ihr exakter Aufenthaltsort fast völlig unbestimmt ist.

Es ist dieses vielfältige Verhalten, das Kristallen und anderen Festkörpern ihre mannigfaltigen Eigenschaften verleiht. Ob es nun die besondere Festigkeit von Diamant oder die elektrische Leitfähigkeit von Eisen ist oder die Tatsache, dass Strom in bestimmten Materialien nur in eine Richtung fließen kann oder dass die brillante Leuchtkraft der Kirchenfenster von Chagall durch Plasmonenanregungen zustande kommt – all dies ist auf die Vielseitigkeit der Elektronen in diesen Stoffen zurückzuführen. In diesem Kapitel werden wir einige der spannendsten Festkörperthemen kurz vorstellen.

## Plasmonen

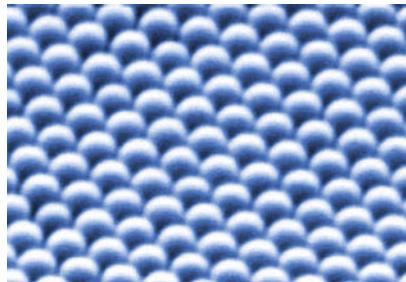
### Brillantes Quantenleuchten

Aufgrund ihrer Quantennatur verhalten sich Elektronen sehr unterschiedlich, je nachdem wo man sie antrifft. Während sie einzeln und in freier Wildbahn kleinen Partikeln ähneln, verhalten sie sich in großen Mengen eher wie Flüssigkeiten. Das ist insbesondere in Festkörpern, wie z. B. Metallen, der Fall. Dort sind die Elektronen nicht an einem Ort lokalisiert, sondern über den gesamten Festkörper verschmiert.

In dieser „Elektronenflüssigkeit“ breiten sich Dichteschwankungen wie Wellen aus. Deren elementare Anregungen verhalten sich aufgrund der Quantenphysik selbst wieder wie Teilchen, die *Plasmonen* genannt werden. Sie fallen, genau wie zum Beispiel auch Phononen (Gitterschwingungen in Kristallen), in die Familie der *Quasiteilchen*. Man unterscheidet grob drei Arten von Plasmonen:

Die *Volumenplasmonen* sind Dichteschwankungen im Inneren eines Metalls oder Halbleiters. *Oberflächenplasmonen* sind periodische Schwankungen der Elektronendichte an der Grenzfläche zweier Materialien, z. B. eines Metalls und eines Halbleiters.

Regelmäßig angeordnete runde Nanopartikel, mit einem Durchmesser von 700 Nanometern



Eine der interessantesten Sorten ist jedoch die der *Partikelplasmonen*. Sie treten ebenfalls an Oberflächen auf, breiten sich jedoch nicht aus, sondern sind an einem Ort konzentriert. Dies erreicht man, indem man die Form und Struktur der Oberfläche gezielt manipuliert, zum Beispiel durch Aufbringung sogenannter *Nanopartikel* (↓). Dies sind bis zu wenige hundert Nanometer (etwa ein Hundertstel so dick wie ein menschliches Haar) große Metallpartikel, häufig aus Gold oder Silber, die man auf die Oberfläche eines Festkörpers aufträgt. Durch Bestrahlung mit Licht der entsprechenden Frequenz kann man die Elektronen innerhalb eines Nanopartikels dann zum Schwingen anregen. Da aber das elektrische Feld der Elektronen dabei über die Grenzen des eigenen Nanopartikels hinaus in die benachbarten Partikel hineinragt, können Plasmonenanregungen sich von Partikel zu Partikel fortpflanzen.

**U-förmiges Nanopartikel, mit verschiedenen stehenden Elektronenwellen (Partikelplasmonen). Schwingungsbäuche sind rot, Schwingungsknoten blau dargestellt.**

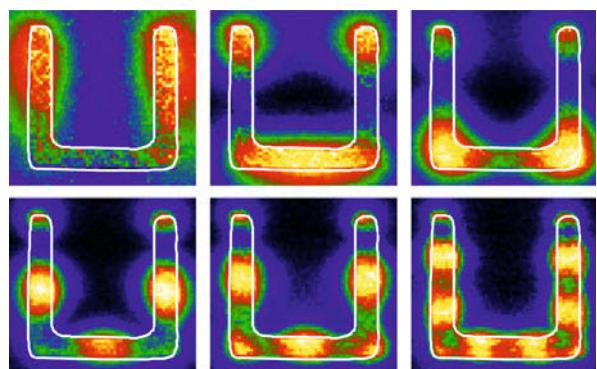


Bild links mit freundlicher Genehmigung von Timothy Andrew Kelf, Light-Matter Interactions on Nano-Structured Metallic Films, University of Southampton, February 2006

Bild rechts mit freundlicher Genehmigung von Stefan Linden, Universität Bonn aus: F. von Cube, S. Irsen, J. Niegemann, C. Matyssek, W. Hergert, K. Busch, S. Linden, Optical Material Express 1, 1009 (2011)  
Nanowelten → S. 212

Beispiele hierfür finden sich schon in der Antike: Der Becher des Lycurgus ist aus einem Glas, das allerfeinsten Gold- und Silberstaub (also Nanopartikel) enthält. Wird Licht vom Glas reflektiert, so zeigt er sich in einem matten Grün, dringt Licht allerdings durch das Glas hindurch, so werden die Partikelplasmonen in den Gold- und Silbernanopartikeln angeregt, und senden ein kräftiges rotes Licht aus. Beispiele aus neuerer Zeit sind die Kirchenfenster von Marc Chagall, der mit Nanopartikeln aus Gold eine unvergleichliche Farbbrillanz erreicht hat.

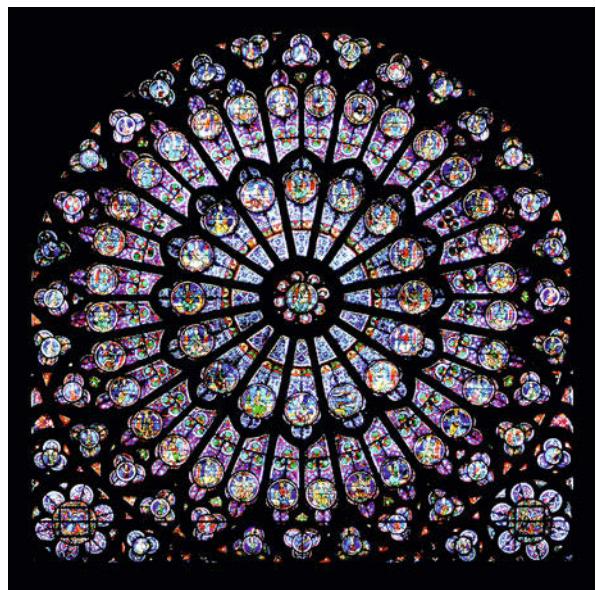
Aber die Plasmonen sind nicht nur ein ästhetisches Phänomen, das Gebiet der „Plasmonics“ ist fester Bestandteil der Nanophysik und Gegenstand aktueller Forschung. Da die Lichteigenschaften der Plasmonen stark von ihrer Umgebung anhängen, kann man sie benutzen, um hochsensitive Sensoren für bestimmte Moleküle zu konstruieren, um so zum Beispiel feinste Schadstoffe zu detektieren.

Ein weiterer Aspekt ist die hohe Frequenz, mit der Plasmonen schwingen können. Diese übersteigt die von gewöhnlichen Oszillationen von Elektronen in Metallen oder Halbleitern, sodass man – basierend auf Plasmonen – deutlich höher getaktete Schaltkreise konstruieren kann als mit normalen Leiterbahnen.

Buntglasfenster in der Kathedrale zu Notre-Dame de Paris. Auch in diesem Glas sind Nanopartikel aus Gold eingearbeitet, deren Leuchten den Fenstern eine besondere Farbqualität verleiht.



Der Kelch des Lycurgus, von außen und von innen beleuchtet. Die brillanten Farben sind ein Resultat der Anregung von Partikelplasmonen innerhalb der Gold- und Silberteilchen, die im Glas eingearbeitet sind. Bilder von Trustees of the British Museum

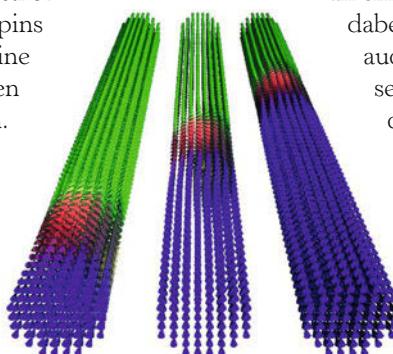
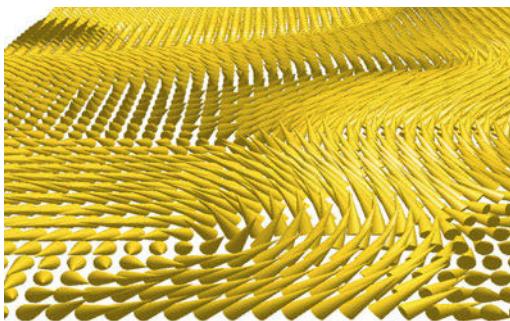


## Ferromagnetismus

Elementarmagnete: gemeinsam sind sie stark

Atomkerne und Elektronen in Festkörpern verhalten sich aufgrund ihres Spins ( $\downarrow$ ) wie kleine Stabmagnete, die in eine gewisse Richtung zeigen und einen Nord- und einen Südpol besitzen. Solche atomaren Magnete werden auch *Elementarmagnete* genannt. So klein sie auch sind, können sie doch die globalen Eigenschaften eines Materials bestimmen. In einigen Stoffen beispielsweise ist es aufgrund der speziellen Anordnung der Atome energetisch am günstigsten, wenn benachbarnte Elementarmagnete in dieselbe Richtung zeigen. Diese Stoffe werden *ferromagnetisch* genannt. Wie der Name (lat. *ferrum* = Eisen) vermuten lässt, ist Eisen bei Raumtemperatur in der Tat ferromagnetisch.

Die einzelnen Elementarmagnete richten sich an ihren Nachbarn aus.



Magnetisierter Draht mit zwei angrenzenden Domänen

In einem ferromagnetischen Stoff existieren dabei meist sogenannte *Weiss-Bezirke*, auch *Domänen* genannt. Innerhalb dieser nano- bis mikrometergroßen Bereiche sind die Elementarmagnete auch ohne äußere Einflüsse parallel zueinander ausgerichtet. Bei einem global unmagnetisierten Material kann diese Ausrichtung sich von Domäne zu Domäne allerdings unterscheiden, sodass es sich nach außen hin nicht wie ein Magnet verhält.

Natürlich sind die Elementarmagnete aber so frei beweglich, dass sie von einem von außen angelegten starken Magnetfeld alle in eine gemeinsame Richtung gezwungen werden können. Deswegen ist ferromagnetisches Material daran

Verschiedene Domänen mit unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung

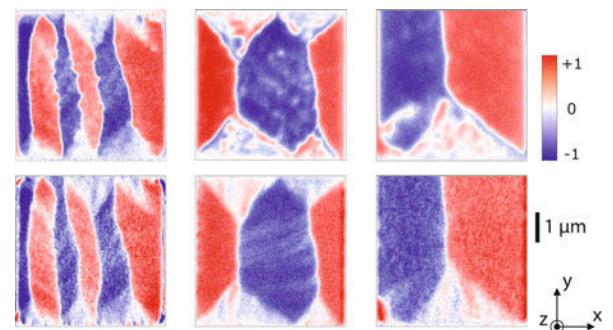


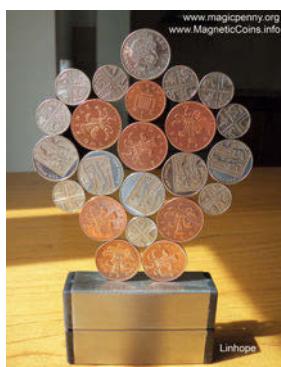
Bild oben und links unten von der Arbeitsgruppe von Prof. R. Wiesendanger, Universität Hamburg  
Bild unten rechts von J. Kurde et al. 2011 New J. Phys. 13 033015

Der Spin eines Teilchens → S. 186

Karl-Heinz Hellwege *Einführung in die Festkörperphysik* Springer Verlag, 3. Auflage 1988

zu erkennen, dass ein Magnet an ihm haften bleibt. Denn wenn man zum Beispiel einen starken Magneten an ein unmagnetisiertes Stück Eisen hält, so richtet das Feld des Magneten alle Elementarmagnete im Eisen in eine Richtung aus – nämlich so, dass alle Südpole zum Nordpol des externen Magneten weisen oder umgekehrt; es gibt dann nur noch eine große Domäne. Das Stück Eisen wird so selbst zum Magneten und zieht den ursprünglichen Magneten an.

Nach diesem Ummagnetisierungsprozess durch ein externes Magnetfeld verhalten sich die ferromagnetischen Materialien sehr träge: Zeigten alle Elementarmagnete nach der Magnetisierung parallel in eine Richtung (A), dann tun sie das auch weiterhin, wenn man das externe Magnetfeld abschaltet (B) – die Magnetisierung des Stoffes verbleibt bei der sogenannten *Remanenz*. Tatsächlich muss man sogar ein gewisses entgegengesetzt gepoltes Magnetfeld anlegen (die *Koerzitivkraft*), einfach nur um die Magnetisierung wieder aufzuheben (C). Will man die Elementarmagnete sogar noch in die entgegengesetzte Richtung zeigen lassen, muss man das entgegengesetzt gepolte Magnetfeld noch zusätzlich verstärken (D).

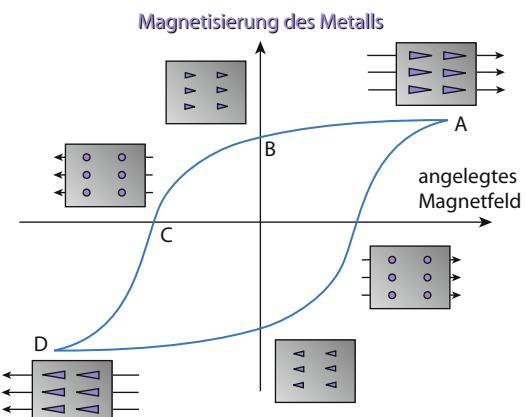


Die Stärke des äußeren Magnetfeldes und die Magnetisierung eines ferromagnetischen Materials sind also nicht einfach proportional zueinander – ihr Zusammenhang wird durch eine sogenannte

Einige Münzen können durch ein äußeres Magnetfeld selbst magnetisch werden

Hysteresekurve beschrieben. Die Fläche, die von der Kurve umschlossen wird, entspricht dabei der Energie, die man aufwenden muss, um einen Ferromagneten zweimal umzupolen. Weil sich das Material nach einem solchen Prozess wieder in seinem Ausgangszustand befindet, hat es diese Energie nicht gespeichert, sondern musste sie in Form von Wärme abgeben.

Diese Tatsache wird zum Beispiel in Induktionsherden verwendet: Induktionskochplatten erzeugen ein oszillierendes Magnetfeld, dem ein Metallkochtopf ausgesetzt ist. Diese Magnete polen die Magnetisierung der Töpfe ständig um, und etwa ein Drittel der Heizleistung entsteht durch die Wärme, die durch das Durchlaufen der Hysteresekurve vom Magnetfeld an den Topf übertragen wird. Die anderen zwei Drittel stammen von den induzierten Wechselströmen. Unter anderem deswegen wird ein Kochtopf aus Eisen auf einem Induktionskochfeld schneller heiß als z. B. ein Topf aus Aluminium, denn Letzteres ist kein ferromagnetischer Stoff.



Hysteresekurve: magnetisiertes Metall (A), Remanenz (B), Koerzitivkraft (C) und unmagnetisiertes Metall (D)

Bild links unten von Magic Penny Trust und Ciencias y Artes Patagonia [www.magicpenny.org](http://www.magicpenny.org), [www.capat.org](http://www.capat.org), [www.MagneticCoins.info](http://www.MagneticCoins.info)

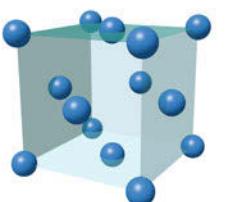


# Kristallgitter

## Die vierzehn verschiedene Arten, den Raum periodisch zu füllen

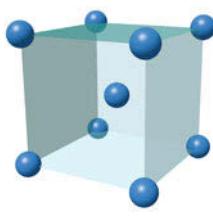
Das Wort *Kristall* stammt vom griechischen *χρύσταλλος* (zu *χρύσος*, „Eis, Frost, Eis“) ab. Anders als bei amorphen Stoffen (wie z.B. Glas) weisen die Atome oder Moleküle in einem Kristall eine besondere Regelmäßigkeit auf. Meist ist damit eine Verschiebungssymmetrie gemeint, d.h., dass sich gewisse Anordnungen der Bausteine im Kristall in eine Richtung immer wiederholen. Die entsprechenden Kristalle werden *periodisch* genannt. Ende des letzten Jahrhunderts wurden jedoch auch sogenannte Quasikristalle ( $\downarrow$ ) entdeckt, die zwar nicht periodisch sind, aber trotzdem eine Symmetriegruppe besitzen, zum Beispiel eine fünfzählige Rotationssymmetrie.

Die Kristallstruktur eines periodischen Kristalls beschreibt man mit dem *Gitter* und der *Basis*. Das Gitter besteht aus periodisch angeordneten Punkten, die die Verschiebesymmetrie des Kristalls beschreiben.



Kubisch flächenzentriertes Gitter

Die Gittervektoren zeigen hierbei in die Richtung, in die das Kristallgitter symmetrisch ist – entlang der sogenannten *Kristallachsen*. Die Basis besteht dann nicht zuletzt aus genau den Atomen und Molekülen, die sich im Kristall entlang der Gitterpunkte wiederholen.

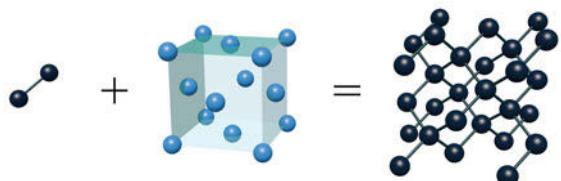


Kubisch raumzentriertes Gitter

Die einfachsten Gitter sind die *kubischen*, mit drei genau senkrecht aufeinander stehenden Gittervektoren, die alle dieselbe Länge haben. Sie unterteilen sich in die einfache kubische (sc, engl. *simple cubic*), kubisch raumzentrierte (bcc, *body centered cubic*) und

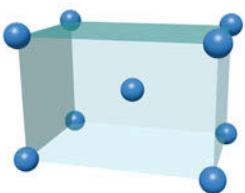
kubisch flächenzentrierte (fcc, *face centered cubic*) Gitter.

Sie treten in der Natur sehr häufig auf: Ca. 60% aller auf der Erde vorkommenden Kristalle besitzen ein bcc- oder fcc-Gitter. So weisen zum Beispiel Salzkristalle (Natriumchlorid) ein fcc-Gitter auf, und besitzen eine Basis mit einem Natrium- und einem Chlor-Atom. Diamant besitzt erstaunlicherweise auch ein fcc-Gitter, die Basis besteht hier allerdings aus zwei zueinander versetzten Kohlenstoffatomen.



Eine Basis aus zwei Kohlenstoffatomen, im fcc-Gitter angeordnet, ergibt das extrem stabile Diamantgitter.

Die *tetragonalen* und *rhombischen* Gitter besitzen schon weniger Symmetrie als die kubischen: Die drei Kristallachsen stehen zwar immer noch senkrecht aufeinander, aber von den Gittervektoren haben nur noch zwei dieselbe Länge (tetragonal), oder sie sind sogar alle unterschiedlich lang (rhombisches Gitter). Insgesamt gibt es sechs verschiedene tetragonale und rhom-

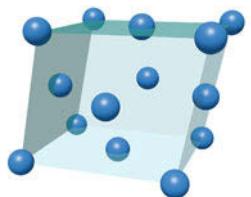


Tetragonal raumzentriertes Gitter



Der Phosgenit besitzt ein tetragonales Kristallgitter

bische Gitter: tetragonal-primitiv und -raumzentriert, sowie rhombisch-primitiv, -basiszentriert, -raumzentriert und -flächenzentriert.



Rhombisch flächenzentriertes Gitter

Die *trigonalen* Gitter besitzen drei gleichlange Gittervektoren, die jedoch alle keinen rechten Winkel zueinander aufweisen. Für gewöhnlich tauchen sie in der Form des *rhomboedrisch-trigonalen* Gitters auf, es gibt jedoch auch den besonderen Fall des *hexagonalen* Gitters: Dieses besitzt eine besonders hohe Symmetrie, denn neben den Verschie-

besymmetrien des trigonalen Gitters besitzt es zusätzlich eine sechszählige Rotationssymmetrie. Eiskristalle sind ein wundervolles Beispiel für in der Natur vorkommende hexagonale Gitter.



Trigonales Gitter

Die *monoklinen* Gitter besitzen drei unterschiedlich lange Gittervektoren, von denen nur zwei nicht aufeinander senkrecht stehen. Ein häufig vorkommender monokliner Kristall ist zum Beispiel Gips.

Schlussendlich bleiben nur noch die *triklinen* Gitter. Hier haben alle drei Gittervektoren unterschiedliche Längen, und es gibt keine rechten Winkel zwischen ihnen. Dieses sind die einzigen Gitter, die keinerlei Spiegelsymmetrie besitzen, und man findet sie nur selten in der Natur.



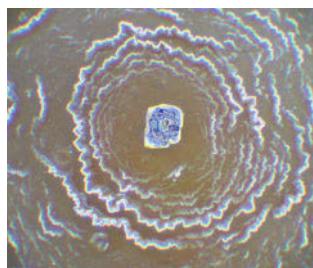
Der Inesit, ein Kristall mit trikliner Gitterstruktur

# Kristallisation

## Vom Keim zum ausgewachsenen Kristall

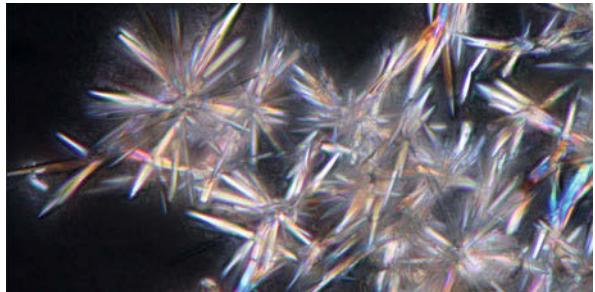
Obwohl Kristalle zu den härtesten Materialien der Erde gehören, entstehen sie auf eine sehr organisch anmutende Art und Weise: Sie wachsen. Kristallgitter sind äußerst regelmäßige Strukturen, in denen die Atome oder Moleküle für gewöhnlich stark aneinander gebunden sind. Die Entstehung eines Kristalls aus einer Schmelze, Lösung oder einem Gasgemisch nennt man **Kristallisation**.

Wird zum Beispiel ein geschmolzenes Metall abgekühlt, so werden die sich sehr schnell bewegenden Metallatome immer langsamer, bis die gegenseitige Anziehungskraft zwischen ihnen irgendwann so groß ist, dass sie sich nicht mehr weit von ihren Nachbarn entfernen können. Das Metall erstarrt. Wenn die Abkühlung langsam genug stattfindet, haben die Atome Zeit, sich in einem regelmäßigen Gitter anzurordnen und so einen Kristall zu bilden.



Ein Kristall kann allerdings auch bei normaler Zimmertemperatur entstehen: Ist ein Stoff zum Beispiel in einer

**Kristallisationskeim des Salzkristalls, mit der Beugungskontrastmethode aufgenommen**



Aragonit kristallisiert in Wasser (Wasserhärte)

Flüssigkeit gelöst, so kann man ihn zum Auskristallisieren bringen, indem man seine chemischen Umstände verändert. Durch Unterkühlung oder Erhöhung des Druckes in der Lösung kann man die Löslichkeit so verändern, dass der zu kristallisierende Stoff übersättigt ist: Er beginnt fest zu werden.

Alle Kristallisationsprozesse sind ein Wetteifern zweier entgegengesetzt wirkender Effekte: Zum einen „möchte“ der noch flüssige Stoff seine Energie verringern, indem er einen Festkörper bildet. Zum anderen bedeutet ein entstehender Kristall eine neue Grenzfläche zu anderen Stoffen (z. B. dem noch flüssigen Teil des Metalls oder dem Lösungsmittel) und damit eine erhöhte Oberflächenenergie, was wiederum energetisch ungünstig ist. Zur Kristallisation kommt es, wenn der erste Effekt den zweiten überwiegt.

Bild Mitte mit freundlicher Genehmigung von Jost Jahn, Amrum

Bilder oben und unten mit freundlicher Genehmigung von Erhard Mathias <http://www.polymermicroscopy.com/afmgalerie.htm>, aufgenommen mit Beugungskontrastmethode

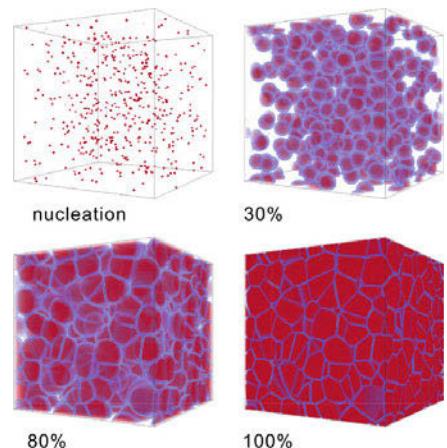
Weil eine große Grenzfläche zwischen dem Kristall und seiner Umgebung energetisch so ungünstig ist, lagern sich neu auskristallisierende Atome am liebsten an bereits bestehendem Kristall an, statt in der Flüssigkeit vereinzelt zu bleiben: So wird das Volumen des Kristalls größer, ohne dass die Oberfläche relevant zunimmt. Deswegen wachsen Kristalle: Anstatt gleichmäßig zu erstarren oder auszukristallisieren, bilden sich einzelne Kristallisationskeime, die dann langsam aber sicher größer werden.

Im Winter kann man das direkt beobachten: Auf Fenstern formt sich Eis zuerst in winzigen Kratzern und Kanten, denn dort kann es sich anlagern, ohne eine große Grenzfläche haben zu müssen. Zusätzliches Eis lagert sich an bereits bestehendem an, wodurch die wunderschönen Eisblumen entstehen.

Bei der industriellen Herstellung von Kristallen (auch *Züchtung* genannt) macht man sich dieses Prinzip zunutze: So wird in eine Lösung oder Schmelze ein sogenannter *Impfkristall* eingeführt – ein bereits bestehender Einkristall, der als Kristallisationskeim dient – und der langsam zu einem großen Kristall heranwächst.

In welchem Gittertyp (kubisch, hexagonal, triklin, siehe Kristallgitter ↓) ein Stoff kristallisiert, hängt nicht nur vom Stoff selbst, sondern auch von äußeren Umständen ab: Durch Druck und Temperatur kann man das Resultat der Kristallisation stark beeinflussen. Deshalb entstehen in tiefen Gesteinsschichten, wo deutlich höhere Drücke und Temperaturen herrschen, teilweise ganz andere Varianten von Gesteinsmineralien als an der Erdoberfläche.

Sogar nachträglich kann man z. B. durch äußeren Druck noch Graphit in Diamant umwandeln, also Kohlenstoff von einem hexagonalen in ein kubisch flächenzentriertes Gitter überführen. Man spricht hierbei von *Umkristallisation*. An der Erdoberfläche ist Diamant übrigens metastabil: Sich selbst überlassen verwandelt er sich langsam wieder in Graphit zurück. Dieser Vorgang geht allerdings so extrem langsam vorstatten, dass man ihn praktisch nicht beobachten kann.



Simulation des Auskristallisationsprozesses in hochreinem Eisen

Schneekristalle in verschiedensten Formen

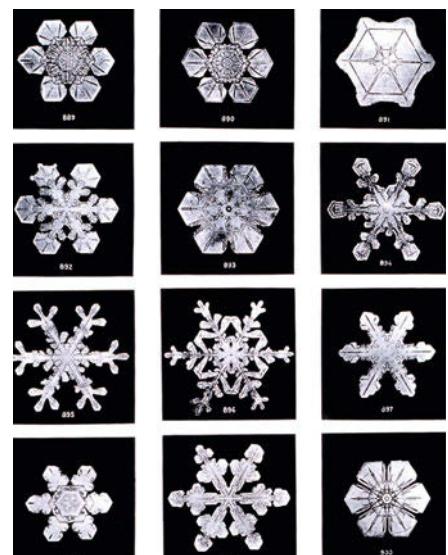


Bild rechts oben von B. Zhu und M. Militzer Modell. Mater. Sci. Eng. 20 085011, 2012  
Kristallgitter → S. 246

K.-T. Wilke, J. Bohm (Hrsg.) *Kristallzüchtung* Verlag Deutsch, 2. Auflage 1988

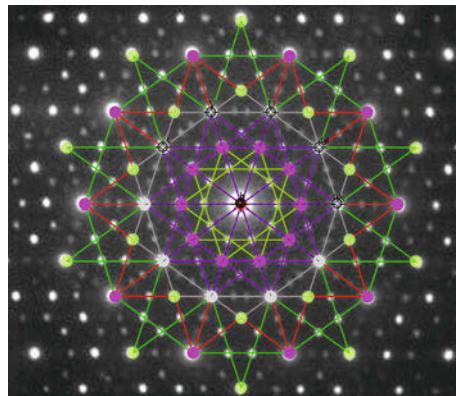
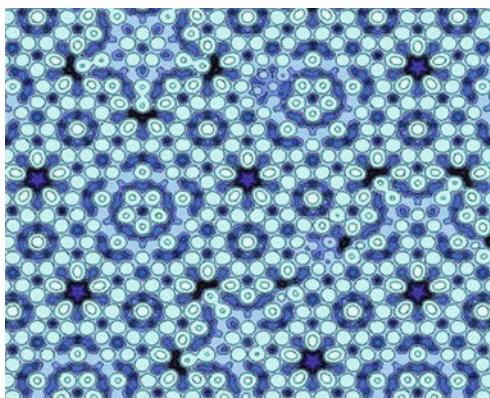


## Quasikristalle

Nicht periodisch und doch symmetrisch

Es ist ein klassisches mathematisches Resultat, dass es im dreidimensionalen Raum nur vierzehn Kristallgitter geben kann, die den periodischen Kristallen zugrunde liegen (↓). Bis Ende des letzten Jahrhunderts ließen sich alle bekannten in der Natur vorkommenden oder künstlichen Kristalle einem dieser sogenannten *Bravais-Gitter* zuordnen. All diese Gitter sind nicht nur symmetrisch unter Verschiebungen, sondern weisen eine 2-, 3-, 4- oder 6-zählige Rotationssymmetrie auf, d.h. sie sind symmetrisch unter Drehung um 180°, 120°, 90° oder 60° um eine ihrer Achsen.

