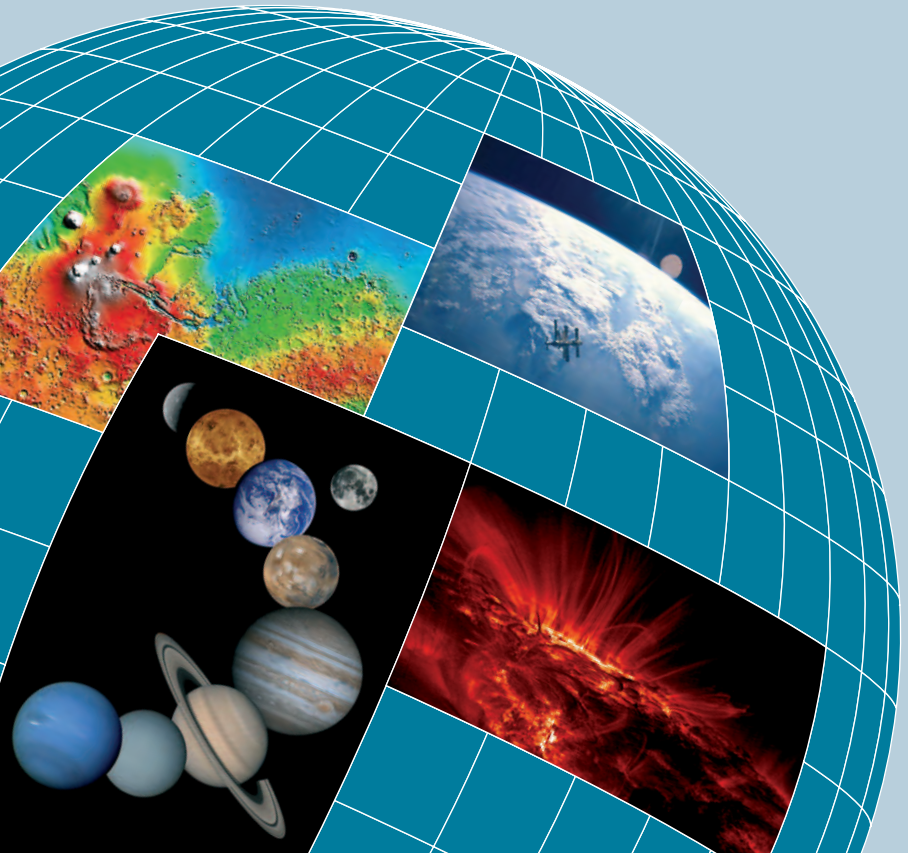


Sonnensystem

Entstehung | Forschung | Entwicklung



WikiPress

Sonnensystem

Das Sonnensystem fasziniert die Menschen bereits seit Zehntausenden von Jahren. Aus dieser Zeit stammen die ersten Beobachtungen der erd-nahen Planeten, des Erdmondes und auch der Sonne selbst. Die Positionen dieser Himmelskörper waren bis in die letzten Jahrhunderte umstritten. Gerade in den letzten Jahrzehnten konnte eine ungeheure Fülle an Infor-mationen zu den Planeten und Monden angehäuft werden. Immer bessere Teleskope und Raumsonden bieten ein immer detaillierteres Bild des Son-nensystems und ihrer Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen. Dieses Buch stellt diese neuen Forschungsergebnisse über die Himmelskörper kenntnisreich dar.

Daniel Arnold ist am 16. September 1980 in Magdeburg geboren, ver-brachte seine Kindheit zunächst in Jena, Thüringen und später in Würz-burg, Bayern, wo er schließlich 2000 seine Schulzeit mit der Allgemeinen Hochschulreife abschloss. Nach Beendigung seine Zivildienstes begann er 2001 in Erlangen an der Universität zunächst Physik zu studieren und wechselte später auf Maschinenbau an derselben Universität. Schon vor seinem Engagement in Wikipedia ab dem Frühjahr 2004 schrieb er neben-bei vorwiegend an Schülerzeitungen mit. Er interessiert sich vorwiegend für Physik, Astronomie und (Computer-)Technik, schaut jedoch auch ger-ne über den Tellerrand und befasst sich außerdem mit Geschichte und Politik.

Sonnensystem

Entstehung, Forschung, Entwicklung

Aus der freien Enzyklopädie Wikipedia
zusammengestellt von

Daniel Arnold

WikiPress 6

Veröffentlicht in der
Zenodot Verlagsgesellschaft mbH

Sonnensystem

Entstehung, Forschung, Entwicklung
Aus der freien Enzyklopädie Wikipedia
zusammengestellt von Daniel Arnold
WikiPress 6

Originalausgabe
Veröffentlicht in der
Zenodot Verlagsgesellschaft mbH
Berlin, März 2006

Die Artikel und Bilder dieses Bandes stammen aus der Wikipedia (<http://de.wikipedia.org>, Stand 21. September 2005) und stehen unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation. Sie wurden vom WikiPress-Redaktionsteam für den Druck aufbereitet und modifiziert. Sie dürfen diese modifizierte Version unter den Bedingungen der Lizenz benutzen. Eine transparente, elektronische Kopie finden Sie unter <http://www.wikiPress.de/baende/sonnensystem.xml>. Die detaillierte Versionsgeschichte (Historie) eines jeden Artikels finden Sie unter der jeweils angegebenen Quelle durch einen Klick auf »Versionen/Autoren« oder in gesammelter Form für dieses Buch unter http://www.wikiPress.de/baende/sonnensystem_historien.txt. Die zusammengefasste Versionsgeschichte finden Sie unter jedem Artikel.

Copyright (c) 2006 Zenodot Verlagsgesellschaft mbH, Berlin
Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled »GNU Free Documentation License«.

Das Logo der Wikipedia ist durch die Wikimedia Foundation, Inc. urheber- und markenrechtlich geschützt.

Umschlagfotos: Planeten (NASA, Freigegeben), Topografische Karte des Mars (NASA, Freigegeben), MIR im Orbit (NASA, Freigegeben), Levi Schleifenförmige Gasfilamente auf der Sonne (NASA/TRACE, Freigegeben), Hale Bopp (NAVY, Freigegeben), Saturnplanet Dione (NASA, Freigegeben), Landungsstelle des Mars Rover Opportunity (NASA, Freigegeben), Protoplanet (NASA, Freigegeben), Twin Peaks auf dem Mars (NASA, Freigegeben), Galileo Galilei (Gemeinfrei)

Gestaltung: Zenodot Verlagsgesellschaft mbH
Umschlaggestaltung: Ute Scharrer
Druck und Bindung: GGP Media GmbH, Pößneck
Printed in Germany

ISBN-10 3-86640-006-3
ISBN-13 978-3-86640-006-1

Inhalt

Vorwort 9	Iapetus	204
		Uranus	207
Sonnensystem und Sonne	13	Ariel	210
Sonnensystem	13	Umbriel	211
Sonne	20	Titania	212
Sonnenwind	39	Oberon	213
		Neptun	214
		Triton	217
		Pluto	219
		Charon	227
Planeten und ihre Monde	42		
Planet	42	Hypothetische Planeten	229
Erdähnlicher Planet	46	Vulkan	229
Gasriese	47	Gegenerde	231
Atmosphäre	48	Phaeton	232
Magnetosphäre	50	Transpluto	232
Merkur	54		
Venus	69	Asteroiden und Kometen	235
Erde	99	Asteroid	235
Innerer Aufbau der Erde	106	Benennung von Asteroiden und Kometen	242
Erdmagnetfeld	112	Vulkanoiden	245
Plattentektonik	118	Erdbahnkreuzer	247
Erdatmosphäre	123	Eros	250
Mond	125	2004 FH	251
Entstehung des Mondes	143	Aphophis	252
Mars	150	Meteoroid	255
Phobos	167	Meteor	255
Deimos	169	Meteorstrom	256
Jupiter	171	Perseiden	258
Io	173	Leoniden	258
Europa	178	Meteorit	259
Ganymed	181	Impakt	267
Kallisto	184	Einschlagkrater	268
Saturn	187	Hoba-Meteorit	271
Tethys	192		
Dione	194		
Rhea	197		
Titan	199		

ALH84001	272	Großer Komet	334
Neuschwanstein.	272	Halleyscher Komet	337
KT-Impakt	273	Enckescher Komet	340
Asteroidengürtel	275	Shoemaker-Levy 9	341
Ceres	278	Tempel 1	343
Pallas	280	Wild 2	345
Juno	282	Donati	347
Vesta	283	Hale-Bopp	349
Koorbitales Objekt	286	Hyakutake	350
Trojaner	288	Anhang	353
Hufeisenumlaufbahn	289	Das Sonnensystem	
Quasisatellit	291	in Zahlen	354
Achilles	292	Literatur	364
2002 AA ₂₉	293	Bücher	364
2003 YN ₁₀₇	299	Zeitschriften.	364
Janus und Epimetheus	303	Fachzeitschriften	364
Zentauren	305	Fernsehen	365
Chiron	306	Weblinks.	365
Kuipergürtel.	307	Glossar	366
Transneptunisches Objekt.	310	Gesamtautorenliste.	384
Plutino	311	GNU Free Documentation	
Quaoar	312	License	387
Orcus	314	GNU Free Documentation	
2003 UB ₃₁₃	315	License (deutsch)	394
Sedna	318	Bildnachweis.	402
Oortsche Wolke	322	Index	403
Nemesis	324		
Komet	325		

An die Leserinnen und Leser dieses Buchs

Erinnern Sie sich bitte an Ihre jüngsten Leseerfahrungen mit Sach- oder Fachliteratur. Haben Sie sich gefragt, wodurch sich die Autoren legitimieren? Gehen wir einmal davon aus, dass Bücher in aller Regel von Fachleuten geschrieben werden. Sie werden Ihnen an exponierter Stelle im Buch vorgestellt, ihre Qualifikation ergibt sich aus ihrer derzeitigen Beschäftigung, aus ihrer dokumentierten fachlichen Erfahrung und aus der Liste ihrer bisherigen Buchveröffentlichungen. So gibt es letztlich keine Zweifel daran, dass die Informationen der Autorin oder des Autors es lohnen, gedruckt zu werden. So weit, so gut. – Wir hoffen, Ihr letztes Sachbuch hat Sie weitergebracht. Die Chancen dafür stehen gut, denn wir haben im deutschen Sprachraum eine breit gefächerte und nach hohen Qualitätsmaßstäben arbeitende Verlagslandschaft. Aber Moment mal! Ist jeder geschriebene Satz in dem Buch wahr? Lesen Sie nicht mitunter Behauptungen, denen Sie weniger zustimmen können? Gibt es überhaupt ein Sachgebiet, in dem sich alle Experten stets einig sind? Nein? Dann müsste es doch zum selben Thema auch ebenso gut gemachte Bücher geben, die zu manch einem Aspekt glatt die entgegengesetzte Auffassung vertreten. Und tatsächlich: Es gibt sie nahezu zu jedem Thema.

Was bedeutet dies für Sie? Es bleibt Ihnen nichts anderes übrig, als jedes Buch kritisch zu lesen. Und in diesem Buch laden wir Sie dazu gleich zu Beginn ausdrücklich und herzlich ein!

Dieses Buch hat keine Autorin und keinen Autor. Es hat ganz viele. Wie viele? Das können wir Ihnen nicht genau sagen. Wir kennen zudem die wenigsten von ihnen. Wir wissen nicht, wo sie wohnen, was sie beruflich machen, wie alt sie sind oder was sie dafür qualifiziert, dieses Buch zu schreiben. Und noch was: Wir glauben, die meisten haben sich untereinander noch nie gesehen. Dennoch begegnen sie sich regelmäßig: In der Wikipedia – der freien Enzyklopädie. Diese Wikipedia ist das bislang schillerndste Beispiel sogenannter Wikis, einer neuartigen Form von Internetseiten, die es dem Leser ermöglichen, ihre Inhalte nicht mehr nur einfach zu konsumieren, sondern sie spontan zu verändern. Hierbei ist jedem der Zugang erlaubt – Hobbyforschern und Lehrstuhlinhabern, Fachstudenten und Schülern, Jugendlichen und Senioren. Niemand muss seine Qualifikation nachweisen, doch seine Beiträge müssen dem Urteil der Gemeinschaft standhalten, sonst werden sie in kürzester Zeit wieder entfernt. Das Faszinierende hierbei ist: Das Prinzip funktioniert!

Vieles hat die Wikipedia mit den konventionellen Enzyklopädien gemeinsam. Anderes hingegen unterscheidet sie deutlich von allen anderen Werken. Befindet sich in einem Text in der Wikipedia ein Fehler, so wird er meistens schnell von einem aufmerksamen Mitleser beseitigt. Das ist etwas, das auf einer statischen Buchseite nicht reproduziert werden kann. Sie können dem Verlag, der die Enzyklopädie herausgegeben hat, zwar um eine Korrektur bitten, aber Sie können sich nicht sicher sein, dass dies auch getan wird. In der Wikipedia können und dürfen Sie derartige Korrekturen jederzeit selbst vornehmen; Sie werden sogar darum gebeten!

Um auch Ihnen – den Buchlesern – Korrekturen zu ermöglichen, enthält dieser Band eine Besonderheit: Die »Edit Card«. Auf ihr können Sie Korrekturen, Verbesserungsvorschläge, erweiternde Informationen oder einfach Ihre Meinung an unseren Verlag einsenden. Unsere Redaktion pflegt Ihren Beitrag dann entsprechend in der Wikipedia im Internet ein.

Vielleicht wird Ihnen nach der Lektüre des Buches, wenn Sie sich in das Abenteuer Wikipedia im Internet stürzen, der eine oder andere Artikel auffallen, der im Wortlaut nicht exakt dem dieses Buches entspricht. Kein Wunder: die Inhalte der Wikipedia sind ständig im Fluss. Ihre Nutzer lesen und arbeiten rund um die Uhr: Sie korrigieren grammatikalische Fehler, ersetzen ein falsches Wort durch ein korrektes, sie ergänzen wichtige Informationen oder beseitigen eine sachlich falsche Aussage.

Dieses Buch dokumentiert nur einen kleinen Mosaikstein aus diesem großen Projekt. Es präsentiert ein Thema, das mit einer für eine Buchpublikation gewünschten Informationstiefe und Ausgewogenheit in der Wikipedia vertreten ist. Dieses Buch wünscht sich Leser, die es gleichermaßen interessiert und kritisch lesen. Kein Wort ist nur dadurch wahr, dass es in einer professionellen Druckerei auf gutem Papier gedruckt wurde. Und dies gilt für dieses Buch genau so wie für jedes andere. Bücher sind Medien, die Gedachtes, Gemeintes und Gewusstes vom Autor zum Leser transportieren. Das Medium, das Sie in den Händen halten, transportiert das Ergebnis einer Kollektivarbeit zahlreicher Menschen.

Wie auch immer Sie dieses Buch nutzen, entscheiden Sie am Ende selbst. Vielleicht möchten Sie es auch einfach nur lesen. Denn hierzu haben wir es Ihnen gedruckt und Sie haben es hierzu bei Ihrem Buchhändler erworben.

Wir wünschen Ihnen mit diesem Buch viel Vergnügen. Lesen Sie kritisch! Jedes Buch. Immer.

Das Team von WikiPress

Vorwort

Der Himmel über unseren Köpfen fasziniert seit jeher die Menschheit mit dem Auf- und Untergang von Sonne, Mond, Planeten und Sternen, deren Ablauf unseren Lebensrhythmus mit dem Wechsel zwischen Tag und Nacht und dem stetigen Wandel der Jahreszeiten diktiert.

Und dennoch scheint auf den ersten Blick am Himmel alles immerwährend gleichförmig wie ein Uhrwerk abzulaufen, und somit verschwenden die meisten Menschen vor allem in den lichtverschmutzten Großstädten nur in wenigen romantischen Augenblicken einen längeren Blick in den Nachthimmel. Auf den zweiten Blick jedoch erkennt man ein Universum voll fremdartiger, unerwarteter Dinge und überraschender Ereignisse am (Nacht-)Himmel, wie die Sonnenflecken, den Mond mit seinen Phasen und seinem vermeintlichen Gesicht, das in unseren Breiten eher seltene Polarlicht, das Band der Milchstraße mit seinen funkelnden Sternen, Sternschnuppen, bei denen sich sicher jeder schon einmal etwas gewünscht hat, Kometen, deren plötzliches Auftreten früher die Menschen in Angst und Schrecken versetzte, das zuweilen helle Leuchten der Planeten, wenn sie der Erde besonders nahe stehen, und ganz selten ein »neuer Stern«, wenn eine Nova oder Supernova aufleuchtet.

Besonders die spektakulären Entdeckungen im Universum, die auch an die Fragen nach dem Woher und Wohin des Lebens und der Menschheit rühren, schaffen es immer wieder auf die Titelseiten der Tageszeitungen. Trotz der langen Geschichte der Erforschung des Sonnensystems gibt es gerade heute eine große Menge an Neuentdeckungen und Korrekturen, die das Verständnis unseres Sonnensystems und somit letztlich unser Selbstverständnis entscheidend verändern.

So hat erst die Entdeckung der Kugelgestalt der Erde in der Antike, später am Anfang der Neuzeit die Entdeckung, dass entgegen dem Augenschein nicht die Sonne um die Erde, sondern die Erde mitsamt den übrigen Planeten um die Sonne kreist und dass wiederum unsere Sonne nur ein Stern unter Abermilliarden Sternen des Universums ist, unser Weltbild entscheidend verändert; dann zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Entdeckung, dass es einen Anfang des Universums gab. Und jetzt wiederum ist aufgrund der immer genaueren Rekonstruktion der dramatischen Entstehung und Entwicklung unseres Sonnensystems unser Selbstverständnis im Begriff sich zu ändern, auch durch die Neuentdeckung großer Körper in den Randbezirken des Sonnensystems und die Entdeckung von Pla-

neten um andere Sterne. In der näheren Zukunft wird mit Sicherheit ein erdähnlicher Planet um einen sonnenähnlichen Stern gefunden werden und vielleicht irgendwann auch außerirdisches Leben.

Dieses Buch

Dem Leser wird es gleich auffallen: Dies ist kein übliches Buch, wie es schon so viele exzellente Bücher über unser Sonnensystem gibt.

Im Gegensatz zu den meisten populärwissenschaftlichen Büchern zum Thema ist dies kein in sich geschlossenes Werk, welches sich im Wesentlichen nur vom Anfang zum Ende lesen lässt. Dieses Buch enthält weitgehend unabhängige Artikel zu einzelnen Objekten und Themen unseres Sonnensystems, die aus der mittlerweile riesigen Artikelmenge der Wikipedia ausgewählt und aufbereitet und durch den Redaktionsprozess zu einem Themengebiet abgerundet wurden.

Dieses Buch kann und soll durchaus als eine neue Kreuzung zwischen einem herkömmlichen Sachbuch und einem Lexikon angesehen werden, die es durch die interne Navigation über Inhaltsverzeichnis, Register und Glossar ermöglicht, quer zu lesen. Natürlich lässt sich dieses Buch auch als ein zusammenhängendes Werk von Anfang bis Ende lesen. Gerade derartige nichtlineare Informationsmöglichkeiten, die dennoch über den letztlich nicht satt machenden Informationshappen hinausreichen, sind wichtig, um neue Leserkreise für »harte« naturwissenschaftliche Themen zu gewinnen.

Man wird sicher nicht alles finden, was man in dem Buch erwartet, und feststellen, dass es sehr unterschiedliche Gewichtungen gibt: Einige Artikel sind relativ kurz, andere deutlich ausführlicher. Dies hängt in erster Linie mit der Entstehung der Artikel in der Wikipedia zusammen. Hier werden Artikel von tausenden Freiwilligen zusammengestellt und überarbeitet, die ein Interesse an der Erstellung einer frei verfügbaren Enzyklopädie haben. Sie fokussieren dabei auf die Artikel, die ihnen persönlich besonders wichtig sind, und bauen diese entsprechend aus. Andere Artikel werden weniger stark berücksichtigt. Häufig ist dies ein Spiegel der allgemeinen Relevanz der beschriebenen Themen, an vielen Stellen handelt es sich jedoch auch einfach um ein persönliches Interesse der Autoren an bestimmten Themengruppen. Davon abgesehen hängen die unterschiedliche Gewichtung und auch bewussten Auslassungen damit zusammen, dass es wesentlich mehr Artikel zum Thema Sonnensystem in der Wiki-

pedia gibt, als sich sinnvoll in einem Buch wie diesem abdrucken ließe. Auch die aufgenommenen Artikel mussten zum Teil gekürzt werden.

Dieses Buch beschränkt sich daher bewusst auf die Objekte des Sonnensystems und handelt Themen wie Raumfahrt, Himmelsbeobachtung und das Universums außerhalb unseres Sonnensystems nur am Rande ab. Es ist das erste Buch einer losen Reihe, dem zwei weitere Bücher über Raumfahrt und Astronomie/Astrophysik folgen werden, die gerade von anderen Autoren aus Wikipedia zusammengestellt werden.

Vor allem vor diesem Hintergrund hat dieses Buch nicht den Anspruch an Vollständigkeit, auch ein einheitlicher Stil der Artikel ist aufgrund der Herkunft nicht zu erwarten. Es wird Unstimmigkeiten enthalten, ebenso vielleicht Fehler und Lücken. An dieser Stelle sind Sie als Leser aufgerufen, uns zu helfen – sei es durch Einsendung der Edit Card am Ende des Buches oder durch aktive Mithilfe in der Wikipedia.

Wir hoffen natürlich, dass wir bei der Auswahl der Artikel gutes Gespür bewiesen und durch den Redaktionsprozess ein qualitativ ansprechendes Buch geschaffen haben, und wünschen uns, dass Sie sich von der Begeisterung der vielen freiwilligen Autoren für dieses Thema anstecken lassen und danach vielleicht das ein oder andere unscheinbare Objekt am Himmel mit anderen Augen sehen.

Lassen sie sich daher von diesem Buch mit auf Entdeckungsreise durch unser Sonnensystem nehmen.

Erlangen im Januar 2006,
Daniel Arnold

Danksagung

Dieses Buch wäre ohne die zahlreichen Autoren der Wikipedia niemals möglich geworden, die in unermüdlichem Einsatz die nun mittlerweile größte Enzyklopädie der Welt geschaffen haben. Doch ohne die Programmierer von MediaWiki, dem zentralen Werkzeug der Wikipedia, in dem all diese Texte geschrieben wurden, wären auch die Autoren nichts gewesen. Daher geht mein Dank auch an sie. Trotzdem braucht es immer noch Menschen, die wichtige Verwaltungsarbeit leisten. Insbesondere dem Wikimedia Deutschland e. V. möchte ich daher hier für sein mutiges und entschlossenes Handeln angesichts der wohl unvermeidlichen unangenehmen Begleiterscheinungen des Erfolgs der Wikipedia danken.

Persönlich danken möchte ich Achim Raschka für seine tatkräftige Unterstützung und seine rigorose Nachbearbeitung der Texte und allen, die mich bei diesem Buch unterstützt haben. Und nicht zuletzt eine kleine Hommage an eine Person, die über eine Bemerkung von mir über den Sternenhimmel sagte: »Ach, jetzt werden wir wohl wieder romantisch ...«

Sonnensystem und Sonne

Sonnensystem

Das Sonnensystem, auch *Solarsystem* oder manchmal auch *unser Planetensystem* genannt, besteht aus der Sonne mit ihren Planeten, Monden, Kleinplaneten, Kometen, Kleinkörpern wie den Meteoroiden, sowie der Gesamtheit aller Gas- und Staubteilchen, die durch die Anziehungskraft der Sonne zu einem System zusammengehalten werden. Dem Planetensystem der Sonne gehört auch unsere →Erde an.

Aufbau

Im Zentrum des Sonnensystems befindet sich als Zentralstern die Sonne mit etwa 1,39 Millionen Kilometern Durchmesser, in der fast 99,9 % der Gesamtmasse des Systems konzentriert sind.

Um die Sonne herum bewegen sich hauptsächlich die Planeten. Im Allgemeinen spricht man von den *neun Planeten*, dem im Mittel am weitesten entfernten Planeten →Pluto wird jedoch seit der Entdeckung anderer →Plutinos (ähnlich große Objekte mit vergleichbaren Bahneigenschaften) der Planetenstatus mehr und mehr aberkannt. 2003 wurde ein Objekt entdeckt, das größer als Pluto ist und sich am äußersten Rand unseres Sonnensystems befindet: →2003 UB₃₁₃. Sowohl die Entdecker als auch die NASA stufen das Objekt aufgrund seiner Größe als Planeten ein; die IAU hat jedoch in einer Erklärung mitgeteilt, dass dieses Objekt zumindest bis zu einer neuen, klaren Definition für Planeten, welche im Sommer 2006 beschlossen werden soll, nicht als Planet anerkannt wird.

Weitere Bestandteile des Sonnensystems sind Millionen von →Asteroiden (auch Planetoiden oder Kleinplaneten genannt) und →Kometen, die vorwiegend in drei Zonen des Sonnensystems anzutreffen sind: dem →Asteroidengürtel, dem →Kuipergürtel und der →Oortischen Wolke.

Der Sonne am nächsten befinden sich die *inneren*, →erdähnlichen Planeten →Merkur (Abstand zur Sonne $57,9 \times 10^6$ km, beziehungsweise 0,39 AE), →Venus ($108,2 \times 10^6$ km, 0,72 AE), Erde ($149,6 \times 10^6$ km, 1 AE) und →Mars ($227,9 \times 10^6$ km, 1,52 AE). Ihr Durchmesser beträgt zwischen 4.878 km und 12.756 km, ihre Dichte zwischen $3,95 \text{ g/cm}^3$ und $5,52 \text{ g/cm}^3$.

Zwischen Mars und →Jupiter befindet sich der so genannte →Asteroidengürtel, eine Ansammlung von *Kleinplaneten*. Die meisten dieser As-

Sonne	
Innere Planeten	(⇒ <i>Vulkanoiden</i>)
	1. ⇒ Merkur
	2. ⇒ Venus
	Aten-Typ Asteroiden
	3. ⇒ Erde ⇒ Mond ⇒ Erdbahnkreuzer
	Apollo-Typ Asteroiden
	4. ⇒ Mars ⇒ Phobos , ⇒ Deimos Mars-Trojaner
Amor-Typ Asteroiden	
⇒ Asteroidengürtel	⇒ Ceres , ⇒ Pallas , ⇒ Juno , ⇒ Vesta
Äußere Planeten	5. ⇒ Jupiter ⇒ Io , ⇒ Europa , ⇒ Ganymed , ⇒ Kallisto Jupiter-Trojaner
	6. ⇒ Saturn ⇒ Tethys , ⇒ Dione , ⇒ Rhea , ⇒ Titan , ⇒ Iapetus ⇒ Zentauren Chiron
	7. ⇒ Uranus Miranda, ⇒ Ariel , ⇒ Umbriel , ⇒ Titania , ⇒ Oberon
	8. ⇒ Neptun ⇒ Triton , Nereid
	9. ⇒ Pluto ⇒ Charon
	Transneptunische Objekte, ⇒ Kuipergürtel
⇒ Oortische Wolke	

Objekte unseres Sonnensystems (vgl. Farbtafeln Abb. 133)

teroiden sind nur wenige Kilometer groß, und nur wenige haben einen Durchmesser von 100 km oder mehr. ⇒ Ceres ist mit etwa 960 km der größte dieser Körper. Ihre Bahnen sind teilweise stark elliptisch, einige kreuzen sogar die Merkur- (Icarus) beziehungsweise Uranusbahn (Chiron).

Zu den *äußeren Planeten* zählen die ⇒ *Gasriesen* ⇒ Jupiter ($778,3 \times 10^6$ km, 5,2 AE), ⇒ Saturn ($1,429 \times 10^9$ km, 9,53 AE) sowie die Planeten ⇒ Uranus ($2,875 \times 10^9$ km, 19,2 AE) und ⇒ Neptun ($4,504 \times 10^9$ km, 30,1 AE) mit Dichten zwischen $0,7 \text{ g/cm}^3$ und $1,66 \text{ g/cm}^3$ sowie ⇒ Pluto ($5,900 \times 10^9$ km, 39,5 AE).

Seit den 1990ern hat man mehr als 500 Objekte gefunden, die sich jenseits der Neptunbahn bewegen. Diese Objekte bilden den ⇒ Kuipergürtel, der sich in einem Abstand von 6–7,5 Milliarden km (30–50 AE) zur Sonne befindet und ein Reservoir für die Kometen mit mittleren Umlaufperioden ist. Die Objekte dieser Zone sind wahrscheinlich nahezu unveränderte Überbleibsel aus der Entstehungsphase des Sonnensystems, man nennt sie deshalb auch Planetesimale.

Jenseits des Kuipergürtels befindet sich bis zu einem Abstand von etwa 1,5 Lichtjahren (etwa 100.000 AE) die ⇒ Oortische Wolke. Man vermutet, dass aus dieser durch Gravitationsstörungen gelegentlich vorbeiziehender Sterne Körper herausgerissen werden und als langperiodische Kometen in die inneren Bereiche des Sonnensystems gelangen. Einige dieser Kometen verbleiben dann auf stark elliptischen Bahnen in der Nähe der Sonne, andere werden von den Planeten, insbesondere von Jupiter, gestört und abgelenkt, so dass sie aus dem Sonnensystem katapultiert werden oder auf Planeten oder in die Sonne stürzen.

Den Rand unseres Sonnensystems bildet die Heliopause, die Grenzschicht zwischen ⇒ Sonnenwind und interstellarem Medium. Man vermutet sie in einer Entfernung von ungefähr 150 AE, das dem 150fachen des Abstands Erde-Sonne oder dem 4fachen von Pluto-Sonne entspricht, der genaue Abstand ist jedoch bis heute nicht bekannt.

Die inneren Planeten sowie Jupiter und Saturn waren schon in der Antike bekannt. Sie wurden von den Römern als Götter betrachtet und sind nach diesen benannt. Uranus, Neptun und Pluto wurden zwischen 1781 und 1930 entdeckt und ebenfalls nach römischen Göttern benannt.

Innerhalb der von den einzelnen Planeten beherrschten Gravitationsfelder – ihrer Hill-Späre – befinden sich, außer bei Merkur und Venus, kleinere Himmelskörper als umlaufende Begleiter. Nach dem altbekannten ⇒ Mond der Erde werden sie analog ebenfalls als Monde, aber auch gleichbedeutend für Begleiter als Trabanten oder Satelliten bezeichnet. Sie sind bis auf den Erdmond und den Plutomond ⇒ Charon wesentlich kleiner als ihr Planet. Eine definitiv untere Grenzgröße, ab der man nicht mehr von einem Mond spricht, wurde wie bei den Planeten bisher noch nicht offiziell festgelegt.

Da astronomische Dimensionen für die meisten Menschen schwer vorstellbar sind, ist ein maßstabsgerecht verkleinertes Modell unseres Sonnensystems hilfreich, um sich die Größenverhältnisse und Distanzen der Objekte unseres Sonnensystems zu veranschaulichen.

Das Sonnensystem im Milchstraßensystem

Die Sonne mit ihren Begleitern ist, wie alle Sterne, Teil eines Sternsystems. Sie ist mit mindestens 100 Milliarden (manche Schätzungen gehen bis 400 Milliarden) weiteren Sternen ein Mitglied des Milchstraßensystems, einer Spiralgalaxie mit einem Durchmesser von etwa 100.000 Lichtjahren. Das Sonnensystem befindet sich zwischen zwei der spiralförmigen Sternkonzentrationen, zwischen dem Perseusarm und dem Sagittariusarm, in einer

lokalen Abzweigung, dem Orionarm. Es ist etwa 26.000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt und umkreist es mit einer Geschwindigkeit von rund 220 km/s binnen etwa 230 Millionen Jahren, einem *galaktischen Jahr*.

Die Lage der mittleren Bahnebene der Planeten des Sonnensystems entspricht nicht der Äquatorebene der Galaxis, sondern ist sehr stark dagegen geneigt. Der Nordpol der Erdbahnebene liegt an der Himmelsphäre nur etwa 30 Grad vom galaktischen Äquator in dem am Nachthimmel schimmernden Band der Milchstraße entfernt, im Sternbild Drache. Der südliche Ekliptikpol liegt im Sternbild Schwertfisch. Der Nordpol der Galaxis befindet sich 30 Grad über der Ekliptik im Sternbild Haar der Berenike, und der galaktische Südpol im Sternbild Bildhauer. Das Zentrum der Galaxis liegt nahe der Erdbahnebene, perspektivisch im Sternbild Schütze. Von der hellen zentralen Verdickung, der Bulge, ist jedoch in dem für das menschliche Auge sichtbaren Lichtspektrum nicht viel zu sehen, da sie im Scheibenbereich auch von großen Mengen interstellaren Staubes umgeben ist.

Der Drehsinn des Milchstraßensystems um sein Zentrum stimmt nicht mit dem Umlaufsinn der Planeten um die Sonne überein. Die Rotation der galaktischen Scheibe erfolgt von Norden gesehen im Uhrzeigersinn, so, als würden die Spiralarme von der Rotation des Zentralbereiches nachgeschleppt; ihr Drehsinn ist gemessen am Sonnensystem gewissermaßen »gegenläufig«.

Der sonnennächste Stern ist Proxima Centauri. Sein Abstand zum Sonnensystem beträgt etwa 4,24 Lichtjahre beziehungsweise 268.000 AE.

Als Grund der Spiralstruktur in der Verteilung der Sterne vermuten viele Astronomen Dichtewellen noch unbekannter Ursache, an denen die Gas- und Staubmassen der galaktischen Scheibe während deren Rotation auflaufen und dadurch zu der Bildung neuer Sterne angeregt werden. Manche Astronomen machen für die anscheinend periodisch auftretenden Massensterben ein erheblich verstärktes Bombardement von Kometen verantwortlich, die bei den regelmäßigen Begegnungen des Sonnensystems mit diesen Dichtewellen in der Oort'schen Wolke aus der Bahn gebracht wurden.

Die galaktische Region, in der sich das Sonnensystem befindet, ist von interstellarem Staub weitgehend frei. Es ist die so genannte *lokale Blase*. Sie erstreckt sich ungefähr 200 Lichtjahre entlang der galaktischen Ebene und etwa 600 Lichtjahre senkrecht dazu. Diese große Blase besteht aus sehr heißem und extrem verdünntem Gas, hauptsächlich Wasserstoff, das diesen Staub von der Erde fern hält. Durch die extrem geringe Dichte von

ungefähr 5.000 Teilchen je Kubikmeter beziehungsweise 5 Teilchen je Liter ist seine Temperatur von etwa 4 Millionen Grad Celsius kein Problem für uns. Außerdem wird im Einflussbereich der Sonne der größte Teil dieses Gases durch den ihm entgegenstürmenden Sonnenwind mit abgeschirmt. Entdeckt wurde die Blase durch eine intensive Röntgenstrahlung, die aufgrund der hohen Temperatur von ihr ausgeht. Vor der Röntgenstrahlung schützt uns die Erdatmosphäre, daher konnte die heiße Blase erst von satellitengestützten Röntgenteleskopen entdeckt werden. Die Entstehung der Blase wird den Druckwellen von etwa 10 Supernovae zugeschrieben, die demnach vor rund 4 Millionen Jahren in einer dichten Staubwolke explodiert sind. Solche Explosionen waren vermutlich auch an der Entstehung des Sonnensystems beteiligt, indem sie die Urwolke des späteren Sonnensystems durch ihre Druckwellen entscheidend vorkomprimierten.

Eine noch größere Blase wurde 500 Lichtjahre von uns entfernt in Richtung des Sternbildes Skorpion entdeckt und *Loop I* genannt. Sie hat einen Durchmesser von etwa 1.000 Lichtjahren. In ihrem Zentrum befindet sich die junge, so genannte Scorpio-Centaurus-Assoziation. Es wird vermutet, dass das Milchstraßensystem von Hunderten solcher heißer Blasen durchsetzt ist.

Die Entstehung des Sonnensystems

Vor etwa 4,6 Milliarden Jahren bewegte sich an Stelle unseres Sonnensystems eine ausgedehnte Materiewolke um das Zentrum der Galaxis. Die Wolke bestand zu über 99 % aus den Gasen Wasserstoff und Helium sowie einem geringen Anteil aus nur mikrometergroßen Staubteilchen, die sich aus schwereren Elementen und Verbindungen, wie Wasser, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, anderen Kohlenstoffverbindungen, Ammoniak und Siliziumverbindungen, zusammensetzten. Der Wasserstoff und der überwiegende Teil des Heliums waren bereits beim Urknall entstanden. Die schwereren Elemente und Verbindungen wurden im Innern von Sternen erzeugt und bei deren Explosion freigesetzt. Teile der Materiewolke zogen sich infolge der eigenen Schwerkraft zusammen und verdichteten sich. Den Anstoß hierzu könnte die Explosion einer relativ nahen Supernova gegeben haben, deren Druckwellen durch die Wolke wanderten. Diese Verdichtungen führten zu der Bildung von vermutlich mehreren hundert oder gar tausend Sternen in einem Sternhaufen, der sich wahrscheinlich nach einigen hundert Millionen Jahren in freie Einzel- oder Doppelsterne auflöste. Im Folgenden wird die Entwicklung desjenigen »Fragments« der Materiewolke betrachtet, aus dem sich unser Sonnensystem bildete.

