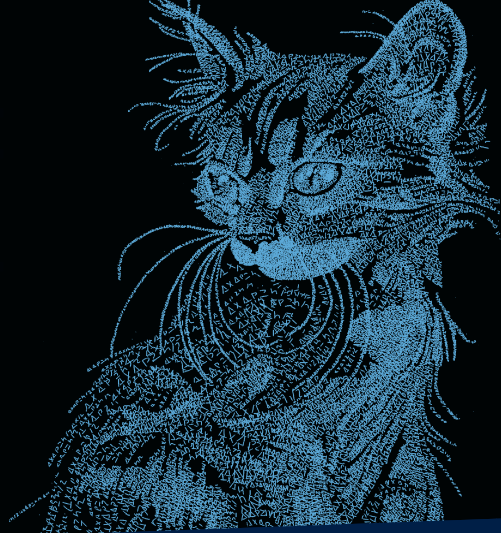


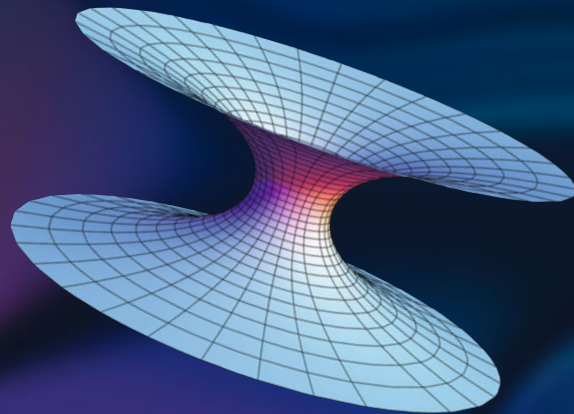


Benjamin Bahr
Jörg Resag
Kristin Riebe



Faszinierende Physik

Ein bebildeter Streifzug
vom Universum
bis in die Welt der Elementarteilchen



 Springer

Faszinierende Physik

Benjamin Bahr · Jörg Resag · Kristin Riebe

Faszinierende Physik

Ein bebildeter Streifzug vom Universum
bis in die Welt der Elementarteilchen

3. Auflage

 Springer

Dr. Benjamin Bahr
benjamin.bahr@desy.de

Dr. Jörg Resag
Leverkusen
www.joerg-resag.de

Dr. Kristin Riebe
Nuthetal
www.kristin-riebe.de

ISBN 978-3-662-58412-5 ISBN 978-3-662-58413-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58413-2>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature, 2013, 2015, 2019
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 dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser
Redaktion: Bernhard Gerl
Projektmanagement: Bianca Alton
Grafiken: Autoren
Satz: Autorensetz, auf der Grundlage der Vorlage von Glaeser/Polthier
Einbandabbildung: Collage aus folgenden Bildern:
Katze: Sienna Morris, www.fleetingstates.com
Gravitationswellen (links oben): T. Dietrich, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno (Max Planck Institute for Gravitational Physics), BAM collaboration
Wurmloch-Raumzeit (Mitte rechts): Benjamin Bahr
Flüssigkristall (unten): Oleg D. Lavrentovich, Kent State University
Einbandgestaltung: deblik, Berlin

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Einleitung

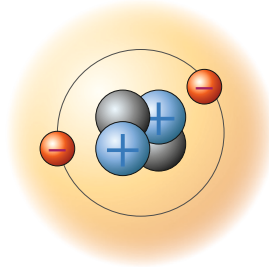
Das vorliegende Buch „Faszinierende Physik“ ist ein Streifzug quer durch die moderne Physik und zugleich eine bebilderte Reise durch die gelösten und ungelösten Rätsel unseres Universums. Sie können das Buch auf einer beliebigen Doppelseite aufschlagen und finden dort ein bestimmtes Thema in sich abgeschlossen 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 von Springer Spektrum mit der Idee für das vorliegende Buch auf uns, das Autorenteam, zukam, waren wir begeistert. Eine ähnliche Idee war im Bereich der Mathematik bereits umgesetzt 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.

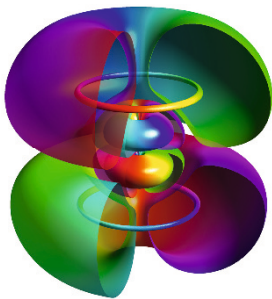
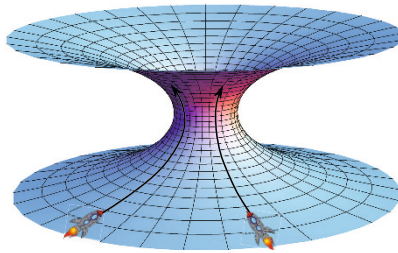
Das zwanzigste Jahrhundert brachte eine Fülle physikalischer Entdeckungen, von denen man im neunzehnten Jahrhundert kaum zu träumen gewagt hatte.

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, schlugen bis zum heutigen Tag fehl. Wie zum Trotz soll Albert Einstein ungläubig „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“.

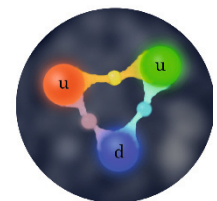


In der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts drang man dann mit immer mächtigeren Teilchenbeschleunigern zunehmend tiefer in die Struktur der Materie vor. Waren aus den Untersuchungen des Atoms zunächst nur drei subatomare Teilchen be-

kannt (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, miteinander 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.

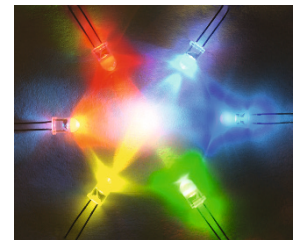
Wir haben vier dieser Bereiche in unser Buch aufgenommen: die Festkörperphysik, welche die physikalischen Eigenschaften von Kristallen und anderen festen Körpern untersucht, die Geophysik, die sich mit dem Aufbau unserer Erde und den darin ablaufenden physikalischen Vorgängen (beispielsweise der Plattentektonik) 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



Vorwort zur dritten Auflage

Seit dem Erscheinen der zweiten Auflage von „Faszinierende Physik“ sind nun bereits dreieinhalb Jahre vergangen, genug Zeit also, um in der neuen, dritten Auflage nicht nur kleinere Fehler zu korrigieren, sondern auch die Themenauswahl zu erweitern. Bei den neu hinzugekommenen Artikeln haben wir dabei nicht nur solche mit aktuellem Bezug gewählt, wie zum Beispiel das der drohenden Erderwärmung oder der Gletscherbewegungen. Wir haben auch solche hinzu-

gefügt, die wir schon immer spannend fanden, die es aber einfach nicht in die bisherigen Auflagen geschafft haben. So befassen wir uns in der vorliegenden Ausgabe zum Beispiel mit der Frage, mit welchen Manövern ein Raumschiff im Sonnensystem von Planet zu Planet reist, was es mit der Zeit selbst auf sich hat, wie die Natur rechts und links unterscheidet und wie man mit dem Prinzip der kleinsten Wirkung die Naturgesetze formulieren kann.

Auch die jüngsten Ereignisse in der Physik haben die Neuauflage beeinflusst: Im September 2015 wurden die seit Langem postulierten Gravitationswellen endlich nachgewiesen, wofür 2017 der Nobelpreis für Physik vergeben wurde. Durch das neue Gebiet der Gravitationswellenastronomie lernen wir seither in einem rasanten Tempo immer mehr über unser Universum. Um dem Rechnung zu tragen, haben wir nicht nur einen neuen Artikel zu diesem Thema geschrieben, sondern auch die bisherigen, die sich damit beschäftigt haben, auf den neuesten Stand gebracht.