Im Jahre 1984 jedoch machte der Ingenieur Daniel Shechtman eine überraschende Entdeckung: Er stellte fest, dass Röntgenbeugungsstrukturen an einer Aluminium-Mangan-Legierung eine fünfzählige Rotationssymmetrie besitzen, d.h., dass der „Kristall“ symmetrisch ist unter Drehungen um 72°. Der Physiker Paul Steinhardt prägte daraufhin den Begriff des *Quasikristalls*.



Streuungsbild an einem Zink-Mangan-Holmium-Kristall, mit dreidimensionaler Projektion eines Penteraktes

Da eine solche Symmetrie nach Lehrmeinung unmöglich war, wurde Shechtmans Entdeckung lange Zeit nicht ernst genommen. Der zweifache Chemienobelpreisträger Linus Pauling soll gesagt haben: „Es gibt keine Quasikristalle, nur Quasi-Wissenschaftler.“

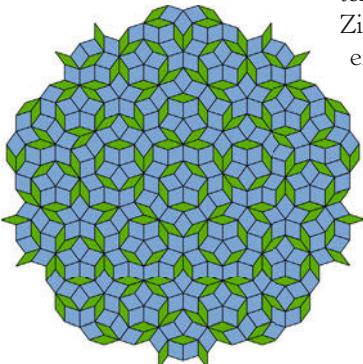
Heute jedoch wissen wir, dass Shechtman mit seinen Arbeiten das Verständnis von molekularen Strukturen revolutioniert hat. Im Jahre 1992 wurde die Definition des Begriffes „Kristall“ so abgeändert, dass auch die Quasikristalle darunterfallen. Inzwischen sind hunderte von Quasikristallen bekannt, und Shechtman erhielt 2011 für seine Arbeiten den Chemienobelpreis.

Atommodell einer Quasikristalloberfläche aus einer Aluminium-Palladium-Mangan-Legierung

In der Tat sind die Quasikristalle nicht periodisch, d. h.: eine Verschiebung in eine bestimmte Richtung bildet den Kristall nicht auf sich selbst ab, wie das bei periodischen Kristallen der Fall ist. Trotzdem weisen die Quasikristalle ein hohes Maß an Symmetrie auf, zum Beispiel eben eine dodekaedrische oder ikosaedrische.

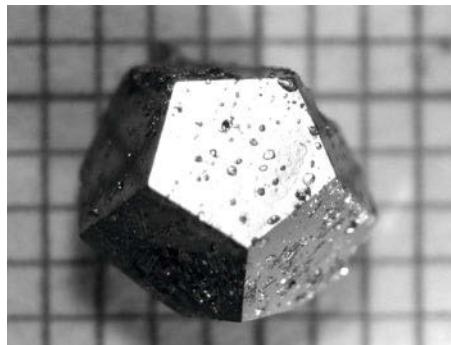
Es gibt Quasikristalle nicht nur in unserer dreidimensionalen Welt, sondern auch z. B. in der Ebene: Seit den 1970ern sind die sogenannten *Penrose-Parkettierungen* bekannt. Mit ihnen kann man z. B. einen Fußboden vollständig so mit Kacheln belegen, dass das entstehende Muster symmetrisch unter Drehung um  $72^\circ$  ist. Ähnliche Muster finden sich tatsächlich schon im 15. Jahrhundert, z. B. im Darb-i-Imam-Schrein im iranischen Isfahan.

Die Penrose-Parkettierung



So konstruiert man zum Beispiel das Muster des ikosahedralen Holmium-Mangan-Zink Quasikristalls durch Projektion eines fünfdimensionalen Hyperwürfels (oder Penterakt) in unseren dreidimensionalen Raum.

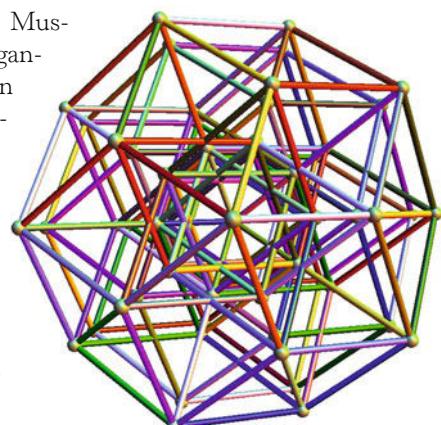
Dreidimensionale Projektion eines Hexeraktes (sechsdimensionaler Hyperwürfel)



Ein Aluminium-Palladium-Rhenium-Kristall

In der Natur sind dreidimensionale Quasikristalle äußerst selten, der einzige natürlich vorkommende Quasikristall ist der Icosahedrit, eine Aluminium-Kupfer-Eisen-Legierung mit der Zusammensetzung  $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{24}\text{Fe}_{13}$ . Quasikristalle können aber auch künstlich hergestellt werden, zum Beispiel indem gewisse Legierungen schnell abgekühlt werden (↓).

Faszinierenderweise kann man die mathematischen Strukturen der Quasikristalle im dreidimensionalen Raum konstruieren, indem man sich ein periodisches Gitter in einer höheren Dimension denkt, und dessen Bild unter einem irrationalen Winkel, z. B. einem ganzzahligen Vielfachen vom goldenen Schnitt, auf eine dreidimensionale „Ebene“ herunter projiziert.



Kristallisation → S. 248

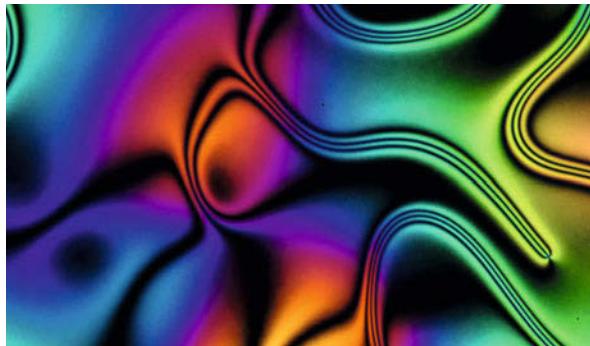
B. Ernst *Der Zauberberg* des M. C. Escher, 7. Die Kunst der Alhambra Taschen 1978 und 1992

J. Baez *This Week's Finds in Mathematical Physics (Week 247)* <http://math.ucr.edu/home/baez/week247.html>; Mathematische Überlegungen zu aperiodischen Parkettierungen (englisch)



## Flüssigkristalle

Ordentlich nass

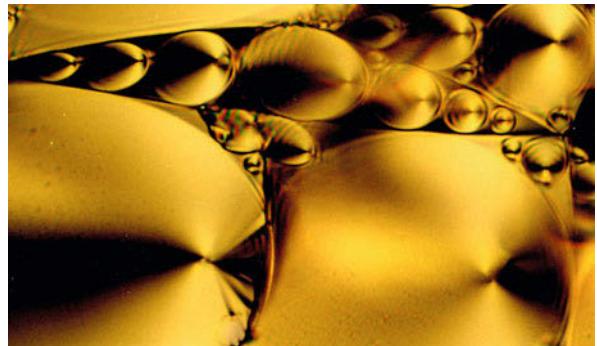


Ein Flüssigkristall in nematischer Phase

Im flüssigen Zustand sind die Moleküle eines Stoffes so schwach aneinander gebunden, dass sie zueinander ständig ihre Position verändern können. Aus diesem Grund ist eine Flüssigkeit eben nicht „fest“, und da die Moleküle eine so große Freiheit besitzen, sind sie meist sehr ungeordnet.

Es gibt jedoch auch Stoffe, die zwar flüssig sind, deren Moleküle aber trotzdem versuchen, sich an ihrer Umgebung auszurichten. Solche Stoffe nennt man *Flüssigkristalle*, denn ähnlich wie die Kristalle ( $\downarrow$ ) weisen sie lokal ein hohes Maß an Ordnung auf.

Es gibt Flüssigkristalle in sehr verschiedenen Ausprägungen und Formen, die sich in ihren Eigenschaften teils stark voneinander unterscheiden. Am einfachsten ist die sogenannte *nematische Phase*: Diese Flüssigkristalle besitzen dünne, stäbchenförmige Moleküle, die zwar zufällig verteilt sind, aber die sich trotzdem



Ein Flüssigkristall in smektischer Phase

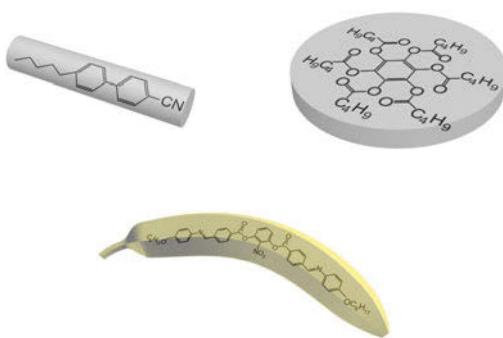
parallel zu ihren Nachbarn ausrichten. So entsteht eine lokale Richtungsabhängigkeit und damit Ordnung in der flüssigen Phase.

Im Gegensatz dazu tritt in der *smektischen Phase* zusätzlich eine gewisse Fernordnung auf: Stäbchenförmige Moleküle ordnen sich zum Beispiel in dünnen Schichten an. Innerhalb dieser Schichten sind die Moleküle ungeordnet (man spricht auch von zweidimensionalen Flüssigkeiten), aber die Schichten selbst – sowie die Ausrichtung der Moleküle in jeder Schicht – ist sehr geordnet. In zwei Richtungen verhält sich der Flüssigkristall also eher wie eine Flüssigkeit, in die dritte, dazu senkrechte Richtung aber wie ein Kristall.

Die sogenannte *kolumnare Phase* tritt auf, wenn die Moleküle sich in säulenartigen Strukturen anordnen. Dies geschieht zum Beispiel, wenn sie eher scheibenförmig statt stäbchenförmig sind.

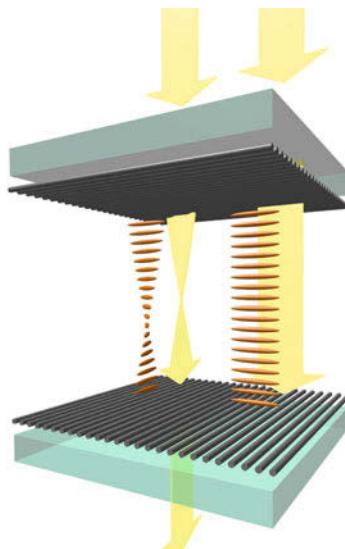
Lange und dünne Moleküle wirken in einem Flüssigkristall wie kleine Dipolantennen: Elektrische Ladungen können meist nur entlang ihrer Achse, aber nicht senkrecht dazu bewegt werden. Deswegen beeinflusst ihre Lage auf ganz entscheidende Art und Weise, wie der Flüssigkristall mit Licht wechselwirkt. Wenn zum Beispiel die Polarisationsrichtung von Licht und die Ausrichtung der Moleküle übereinstimmen, werden diese zum Schwingen angeregt und absorbieren so die Energie des Lichtes. Der Flüssigkristall ist also un durchsichtig.

Liegen die Moleküle hingegen senkrecht zur Polarisationsrichtung, so kann das Licht sie nicht anregen, und breitet sich ungehindert aus – der Flüssigkristall ist also durchsichtig. Bei geschickter Anordnung der Moleküle kann man die Polarisationsrichtung des Lichtes sogar ändern oder den Flüssigkristall gar doppelbrechend machen.



Besondere Molekülformen bestimmen die Eigenschaften der Flüssigkristalle.

Dieses Prinzip macht man sich zum Beispiel in LCDs (*liquid crystal displays*) zunutze: Man überzieht eine ständig leuchtende Fläche (die *Hintergrundbeleuchtung*), die polarisiertes Licht aussendet, mit einer dünnen Schicht aus einem nematischen Flüssigkristall. Mithilfe von elektrischen Feldern kann man die Orientierung der Moleküle darin mikrometrisch genau beeinflussen. Dadurch bestimmt man, welche Teile des Flüssigkristalls lichtdurchlässig sind und welche nicht, also an welchen Stellen man einen leuchtenden Punkt sieht, und an welchen der Bildschirm dunkel bleibt. So entsteht ein scharfes Bild, ohne dass man auf eine unhandliche Elektronenröhre oder dergleichen zurückgreifen muss.



Im LCD entsteht ein Bild, indem die Polarisationsebene des Lichts je nach Bedarf gedreht wird.



## Elektronen in Halbleiterkristallen

### Vom Isolator zum Leiter mit einer Prise Arsen

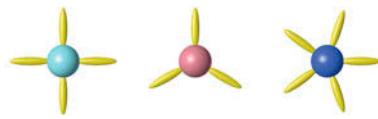
Nicht alle Elektronen, die einen Atomkern umkreisen, sind gleich: Diejenigen, die die inneren Elektronenschalen auffüllen, sitzen sehr dicht am Atomkern und beteiligen sich meist nicht an der Wechselwirkung mit anderen Atomen. Weiter außen hingegen sitzen die sogenannten *Valenzelektronen*. Diese bilden keine vollständige Schale und sind deutlich weniger stark an den Kern gebunden. In den meisten Fällen sind sie es, die für die Bindungen zu anderen Atomen verantwortlich sind.

Silizium (Si) zum Beispiel besitzt, genau wie auch Kohlenstoff, vier Valenzelektronen, weshalb man es auch *vierwertig* nennt. In einem Siliziumkristall gehen genau diese vier Elektronen Bindungen ein, d. h. jedes Atom hat genau vier Nachbarn. Zwischen je zwei Siliziumatomen bilden die beiden Valenzelektronen eine Elektronenbrücke. Diese Bindungen sind sehr stabil und sind ein Grund für die hohe Festigkeit des Siliziumkristalls. Und es ist auch nicht

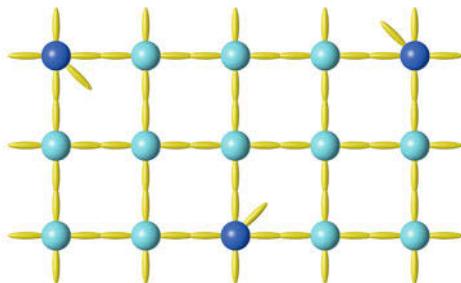
überraschend, dass reines Silizium ein Isolator ist: Weil alle Elektronen fest im Kristall eingespannt und deswegen sehr unbeweglich sind, kann durch Silizium so gut wie kein elektrischer Strom geleitet werden.

Interessant wird es jedoch, wenn man einzelne Siliziumatome in einem reinen Siliziumkristall durch Atome einer anderen Sorte ersetzt: Das Element Arsen (As) zum Beispiel besitzt fünf Valenzelektronen. Wenn man es in ein Siliziumkristallgitter einbaut, werden jedoch nur vier davon als Bindungselektronen benötigt. Das fünfte Valenzelektron ist daher so schwach gebunden, dass es sich fast frei im

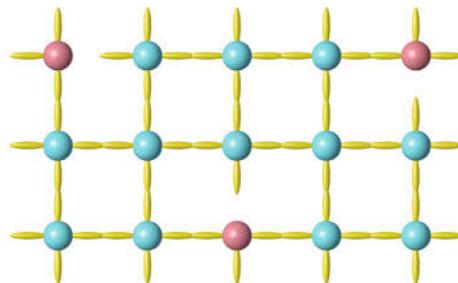
Kristall bewegen kann. Einen solchen Siliziumkristall nennt man *n-dotiert* (von *dotare*, lat.: „ausstatten“). Das „n“ steht dafür, dass negative Ladungsträger übrig bleiben), und im Gegensatz zu reinem Silizium ist er in der Lage, elektrischen Strom zu leiten, weil dort Elektronen leicht wandern können.



Vierwertiges Silizium, Dreiwertiges Indium, Fünfwertiges Arsen



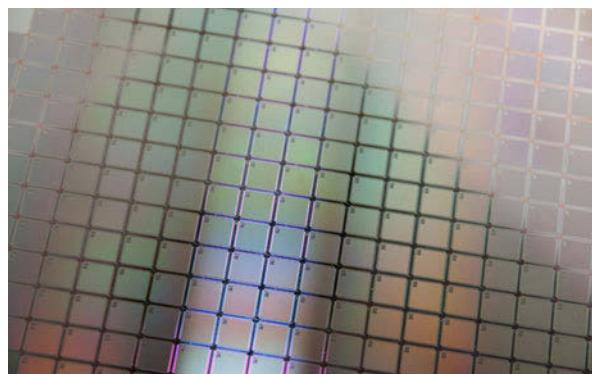
Im n-dotierten Kristall gibt es einen Überschuss an Elektronen im Gitter.



Im p-dotierten Kristall fehlen Elektronen – es gibt daher frei bewegliche „Elektronenlöcher“.

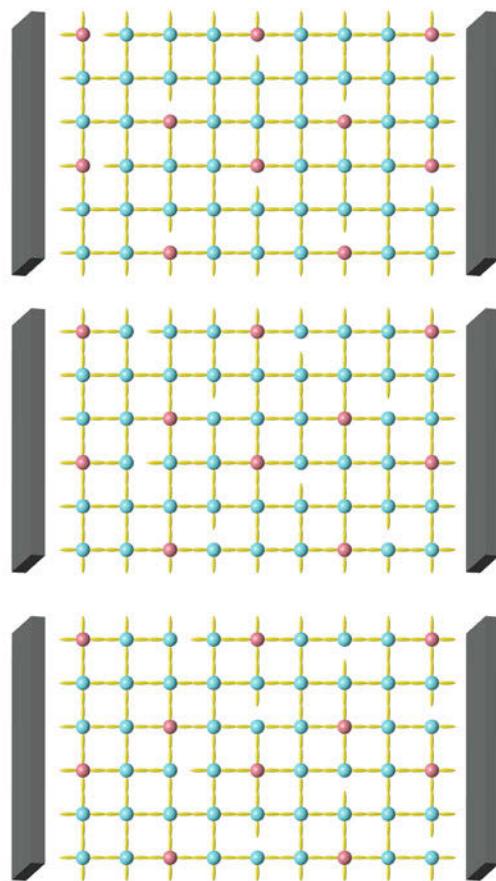
Das Gegenstück zur n-Dotierung ist die sogenannte *p-Dotierung*: Statt mit fünfwertigen, ersetzt man einzelne Siliziumatome mit dreiwertigen Fremdatomen, zum Beispiel Indium (In). Da Indium nur drei Valenzelektronen besitzt, aber wie jedes andere Atom im Kristall vier Nachbarn hat, fehlt ein Elektron, um die Bindungen zu komplettieren. Man spricht hier auch von einem *Defektelektron* oder *Loch*, und man kann es sich wie ein positiv geladenes Gegenstück zu einem Elektron vorstellen (daher *p-dotiert*, mit p = positiv). Genau wie das überschüssige Elektron im n-dotierten Halbleiter, ist das Defektelektron im p-dotierten Halbleiter nicht an den Indiumkern gebunden, sondern relativ frei beweglich.

Mit der Vorstellung, dass das Defektelektron sich durch den Kristall bewegt, ist natürlich gemeint, dass ein Valenzelektron eines benachbarten Siliziumatoms vom Indiumatom angezogen wird und die Elektronenbrücke komplettiert. Dieses Elektron fehlt dann natürlich beim Siliziumatom – das Loch ist anschaulich also an eine neue Position gewandert.



Oberfläche eines Silizium Wafers

Durch gezieltes Dotieren kann man so die Leiteigenschaften von Stoffen wie Silizium genau kontrollieren, was bei der Konstruktion elektronischer Bauteile ausgenutzt wird.



Liegt z.B. an einem p-dotierten Kristall eine Spannung an, so wandern die positiv geladenen Löcher zum Minuspol – es fließt ein Strom.



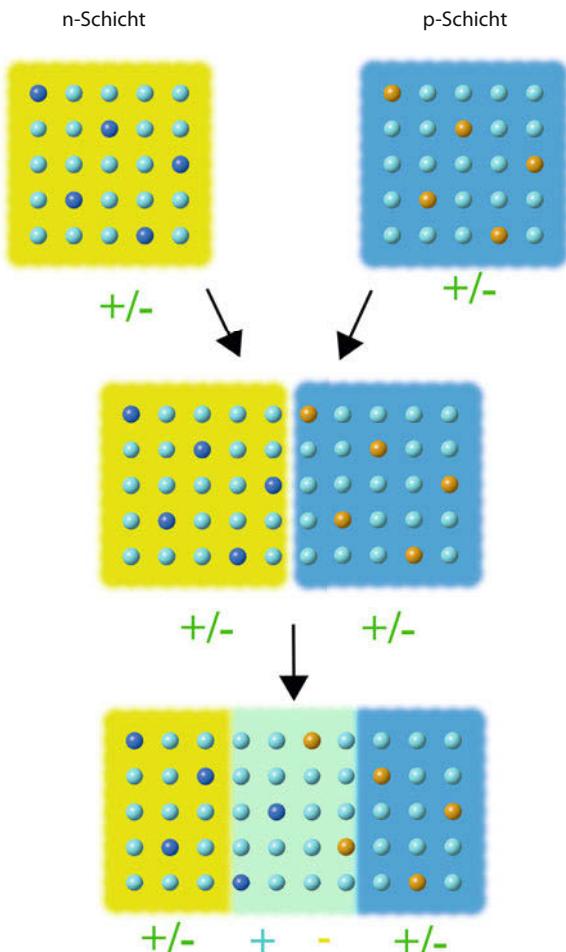
## Halbleiterdioden

### Wie man elektrische Einbahnstraßen baut

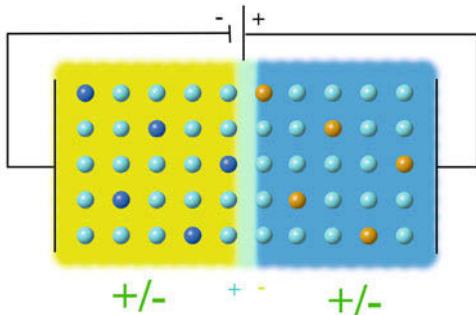
Man kann die elektrischen Eigenschaften von Halbleitern wie z. B. Silizium (Si) oder Galliumarsenid (GaAs) ganz entscheidend beeinflussen, indem man sie dotiert, also einzelne Atome im Kristallgitter durch Atome einer anderen Sorte ersetzt ( $\downarrow$ ). Besonders spannende Effekte kann man erzeugen, wenn man dann auch noch unterschiedlich dotierte Halbleiter miteinander kombiniert. Das Paradebeispiel hierfür ist der sogenannte *np-Übergang*, den man erhält, indem man einen n-dotierten und einen p-dotierten Halbleiter miteinander in Kontakt bringt.

In einem n-dotierten Halbleiter gibt es frei bewegliche Elektronen (negative Ladungen), während sich in einem p-dotierten Leiter positiv geladene Elektronenlöcher (also Stellen, an denen eigentlich ein Elektron sitzen sollte) bewegen können. Trotzdem sind beide Halbleiter elektrisch neutral, denn es gibt zum Beispiel im n-dotierten Siliziumkristall für jedes freie negativ geladene Elektron ein in die Kristallstruktur eingebautes einfach positiv geladenes Fremdatom (von dem das Elektron ja ursprünglich stammt).

Wenn sich jedoch ein n-dotierter und ein p-dotierter Halbleiter berühren, gerät dieses Gleichgewicht durcheinander: Die frei beweglichen Elektronen im n-dotierten Halbleiter fangen an, in den p-Halbleiter hinein zu wandern. Dort setzen sie sich an die Stellen, an denen sich in der Kristallstruktur ein Elektronenloch befindet. Man sagt auch, dass Elektron und Elektronenloch *rekombinieren*.



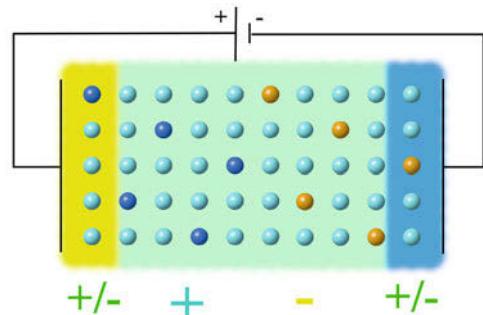
Bringt man einen n-dotierten und einen p-dotierten Halbleiter miteinander in Kontakt, bildet sich eine Raumladungszone aus.



Polt man den np-Übergang in Durchlassrichtung, fließen Elektronen in die n-Schicht (und aus der p-Schicht ab). Wenn die Raumladungszone wieder vollkommen mit Elektronen und Löchern aufgefüllt ist, beginnt ein Strom zu fließen.

Natürlich fehlt jetzt dem n-Halbleiter jeweils ein Elektron, er ist also positiv geladen. Gleichzeitig ist im p-Halbleiter plötzlich jeweils ein Elektron zu viel vorhanden, er ist also negativ geladen.

Es wandern so lange Elektronen von der n-Schicht in die p-Schicht und rekombinieren dort mit den Elektronenlöchern, bis die p-Schicht so sehr negativ geladen ist, dass die elektrische Abstoßung ausreicht, um die Zuwanderung weiterer Elektronen zu verhindern. Es stellt sich also wiederum ein Gleichgewichtszustand ein, in dem es in der Grenzschicht zwischen den beiden elektrisch neutralen Halbleitern einen Bereich – die *Raumladungszone* – gibt, der auf einer Seite positiv, auf der anderen Seite negativ geladen ist. Die Spannungsdifferenz zwischen diesen beiden Bereichen nennt man die *Diffusionsspannung*, und sie ist es, die den np-Übergang zu einer sogenannten *Diode* macht, also elektrischen Strom nur noch in eine Richtung durchlässt, und zwar von der n- zur p-Seite: Man hat eine künstliche Einbahnstraße geschaffen!



Andersherum gepolt jedoch vergrößert sich nur die Raumladungszone, und es fließt kein Strom. Der np-Übergang ist gesperrt.

Legt man nämlich an den np-Übergang derart eine Spannung an, dass Elektronen von der n- Seite zur p- Seite fließen sollten, dann müssen sie die Diffusionsspannung überwinden. Ist die angelegte Spannung größer als diese Barriere (meist reichen einige wenige Volt) dann können die Elektronen die Raumladungszone passieren, und durch die p-Seite des Übergangs abgeleitet werden. Die Diode ist dann also in *Durchlassrichtung* gepolt.

Wird der Übergang jedoch andersherum gepolt, dann fließen für einen kurzen Moment einige Elektronen der n-Schicht, sowie einige Elektronenlöcher in der p-Schicht ab. Dadurch wächst jedoch die Raumladungszone zwischen den beiden Halbleitern, ebenso vergrößert sich die Diffusionsspannung. Sobald diese genauso groß ist wie die von außen angelegte Spannung, stellt sich wiederum ein Gleichgewicht ein, in dem jedoch kein Strom fließt. Die Diode ist dann in *Sperrrichtung* gepolt.

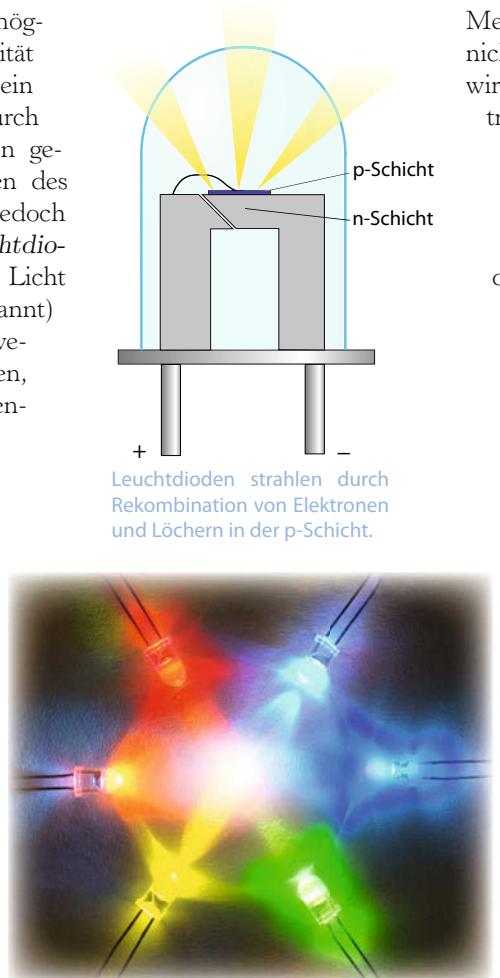


# Leuchtdioden

## Leuchtende Kristalle und biegsame Bildschirme

Seit dem 19. Jahrhundert ist es möglich, mit Glühbirnen aus Elektrizität Licht zu erzeugen. Dabei wird ein elektrisch leitendes Material durch starken Stromfluss zum Glühen gebracht. In den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurde dann jedoch mit der Entwicklung der *Leuchtdiode* (auch *light emitting diode*, LED genannt) eine deutlich elegantere – und weniger heiße – Methode gefunden, die auf den besonderen Eigenschaften von Halbleitern beruht.