Da bei der Kontraktion der Drehimpuls erhalten bleiben muss, hat sich eine schon minimal existierende Rotation der kollabierenden Wolke erhöht, ähnlich wie eine Eiskunstläuferin durch Anlegen der Arme eine schnelle Rotation erreicht. Die dabei entstehenden, nach außen wirkenden Fliehkräfte führten dazu, dass sich die Wolke in den Außenbereichen zu einer rotierenden Scheibe ausbildete.

Fast die gesamte Materie der Wolke stürzte jedoch in das Zentrum und bildete einen Protostern, der weiter kollabierte. Im Innern dieses Gaskörpers stiegen Druck und Temperatur so weit an, bis ein Kernfusionsprozess gezündet wurde, bei dem Wasserstoffkerne zu Heliumkernen verschmelzen. Die dabei freigesetzte Energie erzeugte einen Strahlungsdruck, welcher der Gravitation entgegenwirkte und die weitere Kontraktion aufhielt. Ein stabiler Stern – unsere Sonne – war entstanden.

In der verbleibenden protoplanetaren Scheibe führte nach dem bisherigen Modell die Verklumpung von Staubteilchen (Koagulation) zur Bildung von Planetesimalen, den Bausteinen der Planeten. Diese kilometergroßen Gebilde besaßen genug Masse, um sich durch ihre Gravitation mit anderen Planetesimalen zu größeren Objekten zu vereinigen. Nach neueren Modellen könnten auch gravitative Instabilitäten zu sich selbst verstärkenden Massekonzentrationen und damit zur Bildung von Planetesimalen führen. Dabei verlief das Wachstum nicht gleichmäßig. Die schwersten Objekte übten die größten Gravitationskräfte aus, zogen Materie aus einem weiten Umkreis an und konnten so noch schneller wachsen. Der »Protojupiter« störte schließlich mit seinem Gravitationsfeld andere Planetesimale und beeinflusste deren Wachstum. Offensichtlich verhinderte er auch die Bildung eines größeren Körpers zwischen der Mars- und Jupiterbahn, was zur Entstehung des Asteroidengürtels führte.

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Prozesse der Planetenentstehung hatte der Abstand der Protoplaneten zur jungen Sonne. In Sonnennähe kondensierten schwerflüchtige Elemente und Verbindungen aus, während leichtflüchtige Gase durch den kräftigen → Sonnenwind weggerissen wurden. Hier entstanden die inneren Planeten, Merkur, Venus, Erde und Mars mit festen silikatischen Oberflächen. In den kälteren Außenregionen konnten die entstehenden Planeten auch die leichtflüchtigen Gase, wie Wasserstoff, Helium und Methan festhalten. Hier bildeten sich die »Gasriesen« Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.

Ein Teil der Materie, der nicht von den Planeten eingefangen wurde, verband sich zu kleineren Objekten, den Kometen und Asteroiden. Da diese Himmelskörper seit der Frühzeit des Sonnensystems nahezu unver-

ändert blieben, kann deren Erforschung wichtige Hinweise zu dessen Entstehungsgeschichte liefern. Ebenfalls sehr wertvolle Erkenntnisse brachte die Untersuchung von → Meteoriten. Dies sind Bruchstücke von Planetoiden, die ins Schwerefeld der Erde gerieten.

Auch wenn die Grundprinzipien der Planetenentstehung bereits als weitgehend verstanden gelten, gibt es doch noch zahlreiche offene und nicht unwesentliche Fragen. Eines der Probleme ist die paradox erscheinende Verteilung des Drehimpulses auf die Sonne und die Planeten, denn der Zentralkörper enthält fast 99,9 % der Masse des gesamten Systems, besitzt aber nur etwa 0,5 % des Drehimpulses; der Hauptanteil daran steckt im Bahndrehimpuls ihrer Begleiter. So ist auch die Neigung der Äquatorebene der Sonne gegenüber der mittleren Bahnebene der Planeten von etwa 7° ein Rätsel. Aufgrund ihrer überaus dominierenden Masse dürfte die Sonne (anders als zum Beispiel die Erde) durch die Wechselwirkung mit ihnen kaum ins Taumeln geraten. Möglicherweise hatte sie in ihrer Frühzeit einen Zwergstern als Begleiter oder erhielt »Besuch« von einem Nachbarstern des ursprünglichen Sternhaufens, der durch seine Anziehung die *protoplanetare Scheibe* um etwa 7° kippte, während die Sonne aufgrund ihrer geringen räumlichen Ausdehnung weitgehend unbeeinflusst blieb.

Merksatz zur Reihenfolge der neun Planeten

Von der Sonne aus gesehen:

»Mein Vater erklärt mir jeden Samstag unsere neun Planeten.«
(Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, Pluto)

Oder auch:

»Mein Vater erklärt mir an jedem Samstag unsere neun Planeten.«
(unter Berücksichtigung des Asteroidengürtels)

Und selten auch:

»Mein Vater erklärt mir jeden Samstag unsere Planeten neu.«
(Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Pluto, Neptun; aufgrund der elliptischen Umlaufbahn des Pluto ist seine Distanz zur Sonne zu bestimmten Zeiten kleiner als die des Neptun)

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnensystem>. Historie: 22.4.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Alkuin, Arnomane, Ben-Zin, Lotse, SiriusB, Kurt Jansson, Spawn Avatar, Sig11, Phrood, Nephelin, Sikilai, Zwobot, Malteser, Stefan h, Schewek, Koethnig, Mr. B.B.C., Onel, AkaBot, Mariachi, Dominik, Kai11, Saperaud, Stern, Tkarcher, Hagbard, Rainer Bielefeld, .x, CSonic, Klausbg, Vesta, Spektrum, Reeno, Odin, Jörg Knappen, Heinz Wittenbrink, Kerish, Fristu, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Sonne

Die Sonne (lat. *Sol*) ist der lokale Stern im Zentrum unseres Sonnensystems (auch als *Zentralgestirn* bezeichnet). Populär wird dieser Begriff auch synonym zu Stern verwendet. Das Zeichen der Sonne: ☉

Die Sonne ist für das Leben auf der Erde von fundamentaler Bedeutung. Viele wichtige Prozesse auf der Erdoberfläche, wie das Klima und das Leben selbst, werden durch die Strahlungsenergie der Sonne angetrieben. So stammen etwa 99,998 % des gesamten Energiebeitrags zum Erdklima von der Sonne – der winzige Rest wird aus geothermischen Wärmequellen gespeist. Auch die Gezeiten gehen zu einem Drittel auf die Schwerkraft der Sonne zurück.

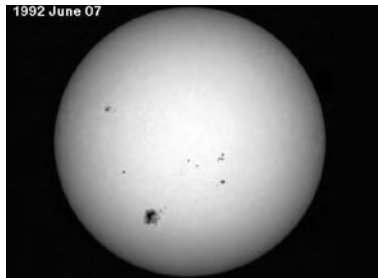


Abb. 1: Die Sonne am 7. Juni 1992. Der Sonnenfleck links unten hat etwa 5fache Erdgröße.

Allgemeines

Die Sonne ist der beherrschende Himmelskörper in unserem Planetensystem, dessen Masse sie zu 99,9 % ausmacht. Ihr Durchmesser beträgt 1,3925 Millionen km (109facher Erddurchmesser), was knapp unter dem Mittelwert aller Sterne liegt. Sie ist ein Stern der so genannten Hauptreihe, ihre Spektralklasse ist G2 und sie hat die Leuchtkraftklasse V. Das bedeutet, dass die Sonne ein durchschnittlicher, gelb leuchtender »Zwergstern« ist, der sich in der etwa 10 Milliarden Jahre dauernden Hauptphase seiner Entwicklung befindet. Ihr Alter wird auf etwa 4,6 Milliarden Jahre geschätzt.

Die Leuchtkraft der Sonne entspricht einer Strahlungsleistung von etwa 3,8·10²⁶ Watt. Diese Strahlung wird zum Großteil im Bereich des sichtbaren Lichts abgegeben mit einem Maximum in den Spektralfarben Gelb und Grün. Die Farbe der Sonne, die wir als gelb wahrnehmen, erklärt sich aus ihrer Oberflächentemperatur von etwa 5.700 °C. Die zentrale Bedeutung der Sonne für die Lebensprozesse auf der Erde zeigt sich auch hier: Jener Bereich des elektromagnetischen Spektrums, in dem die Sonne am stärksten strahlt, ist genau der für uns Menschen und die meisten anderen Lebewesen sichtbare Teil dieses Spektrums.

Die Sonnenmasse beträgt etwa das Doppelte der geschätzten Durchschnittsmasse aller Sterne unserer Milchstraße. Zählt man nur die Sterne

mit Kernfusion (schließt also die »Braunen Zwerge« aus), liegt die Masse im Durchschnitt. Sie setzt sich zu 73,5 % aus Wasserstoff und zu 25 % aus Helium zusammen. Hinsichtlich der Anzahl der Atome betragen diese Anteile 92,7 % und 7,9 %. Die restlichen 1½ Prozent der Sonnenmasse setzen sich aus zahlreichen schwereren Elementen zusammen, vor allem Sauerstoff und Kohlenstoff. Im Sonnenkern entsteht aus den dicht gedrängten Atomkernen des Wasserstoffs durch Kernfusion Helium, so dass der Wasserstoff-Anteil zugunsten des Heliums in Zukunft weiter sinken wird. Dieser Prozess ist der Motor der Sonne, aus dem sie jene Energie bezieht, die sie an der Photosphäre (leuchtende, sichtbare Oberfläche) durch Strahlung abgibt. Da die Sonne kein fester Körper wie die erdähnlichen Planeten und Monde ist, sondern ein heißer Gasball, wäre sie ohne diesen Energienachschub von innen *instabil*. Sie würde sich abkühlen und auf einen Bruchteil ihrer jetzigen Größe zusammenziehen.

Die Sonne rotiert in rund vier Wochen um die eigene Achse. Diese Rotation dauert am Äquator 25,4 Tage, in mittleren Breiten 27–28 Tage und nahe den Polen 36 Tage. Dieser Unterschied in der Dauer eines *Sonnentages* wird als differenzielle Rotation bezeichnet und ist seit längerem durch Gas- und Hydrodynamik erklärbar.

Kulturgeschichte

Die Sonne ist das zentrale Gestirn am Himmel, von ihr hängt alles Leben auf der Erde ab. Diese überragende Bedeutung war den Menschen von alters her bewusst. Viele frühere Kulturen verehrten sie als Gottheit. Die regelmäßige tägliche und jährliche Wiederkehr der Sonne wurde teils ängstlich erwartet und mittels kultischer oder magischer



Abb. 2: Der Sonnenwagen von Trundholm

Rituale beschworen. Besonders das Auftreten einer Sonnenfinsternis löste große Bestürzung und Furcht aus. Im alten China glaubte man, ein Drache würde die Sonne verschlingen. Durch die Erzeugung von großem Lärm versuchte man, das Untier dazu zu bewegen, die Sonne wieder freizugeben. Andererseits machte sich die Menschheit das Wissen über die für alles Leben fundamentalen Perioden Tag und Jahr schon seit frühester Zeit nutzbar. Die Sonne ist die natürliche Uhr der Menschen, und die Abfolge der Jahreszeiten führte zur Entwicklung des Kalenders, der vor allem nach Erfindung des Ackerbaus für alle Kulturen überlebenswichtig war.

Für die Sumerer verkörperte die Sonne den Sonnengott Utu. Bei den Babyloniern entsprach er dem Gott Schamasch, der jeden Tag den Himmel betrat und dessen Strahlen nichts verborgen blieb. Im alten Ägypten wurde Ra (auch Re oder Atum) als Sonnengott verehrt. Der »Ketzler«-Pharao Echnaton ließ später nur noch Aton, die personifizierte Sonnenscheibe, als einzigen Gott zu und schaffte alle anderen ägyptischen Götter ab.

Im antiken Griechenland verehrte man den Sonnengott Helios, der mit seinem Sonnenwagen täglich über das Firmament fuhr. Allerdings sind aus dem antiken Griechenland auch die ersten Überlegungen überliefert, in denen die Sonne als physikalisches Objekt betrachtet wird. Die wohl älteste dieser Hypothesen stammt dabei von Xenophanes, der die Sonne als eine feurige Ausdünstung oder Wolke benannte. So naiv diese Beschreibung aus heutiger Sicht zwar wirkt, stellt sie doch einen gewaltigen kulturhistorischen Schritt dar, denn die Wahrnehmung der Sonne als ein natürliches Objekt widerspricht fundamental der vorherigen – und auch der oft noch in späteren Jahrhunderten vertretenen – Auffassung der Sonne als Teil einer göttlichen Entität. Es ist daher auch wenig verwunderlich, dass aus eben diesen Gedanken auch die erste kritische Auseinandersetzung mit dem vermenschlichten Götterbild des antiken Griechenlands hervorgingen (»Wenn die Pferde Götter hätten, sähen sie wie Pferde aus.«) und daraus folgend erste Gedanken zum Monotheismus. Interessant ist dabei sicherlich auch der Vergleich mit dem bereits oben erwähnten ägyptischen Monotheismus des Echnaton, der ja gerade die Vergötterung der Sonne als Ausgangspunkt nahm. Man kann also sagen, dass mit Xenophanes die Sonne zum ersten Mal in der europäischen Geschichte als Gegenstand der Physik auftauchte oder – etwas schmissiger – dass es sich um die Geburtsstunde der Astrophysik handelte. Die Thesen des Xenophanes wurden später auch von anderen griechischen Philosophen aufgenommen, zum Beispiel beschrieb der Vorsokratiker Anaxagoras die Sonne als glühenden Stein. Diese Auffassungen setzte sich allerdings im Folgenden nicht bei allen Denkern durch, und viele spätere Schulen fielen wieder auf eher mythische Erklärungen zurück. Der Volksglaube in Griechenland nahm wahrscheinlich keinerlei Kenntnis von all diesen Überlegungen.

Dem griechischen Gott Helios entsprach weitgehend der unbesiegbare römische Gott Sol invictus, dessen Kult in der Kaiserzeit weit verbreitet war. Aus der Antike übernommen ist die Sonne als Symbol der Vitalität in der Astrologie.

In der nordischen Mythologie formten die Götter die Sonne aus einem Funken und legten sie in einen Wagen. Die Göttin Sol fährt mit dem Wa-

gen über den Himmel, gezogen von den Rössern Alsvidr und Arwagr. Das Gespann wird beständig von dem Wolf Skalli (Skoll) verfolgt. Am Tag des Weltunterganges (Ragnarök) wird der Wolf die Sonne verschlingen.

Im frühen Mexiko wurde der Sonnengott Tonatiuh von den Azteken verehrt. Bei den Maya und den Inka waren Itzamná beziehungsweise Inti die Hauptgottheiten.

Die Beobachtung der Sonne (und anderer Sterne) und die Bestimmung ihrer Bahnpunkte (Tag- und Nachtgleiche, Sommer- und Wintersonnenwende) war eine Voraussetzung für die Erstellung von Kalendern. Hierdurch konnten wichtige jahreszeitliche Ereignisse vorherbestimmt werden, wie das Eintreffen des Nilhochwassers im alten Ägypten, der günstigste Zeitpunkt der Saat oder das Eintreffen der für die Seefahrt gefährlichen Herbststürme. Vorchristliche Kultstätten, wie Stonehenge, waren offensichtlich zu derartigen Beobachtungszwecken errichtet worden. Die Anlage von Stonehenge ist so ausgerichtet, dass am Morgen des Mittsommertages, wenn die Sonne ihre höchste nördliche Position erreicht, die Sonne direkt über einem Positionstein (»Fersenstein«) aufgeht und die Sonnenstrahlen in gerader Linie ins Innere des Bauwerks eindringen.

Die bronzezeitliche Himmelscheibe von Nebra scheint ebenfalls ein Instrument zur Himmelsbeobachtung gewesen zu sein. Ihre goldenen Ränder werden u. a. als »Sonnenbarken«, ein religiöses Symbol der Bronzezeit, interpretiert. In die gleiche Zeit fällt auch der Sonnenwagen von Trundholm, bei der die Scheibe als Sonnensymbol mit einer Tag- und Nachtseite gedeutet wird.

Das antike Weltbild ging allgemein davon aus, dass die Erde den Mittelpunkt des Universums bildete. Sonne, Mond und die Planeten bewegten sich auf exakten Kreisbahnen um die Erde. Diese Vorstellung, zusammengefasst von Ptolemäus, hielt sich fast 2.000 Jahre lang. Insbesondere die Kirche verteidigte dieses Weltbild, zumal auch in der Bibel dargelegt wird, dass sich die Sonne bewegt. Allerdings zeigte das Modell Schwächen. So konnte die Bewegung der Planeten nur durch komplizierte Hilfskonstruktionen erklärt werden. Bereits Aristarch von Samos postulierte im 2. Jahrhundert v. Chr., dass die Sonne das Zentrum der Welt darstelle. Die Gelehrten Nikolaus von Kues und Regiomontanus griffen diesen Gedanken mehr als 1.500 Jahre später wieder auf. Nikolaus Kopernikus versuchte in seinem Werk *De Revolutionibus Orbium Coelestium* eine mathematische Grundlage dafür zu schaffen, was ihm letztendlich nicht gelang. Sein Werk regte allerdings weitere Forschungen an und bereitete das Fundament für das »Kopernikanische Weltbild«. Kopernikus' Werk wurde von der Kirche

zunächst nicht als Ketzerei betrachtet, da es ein rein mathematisches Modell darstellte. In späteren Jahren, als Gelehrte daran gingen, Kopernikus' Vorstellung in ein reales Weltbild umzusetzen, wandte sich die Kirche jedoch entschieden gegen solche »umstürzlerischen« Gedanken. Gelehrte wie Galilei, die ebenfalls zur Erkenntnis einer zentralen Sonne gelangt waren, wurden von der Inquisition verfolgt. Durch weitere Beobachtungen, exakte Bestimmungen der Planetenbahnen, die Einführung des Teleskops und die Entdeckung der Gesetze der Himmelsmechanik setzte sich das heliozentrische Weltbild allmählich durch.

Die weiteren Fortschritte der Astronomie ergaben schließlich, dass auch die Sonne keine herausragende Stellung im Universum einnimmt, sondern ein Stern unter Abermilliarden Sternen ist.

Aufbau

Die Sonne besteht aus verschiedenen Zonen mit schalenförmigem Aufbau, wobei die Übergänge allerdings nicht streng voneinander abgegrenzt sind.

Kern – Sämtliche freiwerdende Energie stammt aus einer als »Kern« bezeichneten Zone im Innern der Sonne. Dieser Kern erstreckt sich vom Zentrum bis zu etwa einem Viertel des Radius der sichtbaren Sonneneroberfläche. Obwohl der Kern nur 1,6% des Sonnenvolumens ausmacht, sind hier rund 50% der Sonnenmasse konzentriert. Bei einer Temperatur von etwa 15,6 Millionen K liegt die Materie in Form eines Plasmas vor. Durch die Proton-Proton-Reaktion verschmelzen Wasserstoffkerne zu Heliumkernen, wobei Gammastrahlung und Elektronenneutrinos erzeugt werden. Die erzeugten Heliumkerne haben aufgrund der Bindungsenergie eine geringfügig geringere Masse als die Summe der ursprünglichen Wasserstoffkerne (Massendefekt). Der Massenunterschied wird gemäß der Formel $E = m \cdot c^2$ in Energie umgewandelt (pro Proton-Proton-Fusion ≈ 27 MeV). Im Kern der Sonne werden pro Sekunde 700 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 695 Millionen Tonnen Helium fusioniert, wobei eine Gesamtleistung von etwa $4 \cdot 10^{26}$ W = 400 Quadrillionen Watt freigesetzt wird.

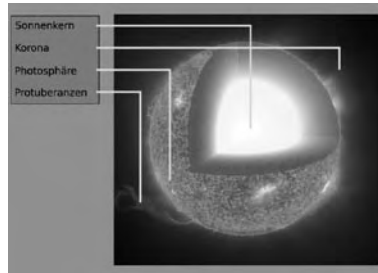


Abb. 3: Aufbau der Sonne

Eigentlich ist der Sonnenkern zu »kalt« für eine Kernfusion. Die kinetische Energie der Teilchen reicht rechnerisch nicht aus, um bei einem Zusammenstoß die starken Abstoßungskräfte der positiv geladenen Protonen (Wasserstoffkerne) zu überwinden. Dass dennoch Fusionen stattfinden, ist auf den quantenmechanischen Tunneleffekt zurückzuführen. Gemäß der Quantenmechanik verhält sich ein Proton wie eine ausgebreitete Welle ohne genau definierten Ort, seine Energie schwankt um einen Mittelwert. Es besteht dabei eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Protonen so weit nähern, dass eine Verschmelzung stattfinden kann. Das Energieniveau der abstoßenden Kräfte wird bei der Verschmelzung gleichsam »durchtunnelt«. Somit ist die Wahrscheinlichkeit einer Fusion zweier Wasserstoffkerne im Innern der Sonne sehr gering. Da jedoch eine immense Anzahl von Kernen vorhanden ist, können dennoch gewaltige Energiemengen freigesetzt werden. Die »gebremste« Kernfusion hat für das Sonnensystem und das Leben auf der Erde den entscheidenden Vorteil, dass die Sonne sparsam mit ihren Energievorräten umgeht und über einen langen Zeitraum konstante Energiemengen abstrahlt.

Strahlungszone – Um den Kern herum liegt die so genannte »Strahlungszone«, die etwa 70% des Sonnenradius ausmacht. Im Vakuum des Weltalls bewegen sich Gammaphotonen mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum. Im Innern der Sonne herrscht eine derart hohe Dichte, dass die Photonen immer wieder mit den Teilchen des Plasmas zusammenstoßen, dabei absorbiert und wieder abgestrahlt werden. Sie bewegen sich auf einer völlig zufälligen Bahn und diffundieren dabei Richtung Sonneneroberfläche. Statistisch benötigt ein Photon etwa 170.000 Jahre, um die Strahlungszone zu passieren. Dies bedeutet, dass das Licht, welches wir heute von der Sonne erhalten, bereits vor entsprechend langer Zeit erzeugt wurde. Bei jedem Zusammenstoß in der Strahlungszone nimmt die Strahlungsenergie des Photons ab und seine Wellenlänge zu. Die Gammastrahlung wird in Röntgenstrahlung umgewandelt. Anders als die Photonen gelangen die Neutrinos nahezu ungehindert durch die Schichten der Sonne, da sie kaum mit Materie in Wechselwirkung treten. Die Neutrinos erreichen, da sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, bereits nach acht Minuten die Erde, wobei sie den Planeten fast ungehindert durchqueren. In jeder Sekunde durchqueren etwa 70 Milliarden Neutrinos einen Quadratzentimeter der Erdoberfläche.

Konvektionszone – An die Strahlungszone schließt sich die »Konvektionszone« an. Am Grenzbereich zur Strahlungszone beträgt die Temperatur noch etwa zwei Millionen Kelvin. Die Energie wird in dieser Zone nicht mehr durch Strahlung abgegeben, sondern durch eine Strömung (Konvektion) der Plasmas weiter nach außen transportiert. Dabei steigt heiße Materie in gewaltigen Strömen nach außen, kühlt dort ab und sinkt wieder ins Sonneninnere hinab. Da das frisch aufgestiegene Plasma heißer und damit heller ist als das absteigende, sind die Konvektionszellen mit einem Teleskop als Granulation der Sonnenoberfläche erkennbar.

Sonnenoberfläche und Umgebung – Oberhalb der Konvektionszone liegt die Photosphäre, die wir als Quelle der Sonnenstrahlung wahrnehmen: eine »Kugelschale aus Licht« als die für uns sichtbare Sonnenoberfläche. Sie ist aber nur eine 300–400 km dicke Schicht, deren Temperatur an der Oberfläche rund 6.000 Kelvin (5.700 °C) beträgt. Die Photosphäre gilt allgemein als die eigentliche Sonnenoberfläche, obwohl unser Zentralgestirn – wie auch die meisten anderen Sterne – keine scharfe äußere Grenze besitzt.

Die Photosphäre gibt die gesamte vom Sonneninnern erzeugte und aufsteigende Energie als Strahlung ab – großteils im sichtbaren Licht, was auch ihr Name andeutet (griech. *φως* = *Licht*). Erst hier hat die Energie der Strahlungsquanten so weit abgenommen, dass sie unschädlich und für das menschliche Auge sichtbar sind. Wegen ungeheurer Wirbel und variabler Magnetfelder (Quelle der Sonnenflecken) darf man sich die Oberfläche allerdings nicht als glatt vorstellen. Durch digitale Bildverarbeitung der Messungen von SOHO, TRACE oder CHANDRA kann man sie so darstellen, dass sie wie hartes, aber dauernd bewegliches Material aussieht. Für die Turbulenzen ist auch die elektrische Leitfähigkeit der heißen Sonnenmaterie entscheidend.

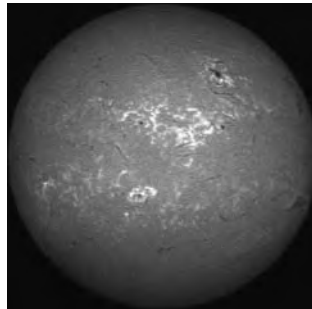


Abb. 4: Die Chromosphäre der Sonne im Licht der H- α -Linie

Über der Photosphäre erstreckt sich die Chromosphäre. Sie wird von jener zwar überstrahlt, ist aber bei Sonnenfinsternissen für einige Sekunden als rötliche Leuchterscheinung zu sehen. Die Temperatur nimmt hier auf über 10.000 K zu, während die Gasdichte um den Faktor 10^{-4} auf 10^{-15} g/cm³ abnimmt.

Über der Chromosphäre liegt die Korona, in der die Dichte nochmals um den Faktor 10^{-4} auf 10^{-19} g/cm³ abnimmt. Die innere Korona erstreckt sich – je nach dem aktuellen Fleckenzzyklus – um 1–2 Sonnenradien nach außen und stellt eine erste Übergangszone zum interplanetaren Raum dar. Durch Sonnenstrahlung, Stoßwellen und andere Wechselwirkungen mechanischer oder magnetischer Art wird die äußerst verdünnte Korona-Materie allerdings auf Temperaturen bis zu zwei Millionen Kelvin aufgeheizt. Die genauen Ursachen dieser Heizmechanismen sind freilich noch unklar. Eine mögliche Energiequelle wären akustische Wellen und Microflares – kleine Ausbrüche auf der Sonnenoberfläche.

Ein besonders hoher Temperaturgradient herrscht an der Untergrenze der Korona, wo ihre Dichte nach oben schneller abnimmt, als die Energie abtransportiert werden kann. Innerhalb einiger 100 Höhenkilometer steigt die kinetische Gastemperatur um eine Million Grad und »macht sich Luft«, indem die zusätzliche Heizenergie als Sonnenwind entweicht. Die Korona kann nur aufgrund ihrer extrem geringen Dichte so heiß werden.

Der bei jeder totalen Sonnenfinsternis sichtbare Strahlenkranz (lat. *Corona* = Krone) hat schon vor Jahrtausenden die Menschen erstaunt. Er kann bis mehrere Millionen Kilometer reichen und zeigt eine strahlenförmige Struktur, die sich mit dem Zyklus der Sonnenflecken stark ändert. Im Sonnenflecken-Maximum verlaufen die Strahlen nach allen Seiten, im Minimum nur in der Nähe des Sonnenäquators.

Die Korona erstreckt sich bis zur Heliopause, wo sie auf das interstellare Medium trifft.



Abb. 5: Die Korona der Sonne während der Sonnenfinsternis im Jahre 1999

Magnetfeld

Die Sonne besitzt außerordentlich starke Magnetfelder, die durch die Strömung der elektrisch leitenden Gase hervorgerufen werden. Die Leitfähigkeit des Plasmas im Sonneninnern entspricht dem von Kupfer bei Zimmertemperatur. In der Sonne zirkulieren elektrische Ströme in einer Größenordnung von 10^{12} Ampere. Das Innere der Sonne wirkt somit wie ein gigantischer Dynamo, der die Bewegungsenergie eines elektrischen Leiters in elektrische Energie und ein Magnetfeld umwandelt. Man geht

derzeit davon aus, dass dieser Dynamo-Effekt nur in einer dünnen Schicht am Boden der Konvektionszone wirksam ist.

Sichtbare Auswirkungen der Magnetfelder sind die Sonnenflecken und die Protuberanzen. Sonnenflecken sind relativ kühle Bereiche der Sonnenatmosphäre. Ihre Temperatur liegt zwischen 3.700 und 4.500 K. Durch spektrosko-

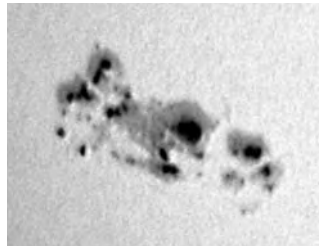


Abb. 6: Große Sonnenfleckengruppe im Jahr 2004

pische Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass im Bereich der Sonnenflecken starke Magnetfelder vorherrschen. Die Spektrallinien von Elementen, die normalerweise bei einer Wellenlänge liegen, erscheinen



Abb. 7: Protuberanz

bei Anwesenheit eines Magnetfeldes dreigeteilt (Zeeman-Effekt), wobei der Abstand der Linien proportional zur Stärke des Feldes ist. Die Magnetfeldstärke im Umfeld der Sonnenflecken kann bis zu 0,3 Tesla (3.000 Gauß) betragen und ist somit tausendmal stärker als das irdische Magnetfeld an der Erdoberfläche. In der Sonne bewirken die Magnetfelder eine Hemmung der Konvektionsströmungen, so dass weniger Energie nach außen transportiert wird.

Die dunkelsten und kühleren Zonen auf der Sonne sind somit die Orte mit den stärksten Magnetfeldern.

Sonnenflecken treten in Gruppen auf, wobei meistens zwei auffällige Flecken dominieren, die eine entgegengesetzte magnetische Ausrichtung aufweisen (ein Fleck ist sozusagen ein »magnetischer Nordpol«, der andere ein »Südpol«). Solche bipolaren Flecken sind meist in Ost-West-Richtung, parallel zum Sonnenäquator, ausgerichtet.

Zwischen den Flecken bilden sich Magnetfeldlinien in Form von Schleifen aus. Längs dieser Linien wird ionisiertes Gas festgehalten, das in Form von Protuberanzen oder Filamenten sichtbar wird (Protuberanzen sind Erscheinungen am Rand, Filamente auf der »Sonnenscheibe«).

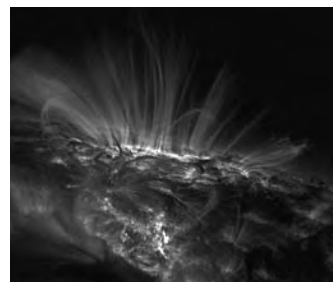


Abb. 8: Schleifenförmige Gasfilamente auf der Sonne im UV-Licht

Die Gesamtzahl der Sonnenflecken unterliegt einem Zyklus von rund elf Jahren. Während eines Fleckenminimums sind kaum Sonnenflecken sichtbar. Mit der Zeit bilden sich zunehmend Flecken in einem Bereich von 30° nördlicher und südlicher Breite aus. Diese aktiven Fleckengürtel bewegen sich zunehmend in Richtung Äquator. Nach etwa 5,5 Jahren ist das Maximum erreicht und die Zahl der Flecken nimmt langsam wieder ab. Nach einem Zyklus hat sich das globale Magnetfeld der Sonne umgepolt. Der vorher magnetische Nordpol ist jetzt der magnetische Südpol.

Die genauen Ursachen für den elfjährigen Zyklus sind noch nicht vollständig erforscht. Derzeit geht man von folgendem Modell aus: Zu Beginn eines Zyklus, im Minimum, ist das globale Magnetfeld der Sonne bipolar ausgerichtet. Die Magnetfeldlinien verlaufen geradlinig über den Äquator von Pol zu Pol. Durch die differentielle Rotation werden die elektrisch geladenen Gasschichten gegeneinander verschoben, wobei die Magnetfelder zunehmend gestaucht, verdreht und verdrillt werden. Die Magnetfeldlinien ragen zunehmend aus der sichtbaren Oberfläche heraus und verursachen die Bildung von Flecken und Protuberanzen. Nach dem Fleckenmaximum richtet sich das Magnetfeld wieder neu aus.

Pulsation

Die gesamte Sonne pulsiert in unterschiedlichen Frequenzen. Sie schwingt gleichsam wie eine riesige Glocke. Allerdings können wir die Schallwellen auf der Erde nicht »hören«, da das Vakuum des Weltraums diese nicht weiterleitet. Mit speziellen Methoden kann man die Schwingungen jedoch sichtbar machen.

Schwingungen aus dem Sonneninnern bewegen die Photosphäre auf und ab. Aufgrund des Dopplereffekts werden die Absorptionslinien des Sonnenspektrums, je nach Bewegungsrichtung der Gase, verschoben. Die hauptsächlich vorherrschende Schwingung hat eine Periodendauer von etwa fünf Minuten (293 ± 3 Sekunden).

Innerhalb der Konvektionszone herrschen heftige Turbulenzen, wobei aufsteigende Konvektionszellen bei der Strömung durch die umliegenden

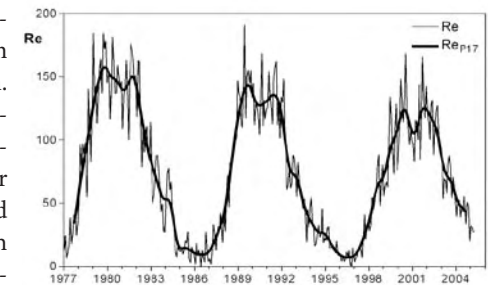


Abb. 9: Sonnenfleckenzahl in den Jahren 1977 bis 2004

Gase Schallwellen erzeugen. Nach außen laufende Schallwellen erreichen die Grenzschicht zur Photosphäre. Da dort die Dichte stark abnimmt, können die Wellen sich dort nicht ausbreiten, sondern werden reflektiert und laufen wieder ins Sonneninnere. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Dichte der Materie und die Schallgeschwindigkeit zu, so dass die Wellenfront gekrümmt und wieder nach außen geleitet wird. Durch wiederholte Reflexion und Überlagerung können Schallwellen verstärkt werden, es bilden sich Resonanzen aus. Die Konvektionszone wirkt somit wie ein riesiger Resonanzkörper, der die darüber liegende Photosphäre in Schwingung versetzt.

Die Auswertung der Schwingungen erlaubt eine Aussage über den inneren Aufbau der Sonne. So konnte die Ausdehnung der Konvektionszone bestimmt werden. Analog zur Erforschung von seismischen Wellen auf der Erde spricht man bei dem solaren Wissenschaftszweig von der Heli-seismologie.

Wechselwirkung der Sonne mit ihrer Umgebung

Die Sonne beeinflusst auch den interplanetaren Raum mit ihrem Magnetfeld und vor allem mit der Teilchenemission, dem Sonnenwind. Dieser Teilchenstrom kann die Sonne mit mehreren 100 km/s verlassen und verdrängt das Interstellare Medium bis zu einer Entfernung von mehr als zehn Milliarden Kilometern. Bei Sonneneruptionen können sowohl Geschwindigkeit als auch Dichte des Sonnenwindes stark zunehmen und auf der Erde neben Polarlichtern auch Störungen in elektronischen Systemen und im Funkverkehr verursachen.

Erforschung der Sonne

Frühe Beobachtungen – Als der wichtigste Himmelskörper für irdisches Leben genoss die Sonne bereits vor der Geschichtsschreibung Aufmerksamkeit der Menschen. Kultstätten wie Stonehenge wurden errichtet, um die Position und den Lauf der Sonne zu bestimmen, insbesondere die Zeitpunkte der Sonnenwenden. Es wird vermutet, dass einige noch ältere Stätten ebenfalls zur Sonnenbeobachtung benutzt wurden, gesichert ist dies aber nicht. Der Verlauf der Sonne sowie besonders Sonnenfinsternisse wurden von den unterschiedlichen Kulturen sehr aufmerksam beobachtet und dokumentiert. Aufzeichnungen aus dem alten China belegen die Beobachtungen besonders heftiger Sonnenfleckenaktivität. Sonnenflecken können mit bloßem Auge wahrgenommen werden, wenn die Sonne tief am Horizont steht und das Sonnenlicht durch die dichte Erdatmosphäre »gefiltert« wird.