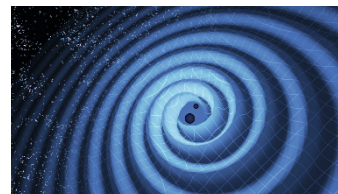
Sogar in den Grundlagen der Physik hat sich einiges getan: So hat man sich darauf geeinigt, die fundamentalen physikalischen Maßeinheiten des „Système International d’unités“ (auch SI-Einheiten genannt) anhand von Naturkonstanten neu zu eichen. Grund genug, im

neuen Artikel zu Maßeinheiten einmal genauer darauf einzugehen, wie Physiker eigentlich physikalische Größen festlegen.

Wir hoffen, Sie werden bei der Lektüre genau so viel Spaß haben, wie wir es beim Schreiben hatten. Unser Dank an dieser Stelle gilt Frau Lisa Edelhäuser, die die Entstehung dieser Auflage begleitet und betreut hat, sowie den vielen Lesern, die uns aufmerksam immer wieder auf kleinere Fehler in den bisherigen Texten hingewiesen haben.

Benjamin Bahr
Jörg Resag
Kristin Riebe

August 2018



Über die Autoren



Benjamin Bahr ist promovierter Physiker und forscht im Bereich der Schleifen-Quantengravitation. In seiner Freizeit liebt er es, Physik so zu erklären, dass alle sie verstehen – und tritt damit auch schon mal im Theater auf.

bbahr26@gmail.com



Jörg Resag hat in theoretischer Teilchenphysik promoviert und ist als erfolgreicher Sachbuchautor bekannt für seine leicht verständlichen und anschaulichen Erklärungen wissenschaftlicher Sachverhalte in Büchern und im Internet.

www.joerg-resag.de



Kristin Riebe ist promovierte Astrophysikerin und erfolgreiche Grafikerin, die dem Buch seine besondere Struktur verliehen hat und es um klare und faszinierende Bilder und Grafiken ergänzte.

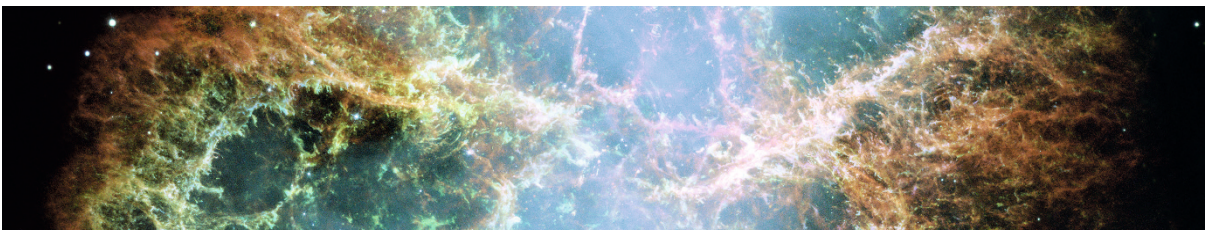
www.kristin-riebe.de

Inhalt

Einleitung.....	V
Inhalt.....	IX



1 Astronomie und Astrophysik.....	1
Die Sonne und ihr Magnetfeld – Sonnenflecken und Flares.....	2
Die Entstehung des Sonnensystems – Akkretionsscheiben und Protoplaneten	4
Die Entstehung des Mondes – Wie der Einschlag des Planeten Theias den Mond erschuf.....	6
Vulkane im Sonnensystem – Gezeitenkräfte, Pizza-Mond und Kryovulkane.....	8
Die Kepler'schen Gesetze – Wie sich die Planeten bewegen.....	10
Satelliten mit geosynchronen Orbits – Kunstvolle Schleifen am Himmel	12
Raketenmanöver – Der Tanz durch das Sonnensystem	14
Der Rand des Sonnensystems – Wo genau zieht man die Grenze?	16
Extrasolare Planeten – Die Suche nach Planeten jenseits des Sonnensystems	18
Der Sternenhimmel – Sterne, Planeten und die Milchstraße.....	20
Die Geburt von Sternen – Wie kontrahierende Gaswolken zu Sternen werden.....	22
Spektralklassen – Welche Farbe haben Sterne?.....	24
Das Hertzsprung-Russell-Diagramm – Temperatur, Leuchtkraft und Lebensweg der Sterne	26
Cepheiden – Sterne mit Herzschlag	28
Planetarische Nebel – Das Ende gewöhnlicher Sterne	30
Weißer Zwerge – Ausgebrannte gewöhnliche Sterne	32
Thermonukleare Supernovae – Wenn weißer Zwerge zu nuklearen Bomben werden.....	34
Kollaps-Supernovae – Das Ende massereicher Sterne	36



Neutronensterne – Ausgebrannte massereiche Sterne	38
Monstersterne und Hypernovae – Das kurze Leben und explosive Ende sehr massereicher Sterne	40
Standardkerzen – Leuchttürme im All	42
Supermassive schwarze Löcher – Schwerkraftmonster in den Zentren der Galaxien.....	44
Aktive Galaxien – Intergalaktische magnetische Energieschleudern.....	46
Galaxientypen – Die Vielfalt der Galaxien	48
Das Schicksal der Milchstraße – Wenn Milchstraße und Andromedagalaxie sich treffen	50
Verschmelzende Galaxien – Kollision der Giganten	52

2 Elektromagnetismus und Licht..... 55

Vektorfelder und Feldlinien – Richtungsweisende Hilfszeichnungen	56
Die elektromagnetische Wechselwirkung – Maxwells Gleichungen der elektromagnetischen Felder.....	58
Hertz'scher Dipol – Schwingen und streuen	60
Gewitter – Blitze, Elmsfeuer und Rote Koboide	62



Farben – Wie bunt ist die Welt?	64
Lichtbrechung – Licht auf krummen Touren	66
Regenbogen – Ästhetische Lichtbrechung an Wassertropfen	68
Anisotrope Medien – Doppelt sehen ohne Alkohol	70
Optische Linsen – Abbildungen und Abbildungsfehler	72
Adaptive Optiken – Intelligente Spiegel	74
Luftspiegelungen – Fliegende Holländer, Fata Morganas und Phantomsinseln	76
Tarnvorrichtungen – Metamaterialien und der Traum von der Unsichtbarkeit	78

3 Mechanik und Thermodynamik 81

Newtons Gesetze der Mechanik – Warum bewegt sich ein Körper?.....	82
Das Prinzip der kleinsten Wirkung – ... und das Noether-Theorem.....	84
Das Foucault'sche Pendel – Der Nachweis der Erdrotation	86
Kräftefreie Kreisel – Frei rotierende Körper in der Schwerelosigkeit.....	88
Kreisel mit äußerem Drehmoment – Präzession und Nutation	90



Newtons Gravitationsgesetz – Von fallenden Äpfeln und kreisenden Planeten..... 92
 Kosmische Geschwindigkeiten – Aufstieg und Absturz im Schwerefeld der Himmelskörper..... 94
 Die Gezeiten – Wie der Mond Ebbe und Flut hervorbringt 96
 Das archimedische Prinzip – Oder warum Schiffe im Bermuda-Dreieck untergehen können..... 98
 Die Physik der Strömungen – Wirbel und Turbulenzen..... 100
 Warum fliegt ein Flugzeug? – Bernoulli oder Newton? 102
 Gewöhnliche Wasserwellen – ... und ihre besonderen physikalischen Eigenschaften 104
 Besondere Wasserwellen – Tsunamis, Solitonen, Monsterwellen 106
 Der Lotuseffekt – Tauziehen zwischen Kohäsion und Adhäsion..... 108
 Chaotische Bewegungen – Deterministisch, aber unvorhersehbar 110
 Schwingende Saiten und Platten – Kann man Töne sehen?..... 112
 Resonanz – Wenn man beim Schwingen die richtige Note trifft..... 114
 Scheinkräfte – Wenn wir Kräfte spüren, ohne eine Ursache zu finden 116
 Granulare Materie – Flüssig und fest zugleich..... 118
 Brown'sche Bewegungen – Das unvorhersagbare Verhalten von Staubkörnern, Pollen und Börsenkursen.... 120
 Entropie und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik – Was der Zeit eine Richtung gibt 122
 Dampfmaschine & Co – Wie gut kann eine Wärmekraftmaschine sein? 124
 Negative absolute Temperaturen – Heißer als heiß..... 126