Der Hauptteil einer Leuchtdiode ist, wie schon der Name suggeriert, ein np-Übergang zwischen zwei Halbleitern (↓). Als Diode ist dieser Übergang nur in eine Richtung für elektrischen Strom durchlässig – wird die Diode falsch herum gepolt, kann kein Strom fließen. Die meisten LEDs sind dabei sehr empfindlich: Bei falscher Polung kann sie schon bei einer angelegten Spannung von einigen wenigen Volt zerstört werden.



LEDs liefern kristallklare Farben.

Meist baut man LEDs übrigens nicht aus dotiertem Silizium, das wir in einem der vorherigen Beiträge genauer betrachtet hatten, sondern aus sogenannten *III-V-Halbleitern*, wie zum Beispiel Galliumarsenid (GaAs). Der Grund dafür ist, dass sich bei diesen Stoffen die elektrischen Eigenschaften sehr genau durch das exakte Verhältnis der beiden Anteile, in diesem Fall Gallium (Ga) und Arsen (As), beeinflussen lassen.

In einer Leuchtdiode ist die p-Schicht, also der Teil in dem die Elektronenlöcher frei beweglich sind, sehr dünn und besitzt eine große Löcherdichte. Sie liegt auf einer vergleichsweise dicken n-Schicht. Wenn man die Diode nun in Durchlassrichtung anschließt, fließt ein Strom: An der n-Schicht kommen Elektronen an, und an der p-Schicht werden Elektronen abgesaugt (man könnte auch sagen, dass Elektronenlöcher ankommen).

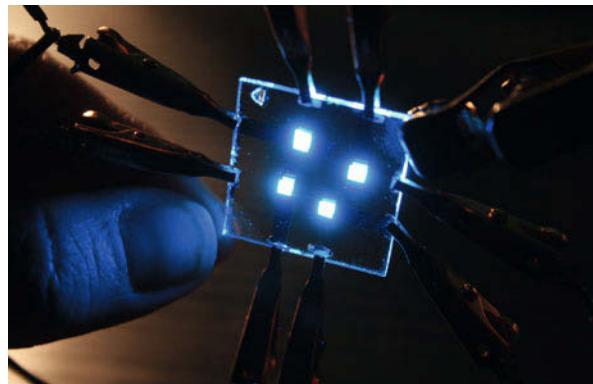
Bild unten mit freundlicher Genehmigung von E. Fred Schubert

Halbleiterdioden → S. 256

Fördergemeinschaft Gutes Licht LED – Licht aus der Leuchtdiode <http://www.licht.de/fileadmin/shop-downloads/h17.pdf>  
 C. Aust, S. Worlitzer Funktionsweise und Eigenschaften von OLEDs <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/displays/articles/44614/>  
 P. Lay Selbstbauprojekte mit Leuchtdioden: 50 praktische Anwendungen für Haus, Garten und Hobby Franzis Verlag 2009

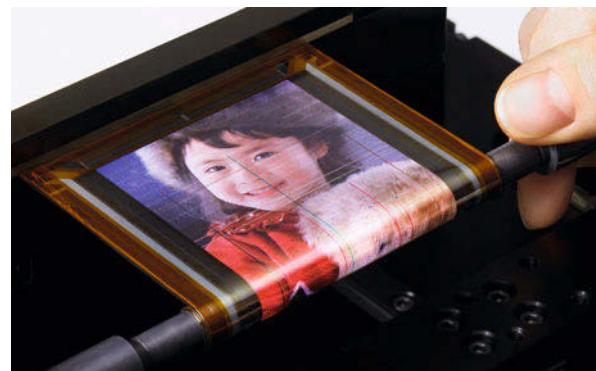
Wie bei jedem np-Übergang füllen die Elektronen die Löcher an der Grenzschicht zwischen beiden Halbleitern wieder auf (sie *rekombinieren*). Wann immer sich ein Elektron und ein Loch vereinigen, wird Energie frei. Diese Energie kann als Licht durch die sehr dünne p-Schicht nach außen abgegeben werden, und ist dann für das menschliche Auge sichtbar. So ist bereits bei sehr kleinen Strömen ein Aufleuchten der LED erkennbar, das proportional mit der Stromstärke heller wird.

LEDs sind sehr viel farbkräftiger als zum Beispiel Flüssigkristallbildschirme (LCDs ↓), und im Gegensatz zu ihnen ist das Bild auf einem LED-Bildschirm auch noch gut zu erkennen, wenn man es von der Seite betrachtet. Da man beim An- und Ausschalten der LEDs im Gegensatz zu den Flüssigkristallen keine schwerfälligen Moleküle bewegen muss, sondern nur Elektronen, sind sie auch sehr viel reaktionsschneller und für schnell wechselnde Bilder geeignet. Der größte Vorteil jedoch ist die Tatsache, dass es nicht nur kristalline, sondern auch organische Halbleiter gibt. Aus diesen lassen sich organische Leuchtdioden (sogenannte



Mit organischen Halbleitern lassen sich biegsame Lichtquellen herstellen.

OLEDs) herstellen. Diese besitzen nicht nur die Vorteile von normalen Leuchtdioden, sondern sind darüber hinaus auch noch biegsam: Seit einigen Jahren wird intensiv an der Entwicklung von Bildschirmen gearbeitet, die ihre Bilder mithilfe von OLEDs darstellen. Diese könnte man dann zum Beispiel als flexible Monitore oder sogar elektronisches Papier einsetzen.



Ein biegsamer Bildschirm, entwickelt von SONY. Er verwendet OLEDs, die dünner als ein menschliches Haar sind.

Bild oben mit freundlicher Genehmigung des U.S. Department of Energy's Pacific Northwest National Laboratory  
Bilder unten mit freundlicher Genehmigung von SONY Entertainment

Flüssigkristalle → S. 252

A. Kammoun *Organische Leuchtdioden aus Polymeren und niedermolekularen Verbindungen für großflächige OLED-Anzeigen*  
Cuvillier Verlag 2008





## 9 Geophysik

Wie entstehen Polarlichter? Wie kommt es, dass alle Ozeanböden jünger als 200 Millionen Jahre sind, während die Gesteine der Kontinente ein Alter von bis zu 4 Milliarden Jahren aufweisen können? Und wie kann es sein, dass unsere Erde in manchen Zeitaltern vollkommen eisfrei war?

Erst seit wir die innere Struktur der Erde entschlüsselt haben, ist in den letzten Jahrzehnten eine umfassende Antwort auf solche und weitere Fragen gelungen. Forscher haben dabei entdeckt, dass das Innere unserer Erdkugel dreigeteilt ist, ganz ähnlich wie bei einem Hühnerei: Das Eigelb entspricht dem Erdkern, in dessen glutflüssiger Eisenschmelze das Erdmagnetfeld entsteht. Das Eiweiß entspricht dem Erdmantel, der weitgehend fest und zugleich zähplastisch ist, sodass sich in ihm wie bei einem Gletscher sehr langsame Strömungen entwickeln können, die sich bis zur Erdkruste – die der Eierschale entspricht – auswirken und diese in Bewegung versetzen.

Unsere Erde ist daher – anders als beispielsweise der Mond – ein sehr dynamischer Planet: Ständig entsteht an den Mittelozeanischen Rücken neuer Meeresboden, während an den Tiefseegräben älterer Meeresboden wieder in den Erdmantel absinkt. Die Kontinente werden von dieser Bewegung mitgenommen, reißen auseinander und kollidieren wieder miteinander. Und manchmal kommt es dabei vor, dass die Zufuhr warmer Meeresströmungen zu den Polen behindert wird – eine Grundvoraussetzung für die Entstehung von Eiszeiten, die seit einigen Jahrtausenden wieder einmal erfüllt ist.

# Der innere Aufbau der Erde

## Eine Reise in die Unterwelt

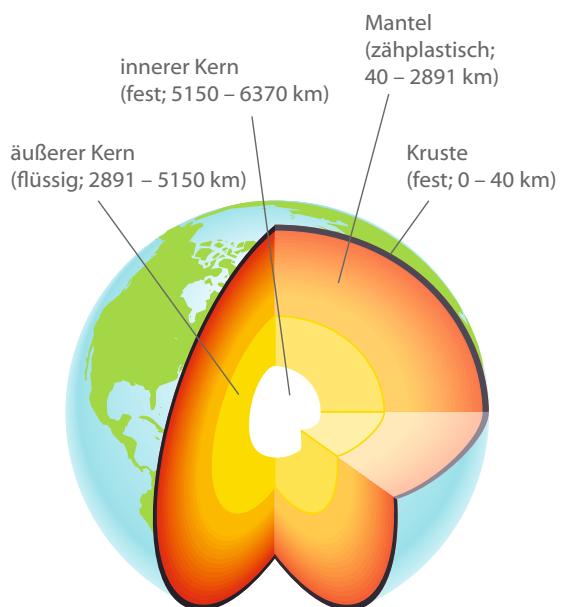
Betrachtet man das Material typischer Meteoriten (so genannte *Chondrite*), so bestehen diese zu rund 20 bis 40 Prozent aus Eisen und anderen Metallen. Auch unsere Erde sollte einen entsprechenden Eisenanteil enthalten, da sie sich zeitgleich mit diesen Meteoriten vor rund 4,6 Milliarden Jahren aus derselben Gas- und Staubscheibe gebildet hat. Die Erdkruste besitzt jedoch nur einen Eisenanteil von knapp fünf Prozent. Zugleich weist die Schwerkraft der Erde darauf hin, dass ihre mittlere Dichte mit rund  $5,5 \text{ g/cm}^3$  fast doppelt so groß sein muss wie die Dichte der Erdkruste, die bei  $2,7$  bis  $3,0 \text{ g/cm}^3$  liegt. Wo also ist das schwere Eisen geblieben, das in den Meteoriten noch so reichhaltig vorhanden ist?

Es muss bei der Bildung der Erde nach unten in Richtung Erdmittelpunkt abgesunken sein, als diese sich noch in einem glutflüssigen Zustand befand. Tatsächlich zeigen Erdbebenwellen, die unsere Erdkugel

durchlaufen, dass es in knapp 2900 Kilometern Tiefe eine Grenzschicht gibt, an der die Dichte sich sprunghaft von rund 5 auf  $10 \text{ g/cm}^3$  erhöht.



Ein fünf Zentimeter hoher Chondrit. Die hell glänzenden Stellen auf der Schnittfläche sind Metallkörper aus einer Eisen-Nickel-Legierung.



Der innere Aufbau der Erde

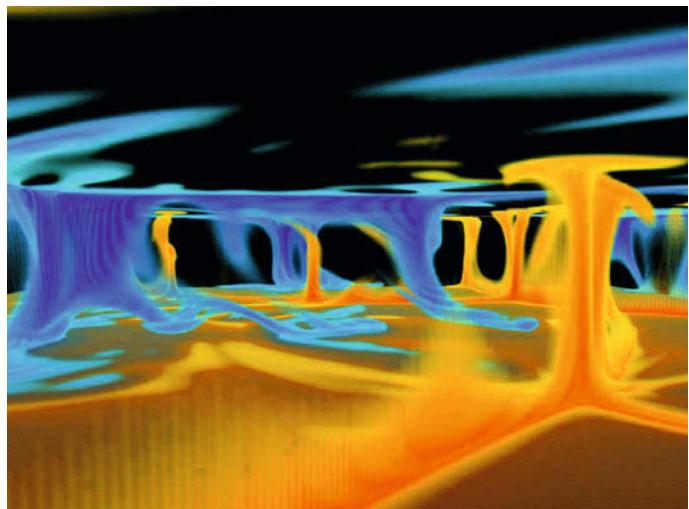
Hier beginnt der sogenannte *Erdkern*, in dem sich das abgesunkene Eisen zusammen mit anderen Metallen (insbesondere Nickel) gesammelt hat. Da seismische Scherwellen nicht in den Erdkern vordringen können, muss das Eisen sich zumindest im äußeren Erdkern in flüssigem Zustand befinden. Man weiß heute, dass im inneren Erdkern in einer Tiefe von 5150 bis 6370 Kilometern der extrem hohe Druck bewirkt, dass die Eisenlegierung dort in fester Form vorliegt.

Während die Erde im Lauf der Jahrtausenden langsam abkühlt, wächst dieser feste innere Erdkern zunehmend an, da immer mehr flüssiges Eisen gleichsam ausfriert.

Oberhalb des Erdkerns liegt in einer Tiefe zwischen einigen 10 und knapp 2900 Kilometern der *Erdmantel*, der aus Silikatgestein besteht. Darüber befindet sich die *Erdkruste*, die im Bereich der Ozeane rund 5 bis 10 Kilometer und im Bereich der Kontinentalplatten 30 bis 50 Kilometer dick ist.

Anders als oft angenommen ist der Erdmantel nicht flüssig, sondern ab einer Tiefe von rund 100 Kilometern (also unterhalb der recht starren sogenannten *Lithosphäre*) zähplastisch, ähnlich wie Gletschereis, das zwar fest ist, aber dennoch langsam zu Tal fließen kann. Daher kann der Erdmantel beispielsweise seismische Scherwellen weiterleiten, was der flüssige äußere Erdkern nicht kann, und sich dennoch im Laufe von Jahrtausenden langsam verformen.

Noch heute ist im Erdinneren ein Teil jener Wärme gespeichert, die bei der Entstehung der Erde dort bereits vorhanden war. Zusätzlich entsteht neue Wärme durch den Zerfall langlebiger radioaktiver Elemente wie Uran und Thorium. Daher nimmt die Temperatur in der Erdkruste alle hundert Tiefenmeter um rund drei Grad zu, sodass es im Inneren tiefer Bergwerke unangenehm warm wird (in einem Kilometer Tiefe herrschen bereits rund 40 °C). An der Kern-Mantel-Grenze erreicht die



Simulation der Konvektion im Erdmantel. Heißes aufsteigendes Mantelmaterial ist orange, kühles absinkendes Material ist blau dargestellt.

Temperatur etwa 3500 °C und im inneren Erdkern rund 5500 °C, so dass sie dort schon vergleichbar mit der Temperatur der Sonnenoberfläche ist. Diese Temperaturdifferenz zur Erdoberfläche treibt im zähplastischen Erdmantel riesige sehr langsame Konvektionsströme an, bei denen heißes Mantelmaterial mit Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Jahr von unten zur Erdoberfläche aufsteigt, dort abkühlt und an anderer Stelle wieder nach unten sinkt. Diese Konvektionsströme sind der Motor der *Kontinentaldrift* (↓). Die Konvektionsströme im flüssigen äußeren Erdkern sind dagegen mit Geschwindigkeiten von einigen Kilometern pro Jahr wesentlich schneller – sie sind die Ursache des Erdmagnetfeldes (↓).



# Die Drift der Kontinente

## Konvektionsströme und Plattentektonik

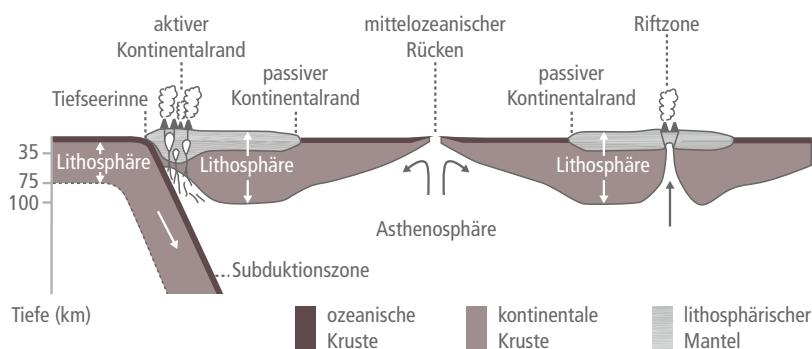
Anders als beispielsweise der Mond oder der Mars ist unsere Erde ein sehr dynamisches System, dessen Oberfläche sich ständig verändert. Die Konvektionsströme des Erdmantels sind stark genug, um die oberste recht starre Schicht (die rund 100 km dicke *Lithosphäre* mitsamt der *Erdkruste*) in plattenartige Bewegung zu versetzen – man spricht auch von *Kontinentaldrift* oder *Plattentektonik*. Neuere geophysikalische Simulationsrechnungen deuten darauf hin, dass sich eine Plattentektonik nur unter sehr speziellen Gleichgewichtsverhältnissen zwischen der äußeren Kruste und dem darunterliegenden Mantel einstellt. Möglicherweise ist sie deshalb bisher nur bei der Erde und nicht bei anderen Planeten gefunden worden.

Bei der Plattentektonik dringt an den mittelozeanischen Rücken ständig heißes Material aus dem zähplastischen Erdmantel nach oben und bildet dort neuen Meeresboden, während an den sogenannten

*Subduktionszonen* (meist Tiefseegräben) dieser Meeresboden wieder in den Erdmantel abtaucht. Daher gibt es nirgends auf der Erde Meeresboden, der älter als rund 200 Millionen Jahre ist.

Die Kontinente sind, anders als die Böden der Ozeane, zu großen Teilen mit bis zu vier Milliarden Jahren zum Teil fast so alt wie die Erde selbst, die sich vor rund 4,6 Milliarden Jahren gebildet hat. Die Schollen der Kontinente bestehen aus silikatreichen Gesteinen (z. B. Graniten), die mit einer Dichte von rund  $2,8 \text{ g/cm}^3$  deutlich leichter sind als die Basalte des Meeresbodens, deren Dichte bei rund  $3,0 \text{ g/cm}^3$  liegt. Daher können die Kontinentschollen nicht in den Erdmantel abtauchen, sondern sie schwimmen wie Eisschollen und werden von dem sie umgebenden Material wie auf einem Förderband mit Geschwindigkeiten von wenigen Zentimetern pro Jahr mitgenommen.

Plattentektonische Zusammenhänge



Umsetzung der konvektiven Mantelbewegung in die plattenartige Bewegung der Oberfläche (Simulation, U. Hansen)

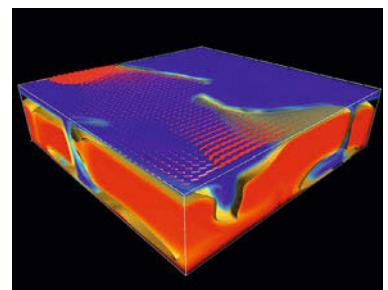
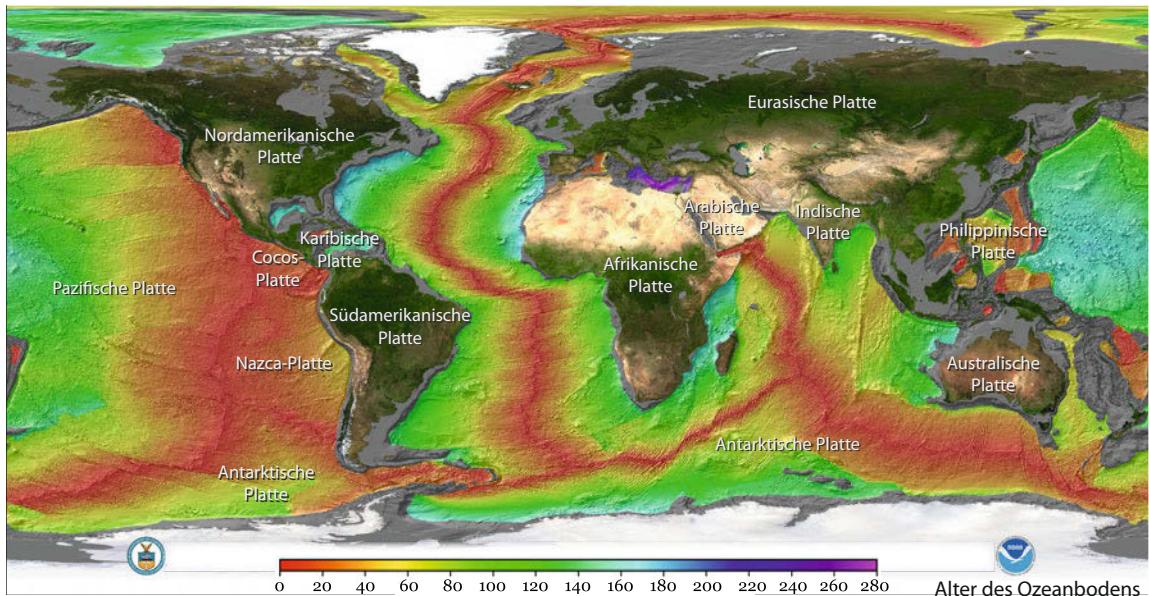


Bild rechts mit freundlicher Genehmigung von Ulrich Hansen, Institut für Geophysik der Universität Münster

Der innere Aufbau der Erde → S. 262

J. Grotzinger, T. H. Jordan, F. Press, R. Siever *Press/Siever - Allgemeine Geologie* Spektrum Akademischer Verlag, 5. Auflage 2008

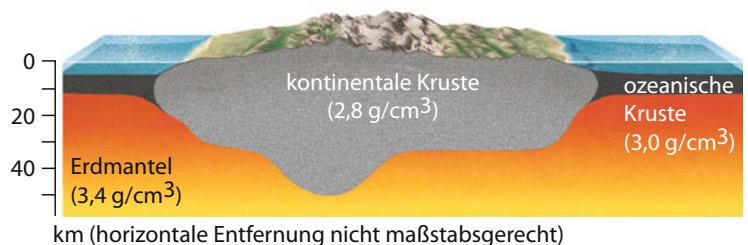


Diese Kontinentaldrift formt die Oberfläche unserer Erde. Etwa alle 500 Millionen Jahre werden die Kontinentschollen zu großen Superkontinenten zusammengeschoben, um anschließend wieder auseinanderzubrechen. In den Kollisionszonen entstehen dabei gewaltige Hochgebirge ähnlich dem heutigen Himalaya, das durch die Kollision der nach Norden driftenden Indischen Platte mit der Eurasischen Platte entstand und das selbst heute noch um mehr als einen Zentimeter pro Jahr emporgehoben wird.

Das letzte Mal existierte ein solcher Superkontinent (Pangäa genannt) vor rund 300 bis 200 Millionen Jahren. Die bei seiner Entstehung aufgefalteten variszischen Gebirgszüge bilden heute die Sockel vieler Mittelgebirge in Europa so-

wie im Osten Nordamerikas. Von ihrer einstigen Größe ist nicht viel übrig geblieben, denn die Erosion hat sie im Lauf der Jahrtausende weitgehend abgetragen und ihr Gesteinsmaterial in Form von mächtigen Sedimentsschichten abgelagert.

Die kontinentale Kruste schwimmt aufgrund ihrer geringeren Dichte auf dem Erdmantel und ragt über die ozeanische Kruste hinaus.



# Erdbeben und seismische Wellen

## Wenn Kontinentalplatten sich verhaken

Die langsamsten Konvektionsströme des Erdmantels verschieben die Platten der Erdkruste mit Geschwindigkeiten von ein bis zehn Zentimetern pro Jahr (Kontinentaldrift ↓). Dieser Prozess läuft nicht immer reibungsfrei ab, da die Platten sich häufig an den Plattengrenzen verkanten und miteinander verhaken, sodass sich enorme Spannungen im Gestein aufbauen können. Irgendwann bricht das Gestein, die Spannung löst sich, und es kommt zu einem Erdbeben.

Der Erdbebenherd (das sogenannte *Hypozentrum*) liegt meist in nur wenigen Kilometern Tiefe, da die Gesteine dort – anders als in tieferen Schichten – noch spröde genug sind, sodass sich Spannungen aufbauen können. Die Stelle an der Erdoberfläche direkt über dem Erdbebenherd bezeichnet man als *Epizentrum*.



An der San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien verschiebt sich die Pazifische Platte jährlich um etwa 6 cm gegenüber der Nordamerikanischen Platte.

Auf der Weltkarte (rechts) sind 358214 Epizentren aus den Jahren 1963 bis 1998 eingezeichnet. Man sieht, wie sich die Erdbeben an den Plattengrenzen konzentrieren.

Die ruckartigen Bewegungen der Gesteine im Erdbebenherd pflanzen sich als seismische Wellen in das umgebende Gestein fort. Am schnellsten breiten sich dabei mit 5 bis 8 km/s die sogenannten *P*-Wellen (Primärwellen) aus, bei denen es sich analog zu Schallwellen um Druckwellen (Kompressionswellen, Longitudinalwellen) handelt. Deutlich langsamer sind mit

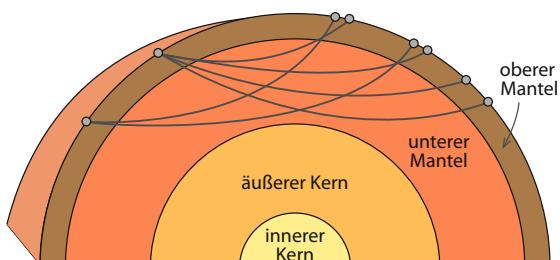
3 bis 4,5 km/s die *S*-Wellen (Sekundärwellen), bei denen die Gesteine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

Zerstörungen in San Francisco durch das Erdbeben von 1906

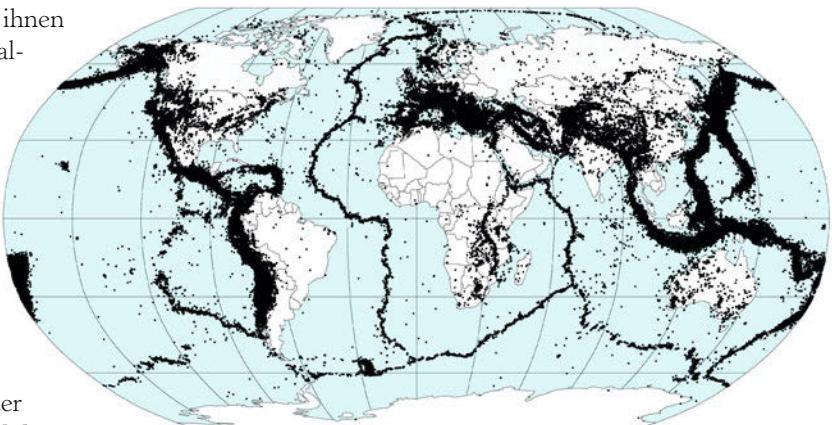
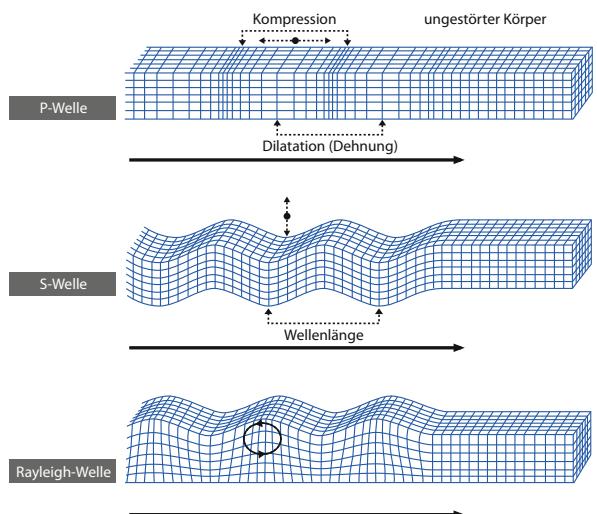


schwingen – es handelt sich bei ihnen also um Scherwellen (Transversalwellen). Am langsamsten sind mit 2 bis 4 km/s **seismische Oberflächenwellen** (beispielsweise die ähnlich wie Meereswellen rollenden Rayleigh-Wellen), die besonders energiereich sind und mit ihren heftigen Bodenbewegungen große Zerstörungen verursachen können.

Seismische Wellen breiten sich quer durch die Erdkugel aus, und ihre Messung verrät viel über das Innenleben unserer Erde. So findet man beispielsweise, dass die transversalen S-Wellen nicht in den Erdkern eindringen können. Da sich Scherwellen nur in festen elastischen Materialien ausbreiten können, schließt man daraus, dass der äußere Erdkern flüssig sein muss. Der Erdmantel ist dagegen im üblichen Sinne weitgehend fest, da S-Wellen ihn durchqueren können. Erst über sehr lange Zeiträume macht sich seine zähplastische Verformbarkeit bemerkbar, die sich besonders in der langsamen Drift der Kontinente zeigt.