Beobachtungen mit Teleskopen –

Auch in Europa hatte man zu der damaligen Zeit Sonnenflecken wahrgenommen, wobei man sie allerdings für »atmosphärische Ausdünstungen« hielt. Erst die Entwicklung des Teleskops führte zu einer systematischen Erforschung des Phänomens. Im Jahre 1610 beobachteten Galileo Galilei und Thomas Harriot die Flecken erstmals mittels Teleskop. Johann Fabricius beschrieb sie 1611 als Erster in einer wissenschaftlichen Abhandlung. Die beobachtete Wanderung der Flecken auf der Sonnenscheibe führte er zutreffend auf die Eigenrotation der Sonne zurück. 1619 postulierte Johannes Kepler einen Sonnenwind, da der Schweif von Kometen immer von der Sonne weggerichtet ist.

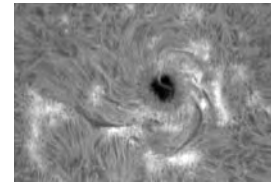


Abb. 10: Einzelner Sonnenfleck

1775 vermutete Christian Horrobow bereits, dass die Sonnenflecken einer gewissen Periodizität unterliegen. 1802 wies William Hyde Wollaston erstmals dunkle Linien (Absorptionslinien) im Sonnenspektrum nach. Joseph von Fraunhofer untersuchte die Linien ab 1814 systematisch, sie werden daher auch als »Fraunhoferlinien« bezeichnet (vgl. Farbtafel Abb. 136). 1843 publizierte Samuel Heinrich Schwabe seine Entdeckung des Zyklus der Sonnenfleckenaktivität. 1849 wurde die Sonnenfleckenrelativzahl eingeführt, die die Anzahl und Größe der Sonnenflecken wiedergibt. Seither werden die Flecken regelmäßig beobachtet und gezählt. 1889 entwickelte George Ellery Hale den Spektroheliographen. Henry Augustus Rowland vollendete 1897 einen Atlas des Sonnenspektrums, der sämtliche Spektrallinien enthält. 1908 entdeckte George Ellery Hale die Aufspaltung von Spektrallinien im Bereich der Sonnenflecken durch magnetische Kräfte (Zeeman-Effekt). 1930 beobachtete Bernard Ferdinand Lyot die Sonnenkorona außerhalb einer totalen Finsternis.

Lange Zeit unklar war allerdings, woher die Sonne ihre Energie bezieht. So hatte man die Vorstellung, dass die Sonne ein glühender, brennender Körper sei. Allerdings hätte der Brennstoff nur für einige tausend Jahre gereicht. William Thomson, der spätere Lord Kelvin, ging davon aus, dass die Sonne durch die eigene Schwerkraftwirkung schrumpfe und die Bewegungsenergie der Sontenteilchen in Wärme umgewandelt würde. So könnte die Sonne für etwa hundert Millionen Jahre Energie abgeben. Mit der Entdeckung der irdischen Radioaktivität stellte man allerdings fest, dass die Gesteine der Erdkruste mehrere Milliarden Jahre alt sein müssen. Erst die Entschlüsselung der atomaren Vorgänge brachte eine Lösung. Er-

nest Rutherford beschrieb einen Zusammenhang zwischen Radioaktivität und Kernumwandlung. Arthur Stanley Eddington folgerte, dass im Inneren der Sterne Elemente verschmelzen und in andere umgewandelt werden, wobei Energie freigesetzt wird. Da bei spektroskopischen Untersuchung hauptsächlich Wasserstoff festgestellt wurde, ging man davon aus, dass dieses Element eine entscheidende Rolle spiele. 1938 beschrieb Hans Bethe schließlich die Prozesse Proton-Proton-Reaktion, die im Inneren der Sonne ablaufen.

1942 wurde festgestellt, dass die Sonne Radiowellen ausstrahlt. 1949 wies Herbert Friedman die solare Röntgenstrahlung nach.

Im Laufe der Zeit wurden spezielle Sonnenobservatorien errichtet, die ausschließlich der Beobachtung der Sonne dienen.

1960 wurde die Schwingung der Photosphäre nachgewiesen. Dies war der Beginn der Helioseismologie, die die Eigenschwingungen der Sonne untersucht und daraus den inneren Aufbau sowie Prozesse ableitet.

Zur Messung der Sonnen-Neutrinos wurden riesige unterirdische Detektoren errichtet. Die Diskrepanz zwischen dem theoretischen und tatsächlich gemessenen Neutrinofluss führte seit den 1970ern zum so genannten *solaren Neutrino*problem: Es konnte nur etwa $\frac{1}{3}$ der erwarteten Neutrinos detektiert werden. Dies ließ zwei Möglichkeiten zu. Entweder war das Sonnenmodell falsch und der erwartete solare Neutrinofluss wurde überschätzt, oder die Neutrinos können sich auf dem Weg zur Erde in eine andere »Art« umwandeln (Neutrinooszillation). Erste Hinweise für diese Neutrinooszillation wurden im Jahr 1998 am Super-Kamiokande gefunden und inzwischen allgemein bestätigt.

Erforschung durch Satelliten und Raumsonden –

Eine Reihe von Satelliten wurde für die Beobachtung der Sonne in eine Erdumlaufbahn geschickt. Mittels der Satelliten können insbesondere Wellenlängenbereiche untersucht werden (Ultraviolett, Röntgenstrahlung), die sonst von der →Erdatmosphäre absorbiert werden. So hatte zum Beispiel die 1973 gestartete Raumstation Skylab unter anderem ein Röntgenteleskop an Bord.

Mit Hilfe von Raumsonden versuchte man unter anderem der Sonne näher zu kommen, um die Umgebung der Sonne studieren zu können. Dies war und bleibt aufgrund von sehr hohen Temperaturen und intensiver Strahlung ein technisch sehr schwieriges Unterfangen. So konnten die 1974 und 1976 gestarteten deutsch-amerikanischen Helios-Sonden sich der Sonne nur bis auf 43,5 Millionen Kilometer nähern.

Die 1990 gestartete Raumsonde Ulysses verfolgte andere Ziele. Sie sollte die Pole der Sonne studieren, die sowohl von der Erde als auch von Satelliten und Raumsonden aus, die sich in der Planetenebene bewegen, nicht sichtbar sind. Dies war nur mit einer Änderung der Bahnebene der Raumsonde um 90° erreichbar. Zu diesem Zweck flog Ulysses zunächst zum Riesenplaneten →Jupiter, wo durch ein Swing-By-Manöver die Bahnebene der Sonde geändert wurde. Dadurch konnte Ulysses die Planetenebene verlassen und überflog seitdem bereits zweimal die beiden Pole der Sonne. Mit konventionellen Raketenantrieben, ohne den Vorbeiflug am Jupiter, wäre eine solche Mission nicht möglich gewesen.

1995 wurde die größtenteils von Europa gebaute Sonde SOHO in Richtung Sonne gestartet. SOHO befindet sich nun im Lagrangeunkt L1 und beobachtet die Sonne mit zwölf verschiedenen Instrumenten. Sie liefert tägliche Aufnahmen der Sonne und trägt wesentlich der Vorhersage der Sonneneruptionen und Stürme bei. 1998 folgte der Satellit TRACE zur Unterstützung von SOHO.

2001 startete die Genesis-Raumsonde, die kurz darauf eine Position im Lagrangepunkt L1 bezog und dort zweieinhalb Jahre lang Proben des →Sonnenwindes sammelte, die anschließend zur Erde gebracht werden sollten. Dadurch sollte die genaue Isotopenzusammensetzung des Sonnenwindes ermittelt werden. Im September 2004 trat die Kapsel in die Erdatmosphäre ein, schlug jedoch aufgrund eines nicht entfalteten Fallschirms hart auf der Erde auf. Einige der Proben haben den Aufprall dennoch überstanden und werden derzeit von Wissenschaftlern studiert.

Für 2013 plant die europäische Raumfahrtbehörde ESA eine Raumsonde namens Solar Orbiter, die sich der Sonne bis auf 45 Sonnenradien (etwa 30 Millionen Kilometer) nähern und dabei Strukturen von 100 km Größe auflösen können soll.

Sichtbare Erscheinungen und Beobachtung der Sonne

Mit Teleskopen kann man Aktivitäten der Sonne in Form von Protuberanzen und Sonnenflecken sichtbar machen. Ebenfalls zu beobachten sind dort heftige Ausbrüche, so genannte Flares, die bereits mit kleinen Instrumenten als hellere und damit heißere Gebiete erkennbar sind.

Die Sonnenbeobachtung geschieht am einfachsten, indem das Okularbild eines Teleskops oder Fernglases auf eine weiße Fläche (zum Beispiel eine Leinwand oder ein Stück Pappe) projiziert wird. Die Abbildung der Sonne kann gefahrlos betrachtet werden. Dieses Verfahren nennt man Okularprojektion.

Ebenfalls möglich ist eine Beobachtung mit Hilfe von speziellen Sonnenfiltern, dies sind Folien oder beschichtete Gläser, die vor das Auge gehalten oder vor dem Objektiv angebracht werden. Eine detaillierte Beobachtung ist außerdem mit einem Herschelprisma oder Pentaprisma möglich.

Bei allen beschriebenen Beobachtungsverfahren wird das gesamte Spektrum des Sonnenlichts gedämpft, die Sonne wird im »Weißlicht« beobachtet. Dabei werden Sonnenflecken, Flares und die Granulation sichtbar.

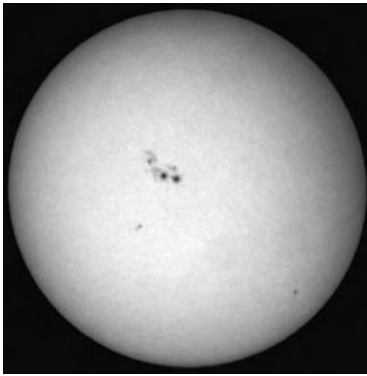


Abb. 11: Sonnenbeobachtung mit einem Spektiv nach der Projektionsmethode

Um Protuberanzen zu beobachten, bedarf es besonderer Bauteile oder Teleskope. Bei einem Protuberanzenansatz wird die Sonne mittels eines Scheibchens abgedeckt – es wird sozusagen eine künstliche totale Sonnenfinsternis erzeugt. Die am Sonnenrand aufsteigenden Protuberanzen werden durch einen sog. *H-alpha-Filter* beobachtet. Dies ist ein besonders schmalbandiger Interferenzfilter, der nur das tiefrote Licht des ionisierten Wasserstoffes durchlässt. Eine Beobachtung der gesamten Sonnenoberfläche in diesem Spektralbereich ermöglichen sog. H-alpha-Teleskope. Damit können Protuberanzen, Filamente, Flecken und Flares beobachtet werden. Diese Teleskope sind in den letzten Jahren sehr preisgünstig geworden und werden von Amateurastronomen zunehmend eingesetzt.

Die Korona kann nur bei einer totalen Sonnenfinsternis oder mittels eines speziellen Gerätes, dem Koronographen, beobachtet werden.

Mit freiem Auge kann die Sonne lediglich bei dunstigem Himmel kurz nach Sonnenaufgang oder kurz vor Sonnenuntergang betrachtet werden. Die →Erdatmosphäre schluckt den größten Teil des Lichts, insbesondere auch der UV-Strahlung. Allerdings verringert die Atmosphäre in Horizontnähe auch stark die Abbildungsqualität und bewirkt eine vertikale Stauchung des Sonnenbildes als Folge der Lichtbrechung. Dass die untergehende Sonne in Horizontnähe größer aussieht, ist hingegen nicht, wie oft vermutet, eine Folge der Refraktion an den Luftschichten, sondern eine optische Täuschung, die von der Wahrnehmungspsychologie unter dem Begriff Mondtäuschung untersucht und erklärt wird.

Entwicklung der Sonne

Die Sonne entstand vor 4,6 Milliarden Jahren durch den gravitativen Kollaps einer interstellaren Gaswolke. Dieser Kollaps, in dessen Verlauf auch die Planeten entstanden, und die anschließende Relaxationsphase war nach etwa 50 Millionen Jahren abgeschlossen. Die anschließende Entwicklungsgeschichte der Sonne führt über ihren jetzigen Zustand zu dem eines Roten Riesen und schließlich über eine instabile Endphase im Alter von etwa 12,5 Milliarden Jahren zu einem Weißen Zwerg, der von einem Planetarischen Nebel umgeben ist.

Dieser Ablauf lässt sich heute anhand der Gesetze der Physik und der Kenntnis kernphysikalischer Prozesse aus Laborexperimenten recht genau im Computer modellieren. Die Kenndaten der einzelnen Phasen sind in der Tabelle angegeben. Der Index Null markiert die heutigen Kenndaten der Sonne, das heißt im Alter von 4,6 Milliarden Jahren.

Phase	Dauer in Millionen J.	Leuchtkraft / L ₀	Radius / R ₀
Hauptreihenstern	11.000	0,7–2,2	0,9–1,6
Übergangsphase	700	2,3	1,6–2,3
Roter Riese	600	2,3–2.300	2,3–166
Beginn des He-Brennens	110	44	etwa 10
He-Schalenbrennen	20	44–2.000	10–130
Instabile Phase	0,4	500–5.000	50–200
Übergang zu Weißem Zwerg mit Planetarischem Nebel	0,1	3.500	100–0,08

Protostern – Vor etwa 4,6 Milliarden Jahren zog sich eine riesige Gas- und Staubwolke unter der eigenen Schwerkraft zusammen. Im Zentrum der Wolke wurde die Materie immer dichter zusammen gepresst, wobei Druck und Temperatur immer weiter anstiegen. Zu diesem Zeitpunkt wurden bereits große Energiemengen in Form von Strahlung abgegeben. Dieses Stadium nennt man einen Protostern.

Hauptreihenstern – Die Temperatur und der Druck im Zentrum stiegen so weit an, bis die Kernfusionsprozesse einsetzten. Dadurch wurde ein Strahlungsdruck wirksam, der der Schwerkraft entgegenwirkte. Die weitere Kontraktion wurde aufgehalten, der Stern stabilisierte sich. Die Sonne hatte das Stadium eines so genannten Hauptreihensterns erreicht. In dieser Phase verweilt sie elf Milliarden Jahre. In dieser Zeit steigt die Leuchtkraft um das Dreifache von 0,7 L₀ auf 2,2 L₀ und der Radius auf fast

das Doppelte von $0,9R_0$ auf $1,6R_0$ an. Im Alter von fünfeinhalb Milliarden Jahren, das heißt in 900 Millionen Jahren ab heute, überschreitet die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche den für höhere Lebewesen kritischen Wert von 30°C . Eine weitere Milliarde Jahre später werden 100°C erreicht. Spätestens in Alter von 9,4 Milliarden Jahren versiegt der Wasserstoff im Sonnenzentrum, und die Fusionszone verlagert sich in einen schalenförmigen Bereich um das Zentrum, der sich im Laufe der Zeit weiter nach außen bewegt. Dieser Vorgang führt jedoch vorerst nicht zu einer Veränderung der äußerlich sichtbaren Sonnenparameter.

Im Zeitraum von 11 bis 11,7 Milliarden Jahren beginnt eine Kontraktionsphase der ausgebrannten Kernzone aus Helium. Dabei wächst der Sonnenradius auf $2,3R_0$ an. Die Sonne wird rötlicher und beginnt sich von der Hauptreihe im so genannten Hertzsprung-Russell-Diagramm zu entfernen. Bis zu diesem Zeitpunkt beträgt der Massenverlust durch Sonnenwind weniger als ein Promille.

Roter Riese – Im Zeitraum von 11,7 bis 12,3 Milliarden Jahren setzt ein dramatisch beschleunigter Anstieg von Leuchtkraft und Radius ein. Durch die Zunahme der Oberfläche strahlt die Sonne noch rötlicher. In der Endphase dieser Entwicklung erreicht die Sonne eine Leuchtkraft von $2.300L_0$ und einen Radius von $166R_0$. Das entspricht etwa dem Radius der Umlaufbahn der \rightarrow Venus. Venus und \rightarrow Merkur werden vernichtet. Von der Erde aus gesehen nimmt die Sonne nun einen großen Teil des Himmels ein, und die Erdkruste wird zu einem einzigen Lava-Ozean aufgeschmolzen. Durch die geringe Gravitation an der Sonnenoberfläche verliert die Sonne in dieser Phase 28% ihrer Masse durch Sonnenwind. Gegen Ende dieser Phase strömt ein Anteil von bis zu $1,3 \cdot 10^{-7}M_0$ pro Jahr als interstellares Gas in den Weltraum, wobei M_0 die Masse der heutigen Sonne bezeichnet. Durch die geringere Sonnenmasse sinkt auch die Anziehungskraft auf die Planeten, so dass deren Bahnradien um jeweils 38% zunehmen. Da die Kernzone der Sonne keine Energie mehr produziert, gibt sie der Gravitation weiter nach und kontrahiert, bis schließlich die Dichte ungefähr auf das 10.000fache des heutigen Wertes angestiegen ist.

Helium-Blitz und -Brennphase – Durch die Kontraktion der Zentralregion steigt dort die Temperatur schließlich auf 10^8K . Bei diesem Wert setzt die Fusion von Helium zu Kohlenstoff ein. Aufgrund der extremen Dichte in der Größenordnung 10^6g/cm^3 im Zentrum und der damit verbundenen

Neutrino-Kühlung zündet die Fusionsreaktion zunächst innerhalb einer heißeren kugelschalenförmigen Zone um das Zentrum. Gewöhnlich würde die dabei freiwerdende Energie zu einer Expansion des Kerns führen, die die Temperatur stabilisiert. Die Kernzone befindet sich jedoch in einem besonderen quantenmechanischen Entartungszustand, was zur Folge hat, dass die Energie zunächst in die Auflösung der Entartung investiert wird. Daher ist zunächst kein stabiler Zustand möglich, so dass die Heliumfusion in Form einer gigantischen Explosion einsetzt, die als Helium-Blitz (*helium flash*) bezeichnet wird. Dabei steigt für mehrere Sekunden die Sonnenleistung auf $10^{10}L_0$. Das entspricht etwa 10% der Leuchtkraft der gesamten Milchstraße. Erst nach einem Umsatz von 3% des Heliumreservoirs setzt eine Expansion ein und stoppt diese Leistungsexkursion. Diese Explosion findet nur im Zentralbereich statt und ist äußerlich zunächst nicht bemerkbar. Sie drängt jedoch die Wasserstofffusionszone weiter nach außen, deren Temperatur daher abnimmt und damit auch der Energieumsatz. Paradoxe Weise sinkt damit als äußerliche Folge des Helium-Blitzes innerhalb der nächsten 10.000 Jahre die Leuchtkraft ab und zwar fast um den Faktor 100. Es folgt eine Phase von einer Million Jahren, in denen die Sonnenparameter oszillieren, bis sich ein stabiler Zustand der Heliumfusion im Zentrum einstellt, der anschließend 110 Millionen Jahre anhält. Gleichzeitig brennt auch die schalenförmige Wasserstofffusionszone weiter außen weiter. In dieser Zeit bleibt die Leuchtkraft nahezu konstant bei $44L_0$ und der Radius bei $10R_0$.

Heliumschalen-Brennen – Danach ist auch das Helium im Sonnenzentrum verbraucht, und es beginnt eine Phase des Heliumschalen-Brennens, die 20 Millionen Jahre andauert. Es existieren nun zwei ineinander geschichtelte schalenförmige Fusionszonen. Im Zentrum sammelt sich Kohlenstoff und kontrahiert gravitativ. Damit ist ein erneuter enormer Anstieg der Leuchtkraft auf $2.000L_0$ und eine Zunahme des Radius auf $130R_0$ verbunden. Gegen Ende verliert die Sonne dabei einen Massenanteil von $0,1M_0$.

In den letzten 500.000 Jahren dieser Phase erwartet man in Zusammenhang mit der Wechselwirkung zwischen dem kontrahierenden Kern und der Heliumfusionszone weitere instabile Situationen, bei denen kurzzeitige Leistungsexkursionen durch Heliumfusion mit etwa 10^6L_0 eintreten können. Ein wahrscheinliches Szenarium wären beispielsweise vier solcher Helium-Blitze im Abstand von etwa 100.000 Jahren. Als Folge jedes dieser Helium-Blitze und der damit verbundenen Expansion

der Wasserstoffschale kann die Fusion dort in den folgenden 200 Jahren vorübergehend völlig zum Stillstand kommen. Die äußerliche Folge eines Helium-Blitzes wäre daher wiederum zunächst eine Abnahme der Leuchtkraft. Nach 400 Jahren erreicht die Energie des Helium-Blitzes die Oberfläche. Leuchtkraft und Radius steigen an und relaxieren in den folgenden 10.000 Jahren wieder. Dabei werden Variationen der Leuchtkraft zwischen $500L_0$ und $5.000L_0$ erwartet sowie Radiusvariationen zwischen $50R_0$ und $200R_0$. In den Phasen maximaler Ausdehnung reicht die Sonnenoberfläche bis an die heutige Erdbahn heran. Nur durch die Zunahme des Erdbahndurchmessers entkommt die Erde der völligen Vernichtung. Gleichzeitig stößt die Sonne in diesen Phasen insgesamt eine Masse von weiteren $0,05M_0$ ab.

Weißer Zwerg und Planetarischer Nebel – Durch die erwähnten Massenverluste verliert die Sonne die gesamte äußere Hülle einschließlich der Wasserstoff- und Heliumfusionszone. Etwa 100.000 Jahre nach dem letzten Helium-Blitz wird daher der heiße innere Kern freigelegt, der im Wesentlichen aus hochverdichtetem Kohlenstoff und Sauerstoff besteht. Sein Radius beträgt nur noch $0,08R_0$, dafür aber seine Oberflächentemperatur $120.000K$. Seine Leuchtkraft beträgt anfänglich $3.500L_0$. Aufgrund der hohen Temperatur enthält diese Strahlung einen enormen Anteil von ultravioletter Strahlung, welche die abgestoßene Gaswolke der Sonne nun zum Leuchten anregt. Da die Geschwindigkeit des Sonnenwindes ständig zunimmt, werden die früher ausgestoßenen Gase durch die späteren eingeholt und oft zu einer kugelförmigen Gasschale komprimiert. Für einen außen stehenden Beobachter erscheinen die leuchtenden Gase in diesem Fall als Ring, der als Planetarischer Nebel bezeichnet wird. Durch das Verflüchtigen des Gases erlischt diese Erscheinung nach einigen 10.000 Jahren wieder, und im Zentrum bleibt der strahlende Rest der Sonne, den man als Weißen Zwerg bezeichnet.

Er hat nur etwa die Größe der Erde, aber eine Masse von $0,55M_0$. Seine Dichte beträgt daher etwa eine Tonne pro Kubikzentimeter. Er besitzt keine innere Energiequelle, so dass seine Abstrahlung zu einem Wärmeverlust führt. Nach einer vergleichsweise raschen Abkühlung im Anfangsstadium durch die extreme Leuchtkraft sinkt die Oberflächentemperatur auf Werte, bei denen eine Strahlung aufgrund der deutlich niedrigeren Leuchtkraft über mehrere dutzend Milliarden Jahre möglich ist, bevor die Sonne als Schwarzer Zwerg im optischen Spektralbereich gänzlich erlischt.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonne>. Historie: 23.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Wolfgangbeyer, Bricktop1, SiriusB, CWitte, Geof, Wing, Marc Layer, Kookaburra, StephanPsy, Lotse, Allen Mc., Saperaud, Rivi, Arnomane, Case-Berlin, Phrood, Fisch1917, Ben-Zin, Zwobot, Media lib, Schusch, Matze6587, Anton J Gamel, StarFichteR, LaZeR, Nephelin, RolandHagemann, Kiko2000, Xorx77, ErikDunsing, Biobertus, Mps, Ken Iso, Korelstar, Stefan h, Koethnig, Martin-vogel, Togo, The Hawk, BitterMan, Liquidat, Traitor, Neitram, Boemmels, Bdk, Apostate Tutor, Odin, Mr. B.B.C., AndreasB, RobbyBer, Srbauer, AlphaCentauri, Head, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Sonnenwind

Der Sonnenwind ist ein Strom geladener Teilchen, der von der Sonne ins All strömt. Gelegentlich wird insbesondere in der Presse auch der falsche Begriff *Sonnenstaub* verwendet, was insbesondere bei der Berichterstattung zur Genesis-Sonde der Fall war.

Entstehung und Zusammensetzung

Der Sonnenwind besteht hauptsächlich aus Protonen und Elektronen sowie aus Heliumkernen (Alpha-Teilchen); andere Atomkerne und nicht ionisierte (elektrisch neutrale) Atome sind nur in kleinem Umfang vorhanden. Obwohl der Sonnenwind aus den äußeren Schichten der Sonne stammt, spiegelt er die Elementhäufigkeit dieser Schichten der Sonne nicht exakt wider, da durch Fraktionierungsprozesse (FIP-Effekt) manche Elemente im Sonnenwind angereichert beziehungsweise verdünnt werden. Im Inneren der Sonne wurden die Elementhäufigkeiten durch die dort stattfindende Kernfusion geändert. Da die äußeren Schichten der Sonne jedoch nicht mit den inneren Schichten gemischt sind, entspricht deren Zusammensetzung noch der Zusammensetzung des Urnebels, aus dem sich das Sonnensystem gebildet hat. Die Erforschung des Sonnenwindes ist deshalb auch interessant, um sowohl auf die chemische Zusammensetzung als auch auf die Isotopenhäufigkeiten des Urnebels schließen zu können.

Die Sonne verliert durch den Sonnenwind pro Sekunde etwa eine Million Tonnen ihrer Masse. Man unterscheidet den langsamen und den



Abb. 12: Ein Experiment zur Erforschung des Sonnenwindes. Das Sonnenwindsegel wird von Aldrin ausgerichtet.

schnellen Sonnenwind. Die Geschwindigkeit des langsamen Sonnenwinds liegt bei etwa 400 Kilometern pro Sekunde, der schnelle Sonnenwind, der an den koronalen Löchern austritt, erreicht 800–900 Kilometer pro Sekunde. In Erdnähe hat der Sonnenwind eine Dichte von etwa $5 \cdot 10^6$ Teilchen pro m^3 .

Auswirkungen des Sonnenwinds

Da der Sonnenwind aus elektrisch geladenen Teilchen besteht, stellt er ein Plasma dar, das sowohl das Magnetfeld der Sonne wie auch das der Erde verformt. Das irdische Magnetfeld hält den Teilchenschauer zum größten Teil von der Erde ab. Nur bei einem starken Sonnenwind können die Teilchen in die hohen Schichten der Atmosphäre eindringen und dort Polarlichter hervorrufen, ebenso wie auf anderen Planeten mit einem Magnetfeld. Starke Sonnenwinde haben auch Einfluss auf die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen und können unter anderem den Kurzwellenfunk und die Kommunikation mit Satelliten stören.

Ein deutlich sichtbares Anzeichen für die Existenz des Sonnenwinds liefern die Kometen: Kometenschweife zeigen immer von der Sonne weg, denn die Gas- und Staubteilchen, welche die Koma und den Schweif bilden, werden vom Sonnenwind mitgerissen.

Der Sonnenwind reicht weit bis über die äußeren Planetenbahnen hinaus. Er treibt das interstellare Gas aus dem Sonnensystem hinaus und bildet eine Art Blase im Weltall, welche Heliosphäre genannt wird. Die Grenze der Heliosphäre, an der die Teilchen des Sonnenwinds abgebremst werden, heißt Heliopause. Sie wird oft als die Grenze des Sonnensystems angesehen. Die genaue Entfernung ist nicht bekannt, Beobachtungen der Raumsonde Voyager 2 geben Grund zu der Annahme, dass sich die Heliopause in etwa der vierfachen Entfernung des Plutos befindet.

Entdeckung und Erforschung

Bereits 1859 beobachtete der Forscher Richard Carrington einen Zusammenhang zwischen Sonnenflares und zeitlich versetzten irdischen Magnetfeldstürmen, was – obwohl damals unerklärlich – ein frühes Indiz für die Existenz des Sonnenwinds war. Anfang des 20. Jahrhunderts vertrat der norwegische Physiker Kristian Birkeland die Auffassung, die Polarlichter würden durch Teilchenströme von der Sonne ausgelöst. Seine Idee wurde jedoch ebenso wenig ernst genommen wie die des deutschen Physikers Ludwig Biermann, der eine »Solare Teilchenstrahlung« annahm, um die Richtung der Kometenschweife erklären zu können.

Astronomen war aufgefallen, dass die Kometenschweife nicht exakt von der Sonne weg gerichtet waren, sondern einen kleinen Winkel dazu aufwiesen. Biermann erklärte diese Eigenschaft 1951 durch die Bewegung des Kometen in einem sich ebenfalls bewegenden Teilchenstrom, gewissermaßen ein seitliches Abdriften durch die Strömung. E.N. Parker hat 1959 die englische Bezeichnung *solar wind* eingeführt und eine magnetohydrodynamische Theorie zur Beschreibung des Sonnenwinds vorgeschlagen.

Die Existenz des Sonnenwinds konnte erst 1959 durch die sowjetische Lunik 1 und 1962 durch die amerikanische Raumsonde Mariner 2 auf ihrem Weg zur Venus experimentell bestätigt werden. Ein weiterer Meilenstein in der Erforschung des Sonnenwinds waren die Sonnenwindsegel, welche mit Ausnahme von Apollo 13 und 17 bei allen Mondlandungen aufgestellt wurden und Daten über die Isotopenhäufigkeiten der Edelgase Helium, Neon und Argon im Sonnenwind lieferten. Viele weitere Missionen haben zum Verständnis des Sonnenwinds beigetragen. Die Raumsonden Pioneer 10/11, Voyager 1/2 und die Ulysses-Mission lieferten Daten des Sonnenwinds außerhalb der Erdumlaufbahn, während Helios 1/2 und die Mariner- und Pioneer-Missionen zur Venus sowie russische Vega-Sonden Daten von innerhalb der Erdumlaufbahn lieferten. IMP 1–8, AIMP 1/2, ACE, ISEE 1–3 Sonden sowie das Sonnenobservatorium SOHO und die Raumsonde Wind lieferten Sonnenwinddaten in Erdnähe. Die Ulysses-Mission lieferte auch Daten über den Sonnenwind außerhalb der Ekliptik. Im Jahr 2001 wurde die Genesis-Mission gestartet bei welcher hochreine Kristalle in einem der Lagrange-Punkt L1 des Erde-Sonne-Systems dem Sonnenwind ausgesetzt wurden und danach zur Untersuchung zur Erde zurückgebracht werden sollten. Die Mission schlug jedoch bei ihrem Abschluss im Jahr 2004 fehl, da die Kapsel, in der die Sonnenwindteilchen zur Erde transportiert werden sollten, nicht wie geplant von einem Fallschirm abgebremst und dann von einem Helikopter aufgefangen wurde, sondern auf dem Boden zerschellte, da sich der Fallschirm nicht geöffnet hatte.

Es gibt Bemühungen, den Sonnenwind mithilfe von Sonnensegeln zum Antrieb von Raumfahrzeugen zu nutzen.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenwind>. Historie: 1.11.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Epo, Ben-Zin, Arnomane, ChristophDemmer, Gunter.krebs, Neo23, ZwoBot, Raimar, Stw, Zeep, Stephan75, Ambrosius, Hella, Dapete, RedBot, Kurt Jansson, AlexR, Lentando, Uxh, Bobbl, Jörnny, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Planeten und ihre Monde

Planet

Ein Planet ist ein Himmelskörper, der nicht selbst leuchtet und sich in einer keplerschen Umlaufbahn um einen Stern bewegt. Der Name stammt vom griechischen »plánetes« und bedeutet »die Umherschweifenden« beziehungsweise »der Wanderer« (altgriechisch). Früher wurden Planeten auch als *Wandelsterne* bezeichnet. Die meisten Planeten des Sonnensystems werden von Monden umkreist.

Ende des 20. Jahrhunderts wurde der erste Planet außerhalb des Sonnensystems (Exoplaneten) entdeckt, der den Stern 51 Pegasi umkreist. Die Zahl der bekannten Exoplaneten stieg seither stark an.

Planeten unseres Sonnensystems

Zu den →Erdähnlichen (felsigen) Planeten oder auch zum inneren Planetensystem zählen der →Merkur, die →Venus, die →Erde und der →Mars. Die Iovianischen Planeten beziehungsweise →Gasriesen des äußeren Planetensystems stellen →Jupiter, →Saturn, →Uranus und →Neptun dar. Der →Pluto gehört zu den Transneptunischen Objekten (TNOs).

Gruppierung – Der Asteroidengürtel trennt das innere vom äußeren Planetensystem. Der große Bereich der Transneptunischen Objekte wird mitunter auch als eine dritte Zone angesehen. Damit zählen Merkur, Venus, Erde und Mars zu den inneren Planeten, und Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun und Pluto zu den äußeren Planeten, wobei der Status von Pluto als Planet allerdings umstritten ist. Diese Unterscheidung ist nicht zu verwechseln mit der Gruppierung in die unteren Planeten, welche die Sonne innerhalb der Erdbahn umlaufen – also Merkur und Venus – und in die oberen Planeten, die sich außerhalb der Erdbahn bewegen.

Definition

Es gibt bis heute kein klar definiertes Unterscheidungsmerkmal zwischen Planeten und →Asteroiden. So ist der Planeten-Status von →Pluto aufgrund seiner geringen Größe und seiner stark elliptischen sowie gegen die Ekliptik geneigten Bahn umstritten. Viele Astronomen rechnen ihn dem →Kuipergürtel zu, einem Reservoir von →Kometen und Asteroiden,

das im Inneren bis an die Neptun-Bahn heranreicht. Kürzlich entdeckte ähnlich große Himmelskörper im Kuipergürtel, insbesondere →2003 UB₃₁₃, haben die Diskussion um Plutos Status neu entfacht. Pluto wird wohl seinen Status als Planet bald verlieren.

Eine plausible Erklärung zur Definition eines Planeten gibt das California Institute of Technology, das eng mit der NASA zusammen arbeitet: *Ein Objekt im Sonnensystem wird als Planet bezeichnet, wenn es eine größere Masse hat als alle anderen Objekte zusammen, die sich im selben Orbit befinden.* Somit ist die Erde ein Planet, da sie schwerer ist als alle Asteroiden, die dieselbe Umlaufbahn wie die Erde haben. Pluto ist zwar das größte Objekt in seiner Umgebung, jedoch nicht schwerer als die Summe seiner Nachbarobjekte, weshalb er laut dieser Definition nicht als Planet eingestuft werden kann. Zählt man Pluto zu Neptuns Umlaufbahn, dann wird dies noch deutlicher. Danach hätte unser Sonnensystem anstatt neun also nur acht Planeten.

Die für die Namensgebung von Himmelskörpern zuständige Internationale Astronomische Union (IAU) hat im Jahr 2004 ein Komitee eingesetzt, das verbindliche Kriterien für die Definition eines Planeten erarbeiten soll. Im Sommer 2006 sollen die Ergebnisse dieser Arbeiten veröffentlicht werden.

Geschichte der Entdeckung

Planeten des Sonnensystems – Die Planeten *Merkur*, *Venus*, *Mars*, *Jupiter* und *Saturn* sind mit bloßem Auge am Nachthimmel erkennbar und erscheinen heller als die meisten Fixsterne. Sie waren bereits in der Antike bekannt und wurden von vielen Kulturen mit ihren Hauptgöttern identifiziert. Die noch heute verwendeten Namen stammen aus der römischen Mythologie.

Obwohl es bereits in der Antike Vertreter des Heliozentrischen Weltbilds gab (zum Beispiel Aristarchos von Samos), wurde bis Mitte des 16. Jahrhunderts allgemein angenommen, dass sich die Planeten mitsamt der Sonne um die *Erde* bewegen (Geozentrisches Weltbild). 1543 veröffentlichte Nikolaus Kopernikus, angeregt durch Aristarchos, sein Werk

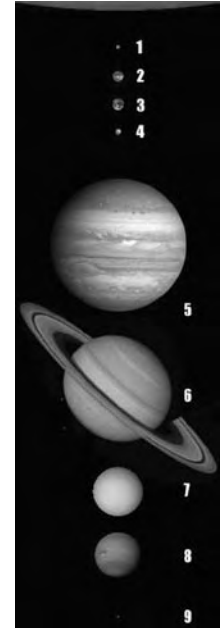


Abb. 13: Maßstabsgetreue Darstellung der Planeten des Sonnensystems (nicht entfernungsrichtig dargestellt)

Von den Umdrehungen der Himmelsphären, in dem er die Sonne in den Mittelpunkt stellte und die Erde als weiteren Planet erkannte.