4 Relativitätstheorie 129

Was ist Zeit? – Eine hartnäckige Illusion 130
 Lichtgeschwindigkeit und Spezielle Relativitätstheorie – Licht kann man nicht überholen 132
 Terrellrotation – Von hinten durch die Brust ins Auge 134



$E=mc^2$ – Masse ist eingesperrte Energie 136
 Gravitation und Allgemeine Relativitätstheorie – Einsteins Theorie der Gravitation 138
 Die Raumzeit nicht-rotierender schwarzer Löcher – Im Sog von Raum und Zeit..... 140
 Die Raumzeit rotierender schwarzer Löcher – Im Strudel von Raum und Zeit..... 142
 Der Warp-Antrieb – Wie man schneller als das Licht sein könnte..... 144
 Wurmlöcher – Abkürzungen durch Raum und Zeit..... 146
 GPS – Ortsbestimmung durch Satellitensignale..... 148

5 Kosmologie.....151

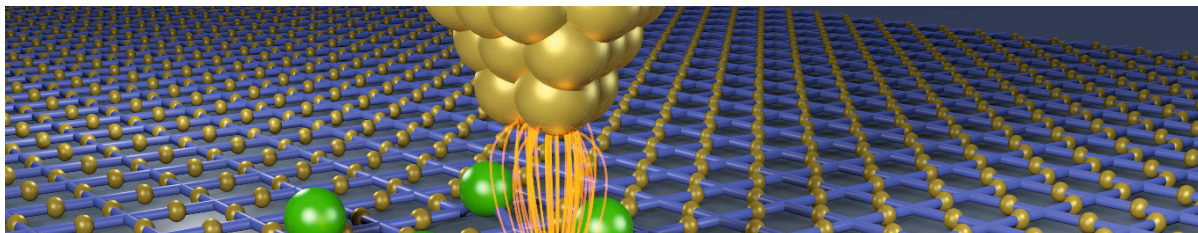
Ein tiefer Blick ins Universum – Wenn das Hubble-Teleskop in die Vergangenheit schaut..... 152
 Das expandierende Universum – Warum ist der Nachthimmel dunkel?..... 154
 Die kosmische Hintergrundstrahlung – Mikrowellen aus der Frühzeit des Universums..... 156
 Dunkle Materie – Das Universum ist schwerer als es aussieht..... 158
 Beschleunigte Expansion und dunkle Energie – Die fehlende Materieform im Universum 160



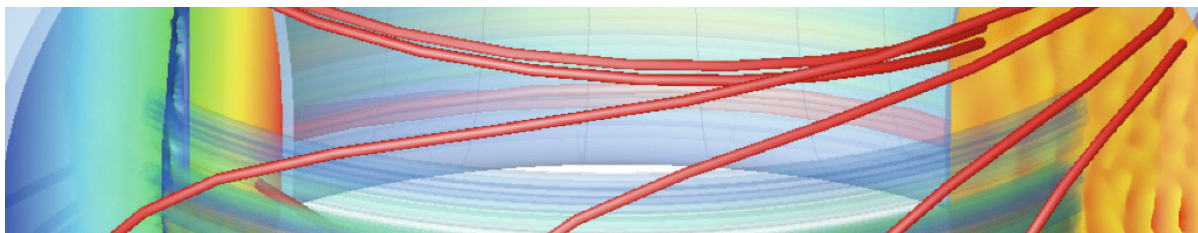
Urknall und inflationäre Expansion – Warum der Raum flach und der Hintergrund überall gleich kalt ist... 162
 Die Entstehung der Materie – Was ab 10^{-10} Sekunden nach dem Urknall geschah..... 164
 Kosmische Horizonte – Oder wie weit wir durch Raum und Zeit sehen können..... 166
 Strukturen im Kosmos – Ein Netzwerk aus Materie 168
 Entstehung kosmischer Strukturen – Die Macht der Gravitation 170
 Gravitationslinsen – Wie man mit scheinbar verzerrten Galaxien das Universum wiegt 172
 Gravitationswellen – Rhythmische Verzerrungen von Raum und Zeit..... 174
 Indirekter Nachweis von Gravitationswellen – Kosmische Signale zur Messung der Raumzeit 176
 Direkter Nachweis von Gravitationswellen – Wie man winzigste Verzerrungen misst 178

6 Atome und Quantenmechanik.....181

Das Bohr'sche Atommodell – Wie kann man sich ein Atom vorstellen? 182
 Atomkerne – Seit hundert Jahren bekannt und doch nicht im Ganzen verstanden..... 184
 Radioaktiver Zerfall – Atomkerne aus dem Gleichgewicht 186
 Welle-Teilchen-Dualismus – Teilchen bewegen sich in Wellen..... 188

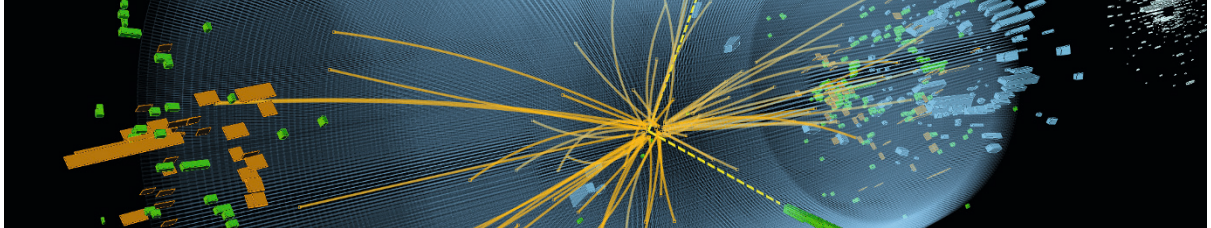


Wellenfunktion – Verschmierte Teilchen	190
Der Tunneffekt – Teilchen ohne Aufenthaltserlaubnis	192
Der Franck-Hertz-Versuch – Energiesprünge in Atomen	194
Der Spin eines Teilchens – Quantisiertes Kreiseln	196
Das Pauli-Prinzip – Warum Elektronen sich gegenseitig meiden.....	198
EPR-Experiment und Bell'sche Ungleichung – Ist die Quantenmechanik unvollständig?	200
Quantenteleportation – Beam me up, Scotty!.....	202
Die Interpretation der Quantenmechanik – Schrödingers Katze und Everetts viele Welten	204
Plasma – Der vierte Aggregatzustand	206
Fusionsreaktoren – Hightech-Energie aus dem Sonnenfeuer.....	208
Phasenübergänge – Fest, flüssig, gasförmig – und darüber hinaus!.....	210
Bose-Einstein-Kondensate – Atome im quantenmechanischen Gleichschritt	212
Topologische Zustände der Materie – Windungen und Wirbel.....	214
Laserkühlung – Warum Gase kälter werden können, wenn man sie mit Licht bestrahlt	216
Supraleitung – Widerstand ist zwecklos	218
Supraflüssigkeiten – Nasser als nass	220
Quantenvakuum – Wie stark drückt das Nichts?.....	222
Elektronenmikroskopie – Mikroskope für den Nanometerbereich	224