Laufwege seismischer Wellen

Vorläufige Bestimmung der Epizentren,  
358214 Ereignisse, 1963 – 1998

Verschiedene Arten seismischer Wellen

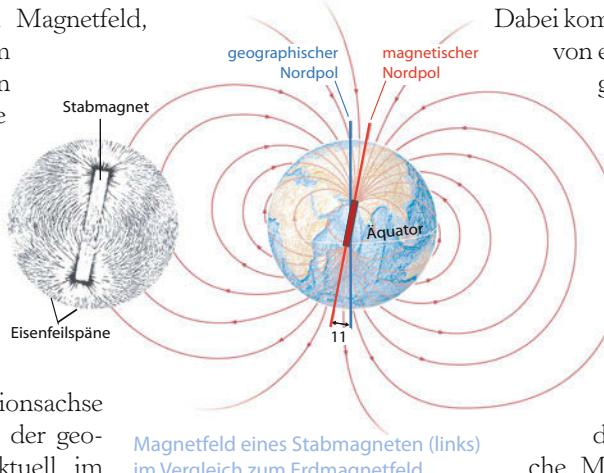


# Der Erdkern als Quelle des Erdmagnetfeldes

## Der innere Geodynamo unserer Erde

Unsere Erde besitzt ein Magnetfeld, das bis in den Weltraum hinausreicht und das man nahe der Erdoberfläche recht genau durch ein sogenanntes *Dipolfeld* beschreiben kann, wie es beispielsweise auch einen Stabmagneten umgibt. Dabei weicht die magnetische Achse um rund elf Grad von der Rotationsachse der Erde ab, sodass sich der geomagnetische Nordpol aktuell im Nordpolarmeer, nahe den Kanadischen Inseln befindet. Er verändert jedoch allmählich seine Position und wandert seit einigen Jahrzehnten um rund dreißig bis vierzig Kilometer jährlich in nordwestliche Richtung.

Das deutet darauf hin, dass der Magnetismus der Erde nicht von einem statischen Magneten erzeugt wird, sondern dynamischen Ursprungs ist. Tatsächlich verliert beispielsweise Eisen oberhalb der *Curie-Temperatur* von  $768\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1041 Kelvin) seine ferromagnetischen ( $\downarrow$ ) Eigenschaften, sodass es im heißen Inneren der Erde keine Dauermagnete aus Eisen geben kann. Das Erdmagnetfeld wird vielmehr dynamisch von Konvektionsströmen der flüssigen Eisenlegierung im äußeren Erdkern in rund 3 000 km Tiefe erzeugt, die durch den Temperaturunterschied zum Erdmantel entstehen.

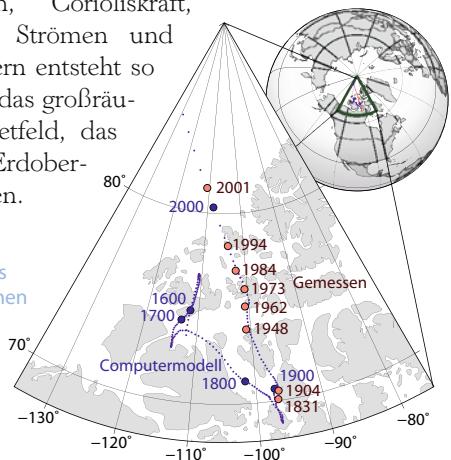


Magnetfeld eines Stabmagneten (links) im Vergleich zum Erdmagnetfeld

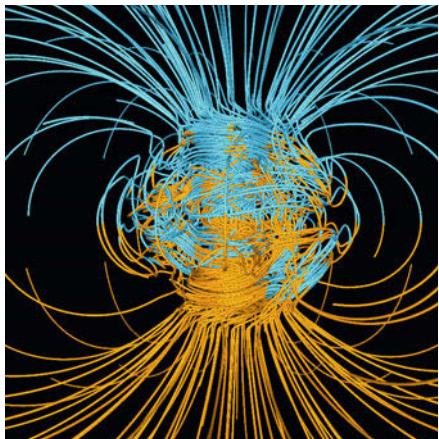
Dabei kommt es zu einem Aufschaukeln von elektrischen Strömen und Magnetfeldern (*Dynamoeffekt*): Wenn ein elektrischer Leiter – hier das flüssige Eisen im Erdkern – sich in einem noch schwachen Magnetfeld bewegt, so entstehen darin elektrische Ströme, die wiederum Magnetfelder hervorrufen und unter bestimmten Bedingungen damit das anfängliche schwache Magnetfeld verstärken können – man spricht vom *Geodynamo*. In

einem komplizierten Wechselspiel zwischen Konvektionsströmen, Corioliskraft, elektrischen Strömen und Magnetfeldern entsteht so im Erdkern das großräumige Magnetfeld, das wir an der Erdoberfläche messen.

Wanderung des geomagnetischen Nordpols.  
Die blauen Punkte zeigen die Ergebnisse eines Computermodells.

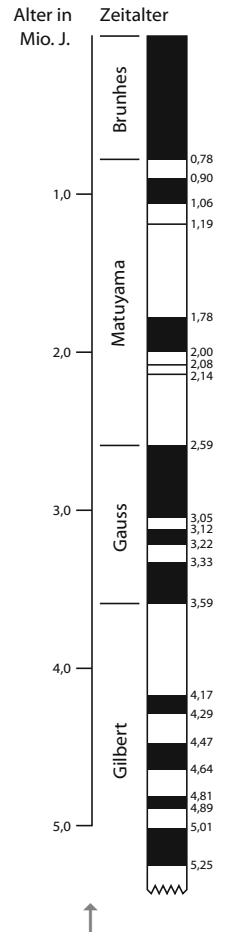
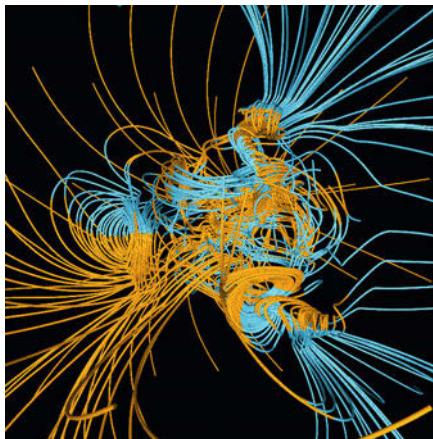


Mittlerweile gelingt es, diese komplexe Dynamik in Computermodellen immer genauer zu simulieren. Dabei zeigt sich, dass das Magnetfeld im Erdkern vermutlich deutlich komplexer ist als im Außenbereich. Außerdem kann es in chaotischen Zwischenphasen von einigen tausend Jahren zu Umpolungen des Magnetfeldes kommen. Die seit dem Jahr 1830 gemessene Abschwächung des Erdmagnetfeldes von rund zehn Prozent könnte ein Hinweis darauf sein, dass die nächste Umpolung womöglich kurz bevorsteht. Während dieser Umpolung wäre das Magnetfeld der Erde stark geschwächt und der Teilchenstrom der Sonne (*Sonnenwind*) könnte die Erde weitgehend ungehindert erreichen. Vermutlich würde die Atmosphäre uns selbst recht gut schützen, doch unsere hochempfindliche Technik (insbesondere Satelliten) wäre wohl stark betroffen.



In der Vergangenheit hat sich das Erdmagnetfeld in unregelmäßigen Abständen im Mittel ungefähr alle 250000 Jahre umgepolt – zuletzt vor etwa 780000 Jahren, sodass die nächste Umpolung eigentlich schon überfällig ist. Dies kann man anhand von Vulkangesteinen nachweisen, die sich zu der jeweiligen Zeit gebildet haben, denn im heißen noch flüssigen Gestein richten sich darin enthaltene magnetische Bestandteile nach dem Erdmagnetfeld aus und dokumentieren damit nach dem Erstarren dessen damalige Ausrichtung. Im Meeresboden des Atlantischen Ozeans konnte man ein entsprechendes Streifenmuster aus abwechselnd magnetisierten Gesteinen nachweisen, die durch die ständige Neubildung von Meeresboden am mittelatlantischen Rücken entstanden sind.

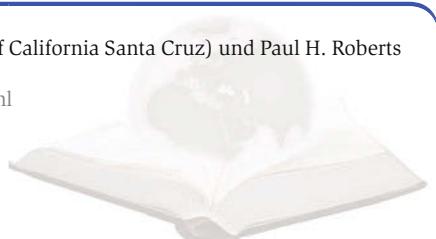
Bilder einer Computersimulation des Geodynamos im Erdkern während einer Normalphase (links) und inmitten einer Umpolungsphase (rechts)



Polarität des Erdmagnetfeldes in den letzten 5 Millionen Jahren. Die schwarz dargestellten Zeiträume entsprechen der heutigen Polarität, die weiß dargestellten der entgegengesetzten Polarität.

Simulationsbilder mit freundlicher Genehmigung von Gary A. Glatzmaier (University of California Santa Cruz) und Paul H. Roberts (University of California Los Angeles)

G. A. Glatzmaier *When North goes South* <http://www.psc.edu/science/glatzmaier.html>

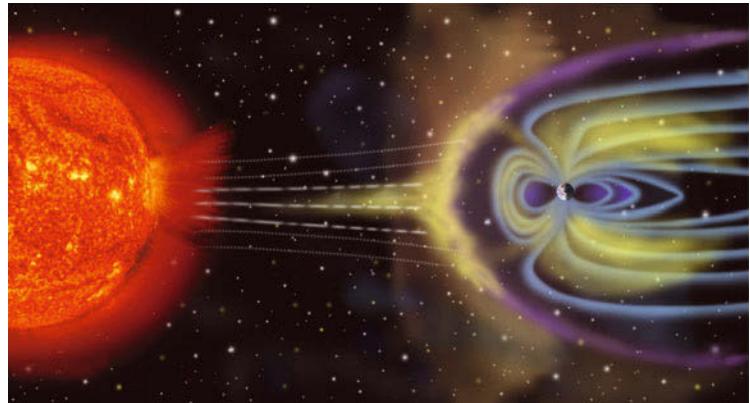


# Erdmagnetfeld und Polarlichter

Wenn der Sonnenwind den Himmel zum Leuchten bringt

Das Erdmagnetfeld, das im Erdkern in rund 3000 Kilometer Tiefe entsteht, reicht bis weit in den Weltraum hinaus. Dabei wird es oberhalb der Erdatmosphäre durch die Wechselwirkung mit dem Plasma des Sonnenwindes deformiert, sodass es zur Sonne hin auf nur etwa zehn Erdradien zusammengestaucht wird, während es auf der sonnenabgewandten Seite zu einem langen Schweif auseinandergezogen wird, der bis zu hundert Erdradien lang sein kann.

Der Sonnenwind besteht im Wesentlichen aus Elektronen und Protonen, die unsere Sonne beispielsweise bei Sonneneruptionen in den Weltraum hinausschleudert und die nach zwei bis vier Tagen mit Geschwindigkeiten von einigen hundert Kilometern pro Sekunde bei der Erde ankommen. Die Teilchen des Sonnenwindes sind damit wesentlich energieärmer als die hochenergetische kosmische Strahlung aus den Tiefen des Weltalls, aber immer noch energiereich genug, um uns bei starker Sonnenaktivität gefährlich werden zu können. Glücklicherweise wird der Sonnenwind durch das Erdmagnetfeld abgelenkt und um die Erde herumgeleitet, denn seine geladenen Teilchen bewegen sich aufgrund der Lorentzkraft ( $\downarrow$ ) in engen Spiralbahnen um die magnetischen Feldlinien herum und werden dadurch gleichsam vom Magnetfeld geführt. In der Nähe der Pole können sie dabei entlang der sich zur Erdoberfläche krümmenden Feldlinien bis in die obere Erdatmosphäre vordringen, wo sie in 100



Das äußere Magnetfeld der Erde (Magnetosphäre, künstlerische Darstellung)

bis 200 Kilometern Höhe von Gasmolekülen gestoppt werden, die wiederum durch die absorbierte Energie zum Leuchten angeregt werden (Fluoreszenz). Dabei können sehr eindrucksvolle Leuchterscheinungen am Himmel entstehen, die als *Polarlichter* bekannt sind.

Auch bei anderen Planeten hat man Polarlichter beobachtet. Das Bild rechts zeigt Polarlicht-Ringe auf dem Planeten Saturn, aufgenommen vom Hubble Space Telescope.





Polarlicht über dem Bear Lake bei dem US-Luftwaffenstützpunkt Eielson in Alaska ...

... über der Amundsen-Scott-Südpolstation in der Antarktis ...

... und von der Internationalen Raumstation aus gesehen



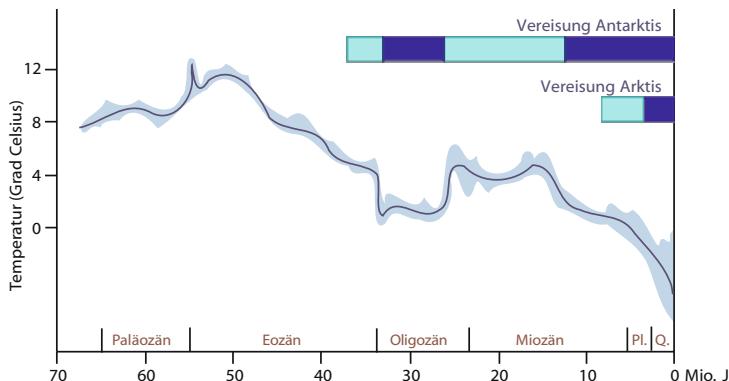
# Eiszeiten und Milankovitch-Zyklen

## Warum gibt es Eiszeiten?

Eiszeitalter sind viele Millionen Jahre lange Perioden, in denen mindestens einer der beiden Pole ganzjährig mit Eis bedeckt ist. Damit ist klar, dass wir uns auch aktuell in einem Eiszeitalter befinden – man nennt es das *Kanäozoische Eiszeitalter*.

Es begann vor rund dreißig Millionen Jahren im mittleren Tertiär mit der Vereisung der Antarktis, nachdem sich die Drake-Straße zwischen Südamerika und der Antarktis so weit geöffnet hatte, dass sich eine kreisförmige Meeresströmung um die Antarktis herum bilden konnte, die sie dadurch von warmen Meeresströmungen abschnitt. Erst mit dem Beginn des Quartärs vor rund 2,6 Millionen Jahren fror dann auch die Arktis ganzjährig zu.

Mittlere Temperaturkurve für die Tiefsee in der Erdneuzeit, wobei formale Temperaturwerte unter null Grad den Vereisungsgrad der Pole repräsentieren und der hellblaue Bereich die kurzfristige Schwankungsbreite der Temperatur angibt.



Temperaturkurve links unten erstellt in Anlehnung an J. Zachos, M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas, K. Billups: Trends, Rhythms and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present Science, 27. April 2001, Vol. 292, S. 686  
J. Baez This Week's Finds (Week 317 und Week 318) <http://math.ucr.edu/home/baez/week317.html> und <http://math.ucr.edu/home/baez/week318.html>

Eiszeitalter sind dennoch die Ausnahme in der Erdgeschichte. Normalerweise sind die Pole eisfrei und der Meeresspiegel liegt ein- bis zweihundert Meter höher als heute, sodass flache, warme Meere große Teile der Kontinente bedecken. Kein Wunder also, dass man in vielen Teilen der Welt auch jenseits der heutigen Ozeane Meeresfossilien finden kann.

Eines der härtesten Eiszeitalter ereignete sich vor rund 750 bis 580 Millionen Jahren. Man vermutet, dass die Erde damals mehrfach komplett oder zumindest zu großen Teilen zufro, und spricht deshalb auch vom *Schneeball Erde*. Die Erde könnte damals zeitweise durchaus gewisse Ähnlichkeiten mit dem Jupitermond Europa aufgewiesen haben, der von einem zugefrorenen Ozean bedeckt ist.

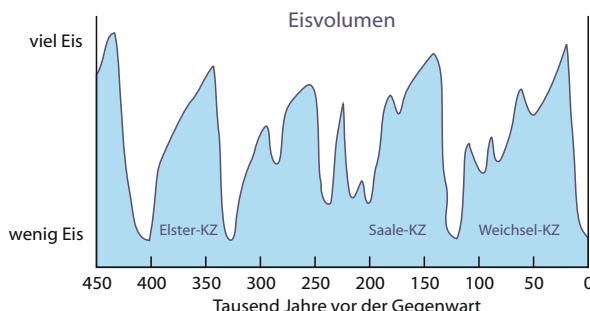
Die Antarktis ist heute von einem Eispanzer bedeckt. Die Pfeile zeigen den antarktischen Zirkumpolarstrom. Die Drake-Straße sieht man links unten im Bild.



Ein nicht ganz so extremes Eiszeitalter ereignete sich im späten Ordovizium und frühen Silur vor rund 460 bis 430 Millionen Jahren. Damals lag die Sahara als Teil des Südkontinents Gondwana in der Nähe des Südpols und war von einem Eispanzer bedeckt. Vor rund 330 bis 270 Millionen Jahren kam es vom mittleren Karbon bis zum mittleren Perm zu einem weiteren Eiszeitalter, bei dem sich im Rhythmus von einigen zehntausend Jahren ständig kältere und wärmere Zeitabschnitte abwechselten (Kalt- und Warmzeiten). In den Kaltzeiten bildeten sich bei niedrigem Meeresspiegel in den Tropen große Sumpfwälder, die in wärmeren Zeiten vom Meer überspült und mit Sedimenten bedeckt wurden. Jedes unserer mitteleuropäischen Steinkohleflöze ist ein solcher verschütteter Tropenwald – Mitteleuropa lag damals am Äquator.

Auch unser aktuelles Eiszeitalter ist von solchen Schwankungen geprägt, bei denen etwa alle einhunderttausend Jahre eine Warmzeit für gut zehntausend Jahre die Kaltzeiten unterbricht. Seit rund 11 000 Jahren leben wir in einer solchen Warmzeit.

Die Schwankungen im Eisvolumen der letzten 450 000 Jahre zeigen den ständigen Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten.



Kreisel mit äußerem Drehmoment → S. 86

R. A. Rohde Global Warming Art <http://www.globalwarmingart.com/>

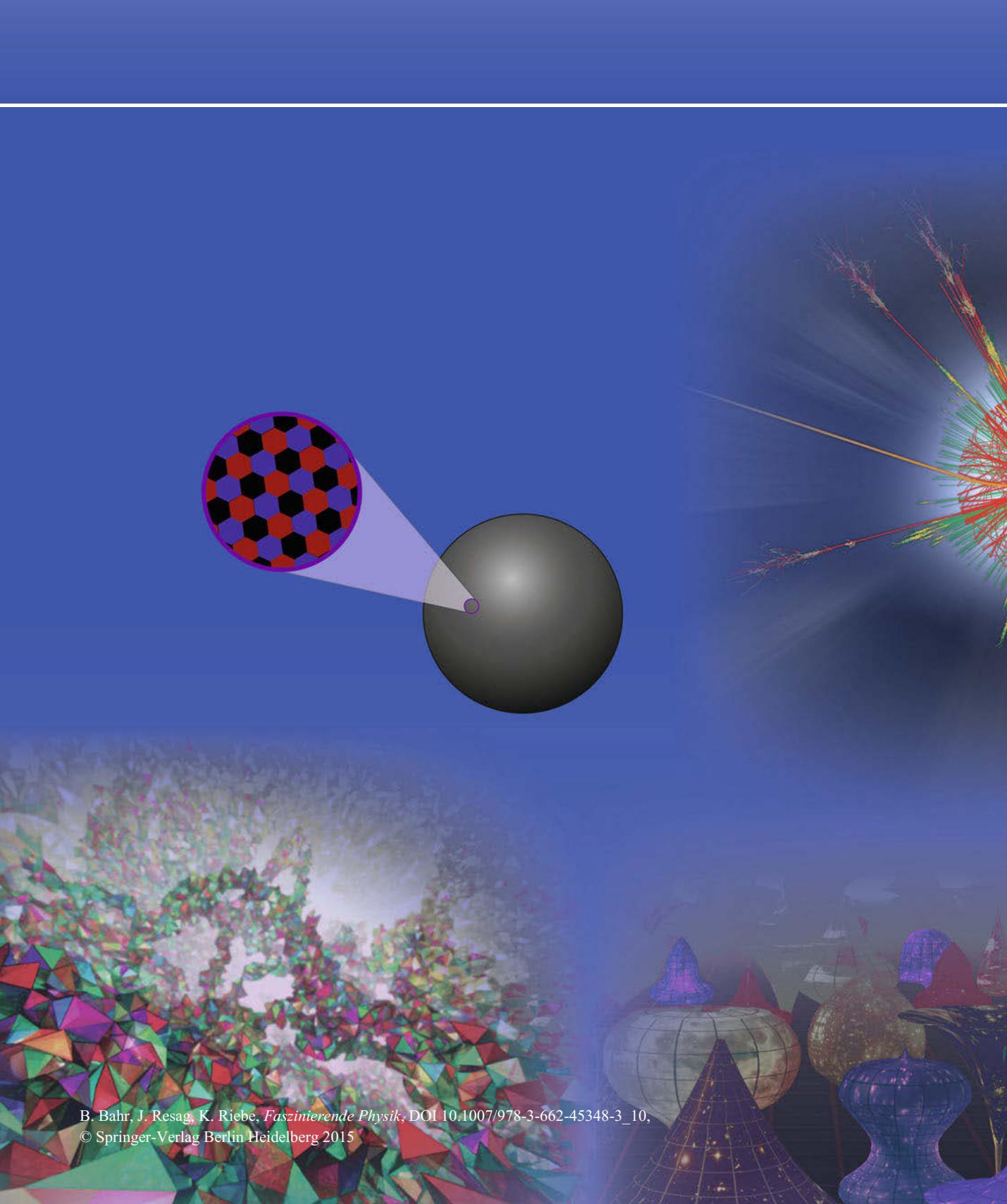
J. Resag Zeitpfad, die Geschichte des Universums und unseres Planeten Springer Spektrum 2012



Die Erde während einer Kaltzeit im Kanäzoischen Eiszeitalter

Eiszeitalter habe ihren Ursprung in einem Zusammenspiel mehrerer Faktoren. Eine wichtige Rolle spielt die Lage der Kontinente und die dadurch möglichen Meeresströmungen, sowie die Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre. Der Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten innerhalb eines Eiszeitalters wird dagegen vermutlich durch die Kombination mehrerer astronomischer Faktoren beeinflusst: Die Exzentrizität der Erdbahn schwankt, und mit ihr die maximale und minimale Entfernung der Erde von der Sonne, die Neigung der Erdachse pendelt zwischen 22,1 und 24,5 Grad und beeinflusst damit die Stärke der Jahreszeiten, und die Präzession der Erdachse ( $\downarrow$ ) lässt diese rotieren und ändert somit die Kopplung zwischen den beiden zuvor genannten Faktoren. Der Einfluss dieser sogenannten *Milankovitch-Zyklen* wird durch Rückkopplungseffekte auf komplizierte Weise verstärkt, sodass sie die Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten während eines Eiszeitalters anstoßen.





# 10 Grenzen des Wissens



Was ist die Stringtheorie, was das holografische Prinzip – und leben wir in einem Multiversum? Wie genau kennen wir heute die Gesetze der Physik? Wissen wir bereits, was die Welt im Innersten zusammenhält?

Die Physik hat in den vergangenen Jahrzehnten und Jahrhunderten große Fortschritte gemacht und viel erreicht. Aber noch immer gibt es keine physikalische Theorie, die alle vier Grundkräfte umfasst und zugleich sowohl die Quantenmechanik als auch die Relativitätstheorie berücksichtigt.

Außerdem wissen wir aus der Kosmologie, dass unser Universum große Mengen dunkler Materie enthalten muss und dass der scheinbare leere Raum eine geheimnisvolle dunkle Energie zu besitzen scheint, die unser Universum beschleunigt expandieren lässt.

Woraus beide bestehen, bleibt jedoch ein Rätsel: Weder dunkle Materie noch dunkle Energie können aus Quarks oder Leptonen bestehen, sodass das Standardmodell hier nichts beitragen kann.

Das Kapitel „Grenzen des Wissens“ stellt die aussichtsreichsten Ansätze vor, um diese Probleme zu lösen und einen Schritt in Richtung einer allumfassenden physikalischen Theorie – oft „Weltformel“ genannt – voranzukommen. Dabei zeigt sich, dass alle diese Ansätze auf eine Welt hinauslaufen, die deutlich umfassender ist als das dreidimensionale Universum, das wir heute kennen. Raum und Zeit erhalten eine körnige, blasenartige Struktur, verborgene Raumdimensionen treten auf und das holografische Prinzip legt nahe, dass unsere Welt eine hologrammatische Struktur aufweisen könnte.

# Supersymmetrie

## Auf der Jagd nach den Superpartnern

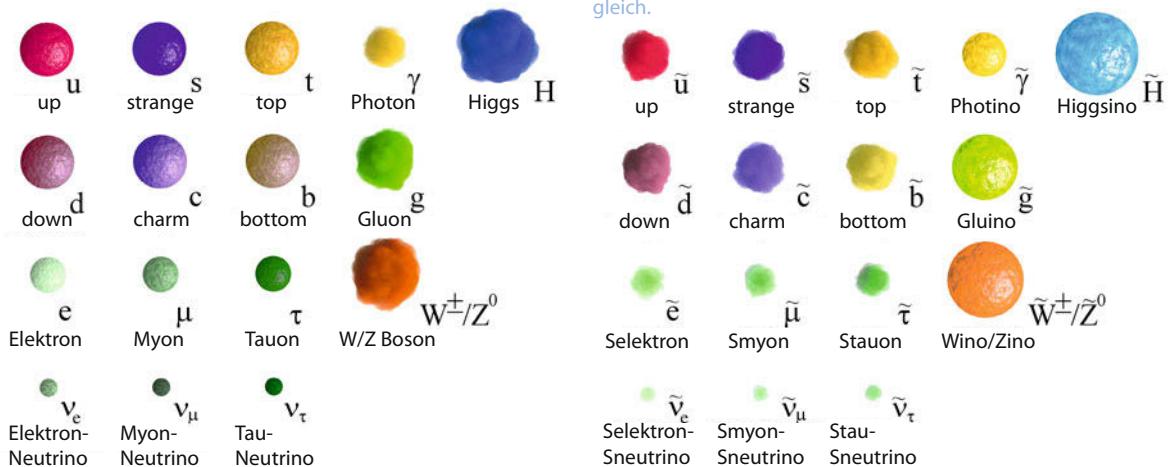
Obwohl das Standardmodell der Teilchenphysik einen Großteil der beobachtbaren Natur erklärt, hat es einige Lücken: Zum Beispiel ermöglicht es eine unrealistisch hohe Masse für das Higgs-Teilchen ( $\downarrow$ ) (das sogenannte *Hierarchieproblem*), und hat keine gute Erklärung für die Zusammensetzung der reichhaltig im Universum vorkommenden dunklen Materie ( $\downarrow$ ).

Um diese Probleme zu überwinden, haben theoretische Physiker eine Symmetrie zwischen den beiden fundamentalen Teilchensorten des Standardmodells, Bosonen und Fermionen, postuliert. Diese sogenannte *Supersymmetrie*, kurz SUSY, verdoppelt die Anzahl der Elementarteilchen: Zu jedem Fermion (d. h. Elementarteilchen mit halbzahligem Spin von  $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ ) gibt es ein neues Boson mit einem ganzzahligen Spin ( $0, 1, 2, \dots$ ) als *Superpartner*. Außerdem existiert

zu jedem Boson des Standardmodells ein dazugehöriges Fermion. Die neu dazukommenden Bosonen werden mit einem vorangestellten „S-“ gekennzeichnet, der Superpartner des Elektrons ist also das „Selektron“. Die supersymmetrischen fermionischen Partner der Bosonen erhalten ein nachgestelltes „-ino“, so gibt es zum Beispiel das „Photino“ oder das „Higgsino“.

Mithilfe der SUSY lösen sich viele der Probleme des Standardmodells automatisch: Die Masse des Higgs-Bosons kann nicht mehr über alle Grenzen wachsen, denn Beiträge höherer Ordnung aus Wechselwirkungen mit Teilchen des Standardmodells heben sich mit den Beiträgen ihrer Superpartner gerade weg.

**Die Elementarteilchen des Standardmodells (links) und ihre Superpartner (rechts): Die Rolle der Bosonen und Fermionen ist vertauscht, alle anderen Eigenschaften (außer der Masse) bleiben gleich.**



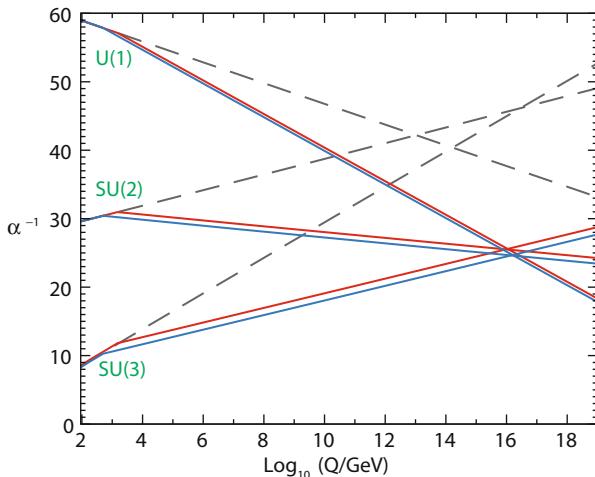
Die Entdeckung des Higgs-Teilchens → S. 238

Dunkle Materie → S. 150

Das Standardmodell der Teilchenphysik → S. 220

Wikipedia *Supersymmetrie* <http://de.wikipedia.org/wiki/Supersymmetrie>

LHC Seite deutscher Teilchenphysiker am LHC <http://www.welmaschine.de/physik/supersymmetrie/>



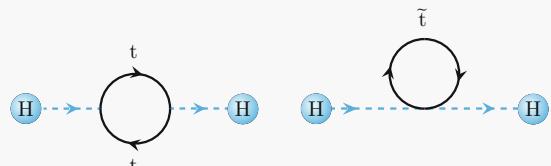
Stärke der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkungen in Abhängigkeit von der Energie. Während sie sich in einer Welt ohne SUSY nicht in einem Punkt treffen (gestrichelte Linien), vereinheitlichen sich die drei Kräfte in einer supersymmetrischen Welt bei ca.  $10^{16}$  GeV (rote/blaue Linien). So erscheinen sie sehr viel natürlicher als verschiedene Aspekte einer einzigen Kraft.