Unter günstigen Bedingungen ist *Uranus* auch mit bloßem Auge zu erkennen; er wurde bereits 1690 fälschlicherweise als Stern katalogisiert. Erst 1781 wurde er von Sir Friedrich Wilhelm Herschel als Planet erkannt. Mit Hilfe der älteren Beobachtungen gelang es Johann Elert Bode, die Umlaufbahn genau zu bestimmen. Anhand von Bahnstörungen des Uranus berechneten Urbain Jean Joseph Le Verrier und John Couch Adams unabhängig die Bahn eines weiteren Planeten, dies führte am 23. September 1846 zur Entdeckung *Neptuns* durch Johann Gottfried Galle. Durch den neu entdeckten Planeten konnten jedoch nicht sämtliche Unregelmäßigkeiten in der Uranus-Bahn erklärt werden.

Schließlich wurde 1930 von Clyde W. Tombaugh ein weiteres Objekt entdeckt und später *Pluto* genannt, der bislang als neunter Planet gilt. Die Existenz eines weiteren Planeten (→ *Transpluto* oder *Planet X*) im Sonnensystem galt lange als unwahrscheinlich.

Seit Ende der 1990er Jahre werden zusehends Objekte jenseits der Neptun- beziehungsweise der Plutobahn entdeckt. Diese transneptunischen Objekte werden gelegentlich von der Presse ebenfalls als Planet bezeichnet. So zum Beispiel → Quaoar (2002), → Orcus (2004), Sedna (2004) oder → 2003UB₃₁₃ (2005).

Exoplaneten – Die ersten Planeten überhaupt, die außerhalb unseres Sonnensystems entdeckt wurden, umkreisen den Pulsar mit dem Namen PSR 1257+12. Durch genaue Messungen der Wiederkehrzeit des Strahls, der uns vom Pulsar erreicht, konnten 1994 drei Planeten mit Massen von 0,02, 4,3 und 3,9 Erdmassen nachgewiesen werden. Auf diesen Planeten ist Leben, wie wir es von der Erde kennen, praktisch ausgeschlossen.

Der erste Exoplanet in einem Orbit um einen sonnenähnlichen Stern wurde 1995 von Professor Michel Mayor vom Departement für Astronomie der Universität Genf und seinem Mitarbeiter Didier Queloz mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt. Der Planet rotiert im 4,2-Tagestakt um den etwa 40 Lichtjahre entfernten Stern Pegasus 51 und hat 0,46 Jupitermassen.

Im Mai 2005 waren 156 extrasolare Planeten in 136 Systemen bekannt, darunter 13 Systeme mit zwei, zwei Systeme mit drei und ein System mit vier Planeten (keine mit mehr). Im Umkreis von etwa 100 Parsec wurden bis jetzt um 7 % der Sterne Planeten gefunden. Die meisten der bis jetzt entdeckten Systeme sind aber nicht mit unserem Son-

nensystem vergleichbar, es handelt sich meist um → Gasriesen, die ihren Zentralstern in einer sehr engen Umlaufbahn umkreisen. Solche Planeten werden von Astronomen *hot Jupiters* genannt. Nach einer Theorie sind sie, wie Jupiter, in relativ großem Abstand von ihrem Zentralstern in der Akkretionsscheibe entstanden, dann aber nach innen gewandert. Nach einer anderen Theorie sind sie jedoch wie Sterne aus einer Gaswolke kondensiert.

Exoplaneten im Orbit um sonnenähnliche Sterne konnten bis 2005 nicht mit Teleskopen direkt beobachtet werden, da sie sehr lichtschwach sind. Sie werden von dem um ein Vielfaches helleren Stern, um den sie kreisen, überstrahlt. Das Auflösungsvermögen von erdgestützten Teleskopen reicht heute noch nicht dazu aus, um zwei so relativ nahe beieinander liegende Objekte mit so großem Helligkeitsunterschied wie zwischen einem Planeten und seinem Stern getrennt darzustellen. Man nutzt daher verschiedene indirekte Methoden wie die *Transitmethode*, bei der durch die Bedeckungen des Sterns durch den Planeten periodische Helligkeitsabsenkungen des Sterns verursacht werden, falls die Umlaufbahn so liegt, dass der Planet von uns aus gesehen genau vor dem Stern vorbeizieht. Eine andere Methode ist die *Radialgeschwindigkeitsmethode*, bei der der Planet durch seinen Schwerkrafteinfluss am Stern zieht (beide kreisen um den gemeinsamen Schwerpunkt) und somit von der Erde aus diese periodische Bewegung eine abwechselnden Blauverschiebung und Rotverschiebung (Doppler-Effekt) des Spektrums des Sterns bewirkt.

Am 10. September 2004 gab das European Southern Observatory bekannt, dass möglicherweise erstmals eine direkte Aufnahme eines Planeten beim 225 Lichtjahre entfernten Braunen Zwerg 2M1207 gelungen ist. Am 30. April 2005 berichtete das ESO, im Februar und März 2005 mit dem Very Large Telescope aufgenommene Fotos zeigten zusammen mit den älteren Aufnahmen, dass sich 2M1207 und sein Begleiter, durch die Schwerkraft aneinander gebunden, tatsächlich gemeinsam bewegten. Dies könne als Beleg dafür gewertet werden, dass tatsächlich der erste fotografische Nachweis eines Exoplaneten gelungen sei.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Planet> (gekürzt). Historie: 23.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Flups, Nephelin, Pietz, Ben-Zin, Vesta, Sig11, Odin, Autan, Rivi, Lotse, Schewek, FlaBot, Zwobot, Peter Kramer, TomK32, -zzz, Spektrum, Tkarcher, Hhdw, Horst Frank, CdaMVvWgS, Waelder, Heliozentrik, Karsten88, FutureCrash, Gunter.krebs, S, Tim, Liquidat, Lutz Terheyden, Srbauer, Mikue, Jörg Knappen, Eugen Ettelt, Gurt, Wst, Traroth, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Erdähnlicher Planet

Als erdähnliche Planeten (auch terrestrische Planeten, vgl. Farbtafeln Abb. 135) werden in der Astronomie und Planetologie diejenigen Körper im Sonnensystem bezeichnet, die in ihrem Aufbau der Erde gleichen: sie bestehen vollständig oder fast vollständig aus festen Bestandteilen, und haben zumeist einen Schalenaufbau: im Zentrum befindet sich ein Eisenkern, darüber eine dicke Schicht – der so genannte *Mantel* – aus Silikaten und Oxiden, und zuoberst eine dünne Kruste, die ebenfalls aus Silikaten und Oxiden besteht, aber an Elementen angereichert ist, die nicht in das Mantelgestein eingebaut werden können und mit der Zeit »ausgeschwitzt« werden (zum Beispiel Kalium, seltene Erden, Uran). In einigen Fällen schließt sich über der Kruste eine →Atmosphäre an; bei der Erde liegen noch die Hydrosphäre beziehungsweise die Ozeane dazwischen. Des Weiteren ähneln Durchmesser und Masse, aber insbesondere auch die durchschnittliche Dichte denen der Erde. Letztere bewegt sich grob zwischen 4–6 g/cm³.

Historisch gehören nur die vier →Planeten des inneren Sonnensystems in die Gruppe der terrestrischen Planeten: →Merkur, →Venus, Erde und →Mars. Mittlerweile zählen die Planetologen aber auch – wenn auch keine *Planeten* – den ähnlich aufgebauten →Erdmond, die →Jupitermonde →Io und →Europa sowie die größeren Eismonde wie →Ganymed, →Kallisto, →Titan und →Triton dazu. In den letztgenannten Eismonden kann zwar der Eisenkern fehlen und ein Eismantel an die Stelle eines Silikatmantels treten, aber die grundsätzliche Beschreibung dieser Eismonde, ihre Entstehung und ihre Entwicklung ähnelt denen der klassischen Vorbilder sehr.

Aufgrund der mangelnden Genauigkeit und Leistungsfähigkeit der Messverfahren konnte bisher von keinem extrasolaren Planeten eine erdähnliche Natur nachgewiesen werden. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass terrestrische extrasolare Planeten existieren.

In der Theorie extrasolarer Planeten und der Science-Fiction-Literatur ist oft eine andere, strengere Auslegung angewandt: Hier ist mit terrestrischen oder erdähnlichen Planeten gemeint, dass es eine nennenswerte und vielleicht lebensfreundliche Atmosphäre sowie ausreichend Wasser gibt.

In Abgrenzung zu den terrestrischen Planeten bezeichnet man die →Gasriesen als *jupiterähnlich* oder *iovianisch*.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Erdähnlicher_Planet. Historie: 5.3.04: Angelegt von *Pluriscient*, danach bearbeitet von den Hauptautoren *Hadhuey*, *Sig11*, *Pluriscient*, *Lotse*, *Srbauer*, *Kseiferlin*, *Zwobot*, *FlaBot*, *Alien*, *Geschichtsfan*. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Gasriese

Gasriese ist in der Astronomie ein gebräuchlicher Ausdruck für große →Planeten, die zum größten Teil aus leichten und nur zu einem geringen Anteil aus schwereren Elementen (Gestein, Metalle) bestehen.

Gasriesen können durchaus einen festen Kern haben – vermutlich ist solch ein Kern für die Entstehung sogar notwendig – aber der Großteil seiner Masse besteht aus leichten Elementen, die aufgrund des hohen Drucks und niedriger Temperaturen jedoch in flüssigem oder festem Zustand vorliegen.

In unserem Sonnensystem gibt es vier Gasriesen, die auch *äußere Planeten* genannt werden: →Jupiter, →Saturn, →Uranus, und →Neptun. Wegen ihrer grundsätzlichen Ähnlichkeit zu Jupiter werden Gasriesen häufig auch als *jupiterähnliche* oder *iovianische Planeten* bezeichnet.

Die Bezeichnung *Gasriese* ist ein wenig irreführend. Der Jupiter zum Beispiel hat eine dicke →Atmosphäre, die hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium besteht, aber auch Spuren anderer Chemikalien wie Ammoniak enthält. Der meiste Wasserstoff ist jedoch in flüssiger Form vorhanden und dieser macht die Hauptmasse des Planeten aus. Die Zusammensetzung der anderen Gasriesen ist ähnlich, Uranus und Neptun haben aber mehr Wasser, Ammoniak und Methan. Die tieferen Schichten des flüssigen Wasserstoffs sind oft unter so starkem Druck, dass der Wasserstoff metallische Eigenschaften bekommt. Metallischer Wasserstoff ist nur unter solch extremen Drücken stabil.

Viele der Exoplaneten, die in den letzten Jahren entdeckt wurden, scheinen Gasriesen zu sein, so dass die Vermutung nahe liegt, dass diese Art von Planeten im Universum recht häufig ist. Jedoch konnten bisher aufgrund der verwendeten Beobachtungstechniken ohnehin nur große Planeten außerhalb des Sonnensystems entdeckt werden, so dass die vorhandenen Daten nicht repräsentativ sind.

Oberhalb von etwa der 13fachen Masse des Jupiters, was etwa 1,2% der Masse der Sonne entspricht, setzen wegen der großen Hitze und des enormen Drucks im Inneren bereits erste Kernfusionsprozesse ein. Dies sind im Wesentlichen die *Deuteriumfusion*, bei der ab etwa 13 Jupitermassen ein Deuteriumkern und ein Proton zu einem ³Heliumkern (Isotop mit drei Neutronen) verschmelzen, sowie die *Lithiumfusion*, bei der ab etwa 65 Jupitermassen beziehungsweise Kerntemperaturen über zwei Millionen Kelvin ein ⁷Lithiumkern mit einem Proton reagiert. Himmelskörper über 13 Jupitermassen sind jedoch noch keine Sterne, sondern so genannte Braune Zwerge, da keine Wasserstofffusion stattfinden kann, die erst ab

etwa 75 Jupitermassen einsetzt und die Hauptenergiequelle eines Sterns ist. Nach der neueren Definition für Braune Zwerge durch Fusionsprozesse beträgt die Obergrenze für einen Planeten also somit 13 Jupitermassen.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Gasriese>. Historie: 3.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Ben-Zin, Arnomane, Marc Layer, Zwobot, S, Srbauer, Schewek, HenrikHolke, FlaBot, Romanm, Eckhart Wörner, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Atmosphäre

Die Atmosphäre (von griech. *ατμός*, *atmós* »Luft, Druck, Dampf« und *σφαίρα*, *sfära* »Kugel«) ist die gasförmige Hülle um einen Himmelskörper. Sie besteht meist aus einem Gemisch verschiedener Gase, die vom Schwerefeld des Himmelskörpers festgehalten werden können.

Die Atmosphäre ist an der Oberfläche am dichtesten und geht in großen Höhen fließend in das interplanetare Medium über. Der Druckverlauf ist in den unteren Bereichen bestimmt durch die hydrostatische Gleichung, die bei im Vergleich zum Planetenradius dünnen Atmosphären geschrieben werden kann als

$$\frac{dp}{dh} = -gp(h)$$

mit dem Druck p , der Höhe h , der Schwerebeschleunigung g und der Dichte ρ . Im Falle konstanter Temperatur reduziert sich die Gleichung zur barometrischen Höhenformel. Im äußeren Bereich ist diese Beschreibung jedoch nicht mehr gültig, da sich die Bestandteile aufgrund der geringen Dichte auf Keplerbahnen oder den Magnetfeldlinien bewegen und sich gegenseitig kaum noch beeinflussen.

Entstehung

Bei der Ausbildung einer Atmosphäre spielen mehrere Faktoren eine Rolle, wozu in erster Linie die Größe des Himmelskörpers zählt. Das Schwerefeld muss dabei gewährleisten, dass die in der Regel aus Ausgasungen hervorgehenden Gasteilchen an den Himmelskörper gebunden bleiben und sich nicht in den Weltraum verflüchtigen können. Entsprechend der kinetischen Gastheorie bewegen sich die Gasteilchen ungeordnet und dabei umso schneller, je höher die Temperatur des Gases ist und je leichter sie sind. Reicht die Anziehungskraft nicht aus, um den Verlust ausreichend schneller Teilchen langfristig derart zu begrenzen, dass es zu einer positiven Teilchenbilanz kommt (also mehr Gasteilchen durch Ausgasungen hinzukommen als

durch die Überwindung der Gravitation verloren gehen), so kann sich auch keine Atmosphäre ausbilden. Dabei spielen neben der Größe auch die Oberflächentemperatur des Himmelskörpers eine Rolle, die nicht zu groß sein darf. Auch die Art der zur Verfügung stehenden Gasteilchen ist wichtig, da zum Beispiel eine Atmosphäre aus Wasserstoff oder Helium viel schwerer an den Planeten zu binden ist als eine aus Sauerstoff oder Stickstoff. Erstere finden sich daher vor allem bei den sehr massereichen Gasriesen.

Aufbau

In der Regel ist eine Atmosphäre keine homogene Gashülle, sondern aufgrund zahlreicher innerer und äußerer Einflüsse in mehrere, mehr oder weniger klar gegeneinander abgegrenzte Schichten einzuteilen, die vor allem durch die Temperaturabhängigkeit chemischer Prozesse in der Atmosphäre und die Strahlungsdurchlässigkeit abhängig von der Höhe entstehen. Im Wesentlichen kann man folgende Schichten nach dem Temperaturverlauf unterscheiden:

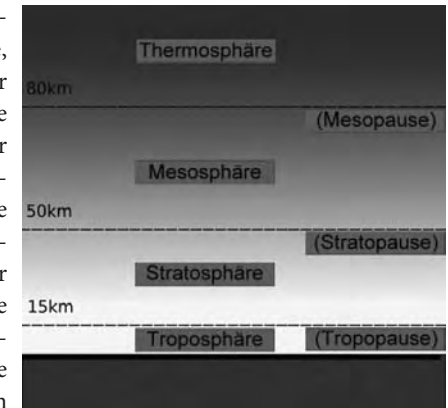


Abb. 14: Aufbau am Beispiel der Erdatmosphäre

- An der Planetenoberfläche beginnt in der Regel die Troposphäre, in der Konvektionsströmungen vorherrschen. Sie wird begrenzt durch die Tropopause.
- Darüber liegt die Stratosphäre, in der die Strahlung beim Energietransport dominiert. Sie wird begrenzt durch die Stratopause.
- In der Mesosphäre wird, vor allem durch Kohlenstoffdioxid, Energie abgestrahlt, so dass in dieser Schicht eine starke Abkühlung erfolgt. Sie wird begrenzt durch die Mesopause.
- In der Thermosphäre dissoziieren und ionisieren die meisten Moleküle, wodurch die Temperatur deutlich ansteigt.
- Die äußerste Schicht ist die Exosphäre, aus der die vorwiegend atomaren beziehungsweise ionisierten Bestandteile aus dem Schwerefeld des Planeten entweichen können. Sie wird bei Vorhandensein eines Magnetfeldes durch die Magnetopause begrenzt.

Diese Gliederung gibt nur eine grobe Einteilung wieder, und nicht jede Schicht ist bei allen Atmosphären nachweisbar. So besitzt die →Venus zum Beispiel keine Stratosphäre, kleinere Planeten und Monde besitzen nur eine Exosphäre, zum Beispiel der →Merkur. Für Entstehung und Ausprägung der Dämmerungsfarben ist der vertikale Aufbau der Atmosphäre maßgeblich. Es ist auch möglich, die Atmosphäre nicht nach dem Temperaturverlauf, sondern nach anderen Gesichtspunkten zu gliedern, wie:

- dem radio-physikalischen Zustand der Atmosphäre (Ionosphäre, →Magnetosphäre)
- den physiko-chemischen Prozessen (Ozonosphäre beziehungsweise Ozonschicht, Chemosphäre)
- der Lebenszone (Biosphäre)
- der Durchmischung (Homosphäre, Homopause, Heterosphäre)
- dem aerodynamischen Zustand (Prandtl-Schicht, Ekman-Schicht, beide als Peplosphäre, Freie Atmosphäre)

Atmosphären des Sonnensystems

Vergleicht man die Himmelskörper unseres Sonnensystems miteinander, so zeigt sich der Einfluss der bei der Ausbildung einer Atmosphäre relevanten Faktoren.

Neben den →Planeten haben auch einige größere Monde eine Atmosphäre, auch bei Planeten anderer Sternsysteme (Exoplanet) konnten mit spektrografischen Methoden Atmosphären nachgewiesen werden. Der →Mond der Erde zeigt hingegen keine Atmosphäre. Er ist hierfür mit knapp 1,2 % der Erdmasse zu klein und weist zudem auf seiner sonnen- gewandten Seite Temperaturen von über 100 °C auf.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Atmosphäre> (gekürzt). Historie: 1.11.01: Angelegt von Vulture, danach bearbeitet von den Hauptautoren Schusch, Srbauer, Mikue, Saperaud, Zwobot, Wst, Neitram, Rivi, Perrak, Rs, Phoenix69, Sadduk, Vulture, Arnomane, Marilyn, hanson, Hannes Hirzel, GruppeCN, Ben-Zin, Stefan h, Schlurher, Haerber, Elya, Robbot, Sansculotte, MarkusZi, Andre Engels, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Magnetosphäre

Als Magnetosphäre bezeichnet man das Raumgebiet um ein astronomisches Objekts, in dem das Magnetfeld des Objekts dominiert, ihre scharfe äußere Begrenzung wird *Magnetopause* genannt. Die innere Begrenzung zur neutralen Atmosphäre bildet die Ionosphäre. Neben der Magnetosphäre der →Erde wurden auch die Magnetosphären des →Jupiter und des

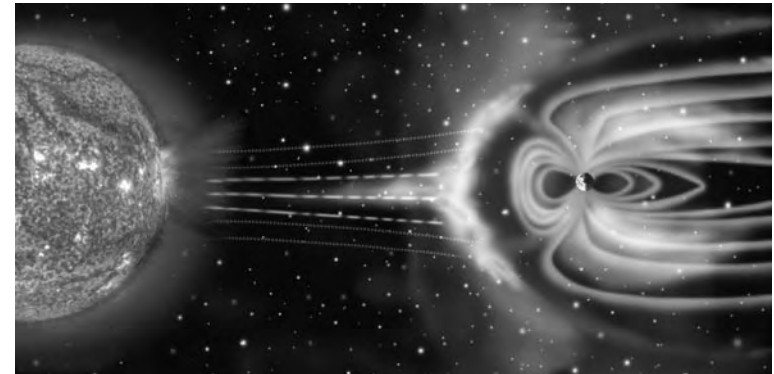


Abb. 15: Die Magnetosphäre schirmt die Erdoberfläche von den geladenen Partikeln des Sonnenwinds ab.

→Saturn durch die Raumsonden Ulysses (1992), Galileo (1995 bis 2003) und Cassini (seit 2004) näher untersucht. Im Folgenden wird exemplarisch die Magnetosphäre der Erde beschrieben.

Struktur

Eine planetare Magnetosphäre wird vor allem durch den auftreffenden →Sonnenwind geformt, der in Erdnähe eine Geschwindigkeit von 300 bis 800 km/s und eine Dichte von drei bis zehn Teilchen pro Kubikzentimeter aufweist und das *interplanetare Magnetfeld* von etwa 4 nT trägt, und enthält ein nahezu stoßfreies Plasma niedriger Dichte. Der Sonnenwind staucht die Magnetosphäre auf der Sonnenseite auf etwa zehn Erdradien (etwa 60.000 km) zusammen und zieht sie auf der Nachtseite zu einem →kometenschweifähnlichen *Magnetschweif* auseinander, der bis in eine Entfernung von etwa 100 Erdradien (600.000 km) reichen kann. Die Form der Magnetopause ist jedoch nicht statisch, sondern ändert sich zeitlich sehr stark – während der Schweif durch die wechselnde Magnetfeldrichtung des Sonnenwinds regelrecht im Sonnenwind »flattert«, ist die Ausdehnung auf der Tagseite vom Impuls des Sonnenwinds abhängig. Bei einem stärkeren magnetischen Sturm am 10. Januar 1997 wurde die Magnetosphäre auf fünf Erdradien (etwa 30.000 km) zusammengestaucht, Satelliten in geostationärer Umlaufbahn befanden sich deshalb bei starken magnetischen Stürmen zeitweise *außerhalb* der Magnetosphäre und sind in diesem Zeitraum dem Sonnenwind direkt ausgesetzt.

Der Sonnenwind umströmt die Erde mit »Überschallgeschwindigkeit« und wird an der *Bugstoßwelle* auf »Unterschallgeschwindigkeit« abge-

bremst, den Bereich zwischen der Bugstoßwelle und der Magnetopause nennt man auch *Magnetosheath*. Ein Teil des Sonnenwinds wird an der Bugstoßwelle auch reflektiert, so dass sich ein *Vorschock* ausbildet.

Die Magnetfeldlinien sind auf der Tagseite geschlossen und in den äußeren Bereichen des Magnetschweifes (den nördlichen und südlichen *Tail Lobes*) offen, den Übergangsbereich an den magnetischen Polen nennt man *Cusp* oder *Cleft* – in diesen Bereichen können Teilchen des Sonnenwinds direkt in die inneren Schichten der Atmosphäre eindringen. Zwischen den Lobes befindet sich in Erdnähe die *Plasmaschicht* mit geschlossenen Feldlinien und die *Neutralschicht* in größeren Entfernungen.

Ströme

Die Wechselwirkung des Magnetfelds des vorbeistömenden Sonnenwinds und des irdischen Magnetfelds führt zu einem Dynamoeffekt, wobei die Erde den Stator und der Sonnenwind den Rotor bildet. Diese Wechselwirkung führt zu einer Energieübertragung an die Magnetosphäre und zu einem komplexen System elektrischer Ströme.

Die äußeren Schichten der Atmosphäre enthalten stark verdünntes Plasma, dessen geladene Teilchen sich entlang der Magnetfeldlinien auf Spiralbahnen bewegt. Durch diese Bewegung wird in der Neutralschicht ein *Neutralschichtstrom* induziert. In der Plasmaschicht wird zusammen mit dem Erdmagnetfeld der *Ringstrom* gebildet.

Birkeland-Ströme – Den Hauptanteil der induzierten Ströme bilden die Birkeland-Ströme (nach Kristian Birkeland, 1867–1917), die aus Elektronen bestehen, die aufgrund der Lorentzkraft in Spiralen um die von Nord- nach Südpol verlaufenden Magnetfeldlinien laufen. Diese Teilchen bewegen sich praktisch stoßfrei in den Strahlungsgürteln (den so genannten Van-Allen-Gürteln) der äußeren Atmosphäre; sie werden aufgrund der Erhaltung des magnetischen Moments bei Annäherung an die magnetischen Pole reflektiert und bewegen sich dann wieder auf den anderen Pol zu.

Bei erhöhter Sonnenaktivität befinden sich mehr und energiereichere freie Elektronen in den oberen Atmosphärenschichten, so dass die an die Atome der Atmosphäre in etwa 100–150 km Höhe stoßen und diese anregen. Das führt zu Leuchterscheinungen, den Polarlichtern.

Pedersenströme – Die Birkeland-Ströme werden in etwa 100 bis 150 km Höhe durch die *Pedersenströme* geschlossen. Die Stromdichten liegen bei

einigen Ampere pro Quadratmeter, was sich zu einem Gesamtstrom von einigen 10.000 Ampere summiert.

Ringstrom – Der irdische Ringstrom ist ein elektrischer Strom, der die Erde entlang des Van-Allen-Gürtels in der Äquatorebene in Ost-West-Richtung umfließt. Er wird getragen von Ionen mit etwa 15 bis 200 keV, die bei der Ionisation von Luftteilchen durch die kosmische Strahlung entstehen. Diese Teilchen bewegen sich jedoch nicht nur in Spiralbahnen um die Feldlinien, sondern führen auch eine Driftbewegungen aus. Die Elektronen bewegen sich dabei von West nach Ost, die Protonen von Ost nach West. Das führt zu einem effektiven Strom in Ost-West-Richtung. Die Ausdehnung dieses Ringstromes reicht von etwa zwei bis zu etwa neun Erdradien. Obwohl die typischen Stromdichten nur wenige Zehntel Ampere pro Quadratmeter betragen, resultieren aufgrund des enormen Volumens Ströme von mehreren Millionen Ampere.

Der Ringstrom wird in ruhigen Phasen vorwiegend aus der Plasmaschicht gespeist, die Energiedichte wird dabei zu mehr als 90 % von Wasserstoffionen getragen. Während magnetischer Stürme gewinnen jedoch Sauerstoffionen aus den oberen Schichten der Atmosphäre an Bedeutung und können bei starken Stürmen den Hauptteil des Stroms tragen.

Polarer Elektrojet – Die Pedersenströme führen zu einem Hallstrom in Ost-West-Richtung, der als *polarer Elektrojet* bezeichnet wird. Der Elektrojet kann bei magnetischen Stürmen Stromstärken von mehr als einer Million Ampere erreichen und sich auf Zeitskalen von Minuten sehr stark ändern. Zusammen mit den Pedersenströmen führt dies zu einem stark fluktuierenden Feld auf der Erdoberfläche, das vor allem in langen Leitern wie Hochspannungsleitungen und Pipelines starke Ströme induziert, die zur Beschädigung oder Zerstörung elektrischer Bauteile beziehungsweise zu verstärkter Korrosion führen können.

Da die Atmosphäre in etwa 100 km Höhe kein sehr guter Leiter ist, führen die Pedersenströme und die Elektrojets auch zu einer starken Aufheizung der Atmosphäre, die eine starke Ausdehnung bewirkt – einige Stürme führten im Bereich von Satelliten auf niedrigen Umlaufbahnen (bis etwa 800 km) zu einer Verdopplung der Luftdichte und einer entsprechend höheren Abbremsung durch den höheren Luftwiderstand, ebenso kommt es durch diese Ausdehnung zum verstärkten Eintrag von Sauerstoffionen in den Ringstrom.

Plasmoide

Der Sonnenwind und die Ströme in den den Tail Lobes führen zu starken Verzerrungen der Feldlinien in der Plasmaschicht des Magnetschweifs. Wenn diese Verzerrungen zu stark werden (die Vorgänge sind im Detail noch nicht verstanden), kann es Abschnürungen durch magnetische Re-konexionen kommen – die erdnäheren Teile der Feldlinien schließen sich zu dipolähnlicheren Feldlinien, während die erdferneren Teile ein *Plasmoid* bilden, ein plasmagefülltes Raumgebiet mit in sich geschlossenen Feldlinien. Durch die freiwerdende magnetische Energie wird zum einen das Plasmoid nach außen beschleunigt, zum anderen führt es zu einer Aufheizung höherer Atmosphärenschichten und damit zu einer verstärkenden Rückkopplung mit dem elektischen Strömungssystem.

Der Vorgang der Plasmoid-Ablösung wird als *magnetischer Teilsturm (substorm)* bezeichnet, da man sie anfangs nur als Teilkomponente magnetischer Stürme betrachtete. Heute weiß man allerdings, dass der Teilsturm ein Phänomen ist, das nicht nur in »Sturmphasen«, sondern auch in ruhigen Phasen auftritt – der Verlauf ist in beiden Fällen sehr ähnlich: Ein Teilsturm dauert etwa 45 Minuten und führt zu einer Plasma-Aufheizung von etwa 2 keV. Während einer Sturmphase ist jedoch das Plasma bereits zu Beginn heißer (etwa 3–4 keV in Ruhephasen und etwa 8 keV in Sturmphasen) und der Anstieg verläuft steiler.

Sonstiges

Änderungen im Sonnenwind können magnetosphärische Vorgänge auslösen, die die Kommunikation über Radio beeinflussen, Schaden an Satelliten verursachen und elektrische Leitungen unterbrechen können.

Bei der →Erde ist die Stoßfront im Durchschnitt etwa zehn Erdradien entfernt. Die größte Magnetosphäre im Sonnensystem besitzt allerdings der →Jupiter. Hier beträgt der Abstand Planet-Stoßfront zeitweise bis zu 100 Jupiterradien.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetosphäre>. Historie: 19.5.04: Angelegt von Anaximander, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Anaximander, Jensflorian, C.Löser, Arnomane, Saperaud, FlaBot, RobotE, Sadduk, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Merkur

Merkur ist der sonnennächste →Planet unseres Sonnensystems. Aufgrund seiner Größe und seiner chemischen Zusammensetzung zählt er zu den

→erdähnlichen (terrestrischen) Planeten. Wegen seiner Sonnennähe ist er nicht ganz einfach zu beobachten.

Das Zeichen des Planeten Merkur bezieht sich in stilisierter Form auf die geflügelte Kopfbedeckung des gleichnamigen römischen Götterboten: ☿

Aufbau

Merkur reiht sich rein äußerlich in die Reihe der Planeten klein und unauffällig ein und wirkt für einen erdähnlichen Planeten auf den ersten Blick eher uninteressant. Es stellt sich jedoch heraus, dass die verschiedenen Aspekte seines inneren Aufbaus widersprüchlicher Natur sind. Der Merkur gibt der Forschung eine harte Nuss zu knacken: Äußerlich gleicht er dem planetologisch inaktiven Erdmond, aber sein Inneres entspricht anscheinend viel mehr dem der geologisch dynamischen Erde (vgl. Farbtafeln Abb. 140).

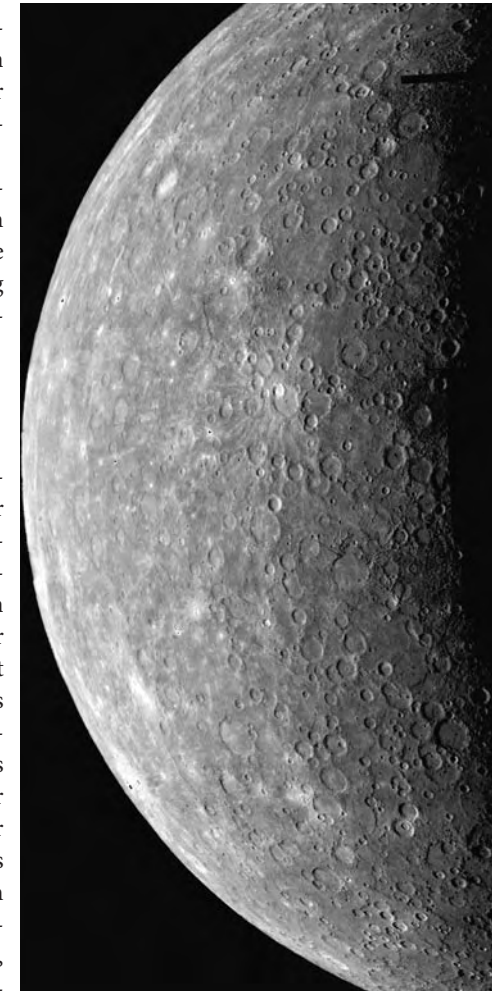


Abb. 16: Merkur, fotografiert von der NASA-Raumsonde Mariner 10. Ein Bildmosaik der dem Caloris-Becken gegenüberliegenden Halbkugel

Atmosphäre – Die →Atmosphäre des Merkur wird nur von Physikern als solche bezeichnet. Sie ist dünner als ein labortechnisch erreichbares Vakuum und bietet die gleiche freie Sicht wie die Atmosphäre des Mondes. Die

Bestandteile Wasserstoff und Helium stammen sehr wahrscheinlich aus dem → Sonnenwind. Der Anteil an Sauerstoff, Natrium und Kalium wurde von ihm vermutlich aus dem Material der Oberfläche freigesetzt. Der Druck der Gashülle beträgt am Boden nur etwa anderthalb Milliardstel Millibar. Aufgrund der großen Hitze und der geringen Anziehungskraft von Merkur entweichen die Gasmoleküle stets schnell ins All, deshalb müsste man statt von einer Atmosphäre eigentlich von der Exosphäre reden, der Austauschzone zum interplanetaren Raum. Eine ursprüngliche Atmosphäre als Entgasungsprodukt des Planeteninnern ist dem Merkur demnach längst verloren gegangen; daher gibt es auf ihm auch keine Spuren einer früheren Erosion durch Wind und Wasser. Das Fehlen einer richtigen Gashülle, welche für einen gewissen Ausgleich der Oberflächentemperaturen sorgen würde, bedingt in dieser Sonnennähe besonders extreme Temperaturschwankungen zwischen der Tag- und der Nachtseite. Die Temperatur auf der Sonnenseite steigt bis auf 427 °C; auf der Nachtseite fällt sie bis auf –173 °C.

Oberfläche – Bis heute sind lediglich etwa 45 Prozent der Oberfläche des Merkur kartiert. Wegen der schwierigen Erreichbarkeit auf der sonnennahen Umlaufbahn und der damit verbundenen Gefahr durch den intensiveren Sonnenwind hat bislang erst eine Raumsonde, Mariner 10, den Planeten besucht. Die mondähnliche, von → Kratern durchsetzte Oberfläche aus rauem, porösem, dunklem Gestein reflektiert das Sonnenlicht nur schwach. Die mittlere sphärische Albedo beträgt 0,06; das heißt, die Oberfläche streut im Durchschnitt 6 % des von der Sonne praktisch parallel eintreffenden Lichtes zurück. Damit ist der Merkur im Mittel noch etwas dunkler als der → Mond (0,07).

Die Oberfläche des Merkur ist mit Kratern übersät; die Verteilung der Einschlagstrukturen ist somit ziemlich gleichmäßig. Mit ein Grund für die hohe Kraterdichte ist die äußerst dünne Atmosphäre, die das Eindringen von → Meteoroiden gestattet, ohne dass sie dabei großteils verglühen. Die große Anzahl der Krater je Fläche – ein Maß für das Alter der Kruste – spricht für eine sehr alte, das heißt seit der Bildung und Verfestigung des Merkur vor etwa viereinhalb bis vor ungefähr vier Milliarden Jahren sonst wenig veränderte Oberfläche. Anhand der zerstörerischen Beeinträchtigung der Oberflächenstrukturen untereinander ist, wie auch bei Mond und → Mars, eine Rekonstruktion der zeitlichen Reihenfolge der prägenden Ereignisse möglich. Es gibt auf der abgelichteten Seite des Planeten keine Anzeichen für → Plattentektonik, aktiven Vulkanismus oder andere heute noch andauernde endogene Prozesse.