Rastertunnelmikroskopie – Wie man einzelne Atome sichtbar macht.....	226
Nanowelten – Ganz unten ist eine Menge Platz.....	228
Laser – Lichtteilchen im Gleichschritt	230

Quantencomputer – Quantenbits: Ja, Nein und Vielleicht 232
 SI-Einheiten – Maßstäbe für die Welt..... 234



7 Welt der Elementarteilchen.....237
 Das Standardmodell der Teilchenphysik – Quarks, Leptonen und drei Wechselwirkungen..... 238
 Feynman-Diagramme – Die Sprache der relativistischen Quantenfeldtheorie..... 240
 Die starke Wechselwirkung – Die Kraft, die Quarks verbindet 242
 Die schwache Wechselwirkung – Teilchenzerfälle, W-, Z- und Higgs-Bosonen..... 244
 Neutrinos – Flüchtige Geisterteilchen 246
 Antimaterie – Spiegelbild und Vernichter der Materie 248
 Verletzung der Spiegelsymmetrie – Die gespiegelte Welt ist anders..... 250
 Quark-Gluon-Plasma – Wenn Protonen und Neutronen schmelzen 252
 Die kosmische Höhenstrahlung – Energiereicher als im weltgrößten Beschleuniger..... 254
 Der Large Hadron Collider (LHC) – Der mächtigste Teilchenbeschleuniger, der je gebaut wurde..... 256
 Die Entdeckung des Higgs-Teilchens – Ein Meilenstein der Teilchenphysik 258

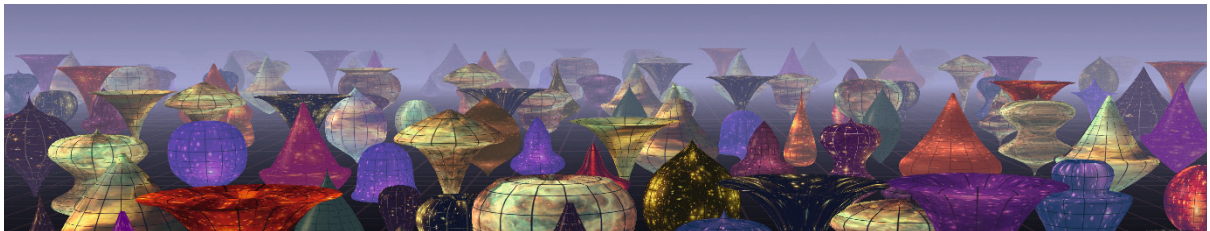
8 Kristalle und andere feste Stoffe.....261
 Plasmonen – Brilliantes Quantenleuchten 262
 Ferromagnetismus – Elementarmagnete: gemeinsam sind sie stark..... 264
 Kristallgitter – Die vierzehn verschiedene Arten, den Raum periodisch zu füllen..... 266
 Kristallisation – Vom Keim zum ausgewachsenen Kristall..... 268
 Quasikristalle – Nicht periodisch und doch symmetrisch..... 270
 Flüssigkristalle – Ordentlich nass 272
 Elektronen in Halbleiterkristallen – Vom Isolator zum Leiter mit einer Prise Arsen 274
 Halbleiterdioden – Wie man elektrische Einbahnstraßen baut 276
 Leuchtdioden – Leuchtende Kristalle und biegsame Bildschirme..... 278

9 Geophysik.....281
 Der innere Aufbau der Erde – Eine Reise in die Unterwelt..... 282
 Die Drift der Kontinente – Konvektionsströme und Plattentektonik..... 284

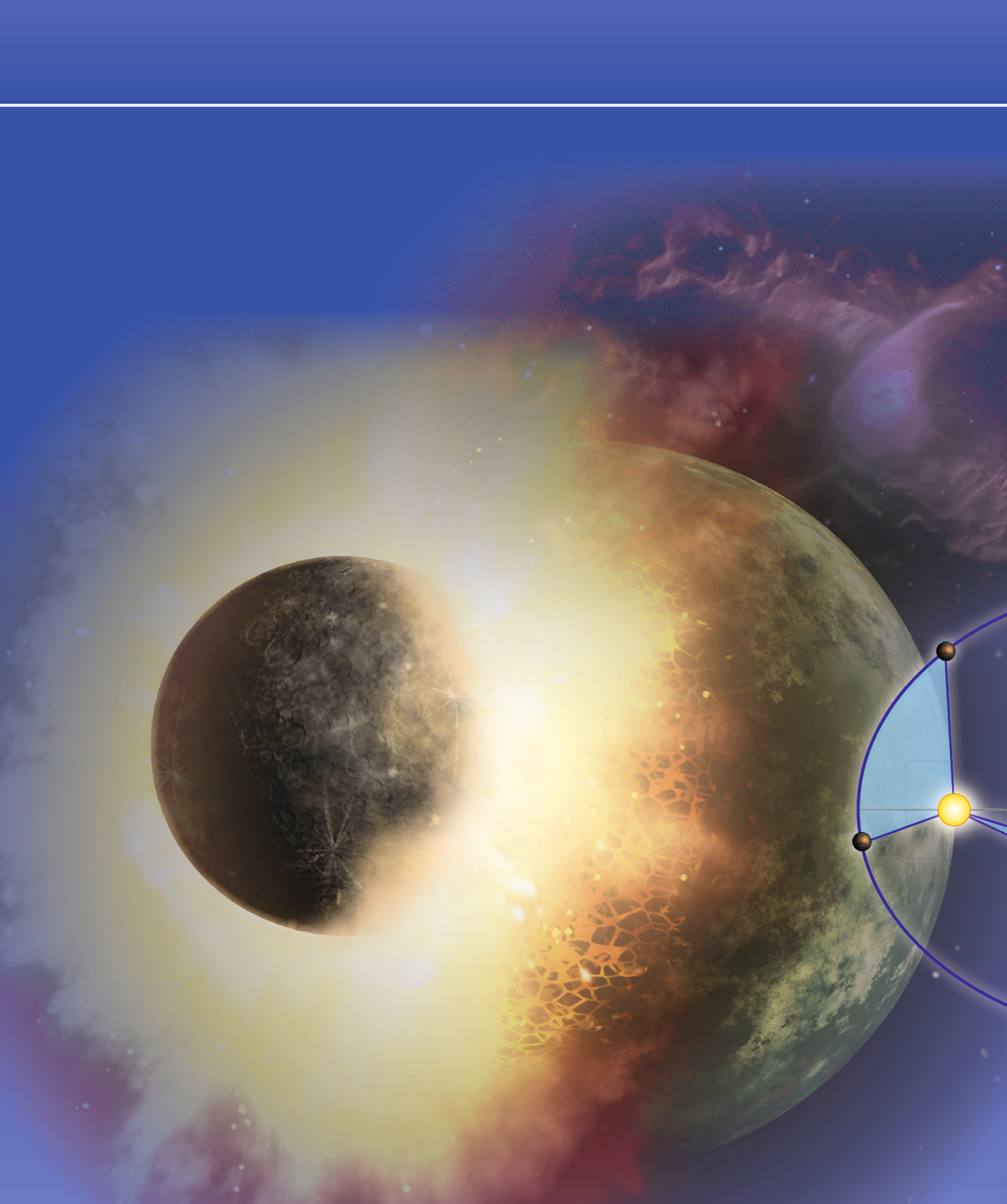
Isostasie – Was Kontinente und Eisberge gemeinsam haben 286
 Erdbeben und seismische Wellen – Wenn Kontinentalplatten sich verhaken 288
 Der Erdkern als Quelle des Erdmagnetfelds – Der innere Geodynamo unserer Erde 290
 Erdmagnetfeld und Polarlichter – Wenn der Sonnenwind den Himmel zum Leuchten bringt 292
 Eiszeiten und Milankovitch-Zyklen – Warum gibt es Eiszeiten? 294
 Gletscherbewegungen – Wandernde Riesen 296
 Globale Erwärmung – Wie Treibhausgase unsere Erde aufheizen 298