Außerdem vereinheitlichen sich die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung sehr viel natürlicher bei hohen Energien. Weiterhin gäbe es in einer supersymmetrischen Welt gewisse supersymmetrische neutrale Teilchen, sogenannte *Neutralinos*. Die hätten zwar eine hohe Masse, wären aber stabil und würden sonst kaum wechselwirken. Damit wären sie ideale Kandidaten für dunkle Materie.

Schlussendlich ist SUSY unverzichtbar für die Stringtheorie. Es gibt also viele Gründe, aus denen SUSY ein äußerst attraktives theoretisches Konzept ist. Viele Physiker sind daher fest davon überzeugt, dass die Welt in Wirklichkeit supersymmetrisch ist.

### Die Masse des Higgs-Teilchens

Die Masse des Higgs-Teilchens berechnet sich aus den Wechselwirkungen mit den anderen Teilchen. Der Hauptbeitrag kommt dabei durch Feynman-Diagramme (↓), die das top-Quark (das bei Weitem schwerste der Quarks) enthalten (links).



Dessen SUSY Partner, das „top-Squark“, trägt einen ähnlichen Betrag bei, jedoch mit dem entgegengesetzten Vorzeichen (rechts). Damit heben sich die Beiträge (beinahe) auf: In einer Welt mit SUSY darf also das Higgs-Boson eine weitaus geringere (und damit realistischere) Masse haben als in einer Welt ohne.

Leider hat man bis zum Zeitpunkt des Druckes dieses Buches noch nie ein supersymmetrisches Teilchen gesehen. Experimente am Teilchenbeschleuniger LHC suchen explizit nach Zeichen von SUSY, jedoch konnte bis dato nur etabliert werden, dass, wenn es Superpartner gibt, sie eine enorm hohe Masse haben müssten. Außerdem erfordert das „Minimally Coupled Supersymmetric Standard Model“ (kurz MSSM) die Einführung von über 100 neuen Naturkonstanten, was es sehr unnatürlich erscheinen lässt. Einige Physiker beginnen daher bereits an der SUSY zu zweifeln, es wird jedoch noch eine Weile dauern, bis man sie sicher bestätigen oder widerlegen kann.

Bild oben links mit freundlicher Genehmigung von Stephen Martin A Supersymmetry Primer Onlineskript: <http://zippy.physics.niu.edu/spmartin.html>; angepasst von KR

Feynman-Diagramme → S. 222

G. Brumfiel Experimentelle Zweifel an der SUSY

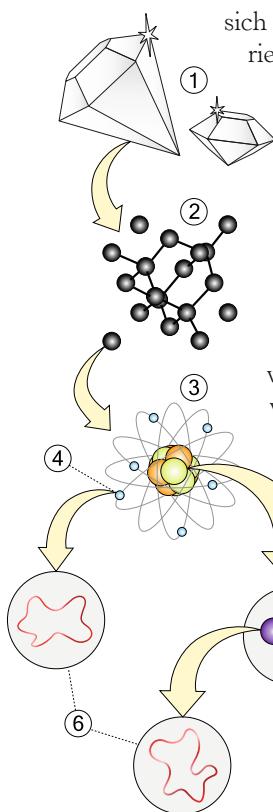
<http://www.spektrum.de/alias/cern/susy-kollidiert-mit-daten-aus-teilchenbeschleuniger/1065420>

# Stringtheorie und M-Theorie

## Auf der Suche nach der Weltformel

Im Standardmodell der Teilchenphysik (↓) gelingt es, auf Basis der Speziellen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik drei der vier bekannten fundamentalen Wechselwirkungen zu beschreiben, nämlich die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung. Die Gravitation will

sich bisher aber noch nicht integrieren lassen: Ihre Verbindung mit der Quantenmechanik führt zu Unendlichkeiten, die ihre Ursache darin haben, dass aufgrund der Unschärferelation für sehr kurze Abstände ständig virtuelle Teilchen entstehen können. Da die Teilchen als punktförmig angenommen werden, entstehen umso mehr virtuelle Teilchen, je kürzer die Abstände sind, sodass bei kleinsten Abständen viele mathematische Ausdrücke divergieren, also unendlich groß werden.

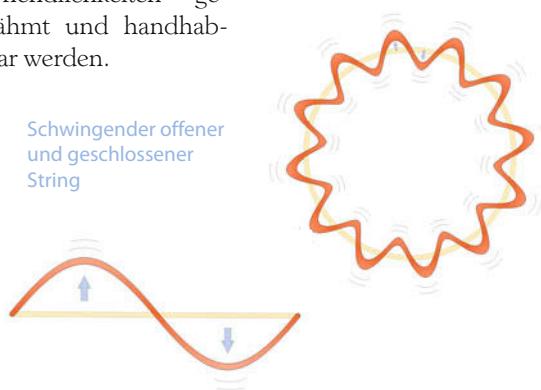


Von Materie (1) über Moleküle (2) und Atome (3) mit Elektronen (4) zu Quarks (5) und Strings (6)

Bei den drei Wechselwirkungen des Standardmodells lässt sich diese Divergenz abfangen und renormieren, nicht aber bei der Gravitation, sodass sich diese nicht in das Standardmodell integrieren lässt. Punktformige Teilchen passen offenbar nicht zu einer Quantentheorie der Gravitation.

Nun müssen Teilchen wie beispielsweise das Elektron oder Photon aber keineswegs punktförmig sein, sondern sie könnten eine sehr kleine Ausdehnung besitzen. Der einfachste Ansatz ist, sie als winzige Fäden (Strings) zu modellieren, die offen sein oder geschlossene Schleifen bilden können.

Während es in Feynman-Diagrammen (↓) mit punktförmigen Teilchen auch punktförmige Vertices gibt, die zu den problematischen Unendlichkeiten führen, gibt es bei Strings solche Vertices nicht mehr, wodurch die Unendlichkeiten geähmt und handhabbar werden.



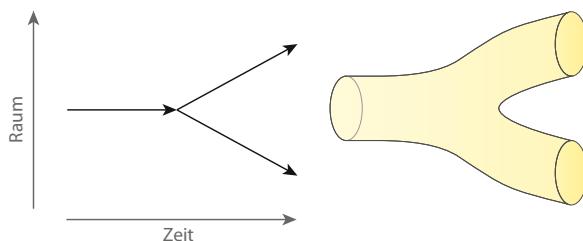
Das Standardmodell der Teilchenphysik → S. 220

Feynman-Diagramme → S. 222

D. Lüst *Quantenfische* C.H. Beck Verlag 2011

E. Witten *Magic, Mystery, and Matrix* Notices of the American Mathematical Society, October 1998, S.1125;

<http://www.sns.ias.edu/~witten/papers/mmm.pdf>

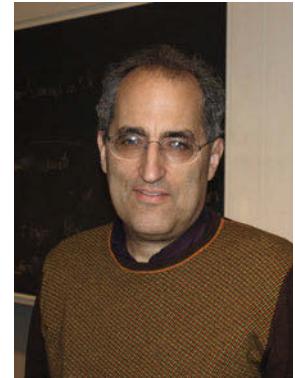


Feynman-Diagramm für Teilchen (links) und String (rechts)

Als man in den 1970er Jahren diese sogenannten *Stringtheorien* näher untersuchte, fand man heraus, dass sie bestimmte geschlossene Strings mit sich bringen, die masselosen Spin-2-Teilchen entsprechen. Für eine Quantentheorie der Gravitation braucht man genau solche Teilchen (die *Gravitonen*), sodass die Stringtheorie automatisch eine konsistente *Quantengravitationstheorie* enthält. Seitdem ist sie immer weiter untersucht und ausgebaut worden und gilt als ein möglicher Kandidat für eine allumfassende Theorie der Physik (Weltformel).

Die Stringtheorie ist jedoch auch oft kritisiert worden: Sie sei noch nicht einmal falsch, da sie keine überprüfbaren Vorhersagen mache. Andererseits kann sie auch eine Reihe wichtiger Erfolge anführen. So ist sie die einzige bekannte konsistente Verallgemeinerung des Standardmodells der Teilchenphysik, die automatisch eine Quantentheorie der Gravitation enthält. Außerdem enthält sie nur einen einzigen physikalischen Parameter: die *Stringspannung*, die sich aus der Gravitationskonstanten ableitet. Im Rahmen der Stringtheorie ist es ferner gelungen, die Entropie schwarzer Löcher korrekt zu berechnen und Verbindungen zum holografischen Prinzip ( $\downarrow$ ) herzustellen – nicht schlecht für eine Theorie, die noch nicht einmal falsch sein soll!

Die Bedingungen, die die Relativitätstheorie und die Quantentheorie der Stringtheorie auferlegen, sind sehr restriktiv. Im Jahr 1995 fand Edward Witten heraus, dass es sehr wahrscheinlich tatsächlich nur eine einzige konsistente Stringtheorie gibt, die alle Bedingungen erfüllt und die er geheimnisvoll *M-Theorie* nannte.



Edward Witten im Jahr 2008 in Göteborg (Schweden)

Bei der M-Theorie handelt es sich noch nicht um eine ausformulierte Theorie, sondern um eine noch weitgehend unerforschte tiefgründige mathematische Struktur, die sich als universelle Verbindung zwischen den bis dahin bekannten verschiedenen Formulierungen (Typ I, Typ IIA und IIB sowie zwei heterotische Varianten) der Stringtheorie abzeichnet. Auch jetzt noch liegt der größte Teil dieser komplexen Struktur wie in einem Nebelmeer verborgen, und nur einige Details konnten bisher sichtbar gemacht werden.



Verborgene Dimensionen → S. 280

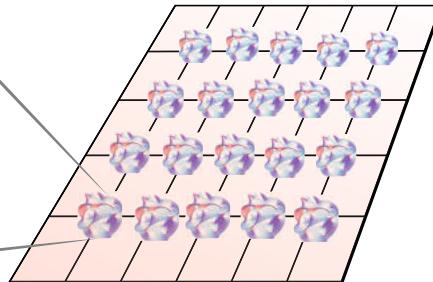
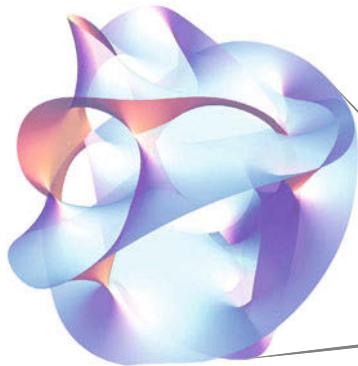
Das holografische Prinzip → S. 288

E. Witten *Reflections on the fate of spacetime Physics Today*, April 1996, S. 24;  
<http://www.sns.ias.edu/~witten/papers/Reflections.pdf>



## Verborgene Dimensionen

Wie viele Dimensionen hat der Raum?

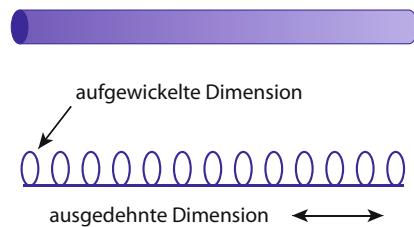


Überzählige Dimensionen sind zu kleinen Raumknäueln aufgewickelt (Calabi-Yau-Räume)

Warum besitzt unsere Welt drei räumliche Dimensionen und nicht zwei oder vier oder noch mehr? Die etablierten physikalischen Theorien, wie beispielsweise das Standardmodell, geben darauf keine definitive Antwort. Sie würden meist auch in einer anderen Anzahl an Raumdimensionen funktionieren. Die einzige Theorie, die zu der Zahl der Raumdimensionen eine klare Aussage macht, ist die *String-* bzw. *M-Theorie* (↓). Sie funktioniert nämlich nur in einer bestimmten Anzahl von Raumdimensionen.

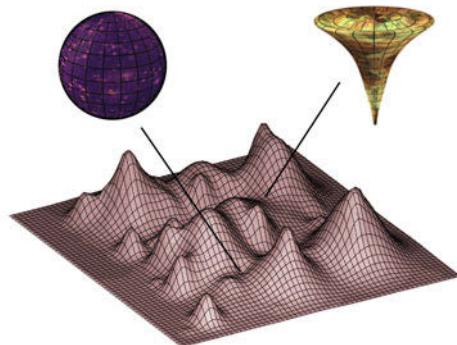
Das Problem ist nur: Diese von der M-Theorie geforderte Anzahl an Raumdimensionen ist nicht drei, oder vier – sondern zehn! Wenn man annimmt, dass die String- bzw. M-Theorie unser Universum beschreibt, in dem wir nur drei Raumdimensionen und eine Zeitdimension beobachten, so müssen die überzähligen Dimensionen irgendwie verborgen sein.

Eine naheliegende Möglichkeit besteht darin, diese Dimensionen sehr eng einzurollen – und so klein zu machen, dass wir sie nicht spüren. Die Oberfläche eines dünnen Strohhalms vermittelt eine gute Vorstellung davon, wie das geht: Von weitem wirkt der Strohhalm wie eine eindimensionale Linie. Erst aus der Nähe sieht man die zweite Dimension seiner Oberfläche, die eng aufgewickelt ist. Man kann sich den Strohhalm daher wie eine gerade Linie vorstellen, bei der an jedem Punkt eine zweite Dimension als Kreis angeheftet ist.



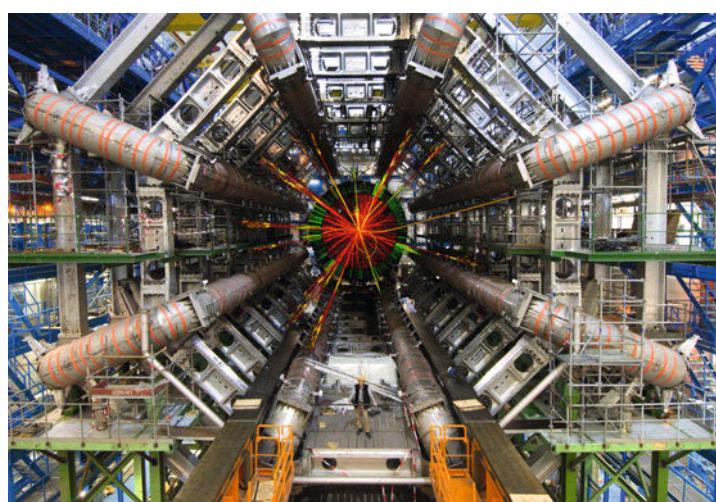
Analog kann man auch an jedem Punkt des dreidimensionalen Raumes die überzähligen Dimensionen zu einem sehr kleinen Raumknäuel aufwickeln – mathematisch werden diese durch sogenannte *Mannigfaltigkeiten* beschrieben, und oft insbesondere durch sogenannte *Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten*, die für die Physiker besser berechenbar sind.

Die aus reiner Energie bestehenden Strings sind klein genug, dass sie auch innerhalb dieses Raumknäuels auf verschiedene Arten schwingen können. Von Weitem sehen diese Stringenschwingungen für uns dann aus wie unterschiedliche Elementarteilchen. Die aufgewickelten verborgenen Raumdimensionen sind nun also durchaus willkommen, denn mit ihrer Hilfe kann man im Prinzip die Physik in den nicht aufgewickelten drei Raumdimensionen modellieren und die Eigenschaften der verschiedenen Elementarteilchen erklären. Dabei hängt diese Physik davon ab, wie die verborgenen Dimensionen im Detail aufgewickelt und ineinander ver-



schlungen sind, wobei es sehr viele (vermutlich rund  $10^{500}$ ) verschiedene Möglichkeiten gibt. Man spricht angesichts dieser gigantischen Vielfalt an Möglichkeiten von der *Landschaft der Stringtheorie*.

Meist geht man davon aus, dass die Ausdehnung des Raumknäuels ungefähr bei einer Plancklänge ( $1,6 \cdot 10^{-35}$  m) liegt. Mit der heute bekannten Physik wäre es jedoch auch verträglich, wenn einige dieser Dimensionen einen Einrollradius bis zu einigen Mikrometern besäßen, wobei nur die Gravitation in der Lage wäre, sich in diese Zusatzdimensionen hinein auszubreiten. In diesem Fall würde die Gravitationskraft zu kleineren Abständen hin stärker als nur quadratisch zunehmen, sodass die Energien am Large Hadron Collider LHC (↓) ausreichen könnten, kurzelebige schwarze Mikrolöcher zu erzeugen und so die Existenz dieser verborgenen Zusatzdimensionen nachzuweisen.

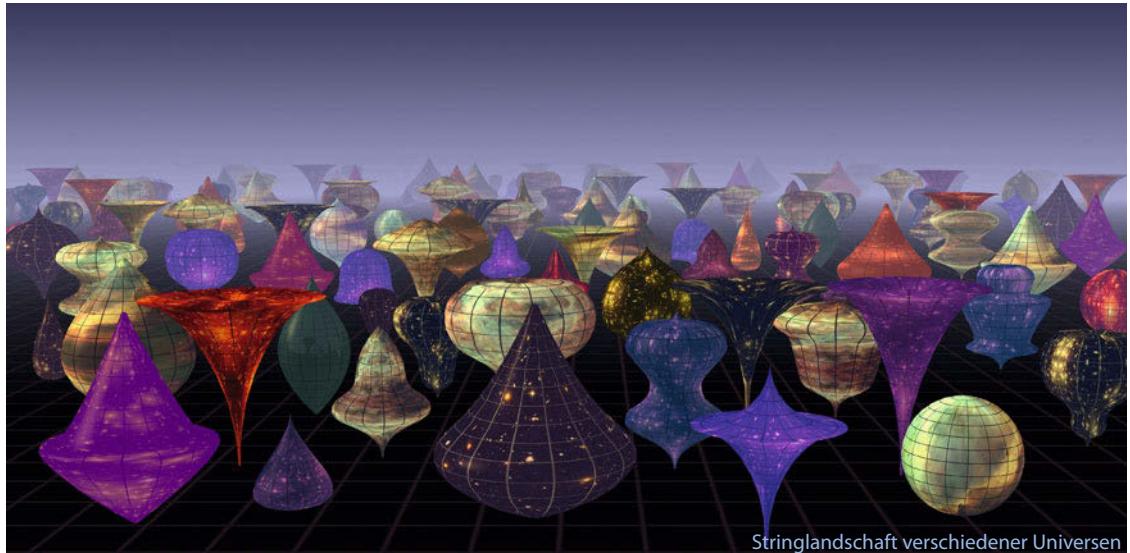


Simuliertes Zerfallsereignis eines schwarzen Mikrolöchs, eingefügt in ein Foto des ATLAS-Detektors am LHC



# Multiversum und anthropisches Prinzip

Hinter dem Horizont geht's weiter

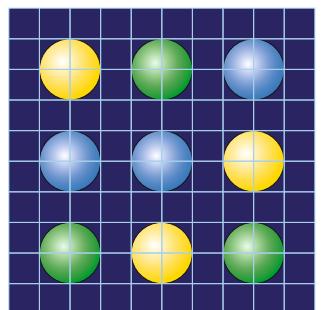


Wenn man sich mit der modernen Physik und Kosmologie beschäftigt, so drängt sich an vielen Stellen der Gedanke auf, dass das für uns sichtbare Universum nur ein kleiner Teil eines viel größeren Gebildes ist, das oft als *Multiversum* bezeichnet wird.

Im einfachsten Fall könnten die einzelnen Universen einfach verschiedene Raumbereiche des Multiversums sein, die so weit voneinander entfernt sind und so schnell expandieren, dass sie seit ihrer Entstehung noch keinen kausalen Kontakt zueinander herstellen konnten. Die anderen Universen lägen also jenseits unseres Horizonts (↓). Denkbar wäre auch, dass verschiedene Universen in unterschiedlichen Zeitaltern

existieren, wobei beispielsweise der Kollaps eines alten Universums in einen Urknall übergeht und damit zur Geburt eines neuen Universums führt (siehe Loop-Quantengravitation ↓ ).

Es wäre sogar vorstellbar, dass sowohl räumlich als auch zeitlich verschiedene Universen existieren. Die Idee der inflationären Expansion (↓) legt beispielsweise nahe, dass das ursprüngliche



Kosmische Horizonte → S. 158

Loop-Quantengravitation → S. 290

Urknall und inflationäre Expansion → S. 154

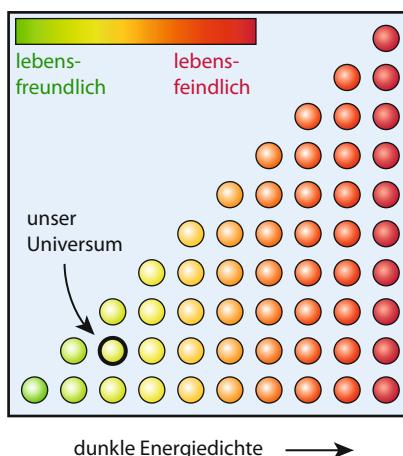
Inflatonfeld nicht nur an einer einzigen Stelle des Multiversums eine riesige expandierende Raumblase wie die unsere geschaffen hat. Es könnten an vielen Stellen in einem *Hyperraum* ständig neue voneinander getrennte Raumblasen (Universen) entstehen und expandieren. Dieses Multiversum wäre wie ein gigantischer löchriger Schweizer Käse, der sich mit enormer Geschwindigkeit ständig weiter ausdehnt, wobei jedes expandierende Loch darin einem eigenen Universum entspricht. Zugleich entstehen in diesem Käseblock an vielen Stellen immer neue Löcher und damit neue Universen.

Nach der Stringtheorie könnten sich nun die physikalischen Gesetze in den verschiedenen Universen in ganz unterschiedlicher Weise manifestieren, was überraschenderweise davon abhängt, in welcher Weise sich die überzähligen Raumdimensionen ( $\downarrow$ ) der Stringtheorie zu winzigen Knäuels einrollen. Berechnungen legen nahe, dass es in dieser Stringlandschaft verschiedener Universen rund  $10^{500}$  verschiedene Einrollmöglichkeiten gibt.

In welchem dieser unzähligen Universen leben nun wir? Offenbar in einem, in dem eine Einrollmöglichkeit und damit eine Physik realisiert ist, die das Entstehen intelligenten Lebens ermöglicht. Wir müssen uns also nicht wundern, dass unser Planet und unsere Welt so perfekt auf Leben abgestimmt ist: Denn wir können natürlich nur in einer der Welten existieren, die unser Leben möglich machen. Diese Sichtweise nennt man *anthropisches Prinzip*.



Das anthropische Prinzip ist beispielsweise in der Lage, den geringen Wert der dunklen Energiedichte in unserem Universum plausibel zu machen. Modellrechnungen legen nahe, dass es sehr viel mehr Universen gibt, in denen die dunkle Energiedichte viel größere Werte aufweist, aber die dadurch hervorgerufene abstoßende Gravitation lässt diese Universen viel zu schnell expandieren, als dass darin Sternensysteme und somit Leben entstehen könnte.



Also ist es am wahrscheinlichsten, dass in einem bewohnten Universum die dunkle Energiedichte zwar nicht Null ist, aber doch so klein, dass sich die beschleunigte Expansion in Grenzen hält. Tatsächlich stellte im Jahr 1987 der Physik-Nobelpreisträger Steven Weinberg auf diese Weise erste Vermutungen über die Existenz und Stärke der dunklen Energie an, die sich zur Überraschung der meisten Physiker rund zehn Jahre später weitgehend bestätigten.

Vorborgene Dimensionen → S. 280

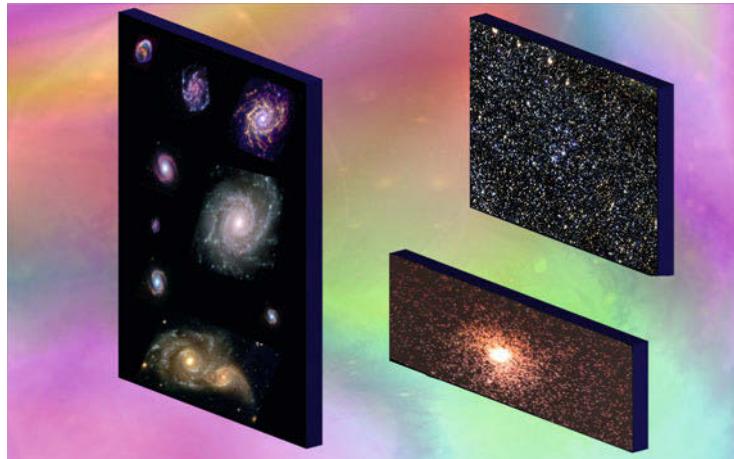
B. Greene *Die verborgene Wirklichkeit: Paralleluniversen und die Gesetze des Kosmos* Siedler Verlag 2012

S. Weinberg *Living in the Multiverse* arXiv:hep-th/0511037v1, <http://arxiv.org/abs/hep-th/0511037>



# Branenwelten

Die Stringtheorie enthält mehr als Strings



Branenwelten

Während im Standardmodell (↓) alle Teilchen (Quarks, Leptonen und Wechselwirkungsteilchen) punktförmige Objekte sind, basiert die Stringtheorie (↓) auf der Annahme, dass die kleinsten Objekte der Welt winzige eindimensionale Objekte sind – Fäden oder *Strings*. Mit dieser Annahme gelingt es ihr, die Probleme bei der quantenmechanischen Beschreibung der Gravitation bis zu einem gewissen Grad in den Griff zu bekommen.

Doch was macht Strings so besonders? Da die Stringtheorie neun Raumdimensionen erfordert, könnte man doch meinen, dass auch mehrdimensionale Objekte darin existieren dürfen: zweidimensionale Flächen, dreidimensionale Objekte und so weiter. Es schien Physikern jedoch zunächst so, als ob sich nur eindi-

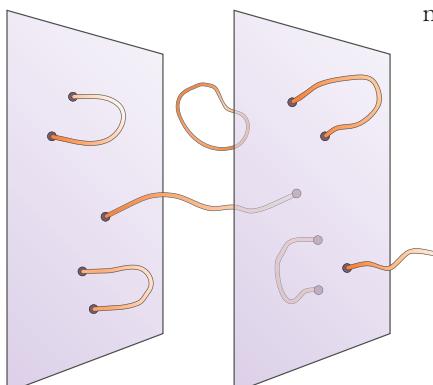
mensionalen Strings eine konsistente Quantentheorie aufbauen ließ, sodass man mehrdimensionale Objekte verwarf.

Im Lauf der 1990er Jahre lernte man, über die bis dahin ausschließlich verwendeten Näherungsverfahren (die sogenannte *Störungstheorie*) hinauszugehen und neue Aspekte der Stringtheorie zu erfassen, die sich mit gewöhnlichen Näherungsverfahren nicht analysieren lassen. Dabei erkannte man, dass die einst festgestellten Inkonsistenzen bei mehrdimensionalen Objekten ein Artefakt der Näherungsmethoden waren, und dass mehrdimensionale Objekte nicht unmöglich – sondern sogar unverzichtbare Bestandteile der Stringtheorie sind. In Analogie zu dem Wort „Membran“ bezeichnete man diese als *Branen*.

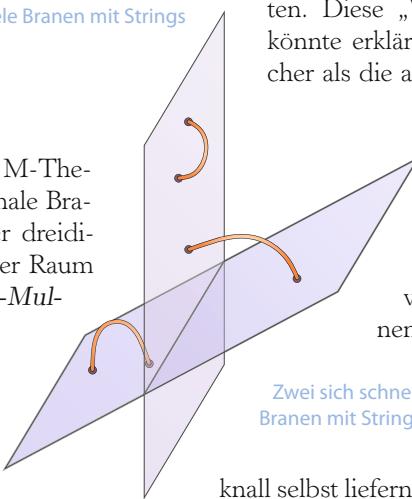
Die neuen mathematischen Methoden enthielten zudem eine Vielzahl von Zusammenhängen (*Dualitäten*) zwischen den bis dahin bekannten unterschiedlichen Stringtheorien, die sich nun als verschiedene Grenzfälle einer einzigen umfassenden Stringtheorie verstehen ließen: der M-Theorie (wobei das *M* für das Wort „Membran“ stehen könnte). Die M-Theorie enthält eine zehnte Raumdimension, die genau demjenigen Parameter (der Stringkopplung) entspricht, der bei den Näherungsmethoden sehr kleine Werte annehmen muss, sodass die darauf basierenden Stringtheorien diese Raumdimension nicht erfassen können.

In diesem zehndimensionalen Raum der M-Theorie können nun viele große dreidimensionale Branen enthalten sein, von denen eine unser dreidimensionales Universum bilden könnte. Der Raum der M-Theorie wäre dann eine Art *Branen-Multiversum*.

Wenn es jedoch neben unserer eigenen Brane noch weitere Branen gibt, warum sehen wir diese dann nicht? Der Grund dafür liegt darin, dass alle Teilchen des Standardmodells offenen Strings entsprechen, deren Enden fest mit einer Brane verbunden sein müssen. Diese Strings können ihre ange stammte Brane nicht verlassen.