Nördlich des Äquators liegt Caloris Planitia, ein riesiges, wahrscheinlich kreisförmiges, aber ziemlich flaches Becken mit einem errechneten Durchmesser von etwa 1.340 km. Es ist damit das größte Gebilde auf der bekannten Seite von Merkur und wurde vermutlich von einem über 100 km großen Einschlagkörper erzeugt. Der → Impakt war so heftig, dass durch die seismischen Schwingungen um den Ort des Einschlags mehrere konzentrische Ringwälle aufgeworfen wurden und aus dem Innern des Planeten Lava austrat. Das Innere des Beckens ist von dem Magma aus der Tiefe anscheinend aufgefüllt worden, ähnlich wie die Marebecken des Mondes. Den Boden des Beckens prägen viele konzentrische Furchen und Grate, die an eine Zielscheibe erinnern und ihm Ähnlichkeit mit dem annähernd vergleichbar großen Multiringssystem auf dem Mond geben, in dessen Beckenzentrum das Mare Orientale liegt. Das ziemlich flache Caloris-Becken wird von den Caloris Montes begrenzt, einem unregelmäßigen Kettengebirge, dessen Gipfelhöhen lediglich etwa 1 km erreichen. Auch andere flache Tiefebene ähneln den Maria des Mondes. *Mare* (Mehrzahl: Maria, dt. »Meere«) ist in der Selenologie – der »Geologie« des Erdtrabanten – die lateinische Gattungsbezeichnung für die glatten und dunklen Basaltflächen, die zahlreiche Krater und Becken des Mondes infolge von aus Bodenspalten emporgestiegener und erstarrter Lava ausfüllen. Die glatten Ebenen des Merkur sind aber nicht dunkel wie die »Mondmeere«. Insgesamt sind sie anscheinend auch kleiner und weniger zahlreich. Sie liegen alle auf der Nordhalbkugel im Umkreis des Caloris-Beckens. Ihre Gattungsbezeichnung ist Planitia (lat. für »Tiefebene«).

Dass sich die mareähnlichen Ebenen auf dem Merkur nicht mit einer dunkleren Farbe von der Umgebung abheben, wie die Maria des Mondes, wird mit einem geringeren Gehalt an Eisen und Titan erklärt. Damit ergibt sich jedoch ein gewisser Widerspruch zu der hohen mittleren Dichte des Planeten, die für einen verhältnismäßig sehr großen Metallkern spricht.

Zwei Formationen findet man ausschließlich auf der Merkur Oberfläche:

- Erstens befindet ein eigentümlich chaotisch wirkendes Gelände unregelmäßig geformter, bis etwa 1 km hoher Hügel, das von Tälern zerschnitten ist, sich dem Caloris-Becken genau gegenüber. Als Ursache wird eine Fokussierung der seismischen Schwingungen des großen Einschlages angenommen, durch die das ursprüngliche Relief des Antipodengebietes zerstört wurde. Das betroffene Gebiet ist etwa fünfmal so groß wie Deutschland und ist demnach mindestens von gleicher Größe wie das nur zu rund einem Drittel erkundete Caloris-Becken.

- Zweitens existieren bis mehrere hundert Kilometer lange und bis zu 2 km hohe, gelappte Böschungen, die damit die größten Höhenunterschiede auf dem Merkur aufweisen. Diese Strukturen ähnlich einer Verwerfung haben die Gattungsbezeichnung Rupes (lat. für »Böschung«, »Steilwand«) mit den Individualnamen nach Schiffen von Entdeckern und wissenschaftlichen Expeditionen bekommen. Sie ziehen sich in sanften Windungen quer durch Ebenen und Krater. Die durch sie in der Höhe versetzten Krater Teile sind auch horizontal gegeneinander verschoben. Es handelt sich um Überschiebungen der Kruste, die vermutlich durch ein Schrumpfen des gesamten Planeten entstanden sind. Der in der Planetengeologie profilierte amerikanische Geologe Robert G. Strom hat die Schrumpfung der Merkur-Oberfläche auf etwa 100.000 km² abgeschätzt. Das entspricht einer Verringerung des Planetenradius um bis zu etwa 2 km. Als Ursache der Kontraktion wird die Abkühlung des Planeten im Anschluss an eine heiße Phase seiner Entstehung gesehen, in der er ähnlich wie die Erde und der Mond von vielen großen Asteroideneinschlägen bis zur Glutflüssigkeit aufgeheizt worden sein soll. Dieses schwere Bombardement nahm demnach erst vor etwa 3,8 Milliarden Jahren ein Ende. Einige der gelappten Böschungen sind offenbar durch ein ziemlich starkes Bombardement teilweise zerstört. Das bedeutet, dass sie früher entstanden sind als die dadurch entstandenen Krater. Nach dem Grad der Erosion dieser Krater durch viele kleinere, nachfolgende Meteoriteneinschläge wird die Schrumpfung der Kruste vor ungefähr vier Milliarden Jahren angenommen, also während der Entstehung der mareähnlichen Ebenen.



Abb. 17: Rupes Discovery, die längste gelappte Böschung, zieht sich über 400 km durch Ebenen und Krater.

Laut einer alternativen Hypothese sind die tektonischen Aktivitäten während der Kontraktionsphase auf die Gezeitenkräfte der Sonne zurückzuführen, durch deren Einfluss die Eigendrehung des Merkur von einer ungebundenen, schnellen Geschwindigkeit auf die heutige Rotationsperiode heruntergebremsert wurde. Dafür spricht, dass sich diese Strukturen wie auch eine ganze Reihe von Rinnen und Bergrücken mehr in meridionale als in Ost-West-Richtung erstrecken.

Nach der Kontraktion und der dementsprechenden Verfestigung des Planeten entstanden kleine Risse auf der Oberfläche, die sich mit an-

deren Strukturen, wie Kratern, und den flachen Tiefebene überlagerten – ein klares Indiz dafür, dass die Risse im Vergleich zu den anderen Strukturen jüngerer Ursprungs sind. Die Zeit des Vulkanismus auf dem Merkur endete, als die Kompression der Hülle sich einstellte, so dass dadurch die Ausgänge der Lava an der Oberfläche verschlossen wurden. Vermutlich passierte das während einer Periode, die man zwischen die ersten 700 bis 800 Millionen Jahre der Geschichte des Merkur einordnet. Seither gab es nur noch vereinzelte Einschläge von →Kometen und →Asteroiden.

Eine weitere Besonderheit gegenüber dem Relief des Mondes sind auf dem Merkur die so genannten Zwischenkrater Ebenen. Im Unterschied zu der auch mit großen Kratern gesättigten Oberfläche des Mondes kommen auf dem Merkur zwischen den größeren Kratern auch relativ glatte Ebenen mit Hochlandcharakter vor, die nur von kleinen Kratern geprägt sind. Manche Forscher sehen darin die ursprüngliche, verhältnismäßig unveränderte Merkur-Oberfläche. Andere glauben an einen sehr frühen und großräumigen Vulkanismus, der die Regionen einst geglättet hat. Es gibt Anzeichen dafür, dass sich in diesen Ebenen die Reste größerer und auch vieler doppelter Ringwälle gleich solchen des Mondes noch schwach abzeichnen.

Wie auch beim Mond zeigen die Krater des Merkur ein weiteres Charakteristikum, das für eine Einschlagstruktur als typisch gilt: Das hinausgeschleuderte und zurückgefallene Material, das sich um den Krater herum anhäuft; manchmal in Form von radialen Strahlen, wie man sie auch als Strahlensysteme auf dem Mond kennt. Sowohl diese speichenartigen Strahlen als auch die Zentralkrater, von denen sie jeweils ausgehen, sind aufgrund des relativ geringen Alters heller als die Umgebung. Die ersten Beobachtungen der Strahlen des Merkur machte man mit den Radioteleskopen Arecibo und Goldstone und mit Hilfe des Very Large Array (VLA) des nationalen Radioobservatoriums der Vereinigten Staaten.

Innerer Aufbau: Kern, Mantel und Kruste – Der Merkur ist ein →Gesteinsplanet wie die →Venus, die Erde und der →Mars. In der klassischen Reihe der Planeten ist Merkur der zweitkleinste Planet des Sonnensystems. Sein Durchmesser beträgt mit 4.878 km nur knapp 40 Prozent des Erddurchmessers. Er ist sogar kleiner als der →Jupitermond →Ganymed und der →Saturnmond →Titan, – dafür aber jeweils mehr als doppelt so massereich wie diese sehr eisreichen Trabanten. Der äußerste Planet →Pluto – ebenfalls eisreich – ist noch weit kleiner als der Merkur.

Das Innere des Merkur wird anscheinend von einem sehr großen Eisen-Nickel-Kern beherrscht, der zu 65% aus Eisen besteht und drei Viertel des Planetendurchmessers einnimmt. Merkurs relativer Gehalt an Eisen ist größer als der jedes anderen großen Objektes im Sonnensystem. Als Erklärung werden verschiedene Annahmen ins Feld geführt, die alle von einem ehemals ausgeglichenerem Schalenbau und einem entsprechend dickeren, metallarmen Mantel ausgehen.

Mit einem Durchmesser von etwa 3.600 km ist er demnach größer als der Erdmond und bedingt die sehr hohe mittlere Dichte des Planeten von $5,427 \text{ g/cm}^3$. Die mittlere Dichte der Gesamtzusammensetzung des Merkur ist im Prinzip sogar noch größer als die der Erde, denn

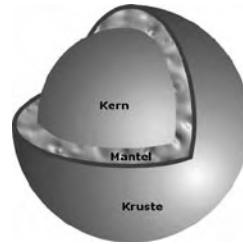


Abb. 18: Schnitt durch den Mantel des Merkur

der Erdkörper übertrifft den Merkur darin nur durch die zusätzliche Kompressionswirkung seiner Schwerkraft. Der im Verhältnis entsprechend geringer ausfallende Mantel des Merkur mit einer Dicke von wahrscheinlich rund 600 km wird demgemäß von einer nur einige 10 km dünnen Kruste umhüllt. Die äußeren Schalen dürften – ebenfalls wie bei der Erde – aus Silikaten bestehen.

Magnetosphäre – Trotz seiner langsamen Rotation besitzt Merkur eine relativ ausgeprägte Magnetosphäre. Er ist damit neben der Erde der einzige weitere Gesteinsplanet, der ein globales Magnetfeld aufweist. Es hat mit 300 nT ungefähr ein Prozent der Stärke des Erdmagnetfeldes und ist der Rotationsachse annähernd parallel. Möglicherweise wird Merkurs Dipolfeld ganz ähnlich durch den Dynamo-Effekt zirkulierender Schmelzen im Metallkern erzeugt. Da der Merkur aber seit seiner Entstehung aufgrund der geringen Größe schon längst zu stark abgekühlt sein dürfte, um in seinem Kern ein Eisen-Nickel-Gemisch noch flüssig halten zu können, wäre es auch möglich, dass sich zum Beispiel durch Mischungen mit Schwefel eine eutektische Legierung mit niedrigerem Schmelzpunkt bilden konnte. Eine andere Hypothese erklärt die Existenz des Magnetfeldes als Überbleibsel eines früheren, mittlerweile aber erloschenen Dynamo-Effektes; es wäre dann das Ergebnis erstarrter Ferromagnetite.

Geologische Entwicklungsetappen – Nach der herkömmlichen Theorie zur Entstehung des Planetensystems der Sonne ist der Merkur wie alle Planeten aus einer allmählichen Zusammenballung von Planetesimalen

hervorgegangen, die sich zu immer größeren Körpern vereinten. In der letzten Phase der Akkretion schluckten die größeren Körper die kleineren und in dem Bereich des heutigen Merkurorbits bildete sich binnen etwa zehn Millionen Jahren der sonnennächste Planet.

Mit der Aufheizung des Protoplaneten, also des »Rohplaneten« durch den Zerfall der radioaktiven Elemente und durch die Energie vieler großer und andauernder Einschläge während des Aufsammlens der kleineren Brocken begann das, was man mangels eines merkurspezifischen Begriffes als die *geologische* Entwicklung bezeichnen kann. Der bis zur Glut erhitzte Körper differenzierte sich chemisch durch seine innere Gravitation in Kern, Mantel und Kruste. Mit dem Ausklingen des Dauerbombardements konnte der entstandene Planet beginnen sich abzukühlen, und es bildete sich aus der äußeren Schicht eine feste Gesteinskruste.

In der folgenden Etappe sind anscheinend alle Krater und andere Spuren der ausklingenden Akkretion überdeckt worden. Die Ursache könnte eine Periode von frühem Vulkanismus gewesen sein. Dieser Zeit wird die Entstehung der Zwischenkraterebenen zugeordnet sowie die Bildung der gelappten Böschungen durch ein Schrumpfen des Merkur zugeschrieben.

Erst das Ende des schweren Bombardements hat sich mit der Entstehung des Caloris-Beckens und den damit verbundenen Landschaftsformen im Relief als Beginn der dritten Epoche eindrucksvoll niedergeschlagen.

In der vierten Phase entstanden die weiten, mareähnlichen Ebenen, wahrscheinlich durch eine weitere Periode vulkanischer Aktivitäten.

Die fünfte und seit etwa drei Milliarden Jahren noch immer andauernde Phase der Oberflächengestaltung zeichnet sich lediglich durch eine Zunahme der Einschlagkrater aus. Dieser Zeit werden die Zentralkrater der Strahlensysteme zugeordnet, deren auffällige Helligkeit als ein Zeichen der Frische angesehen werden.

Die Abfolge der Ereignisse hat im Allgemeinen eine überraschend große Ähnlichkeit mit der Geschichte der Oberfläche des Mondes; in Anbetracht der ungleichen Größe, der sehr verschiedenen Orte im Sonnensystem und den damit verbundenen, entsprechend unterschiedlichen Bedingungen ist das nicht zu erwarten gewesen.

Umlaufbahn und Rotation

Als sonnennächster Planet hat Merkur nicht nur den geringsten Abstand zu unserem Zentralgestirn, sondern mit etwa 88 Tagen auch die kürzeste Umlaufzeit. So liegt sein sonnennächster Punkt, das Perihel, bei 0,307 AE und sein sonnenfernster Punkt, das Aphel, bei 0,467 AE. Zudem ist die

Umlaufbahn des Merkur vergleichsweise stark elliptisch, die numerische Exzentrizität seiner Bahn wird mit 0,206 nur noch vom weit entfernten Pluto übertroffen. Ebenso ist die Neigung seiner Bahnebene gegen die Erdbahnebene mit über sieben Grad höher – wiederum mit Ausnahme des kleinen Pluto – als die Bahnneigung aller anderen Planeten.

Periheldrehung – Durch den direkten gravitativen Einfluss der anderen Planeten, aber auch durch ihren Einfluss einer Ablenkung der Sonne an dem gemeinsamen Schwerpunkt des Gesamtsystems führt die große Bahnachse eine langsame rechtläufige Drehung in der Bahnebene aus. Auch der Merkur durchläuft also streng genommen keine Ellipsen-, sondern eine Rosettenbahn.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts waren die Astronomen in der Lage, diese Veränderungen, insbesondere die Lage des Merkur-Perihels, mit großer Genauigkeit zu messen. Urbain Le Verrier, der damalige Direktor des Pariser Observatoriums, bemerkte, dass die Präzession (Drehung) des Perihels für Merkur 5,74" (Bogensekunden) pro Jahr beträgt. Dieser Wert konnte allerdings nicht völlig mit der klassischen Mechanik von Isaac Newton erklärt werden. Laut der Newtonschen Himmelsmechanik ist der gemessene Wert um 0,43" pro Jahr zu groß und dürfte in 100 Jahren nur 532,08" betragen. Darum vermutete man neben einer entsprechenden Abplattung der Sonne zunächst einen Asteroidengürtel zwischen Merkur und der Sonne oder einen weiteren Planeten, der für diese Störungen verantwortlich sein sollte. Obwohl man sogar schon einen Namen für diesen vermeintlichen Planeten gewählt hatte (Vulkan), konnte trotz intensiver Suche kein Objekt innerhalb der Merkurbahn gefunden werden. Da ein Objekt innerhalb der Merkurbahn allerdings durch den entsprechend kleinen Abstand zur Sonne leicht von dieser überstrahlt werden kann, stieß das Problem nur auf mäßiges Interesse, bis Albert Einstein mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie eine Erklärung für die kleinen Unterschiede zwischen Theorie und Beobachtung erbrachte. Der relativistisch berechnete Überschuss von 43,03" je Jahrhundert stimmt gut mit dem beobachteten von 43,11" überein. Für eine komplette Periheldrehung um 360° benötigt Merkur rund 225.000 Jahre.

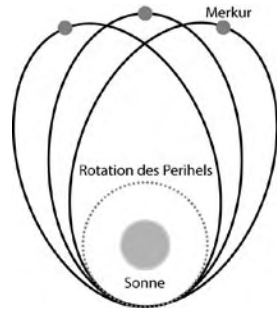


Abb. 19: Drehung des Merkur-Perihels. Die Exzentrizität der Bahn und die Rate der Präzession sind stark übertrieben.

Die Exzentrizität der Bahn und die Rate der Präzession sind stark übertrieben.

Je einzelnen Umlauf beträgt die Verschiebung 0,1039" beziehungsweise 29 km.

Dieser Erfolg der Allgemeinen Relativitätstheorie gilt als einer ihrer Hauptstützen. Er wurde mitunter sogar als ein Paradebeispiel für die Widerlegung (Falsifikation) einer alten Theorie angesehen. Die Periheldrehung konnte jedoch prinzipiell auch mit der Newtonschen Himmelsmechanik erklärt werden, nur nicht mit einer so hohen Genauigkeit.

Gebrochen gebundene Rotation – Radarbeobachtungen zeigten 1975, dass der Planet nicht, wie ursprünglich angenommen, eine einfache gebundene Rotation besitzt, d. h. der Sonne immer dieselbe Seite zuwendet (so, wie der Erdmond uns auf der Erde immer dieselbe Seite zeigt). Vielmehr dreht er sich während zweier Umläufe exakt dreimal um seine eigene Achse. Seine Rotationsdauer beträgt zwar 58,646 Tage, aber aufgrund der 2:3-Kopplung an die schnelle Umlaufbewegung mit demselben Drehsinn entspricht der Abstand zwischen zwei Sonnenaufgängen an einem beliebigen Punkt auf dem Planeten mit 175,938 Tagen auch genau dem Zeitraum von zwei Sonnenumläufen. Nach einem weiteren Umlauf geht die Sonne dementsprechend am Antipodenort auf. Durchläuft der Merkur den sonnennächsten Punkt seiner ziemlich stark exzentrischen Bahn, den Perihel, steht das Zentralgestirn zum Beispiel immer abwechselnd über dem Calorisbecken am 180. Längengrad beziehungsweise über dessen chaotischen Antipodengebiet am Nullmeridian im Zenit. Zur Erklärung dieser gebrochen gebundenen Rotation wird unter Caloris Planitia (der »heißen« Tiefebene), einer Massekonzentration ähnlich den so genannten Mascons der großen, annähernd kreisförmigen Maria des Erdmondes, angenommen, an der die Gezeitenkräfte der Sonne die vermutlich einst schnellere Eigendrehung des Merkur zu dieser ungewöhnlichen Resonanz heruntergebremst haben. Im Perihelbereich, während der höchsten Bahngeschwindigkeit von Merkur, entspricht seine Rotationsgeschwindigkeit einer normalen gebundenen Rotation.

Merkur hat keinen Mond. Aber aufgrund der langsamen Rotation und der großen Exzentrizität der Umlaufbahn sowie in Hinsicht der erdmondähnlichen Oberflächengestaltung in der analogen Form von zwei auffallend unterschiedlichen Hemisphären gibt es die Hypothese, dass Merkur selbst einmal ein Trabant war, welcher der Venus entwichen ist. Mit dieser Annahme ließe sich erklären, warum diese beiden Planeten als einzige im Sonnensystem mondlos sind.

Erforschung

Merkur ist mindestens seit der Zeit der Sumerer (3. Jahrtausend v. Chr.) bekannt. Die Griechen der Antike gaben ihm zwei Namen, Apollo, wenn er am Morgenhimmel sichtbar war, und Hermes, wenn er am Abendhimmel sichtbar war.

Die griechischen Astronomen wussten allerdings, dass es sich um denselben Himmelskörper handelte. Heraklit glaubte sogar, dass Merkur und Venus die Sonne und nicht die Erde umkreisen. Die Römer benannten ihn wegen seiner schnellen Bewegung am Himmel nach dem geflügelten Götterboten Merkur.

Erdgebundene Erforschung – Nach der Erfindung des Fernrohrs entdeckte Giovanni Zupi im Jahre 1639, dass der Merkur Phasen zeigt wie der Mond, und bewies damit seinen Umlauf um die Sonne.

Die ersten, nur sehr vagen Merkurkarten wurden von Johann Hieronymus Schroeter skizziert. Die ersten detaillierteren Karten wurden im späten 19. Jahrhundert, etwa 1881 von Giovanni Schiaparelli und danach von Percival Lowell angefertigt. Lowell meinte, ähnlich wie Schiaparelli bei seinen Marsbeobachtungen, auf dem Merkur Kanäle erkennen zu können.

Besser, wenn auch immer noch sehr ungenau, war die Merkurkarte von Eugenios Antoniadi aus dem Jahr 1934. Für seine Nomenklatur der Albedomerkmale bezog er sich auf die Hermes-Mythologie. Audouin Dollfus hat sie für seine genauere Karte von 1972 großteils übernommen. Für heutige Merkurkarten auf der Grundlage der Naherkundung hat

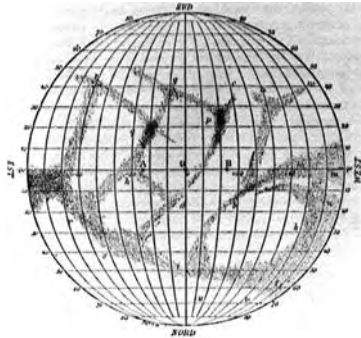


Abb. 20: Merkurkarte von Schiaparelli

die IAU diese Nomenklatur gebilligt. Für die topografischen Strukturen wurde ein anderes Schema gewählt. So bekamen die den Maria des Mondes ähnlichen Tiefebene den Namen des Gottes Merkur in verschiedenen Sprachen. Die Krater des Merkur wurden hauptsächlich nach Komponisten, Dichtern, Malern und anderen Künstlern benannt.

Erforschung mit Raumsonden – Merkur gehört zu den am wenigsten erforschten Planeten des Sonnensystems. Dies liegt vor allem an den für Raumsonden sehr unwirtschaftlichen Bedingungen in der Nähe der Sonne, wie

der hohen Temperatur und intensiven Strahlung, sowie an zahlreichen technischen Schwierigkeiten, die bei einem Flug zum Merkur in Kauf genommen werden müssen. Selbst von einem Erdborbit aus sind die Beobachtungsbedingungen zu ungünstig, um ihn mit Teleskopen zu beobachten. Der Spiegel des Hubble-Weltraumteleskops würde durch die Teilchen des Sonnenwindes großen Schaden nehmen, wenn man ihn auf einen dermaßen sonnennahen Bereich ausrichten würde.

Der Merkur umkreist die Sonne drei mal so nah wie die Erde, so dass eine Raumsonde über 91 Millionen Kilometer in das Gravitationspotentialtopf der Sonne fliegen muss, um den Planeten zu erreichen. Von einem stationären Startpunkt würde die Raumsonde keine Energie brauchen, um in Richtung Sonne zu fallen. Da der Start aber von der Erde erfolgt, die sich bereits mit einer Orbitalgeschwindigkeit von 30 km/s um die Sonne bewegt, verhindert der hohe Drehimpuls der Sonde eine Bewegung Richtung Sonne. Daher muss die Raumsonde eine beträchtliche Geschwindigkeitsänderung aufbringen, um in eine Hohmannbahn einzutreten, die in die Nähe des Merkurs führt.

Zusätzlich führt die Abnahme der potenziellen Energie der Raumsonde bei einem Flug in das Gravitationspotentialtopf der Sonne zur Erhöhung ihrer kinetischen Energie, die sich in einer Erhöhung der Fluggeschwindigkeit widerspiegelt. Wenn man dies nicht korrigiert, ist die Sonde beim Erreichen des Merkurs bereits so schnell, dass ein sicherer Eintritt in den Merkurorbit oder gar eine Landung erheblich erschwert wird. Für einen Vorbeiflug ist die hohe Fluggeschwindigkeit allerdings von geringerer Bedeutung. Ein weiteres Hindernis ist das Fehlen einer Atmosphäre, dies macht es unmöglich, treibstoffsparende Aerobraking-Manöver zum Erreichen des gewünschten Orbits um den Planeten einzusetzen. Stattdessen muss der gesamte Bremsimpuls für einen Eintritt in den Merkurorbit durch bordeigene Triebwerke und mitgeführten Treibstoff aufgebracht werden.

Aufgrund dieser Einschränkungen gab es bisher mit Mariner 10 eine einzige Raumsonde, die den Merkur je erreicht hat. Eine weitere Sonde, MESSENGER, ist derzeit auf dem Weg zum Planeten, und noch eine, BepiColombo, befindet sich in Planung.

Mariner 10 – Merkur wurde nur von einer einzigen Raumsonde, Mariner 10, besucht, die von 1974 bis 1975 dreimal an ihm vorbei flog: Am 29. März 1974 in einer Entfernung von 705 km, am 21. September 1974 in einer Entfernung von 50.000 km und am 16. März 1975 in einer Entfernung von 327 km. Da sie ihn auf ihrer Sonnenbahn alle zwei Merkurjahre

passiert hat – an ihrem sonnen-nächsten Bahnpunkt in der Nähe seines sonnenfernsten Ortes –, kam jedes Mal dieselbe Hemisphäre bei gleicher Beleuchtung ins Bild. Dadurch hat sich die beschriebene Kopplung von Merkurs Rotation an seine Umlaufbahn bewiesen, aber es konnten nur 45 Prozent seiner Oberfläche kartiert werden. Zusätzlich wurde Merkur im infraroten und im UV-Licht untersucht und es wurden Messungen des Magnetfeldes sowie der geladenen Partikel vorgenommen.



Abb. 21: Die NASA-Sonde Mariner 10

MESSENGER – Eine weitere Raumsonde der NASA, MESSENGER, startete am 3. August 2004 und soll den Merkur 2011 erreichen, um ihn erstmals vollständig zu kartografieren. MESSENGER wird als erste Raumsonde in einen Merkur-Orbit einschwenken und den Planeten mit seinen zahlreichen Instrumenten eingehend studieren. MESSENGER soll sich dabei der Untersuchung der geologischen und tektonischen Geschichte des Merkur sowie seiner Zusammensetzung widmen. Weiterhin soll die Sonde nach dem Ursprung des Magnetfeldes suchen, die Größe und den Zustand des Planetenkerns bestimmen, die Polarkappen des Planeten untersuchen sowie die Exosphäre und die Magnetosphäre erforschen. Um sein Ziel zu erreichen, fliegt MESSENGER eine sehr komplexe Route, die ihn erstmal zurück zur Erde, dann zwei Mal an der Venus sowie drei Mal am Merkur vorbeiführt. Der erste Vorbeiflug am Merkur soll im Januar 2008 stattfinden, die gesamte Reise nimmt etwa 6,5 Jahre in Anspruch. Die Missionsdauer im Merkurorbit ist auf ein Jahr festgelegt.



Abb. 22: MESSENGER bei den Startvorbereitungen

Die Missionsdauer im Merkurorbit ist auf ein Jahr festgelegt.

BepiColombo – Auch die europäische Raumfahrtorganisation ESA möchte sich gemeinsam mit der japanischen Raumfahrtbehörde JAXA mit der

Sonde BepiColombo an der Erforschung des sonnennächsten Planeten beteiligen. BepiColombo soll aus zwei getrennten Sonden – einem planetaren Fernerkundungsbewerber in einem 400×1.500 km polaren Orbit sowie einem Magnetosphärenorbiter in einem 400×12.000 km polaren Orbit – bestehen und sich der Untersuchung des Magnetfeldes sowie der geologischen Zusammensetzung und Geschichte des Merkur widmen. Der Start der Sonde ist derzeit für 2012 geplant, die Reise zum Merkur mit Hilfe von Ionentriebwerken und Vorbeifügen an inneren Planeten soll vier Jahre und zwei Monate dauern. Am Ziel angekommen, wird die Sonde sich Temperaturen von bis zu 250°C aussetzen und soll mindestens ein Jahr lang wissenschaftliche Ergebnisse liefern.

Beobachtung

Merkur kann sich als innerster Planet des Sonnensystems nur bis zu einem Winkel von maximal 28 Grad von der Sonne entfernen und ist daher schwierig zu beobachten. Er kann in der Abend- oder Morgendämmerung als orangefarbener Stern mit einer scheinbaren Helligkeit von etwa 1 bis -1 in der Nähe des Horizonts mit bloßem Auge wahrgenommen werden.

Durch die Horizontnähe wird seine Beobachtung mit Teleskopen sehr erschwert, da sein Licht eine größere Strecke durch die Erdatmosphäre zurücklegen muss und durch Turbulenzen und Lichtbrechung und Absorption gestört wird. Der Planet erscheint meist als verwaschenes, halbmondförmiges Scheibchen im Teleskop. Auch mit leistungsfähigen Teleskopen sind kaum markante Merkmale auf seiner Oberfläche auszumachen.

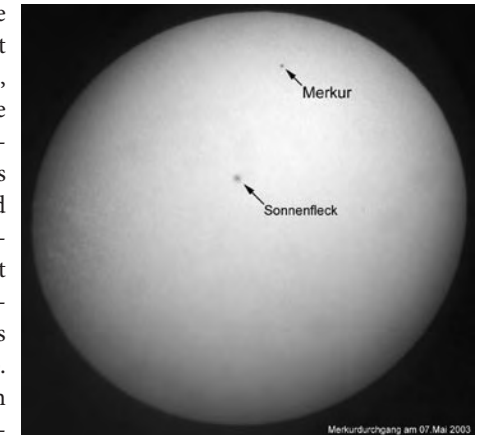


Abb. 23: Merkurdurchgang am 7. Mai 2003

Da die Merkurbahn stark elliptisch ist, schwanken die Werte seiner größten Elongation zwischen 18 und 28 Grad.

Bei der Beobachtung des Merkur sind – bei gleicher geografischer nördlicher oder südlicher Breite – die Beobachter der Nordhalbkugel im Nachteil, denn die Merkur-Elongationen mit den größten Werten finden

zu Zeiten statt, bei denen für einen Beobachter auf der Nordhalbkugel die Ekliptik flach über dem Horizont verläuft und Merkur in der hellen Dämmerung auf- oder untergeht. In den Breiten Mitteleuropas ist er dann mit bloßem Auge nicht zu sehen. Die beste Sichtbarkeit verspricht eine maximale westliche Elongation (Morgensichtbarkeit) im Herbst sowie eine maximale östliche Elongation (Abendsichtbarkeit) im Frühling.

In großer Höhe über dem Horizont kann Merkur mit bloßem Auge nur während einer totalen Sonnenfinsternis gesehen werden.

Aufgrund der Bahneigenschaften von Merkur und Erde wiederholen sich alle 13 Jahre ähnliche Merkursichtbarkeiten. In diesem Zeitraum finden im Allgemeinen auch zwei so genannte *Transits* oder *Durchgänge* statt, bei denen der Merkur von der Erde aus gesehen direkt vor der Sonnenscheibe als schwarzes Scheibchen zu sehen ist. Ein solcher Transit *des Merkur* ist sichtbar, wenn er bei der unteren Konjunktion – während er die Erde beim Umlauf um die Sonne auf seiner Innenbahn überholt – in der Nähe eines seiner beiden *Bahnknoten* steht, also die Erdbahnebene kreuzt. Ein solches Ereignis ist aufgrund der entsprechenden Geometrie nur zwischen dem 6. und dem 11. Mai oder zwischen dem 6. und dem 15. November möglich, da die beiden Bahnknoten am 9. Mai beziehungsweise am 11. November von der Erde gesehen vor der Sonne stehen. Der nächste Merkurdurchgang findet am 8. November 2006 statt, wird allerdings nur vom pazifischen Raum aus zu beobachten sein, da er in Europa zur Nachtzeit erfolgen wird. Der darauf folgende Durchgang wird dann am 9. Mai 2016 stattfinden.

Kulturgeschichte

Im antiken Griechenland bezog man den Planeten auf den Gott und Götterboten Hermes. Der zumeist nur in der Dämmerung und dann auch nur schwer zu entdeckende, besonders rastlose Planet wurde auch als Symbol für Hermes als Schutzpatron der Händler, Wegelagerer und Diebe gesehen. Bei den Römern entsprach Hermes spätestens in der nachantiken Zeit dem Mercurius, abgeleitet von *mercari* (lat., »Handel treiben«). Der von ihnen nach Merkur benannte Wochentag *dies Mercurii* ist im Deutschen der Mittwoch. In der Zuordnung der Wochentage besteht die namentliche Verbindung des Merkur mit dem Mittwoch noch im Französischen (Mercredi), im Italienischen (Mercoledì), im Spanischen (Miércoles) und im Rumänischen. Den Germanen wird als Entsprechung des Gestirns der Gott Odin beziehungsweise Wotan zugeschrieben, dem ebenso der Mittwoch zugeordnet wurde. In der Welt

der mittelalterlichen Alchemisten hat man dem eiligen Wandelstern das bewegliche Quecksilber zugeordnet. In vielen Sprachen basiert der Name dieses Metalls heute noch auf diesem Wortstamm (engl.: *Mercury*, franz.: *Mercur*).

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Merkur_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Merkur_(Planet)) (gekürzt). *Historie: 2.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Lotse, CWitte, Bricktop1, S, Kubi, Zinnmann, Arnomane, Freud, Kseiferlin, Pikarl, Phrood, Ralf5000, Ben-Zin, Stefan h, Zwobot, Asdert, Nephelin, Igrimm12, Mps, BWBot, Necrosausage, RKraasch, Atamari, S.K., Vlado, AstroGK, Rainer Bielefeld, Chobot, Stern, Raymond, Crux, Hagbard, AkaBot, Inschanör, Balú, CuttyP, Traroth, Galilea, ArtMechanic, Romanm, Danimo, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.*

Venus

Die Venus ist nach dem →Merkur der zweitinnerste →Planet sowie der sechstgrößte des Sonnensystems. Sie kommt auf ihrer Umlaufbahn der →Erde am nächsten und hat fast die gleiche Größe. Nach dem →Mond ist sie das hellste Objekt am Nachthimmel. Da sie als einer der unteren Planeten morgens und abends am besten sichtbar ist und nie gegen Mitternacht, wird die Venus auch Morgenstern beziehungsweise Abendstern genannt. Sie zählt zu den →erdähnlichen (terrestrischen) Planeten.

Das Zeichen des Planeten Venus ist das aus der Biologie bekannte Symbol für das weibliche Geschlecht. Es steht auch für die Weiblichkeit als solche und gilt als stilisierte Darstellung des Handspiegels der Göttin Venus: ♀

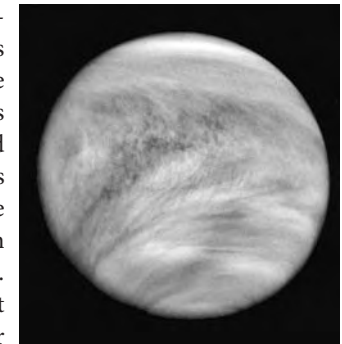


Abb. 24: Eine Aufnahme der Venus von Pioneer Venus Orbiter im ultravioletten Licht zeigt deutliche Wolkenstrukturen.

Aufbau

Im ganzen Sonnensystem sind sich im Allgemeinen keine zwei Planeten so ähnlich wie die Venus und die →Erde. So hat die Venus mit 12.103,6 km fast den gleichen Durchmesser wie die Erde. Oft werden die beiden Planetenschwestern auch als Zwillinge bezeichnet. Doch so sehr sie sich in der Masse und in der chemischen Zusammensetzung auch gleichen, unterscheiden sich die Oberflächen beider Planeten doch stark (vgl. Farbtafeln Abb. 140).

Atmosphäre – Die Atmosphäre der Venus besteht hauptsächlich aus Kohlendioxid. Zu einem kleinen Teil von 3,5 % ist auch Stickstoff enthalten. Die absolute Menge des Stickstoffs entspricht aufgrund der großen Gesamtmasse immerhin etwa dem Fünffachen des Stickstoffs in der Erdatmosphäre. Die Masse der Venusatmosphäre beträgt rund das 90fache der Lufthülle der Erde und bewirkt am mittleren Bodenniveau einen Druck von 92 bar. Dies kommt dem Druck in gut 900 m Meerestiefe gleich. Die Dichte der Atmosphäre ist an der Oberfläche im Mittel etwa 50 mal so hoch wie auf der Erde.

Die Hauptmasse der Atmosphäre mit rund 90 Prozent reicht von der Oberfläche bis in eine Höhe von 28 Kilometer. Die Masse dieses Gasozeans entspricht etwa einem Drittel der Masse des irdischen Weltmeeres. Dieser dichten Dunstschicht sind wahrscheinlich auch die von verschiedenen Sonden registrierten elektromagnetischen Impulse zuzuordnen, die für sehr häufige Blitzentladungen sprechen, denn in den Wolken auf der Nachtseite der Venus konnten keine von Gewittern aufleuchtende Blitze nachgewiesen werden. Über den Wolken reichen äußere Dunstschichten bis in eine Höhe von etwa 90 Kilometer. Rund 10 Kilometer höher endet die Troposphäre. In der darüber liegenden, etwa 40 Kilometer dicken Mesosphäre erreicht die Temperatur Tiefstwerte von rund -100 °C . In dem anschließenden Stockwerk der Thermosphäre steigt die Temperatur infolge der Absorption der Sonnenstrahlung. Minusgrade herrschen insgesamt nur am Grund der Thermosphäre bis hinunter in den oberen Wolkenlagen. Die Exosphäre als äußerste Atmosphärenschicht erstreckt sich in einer Höhe von etwa 220 bis 250 Kilometer.