10 Grenzen des Wissens 301

Supersymmetrie – Auf der Jagd nach den Superpartnern 302
 Stringtheorie und M-Theorie – Auf der Suche nach der Weltformel 304
 Verborgene Dimensionen – Wie viele Dimensionen hat der Raum? 306
 Multiversum und anthropisches Prinzip – Hinter dem Horizont geht's weiter 308
 Branenwelten – Die Stringtheorie enthält mehr als Strings 310
 Entropie und Temperatur schwarzer Löcher – Schwarze Löcher sind nicht vollkommen schwarz 312
 Das holografische Prinzip – Ist unsere Welt ein Hologramm? 314
 Loop-Quantengravitation – Quanten der Raumzeit 316



Bildnachweis 318
Index 325



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 Aufblitzen 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

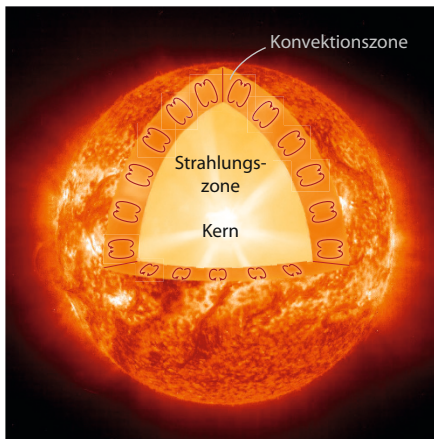
Sonnenflecken und Flares

Unsere Sonne ist eine riesige Gaskugel aus rund 73,5 % Wasserstoff, 25 % Helium und 1,5 % sonstiger Elemente, in deren innerstem 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-Gasgemisch, aus dem die Sonne besteht, liegt in der Sonne in ionisierter Form als Plasma (\downarrow) vor, sodass es elektrisch leitend ist. Ähnlich wie im flüssigen äußeren Erdkern entsteht daher auch in der Sonne durch den sogenannten *Dynamo*effekt ein Magnetfeld, das analog zum Erdmagnetfeld (\downarrow) meist annähernd eine Dipolstruktur ähnlich wie bei einem Stabmagneten aufweist. Während sich das Erdmagnetfeld in unregelmäßigen Abständen im Mittel ungefähr alle 250 000 Jahre umpolt, geschieht dies bei der Sonne wesentlich schneller: ungefähr alle elf Jahre, so beispielsweise im Jahr 2000.

Während der Umpolungsphase werden Magnetfeldlinien (\downarrow) 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. 206

Der Erdkern als Quelle des Erdmagnetfelds → S. 290

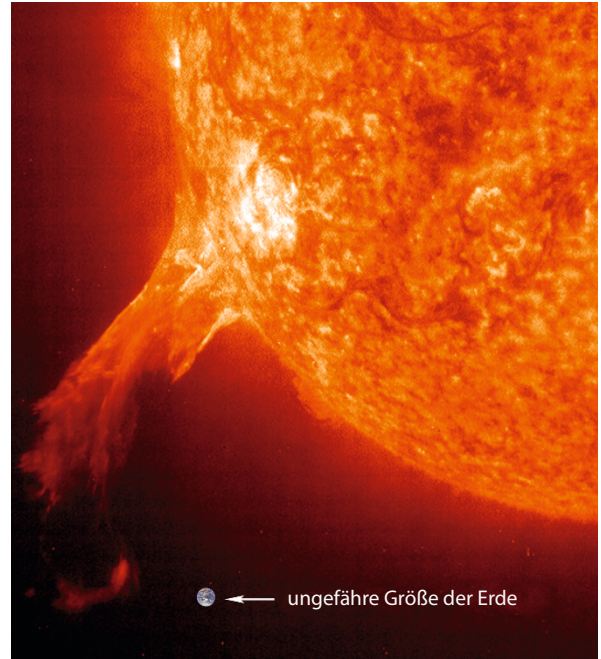
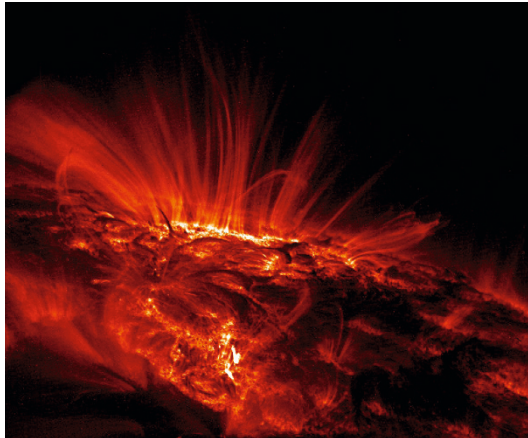
Vektorfelder und Feldlinien → S. 56

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 Zerreißen in den Weltraum hinausgeschleudert werden – man spricht dann von *Sonneneruptionen* oder *Flares*.

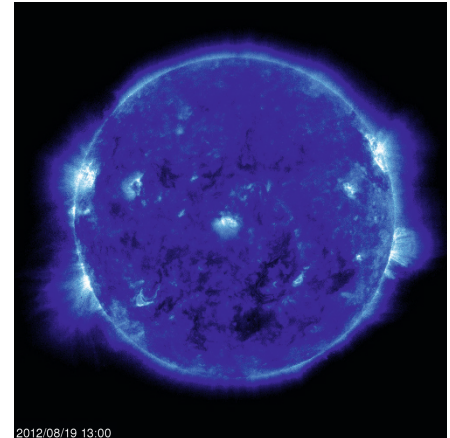
Die Struktur der Magnetfelder in der Chromosphäre und Korona kann man gut auf den Bildern erkennen, die die Sonne im extrem ultravioletten Spektralbereich ihres Lichts zeigen, das von sehr heißem Plasma ausgesendet wird. Das Bild unten rechts stammt von der SOHO-Sonnenforschungs-sonde und zeigt die extrem 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 Spektralbereich

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



UV-Aufnahme einer Sonneneruption im Juli 2002



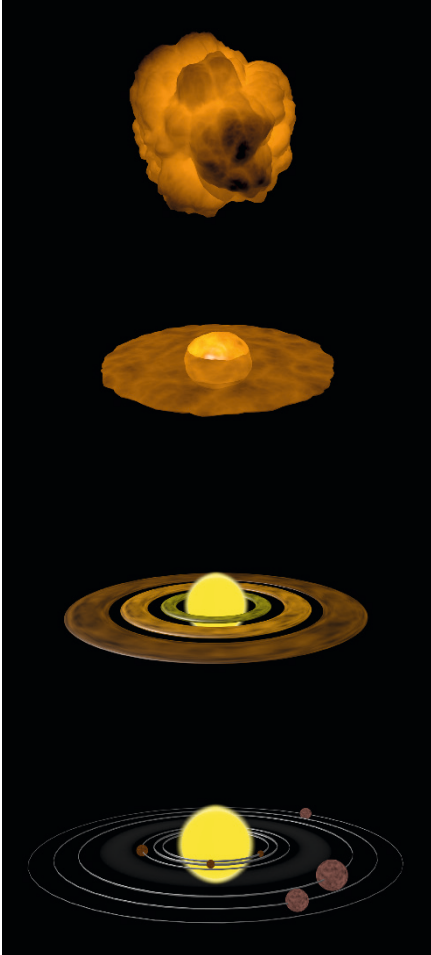
Erdmagnetfeld und Polarlichter → S. 292

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



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 zusammensogen 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 verschmelzen 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.

Kollaps-Supernovae → S. 36

Thermonukleare Supernovae → S. 34

Scheinkräfte → S. 116

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 Lichtjahren 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 Sternsystemen aufgeworfen werden.