Parallele Branen mit Strings



Zwei sich schneidende Branen mit Strings

Wenn unser Universum eine dreidimensionale Brane ist, so sind alle Atome und jeder Lichtstrahl darin eingesperrt, so als ob es die anderen Raumdimensionen nicht gäbe (dies ist neben dem engen Einrollen eine weitere Möglichkeit, die Unsichtbarkeit dieser zusätzlichen Raumdimensionen zu erklären; siehe auch Verborgene Dimensionen ↓).

Eine Ausnahme gibt es allerdings: die Gravitation! Da Gravitonen geschlossenen Stringschleifen entsprechen, können sie die Branen verlassen und sich in die anderen Raumdimensionen ausbreiten. Diese „Verdünnung“ der Gravitation könnte erklären, warum sie so viel schwächer als die anderen Wechselwirkungen ist.

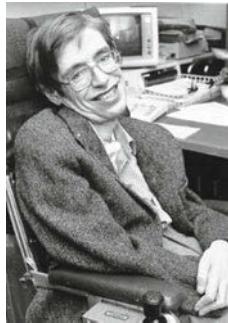
Am Large Hadron Collider (LHC) sucht man intensiv nach solchen aus unserem Universum verschwindenden Gravitonen, die die Existenz der für uns verborgenen Raumdimensionen enthüllen könnten.

Branen könnten sogar eine Erklärung für den Urknall selbst liefern: Wenn zwei Branen im höherdimensionalen Hyperraum kurzzeitig miteinander kollidieren, so wirkt sich diese Kollisionen auf die Branen nämlich nach Modellrechnungen wie der Urknall aus – ein wirklich faszinierender Gedanke.



# Entropie und Temperatur schwarzer Löcher

## Schwarze Löcher sind nicht vollkommen schwarz



Stephen Hawking

Entdecker Stephen Hawking auch *Hawking-Strahlung* genannt wird. Experimentell nachweisen konnte man diese sehr schwache Strahlung allerdings noch nicht.

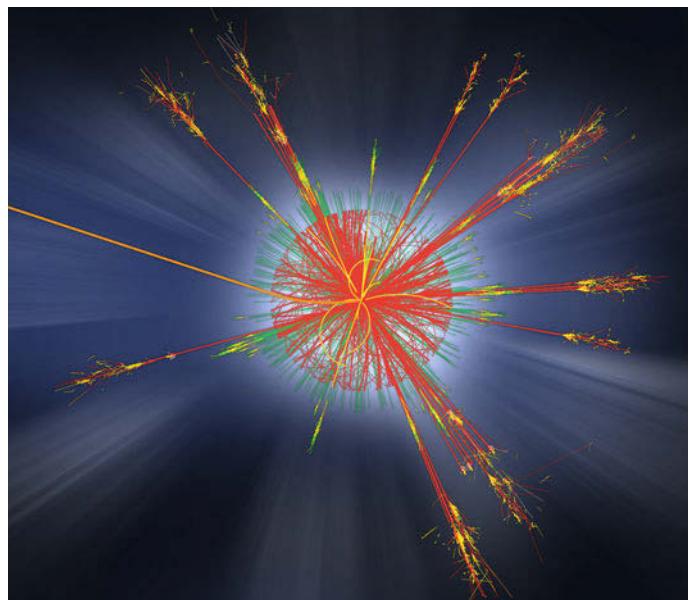
Wenn die Temperatur eines schwarzen Lochs größer als die Temperatur seiner Umgebung ist, so zerstrahlt es sehr langsam. Ein schwarzes Loch mit einer Sonnenmasse hat beispielsweise eine Temperatur von etwa  $6 \cdot 10^{-8}$  Kelvin, ist also sehr viel kälter als die kosmische Hintergrundstrahlung (2,7 Kelvin) und kann demnach im heutigen Universum noch nicht zerstrahlen. Da das Universum jedoch aufgrund

Simulierter Zerfall eines schwarzen Mikrolochs, wie er sich im ATLAS-Detektor am Large Hadron Collider LHC (CERN) darstellen könnte

Eigentlich sollten schwarze Löcher absolut schwarz sein, da nichts ihrem starken Gravitationsfeld entkommen kann – auch Licht oder Wärmestrahlung nicht. Dennoch ist man sich heute sicher, dass schwarze Löcher eine (meist sehr geringe) Eigentemperatur haben müssen, also eine schwache Wärmestrahlung aussenden, die nach ihrem theoretischen

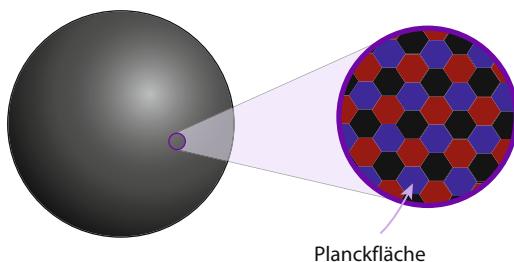
seiner Expansion ständig abköhlt, wird irgendwann die Temperatur des schwarzen Lochs unterschritten. Dann liegt die Lebensdauer eines schwarzen Lochs von einer Sonnenmasse bei rund  $10^{66}$  Jahren – eine unvorstellbar lange Zeit!

Kleine schwarze Löcher sind allgemein heißer als große, denn ihre Temperatur wächst umgekehrt proportional zu ihrer Masse. Sollte es am Large Hadron Collider LHC (↓) tatsächlich gelingen, schwarze Mikrolöcher zu erzeugen, so wären diese so heiß, dass sie ähnlich wie sehr instabile Teilchen bereits Sekundenbruchteile nach ihrer Entstehung wieder zerstrahlen.



Man kann sich die Entstehung der Wärmestrahlung schwarzer Löcher so vorstellen: Im leeren Raum entstehen aufgrund der quantenmechanischen Unschärferelation ständig sogenannte virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare, die sich nach sehr kurzer Zeit wieder gegenseitig vernichten. Am Schwarzschild-Radius (Horizont) eines schwarzen Lochs kann jedoch ein Partner eines dort entstehenden virtuellen Teilchenpaares in das schwarze Loch fallen und den anderen Partner somit freisetzen. Solche freien Partner verlassen als Strahlung den Horizont.

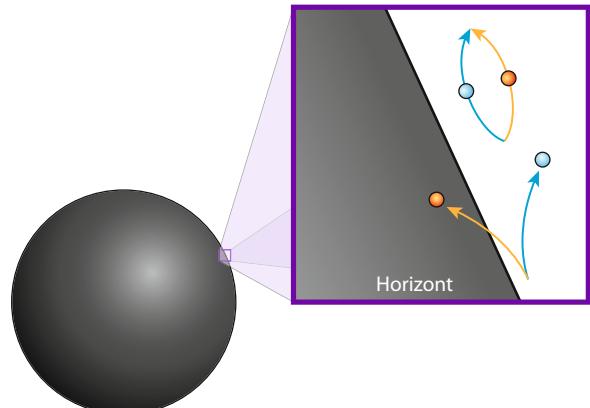
Wenn schwarze Löcher eine Temperatur haben, so müssen sie auch eine Entropie ( $\downarrow$ ) besitzen. Die Entropie gibt dabei logarithmisch die Zahl der Quantenzustände an, die ein schwarzes Loch in seinem Inneren besitzen kann, ohne dass wir sie von außen unterscheiden können. Bei einem schwarzen Loch ist die Entropie  $S$  proportional zur Zahl der Planckflächen  $I_p^2$ , die auf die Kugeloberfläche  $A$  beim Schwarzschild-Radius um das schwarze Loch herum Platz finden:



Die Anzahl der Planckflächen auf der Kugeloberfläche am Schwarzschild-Radius ist ein Maß für die Entropie.

Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik → S. 118  
Quantenvakuum → S. 206

A. Müller *Schwarze Löcher, Die dunklen Fallen der Raumzeit* Spektrum Akademischer Verlag 2010,  
siehe auch [http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/astro\\_sl\\_hawk.html](http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/astro_sl_hawk.html)

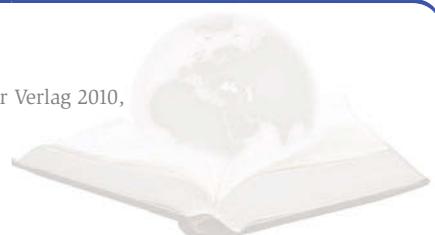


Entstehung realer Teilchen aus virtuellen Teilchen am Rande eines schwarzen Lochs

$$S = k_B / 4 \cdot A / I_p^2$$

Dabei ist  $k_B$  die Boltzmannkonstante und  $I_p = 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$  ist die winzige Plancklänge.

Diese Formel ist die beste Verbindung zwischen Gravitation und Quantenmechanik, die wir heute haben. Sie ist sehr ungewöhnlich, da normalerweise die Entropie eines Objekts proportional zu seinem Volumen und nicht zu seiner Oberfläche  $A$  anwächst. Da die Plankfläche absolut winzig ist, ist die Entropie eines schwarzen Lochs riesig. Sie ist die Obergrenze für die Entropie und damit für die Zahl der Quantenzustände, die ein Raumvolumen mit der Oberfläche  $A$  überhaupt aufnehmen kann – mehr geht nicht!

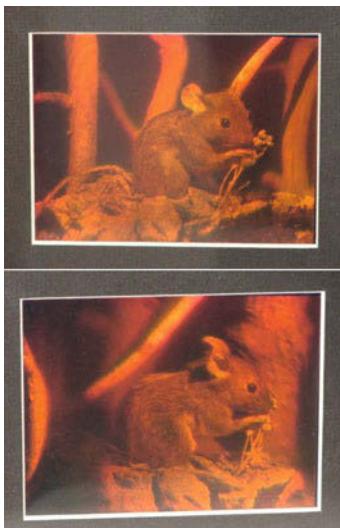


# Das holografische Prinzip

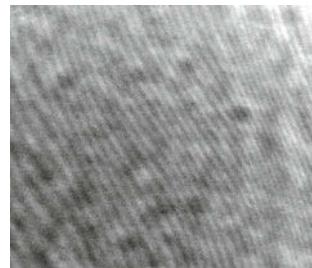
Ist unsere Welt ein Hologramm?

Ein *Hologramm* kann auf einem zweidimensionalen fotografischen Film die Information über ein dreidimensionales Objekt speichern, indem es die Wellennatur des Lichtes ausnutzt. Auf dem Film befindet sich dabei kein einfaches Abbild des Objektes, sondern ein kompliziertes Interferenzmuster feiner Linien und Flecken, die in ihrer Gesamtheit die Information über jeden lichtaussendenden Punkt des Objektes speichern.

Lässt man Laserlicht durch diesen Film leuchten, so bildet sich durch Beugung dasselbe Lichtwellenfeld, wie es auch das Objekt aussendet. Der Film sieht dann aus wie ein Fenster, hinter dem sich das dreidimensionale Objekt befindet, wobei man sogar den Blickwinkel auf das Objekt verändern kann.



Ein Hologramm aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet



Nahaufnahme eines Hologramms

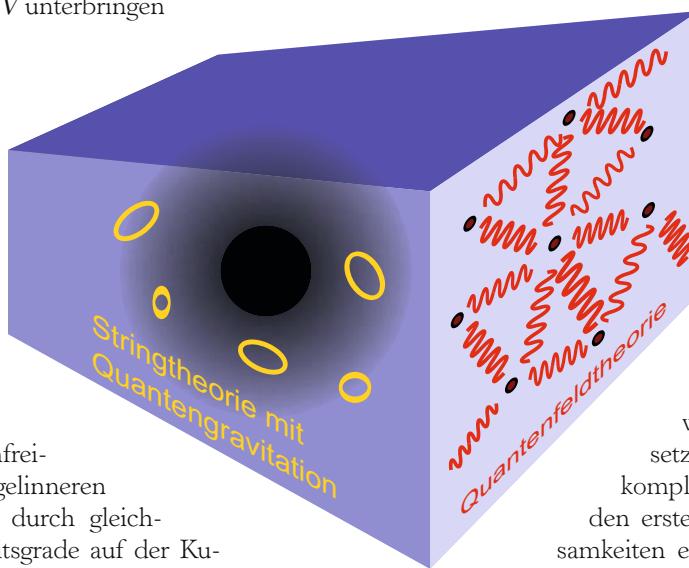
Ein Hologramm zeigt, dass etwas Dreidimensionales (das Objekt) auf etwas Zweidimensionalem (dem Film) repräsentiert werden kann. Es gibt viele Hinweise darauf, dass ein ähnliches *holografisches Prinzip* eine zentrale Säule bei der Suche nach einer fundamentalen physikalischen Theorie aller Naturkräfte ist, die insbesondere eine Quantentheorie der Gravitation umfasst.

Ein solcher Hinweis ist die Entropie schwarzer Löcher ( $\downarrow$ ). Dabei zählt die Entropie  $S$  logarithmisch die Zahl  $\Omega$  der Quantenzustände, die ein schwarzes Loch umfasst und die man von außen makroskopisch nicht unterscheiden kann, dabei gilt:  $S \sim \ln \Omega$ . Die Zahl der Quantenzustände wächst wiederum ungefähr exponentiell mit der Zahl  $F$  der Freiheitsgrade (beispielsweise Teilchen), die ein physikalisches System besitzt:  $\Omega \sim e^F$ . Da sich der natürliche Logarithmus und die Exponentialfunktion gerade kompensieren, wächst die Entropie  $S$  ungefähr proportional mit der Zahl der Freiheitsgrade eines Systems an:  $S \sim F$ .

Normalerweise ist die Zahl der Freiheitsgrade und damit die Entropie proportional zum Volumen eines Systems. Zwei Liter Wasser haben doppelt so viel Entropie wie ein Liter Wasser derselben Temperatur. Bei schwarzen Löchern ist das jedoch anders, denn bei ihnen wächst die Entropie proportional zur Kugeloberfläche  $A$  des Ereignishorizonts an, also nicht proportional zum Kugelvolumen  $V$  darin ( $\downarrow$ ). Zugleich bilden schwarze Löcher die Materieform mit der größten Entropie und damit mit den meisten Freiheitsgraden, die sich im Kugelvolumen  $V$  unterbringen lassen.

Die Entropie schwarzer Löcher legt nahe, dass man sämtliche Quantenfreiheitsgrade aus dem Kugellinneren des schwarzen Lochs durch gleichwertige Quantenfreiheitsgrade auf der Kugeloberfläche des Ereignishorizonts darstellen kann, sodass wie bei einem Hologramm sich die Physik des Kugellinneren auf dessen Oberfläche abbilden lässt. Doch gilt dieses holografische Prinzip nur bei schwarzen Löchern?

Im Jahr 1997 fand der Physiker Juan Maldacena mit der sogenannten *AdS/CFT-Korrespondenz* erstmals ein konkretes Beispiel, bei dem eine Stringtheorie, die ja automatisch die Quantengravitation enthält, in einem bestimmten berandeten Raum eins-zu-eins einer Quantenfeldtheorie ohne Gravitation auf dem Rand dieses Raumes entspricht, wie man sie in ähnlicher Form von der Quantenchromodynamik (QCD), also der Theorie der starken Wechselwirkung, her kennt.



Die beiden mathematischen Beschreibungen sind dabei physikalisch vollkommen gleichwertig, wobei die Übersetzung zwischen ihnen so kompliziert ist, dass man auf den ersten Blick kaum Gemeinsamkeiten erkennt, ähnlich wie bei einem echten Hologramm. Beispielsweise entspricht ein schwarzes Loch im Rauminneren einem heißen Teilchengemisch auf dessen Rand, wobei beide genau dieselbe Entropie besitzen.

B. Greene *Die verborgene Wirklichkeit: Paralleluniversen und die Gesetze des Kosmos* Siedler Verlag 2012

J. Maldacena *Schwerkraft – eine Illusion?* Spektrum der Wissenschaft, März 2006, S. 36

J. D. Bekenstein *Das holografische Universum* Spektrum der Wissenschaft, November 2003, S. 32



# Loop-Quantengravitation

## Quanten der Raumzeit

Die Schwerkraft, oder Gravitation, ist in vielerlei Hinsicht die komplizierteste und merkwürdigste der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Die drei anderen Fundamentalkräfte – die elektromagnetische Kraft, die schwache und die starke Kernkraft – beschreiben die gegenseitige Beeinflussung von Teilchen, die sich durch die Raumzeit bewegen. Hingegen entsteht, laut der Allgemeinen Relativitätstheorie, Schwerkraft dadurch, dass Teilchen mit der Raumzeit selbst wechselwirken, indem sie ihre Geometrie verzerrn. Anschaulich gesprochen ist Gravitation nicht nur ein Resultat des Wechselspiels der Schauspieler untereinander, sondern wird vor allem durch die Interaktion der Schauspieler mit der Bühne selbst verursacht, die sich ständig verändert.

Dieser Sachverhalt hat es ungleich schwerer gemacht, die Theorie der Schwerkraft mit den Prinzipien der Quantentheorie zu vereinen, als dies für die anderen drei fundamentalen Wechselwirkungen der Fall war.

Erst Ende des 20. Jahrhunderts wurde ein Ansatz für eine Quantentheorie der Geometrie der Raumzeit gefunden, der nicht auf Hilfsmittel wie aufgerollte Extradrädimensionen wie in der Stringtheorie ( $\downarrow$ ) oder Supersymmetrie ( $\downarrow$ ) zurückgreifen muss.

Dieser Ansatz, mit dem umständlichen Namen *Loop Quantum Gravity* (LQG, auf Deutsch *Schleifenquantengravitation*), obwohl noch nicht bis zum Ende ausgearbeitet, hat bereits zu erstaunlichen und ermutigenden Resultaten geführt.

Sind die Vorhersagen der LQG korrekt, dann gibt es einen kleinsten nicht verschwindenden Abstand zwischen zwei Punkten im Raum. Näher als diesen (ungefähr eine *Plancklänge*, also  $10^{-35}$  m) können sich zwei Teilchen nicht kommen, ohne sich am selben Ort zu



Künstlerische Darstellung einer Quantenraumzeit auf mikroskopischer Skala. Die Tetraeder sind Quanten des Raumes selbst, die Farben kodieren geometrische Eigenschaften, wie den Flächeninhalt.

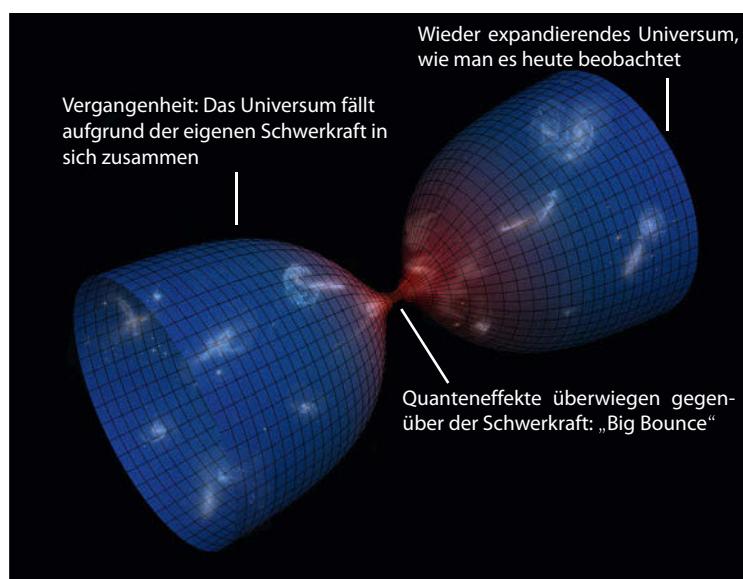
befinden. So wie Materie uns auf makroskopischen Abständen als Kontinuum erscheint, wenn man genauer hinschaut aber in Wahrheit aus einzelnen Atomen besteht, so wäre der Raum selbst nicht kontinuierlich, sondern gequantelt.

Dieser Gedanke hat weitreichende Konsequenzen für unser Verständnis von Raum und Zeit. Vor allem aber löst er konzeptionelle Probleme auf, die sowohl die Quantentheorie als auch die Allgemeine Relativitätstheorie plagen. Das prominenteste Beispiel für eine solche Problemlösung ist die Idee des *Urknalls* (↓): Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt vorher, dass das gesamte beobachtbare Universum vor rund 14 Milliarden Jahren in einem Punkt unendlich hoher Dichte konzen-

triert war. Sie ist aber prinzipiell nicht in der Lage eine Aussage darüber zu treffen, was davor gewesen sein mag. Gibt es jedoch, wie von der LQG vorhergesagt, einen kleinstmöglichen Abstand, dann kann Materie nicht unendlich dicht zusammengepresst werden. Die mathematischen Unendlichkeiten verschwinden also aus den Gleichungen, und man kann tatsächlich versuchen zu berechnen, was sich vor dem Urknall befand.

In der Tat zeigen erste Simulationen (die unter vereinfachten Annahmen gemacht wurden), dass ein unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft in sich zusammenfallendes Universum *nicht* auf einen unendlich kleinen Punkt schrumpft. Stattdessen geht es kurz vor dem finalen Kollaps durch eine Phase extrem hoher (aber nicht unendlicher) Dichte, nur um sich dann wieder explosionsartig auszudehnen, so wie es unser Universum heute tut. Anstatt eines Urknalls könnte es also einen *Urprall* geben haben, der ein kollabierendes und ein expandierendes Universum miteinander verbindet.

Forscher hoffen, dass die Mission des Planck-Satelliten experimentelle Beweise für die theoretischen Vorhersagen der LQG finden wird. Dies könnte unter anderem gelingen, indem man winzige Laufzeitunterschiede in kosmischer Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge nachweist, die uns von Gamma Ray Bursts erreicht, und die von der LQG vorhergesagt werden.



Laut der LQG ist der Urknall das Resultat eines sich aufgrund der Schwerkraft zusammziehenden Universums, dessen Kollaps durch Quanteneffekte in eine Expansion umgekehrt wird.

Urknall und inflationäre Expansion → S. 154  
Stringtheorie und M-Theorie → S. 278



# Bildnachweis

Im Bildnachweis werden folgende Abkürzungen verwendet:

BB	Benjamin Bahr
JR	Jörg Resag
KR	Kristin Riebe

## Einleitung

- S. V: rechts oben: Gürtelsterne des Orion: De Martin & ESA/ESO/NASA Photo-shop FITS Liberator
- S. V: Mitte: Helium-Atom: KR
- S. V: links unten: Plasmastrom auf Tablette: Rösner, HAWK Göttingen
- S. VI: oben: Wurmloch: BB
- S. VI: links unten: Wellenfunktion: Bernd Thaller, Universität von Graz, Institut für Mathematik und Wissenschaftliches Rechnen, <http://vqm.uni-graz.at/index.html>
- S. VI: rechts: Proton mit Quarks: KR
- S. VII: links oben: Orion-Nebel: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) und Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team
- S. VII: Mitte: Hexerakt: J. Gregory Moxness, <http://TheoryOfEverything.org>
- S. VII: rechts unten: Leuchtdioden: E. Fred Schubert

## Inhalt

- S. VIII: oben: Extrasolare Planeten: NASA/Tim Pyle
- S. VIII: unten: Krebsnebel: NASA
- S. IX: Gewitterblitze: U.S. Air Force, Foto von Edward Aspera Jr.
- S. X: oben: Foucault'sches Pendel: Daniel Sancho, CC BY 2.0
- S. X: unten: schwarzes Loch mit Akkretionsscheibe: NASA/

JPL-Caltech  
 S. XI: Hubble Ultra Deep Field: NASA und die European Space Agency (ESA)  
 S. XII: oben: Spitze eines Rastertunnelmikroskops: Sebastian Loth, Max Planck Gesellschaft  
 S. XII: unten: Teilchenkollision: CERN, CMS-Experiment  
 S. XIII: oben: Aragonit-Kristalle: Erhard Mathias  
 S. XIII: unten: Polarlicht: United States Air Force, Foto von Senior Airman Joshua Strang  
 S. XIV: Multiversum: KR  
 S. I: Gravitationswellen: M. Koppitz (AEI/ZIB), C. Reisswig (AEI), L. Rezzolla (AEI)

## 1 Astronomie und Astrophysik

### Kapiteleingangsseite

S. 3: NASA/JPL-Caltech; ESA & Garrelt Mellema (Leiden Universität, Niederlande); KR; NASA, ESA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA); Collage von KR

### Die Sonne und ihr Magnetfeld

- S. 4: unten links: KR, nach einem Bild von SOHO (ESA & NASA)
- S. 4: unten rechts: ESO (Philippe Duhoux)
- S. 5: oben: SOHO-EIT Consortium, ESA, NASA
- S. 5: unten links: TRACE Project, NASA
- S. 5: unten rechts: SOHO (ESA & NASA)

### Die Entstehung des Sonnensystems

- S. 6: BB
- S. 7: links unten: NASA, ESA, M. Livio, Hubble 20th

Anniversary Team (STScI)  
 S. 7: rechts oben: NASA/JPL-Caltech

### Die Entstehung des Mondes

- S. 8: oben: NASA/JPL-Caltech
- S. 8: links unten: NASA
- S. 9: oben: KR
- S. 9: unten: JR, nach einer Computersimulation von Robin M. Canup

### Die Kepler'schen Gesetze

- S. 10: oben links: Frederick Mackenzie (1787/88-1854)
- S. 10: unten: JR, KR
- S. 11: oben rechts: JR, KR
- S. 11: unten: JR, auf der Grundlage einer Grafik von NASA/JPL-Caltech

### Satelliten mit geosynchronen Orbits

- S. 12: BB
- S. 13: oben: Mamijomarash/Wikimedia Commons
- S. 13: unten: BB

### Der Rand des Sonnensystems

- S. 14: rechts oben: NASA GSFC
- S. 14: links unten: NASA/ESA/JPL-Caltech/Goddard/SwRI
- S. 15: links: Interstellar Probe, Jet Propulsion Laboratory, NASA; deutsche Bearbeitung von BB, KR
- S. 15: rechts: NASA/Goddard/Adler/U. Chicago/Wesleyan; deutsche Bearbeitung von BB, KR

### Extrasolare Planeten

- S. 16: NASA/Tim Pyle
- S. 17: rechts oben: Trent Schindler, National Science Foundation
- S. 17: links unten: NASA/Ames/JPL-Caltech

### Der Sternenhimmel

- S. 18: links: ESO/Iztok Bončina
- S. 18: rechts: ESO/Y. Beletsky;

Beschriftung von JR  
 S. 19: oben: NASA  
 S. 19: unten: ESO/S. Brunier

### Die Geburt von Sternen

- S. 20: links unten: NASA, The Hubble Heritage Team, STScI, AURA
- S. 20: oben: NASA, ESA, AURA/Caltech
- S. 21: oben links: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) und Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team
- S. 21: oben rechts: ESO
- S. 21: unten links: C.R. O'Dell/Rice University, NASA
- S. 21: unten rechts: ESO/L. Calçada

### Spektralklassen

- S. 22: rechts oben: BB
- S. 22: links unten: NASA, Robert Nemiroff (MTU) & Jerry Bonnell (USRA)
- S. 23: rechts oben: BB
- S. 23: links unten: De Martin & ESA/ESO/NASA Photo-shop FITS Liberator

### Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

- S. 24: ESO, angepasst von KR
- S. 25: oben: JR, KR
- S. 25: unten: NASA, ESA, J. Anderson (STScI)

### Cepheiden

- S. 26: BB
- S. 27: oben: NASA, ESA, The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) und R. Gendler
- S. 27: unten: ESO

### Planetarische Nebel

- S. 28: NASA, ESA, HEIC und The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
- S. 29: oben: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona
- S. 29: unten: ESA & Garrelt