Die Atmosphäre der Venus ist von außen völlig undurchsichtig, das liegt jedoch nicht so sehr an der Masse beziehungsweise der sehr hohen Dichte der Gashülle, sondern hauptsächlich an einer stets geschlossenen Wolkendecke. Sie befindet sich in einer Höhe von etwa 50 km und ist rund 20 Kilometer dick. Ihr Hauptbestandteil sind zu etwa 75 Masseprozent Tröpfchen aus Schwefelsäure. Daneben gibt es auch chlor- und phosphorhaltige Aerosole. In der unteren von insgesamt drei Wolkenschichten gibt es möglicherweise auch Beimengungen von elementarem Schwefel.

Die sphärische Albedo der cremegelben und zumeist strukturlosen Wolktoberfläche beträgt 0,76; das heißt, sie streut 76 Prozent des von der Sonne praktisch parallel eintreffenden Lichts zurück. Die Erde reflektiert dagegen nur 39 Prozent. Die von der Venus nicht reflektierte Strahlung wird zu rund zwei Drittel von der Wolkendecke absorbiert. Diese Energie treibt die obersten äquatorialen Wolkenschichten zu einer Geschwindigkeit von etwa 100 m/s beziehungsweise 360 km/h, mit der sie sich immer in Rotati-

onsrichtung der Venus in nur vier Tagen einmal um den Planeten bewegen. Die Hochatmosphäre rotiert somit rund 60 mal so schnell wie die Venus selbst. Diese Erscheinung wird »Superrotation« genannt. Ihre Ursache ist zumindest im Fall der Venus unbekannt. Die einzigen anderen Beispiele im Sonnensystem sind die Strahlströme in der höheren Atmosphäre der Erde und die Wolkobergrenze des Saturnmondes Titan, dessen Stickstoff-Atmosphäre am Boden immerhin den anderthalbfachen Druck der irdischen Lufthülle hat. Eine Superrotation gibt es also nur bei den drei festen Weltkörpern des Sonnensystems, die eine dichte Atmosphäre besitzen.

Die Gashülle der Venus bildet eine einzige Konvektionszelle. Die in der am intensivsten bestrahlten Äquatorzone aufgestiegenen Gasmassen strömen in die Polargebiete und sinken dort in tiefere Lagen, in denen sie zum Äquator zurückfließen. Die im ultravioletten Licht sichtbaren Strukturen der Wolkendecke haben daher die Form eines in Richtung der Rotation liegenden Y. In Bodennähe wurden nur geringe Windgeschwindigkeit von 0,5 bis 2 m/s gemessen. Durch die hohe Gasdichte entspricht das auf der Erde immerhin der Windstärke 4, das heißt, es kommt einer mäßigen Brise gleich, die Staub bewegen kann. Von dem auf die Venus einfallenden Sonnenlicht erreichen nur zwei Prozent die Oberfläche und ergeben eine Beleuchtungsstärke von etwa 5.000 Lux. Die Sichtweite dort beträgt wie an einem trüben Nachmittag rund drei Kilometer.

Die nicht von den Wolken reflektierte oder absorbierte Strahlung wird hauptsächlich von der unteren, sehr dichten Atmosphäre absorbiert und in thermische Strahlung des Infrarotbereichs umgewandelt. In diesem Wellenlängenbereich ist das Absorptionsvermögen des Kohlendioxids sehr groß und die Wärmestrahlung wird so gut wie vollständig von der unteren Atmosphärenschicht aufgenommen. Der starke Treibhauseffekt ist hauptsächlich durch die Masse an Kohlendioxid bedingt, aber auch die geringen Spuren von Wasserdampf und Schwefeldioxid haben daran einen wesentlichen Anteil. Er sorgt am Boden für eine mittlere Temperatur von 470 °C . Das liegt weit über den Schmelztemperaturen von Zinn (232 °C) und Blei (327 °C), und übertrifft sogar die Höchsttemperatur auf dem Merkur (427 °C). Die Erwärmung der Oberfläche ist dadurch auch derart gleichmäßig, dass die Temperaturunterschiede trotz der sehr langsamen Rotation der Venus sowohl zwischen der Tag- und der Nachtseite als auch zwischen der Äquatorregion und den Polgebieten nur sehr gering sind. Ein Minimum von etwa 440 °C wird in Bodennähe nie unterschritten. Ohne die Wolkendecke mit ihrem hohen Reflexionsvermögen wäre es auf der Venus noch erheblich heißer.

Oberfläche – Der Boden der Venus ist ständig dunkelrotglühend. Aufgrund der sehr hohen Temperatur gibt es keine Gewässer. Das Relief wird hauptsächlich von sanft gewellten Ebenen beherrscht. Mit verhältnismäßig geringen Niveauunterschieden von weniger als tausend Metern entsprechen sie dem globalen Durchschnittsniveau und bilden, relativ ähnlich dem Meeresspiegel der Erde, für alle Höhenangaben ein praktisches Bezugsniveau. Dieses Null-Niveau (Normalnull) der Venus entspricht einem Kugelradius von 6.051,8 Kilometern. Die Ebenen nehmen über 60 Prozent der Oberfläche ein. Etwas weniger als 20 Prozent sind bis zu zwei Kilometer tiefe Niederungen. Die verbleibenden 20 Prozent sind Erhebungen, aber nur etwa 8 Prozent entfallen auf ausgesprochene Hochländer, die sich mehr als 1,5 Kilometer über das Null-Niveau erheben. Die hypsografische Kurve der Höhenverteilung auf der Venus zeigt also kein zweites Hauptniveau wie im Fall der Erde, deren umfangreiche Oberkruste in Form der Kontinente neben den Ozeanböden rund ein Drittel der Oberfläche der Erdkruste bildet. Der Höhenunterschied zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Punkt der Venusoberfläche beträgt etwa 12.200 Meter; das sind rund zwei Drittel des maximalen Höhenunterschiedes der Erdkruste mit etwa 19.880 Metern. Die Höhenangaben im Einzelnen sind für die Venus oft sehr unterschiedlich (vgl. Farbtafeln Abb. 141).

Alle Formationen auf der Venus tragen weibliche Namen, mit Ausnahme von Alpha Regio und Beta Regio – den ab 1963 von der Erde aus zuerst entdeckten Strukturen – sowie der Maxwell Montes. Letztere erhielten als die höchste Erhebung des Planeten ihren Namen zu Ehren von James Clerk Maxwell, der mit seinen Gleichungen der elektromagnetischen Wellen unter anderem auch eine Grundlage für die Radarerkundung der Venusoberfläche geschaffen hat.

Alle aktuellen Darstellungen des Reliefs basieren hauptsächlich auf den Radarmessungen mithilfe des Venus-Orbiters Magellan der NASA und geben somit Einzelheiten bis etwa 100 Meter Breite zu erkennen.

Hochländer – Die Hochlagen verteilen sich im Wesentlichen auf zwei kontinentartige Strukturen. Die umfangreichere von beiden, *Aphrodite Terra*, ist etwa so groß wie Südamerika und erstreckt sich in der Form eines Skorpions längs über etwa ein Drittel des Äquators. In seinem westlichen Teil hebt sich das Plateau Ovda Regio hervor, im nördlichen Zentrum Thetis Regio und im Osten Atla Regio. Das Land der Aphrodite ist Bestandteil des äquatorialen Hochlandgürtels, der sich mit einzelnen größeren Inseln bis etwa 45° nördlicher und südlicher Breite ausdehnt. Ein

ganzes Stück nordwestlich von Aphrodite, zwischen dem 45. und dem 80. Breitengrad, liegt *Ishtar Terra*. Das Ishtar-Land ist nur ungefähr so groß wie Australien, doch auf ihm befinden sich die Maxwell-Berge, mit einer Gipfelhöhe von bis etwa 10.800 Meter. Der Mount Everest braucht sich aber mit seiner Höhe von 8.850 Metern über dem Meeresspiegel nicht hinter dem Maxwell-Gebirge zu verstecken, denn, wenn man die Größe des Himalaya auf analoge Weise an dem mittleren Krustenniveau der Erde misst, erreicht die höchste Erhebung der Erde sogar eine Höhe von etwa 11.280 Metern. Den Kern von Ishtar bildet im Westteil die auf der Venus einzigartige, relativ flache Hochebene Lakshmi Planum mit den zwei großen vulkanischen Einsenkungen Colette Patera und Sacajawea Patera. Die Hochebene liegt etwa vier Kilometer über dem Durchschnittsniveau und wird von den höchsten Kettengebirgen des Planeten begrenzt. Im Süden von den Danu Montes, im Westen von den höheren Akna Montes, im Nordwesten von den mit 6,5 km noch höheren Freyja Montes und schließlich im Osten von den Maxwell Montes. In den Maxwell-Bergen liegt der Einschlagkrater Cleopatra, mit einem Durchmesser von 104 km die achtgrößte Impaktstruktur auf der Venus. Aufgrund dieser Lage dachte man beim Anblick der ersten, noch unscharfen Radarbilder, dass es sich um einen Vulkankrater handelt. Auf vielen Bergzügen wurden radarhelle »Schneekappen« festgestellt, die in Anbetracht der dort herrschenden Bedingungen sehr wahrscheinlich aus einer dünnen Niederschlagsschicht der Schwermetallsalze Bleisulfid und Bismutsulfid bestehen. Der Ostteil von Ishtar, mit dem Namen Fortuna Tessera, ist ein hügeliges, tessera-artiges Plateau mit einer Höhe von bis etwa 2,5 km über Normal-Null.

Die Hochlagen der *Tesserae* (griech., soviel wie »Mosaik«) gehören zu den Sonderformen des Venusreliefs. Sie bestehen aus parkettmusterartig gebrochenen Blöcken mit jeweils bis über 20 Kilometer Breite, die anscheinend durch tektonische Spannungen deformiert worden sind. Diese mitunter auch »Würfelländer« genannten Hochlagen nehmen große Teile im Westen und Norden von Aphrodite sowie im Norden und vor allem im Osten von Ishtar ein. Daneben ragen sie auch als Inseln aus den Tiefländern empor, wie die drei größeren Einheiten Alpha Regio, mit einem Durchmesser von etwa 1.300 Kilometern, sowie Phoebe Regio und Tellus Tessera, die alle zum äquatorialen Hochlandgürtel zählen.

Dicht am westlichen Südrand der Alpha-Region (siehe Bild) liegt Eve Corona. Die im Durchmesser etwa 330 Kilometer große Struktur wurde ursprünglich für einen Einschlagkrater gehalten. Ihr heller zentraler Fleck diente als Bezugspunkt für die Festlegung des Null-Meridians.

Einschlagkrater – Die Anzahl der ➔Einschlagkrater auf der Venusoberfläche beträgt gerade einmal 963 Exemplare. Das sind etwa so viel wie auf der Landfläche der Erde. Wegen der sehr dichten Atmosphäre wurde auf der Venus eine noch weit geringere Zahl angenommen. Ihre Durchmesser liegen in dem Bereich zwischen 1 und 300 Kilometer. In dieser Größe gibt es dagegen allein auf der vierundzwanzig Mal kleineren Vorderseite des ➔Mondes, trotz der großen, von Lava weitgehend geglätteten Marebecken, rund hundert Mal so viele. Würde die Kraterhäufigkeit auf dem Mond jener der Venus entsprechen, so hätte er insgesamt nur 80 Exemplare zu bieten.

Die Venuskrater sind für ihre geringe Anzahl erstaunlich gleichmäßig über die Oberfläche verteilt. Da nur größere ➔Meteoroiden die sehr dichte Atmosphäre durchdringen und auch solche Einschlagstrukturen erzeugen können, gibt es keine Kraterdurchmesser unter 1,5 km, sondern an Stelle dessen nur so etwas wie »Schmauchspuren«. Kleinere Krater sind oft von einem radardunklen, also glatten, Terrain umgeben, das wahrscheinlich auf die Druckwelle des Einschlags zurückzuführen ist; in manchen solcher kreisförmigen Flächen ist jedoch kein Zentralkrater zu erkennen. Der mit Abstand größte Venuskrater Mead hat einen Durchmesser von etwa 280 Kilometer. Ihm folgen in dem Größenbereich von über 100 Kilometer sieben weitere Exemplare. Das Fehlen von Kratern mit größeren Ausmaßen, wie auf dem Mond, dem Mars und auch auf dem ➔Merkur, wo sie in den jeweils markantesten Fällen sogar Durchmesser bis weit über 1.000 beziehungsweise 2.000 Kilometer erreichen, wird ebenso mit der hohen Atmosphärendichte erklärt. Das Relief aller Einschlagkrater auf der Venus ist sehr flach.

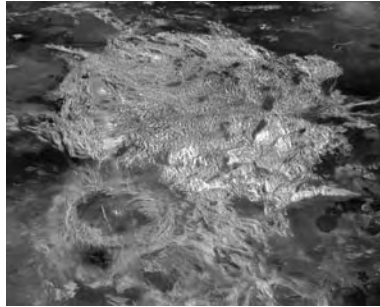


Abb. 25: Alpha Regio

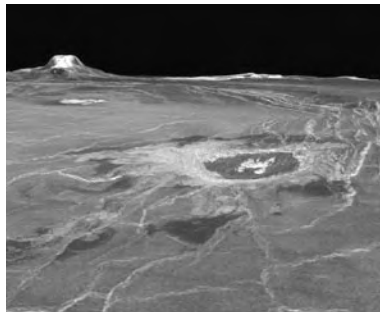


Abb. 26: Das computergenerierte Bild des Orbiters Magellan zeigt zwanzigfach überhöht eine perspektivische Sicht auf den 48,5 km großen Krater Cunitz. Links im Hintergrund ist der Schildvulkan Gula Mons zu sehen.

Etwa 85 Prozent der Venusoberfläche bestehen aus deutlichen Spuren einer flächendeckenden Magmaförderung. Die meisten Krater sind davon aber nicht in Mitleidenschaft gezogen worden, sie sind demnach erst später entstanden. Das hat hinsichtlich ihrer spärlichen und sehr gleichmäßigen Verteilung im Vergleich mit der Mondoberfläche zu dem Schluss geführt, dass die derzeitige Oberfläche der Venus erst etwa 500 bis 800 Millionen Jahre alt und aus umfassenden sowie relativ raschen Lavafluten hervorgegangen ist, die das alte Relief überdeckt haben. Diese Auffassung gipfelt in der Erklärung der amerikanischen Wissenschaftler Gerald G. Schaber und Robert G. Strom, dass die vulkanische Wärmefreisetzung der Venus nicht kontinuierlich wie auf der Erde abläuft, sondern in großen periodischen Schüben erfolgt. Das würde bedeuten, dass die Lithosphäre der Venus wesentlich dicker ist als die der Erde und dadurch einen relativ ungehinderten Wärmestrom nicht zulässt, sondern über längere Zeit aufstaut, bis er sich mit aller Gewalt in Form von starken tektonischen Aktivitäten und einem heftigen Vulkanismus global Bahn bricht.

Coronae und Arachnoiden – Als besonderes Zeichen dieses Umbruchs werden die einzigartigen Coronae (lat., »Kronen«) und Arachnoiden (lat., »Spinnen«) angesehen. Es sind die charakteristischsten Gebilde auf der Venus. Sie befinden sich zu Hunderten in den Tiefenbenen, häufen sich in der Äquatorialzone und prägen dort auch große Teile des Landes der Aphrodite. Aufgrund ihres Äußeren, das am ehesten den Eindruck von eingesunkenen und deformierten Vulkanen erweckt, werden sie mitunter als Einbruchkrater bezeichnet. Einer anderen Erklärung zufolge kann es sich auch um Einschlagstrukturen handeln. Die kreisförmigen und ovalen Gebilde beinhalten ein flaches, unter dem Umgebungsniveau liegendes, welliges Becken mit einem niedrigen, breiten und leicht gewölbten Rand, der von einem breiten Graben mit konzentrischen Brüchen und Gebirgskämmen umgeben ist.

Die kleinsten Durchmesser betragen etwa 40 Kilometer. Den mit Abstand größten Durchmesser von etwa 2.600 Kilometer besitzt Artemis Corona mit dem ringförmigen Grabensystem Artemis Chasma. Das Riesengebirge liegt im Land der Aphrodite, im Süden des Zentralbereichs. In den meisten Fällen misst die Spannweite zwischen 100 und 400 km. Die Arachnoiden sind zumeist etwas kleiner als die Coronae und sind zusätzlich von radialen Rissen durchzogen, deren Muster an eine langbeinige Spinne in ihrem Netz erinnert.

Manche Geologen vermuten in den Arachnoiden eine Vorstufe in dem unterbrochenen Entwicklungsweg zur Corona. Die Ursache dieser Gebilde sind nach der verbreitetsten Ansicht nicht vollständig aufgestiegene Mantelplumes. Ähnlich wie Blasen sind demnach große Portionen von Mantelschmelze zur Oberfläche aufgestiegen, die jedoch bereits abkühlten, als sie die Kruste

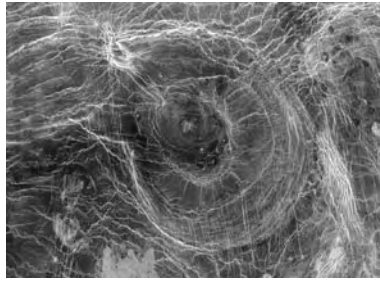


Abb. 27: Arachnoid auf einer Radaraufnahme der Venus

gerade angehoben und aufgebrochen hatten. Aufgrund der abkühlungsbedingten Kontraktion ist die angebrochene Kruste nachgesackt und es konnte kein richtiger Schildvulkan aufgebaut werden. In Hinsicht der Plumes und als Unterscheidung gegenüber der Plattentektonik der Erde wird dieser globaltektonische Prozess als Tropfentektonik bezeichnet.

Vulkanbauten – Vulkane kommen auf der Venus mindestens so zahlreich vor wie auf der Erde. Es gibt ganze Felder von Schildvulkanen und Felder mit Hunderten kleiner Vulkankuppen und -kegeln. Die Zahl der kleinen vulkanischen Erhebungen geht weit über 50.000 hinaus. Vulkane mit einer mindestens 100 Kilometer durchmessenden Basis gibt nicht weniger als 167 Exemplare.

Zu den prominentesten Lavabergen zählen die Schildvulkane Sif Mons und Gula Mons in Eistla Regio mit Höhen von 2 beziehungsweise 3 km und Basisdurchmessern von 300 beziehungsweise 250 km. Ebenso in Beta Regio der Rhea Mons mit einer Gipfelhöhe von 4,5 km sowie der gleich hohe Theia Mons mit einem sagenhaften Basisdurchmesser von 700 km; das sind sogar rund 100 km mehr, als die Basis des Olympus Mons auf dem Mars misst, dem mit einer Basishöhe von etwa 27 km höchsten Berg im bekannten Sonnensystem. Die höchsten Vulkane der Venus gibt es in Atla Regio, dem östlichsten Abschnitt von Aphrodite Terra. Dort befindet sich außer dem zweigipfligen Sapas Mons (4,5 beziehungsweise 400 km) auch der Ozza Mons (6 beziehungsweise 300 km) und schließlich der Maat Mons, der mit über 8 km Höhe höchste Vulkan der Venus, und nach den Maxwell-Bergen ihre zweitgrößte Erhebung, mit einem Basisdurchmesser von lediglich 200 km (Abb. 27). Die Riesenvulkane der Venus sind alle Bestandteil des äquatorialen Hochlandgürtels. In der Regel sind sie um so größer, je näher sie sich am Äquator befinden. Der Maat Mons liegt fast

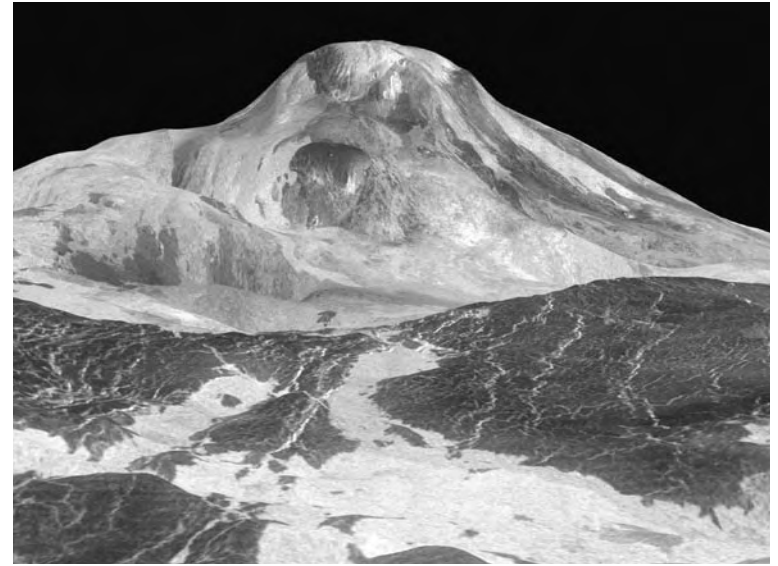


Abb. 28: Mit seinen 8 km Höhe ist Maat Mons der höchste Vulkan der Venus

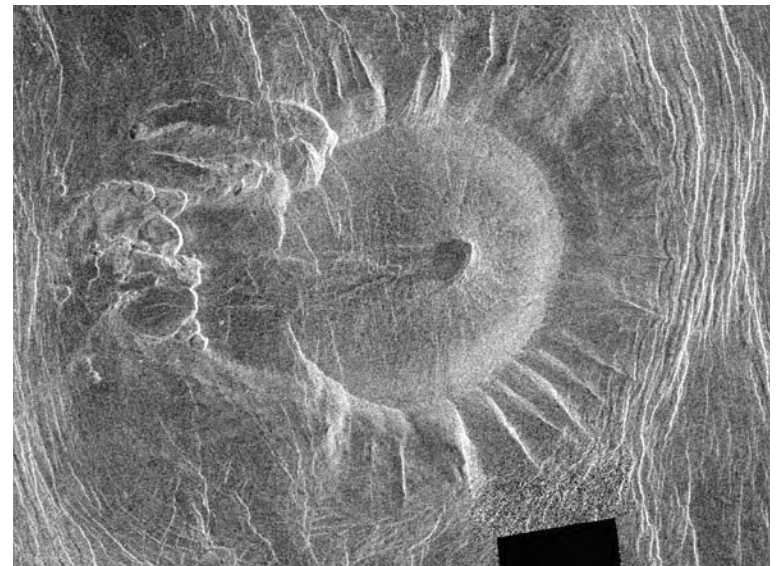


Abb. 29: Venusvulkan vom Typ »Zecke«

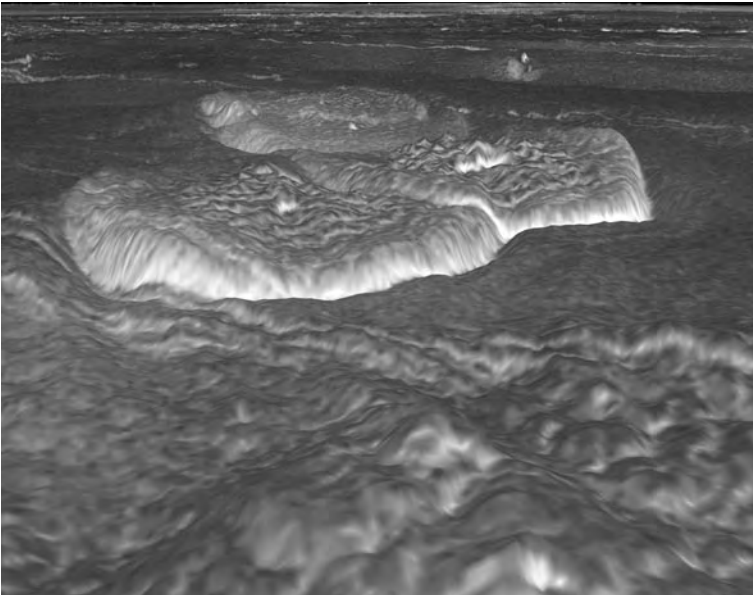


Abb. 30: Die östlichen Exemplare der sieben »Pfannkuchen« Seoritsu Farra, in computergenerierter 3D-Perspektive mit dreiundzwanzigfach überhöhter Höhendarstellung

genau darauf. Im Allgemeinen haben auf der Venus auch die Vulkane ein eher flaches Relief. Die Hangneigungen betragen zumeist nur ein bis zwei Grad.

Eine spezielle Vulkanform hat aufgrund einer gewissen Ähnlichkeit den Spitznamen »Tick« (engl., »Zecke«) bekommen (Abb. 28). Ähnliche Vulkane gibt es auf dem Meeresboden der Erde.

Zu den einmaligen vulkanischen Oberflächenstrukturen der Venus zählen sehr regelmäßig aufgebaute, kreisrunde *Quellkuppen*, die wegen ihres Erscheinungsbildes scherzhaft *pancake domes* (»Pfannkuchenkuppeln«) genannt werden. Sie haben einen typischen Durchmesser von zumeist etwa 25 Kilometern und eine Höhe um 700 Meter, die aber auch bis über ein Kilometer betragen kann. Sie treten auch in Gruppen auf und überlappen sich dann oft. Ihre Oberfläche wird neben einer zentralen Öffnung von konzentrischen und radialen Rissen geprägt. Offenbar sind die Gebilde durch eine Lava mit sehr hoher Zähigkeit entstanden. Es wird gerätselt, wie die Lava derart gleichmäßig über die Ebenen quellen konnte. Viskose Lava häuft sich auch auf der Erde zu Kuppeln, aber die sind sehr viel kleiner und nicht derart symmetrisch.

Lavaflüsse – Vulkanische Ebenen mit großen Lavaüberflutungen sind auf der Venus der häufigste Geländetyp. Andere vulkanische Strukturen deuten auf Ströme von sehr dünnflüssiger Lava hin. Neben Tausenden von Kilometern langen, erstarrten Lavaströmen, den *Fluctus*, gibt es sehr bemerkenswerte Erosionstäler. Manche gehen als breite Ausflussformation von großen Einschlagkratern aus. Sie erreichen eine Länge von bis zu 150 Kilometer, weisen auf ihrem Boden inselartige Strukturen auf und verlieren sich ohne weitere Spuren in den Ebenen. Ihre bis über 100 Meter hohen Wände sind von geschwungener Form, daher haben diese Formationen die spezielle Gattungsbezeichnung *Unda* (lat., »Welle«) bekommen. Wohl am phänomenalsten sind die sehr langen und deutlich gewundenen Rinnen. Sie sind zumeist nur etwa 1,5 km breit und ebenfalls nicht sehr tief. Die beeindruckendste Rinne hat eine Länge von etwa 6.800 km und übertrifft damit um über 100 km sogar den Nil, den längsten Strom der Erde. Das Gebilde mit dem Namen *Hilidr Fossa* schlängelt sich von Atla Regio bis in die große nördliche Tiefebene Atalanta Planitia, in der mit einer Tiefe von bis zu 1.400 m unter Normal-Null der tiefste Punkt auf der Venus gemessen wurde. Die kreisförmige Senke ist ungefähr so groß wie der Golf von Mexiko. Aufgrund der extrem hohen Oberflächentemperatur kommt flüssiges Wasser als Ursache der »Kanäle« nicht in Frage. Auf der Erde ziehen sich die längsten Lavarinnen allerdings nur einige Dutzend Kilometer hin. Möglicherweise waren es enorm dünnflüssige, salzreiche Lavamassen mit entsprechend niedrigerem Schmelzpunkt, welche zu einer Zeit mit planetenweit noch größerer Oberflächentemperatur die Landschaft derart ausgeformt haben. Es werden auch pyroklastische Ströme aus heißem Gas und Staub in Betracht gezogen.

Es ist eines der großen Rätsel der Venus, dass sie trotz der Vielzahl und der Vielfalt vulkanischer Strukturen heute geologisch tot zu sein scheint. Allerdings würde man während nur einer einzigen näheren Globalerkundung der vulkanisch ständig aktiven Erde auch nicht zwangsläufig in jedem Fall Zeuge eines gerade ablaufenden Vulkanausbruchs werden. Festgestellte Variationen des Anteils von Schwefeldioxid in der Venusatmosphäre und der Dichteverteilung in der oberen Dunstschicht deuten tatsächlich auf mögliche Aktivitäten hin. Auch die Anzeichen von Blitzen könnten davon zeugen. In konkretem Verdacht stehen vor allem die zwei großen Schildvulkane in Beta Regio und der Maat Mons. Teile der Vulkanflanken sind radardunkel, das heißt, sie reflektieren die abtastenden Radarstrahlen nur sehr gering und sind also ziemlich glatt. Diese Ebenheiten lassen sich in dem Fall als ein Zeichen für frische Lavaströme

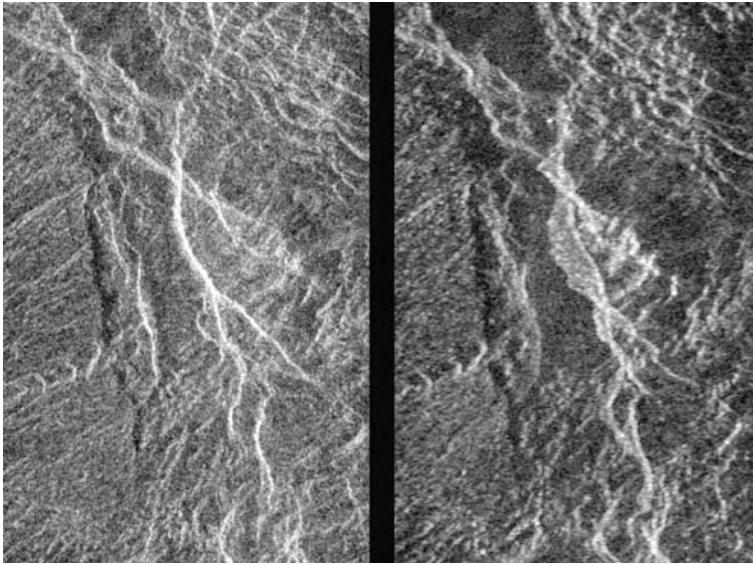


Abb. 31: Ein Erdbeben auf der Venus: Davor (links) und acht Monate später

ansehen. Direkte Beweise für einen derzeit aktiven Vulkanismus wurden bislang jedoch noch nicht gefunden. Die einzige wirkliche Veränderung der Oberfläche ist in einem anderen Teil von Aphrodite Terra registriert worden, am Westrand der Ovda-Region, und sieht aus wie eine breite Hangrutschung (siehe Abb. 43). Nachuntersuchungen der Bilder lassen jedoch vermuten, dass es doch nur ein durch Überlagerungseffekte des Radarsystems hervorgerufener Bildfehler ist.

Gräben – Der beeindruckendste Graben auf der Venus ist Diana Chasma. Das relativ steilwandige Tal befindet sich auf Aphrodite Terra, markanterweise in der Nachbarschaft von Artemis Corona, der mit Abstand größten Corona, und bildet zum Teil den südlichen Abschnitt des Randgrabens der großen elliptischen Ceres Corona. Es ist etwa 280 Kilometer breit und fällt am Fuß der höchsten es einfassenden Bergrücken rund vier Kilometer tief auf ein Niveau von mehr als ein Kilometer unter Normal-Null ab. Die canyonartige Struktur hat auf der Erde kein vergleichbares Beispiel und wird oft mit dem Mariner-Talsystem auf dem Mars verglichen. Vermutlich ist sie wie dieses durch tektonische Aktivitäten entstanden. Beide Gräben erstrecken sich fast parallel zum jeweiligen Äquator.

In der Beta Regio sind die Vulkane Rhea Mons und Theia Mons durch den offensichtlich tektonischen Graben Devana Chasma miteinander verbunden.

Windstrukturen – Trotz der nur geringen Windgeschwindigkeiten, die am Boden gemessen wurden, zeigen einige Regionen radarhelle streifen- und fächerförmige Strukturen in der Art von »Windfahnen«, die von einzelnen Kratern und Vulkankegeln ausgehen. Ihr Verlauf zeigt die während ihrer Bildung vorherrschende Windrichtung. Die meisten Windstreifen bevorzugen eine den globalen atmosphärischen Strömungen in Bodennähe entsprechende westliche und äquatoriale Richtung. Es ist dabei jedoch nicht immer klar, ob die hell erscheinenden Streifen direkt aus dem verwehten Material bestehen oder aber Lockermaterial ringsum abgetragen wurde und nur im Windschatten liegen geblieben ist.



Abb. 32: Ein rund 5 km breiter Vulkan mit 35 km langen Windstreifen

Innerer Aufbau – Unterhalb der Lithosphäre ähnelt das Innere der Venus wahrscheinlich dem der Erde. Da sie fast die gleiche Masse und eine ähnliche mittlere Dichte hat ($5,24 \text{ g/cm}^3$ im Vergleich zu $5,52 \text{ g/cm}^3$ im Falle der Erde) und der Kosmogonie gemäß im gleichen Bereich des Sonnensystems entstanden ist, sollte sie auch einen analogen Schalenbau aufweisen. Dass die Erde eine etwas größere mittlere Dichte hat, ist nicht nur auf ihre chemische Zusammensetzung zurückzuführen, sondern zum Teil eine rein physikalische Auswirkung ihrer größeren Masse, die durch die entsprechend größere Schwerkraft eine stärkere Eigenkompression bedingt. Die Venus besitzt – im

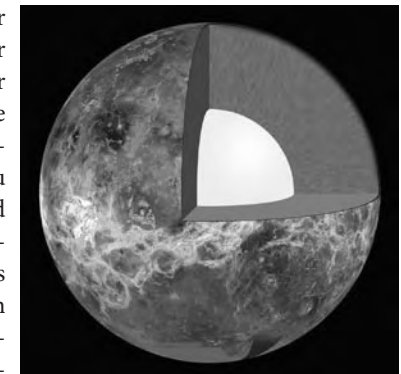


Abb. 33: Schnitt durch den Mantel der Venus

Gegensatz zum viel kleineren →Merkur – einen größeren Anteil an leichteren Elementen als die Erde, sie hätte also selbst bei gleicher Größe wie die Erde noch eine geringere Masse. Das ist für einen Planeten innerhalb der Erdbahn nicht recht verständlich, denn gemäß der herkömmlichen Theorie zur Entstehung des Sonnensystems müsste das Verhältnis zwischen den leichten und den schweren Elementen der Venus zwischen den Verhältnissen der Erde und des Merkur liegen, da vor allem die leichteren Elemente durch den besonders stürmischen Teilchenstrom der jungen, sich herausbildenden Sonne in die Außenbereiche getrieben wurden. Unter der Vorgabe des klassischen Schalenaufbaus der Erde kann man also statt auf einen verhältnismäßig größeren nur auf einen relativ kleineren Eisen-Nickel-Kern und dafür auf einen etwas größeren Mantel schließen. Besonders der obere Mantel wird verhältnismäßig dicker erwartet. Auch die Lithosphäre könnte, wie durch Gravitationsfeld-Messungen der Venussonde Magellan nahe gelegt wurde, wesentlich dicker als die der Erde sein. Auf dieser Überlegung beruht auch die Erklärung dafür, dass es auf der Venus keine →Plattentektonik wie auf der Erde gibt, sowie die Hypothese, dass sich die Venusoberfläche statt dessen in einem langperiodischen Rhythmus durch massive globale Vulkanaktivitäten erneuert.

Obwohl die Venus einen ähnlich großen Nickel-Eisen-Kern wie die Erde haben sollte, hat sie kein inneres Magnetfeld. Das ist auf ihre extrem langsame Rotation zurückzuführen, die nicht ausreicht, um durch den Dynamo-Effekt ein solches zu erzeugen. Das an der Venusoberfläche gemessene Magnetfeld ist äußerst schwach. Es wird durch elektrische Ströme in der Ionosphäre induziert, die dort durch die Wechselwirkung mit den elektrisch geladenen Teilchen des Sonnenwindes hervorgerufen werden. In dieser Magnetosphäre gibt es keine Gürtel von eingefangenen Sonnenpartikeln gleich denen der Van-Allen-Gürtel der Erde und der Strahlungsgürtel des →Jupiter, →Saturn und →Uranus. Das Venusmagnetfeld erreicht am Boden nur ein Zehntausendstel der Stärke, die das Erdmagnetfeld an der Erdoberfläche hat. Die Oberfläche der Venus wird vor den heranrasenden Teilchen des Sonnenwindes nicht vom Magnetfeld geschützt, wie die Erdoberfläche, sondern durch die vom Teilchenstrom selbst mitinduzierte Ionosphäre sowie durch die dichte Atmosphäre.