Der Rand des Sonnensystems → S. 16

Extrasolare Planeten → S. 18

A. Unsöld, B. Baschek *Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik* Springer Verlag, 7. Auflage 2002



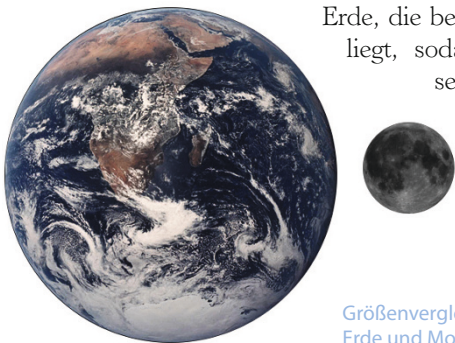
Die Entstehung des Mondes

Wie der Einschlag des Planeten Theias den Mond erschuf

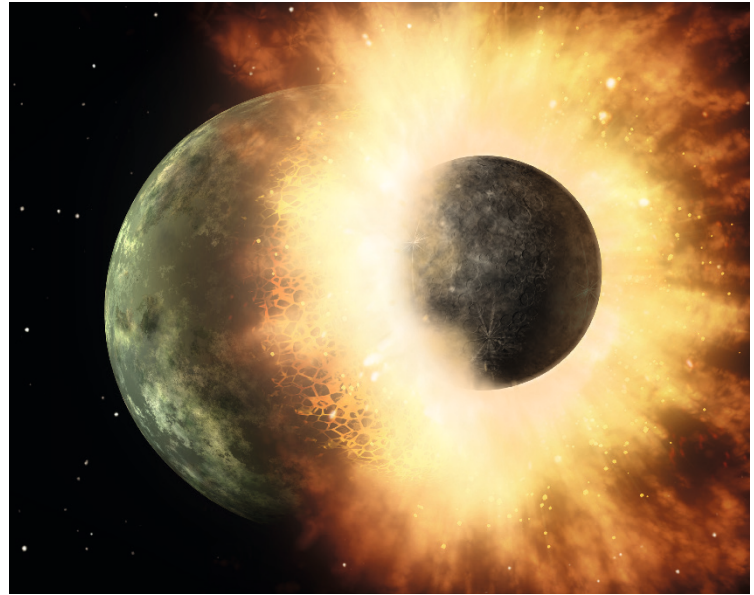
In unserem Sonnensystem besitzt nur die Erde einen vergleichsweise großen Mond, wenn man ihn in Relation zu seinem Planeten setzt: Der Monddurchmesser liegt bei rund 0,27 Erddurchmessern. Merkur und Venus haben dagegen gar keine Monde, der Mars besitzt zwei kleine Monde (Phobos und Deimos), die eigentlich nur 10 bis 30 km 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 Kollisionszenario 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

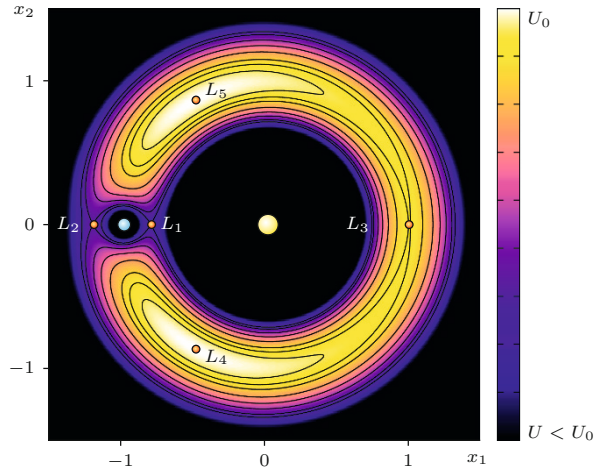
Die Entstehung des Sonnensystems \rightarrow S. 4

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](http://www.youtube.com/watch?v=gVrJidulTJc)

derselben Umlaufbahn neben der Erde an einem der sogenannten *Lagrangepunkte* L_4 oder L_5 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 Lagrangepunkten L_4 und L_5 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 unseren 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 Lagrangepunkt 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-

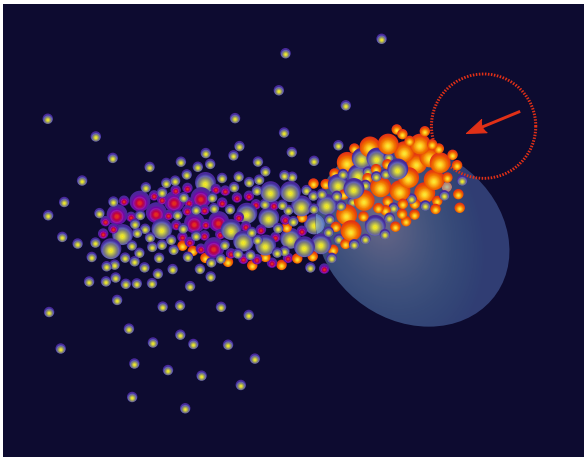


Die Lagrangepunkte im Erde-Sonne-System. Die Sonne befindet sich in der Mitte, die blaue Kugel entspricht der Erde.

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 (↓) 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. 96

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



Vulkane im Sonnensystem

Gezeitenkräfte, Pizza-Mond und Kryovulkane



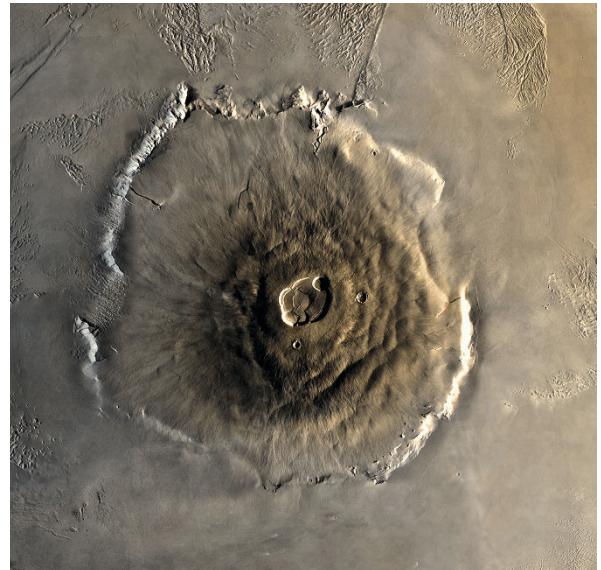
Vulkan der Insel White Island, Neuseeland

Sucht man in unserem Sonnensystem nach Vulkanen, so denkt man zuerst an unsere Erde. In ihrem Inneren ist wegen ihrer glühend-heißen Entstehungsgeschichte sowie radioaktiver Zerfälle genügend Wärmeenergie vorhanden, um jedes Jahr viele von ihnen ausbrechen zu lassen. Die größten dieser Vulkane – die sogenannten *Supervulkane* – können bei ihrem Ausbruch sogar gefährliche Klimakatastrophen hervorrufen. So wurde das größte globale Massenaussterben am Ende des Erdzeitalters Perm vor rund 250 Millionen Jahren (also noch vor dem Auftauchen der Dinosaurier) vermutlich durch massive Vulkanausbrüche im heutigen Sibirien ausgelöst.

Auch auf anderen Himmelskörpern gibt es Vulkane. Besonders eindrucksvoll ist der Marsvulkan Olympus Mons, der mit 26 km Höhe zugleich der größte Berg im Sonnensystem ist. Ob Olympus Mons noch aktiv ist, weiß man nicht – gut möglich, dass der Mars in seinem Inneren bereits zu kalt für weitere Ausbrüche ist.