- Mellema (Leiden Universität, Niederlande)
- Weisse Zwerge**  
S.30: links: NASA, ESA und K. Noll (STScI)  
S.30: rechts: NASA und H. Richer (University of British Columbia), NOAO/AURA/NSF  
S.31: oben: NASA, ESA, G. Bacon (STScI)  
S.31: unten: Omnidoom 999/ Wikimedia Commons
- Thermonukleare Supernovae**  
S.32: ESO  
S.33: oben: NASA/ESA, The Hubble Key Project Team und The High-Z Supernova Search Team  
S.33: unten links: NASA/CXC/Rutgers/J.Hughes et al.  
S.33: unten Mitte: NASA/JPL-Caltech/WISE Team  
S.33: unten rechts: NASA, ESA und das Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
- Kollaps-Supernovae**  
S.34: links: Max-Planck-Institut für Astrophysik  
S.34: rechts: NASA  
S.35: oben: Max-Planck-Institut für Astrophysik  
S.35: unten links: NASA, ESA, K. France (University of Colorado, Boulder), P. Challis und R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)  
S.35: unten rechts: NASA/JPL-Caltech
- Neutronensterne**  
S.36: rechts oben: NASA/CXC/ASU/J. Hester et al. (Röntgenstrahlen) und NASA/HST/ASU/J. Hester et al. (optisch)  
S.36: links unten: NASA/Goddard Space Flight Center  
S.37: links oben: NASA  
S.37: rechts unten: Fred Walter
- (State University of New York at Stony Brook) und NASA
- Monstersterne und Hypernovae**  
S.38: links: Nathan Smith (University of California, Berkeley), NASA  
S.38: rechts: NASA/Swift/Mary Pat Hrybyk-Keith, John Jones  
S.39: Instituto de Astrofísica de Canarias, Isaac Newton Teleskop – Daniel López
- Standardkerzen**  
S.40: links: BB  
S.40: rechts: NASA/JPL-Caltech  
S.41: oben und links unten: BB  
S.41: rechts unten: Stefan Immler, NASA/GSFC, Swift Science Team
- Supermassive schwarze Löcher**  
S.42: oben: NASA/JPL-Caltech  
S.42: unten: NASA/CXC/MIT/F. Baganoff, R. Shcherbakov et al.  
S.43: oben links: ESO/MPE/Marc Schartmann  
S.43: oben rechts: NASA/The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)  
S.43: unten rechts: JR, KR
- Aktive Galaxien**  
S.44: links: NASA  
S.44: rechts: NASA, ESA, The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)  
S.45: oben: Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA/ESA)  
S.45: links unten: R.Kraft (SAO) et al., CXO, NASA
- Galaxientypen**  
S.46: KR, aus Einzelbildern von SDSS, HST, ESO, NASA und Adam Block, Mount Lemmon SkyCenter/University of Arizona  
S.47: links und Mitte: NASA, ESA und das Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration  
S.47: rechts: ESO, Henri Boffin
- von Fergus of Greenock  
S.57: links und oben rechts: JR, KR
- Hertz'scher Dipol**  
S.58: oben: Averse/Wikimedia Commons  
S.58: rechts unten: KR, BB  
S.59: oben: BB  
S.59: Mitte: Gert Wagner, <http://www.wingsfilm.com>  
S.59: unten: Yike.G./Wikimedia Commons
- Gewitter**  
S.60: NASA  
S.61: oben links: aus The Aerial World, G. Hartwig, London, 1886; verändert von Saibo/Wikimedia Commons  
S.61: unten links: U.S. Air Force, Foto von Edward Aspera Jr.  
S.61: unten rechts: NASA, University of Alaska, Fairbanks
- Farben**  
S.62: links: Quark67/Wikimedia Commons  
S.62: rechts: BenRG/Wikimedia Commons, angepasst von KR  
S.63: oben: JR, abgeleitet von einem Bild von Horst Frank/Phrood/Anony  
S.63: Mitte: Hati/Wikimedia Commons, angepasst von JR  
S.63: unten: Bautsch/Wikimedia Commons
- Lichtbrechung**  
S.64: links: Zátonyi Sándor/Wikimedia Commons  
S.64: rechts: Brocken Inaglory/Wikimedia Commons  
S.65: oben: Brocken Inaglory/Wikimedia Commons  
S.65: unten links: BB  
S.65: unten rechts: Geof/Wikimedia Commons
- Regenbogen**  
S.66: oben: KR  
S.66: unten: Artur Euriich/SPEKTRALE 2011/JGU  
S.67: oben: Brocken Inaglory/

Wikimedia Commons  
 S. 67: Mitte: Calvin Bradshaw,  
[calvinbradshaw.com](http://calvinbradshaw.com)  
 S. 67: unten: Uwe Vogel,  
[oldschoolman.de](http://oldschoolman.de)

### Anisotrope Medien

S. 68: links unten: BB  
 S. 68: rechts oben: FIZ CHE-MIE  
 S. 69: KR

### Optische Linsen

S. 70: P. Koza, Fakultät für Physik, LMU München  
 S. 71: links: LP E-Learning, Georg-August-Universität Göttingen  
 S. 71: rechts oben: Fantagu und Smial/Wikimedia Commons  
 S. 71: rechts unten: BB

### Adaptive Optiken

S. 72: rechts oben: Heidi Hammel, Space Science Institute, Boulder, CO/Imke de Pater, University of California, Berkeley/W. M. Keck Observatory; <http://astro.berkeley.edu/~imke/>  
 S. 72: links unten: Frank Mummann/Wikimedia Commons  
 S. 73: links oben: R. Cerisola  
 S. 73: rechts unten: ESO/G. Hüdepohl ([www.atacama-photo.com](http://www.atacama-photo.com))

### Luftspiegelungen

S. 74: BB  
 S. 75: oben: Pappphase/Wikimedia Commons  
 S. 75: unten: Vinzenz Mühlstein/Wikimedia Commons

### Tarnvorrichtungen

S. 76: links unten: Schurig et al „Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies“, Science Vol. 314, Nr. 5801 S. 977–980, 2006; abgedruckt mit Erlaubnis der AAAS  
 S. 76: rechts oben: BB  
 S. 77: rechts oben: 2013 Riken Research

S. 77: unten links und rechts:  
 4. Physikalisches Institut,  
 Universität Stuttgart

### 3 Mechanik und Thermodynamik

#### Kapiteleingangsseite

S. 79: Wikimol/Wikimedia Commons; BB; KR; Roger McLassus, CC BY-SA 3.0 und GNU FDL; Collage von KR

#### Newton's Gesetze der Mechanik

S. 80: links: Sir Isaac Newton, gemalt von Godfrey Kneller im Jahr 1689  
 S. 80: rechts oben: JR, KR  
 S. 81: links oben: Caleb Charland  
 S. 81: links unten: KR  
 S. 81: rechts: NASA

#### Das Foucault'sche Pendel

S. 82: rechts oben: Daniel Sancho  
 S. 82: links unten: ArtMechanic/Wikimedia Commons  
 S. 82: rechts unten: JR, KR  
 S. 83: JR, KR

#### Kräftefreie Kreisel

S. 84: JR, KR  
 S. 85: links oben: JR, KR  
 S. 85: rechts unten: NASA/JPL/USGS

#### Kreisel mit äußerem Drehmoment

S. 86: links: Lacen/Wikimedia Commons, verändert von JR, KR

S. 86: rechts: JR, KR  
 S. 87: links: JR, KR  
 S. 87: rechts: KR

#### Newton's Gravitationsgesetz

S. 88: oben: BB, KR  
 S. 88: unten: JR, KR  
 S. 89: oben: NASA  
 S. 89: rechts unten: NASA/JPL-Caltech/UMD/GSFC/Tony Farnham, angepasst von KR

### Kosmische Geschwindigkeiten

S. 90: JR, KR  
 S. 91: oben links und unten: Don Davis, NASA  
 S. 91: oben rechts: NASA/Hubble Space Telescope Comet Team

### Die Gezeiten

S. 92: oben: JR, KR  
 S. 92: unten: JR, KR  
 S. 93: oben: Fabos (Fabien)/Wikimedia Commons  
 S. 93: unten: JR, KR

### Das archimedische Prinzip

S. 94: oben: Foto von Stefan Zachow, Internationale Mathematische Union  
 S. 94: unten links: JR, KR  
 S. 94: unten rechts: Pete/Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0  
 S. 95: JR, KR

### Die Physik der Strömungen

S. 96: links: Bob Cahalan, NASA GSFC  
 S. 96: rechts: NASA Langley Research Center (NASA-LaRC)  
 S. 97: links: NASA, ESA und M. Livio and the Hubble 20th Anniversary Team (STScI)  
 S. 97: rechts: NASA/JPL

### Warum fliegt ein Flugzeug?

S. 98: BB  
 S. 99: links: NASA  
 S. 99: rechts: Peter Dvorszky

### Gewöhnliche Wasserwellen

S. 100: links: Roger McLassus/Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0 und GNU FDL  
 S. 100: rechts: Vargklo/Wikimedia Commons, abgewandelt von Jörg Resag  
 S. 101: oben links: NASA/GSFC/METI/Japan Space Systems und U.S./Japan ASTER Science Team

S. 101: oben rechts: Michel Griffon/Wikimedia Commons  
 S. 101: unten: Doug Smith, „A Case Study and Analysis of

S. 101: unten rechts: Adrian Pingstone/Wikimedia Commons

### Besondere Wasserwellen

S. 102: oben: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey  
 S. 102: unten: David Rydevik/Wikimedia Commons  
 S. 103: oben links: U.S. Navy  
 S. 103: oben rechts: Ulliver/Wikimedia Commons  
 S. 103: unten: NOAA

### Der Lotuseffekt

S. 104: links: Jon Sullivan, PDPhoto.org  
 S. 104: Mitte: ITV Denkendorf  
 S. 104: unten: W. Barthlott, [www.lotus-effect.de](http://www.lotus-effect.de)  
 S. 105: oben: U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory  
 S. 105: unten links: William Thielicke, [w.th@gmx.de](mailto:w.th@gmx.de)  
 S. 105: unten rechts: W. Barthlott, [www.lotus-effect.de](http://www.lotus-effect.de)

### Chaotische Bewegungen

S. 106: links: JR, KR  
 S. 106: rechts: George Ioannidis/Wikimedia Commons  
 S. 107: links: Wikimol/Wikimedia Commons  
 S. 107: rechts: Wofl/Wikimedia Commons

### Schwingende Saiten und Platten

S. 108: links unten: BB  
 S. 108: rechts oben: Dieter Biskamp  
 S. 109: J. S. Schlümer, „Vergleich von holografisch-interferometrisch und speckle-interferometrisch ermittelten Plattenschwingungsformen mit rechnerisch simulierten Interferogrammen“ 1993

### Resonanz

S. 110: BB  
 S. 111: oben: flapdragon/Wikimedia Commons  
 S. 111: unten: Doug Smith, „A Case Study and Analysis of

the Tacoma Narrows Bridge Failure", Department of Mechanical Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada, March 29, 1974

### Scheinkräfte

- S. 112: BB
- S. 113: rechts unten: Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC
- S. 113: restliche Bilder: BB

### Granulare Materie

- S. 114: B. Koechle, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos
- S. 115: links oben: WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos
- S. 115: rechts unten: Perry Bartelt, Michael Lehning, [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00074-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00074-5); abgedruckt mit Erlaubnis von Elsevier
- S. 115: Mitte: KR

### Brown'sche Bewegungen

- S. 116: rechts oben: BB
- S. 116: links unten: KR
- S. 117: rechts oben: BInf. MPhil. (Arch) Justin James Clayden, <http://justy.me>
- S. 117: links unten: BB

### Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

- S. 118: oben: JR
- S. 118: unten: JR, KR
- S. 119: links: JR, KR
- S. 119: rechts oben: KR, nach einer Vorlage von Dims/Wikimedia Commons
- S. 119: rechts unten: KR

### Negative absolute Temperaturen

- S. 120: MPQ/ LMU München
- S. 121: rechts oben: MPQ / LMU München
- S. 121: links unten: BB

## 4 Relativitätstheorie

### Kapiteleingangsseite

- S. 123: Ute Kraus, Institut für Physik, Universität Hildesheim, Tempolimit Lichtgeschwindigkeit; ESO/M. Kornmesser; Ferdinand Schmutzler; BB; NASA; Collage von KR

### Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie

- S. 124: JR, KR
- S. 125: oben: JR
- S. 125: unten: JR, Hintergrundbild von Richard P. Hoblitt, USGS

### Terrellrotation

- S. 126: links unten: Ute Kraus, Institut für Physik, Universität Hildesheim, Tempolimit Lichtgeschwindigkeit
- S. 126: rechts: BB
- S. 127: oben und Mitte: BB
- S. 127: unten: Ute Kraus, Institut für Physik, Universität Hildesheim, Tempolimit Lichtgeschwindigkeit

### $E=mc^2$

- S. 128: JR, KR
- S. 129: oben: KR
- S. 129: unten links: Federal government of the United States
- S. 129: unten rechts: ESO/M. Kornmesser

### Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie

- S. 130: oben: Ferdinand Schmutzler (1870 – 1928)
- S. 130: unten: JR, KR
- S. 131: NASA

### Die Raumzeit nicht-rotierender schwarzer Löcher

- S. 132: JR
- S. 133: oben: NASA/JPL-Caltech
- S. 133: unten: KR

### Die Raumzeit rotierender schwarzer Löcher

- S. 134: oben: JR
- S. 134: unten: KR

S. 135: oben: JR

S. 135: unten: Gravity Probe B Team, Stanford, NASA; bearbeitet von KR

### Der Warp-Antrieb

- S. 136: links: NASA, Les Bossinas (Cortez III Service Corp.)
- S. 136: rechts: Trekky0623/Wikimedia Commons, angepasst durch KR
- S. 136: unten: Allen McCloud, CC BY-SA 3.0
- S. 137: Thomas Müller, Daniel Weiskopf, Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart (VISUS); Texturen: NASA

### Wurmlöcher

- S. 138: BB
- S. 139: rechts oben: Corvin Zahn, Institut für Physik, Universität Hildesheim, Tempolimit Lichtgeschwindigkeit, [www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de](http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de)
- S. 139: links unten: BB

### GPS

- S. 140: BB
- S. 141: NASA

## 5 Kosmologie

### Kapiteleingangsseite

- S. 143: KR, JR; Ralf Kähler; Chris Henze, NASA; M. Koppitz (AEI/ZIB), C. Reisswig (AEI), L. Rezzolla (AEI); NASA, ESA, L. Bradley (JHU), R. Bouwens (UCSC), H. Ford (JHU), and G. Illingworth (UCSC); Collage von KR

### Ein tiefer Blick ins Universum

- S. 144: NASA and the European Space Agency
- S. 145: oben links: NASA and A. Feild (STScI), bearbeitet von KR
- S. 145: oben rechts: NASA
- S. 145: unten: NASA, ESA, Garth Illingworth (University of California, Santa Cruz)

und Rychard Bouwens (University of California, Santa Cruz und Leiden University) und das HUDF09 Team

### Das expandierende Universum

- S. 146: JR, KR
- S. 147: oben: NASA/WMAP Science Team
- S. 147: unten: JR, KR

### Die kosmische Hintergrundstrahlung

- S. 148: rechts oben: National Park Service
- S. 148: links unten: JR, KR
- S. 149: ESA und die Planck Kollaboration

### Dunkle Materie

- S. 150: links: European Southern Observatory/L. Calçada
- S. 150: rechts: NASA/JPL-Caltech
- S. 151: oben links: Volker Springel, MPA Garching/Universität Heidelberg
- S. 151: oben rechts: NASA/ESA/Richard Massey (California Institute of Technology)
- S. 151: unten: NASA/CXC/CfA/ M. Markevitch et al.

### Beschleunigte Expansion und dunkle Energie

- S. 152: oben: NASA/WMAP Science Team
- S. 152: unten: KR
- S. 153: links: JR, in Anlehnung an Perlmutter, Physics Today (2003), angepasst von KR
- S. 153: rechts: ESA und die Planck Kollaboration, bearbeitet von KR

### Urknall und inflationäre Expansion

- S. 154: oben: JR
- S. 154: unten: KR, JR
- S. 155: oben: JR
- S. 155: unten: JR

### Die Entstehung der Materie

- S. 156: oben: JR
- S. 157: oben: JR

S. 157: unten: JR, KR

### Kosmische Horizonte

S. 158: JR  
S. 159: JR, mit Bildern von NASA, WMAP, ESO

### Strukturen im Kosmos

S. 160: oben: T. H. Jarrett (IPAC/SSC)  
S. 160: unten: NASA, ESA, L. Bradley (JHU), R. Bouwens (UCSC), H. Ford (JHU), and G. Illingworth (UCSC)  
S. 161: oben: KR, mit Daten vom 2dF  
S. 161: unten: Dale Kocevski, University of Kentucky

### Entstehung kosmischer Strukturen

S. 162: oben: Ralf Kähler, Tom Abel  
S. 162: unten: KR  
S. 163: unten links: KR  
S. 163: rechts: Stefan Gottlöber (AIP), MultiDark-Projekt

### Gravitationslinsen

S. 164: oben rechts: ESA/ Hubble & NASA  
S. 164: unten links: NASA, ESA & L. Calçada  
S. 165: oben rechts: NASA, ESA und STScI  
S. 165: unten links: BB

### Gravitationswellen

S. 166: links: SXS collaboration, <http://www.black-holes.org/explore2.html>  
S. 166: rechts: M. Koppitz (AEI/ZIB), C. Reisswig (AEI), L. Rezzolla (AEI)  
S. 167: links: Bernd Brügmann, Marcus Thierfelder  
S. 167: rechts: Chris Henze, NASA

### Gravitationswellendetektoren

S. 168: oben: H. Lück (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut)/Leibniz Universität Hannover)  
S. 168: unten: Deutsche Luftbild, Hamburg/

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut)/Leibniz Universität Hannover  
S. 169: Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut)/Milde Wissenschaftskommunikation

## 6 Atome und Quantenmechanik

### Kapiteleingangsseite

S. 171: Sienna Morris; Bernd Thaller; KR; Martin Jucker, EFDA; Luc Viatour; Collage von KR

### Das Bohr'sche Atommodell

S. 172: oben rechts: <http://www.phil-fak.uni-duesseldorf.de/philo/galerie/antike/demokrit.html>; gemeinfrei  
S. 172: links Mitte und unten: BB  
S. 173: oben: BB  
S. 173: unten links: : IAEA  
S. 173: unten rechts: Briefmarke von Viggo Bang und Czeslaw Slania, Bilddatei von <http://jayabarathan.files.wordpress.com/2011/02/fig-5-niels-bohr-stamp.jpg?w=540>

### Atomkerne

S. 174: BB  
S. 175: BB

### Radioaktiver Zerfall

S. 176: Inductiveload/Wikimedia Commons  
S. 177: BenRG/Wikimedia Commons

### Welle-Teilchen-Dualismus

S. 178: links: JR, KR  
S. 178: rechts: JR  
S. 179: oben links: KR  
S. 179: oben Mitte: Fffred/Wikimedia Commons  
S. 179: rechts: A. Tanamura; CC BY-SA 3.0  
S. 179: unten links: Ben Mills/ Wikimedia Commons, KR

### Wellenfunktion

S. 180: rechts oben und links: Bernd Thaller, Universität von Graz, Institut für Mathematik und Wissenschaftliches Rechnen, <http://vqm.uni-graz.at/index.html>  
S. 181: BB

### Der Tunneleffekt

S. 182: BB  
S. 183: Concord Consortium (<http://concord.org>), Molecular Workbench (<http://mw.concord.org>)

### Der Franck-Hertz-Versuch

S. 184: BB  
S. 185: links: BB  
S. 185: rechts: Ed Lochocki

### Der Spin eines Teilchens

S. 186: JR  
S. 187: JR

### Das Pauli-Prinzip

S. 188: JR, KR  
S. 189: oben: Andrew Truscott, Kevin Strecker, Randall Hulet, Rice University  
S. 189: unten: Flexxxv/Wikimedia Commons, Dhatfield/Wikimedia Commons, JR

### EPR-Experiment und Bell'sche Ungleichung

S. 190: JR  
S. 191: JR

### Die Interpretation der Quantenmechanik

S. 192: rechts oben: Sienna Morris, [www.fleetingsates.com](http://www.fleetingsates.com)  
S. 192: links unten: Benjamin Couprie/Wikimedia Commons  
S. 193: JR, KR

### Plasma

S. 194: links unten: KR, auf Grundlage eines Bildes von der NASA  
S. 194: rechts oben: Luc Viatour, [www.lucnix.be](http://www.lucnix.be)  
S. 195: oben rechts: Michael Kong et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 174018;

abgedruckt mit Erlaubnis der IOP publishing ltd.

S. 195: unten links: NASA / Solar Dynamics Observatory (SDO)

S. 195: unten rechts: Simon Rösner, HAWK Göttingen

### Fusionsreaktoren

S. 196: Martin Jucker, EFDA  
S. 197: oben: Max-Planck-

Institut für Plasmaphysik

S. 197: unten links: Culham Centre for Fusion Energy

S. 197: unten Mitte und rechts: U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory

### Bose-Einstein-Kondensate

S. 198: oben: NIST/JILA/CU-Boulder

S. 198: rechts unten: U.S. Department of Energy's Pacific Northwest National Laboratory

S. 199: oben rechts: T. Pfau, 5. Physikalisches Institut Universität Stuttgart

S. 199: unten links: BB, auf der Grundlage eines Bildes von Department of Physics, University of Otago, NZ

S. 199: unten rechts: Wolfgang Ketterle, MIT

### Laserkühlung

S. 200: BB  
S. 201: links: H. M. Helfer/NIST

S. 201: Mitte und rechts: BB

### Supraleitung

S. 202: Martin Wagner, <http://www.martin-wagner.org/supraleitung.htm>

S. 203: links: BB

S. 203: rechts: Haj33/Wikimedia Commons

### Supraflüssigkeiten

S. 204: links: Alfred Leitner/Wikimedia Commons

S. 204: rechts: BB

### Quantenvakuum

S. 206: BB

S. 207: BB

**Elektronenmikroskopie**

- S.208: BB  
 S.209: oben rechts: Stefan Diller – Wissenschaftliche Photographie – Würzburg 2008  
 S.209: unten links: Janice Carr, CDC  
 S.209: unten Mitte: Foto von Jürgen Berger/Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, Tübingen  
 S.209: unten rechts: National Center for Electron Microscopy, Lawrence Berkeley National Laboratory (C. Song)

**Rastertunnelmikroskopie**

- S.210: KR  
 S.211: rechts oben: Sebastian Loth, CFEL Science Hamburg  
 S.211: links oben: Kliewer, Rathlev, Berndt, CAU Kiel  
 S.211: unten: Dr. Marco Pratzer, II. Phys. Institut B, RWTH Aachen

**Nanowelten**

- S.212: oben: Sebastian Loth, Max Planck Gesellschaft  
 S.212: unten links: Arnero/Wikimedia Commons  
 S.212: unten rechts: JR  
 S.213: oben: National Human Genome Research Institute  
 S.213: Mitte: Benjah-bmm27/Wikimedia Commons  
 S.213: unten: Mariana Ruiz Villarreal (LadyofHats/Wikimedia Commons)

**Laser**

- S.214: BB  
 S.215: rechts oben: BB  
 S.215: links unten: Professor Mark Csele, Niagara College  
 S.215: rechts unten: United States Air Force

**Quantencomputer**

- S.216: BB  
 S.217: links: BB  
 S.217: rechts: D-Wave Systems Inc.

**7 Welt der Elementarteilchen****Kapiteleingangsseite**

- S.219: JR, KR, ALICE Team, Henning Weber, CERN; Collage von KR

**Das Standardmodell der Teilchenphysik**

- S.220: KR  
 S.221: oben: KR  
 S.221: unten: JR, KR

**Feynman-Diagramme**

- S.222: oben: NASA, The Hubble Heritage Team, STScI, AURA  
 S.222: unten: JR, KR  
 S.223: JR, KR

**Die starke Wechselwirkung**

- S.224: JR, KR  
 S.225: JR, KR

**Die schwache Wechselwirkung**

- S.226: rechts oben und links unten: JR, KR  
 S.226: rechts unten: JR, KR, Hintergrund von SOHO  
 S.227: CERN

**Neutrinos**

- S.228: Strait/Wikimedia Commons, KR  
 S.229: links oben: JR, KR  
 S.229: rechts oben: SNO  
 S.229: rechts unten: JR, nach Vorlage von Danielle Vevea/NSF & Jamie Yang/NSF

**Antimaterie**

- S.230: oben und unten rechts: JR, KR  
 S.230: unten links: Nobel Foundation  
 S.231: links: JR, KR  
 S.231: rechts: NASA/Goddard Space Flight Center/J. Dwyer/Florida Inst. of Technology

**Quark-Gluon-Plasma**

- S.232: CERN, Henning Weber  
 S.233: oben: ALICE Team, CERN  
 S.233: unten: The ATLAS Experiment, CERN

**Die kosmische Höhenstrahlung**

- S.234: rechts oben: Maximo Ave, Dinoj Surendran, Tokonatsu Yamamoto, Randy Landsberg, Mark SubbaRao unter Verwendung von Sergio Sciutto's AIRES package

- S.234: links: JR, nach einer Vorlage des Pierre-Auger-Observatoriums

- S.235: oben: X-ray: NASA/CXC/CfA/D.Evans et al.; Optical/UV: NASA/STScI; Radio: NSF/VLA/CfA/D. Evans et al., STFC/JBO/MERLIN

- S.235: unten: KR, auf Grundlage einer Grafik vom CERN

**Der Large Hadron Collider (LHC)**

- S.236: CERN  
 S.237: links unten: JR  
 S.237: rechts Mitte und unten: CERN

**Die Entdeckung des Higgs-Teilchens**

- S.238: links unten: CERN  
 S.238: rechts oben: CERN, CMS-Experiment  
 S.239: links: JR, KR  
 S.239: rechts oben: CERN, ATLAS-Experiment  
 S.239: rechts unten: CERN, CMS-Experiment

**8 Kristalle und andere feste Stoffe****Kapiteleingangsseite**

- S.241: Erhard Mathias; Oleg D. Lavrentovich, Kent State University; BB; J. Gregory Moxness, <http://TheoryOfEverything.org>; Collage von KR

**Plasmonen**

- S.242: links: „Light-Matter Interactions on Nano-Structured Metallic Films“ von Timothy Andrew Kelf University of Southampton,

February 2006

- S.242: rechts: Stefan Linden, Universität Bonn; aus: F. von Cube, S. Irsen, J. Niegemann, C. Matyssek, W. Hergert, K. Busch, S. Linden, Optical Material Express 1, 1009 (2011)

- S.243: oben: Trustees of the British Museum

- S.243: unten: Krzysztof Mizerka/Wikimedia Commons

**Ferromagnetismus**

- S.244: oben und unten links: Arbeitsgruppe von Prof. R. Wiesendanger, Universität Hamburg  
 S.244: unten rechts: J. Kurde et al. 2011 New J. Phys. 13 033015; doi:10.1088/1367-2630/13/3/033015

- S.245: links: Magic Penny Trust und Ciencias y Artes Patagonia

- S.245: rechts: BB, KR

**Kristallgitter**

- S.246: BB  
 S.247: oben: BB  
 S.247: unten links und rechts: [www.irocks.com](http://www.irocks.com)

**Kristallisation**

- S.248: rechts oben: Erhard Mathias  
 S.248: Mitte: Jost Jahn, Amrum  
 S.248: links unten: Erhard Mathias  
 S.249: oben: B. Zhu und M. Militzer, 2012 Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 20 085011; abgedruckt mit Erlaubnis der IOP publishing ltd.