Himmelsmechanik

Umlaufbahn und Resonanzen – Der mittlere Abstand des Planetenzentrums vom gemeinsamen Schwerpunkt des Sonnensystems, seinem Baryzentrum, wird als große Bahnhalbachse bezeichnet und beträgt bei der

Venus 108.209.077 Kilometer. Etwas anschaulicher ausgedrückt sind das etwa 72,3 Prozent des mittleren Erdbahnradius, also 0,723 AE. Ihr sonnennächster Punkt, das Perihel, liegt bei 0,718 AE und ihr sonnenfernster Punkt, das Aphel, bei 0,728 AE. Daraus resultiert ein mittlerer Bahnabstand von rund 41 Millionen Kilometern, so dass die Venus und die Erde die zueinander nächsten Planetennachbarn im Sonnensystem sind. Die Umlaufbahn der Venus ist $3,39471^\circ$ gegen die Ekliptik geneigt. Die siderische Umlaufperiode der Venus – die Dauer eines Venusjahres – beträgt 224 Tage 16 Stunden und 50 Minuten.

Zusammen mit der Bahnperiode der Erde von 365,256 Tagen ergibt sich als Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden größten Annäherungen eine Periode von 583,924 Tagen, die auch als gegenseitige Bahnstörungsperiode aufgefasst werden kann. Von der Erde aus gesehen ist das die synodische Umlaufperiode der Venus. Die Umlaufzeiten von Venus und Erde befinden sich zueinander in der *Kommensurabilität* 8:13 (genau 8:13,004); das heißt, sie stehen in einem Verhältnis, das auf einem gemeinsamen Maß beruht und sich dementsprechend fast exakt durch kleine ganze Zahlen ausdrücken lässt. Aus der Differenz der beiden Zahlen ($13 - 8 = 5$) kann man in dem Fall eines übereinstimmenden Drehsinns ablesen, dass sich die größten Annäherungen im Idealfall von genau kreisförmigen Bahnen auf jeweils fünf verschiedene Bahnpunkte exakt gleichmäßig verteilen würden. Eventuell ist das auch mit ein Grund für die sehr geringe Exzentrizität der Venusbahn. Kommensurabilitäten führen durch den Resonanzeffekt zu starken Bahnstörungen, die um so ausgeprägter sind, je genauer das Verhältnis der Zahlen erreicht wird und desto kleiner die Differenz zwischen ihnen ist. Das bekannteste Beispiel ist der Einfluss des Jupiter auf die Verteilung der Planetoiden, der durch solche Resonanzeffekte innerhalb des →Planetoidengürtels zu Kommensurabilitätslücken (Kirkwoodlücken) sowie auch -häufungen führt. Ähnliche Auswirkungen haben auch die Umlaufbewegungen unter den Monden des →Saturn auf die Struktur seines Ringsystems. Alle jeweils benachbarten Planeten und regulären Monde bewegen sich in kommensurablen Umlaufverhältnissen und unterstreichen damit die gewisse Regelmäßigkeit der Bahnabstände im Sonnensystem.

Der mittlere Bahnabstand zum Merkur, dem zweitkleinsten Planeten und inneren Bahnnachbarn der Venus, beträgt rund 50,3 Millionen Kilometer (0,336 AE). Das ist nur etwas weniger als dessen große Bahnhalbachse (0,387 AE). Die mittlere Bahnstörungsperiode zwischen der Venus und dem Merkur beträgt 144,565 Tage. Ihre Umlaufzeiten haben das

kommensurable Verhältnis 5:2 (genau 5:1,957). Im Idealfall würden sich die größten Annäherungen also auf jeweils drei Bahnpunkte gleichmäßig verteilen, doch die Umlaufbahn des Merkur ist fast so exzentrisch wie die des noch kleineren und äußersten Planeten Pluto.

Die Umlaufbahn der Venus hat unter allen Planetenbahnen die geringste Exzentrizität. Die *numerische Exzentrizität* beträgt nur 0,0068; das heißt, der größte und der kleinste Abstand vom Baryzentrum weichen lediglich um 0,68 Prozent von dem Radius der mittleren Kreisbahn ab. Die Planetenbahn der Venus ist mit dieser Abweichungen von unter einem Prozent also am kreisförmigsten. Noch geringere Abweichungen von der Kreisform haben im Sonnensystem nur die Umlaufbahnen mancher Monde. Dafür ist die Neigung der Venusbahn gegen die Bahnebene der Erde nach der von ➔Pluto (17,15°) und ➔Merkur (7,0°) mit am größten, wenn auch mit etwa 3,4° deutlich mäßiger als die Inklination dieser zwei kleinsten Planeten, die das Planetensystem der Sonne gewissermaßen einrahmen.

Rotation und Resonanzen – Die Rotation der Venus ist im Gegensatz zum üblichen Drehsinn der Eigendrehung und der Umlaufbewegung der Planeten und der meisten Monde rückläufig, das heißt, auf ihr geht die Sonne im Westen auf und im Osten unter. Die Neigung der Rotationsachse wird daher nicht mit 2,64°, sondern mit 177,36° angegeben, so als wäre die Achse bei ursprünglich progradem Drehsinn auf den Kopf gekippt worden. Die einzigen weiteren Planeten mit retrogradem Rotationsinn sind der ➔Uranus und der ➔Pluto. Die Eigendrehung der Venus ist zudem außergewöhnlich langsam: Eine siderische Rotationsperiode (das heißt relativ zu den Fixsternen) dauert 243,019 Tage und damit sogar 8 Prozent länger als die Umlaufperiode. Durch den rückläufigen Drehsinn dauert die auf die Sonne bezogene Rotationsperiode – also ein Venustag – jedoch »nur« 116,751 Erdtage; im anderen Fall würde das Verhältnis zwischen der Rotations- und der Umlaufgeschwindigkeit fast eine gebundene Rotation bedeuten, wie im vollendeten Beispiel des Mondes, welcher dadurch der Erde ständig dieselbe Seite zuwendet. Der Venus wäre damit gegenüber der Sonne ein ähnliches Schicksal beschieden.

Die Ursache des retrograden Drehsinns und der besonders langsamen Geschwindigkeit der Venusrotation ist nicht bekannt. Einer Hypothese zufolge könnte es das Resultat einer Kollision mit einem großen ➔Asteroiden sein. Die siderische Rotationsperiode erscheint allerdings nicht voll-

kommen willkürlich, denn sie steht eigenartigerweise in einem fast exakten 2:3-Verhältnis zur Bahnperiode der Erde ($365,256:243,019 = 2:3,006$). Die synodische Rotationsperiode der Venus (das heißt relativ zur Erde) beträgt im Mittel 145,928 Tage. Genauer gesagt ist das die Periode, mit der ein Venusmeridian parallel zur heliozentrischen Länge der Erde liegt. Eine direkte Ausrichtung zur Erde ist nur zur oberen beziehungsweise unteren Konjunktion gegeben, wenn sich die Venus von der Erde aus gesehen in einer Linie hinter beziehungsweise vor der Sonne befindet. Da es sich in dem 2:3-Verhältnis um zwei zueinander entgegengesetzte Drehsinne handelt, gilt für die räumliche Verteilung dieser Periodizität nicht die Differenz, sondern die Summe der Verhältniszahlen. Das entspricht während fast genau zwei Jahren wiederum einer pentagrammatischen Verteilung auf fünf gleichmäßig verteilte Bahnpositionen der Erde (5:1,998).

Die zweijährige Gesamtperiode des Zusammenspiels der Venusrotation mit der Erdbewegung steht mit 729,64 Tagen in einem Verhältnis 4:5 (4:4,998) zur synodischen Umlaufperiode der Venus. Das synodische Venusjahr umfasst mit 583,924 Tagen vier mittlere synodische Rotationen (1:4,001). Ein Beobachter auf der Venus würde – bei unbeeinträchtigter Sicht – die Erde alle 146 Erdtage beziehungsweise alle 1,25 Venustage an der gleichen Position finden. Die Venus wendet der Erde zum Beispiel bei jeder oberen und jeder unteren Konjunktion, sowie, von der Sonne aus gesehen, bei jeder 90°-Stellung (nach Osten beziehungsweise nach Westen) praktisch immer ein und dieselbe Seite zu, – die Seite des Null-Meridians. Von diesem Standort aus würde die Erde alle 146 Tage abwechselnd zur Mittagszeit, gegen Sonnenuntergang, um Mitternacht und gegen Sonnenaufgang ihren Höchststand haben. Das markante Beispiel der Erdausrichtung der Hemisphäre des Null-Meridians bezieht sich auf die gleichen räumlichen Erdpositionen wie die alleinige Folge der unteren Konjunktionen, nur mit der schnelleren Periode und in der umgekehrten Reihenfolge des Pentagramm-Musters. Die kleine Abweichung der Venusrotation bedeutet nur eine systematische Verschiebung um jeweils gut einen halben Längengrad in Richtung Osten.

Während acht Umlaufperioden der Erde beziehungsweise dreizehn Umlaufperioden der Venus mit fünf Konjunktionsperioden zueinander rotiert die Venus, ebenfalls fast auf den Tag genau, zwölfmal relativ zu den Sternen, zwanzigmal relativ zur Erde und fünfundzwanzigmal relativ zur Sonne. Es liegt die Vermutung nahe, dass es sich insgesamt um ein Resonanz-Phänomen handelt.

Monde – Die Venus hat keine Monde. Trotzdem behauptete der italienische Astronom Giovanni Domenico Cassini im Jahr 1672, einen solchen entdeckt zu haben, und nannte ihn Neith. Bis 1892 war der Glaube an einen Venusmond verbreitet, bevor sich herausstellte, dass anscheinend Sterne irrtümlich für einen Mond gehalten worden waren.

Es gibt eine Hypothese, nach der es sich bei dem äußerlich sehr erdmondähnlichen \rightarrow Mercur um einen entwichenen Trabanten der Venus handelt. Damit kann unter anderem erklärt werden, warum die beiden inneren Planeten als einzige keinen Begleiter haben.

Erforschung

Aufgrund der dichten, stets geschlossenen Wolkendecke war eine Erforschung der Oberfläche des Planeten erst durch radioastronomische Verfahren und mittels Venus-Sonden möglich. Frühe Beobachtungen mit bloßem Auge und mithilfe von Teleskopen konnten nur die Geometrie der Umlaufbahn und die Wolkenoberfläche untersuchen.

Erdgebundene Erforschung – Bei den ersten Beobachtungen der Venus mit Teleskopen durch Galileo Galilei und Zeitgenossen im Jahre 1610 zeigte sich unmittelbar, dass die Venus wie der Mond Phasen zeigt. Diese Beobachtung, die heute leicht durch die Tatsache, dass Venus ein innerer Planet ist, erklärt werden kann, war zur damaligen

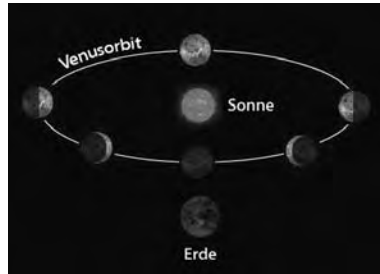


Abb. 34: Die Phasen der Venus

Zeit einer der großen Beweise, dass die Venus die Sonne und nicht die Erde umkreist. Die Phasen der Venus wurden von Nikolaus Kopernikus als möglicher Beweis seiner heliozentrischen Lehre vorhergesagt. Damit unterstützte die Beobachtung die kopernikanische Theorie, obwohl hinzugefügt werden muss, dass schon Herakleides Pontikos, ein Schüler Aristoteles', die Vermutung geäußert hatte, dass Merkur und Venus die Sonne umkreisen. Selbst im Ptolemäischen Modell und auch im Planetenmodell von Tycho Brahe lassen sich die Phasen dieser beiden Planeten erklären, so dass die Beobachtungen keinen zweifelsfreien Beweis des kopernikanischen Modells darstellen.

Ende des achtzehnten Jahrhunderts führte der Lilienthaler Astronom Johann Hieronymus Schröter genauere Untersuchungen der Venusphasen

durch. Er stellt fest, dass es zwischen der geometrisch berechneten Phase der Venus und der tatsächlich beobachteten Phase systematische Unterschiede gibt. Zunächst meinte Schröter, dass diese Unregelmäßigkeiten, wie beim Erdmond, auf Oberflächendetails wie Gebirgszüge zurückgehen. In einer 1803 veröffentlichten Arbeit über die Venusphase zum Zeitpunkt der Dichotomie (*Halbvenus*) folgerte er dann allerdings korrekt, dass es sich um Dämmerungseffekte in der Atmosphäre handelt. Daher wird diese Erscheinung heute allgemein nach der von Patrick Moore eingeführten Bezeichnung Schröter-Effekt genannt. Der Effekt ist schon für Amateure mit kleinem Teleskop leicht als »Venushörner« zu beobachten (siehe dazu den unteren Abschnitt »Beobachtung«).

Seit Johannes Kepler die Venustransits von 1631 und 1639 vorhergesagt hatte, waren diese seltenen Ereignisse, bei denen die Venus als dunkles Scheibchen vor der Sonne zu sehen ist, ein besonders beliebtes Forschungsgebiet. Mit Hilfe dieser Beobachtungen konnte insbesondere die Entfernungsskala des Sonnensystems erheblich verbessert werden.

Durch die Erfindung des Radars und der Radioastronomie traten in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts neue Beobachtungsmöglichkeiten hinzu. Mikrowellen-Beobachtungen, welche die Astronomen C. Mayer et al. im Jahre 1956 durchführten, deuteten zum ersten Mal auf eine sehr hohe Oberflächentemperatur der Venus von mindestens 600 Kelvin hin. Die Rotationsdauer der Venus konnte erstmals während der unteren Konjunktion im Jahre 1961 gemessen werden. Dies gelang mit Hilfe eines Radarstrahls der 26-Meter-Antenne in Goldstone, Kalifornien, dem Jodrell-Bank-Radioobservatorium in Großbritannien und dem sowjetischen Radioteleskop in Yevpatoria auf der Krim. Allerdings konnte erst 1964 nachgewiesen werden, dass die Rotation der Venus retrograd erfolgt.

Die Messung der Laufzeit der Radarstrahlen bei diesen Untersuchungen lieferte zudem exakte Werte für den Abstand der Venus von der Erde. Im Zuge dieser Laufzeitmessungen gelang dem Physiker Irwin I. Shapiro 1968 die experimentelle Bestätigung des von ihm im Jahre 1964 vorhergesagten und nach ihm benannten Shapiro-Effekts. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie sollte die Laufzeit eines Radarsignals beim Durchlauf des Gravitationsfeldes der Sonne gegenüber der klassischen Theorie etwas vergrößert sein. Der Effekt sollte bei der oberen Konjunktion der Venus etwa 200 Mikrosekunden ausmachen. Dieser Wert wurde seit den ersten Messungen mit immer größerer Genauigkeit bestätigt.

Die Oberflächenerkundung mittels der erdgebundenen Radarvermessung erfasst durch die indirekt an die Erdbewegung gebundene, reso-

nanzartige Rotation der Venus während der unteren Konjunktion immer nur die Hemisphäre von Alpha Regio, mit Beta Regio im Westen und Ishtar Terra im Norden. Der zentrale Nullmeridian dieser »Vorderseite« verläuft dementsprechend durch Alpha Regio. Im Norden verläuft er über die Maxwell Montes. Das Koordinatensystem der Venus wurde so festgelegt, dass die Längengrade entsprechend der retrograden Rotation von Westen nach Osten, von 0° bis 360° östlicher Länge gezählt werden. Durch die Geringfügigkeit der systematischen Abweichung von einer echten Resonanz mit nur gut einem halben Längengrad in Richtung Osten müssen 347 solcher synodischen Venusjahre vergehen, also 554,7 Erdjahre, bis auch die »Rückseite« der Venus auf diese Weise erfasst ist.

Erforschung durch Raumsonden – Es gab eine Vielzahl von unbemannten Venus-Missionen. Einige schafften eine weiche Landung auf der Oberfläche, erreichten Kommunikationszeiten von bis zu 110 Minuten, blieben jedoch sämtlich ohne Rückkehr (mit Proben).

Der Weg zur Venus – Die Venus umkreist die Sonne näher als die Erde, wobei der Abstand der Venus zur Sonne nur 72 Prozent des Abstands der Erde zur Sonne beträgt. Deshalb muss eine Raumsonde über 41 Millionen Kilometer in das Gravitationspotenzial der Sonne fliegen, was zu einer erheblichen Abnahme der potenziellen Energie der Sonde führt. Die freigewordene potenzielle Energie wird dabei in kinetische Energie umgewandelt. Dies führt zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit der Sonde, so dass die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung der Sonde stark verändert werden müssen, um eine Annäherung an die Venus zu erreichen.

Frühe Vorbeiflüge – Am 12. Februar 1961 startete die Sowjetunion Venera 1, die erste Raumsonde zu einem fremden Planeten. Ein überhitzter Orientierungssensor verursachte eine Funktionsstörung, jedoch kombinierte Venera 1 erstmals alle für einen interplanetaren Flug nötigen Merkmale: Solarpanels, parabolische Kommunikationsantenne, 3-Achsen-Stabilisierung, Triebwerk zur Flugbahnkorrektur und einen Start von einem Parkorbit um die Erde. Die Sonde flog in 100.000 km Entfernung an der Venus vorbei, ohne ihre Beobachtungen ausführen oder mit der Erde kommunizieren zu können.

Die erste erfolgreiche Venus-Raumsonde war die US-amerikanische Mariner 2, eine modifizierte Ranger-Mondsonde, die 1962 an der Venus

vorbeiflog. Sie entdeckte, dass die Venus über kein Magnetfeld verfügt, und maß thermische Mikrowellenstrahlung der Venus.

Die Sowjetunion startete am 2. April 1964 die Zond 1, die jedoch kurz darauf nach einer letzten Kommunikation am 16. Mai verlorenging.

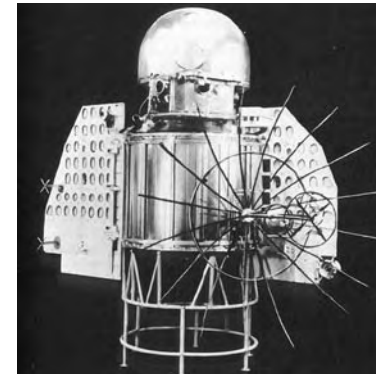


Abb. 35: Venera 1 war die erste Raumsonde, die zur Venus flog

Frühe Landungen und Orbiter – Am 1. März 1966 führte die sowjetische Venera-3-Sonde eine Crashlandung auf der Venus durch, womit sie das erste Raumfahrzeug wurde, das die Oberfläche der Venus erreichte. Die Sonde überlebte die Landung nicht. Ihre Schwestersonde Venera 2 fiel kurz vor dem Vorbeiflug aufgrund einer Überhitzung aus. Die Landekapsel der Venera 4 tauchte am 18. Oktober 1967 in die Venusatmosphäre ein. Sie maß Temperatur, Druck und Dichte, führte zudem elf

automatische chemische Experimente zur Analyse der Atmosphäre durch. Sie wurde damit zur ersten Raumsonde, die direkte Messdaten von einem anderen Planeten lieferte. Die Daten zeigten einen Kohlendioxidanteil von 95% und in Kombination mit den Daten der amerikanischen Mariner-5-Sonde einen weitaus höheren Atmosphärendruck als erwartet: 75–100 Bar.

Diese Daten wurden von den Venera-5- und Venera-6-Missionen am 16. Mai und 17. Mai 1969 bestätigt und verfeinert. Aber bislang erreichte keine dieser Raumsonden intakt die Venusoberfläche. Die Batterie der Venera 4 entleerte sich, noch während die Sonde durch die unerwartet massive Atmosphäre trieb, Venera 5 und 6 wurden von dem hohen Außendruck in einer Höhe von etwa 18 km über dem Boden zerquetscht.

Die erste erfolgreiche Landung gelang der Venera-7-Sonde am 15. Dezember 1970. Sie maß Oberflächentemperaturen von 457 bis 474 °C und einen Außendruck von 90 Bar. Venera 8 landete am 22. Juli 1972. Zusätzlich zu den erhaltenen Druck- und Temperaturprofilen zeigte ein Lichtmesser, dass die Wolken eine Schicht bilden, die 35 km über der Oberfläche endet. Ein Gammastrahlenspektrometer analysierte die chemische Zusammensetzung des Bodengesteins.

Die sowjetische Raumsonde Venera 9, erste Sonde der neuen Generation schwerer Raumsonden, die mit neuen Proton-Raketen gestartet wurden,

schwenkte am 22. Oktober 1975 in einen Venusorbit. Sie wurde damit zu dem ersten künstlichen Satelliten der Venus. Eine Vielzahl von Kameras und Spektrometern lieferte Daten über die Venuswolken, Ionosphäre und Magnetosphäre und führte außerdem erste bistatische Radarmessungen der Venusoberfläche durch.

Die 660 Kilogramm schwere Landekapsel trennte sich von Venera 9 und landete nach rund einer Stunde. Sie lieferte die ersten Bilder der Oberfläche, untersuchte zudem den Boden mit einem Gammastrahlenspektrometer und einem Densitometer. Während des Abstiegs wurden Druck, Temperatur und Lichtverhältnisse gemessen, außerdem wurden mit Backscattering und Multi-Angle Scattering (Nebelmessgerät) Messungen der Wolkendichte durchgeführt. Die Sonde entdeckte, dass die Wolken in drei getrennten Schichten angeordnet sind. Am 25. Oktober traf die Schwestersonde Venera 10 ein und führte ein ähnliches Messprogramm durch.

Pioneer Venus – Im Jahr 1978 entsandte die NASA zwei Pioneer-Raumsonden zur Venus: einen Orbiter und eine Multiprobe-Sonde, die getrennt gestartet wurden. Die Multiprobe-Sonde hatte eine große und drei kleinere Atmosphärensonden an Bord. Die große Sonde wurde am 16. November 1978 freigesetzt, die drei kleineren am 20. November. Alle vier traten am 9. Dezember in die Atmosphäre ein, gefolgt von der Trägersonde selbst. Obwohl die Sonden nicht darauf ausgelegt waren, eine Landung zu überleben, funkte eine von ihnen, nachdem sie die Oberfläche erreichte, 45 Minuten lang Daten zurück.

Der Pioneer Venus Orbiter erreichte am 4. Dezember 1978 einen elliptischen Venusorbit. Er hatte siebzehn Experimente an Bord, sollte die Venus mit Radar kartieren (mit einer Auflösung von etwa 20 Kilometern pro Pixel) und beim Durchfliegen der höchsten Atmosphärenschichten diese analysieren, um ihre Zusammensetzung sowie die Interaktionen der Hochatmosphäre mit dem Sonnenwind zu erforschen. Der Orbiter wurde solange betrieben, bis der zur Lagekorrektur verwendete Treibstoff ausging. Er wurde im August 1992 durch Verglühen in der Atmosphäre zerstört.

Weitere sowjetische Erfolge – Ebenfalls 1978 flogen Venera 11 und Venera 12 an der Venus vorbei und setzten ihre Landekapseln frei, die am 21. Dezember und 25. Dezember in die Atmosphäre eintraten. Die Lander trugen Farbkameras, ein Bodenbohrgerät und einen Analysator, die leider sämtlich nicht funktionierten. Jeder Lander führte Messungen mit einem Nebelmessgerät, einem Massenspektrometer und einem Gas-Chromatographen

durch. Außerdem entdeckte man mit Hilfe von Röntgenstrahlen einen unerwartet hohen Anteil von Chlor in den Wolken, zusätzlich zum bereits bekannten Schwefel. Auch wurde eine starke Blitzaktivität beobachtet.

Venera 13 und Venera 14 führten praktisch die gleiche Mission durch. Sie erreichten die Venus am 1. März und 5. März 1982. Diesmal waren die Bohr/Analyse-Experimente erfolgreich, auch die Farbkameras funktionierten einwandfrei. Eine Röntgenbestrahlung der Bodenproben zeigte Ergebnisse, die bei Venera 13 ähnlich einem kaliumreichen Basalt ausfielen und 900 Kilometer weiter südöstlich, an der Landestelle von Venera 14, den Basalten des irdischen Ozeanbodens glichen.

Am 10. und 11. Oktober traten Venera 15 und Venera 16 in polare Umlaufbahnen um die Venus ein. Venera 15 beobachtete und kartierte die obere Atmosphäre mit einem Infrarot-Fourierspektrometer. Vom 10. November bis zum 10. Juli kartierten beide Satelliten das nördliche Drittel der Planetenoberfläche mit einem Synthetic Aperture Radar. Dabei konnten insgesamt etwa 30 Prozent der Oberfläche mit einer Auflösung von ein bis zwei Kilometern erfasst werden, die erstellten Karten waren damit etwa zehn Mal detailreicher als die von Pioneer Venus 1. Die Ergebnisse erlaubten erste konkretere Vorstellungen von der geologischen Entwicklung der Venus.

Die sowjetischen Raumsonden VeGa 1 und VeGa 2 erreichten die Venus am 11. Juni und 15. Juni 1985. Die Experimente ihrer Landeeinheiten waren auf die Erforschung der Wolkenzusammensetzung und Struktur fokussiert. Jeder Lander trug einen Ultraviolett-Absorption-Spektrometer sowie ein Gerät, um die Größe der Aerosol-Partikel zu messen, außerdem Vorrichtungen zum Sammeln von Atmosphärenproben, die mit Hilfe eines Massenspektrometers, eines Gas-Chromatographs und eines Röntgenspektrometers untersucht wurden. Die zwei oberen Wolkenschichten wurden als aus Schwefelsäure, die untere Schicht als wahrscheinlich aus Phosphorsäure bestehend befunden. Auf der Oberfläche der Venus wurden ein Bohrgerät und ein Gammastrahlenspektrometer eingesetzt. Bilder von der Oberfläche gab es keine – die Lander hatten keine Kameras an Bord. Dies waren zugleich die bisher letzten Landungen auf der Oberfläche der Venus.

Die VeGa Sonden setzten außerdem Ballons in der Atmosphäre der Venus aus, die in einer Höhe von etwa 53 Kilometer jeweils 46 und 60 Stunden lang flogen. Die Ballons legten dabei einen Weg von etwa einem Drittel des Umfangs der Venus zurück. Sie maßen dabei Windgeschwindigkeit, Temperatur, Druck und Wolkendichte. Mehr Sturm- und Strömungsaktivität als erwartet wurde entdeckt, einschließlich plötzlicher Flughöhewechsel

um ein bis drei Kilometer. Die VeGa-Muttersonden flogen weiter zum ➔Halley'schen Kometen, den sie neun Monate später erreichten.

Magellan – Am 10. August 1990 erreichte mit Magellan nach Pioneer Venus die nächste US-amerikanische Raumsonde eine Umlaufbahn um die Venus. Das einzige Instrument der Sonde war ein Synthetic Aperture Radar, mit dem die Oberfläche der Venus kartiert werden sollte. In den darauffolgenden Jahren wurden 98 Prozent der Oberfläche von 89° Nord bis 89° Süd kartiert, wobei die Auflösung der Aufnahmen bei rund 100 Metern pro Pixel lag. Damit waren die Karten um den Faktor 200 gegenüber Pioneer-Venus 1 und immerhin um den Faktor 15 gegenüber Venera 15 und Venera 16 detailreicher. Zudem wurde in der Endphase der Mission die Bahn der Sonde so gewählt, dass sie durch die obersten Schichten der Atmosphäre flog und so Schlussfolgerungen über die Dichte und Zusammensetzung der Atmosphäre erlaubte. Durch diese Manöver wurde die ohnehin schon kaum noch funktionierende Sonde ständig abgebremst und trat schließlich am 12. Oktober 1994 in die tieferen Schichten der Atmosphäre der Venus ein und verglühte; es ist jedoch nicht auszuschließen, dass einige Restteile der Sonde die Oberfläche erreichten. Der Magellan-Sonde verdanken wir die besten der heute verfügbaren Karten der Venus.

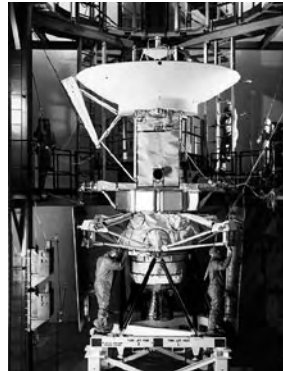


Abb. 36: Magellan bei den Startvorbereitungen

Vorbeiflüge neuerer Zeit – Einige Raumsonden auf dem Weg zu Zielen weit außerhalb der Erdbahn nutzten die Venus, um durch Swing-By-Manöver ihre Geschwindigkeit zu erhöhen. Dies waren in den 1990ern die Galileo-Mission zum ➔Jupiter und die Cassini-Huygens-Mission zum ➔Saturn (zwei Vorbeiflüge). Insbesondere die Bordinstrumente von Cassini-Huygens konnten bei diesen Begegnungen zahlreiche wissenschaftliche Daten liefern. So ergab das für die Saturnmonde konstruierte Radar die bisher genaueste Kartierung einiger Venus-Regionen. Magnetometer-Tests zeigten, dass es entgegen der Daten der sowjetischen Venera-Sonden keine Blitze aus den 48 Kilometer hohen Venuswolken gibt. So bleibt das Vorhandensein von Blitzaktivität oder ähnlichen elektrischen Erscheinungen bis zum heutigen Tag ein ungeklärtes Geheimnis.

Zukünftige Missionen – Am 9. November 2005 startete soll die nach Magellan erste reine Venussonde. Die Venus Express-Sonde der europäischen Raumfahrtagentur ESA soll 2006 in eine Venusumlaufbahn einschwenken und von dort aus mindestens zwei Venustage lang (etwa 500 Erdtage) die Atmosphäre und die Oberfläche der Venus studieren. Außerdem ist mit MESSENGER eine US-amerikanische Raumsonde zum ➔Merkur unterwegs, die an der Venus 2006 und 2007 zwei Mal vorbeifliegen wird. Auch die japanische Raumfahrtagentur JAXA plant für 2008 einen kleinen Venusorbiter namens Planet-C, der mit gekühlten Kameras die Venus in infrarotem Licht studieren soll. Im nächsten Jahrzehnt könnte Russland möglicherweise mit einer neuen Landemission namens Venera-D an die früheren Venera-Erfolge der sowjetischen Zeit anknüpfen. Auch die USA haben Überlegungen für neue Venus-Missionen, allerdings wurden bisher keine konkreten Planungen getroffen. Es ist jedoch mit keiner US-amerikanischen Venus-Mission bis frühestens etwa Mitte der nächsten Dekade zu rechnen.

Beobachtung

Weil die Venus ein innerer Planet ist, das heißt eine engere Umlaufbahn als die Erde besitzt, kann sie sich von der Erde aus gesehen nie weit von der Sonne entfernen. Insbesondere kann die Venus, im Gegensatz zu den oberen Planeten, der Sonne an der Himmelskugel niemals gegenüberstehen, das heißt in Opposition kommen. Stattdessen unterscheidet man anstelle der Konjunktion der äußeren Planeten die obere Konjunktion (Venus hinter der Sonne) von der unteren Konjunktion, bei der die Venus vor der Sonne steht.

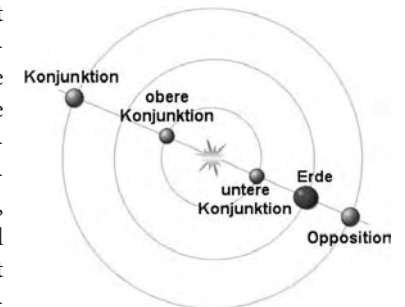


Abb. 37: Obere und untere Konjunktion der Venus

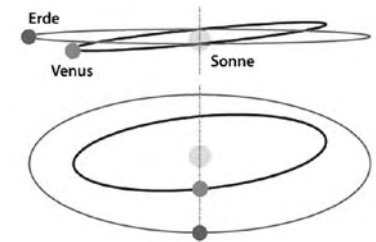


Abb. 38: Die Neigung der Venusbahn gegen die Erdbahn

Die Neigung der Venusbahn gegen die Bahnebene der Erde beträgt etwa 3,4°. Obwohl dieser Wert nicht sonderlich groß erscheint, ist es dadurch sehr selten (auch im

Vergleich zum Merkur), dass es bei der unteren Konjunktion zu einem sogenannten Durchgang vor der Sonnenscheibe kommt. Da die Venus bei der unteren Konjunktion nur etwa 41 Millionen km von der Erde entfernt ist, kann sie sich perspektivisch in einem Winkelabstand von bis zu fast 9° über oder unter der Sonnenscheibe vorbeibewegen. So kann sie für einige Tage (bei Vorbeizug nördlich der Sonne auf der Nordhalbkugel und bei Vorbeizug südlich der Sonne auf der Südhalbkugel) sowohl am Abend- als auch am Morgenhimmel gesehen werden. Im 20. Jahrhundert hat es zum Beispiel nicht einen einzigen Venustransit gegeben.

Steht die Venus östlich der Sonne, kann sie als Abendstern am Westhimmel beobachtet werden, steht sie westlich, kann sie als Morgenstern am Osthimmel gesehen werden. Hierbei sind Sichtbarkeitszeiten von bis zu viereinhalb Stunden (vom Venus- bis zum Sonnenaufgang beziehungsweise vom Sonnen- bis zum Venusuntergang) möglich. Wegen ihrer großen Helligkeit und ihres größeren Winkelabstandes ist Venus viel leichter zu beobachten als Merkur. Bei günstigem Wetter kann sie zur Zeit der größten Elongation von 48 Grad am Tag mit bloßem Auge gesehen werden.

Aufgrund ihrer Bahnbewegung zeigt die Venus im Teleskop je nach Position unterschiedliche Phasen (wie die Phasen des Mondes). Vor und nach einer oberen Konjunktion erscheint sie als kleines, fast rundes Scheibchen mit einem Durchmesser von etwa $10''$ (Bogensekunden). Mit zunehmendem Winkelabstand von der Sonne wird sie perspektivisch größer und nimmt zur größten östlichen Elongation die Form einer abnehmenden »Halbvenus« an. Während die Venus weiter der unteren Konjunktion zustrebt, wird ihr Winkelabstand zur Sonne wieder kleiner, sie zeigt eine schmalere werdende Sichel und erreicht ihren größten scheinbaren Durchmesser von etwa $60''$. Während die scheinbare Größe der Venus als Ganzes also wächst, wird der Anteil der sichtbaren Fläche immer geringer, und umgekehrt, wenn sich der Kreis nach insgesamt 584 Tagen wieder schließt. Daher hat sie ihre größte scheinbare Helligkeit von gut -4_{mag} in einer gewissen »Kompromissposition«, die sie etwa 35 Tage vor beziehungsweise nach der unteren Konjunktion erreicht, wenn sie der Erde etwa 30 Prozent ihrer beleuchteten Oberfläche zuwendet. Die Venus steht dann in ihrem »größten Glanz«. Im weiteren Verlauf kann, durch die Lichtstreuung ihrer Atmosphäre, an der leuchtenden Sichel eine starke Verlängerung der Spitzen beobachtet werden, das so genannte »Übergreifen der Hörnerspitzen«. Die Venussichel umfasst nahe der unteren Konjunktion also einen Bogen von weit über 180° , obwohl eine beleuchtete feste Kugel eigentlich nur einen Sichelbogen von exakt 180° zeigen sollte. Die ständig geschlossene

Wolkendecke der Venus verwehrt dem Auge zwar jeden Einblick, verstärkt aber stets ihr Leuchten. Kurz vor der unteren Konjunktion schließt sich der Sichelbogen sogar vollständig zu einem Kreis. Dieser Effekt ist allerdings wegen der großen Sonnennähe nur schwer zu beobachten.

Der synodische Sichtbarkeitszyklus der Venus wiederholt sich gemäß der pentagrammartigen Verteilung der Konjunktionpunkte auf ihrer Bahn fünfmal hintereinander vor jeweils verschiedenem Sternenhintergrund. Dieser gesamte Sternenzklus wiederholt sich wiederum fast auf den Tag genau alle acht Jahre.