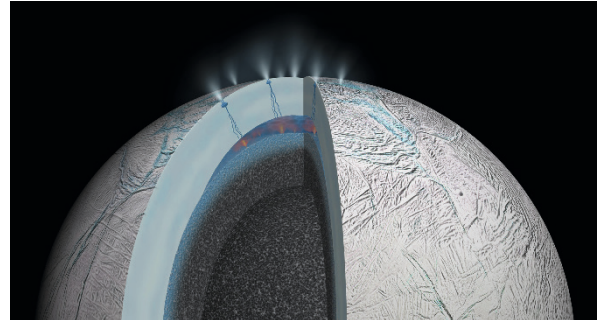
Jede Menge aktive Vulkane gibt es an einem anderen Ort im Sonnensystem: dem Jupitermond Io. Die Gezeitenkräfte, die der nahe Gasriese auf Io ausübt, sind tausendfach stärker als die Gezeitenkräfte, die der Mond auf unserer Erde verursacht und damit Ebbe und Flut hervorruft (↓). Ios enge, leicht elliptische Umlaufbahn lässt seinen Abstand zu Jupiter leicht schwanken, sodass die veränderlichen Gezeitenkräfte den kleinen Mond mal stärker und dann wieder schwächer in die Länge ziehen. Das Innere von Io wird so ständig durchgeknetet und aufgeheizt, was zu einem extrem ausgeprägten Vulkanismus führt.

Der Marsvulkan Olympus Mons

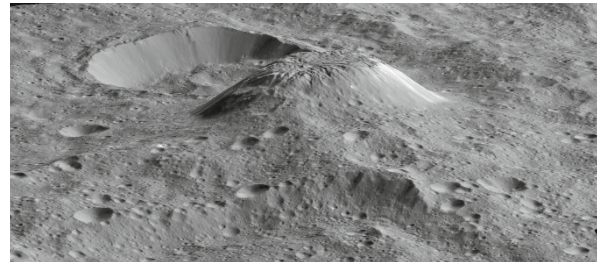


Die ausgestoßene Lava enthält neben flüssigen Gesteinen auch gelben Schwefel und seine Verbindungen. Sie überziehen den Mond mit einem bunten Flickenteppich, was ihm den Spitznamen „Pizza-Mond“ eingebracht hat.

Eine ganz andere Art des Vulkanismus wurde auf dem Saturnmond Enceladus entdeckt. Die Vulkane dieses Eismondes speien keine glühende Lava, sondern stoßen eine Mischung aus aufgeschmolzenen Substanzen seines Eispanzers wie Wasser, Kohlendioxid, Methan und Ammoniak aus. Vermutlich liefern auch hier variierende Gezeitenkräfte die Energie für diese Ausbrüche. Im Jahr 2005 konnte die Cassini-Sonde die Aktivität dieser *Kryovulkane* direkt fotografieren und so im Bild nachweisen. Das ausgestoßene Material entkommt zum Teil in den Weltraum und bildet dort den sogenannten E-Ring des Saturns.

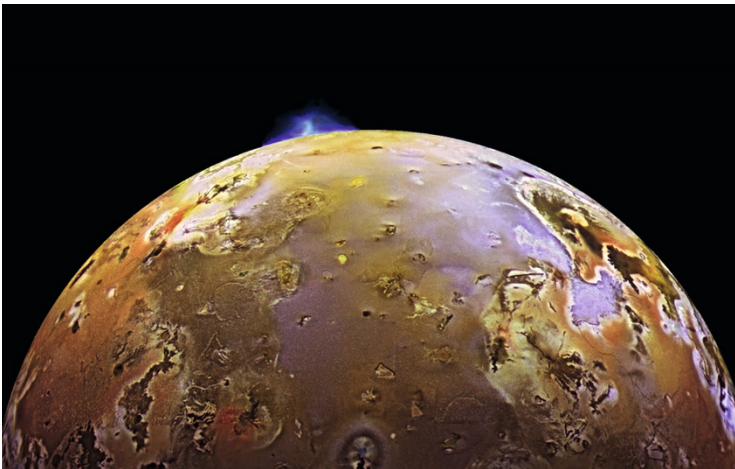


Kryovulkane auf Enceladus (künstlerische Darstellung)



Ahuna Mons auf dem Zwergplaneten Ceres

Vulkanausbruch auf Io



Indirekte Nachweise für Kryovulkane findet man auf vielen vereisten Himmelskörpern. Auf dem größten Saturnmond Titan wurden vulkanartige Eisformationen entdeckt, ebenso auf dem Zwergplaneten Pluto. Sogar auf dem Zwergplaneten Ceres, der im Asteroidengürtel seine Bahnen zieht, wurde ein etwa 20 km breiter und gut 4 km hoher Berg entdeckt, bei dem es sich wahrscheinlich um einen Kryovulkan handelt. Damit wäre dieser Ahuna Mons genannte Berg der sonnennächste bekannte Kryovulkan.

Julia Calderone *Io Erupts* NASA, <https://svs.gsfc.nasa.gov/11455>, 2014

Dirk Eidemüller *Gezeitenkräfte erzeugen Eisfontänen auf Enceladus* Welt der Physik, www.weltderphysik.de, 2013

Rainer Kayser *Kryovulkanismus auf Ceres* Welt der Physik, www.weltderphysik.de, 2016



Die Kepler'schen Gesetze

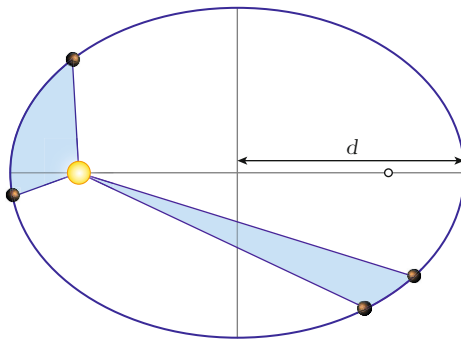
Wie sich die Planeten bewegen



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).

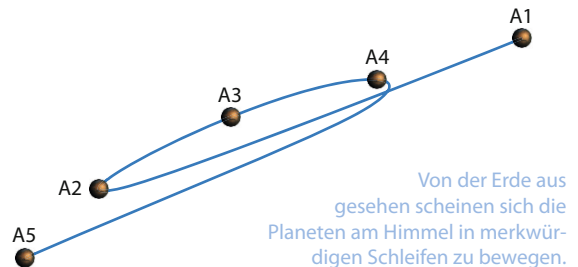
Erst nach jahrelangen mühsamen Berechnungen auf Basis detaillierter Beobachtungsdaten seines Vorgängers Tycho Brahe (1546 – 1601) und nach manchem Irrweg war es Kepler gelungen, diese beiden Gesetze zu ermitteln. Im Lauf der nächsten zehn Jahre entdeckte er durch eingehende Analyse der Bahndaten ein 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.