- S.249: unten: Plate XIX von „Studies among the Snow Crystals ...“ von Wilson Bentley, „The Snowflake Man.“ Aus Annual Summary of the „Monthly Weather Review“ for 1902

**Quasikristalle**

- S.250: links: J. W. Evans, US Department of Energy

S.250: rechts: J Gregory Moxness, <http://TheoryOfEverything.org>  
 S.251: oben: Ian Fisher, Stanford University, US Department of Energy  
 S.251: links unten: Inductive load/Wikimedia Commons  
 S.251: rechts unten: J. Gregory Moxness, <http://TheoryOfEverything.org>

### Flüssigkristalle

S.252: Oleg D. Lavrentovich, Kent State University, <http://dept.kent.edu/spie/liquid-crystals/>  
 S.253: links: Bohdan Senyuk und Oleg D. Lavrentovich, Kent State University, <http://dept.kent.edu/spie/liquid-crystals/>  
 S.253: rechts: BB

### Elektronen in Halbleiterkristallen

S.254: BB  
 S.255: links unten: TU Wien  
 S.255: rechts: BB

### Halbleiterdioden

S.256: BB  
 S.257: BB

### Leuchtdioden

S.258: oben: BB  
 S.258: unten: E. Fred Schubert  
 S.259: oben: Foto vom U.S. Department of Energy's Pacific Northwest National Laboratory  
 S.259: unten: SONY Entertainment

## 9 Geophysik

### Kapiteleingangsseite

S.261: Ulrich Hansen, Institut für Geophysik der Universität Münster; Planet Erde, ZEIT Wissen Edition/Spektrum Akademischer Verlag, 2008; Joshua Strang, United States Air Force; Collage von KR

### Der innere Aufbau der Erde

S.262: oben: Planet Erde, ZEIT Wissen Edition/Spektrum Akademischer Verlag, 2008  
 S.262: links unten: Fratz/Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0  
 S.263: Ulrich Hansen, Institut für Geophysik der Universität Münster

### Die Drift der Kontinente

S.264: links: Planet Erde, ZEIT Wissen Edition/Spektrum Akademischer Verlag, 2008  
 S.264: rechts: Ulrich Hansen, Institut für Geophysik der Universität Münster  
 S.265: oben: Elliot Lim, Cires & NOAA/NGDC, angepasst von KR  
 S.265: unten: Planet Erde, ZEIT Wissen Edition/Spektrum Akademischer Verlag, 2008

### Erdbeben und seismische Wellen

S.266: oben: NOAA/NGDC  
 S.266: unten: National Archives and Records Administration  
 S.267: oben: NASA, DTAM Team  
 S.267: links und rechts unten: Planet Erde, ZEIT Wissen Edition/Spektrum Akademischer Verlag, 2008; linkes Bild bearbeitet von KR

### Der Erdkern als Quelle des Erdmagnetfeldes

S.268: oben: Planet Erde, ZEIT Wissen Edition/Spektrum Akademischer Verlag, 2008  
 S.268: unten: Tentotwo/Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0; angepasst von JR  
 S.269: links unten: Gary A. Glatzmaier (University of California Santa Cruz) und Paul H. Roberts (University of California Los Angeles)  
 S.269: rechts: U.S. Geological Survey

### Erdmagnetfeld und Polarlichter

S.270: oben: NASA  
 S.270: unten: J.T. Trauger (Jet Propulsion Laboratory) und NASA  
 S.271: oben: United States Air Force, Foto von Senior Airman Joshua Strang  
 S.271: unten links: Chris Danals, National Science Foundation  
 S.271: unten rechts: ISS Expedition 23 crew, NASA

### Eiszeiten und Milankovitch-Zyklen

S.272: unten links: JR  
 S.272: unten rechts: NASA; verändert von JR  
 S.273: oben: Ittiz/Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0  
 S.273: unten: JR, KR

### 10 Grenzen des Wissens

### Kapiteleingangsseite

S.275: ATLAS Experiment, CERN; Thomas Thiemann, FAU Erlangen-Nürnberg, Milde Science Communication Potsdam, Exozet Potsdam; JR; KR; Collage von KR

### Supersymmetrie

S.276: BB  
 S.277: links: Stephen Martin, „A Supersymmetry Primer“, Onlineskript: <http://zippy.physics.niu.edu/spmartin.html>; angepasst von KR  
 S.277: rechts: BB, KR

### Stringtheorie und M-Theorie

S.278: links: MissMJ/Wikimedia Commons  
 S.278: rechts: KR  
 S.279: oben links: KR  
 S.279: oben rechts: Ojan/Wikimedia Commons  
 S.279: unten: JR, Hintergrundbild von NASA

### Verborgene Dimensionen

S.280: oben: JR, unter Verwendung einer Grafik von Jbourjai/Wikimedia Commons  
 S.280: unten: JR, KR  
 S.281: oben: KR  
 S.281: unten: ATLAS Experiment, CERN

### Multiversum und anthropisches Prinzip

S.282: oben: KR  
 S.282: unten: JR, KR  
 S.283: oben: Silver Spoon/Wikimedia Commons  
 S.283: unten: JR, KR

### Branenwelten

S.284: Rogilbert/Wikimedia Commons  
 S.285: KR

### Entropie und Temperaturschwarzer Löcher

S.286: oben links: NASA  
 S.286: unten: ATLAS Experiment, CERN  
 S.287: JR, KR

### Das holografische Prinzip

S.288: oben: Epzcaw/Wikimedia Commons  
 S.288: links: Georg-Johann Lay/Wikimedia Commons  
 S.289: JR

### Loop-Quantengravitation

S.290: Thomas Thiemann, FAU Erlangen-Nürnberg, Milde Wissenschaftskommunikation Potsdam, Exozet Potsdam  
 S.291: BB

# Index

**Symbolen**

2dF Galaxy Redshift Survey  
160

**A**

Abbildungsfehler 70  
Aberration 71  
Absorption 200, 214, 222  
adaptive Optiken 72  
Adhäsion 104, 114, 204  
Aggregatzustand 114, 194, 198  
AGN (active galactic nuclei)  
    44. siehe auch aktive  
    Galaxie  
Akkretionsscheibe 6, 42, 44,  
    133  
Aktionsprinzip 80  
aktive Galaxie 42, 44, 235  
Aktuator 73  
ALICE-Detektor 233, 237  
Allgemeine Relativitätstheorie.  
    siehe Relativitätstheorie, Allgemeine  
Ampère'sches Gesetz 56  
Analemma-Figur 13  
Anderson, Carl David 231, 235  
Andromedagalaxie 41, 48  
Anisotrope Medien 68  
anthropisches Prinzip 282  
Antimaterie 230, 237  
Äquivalenzprinzip 130  
Archimedes 94  
archimedisches Prinzip 94  
Asteroid 7, 85, 91  
Astigmatismus 71  
Astronomie 3  
astronomische Einheit (AU) 14  
astronomische Refraktion 65  
Astrophysik 3

ATLAS-Detektor 227, 233,  
    237, 239, 281, 286  
Atom 116, 171–216  
Atomhülle 173  
Atomkern 172, 174, 176, 196,  
    224  
Atomlaser 199  
Atomuhr 140  
Attraktor 107  
Aufenthaltswahrscheinlichkeit  
    117, 182  
Auflösung 72, 208  
Auftrieb 94, 99  
Ausdehnungsfaktor (Universum)  
    146, 153. siehe  
    auch Skalenfaktor  
Auskristallisieren 248  
Austauschteilchen 221, 225

**B**

Bardeen, John 202  
Baryon 224  
Basalt 264  
BCS-Theorie 202  
Bell, John Steward 191  
Bell'sche Ungleichung 190  
Bermuda-Dreieck 94  
Bernoulli-Prinzip 98  
Beschleunigung 80  
Betazerrfall 177, 223, 226, 228  
Bezugssystem 112, 128, 130,  
    149. siehe auch Inertialsystem  
    alsystem  
Binning, Gerd 211  
Blitz 60  
Blow-Up 97  
Bohm, David 190  
Bohr, Niels 172, 192  
Bohr'sches Atommodell 172

Boltzmannkonstante 118, 120,  
    287  
Böschungswinkel 115  
Bose-Einstein-Kondensat 198,  
    201  
Bose, Satyendra Nath 198  
Boson 188, 198, 202, 220, 222,  
    226, 276  
Brahe, Tycho 10  
Brane 284  
Bravais-Gitter 250  
Brechungsindex 64  
Brennpunkt 10, 70, 89  
Brown, Robert 116  
Brown'sche Bewegung 116, 200  
Buckminster-Fulleren 179  
Bullet-Cluster 51

**C**

Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit  
    281  
Casimir-Effekt 139, 207  
Casimir, Hendrik 207  
Cassiopeia A 35  
Centaurus A 44  
Cepheid 26, 40  
CERN 236  
Chandrasekhar-Grenze 31,  
    32, 36  
chaotische Bewegung 106  
Chladni, Ernst Florens Friedrich  
    109  
Chladnische Klangfigur 109  
Chromosom 213  
Chromosphäre 4  
Clarke, Arthur C. 13  
Clarke-Orbit 13  
CMS-Detektor 237, 238  
Confinement 225

Cooper, Leon N. 202  
Cooper-Paar 202  
Corioliskraft 112  
CP-Verletzung 231  
Curie-Temperatur 268

**D**

Dalton, John 172  
De-Broglie-Wellenlänge 208  
Defektelektron 255  
Dekohärenz 193  
Demokrit 172  
Determinismus 106  
Diamant 246  
Dichromat 63  
Dichtewelle 46  
Diffusion 117  
Dimension 280  
Diode 256, 258  
Dipol 4, 57, 58, 68, 253, 268  
Dirac, Paul A. M. 230  
Dirac-See 230  
Dispersion 66, 71, 100  
DNA 213  
Doppelpendel 106  
Doppelpulsar 168  
Doppelquasar 164  
Doppelpaltestperiment 178  
Doppelstern 31, 32  
Dopplereffekt 148, 200  
Dotierung 255  
Drehachse 84, 86, 186  
Drehimpuls 11, 84, 86, 93, 134,  
    180, 186  
Drehmoment 86, 95  
Dualität 285  
dunkle Energie 41, 131, 137,  
    152, 153, 283  
dunkle Materie 46, 51, 150,

- 152, 157, 162, 165,  
237, 277
- dunkler Halo 46, 150, 162
- Dünung 101
- Durchlassrichtung 257
- D-Wave One 217
- Dynamo 56
- Dynamoeffekt 4, 268
- E**
- Ebbe 92
- Eddington, Sir Arthur 164
- Eigendrehimpuls 186
- Eigenfrequenz 110
- Einstein, Albert 123–141, 169,  
178, 190, 198
- Einstingleichungen 138
- Einsteinkreuz 165
- Einsteinring 165
- Eisen 244, 262
- Eisenkern 9, 262
- Eiszeit 272
- Ekliptik 19
- elektrisches Feld
- elektromagnetisches 55, 56,  
58, 124
- Elektromagnetismus 53–77
- Elektron 173, 177, 188, 220,  
254, 256
- Elektronenloch 256
- Elektronenmikroskop 208
- Elementarmagnet 244
- Elementarteilchen 219–239
- Elementenhäufigkeit 157, 234
- Ellipse 10
- Elmsfeuer 61
- $E = mc^2$  128, 230
- Emission 214
- Energie 128, 234
- Energieniveau 175, 185, 200,  
214
- entartete Materie 31
- Entartungsdruck 36
- Entfernungsbestimmung (Astronomie) 40
- Entropie 121, 205, 287, 288
- Entstehung der Materie 156
- Epizentrum 266
- EPR-Experiment 190
- Erdbane - Exzentrizität 273
- Erdbeben 262, 266
- Erde 8, 10, 12, 82, 90, 92,  
261–273
- Aufbau 262
- Erdkern 262, 267, 268
- Erdkruste 262, 264, 266
- Erdmagnetfeld 263, 268, 270
- Erdmantel 263, 264, 266
- Erdrotation 82
- Ereignishorizont 134, 147, 159,  
167, 289
- Ergosphäre 134
- Eta Carinae 39
- evolved Laser Interferometer  
Space Antenna (eLISA) 167, 169
- Exoplanet. siehe Planet, extrasolarer
- exotische Materie 137
- F**
- Farbe 62
- Farbladung 223, 225
- Fata Morgana 74
- Feldlinie 54, 88, 194, 203, 270
- Fermat'sches Prinzip 64, 70, 76
- Fermion 188, 220, 276
- ferromagnetisch 203, 216, 244,  
268
- Festkörper 241–259
- Feynman-Diagramm 206, 222,  
225, 231, 239, 277, 278
- Feynman, Richard P. 80, 212,  
222
- Feynman-Stückelberg-Interpretation 231
- Filament 151, 161
- Fixsterne 18
- flächenzentriertes Gitter 246
- Flagellum 213
- Flamm'sches Paraboloid 133
- Flare. siehe Sonneneruption
- Fliehkraft 92, 112
- Flugzeug 98
- Fluoreszenz 61, 270
- Flüssigkristall 252
- Flut 92
- Foucault, Jean Bernard Léon 82
- Foucault'sches Pendel 82
- Fraktal 107
- Franck-Hertz-Versuch 184
- Franck, James 184
- Friedmann, Alexander Alexandrowitsch 146
- Fulleren 213
- Fusionsreaktor 196
- G**
- Galaxie 44, 48, 144, 160
- Typen 46
- wechselwirkende 50
- Galaxienhaufen 50, 151, 160,  
163, 164
- Galaxiensuperhaufen 161
- Galaxienverschmelzung 49, 50
- Galilei, Galileo 80
- Galliumarsenid 258
- Gammablitz 38, 291
- Gamma Ray Burst. siehe Gamma-  
blitz
- Gammastrahlung 37, 38, 230
- Gasriese 7
- Gauß'sches Gesetz 55, 56
- gebundene Rotation 93
- Geisterteilchen 228
- gelber Riese 28
- Geo600 167, 169
- Geodynamo 268
- Geophysik 261
- geostationärer Orbit 12
- geosynchroner Orbit 12, 140
- Gerlach, Walther 186
- Gesteinsplanet 7
- Gewitter 60, 231
- Gezeiten 92
- Gezeitenkraft 9, 50
- Giant Luminous Arc 165
- Gitter 246
- Global Positioning System  
(GPS) 131, 140
- Glorie 67
- Gluon 186, 221, 222, 225, 232
- Gondwana 273
- Granit 264
- granulare Materie 114
- Gravitation 11, 88, 130, 132,  
150, 153, 162, 220,  
285, 288, 290
- Gravitationslinse 137, 150, 164
- Gravitationswelle 43, 166, 168
- gravitativer Kollaps 162
- Graviton 279, 285
- Gravity Probe B 135
- Great Attractor 161
- Grenzen des Wissens 275–291
- H**
- Hadron 224, 232
- Halbleiter 254, 256
- Halbleiterdiode 256
- Halbleiterkristall 254
- Halo
- aus dunkler Materie. siehe  
dunkler Halo
- der Milchstraße 20
- Hauptreihe (Sterne) 23, 24
- Hawking, Stephen 286
- Hawking-Strahlung 286

- Heisenberg, Werner 192  
Heliosheath 15  
Heliosphäre 15  
Helixnebel 29  
Hertz, Gustav 184  
Hertz, Heinrich 58  
Hertz'scher Dipol 57, 58, 68  
Hertzsprung-Russell-Diagramm 23, 24  
Hexerakt 251  
hierarchische Strukturbildung 162  
Higgs-Feld 156, 221, 227  
Higgs-Teilchen 227, 237, 238, 276  
Himalaja 265  
Himmel (Farbe) 59  
holografisches Prinzip 233, 288  
Hologramm 288  
Homunkulus-Nebel 38  
Horizont  
  kosmischer 158  
Hubble-Diagramm 46  
Hubble, Edwin 146  
Hubble-Gesetz 160  
Hubble-Parameter 147  
Hubble-Radius 158  
Hubble Ultra Deep Field (HUDF) 145  
Hubble-Weltraumteleskop 144  
Hydra-Centaurus-Komplex 161  
Hypernova 38  
Hyperraum 283, 285  
Hyperwürfel 251  
Hypozentrum 266  
Hysteresekurve 245
- I**  
IceCube-Detektor 229  
Impulserhaltung 99  
Induktionsgesetz 56
- Induktionsherd 245  
Inertialsystem 112, 124  
Inflation 154, 158, 282  
Inflatonfeld 149, 154, 283  
Ingenhousz, Jan 116  
Interferenz 101, 178, 288  
Internationale Raumstation (ISS) 89, 131, 271  
interstellares Medium 14
- J**  
James Webb Space Telescope 17, 145  
Jet 38, 43, 45, 233, 235  
Joint European Torus (JET) 197  
Jupiter 7, 10, 89  
Großer Roter Fleck 97  
Kometeneinschlag 91
- K**  
Kalkspat 69  
Kaltzeit 273  
Kamerlingh Onnes, Heike 202, 204  
Kapillarwelle 100  
Kappa-Mechanismus 26  
Katzenaugennebel 28  
Kepler, Johannes 10, 81, 89  
Kepler'sche Gesetze 10  
Kepler-Weltraumteleskop 17  
Kernfusion 4, 24, 32, 129, 196, 226, 228  
Kernkraft 174, 196  
Kernspaltung 129, 177  
Knotenlinie 109  
Knotenpunkt 108  
Koerzitivkraft 245  
Kohärenz 199, 214  
Kohärenzlänge 214  
Kohäsion 104, 114  
Kollaps (der Wellenfunktion) 192  
Kollision 8, 50  
Komet 91  
Komplementarität 181  
Kontinent 264  
Kontinentaldrift 263, 264  
Kontinentalplatte 266  
Kontinentalscholle 264  
Konvektion 60, 264, 266, 268  
Kopenhagener Interpretation 192  
Korona 5  
kosmische Geschwindigkeit 90  
kosmische Hintergrundstrahlung 144, 147, 148, 152, 157, 162  
kosmische Höhenstrahlung 125, 223, 228, 234  
kosmisches Netz 160, 163  
Kosmologie 143–169  
Kraft 80  
Krebsnebel 34  
Kreisel 186  
  kräftefrei 84  
  mit Drehmoment 86  
Kristall 241, 246, 248, 250  
Kristallgitter 246  
Kristallisation 248  
Kristallisationskeim 249  
Kristallzüchtung 249  
kritische Dichte (des Universums) 152
- L**  
Ladung  
  elektrische 55, 56, 58, 60  
  Farb-, siehe Farbladung  
Lagrangepunkt 9  
laminar 99  
Längenkontraktion 125, 126  
Large Hadron Collider (LHC) 221, 227, 232, 236, 238, 277, 281, 285, 286
- Laser 200, 214, 288  
Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) 167  
Laserkühlung 200  
Lawine 115  
Lemaitre, Georges 146  
Lense-Thirring-Effekt 135  
Lepton 186, 220, 226  
Leuchtdiode 258  
Leuchtkraftklasse 23  
Licht 53, 57, 59, 62, 64, 68, 124, 128, 200, 208, 214  
Lichtablenkung 165  
Lichtbrechung 64, 66, 68  
Lichtgeschwindigkeit 64, 124, 128, 130, 208, 236  
Lichtkegel 126, 132, 158  
Lichtuhr 124  
Linse (optisch) 70  
Liquid Crystal Display (LCD) 253  
Lithosphäre 263, 264  
Loop-Quantengravitation 282  
Lorentz-Attraktor 107  
Lorentzkraft 56, 270  
Lotuseffekt 104  
Luftspiegelung 74  
Lycurguskelch 243
- M**  
Magnet 244  
Magnetfalle 201  
Magnetfeld 4, 37, 38, 45, 186, 203, 208, 235, 268, 270  
Makrozustand 118  
Maldacena, Juan 289  
Masse 128, 130  
Massendefekt 129  
Maxwellgleichungen 55, 56, 58  
Maxwell, James Clerk 56

- Mechanik 79–121  
Meißner-Ochsenfeld-Effekt 203  
Meson 174, 224  
Metamaterialien 76  
Metamerie 62  
Metazentrum 95  
Meteorit 262  
Methanhydrat 94  
Mikroskop  
  Elektronen-. *siehe* Elektronenmikroskop  
  optisches 70  
Rasterelektronen-. *siehe* Rasterelektronenmikroskop  
Rastertunnel-. *siehe* Rastertunnelmikroskop (RTM)  
Mikrostruktur 104  
Mikrowellenstrahlung 77, 148  
Mikrozustand 118  
Milankovitch-Zyklus 272  
Milchstraße 18, 20, 48, 161  
  Zentrum (Sgr A\*) 42  
mittelozeanischer Rücken 264  
MOdified Newtonian Dynamics (MOND) 151  
Mond 8, 90, 92, 215  
Monsterstern 38  
Monsterwelle 102  
M-Theorie 278, 280, 285  
Multiversum 282, 285  
Myon 125, 220, 223, 235
- N**  
NAND-Operation 216  
Nanobot 213  
Nanopartikel 242  
Nanowelt 212  
Navier-Stokes-Gleichungen 96  
Navigationsgerät 140
- NAVSTAR Satelliten 141  
Neddermeyer, Seth 235  
negative absolute Temperatur 120  
negative Masse 137  
negativer Druck 131, 153  
Netzhaut 62  
Neutrino 34, 157, 177, 220, 226, 228  
Neutrino-Hintergrundstrahlung 228  
Neutrinomasse 228  
Neutrinooszillation 228  
Neutron 174, 220, 226  
Neutronenstern 34, 36, 168, 228  
New Gravitational wave Observatory (NGO) 169  
Newton, Isaac 11, 62, 80, 88  
Newton's Gesetze 80  
Newton's Gravitationsgesetz 88  
Nobelpreis 33, 152, 178, 202, 211, 212, 250, 283  
Nordpol  
  geomagnetischer 268  
np-Übergang 256  
Nukleon 174  
Nutation 84, 87
- O**  
Oberflächenspannung 100, 104, 204  
Oberton 108  
OJ 287 43  
Olbers'sches Paradoxon 146  
OLED 259  
Opazität 26  
optisches Gitter 121  
Orionnebel 14, 21
- Pangäa 265
- Parallaxenmethode 40  
Paranuss-Effekt 114  
Partikelhorizont 159  
Pauli-Prinzip 31, 36, 188  
Pendel 82  
Penrose-Parkettierung 251  
Penrose-Prozess 135  
Penrose, Roger 127  
Penterakt 250  
Penzias, Arno 148  
Perpetuum Mobile 119  
Phantominsel 75  
Phasenbeziehung 215  
Phonon 202  
Photoeffekt 178  
Photomultiplier 229  
Photon 62, 128, 177, 178, 186, 201, 214, 221, 222, 238  
Photosphäre 4  
Pierre-Auger-Observatorium 235  
Pion 224  
Pion-Zerfall 129, 223  
Planckfläche 287  
Plancklänge 281, 287, 290  
Planck, Max V  
Planck-Satellit 149  
Planck'sches Wirkungsquantum 178, 186  
Planet 6, 10, 18, 89  
  extrasolarer 16  
planetarischer Nebel 28  
Planetenbahn 10, 89  
Plasma 5, 148, 156, 194, 196, 232, 270  
Plasmalampe 194  
Plasmon 242  
Platte 108  
Plattentektonik 264  
Plejaden 20  
Podolsky, Boris 190  
Poinsot-Konstruktion 85
- Polarisation 68, 253  
Polarlicht 270  
Polarstern 87  
Positron 177, 226, 231  
Potentialbarriere 183  
Potentialtopf 90  
Präzession 86, 135, 186  
  Erdachse 87  
Prisma 66  
Proton 174, 220  
Protonenzerfall 226  
protoplanetare Scheibe 21  
Pulsar 37
- Q**  
Quant 184  
Quantenbit 216  
Quantenchromodynamik (QCD) 233, 289  
Quantencomputer 216  
Quantenfeldtheorie 202, 222, 233, 289  
Quantengravitation 279, 289, 290  
Quantenmechanik 171–216  
  Interpretation 192  
Quantenraumzeit 290  
Quantensprung 175, 181, 184  
Quantenvakuum 139, 206  
Quark 156, 174, 186, 220, 223, 224, 226, 232  
Quark-Gluon-Plasma 157, 232  
Quasar 42, 45, 129, 164  
Quasikristall 250  
Quasiteilchen 242  
Qubit. *siehe* Quantenbit  
Quecksilber 184, 202
- R**  
Radialgeschwindigkeitsmethode 16  
Radioaktivität 174, 176, 183,

- 226, 228  
Radioantenne 58  
Radiostrahlung 37  
Random Walker 117  
Rasterelektronenmikroskop (REM) 208, 210  
Raster tunnelmikroskop (RTM) 183, 210, 213  
Raumblase 136, 283  
Raumkrümmung 133, 136, 152, 155, 167  
Raumladungszone 257  
Raumquantelung 291  
Raumstation 89, 130  
Raumzeit 131, 132, 134, 138, 154, 167, 168, 290  
Raum-Zeit-Diagramm 126, 132  
Raum-Zeit-Krümmung 131, 138  
raumzentriertes Gitter 246  
Rayleigh-Streuung 59  
Refraktion 65, 101  
Regenbogen 66  
Rekombination 256, 258  
Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) 232  
Relativitätstheorie 123–141  
Allgemeine 130, 132, 136, 138, 141, 153, 164, 166, 291  
Spezielle 57, 124, 126, 137, 141, 222  
Remanenz 245  
Renormierung 278  
Resonanz 110  
Resonanzbreite 224  
Resonanzfrequenz 110  
Resonanzkatastrophe 111  
Resonator 214  
Rohrer, Heinrich 211  
Röntgenstrahlung 37  
ROSAT 161  
Rosen, Nathan 190  
Rössler-Attraktor 107  
roter Riese 25, 28, 32  
Rotverschiebung 40, 144, 146, 153, 158, 160  
RR-Lyrae-Sterne 26, 40  
Rückkopplung 97  
Rückstoß 81  
Rutherford, Ernest 174  
**S**  
Sagittarius A\* 42  
Saita 108  
Sand 114  
Satellit 12, 140  
Saturn 270  
Schenkmodell 175  
Schalenstruktur 189  
Scheinkraft 112  
Schiff 94  
Schmaft 80  
Schneeball Erde 272  
Schockfront 49, 51, 235  
Schrieffer, John R. 202  
Schrödinger, Erwin 193  
Schrödingers Katze 192  
Schüttkegel 115  
schwarzes Loch 38, 44, 129, 132, 134, 166, 169, 235  
Entropie und Temperatur 286  
supermassiv 42  
schwarzes Mikroloch 281, 286  
Schwarzschild-Radius 132, 134, 287  
Schwerelosigkeit 130  
Schwerkraft. siehe Gravitation  
Schwerpunkt 95  
Schwingung 58, 82, 108, 110, 181, 214, 242  
Sekundärelektron 208  
selbstorganisierte Kritikalität 115  
Seyfertgalaxie 45  
Shapley-Konzentration 161  
Shechtman, Daniel 250  
Shoemaker-Levy 9 (Komet) 91  
Siebengestirn. siehe Plejaden  
Silberatom 186  
Silizium 254  
Simulation 9, 34, 49, 51, 109, 115, 163, 166, 183, 197, 232, 234, 249, 263, 264, 269, 291  
Sirius B 31  
Skalenfaktor (Universum) 158  
Snellius'sches Brechungsgesetz 64, 68  
SOHO (Solar & Heliospheric Observatory) 5  
Soliton 102, 198  
Sonne 4, 6, 196, 270  
Hertzsprung-Russell-Diagramm 25  
Spektralklasse 23  
Sonneneruption 5, 270  
Sonnenfleck 4  
Sonnensystem 6, 14  
Sonnenwind 7, 14, 269, 270  
Spektralklasse 22  
Spektrallinie 23  
Spektrum 63, 66  
Stern- 22  
Sperrrichtung 257  
Spiegel 72  
Spin 186, 188, 190, 216  
Spiralarm 7, 46, 150  
Stäbchen (Auge) 62  
Standardkerze 27, 33, 40  
Standardmodell 219, 220  
Star Trek 136  
statische Grenze 134  
stehende Welle 108, 181  
Steinhardt, Paul 250  
Steinkohle 273  
Stellerator 196  
Stern 18, 24, 28, 30, 38  
Entstehung 20  
Farbe 22  
Spektrum 22  
veränderlicher 26  
Sternbild 18  
Sternenhimmel 18  
Sternentag 12  
Sternentstehung 20  
Stern-Gerlach-Versuch 186  
Sternhaufen 20, 25, 30  
Stern, Otto 186  
Stimmgabel 111  
Stimmgabel-Diagramm. siehe Hubble-Diagramm  
Störungstheorie 284  
Strahlungsdruck 162  
String 278, 284  
Stringlandschaft 281  
Stringtheorie 278, 280, 284, 289  
Strömungsabriß 99  
Strömungsmechanik 96  
Stückelberg, E. C. G. 231  
Subduktionszone 264  
Sudbury Neutrino Observatory (SNO) 229  
Supererde 17  
superhydrophob 104  
Super-Kamiokande 229  
Superkontinent 265  
Supernova 228, 235  
Kollaps (Typ II) 34, 36, 38, 49, 168  
thermonukleare (Typ Ia) 31, 32, 41, 153  
Superposition 193, 216  
Supersymmetrie 276  
Supraflüssigkeit 204

- Supraleitung 202
- T**
- Tarnvorrichtung 76
- Tauon 220
- Teilchenbeschleuniger 234, 236
- Teilchenjet 233, 235
- Teilchenschauer 235
- Teilchenzerfall 226
- Teleskop 72. siehe auch Hubble-Weltraumteleskop und James Webb Space Telescope
- Temperatur 120, 148, 156, 195, 200, 202, 204
- Temperaturnullpunkt 120
- Termination Shock 15
- Terrell, James 127
- Terrellrotation 126
- Tetrachromat 63
- Theia 8
- Thermodynamik 79–121
- thermonukleare Supernova. siehe Supernova, thermonukleare (Typ Ia)
- Tiefdruckgebiet 113
- Tiefseegraben 264
- Tokamak 196
- Ton 108
- Topologie (der Raumzeit) 138
- Torus 196
- Totalreflexion 65
- Totes Meer 94
- Trägheit 11, 80, 128
- Trägheitsmoment 85
- Trägheitsprinzip 80
- Transitmethode 17
- Trichromat 63
- Trödelprinzip 131
- Tröpfchenmodell 175
- Tropopause 60
- Tscherenkow-Strahlung 229
- Tsunami 77, 102
- T-Tauri-Stern 21
- Tunneleffekt 176, 182, 210
- Turbulenz 72, 97, 98
- Two Micron All Sky Survey (2MASS) 160
- U**
- Überlichtgeschwindigkeit 136, 158
- Uhr 124, 131, 140
- Umpolung (Erdmagnetfeld) 269
- Universum. siehe auch Kosmologie
- Expansion 146, 152, 154, 158, 161, 162
- sichtbares 154, 159
- Unschärferelation 287
- Unsichtbarkeit 76
- Urknaall 154, 231, 232, 285, 291
- Urprall (Big Bounce) 291
- V**
- Vakuum 139, 223
- Vakuumfluktuation 206
- Valenzelektron 254
- variszischer Gebirgszug 265
- Vektorfeld 54
- verborgene Dimensionen 280
- Verschiebungsstrom 56
- Verschiebungssymmetrie 246
- verschränkte Teilchen 191
- Vertex 222
- Verzeichnung 71
- Viele-Welten-Interpretation 193
- vierwertig 254
- Virgo-Galaxienhaufen 161
- virtuelle Teilchen 206, 223, 287
- Viskosität 204, 233
- Void 161, 163
- Vortex 199
- Voyager-Sonden 15
- W**
- Wahrscheinlichkeit 119, 120, 181, 187, 188, 190, 192
- Wahrscheinlichkeitsamplitude 188
- Wärmeleitfähigkeit 205
- Wärmestrahlung 148
- Warmzeit 273
- Warp-Antrieb 136
- Wasserwelle 100, 102
- Wechselwirkung 220, 222
- elektromagnetische 56, 221, 227
- elektroschwache 221, 227
- fundamentale 219, 277, 278, 290
- schwache 221, 226, 228
- starke 174, 221, 224, 233, 289
- Wechselwirkungsprinzip 80
- Weinberg, Steven 283
- Weiss-Bezirk 244
- weißer Zwerg 23, 24, 29, 30, 32
- Welle. siehe auch Wasserwelle
- Druck- 266
- elektromagnetische 57, 58, 62, 178
- Rayleigh- 267
- Scher- 267
- seismische 266
- Wellenfunktion 180, 188, 193, 206, 210
- Wellenpaket 103
- Welle-Teilchen-Dualismus 178
- Weltfläche 126
- Weltformel 275, 278
- Weltlinie 158
- Wilson, Robert 148
- Wirbelstraße 96
- Wirkungsgrad 121
- Witten, Edward 279
- Wolf-Rayet-Stern 39
- Wurmloch 138
- Z**
- Zapfen (Auge) 62
- Zeitdilatation 125, 132, 139
- Zeitmaschine 139
- Zeitrichtung 119
- Zirkumpolarstrom 272
- zweiter Hauptsatz (Thermodynamik) 118
- Zwerggalaxie 47