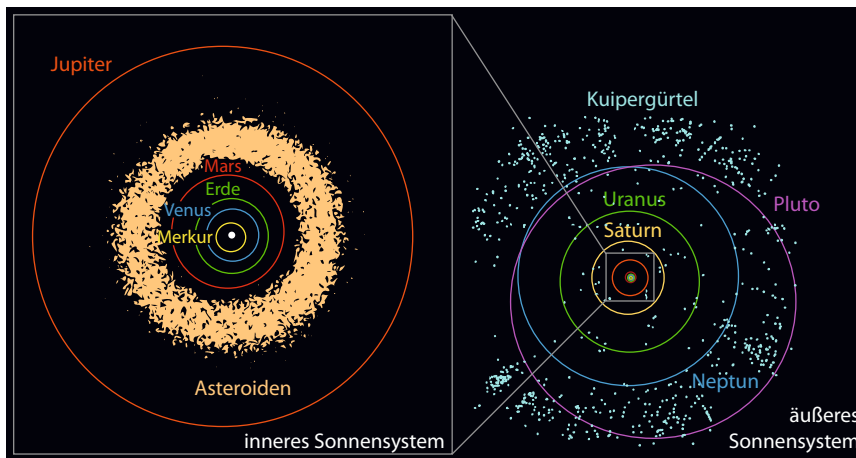
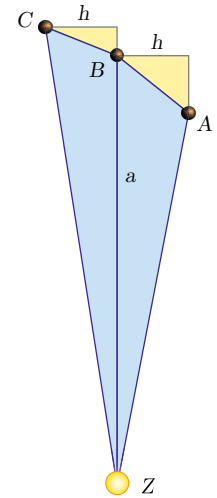
So benötigt beispielsweise der Jupiter 11,863 Erdenjahre für einen Umlauf, und die große Halbachse seiner Bahn ist entsprechend $11,863^{2/3} = 5,2$ -mal so groß wie die der Erde.



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 mitreißt 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.



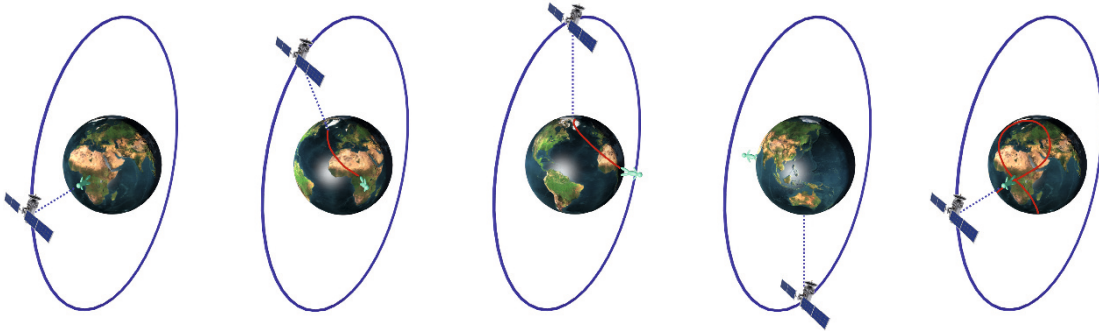
Das dritte Kepler'sche Gesetz ergibt sich schließlich aus der Balance zwischen Fliehkraft und Gravitation, nach der ein Planet sich beispielsweise bei $2^2 = 4$ -facher Vergrößerung der Bahn nur noch halb so schnell bewegt und deshalb für den viermal längeren Weg die $2^3 = 8$ -fache Zeit benötigt.

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 er 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.

Die Bahnkurve, die ein geosynchroner Satellit über den Himmel zieht, erscheint Beobachtern auf der Erde wie eine geschwungene Acht.

Im Allgemeinen kann eine geosynchrone Bahn aber auch elliptisch sein, und/oder in einer Ebene stattfinden, die relativ zur Äquatorebene geneigt ist (↓). 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

Umlaufbahnen: Raketenmanöver → S. 14

Die Kepler'schen Gesetze → S. 10

Wikipedia *Liste der geostationären Satelliten*

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).

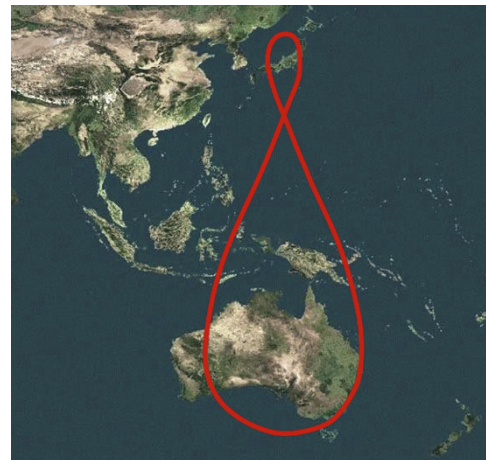
Der zweite anschauliche Fall ist ein Satellit auf einer Polarbahn, d. h. auf einem Kreis um die Erde, der allerdings in einer Ebene senkrecht zur Äquatorebene liegt. Steht ein solcher Satellit mittags über einem Punkt am Äquator und bewegt sich von da direkt zum Nordpol, sieht ein an diesem Punkt stehender 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-Autor 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, SYNGOM 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

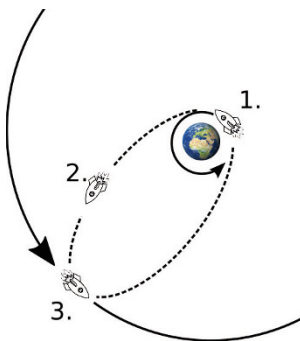


Raketenmanöver

Der Tanz durch das Sonnensystem

Alles im Sonnensystem (\downarrow) dreht sich umeinander. Die Planeten kreisen um die Sonne, Monde kreisen um Planeten, und auch künstliche Satelliten wie die des GPS (\downarrow) umrunden unsere Erde. Selbst die Sonne steht nicht still am Firmament, sondern umrundet das Zentrum der Milchstraße (\downarrow) einmal alle ungefähr 225 Millionen Jahre. Das sich gegenseitige Umkreisen der Planeten, Monde und Kometen wird durch zwei wesentliche physikalische Gesetze bestimmt: die Erhaltungssätze der Energie und des Drehimpulses (\downarrow). Es ist das Wechselspiel dieser beiden Gesetze, das sämtliche Bewegungen der Himmelskörper umeinander bestimmt. Selbst die Flugbahnen von Raketen, Raumschiffen und Sonden folgen streng diesen Gesetzmäßigkeiten.

Für die Navigation durch das Sonnensystem gibt es mehrere Manöver, die ein Raumschiff ans Ziel bringen können. Zum einen gibt es den sogenannten *Hohmann-Transfer*, der benutzt wird, um ein Raumschiff auf einer kreisförmigen Umlaufbahn, z. B. um einen



Der Hohmann-Transfer versetzt eine Rakete von einem niedrigen in einen höheren Orbit. Dazu muss die Rakete bei der Periapsis (1) kurz Schub geben, um die Kreisbahn in eine elliptische Bahn (2) zu verformen. Auf der Apoapsis (3) muss ein weiteres Mal Schub gegeben werden, um die Ellipse in eine Kreisbahn zu ändern.



Start der Zuma-Mission der privaten Raumfahrtfirma SpaceX. Die im November 2017 gestartete Rakete sollte einen US-Militärsatelliten in die Erdumlaufbahn bringen.

Planet, auf eine höhere Umlaufbahn zu transferieren. Dazu gibt das Raumschiff zuerst einen Schubstoß in Flugrichtung ab. Der sorgt dafür, dass es schneller wird, und nach dem Drehimpulserhaltungssatz bedeutet das, dass es sich nun auf einem elliptischen Orbit befinden muss – und zwar an seinem tiefsten Punkt, die sogenannte Periapsis (\downarrow). Das Raumschiff fliegt dann (ohne weitere Schubwirkung) die elliptische Flugbahn entlang, wird dabei immer langsamer, bis es den höchsten Punkt – die Apoapsis – erreicht hat. Um nicht wieder zurück in Richtung des Planeten zu stürzen, zündet die Rakete auf der Apoapsis ein weiteres Mal die Schubraketen, wieder in Flugrichtung, solange bis aus der elliptischen Flugbahn wieder ein Kreis geworden ist – dieses Mal allerdings viel weiter vom Planeten entfernt.

Die Entstehung des Sonnensystems → S. 4

GPS → S. 148

Galaxientypen → S. 48

Erhaltungssätze: Newtons Gesetze der Mechanik → S. 82, Das Prinzip der kleinsten Wirkung → S. 84

Die Kepler'schen Gesetze → S. 10