Abb. 39: Aus der Perspektive der Sonde Clementine: Die »Vollvenus« oberhalb der Korona der Sonne, die gerade vom Mond verdeckt wird

Venustransit – Trifft die untere Konjunktion mit dem Knotenpunkt der Venusbahn (einem Schnittpunkt mit der Ekliptik) zusammen, steht die Venus genau vor der Sonnenscheibe und es kommt zu einem Durchgang (Transit). Der letzte Venusdurchgang ereignete sich am 8. Juni 2004, zwischen etwa 07:15 und 13:23 Uhr MESZ und konnte von ganz Europa aus beobachtet werden. Weitere Venusdurchgänge (nach dem gregorianischen Kalender):

- 5. Juni 1518
- 2. Juni 1526
- 7. Dezember 1631 (von Johannes Kepler vorausberechnet, in Europa nicht sichtbar)
- 4. Dezember 1639 (von Jeremiah Horrocks berechnet und beobachtet)
- 6. Juni 1761 (weltweit koordinierte Beobachtungsexpeditionen)
- 3. Juni 1769
- 9. Dezember 1874
- 6. Dezember 1882
- 8. Juni 2004
- 6. Juni 2012 (in Mitteleuropa ist nur das Ende sichtbar)
- 11. Dezember 2117
- 8. Dezember 2125
- 11. Juni 2247
- 9. Juni 2255

Durchgänge der Venus finden immer abwechselnd im Juni oder im Dezember statt, weil zu diesen Zeiten die Erde die Knoten der Venusbahn passiert. Der Zyklus der Transits beträgt 243 Jahre, dabei finden vier Durchgänge mit den Abständen von 8 Jahren, von 121,5 Jahren, wieder von 8 und dann nach 105,5 Jahren statt. Durch die Beobachtung eines Venustransits von verschiedenen Positionen auf der Erde kann man mit der Messung der Horizontalparallaxe die Entfernung Erde-Sonne (die Astronomische Einheit) ableiten.

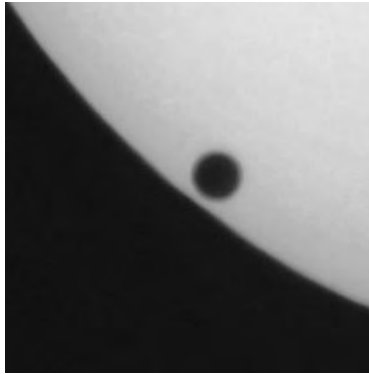


Abb. 40: Venustransit am 8. Juni 2004

Kulturgeschichte

Da die Venus das hellste sternartige Objekt am Firmament ist, hat sie wohl seit Anbeginn der Kulturgeschichte eine tragende Rolle in der Astronomie, aber auch in der Mythologie und der Astrologie gespielt. Im alten Babylon verband man den hellsten Wandelstern mit Ishtar, der bedeutendsten babylonischen Göttin. Im frühen antiken Griechenland nannte man die Venus als Morgenstern Phosphoros (soviel wie »Lichtbringer«) – auf Lateinisch Lucifer –, manchmal auch Heosphoros, und als Abendstern Hesperos. Erst die späteren Hellenen bezogen diesen Planeten auf die Göttin Aphrodite. Im alten Ägypten verband man den Wandelstern mit der Göttin Isis, in der germanischen Mythologie mit der Göttin Freyja (altnordisch, »Herrin«) beziehungsweise Freia, auf die unser Wochentagsname für den Freitag zurückgeht. Mit der Renaissance hat sich für den Planeten der Name Venus (lat., »Anmut«, »Liebreiz«) der römischen Liebesgöttin durchgesetzt, der Name einer altitalienischen Gartengöttin, die später der griechischen Aphrodite gleichgesetzt wurde.

Seit der Antike wird sowohl für den Planeten als auch für die Göttin Venus das Pentagramm als Symbol benutzt. Der Ursprung dieser Symbolik liegt anscheinend in der besonderen periodischen Bewegung des Planeten, dessen auffälligste Positionen am Sternenhimmel im Zeitraum von acht Jahren ein recht exaktes Pentagramms beschreiben. Es gibt Vermutungen, dass die Griechen die Olympischen Spiele der Antike nach diesem Zyklus ausgerichtet haben.

In der Astrologie ist die Venus unter anderem das Symbol des Bindungsvermögens.

Im antiken China ordnete man gemäß der Fünf-Elemente-Lehre den Planeten Venus der Wandlungsphase Metall zu. Daher heißt die Venus im Chinesischen und Japanischen Metall-Stern (金星 chin. *jīnxīng*, jap. *kinsei*).

Venus in Literatur, Film und Musik – In den ersten wissenschaftlich untermauerten Vorstellungen von der Venus als Weltkörper galt dieser erdähnliche Planet durch seine größere Sonnennähe im Gegensatz zum Mars als eine lebensfreundlichere, junge und sehr warme Welt der Urzeit, die unter der undurchdringlichen Wolkendecke von Dschungel und Wüsten geprägt ist. Das hat sich dann auch in der später aufgekommenen wissenschaftlichen Phantastik der Literatur und der Filmkunst niedergeschlagen. Besonders in Form verschiedenster Venusianer. Mit der Erkundung der wirklichen Bedingungen, seit der zweiten Hälfte der 1960er Jahre, ist es dann in dieser Beziehung um die Venus still geworden.

Edgar Rice Burroughs, der Schöpfer von Tarzan, verfasste von 1932 bis 1970 insgesamt neun Romane, die auf der Venus spielen, darunter *Piraten der Venus*, *Auf der Venus verschollen* und *Krieg auf der Venus*.

1948 erschien von Robert A. Heinlein das Jugendbuch *Space Cadet* (Weltraumkadetten). Ein amerikanischer Offiziersschüler besteht als Bewerber der interplanetarischen Friedenspatrouille im Jahr 2075, im Einsatz für das friedliche Zusammenleben der verschiedenen Planetenvölker, seine erste Feuerprobe gegen einen Aufstand der amphibischen Wesen der Venus.

1951 folgte nach anderen mit *Between Planets* (Zwischen den Planeten) ein weiteres Jugendbuch von Heinlein, das teils auf der Venus handelt. Mars und Venus sind von Kolonisten der Erde besiedelt, die in friedlicher Koexistenz mit jeweils einheimischen intelligenten Spezies leben. Hier rebellieren die Kolonisten des »Nebelplaneten« Venus gegen die Regierung auf der Erde.

1951 erschien von Stanisław Lem der Roman *Astronauti*, der unter den deutschen Titeln *Die Astronauten* oder *Planet des Todes* herausgegeben wurde. Nach dieser Romanvorlage entstand von 1959 bis 1960 als Gemeinschaftsproduktion der DDR und Polen der Science-Fiction-Film *Der schweigende Stern* (Verleihtitel in der BRD: *Raumschiff Venus antwortet nicht*). Das Werk bezieht sich auf die Gefahr eines atomaren Weltkrieges. Nach der Identifizierung eines geheimnisvollen Fundes bricht

im Jahr 1970 eine internationale Expedition zum Zweck der Nachforschung zur Venus auf und entschlüsselt unterwegs den Hinweis auf einen 1908 fehlgeschlagenen Angriff auf die Erde. Am Ziel angekommen, findet die Besatzung eine leblose, radioaktiv verseuchte Welt vor, auf der nur noch die automatischen Anlagen einer Vernichtungsmaschinerie laufen, der die Bewohner der Venus offenbar selbst zum Opfer gefallen sind.

1956 erschien mit *It Conquered the World* eine der frühen Filmarbeiten von Roger Corman. Nach dem Funkkontakt mit einem verschollenen Satelliten der USA kehrt dieser mit einem Invasionsabsichten tragenden Weltraummonster als eines der letzten seiner Art von der Venus zurück. Unter dem Vorwand, die Selbstzerstörung der Menschheit zu verhindern, bringt das Monster aus einem Höhlenversteck mithilfe von kleinen fliegenden Rochen einzelne Einwohner einer amerikanischen Kleinstadt in Schlüsselpositionen unter seine Kontrolle. 1966 gab es ein Remake des kultigen SF-Trash unter dem Titel *Zontar the Thing from Venus* von Larry Buchanan.

1958 kam von Regisseur Edward Bernds *Queen from outer Space* in die Kinos. 1961 folgte die deutsche Synchronfassung *In den Krallen der Venus*. Die satirisch angelegte Handlung von schönen Frauen und echten Kerlen spielt im Jahr 1985. Ein Raumschiff der Erde wird mit seinen Astronauten von einer unbekannt Kraft vom Kurs abgebracht und auf die Venus entführt. Dort sind nach einem Krieg bis auf wenige Ausnahmen alle Männer auf einen Nachbarplaneten verbannt worden.

1964 ist der Roman *Das Erbe der Phaetonen* von Georgi Martynow auf deutsch erschienen. Die Venus und ihre menschenähnlichen Bewohner spielen in der sehr abwechslungsreichen Geschichte eine Nebenrolle als Zwischenstation auf der Suche nach den Spuren der alten Zivilisation des als \Rightarrow Asteroidengürtel untergegangenen fünften Planeten Arsenia (\Rightarrow Phaeton).

In der Musik hat Gustav Holst der Venus in seiner Orchestersuite *Die Planeten* (1914–1916) den zweiten Satz *Venus, the Bringer of Peace* (Venus, die Friedensbringerin) gewidmet.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Venus_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Venus_(Planet)). Historie: 30.1.02: Angelegt von Vulture, danach bearbeitet von den Hauptautoren Lotse, Bricktop1, CWitte, S, Phrood, Arnomane, Aglarech, Asdert, Baldhur, Vlado, Alkuin, Zinnmann, Ra'ike, Zwobot, Vesta, Sechmet, CrissoV, Leopard, Vulture, Mps, Asdrubal, Ixitixel, Leogfischer, BWBot, Bahnmoeller, BenZin, Nephelin, Stefan h, Cjlp, Pikarl, Atamari, Wing, Masato, Allen McC., AstroGK, RKraasch, Pjacobi, Zhou Yi, AkaBot, Andre Engels, Novalin, Head, Wiegels, Stern, Rivi, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Erde

Die Erde (von indogermanisch *er[t]*) ist der dritte \Rightarrow Planet des Sonnensystems. Sie ist etwa 4,6 Milliarden Jahre alt und der einzige bekannte belebte Ort. Das Planetenzeichen ist $\text{\textcircled{E}}$. Der lateinische Name ist *Terra* (vgl. Farbtafeln Abb. 139).

Entstehung und Aufbau der Erde

Die Erde ist der größte Gesteinsplanet im uns bekannten Sonnensystem. Alle anderen Planeten sind kleiner oder bestehen, wie \Rightarrow Jupiter, hauptsächlich aus Gas in stark komprimierten Zuständen. Man geht heute allgemein davon aus, dass sie während der ersten 100 Millionen Jahre einem intensiven Bombardement von \Rightarrow Meteoriten ausgesetzt war. Heute ist nur noch ein geringer Beschuss zu verzeichnen. Die meisten der Meteore werden von Objekten, die kleiner sind als 1 cm, hervorgerufen. Im Gegensatz zum \Rightarrow Mond sind auf der Erde die meisten \Rightarrow Einschlagkrater durch geologische Prozesse wieder ausgelöscht worden. Durch die kinetische Energie der \Rightarrow Impakte während des schweren Bombardements und durch die Wärmeproduktion des radioaktiven Zerfalls erhitze sich die junge Erde, bis sie vollkommen aufgeschmolzen war. In der Folge kam es zu einer gravitativen Differenzierung des Erdkörpers in einen Erdkern und einen Erdmantel. Die schwersten Elemente, vor allem Eisen, sanken in die Richtung des Schwerpunkts des Planeten, während leichte Elemente, vor allem Sauerstoff, Silizium und Aluminium, nach oben stiegen. Aus diesen Elementen bildeten sich hauptsächlich silikatische Minerale, aus denen auch die Gesteine der Erdkruste bestehen. Aufgrund ihres vorwiegenden Aufbaus aus Eisen und Silikaten hat die Erde wie alle terrestrischen Planeten, eine recht hohe mittlere Dichte von $5,515 \text{ g/cm}^3$.

Die Erde hat, wie alle Planeten, durch die Eigengravitation ihrer großen Masse annähernd die Form einer Kugel. Durch die Fliehkräfte ihrer ziemlich schnellen Rotation ist sie an den Polen geringfügig abgeplattet. Der Äquatorumfang ist dadurch mit $40.076,592 \text{ km}$ um $67,439 \text{ km}$ beziehungsweise um $0,17\%$ größer als der Polumfang mit $40.009,153 \text{ km}$. Der Poldurchmesser ist mit $12.713,5 \text{ km}$ dementsprechend um $42,78 \text{ km}$ beziehungsweise um $0,34\%$ kleiner als der Äquatordurchmesser mit $12.756,28 \text{ km}$. Der Meeresspiegel (das Geoid) weicht davon nochmals um $\pm 100 \text{ Meter}$ ab. Die Unterschiede im Umfang tragen mit dazu bei, dass es keinen eindeutig höchsten Berg auf der Erde gibt. Nach der Höhe über dem Meeresspiegel ist es der Mt. Everest im Himalaya, nach dem Abstand

des Gipfels vom Erdmittelpunkt der auf dem Äquatorwulst stehende Vulkanberg Chimborazo in den Anden. Von der jeweils eigenen Basis an gemessen ist der Mauna Kea auf der vom pazifischen Meeresboden aufragenden großen vulkanischen Hawaii-Insel am höchsten.

Wie die meisten festen Planeten und fast alle größeren Monde, zum Beispiel der → Erdmond, weist auch die Erde eine deutliche Dichotomie ihrer Oberfläche auf, das heißt eine Zweiteilung in unterschiedlich ausgeprägte Halbkugeln. Die Oberfläche der Erde unterteilt sich in eine Landhemisphäre und eine Wasserhemisphäre. Die Wasserfläche hat in der gegenwärtigen geologischen Epoche einen Gesamtanteil von 70,7%. Die von der Landfläche umfassten 29,3% entfallen hauptsächlich auf sieben Kontinente; der Größe nach: Asien, Afrika, Nordamerika, Südamerika, Antarktika, Europa und Australien. Europa ist als große westliche Halbinsel Asiens im Rahmen der Plattentektonik allerdings wahrscheinlich nie eine selbstständige Einheit gewesen. Die kategorische Grenzziehung zwischen Australien als kleinstem Erdteil und Grönland als größter Insel wurde nur rein konventionell festgelegt. Die Fläche des Weltmeeres wird im Allgemeinen in drei Ozeane einschließlich der Nebenmeere unterteilt: den Pazifik, den Atlantik und den Indik. Die tiefste Stelle, das Witjastief 1 im Marianengraben, liegt 11.034 m unter dem Meeresspiegel.

Nach seismischen Messungen ist die Erde hauptsächlich aus drei Schalen aufgebaut: Aus dem Erdkern, dem Erdmantel und der Erdkruste. Diese Schalen sind durch seismische Diskontinuitätsflächen (Unstetigkeitsflächen) voneinander abgegrenzt. Die Erdkruste und der oberste Teil des oberen Mantels bilden zusammen die so genannte Lithosphäre. Sie ist zwischen 50 und 100 km dick und zergliedert sich in große und kleinere

tektonische Einheiten, die Platten. Die größten Platten entsprechen in ihrer Anzahl und Ordnung in etwa jener der von ihnen getragenen Kontinente, mit Ausnahme der pazifischen Platte. All diese Schollen bewegen sich gemäß der → Plattentektonik relativ zueinander auf den teils aufgeschmolzenen, zähflüssigen Gesteinen des oberen Mantels, der 100 bis 150 km mächtigen Asthenosphäre. Der innere Erdkern ist fest, der äußere geschmolzen und gut 4.000 °C heiß.

Ein dreidimensionales Modell der Erde wird, wie alle verkleinerten Nachbildungen von Weltkörpern, Globus genannt.

Atmosphäre

Die Erde besitzt eine etwa 640 km hohe → Atmosphäre. Deren Masse beträgt $5,13 \times 10^{18}$ kg und macht somit knapp ein Millionstel der Erdmasse aus. Der mittlere Luftdruck auf dem Niveau des Meeresspiegels ist 1.013 hPa groß, bei einer mittleren Luftdichte von $1,293 \text{ kg/m}^3$. In den bodennahen Schichten besteht die Lufthülle im Wesentlichen aus 78% Stickstoff, 21% Sauerstoff und 1% Edelgasen. Dazu kommt ein wechselnder Anteil an Wasserdampf (0–5%), der das Wettergeschehen bestimmt.

Die auf der Erde gemessenen Temperaturextreme betragen $-89,6$ °C (gemessen am 21. Juli 1983 in der Wostok-Station in der Antarktis auf 3.420 Metern Höhe, was einer Temperatur von -60 °C auf Meereshöhe entspräche) und $+58$ °C (gemessen am 13. September 1922 in Al 'Aziziyah in Libyen auf 111 Metern Höhe). Die mittlere Temperatur in Bodennähe beträgt 15 °C; die Schallgeschwindigkeit bei dieser Temperatur beträgt in der Luft am Meeresniveau etwa 340 m/s.

Die Erdatmosphäre streut den kurzwelligen, blauen Anteil des Sonnenlichts etwa fünfmal stärker als den langwelligen, roten und bedingt dadurch bei hohem Sonnenstand die Blaufärbung des Himmels. Die Erde wird daher auch der Blaue Planet genannt.

Globaler Energiehaushalt

Der Energiehaushalt der Erde wird im Wesentlichen durch die Einstrahlung der Sonne bestimmt, der sonstige vorwiegend durch radioaktive Zerfälle erzeugte Energiebeitrag beträgt nur etwa 0,1%. Die Albedo der Erde beträgt 0,367, wobei ein wesentlicher Anteil auf die Wolken der Erdatmosphäre zurückzuführen ist. Dies führt zu einer globalen effektiven Temperatur von 246 K (-27 °C), Die Durchschnittstemperatur am Boden liegt jedoch durch einen starken atmosphärischen Treibhauseffekt bei etwa 288 K (15 °C), wobei Wasser und Kohlendioxid den Hauptbeitrag liefern.



Abb. 41: Landhalbkugel (47% Land)

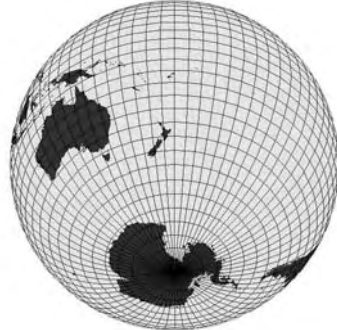


Abb. 42: Wasserhalbkugel

Herkunft des irdischen Wassers

Die Herkunft des Wassers auf der Erde, insbesondere die Frage, warum auf der Erde deutlich mehr Wasser vorkommt als auf den anderen erdähnlichen Planeten, ist bis heute nicht befriedigend geklärt. Ein Teil des Wassers dürfte durch das Ausgasen der Magma entstanden sein, also letztlich aus dem →Erdinneren stammen. Ob dadurch aber die Menge an Wasser erklärt werden kann, ist fragwürdig. Weitere große Anteile könnten aber auch durch Einschläge von →Kometen, →transneptunischen Objekten oder wasserreichen →Asteroiden (Protoplaneten) aus den äußeren Bereichen des →Asteroidengürtels auf die Erde gekommen sein. Messungen des Isotopenverhältnisses von Deuterium zu Protium (D/H-Verhältnis) deuten dabei eher auf Asteroiden hin, da in Wassereinschlüssen in kohlgigen Chondriten ähnliche Verhältnisse gefunden wurden wie in ozeanischem Wasser, wohingegen bisherige Messungen dieses Isotopen-Verhältnisses an Kometen und transneptunischen Objekten nur schlecht mit irdischem Wasser übereinstimmen.

Himmelsmechanik

Umlaufbahn – Der mittlere Abstand des Zentrums der Erde vom Zentrum der Sonne ist die große Bahnhalbachse und beträgt etwa 149.597.870 km. Der gerundete Wert 149,6 Millionen km wird auch als Astronomische Einheit bezeichnet und als astronomische Längeneinheit hauptsächlich für Entfernungsangaben innerhalb des Sonnensystems verwendet. Der sonnennächster Punkt der Erde, das Perihel, liegt bei 0,983 AE, der sonnenfernste Punkt, das Aphel, bei 1,017 AE. Die Erde läuft also auf einer elliptischen Umlaufbahn mit einer Exzentrizität von 0,0167 um die Sonne. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt sie 365 d 6 h 9 min 9,54 s, was als Definition des siderischen Jahres genommen wird.

Die Bahnebene der Erde wird als Ekliptik bezeichnet.

Mond – Die Erde wird von einem Mond umkreist. Dieser ist im Vergleich zur Erde deutlich größer, als es bei den anderen Planeten mit Ausnahme des →Pluto/→Charon-Systems der Fall ist. Der große Mond ist verantwortlich für die Stabilität der Bahnneigung der Erde und damit auch für die guten Bedingungen zum Entstehen von Leben auf der Erde.

Rotation und Gezeiten – Die Erde rotiert einmal in 23 h 56 min 4,09 s um ihre eigene Achse. Analog zum siderischen Jahr wird diese Zeitspanne als ein siderischer Tag definiert. Aufgrund der Bahnbewegung der Erde

Abb. 43: Größen- und Abstandsverhältnis zwischen Erde und Mond

entlang ihrer Umlaufbahn und der daraus resultierenden leicht unterschiedlichen Position der Sonne an nacheinanderfolgenden Tagen ist ein Sonnentag, der als die Zeitspanne zwischen zwei Sonnenhöchstständen (Mittag) definiert ist, etwas größer als ein siderischer Tag und wird nach Definition in 24 Stunden eingeteilt.

Aufgrund der Neigung der Rotationsachse der Erde von 23,44° gegen die Ekliptik werden die Nord- und die Südhalbkugel der Erde an verschiedenen Punkten ihrer Umlaufbahn um die Sonne unterschiedlich beleuchtet, was zu den das Klima der Erde prägenden Jahreszeiten führt.

Der Mond verursacht auf der Erde Gezeiten. Ebbe und Flut in den Meeren und im Erdmantel bremsen die Erdrotation und verlängern dadurch gegenwärtig die Tage um etwa 20 Mikrosekunden pro Jahr. Die Gezeiten wirken sich auch auf die Landmassen aus, die sich um etwa einen halben Meter heben und senken. Die Rotationsenergie der Erde wird dabei in Wärme umgewandelt. Der Drehimpuls wird auf den Mond übertragen, dessen Bahn sich dadurch um etwa



Abb. 44: Erde vom Mond aus gesehen

4 Zentimeter pro Jahr von der Erde entfernt. Dieser schon lange vermutete Effekt ist seit etwa 1995 durch Laser-Distanzmessungen abgesichert.

Die zunehmende Tageslänge kann geologisch anhand von Wachstumsringen in fossilen Korallen nachgewiesen werden. Man findet in diesen Sedimenten eine Spur für jeden Tag, und eine jährliche Regelmäßigkeit, aus der sich die Anzahl der Tage im damaligen Jahr bestimmen lässt. In der Vergangenheit zeigt sich die Zunahme der Tageslänge anhand überlieferter Sonnenfinsternisse, die bei gleichbleibender Tageslänge an einem anderen Ort auf der Erde sichtbar gewesen wären.

Extrapoliert man diese Abbremsung in die Zukunft, wird auch die Erde einmal dem Mond immer die gleiche Seite zuwenden, wobei ein Tag auf der Erde dann 47 Mal so lang wäre wie heute. Damit unterliegt die Erde dem

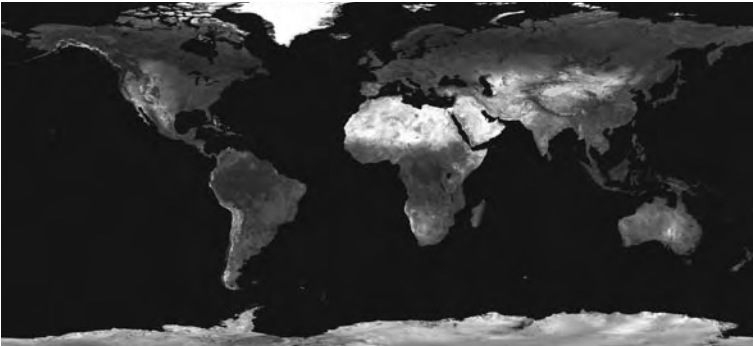


Abb. 45: Die Erde bei Tag (ohne Wolken und Packeis; Fotomontage)

gleichen Effekt, der in der Vergangenheit schon zur gebundenen Rotation des Mondes geführt hat. Zu dem Zeitpunkt, an dem diese Korotation eintreten wird, wird das Wechselspiel der Gezeiten beendet sein. Die Flutberge verbleiben dann immer an einem Ort auf der Verbindungslinie Erde-Mond und es wird zu einer dauerhaften Verformung des Erdkörpers kommen, ähnlich dem des Mondes. Diese Überlegungen kann man allerdings als hypothetisch betrachten, da zum einen die Stabilität der Erdrotation nicht gewährleistet ist. Außerdem wird sich durch den Übergang der Sonne zu einem weißen Zwerg auch das gesamte Sonnensystem verändert haben.

Leben und Klima

Die Erde ist bisher der einzige Planet, auf dem Leben beziehungsweise eine Biosphäre nachweisbar ist. Nach dem gegenwärtigen Stand der Forschung begann das Leben auf der Erde möglicherweise innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums, gleich nach dem Ausklingen eines schweren Bombardements großer Asteroiden, dem die Erde nach ihrer Entstehung vor etwa 4,6 Milliarden Jahren bis etwa vor 3,9 Milliarden Jahren als letzte Phase der Bildung des Planetensystems ausgesetzt war. Nach dieser Zeit hat sich eine stabile Erdkruste ausgebildet und so weit abgekühlt, dass sich Wasser auf ihr sammeln konnte. Die ältesten direkten, allerdings umstrittenen Hinweise auf Leben, die als versteinerte Cyanobakterien gedeutet werden, sind 3,5 Milliarden Jahre alt und wurden in Gesteinen der Warrawoona-Gruppe im Nordwesten Australiens gefunden. In 3,85 Milliarden Jahre altem Sedimentgestein aus der Isua-Region im Südwesten Grönlands wurden in den Verhältnissen von Kohlenstoffisotopen Anomalien entdeckt, die auf biologischen Stoffwechsel hindeuten könnten; bei dem Gestein



Abb. 46: Die Erde bei Nacht (Fotomontage)

kann es sich aber auch statt um Sedimente lediglich um ein stark verändertes Ergussgestein ohne derartige Bedeutung handeln. Die ältesten und eindeutigen Lebensspuren auf der Erde sind 1,9 Milliarden Jahre alte fossile Bakterien aus der Gunflint-Formation in Ontario.

Die chemische wie die biologische Evolution sind untrennbar mit der Klimageschichte verknüpft. Das Leben wird in seiner Entwicklung von den herrschenden Bedingungen geprägt und hat seinerseits Einfluss auf die Entwicklung und das Erscheinungsbild der Erde.

Durch den Stoffwechsel des pflanzlichen Lebens, also durch die Photosynthese, wurde die Erdatmosphäre mit molekularem Sauerstoff angereichert und bekam ihren oxidierenden Charakter. Zudem wurde die Albedo und damit die Energiebilanz durch die Pflanzendecke merklich verändert. Die Wechselwirkungen zwischen Lebewesen und Klima haben heute durch den zunehmenden Einfluss des Menschen eine neue Quantität erreicht. Während im Jahr 1920 etwa 1,8 Milliarden Menschen die Erde bevölkerten, wuchs die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2000 auf 6,1 Milliarden an. In den Entwicklungsländern ist für die absehbare Zukunft weiterhin ein starkes Bevölkerungswachstum zu erwarten, während in vielen hoch entwickelten Ländern die Bevölkerung stagniert oder nur sehr langsam zunimmt, deren industrieller Einfluss auf die Natur aber weiterhin wächst.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Erde>. Historie: 23.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Nephelin, Srbauer, Epo, Saperaud, S, Geof, Zwobot, Lotse, Geoz, Ben-Zin, WHell, Hokanomono, Nico Düsing, BWBot, Stern, Gerhard Kemme, CuttyP, Kosebamse, Solarwerner, Leipnizkeks, Aka, Roger Zenner, Malteser.de, Daniel FR, Bertonymus, Matthäus Wander, Kopoltra, Spawn Avatar, Kku, Wolfgang1018, Phrood, Schusch, Baumst, Pietz, Allen McC., Fgb, ArtMechanic, Marvel, Ninjamask, RKraasch, HansG, Sicherlich, Arcy, Hubi, Stefan h, AlephNull, Stechlin, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Innerer Aufbau der Erde

Die Erde ist annähernd eine Kugel. Durch die Fliehkräfte ihrer Rotation ist sie an den Polen geringfügig abgeplattet, so dass der Äquator-Durchmesser 12.756,2 km beträgt und der Pol-Durchmesser nur 12.713,6 km. Der Unterschied der beiden Durchmesser beträgt also 42,6 km. Dies führt zur Erdfigur des Erdellipsoids. Der Meeresspiegel (das Geoid) weicht davon nochmals um ± 100 m ab.

Die Oberfläche der Erde unterteilt sich in Landflächen mit einem Anteil von 29,3 % an der Gesamtoberfläche des Planeten und Wasserflächen mit einem Anteil von 70,7 %. Die Landflächen werden zum überwiegenden Teil von den Kontinenten gebildet.

Entstehung des Schalenaufbaus

Wie alle anderen Planeten des Sonnensystems entstand auch die Erde vor etwa 4,6 Milliarden Jahren aus einer rotierenden Staub- und Gaswolke, die durch ihre Schwerkraft langsam dichter wurde und Planetesimale bildete. Massereichere Teilchen zogen wegen ihrer größeren Gravitation die kleineren an und wuchsen auf diese Weise allmäh-

lich zu Proto-Planeten heran, bis letztlich die Planeten übrig blieben, die einen Großteil der freien Materie abgezogen hatten. Aus einem anfangs kalten und im Inneren homogenen Himmelskörper hat sich die Proto-Erde innerhalb von etwa 100 Millionen Jahre durch die Einschläge der Planetesimale und der frei werdenden gravitativen Energie zunehmend erwärmt.

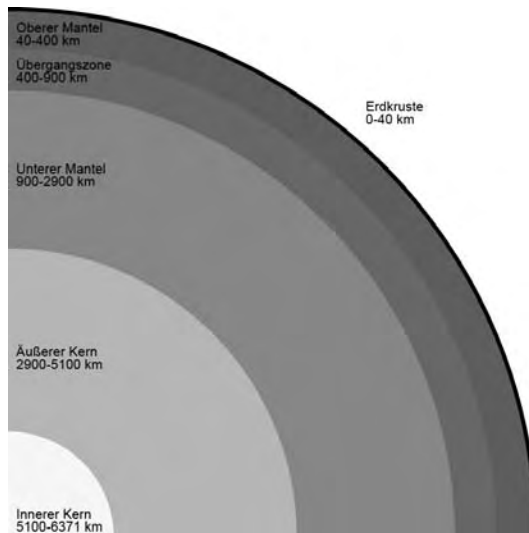


Abb. 47: Aufbau der Erde (Schalen)

Durch den Massenzuwachs verdichtete sich der Erdkern, radioaktive Zerfallsprozesse beschleunigten die Erhitzung des Planeten. Nachdem sich die Erde auf ungefähr 2.000°C erwärmt hatte – eine Temperatur, bei der Eisen und die meisten Silikate geschmolzen sind –, bildete sich tröpfchenförmige Eisenschmelzen, in der sich die – gemäß Goldschmidt-Klassifikation – siderophilen Elemente anreicherten, und Silikatschmelzen, in der sich die lithophilen Elemente anreicherten. Die schwereren Tröpfchen der Metallschmelze wanderten Richtung Zentrum und sammelten sich dort zum Eisenkern, während die leichtere Silikatschmelze vom Zentrum nach außen verdrängt wurde und sich zum Erdmantel und zur Erdkruste entwickelte.

Durch lange währende Differenziation gelangte somit kontinuierlich leichtere Materie in die äußeren Zonen der Erde. So entstand über dem schweren Eisenkern ein Mantel aus Gesteinen mittlerer Dichte, bestehend aus Magnesium-Eisen-Silikaten, und darüber eine Außenkruste aus leichtem Material wie Sauerstoff, Silizium, Aluminium, Calcium, Natrium und anderen. Das leichte Wasser, dessen Herkunft bis heute umstritten ist, fand sich zu den Ozeanen zusammen. Die noch leichteren Gase erzeugten schließlich die Atmosphäre der Erde. Dass die Differenziation auch heute noch nicht abgeschlossen ist, erkennt man zum Beispiel am Gasausstoß bei Vulkanausbrüchen, wobei riesige Mengen an Gasen aus dem Erdinneren entweichen.

Eigenschaften der Schalen

Die Erde besteht in ihrem Inneren aus drei durch seismische Diskontinuitätsflächen (Unstetigkeitsflächen) begrenzte Hauptschalen: Der Erdkruste, dem Erdmantel und dem Erdkern.

Erdkern

- **Innerer Erdkern:** Der innere Kern der Erde erstreckt sich zwischen 5.100 km und 6.370 km unter der Erdoberfläche. Er besteht aus einer festen Eisen-Nickel-Legierung. Der Druck beträgt hier bis zu vier Millionen Bar die Temperatur liegt zwischen 4.000 °C und 5.000 °C, ähnlich den dunklen Flecken an der Sonnenoberfläche.
- **Äußerer Erdkern:** Der äußere Kern liegt in einer Tiefe zwischen 2.900 km und 5.100 km. Er ist flüssig bei einer Temperatur von etwa 2.900 °C und besteht aus einer Nickel-Eisen-Schmelze, die möglicherweise auch geringe Spuren von Schwefel oder Sauerstoff enthält. Im Zusammenwirken mit der Erdrotation ist die bewegliche Eisenschmelze

aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit verantwortlich für das → Erdmagnetfeld.

- Die obere Begrenzung des Erdkerns ist die Kern-Mantel-Grenze (Wiechert-Gutenberg-Diskontinuität).

Erdmantel

- **Unterer Mantel:** Der Übergang zwischen äußerem Kern und unterem Mantel ist durch eine sprunghafte Dichteabnahme von 10 auf 5 g/cm^3 gekennzeichnet. Ursache dafür ist ein Mineralwechsel, denn der untere Mantel besteht aus schweren Silikaten und einem Gemenge von Metalloxiden wie zum Beispiel Magnesiumoxid und Eisenoxid. Im unteren Mantel, zwischen 700 km und 2.900 km Tiefe, herrscht eine Temperatur von etwa 2.000 °C . An der überhitzten Grenzschicht zwischen äußerem Kern und unterem Mantel entspringen Plumes und Superplumes, also Aufstrombereiche heißen Magmas.
- **Übergangszone:** Dieser Bereich zwischen 350 km und 700 km Tiefe wird bereits dem oberen Mantel zugeordnet, manchmal jedoch auch als mittlerer Mantel bezeichnet.
- **Oberer Mantel:** Der obere Mantel ist weniger starr als der untere, noch etwa 1.500 °C heiß und besteht nur aus Peridotit, der sich aus Olivin und Pyroxen zusammensetzt. Es gilt als gesichert, dass die basaltischen Magmen, die alle Phänomene des Vulkanismus hervorbringen, aus dem Material des oberen Mantels bestehen. In der Bewegung dieser Magmaströme liegt die Ursache von → Plattentektonik, Erdbeben und Gebirgsbildungen.
- **Asthenosphäre:** Zwischen 100 km und 350 km Tiefe in den oberen Erdmantel hinein erstreckt sich die Asthenosphäre, die »Fließschicht« für die darüber liegende, relativ starre Lithosphäre.
- Die obere Begrenzung des Erdmantels wird als Mohorovicic-Diskontinuität bezeichnet.

Erdkruste – Die Erdkruste, auch Lithosphäre genannt, besteht aus zwei sehr unterschiedlichen Strukturen:

- **Ozeanische Erdkruste:** Die ozeanische Kruste bildet mit 5–10 km Mächtigkeit eine vergleichsweise dünne Schicht um den Erdmantel. Sie besteht aus riesigen Platten, die ständig in langsamer Bewegung sind und dabei auf der »Fließschicht« (Asthenosphäre) des oberen Mantels schwimmen. An den Spreizungszonen der Krustenplatten, den mittelozeanischen Rücken, dringen ständig basaltische Magmen empor, die

fließbandartig neue ozeanische Kruste aus Basalt und Gabbro produzieren. Deshalb wird die ozeanische Kruste mit wachsender Entfernung von den Rücken immer älter. Da sie an Subduktionszonen wieder in den Mantel abtaucht, um erneut aufgeschmolzen zu werden, ist sie nirgendwo älter als 200 Millionen Jahre.

- **Kontinentale Erdkruste:** Sie besteht aus einzelnen Schollen, die auch als Kontinente bezeichnet werden. Auch die kontinentale Kruste »schwimmt« auf der ozeanischen Kruste. Dort, wo sie als Gebirgsmassiv am höchsten aufragt, taucht sie durch ihr Eigengewicht auch am tiefsten ein (Isostasie). Im Detailaufbau zeigt die kontinentale Erdkruste eine Zweiteilung in eine spröde Oberkruste und eine duktile Unterkruste, welche durch Mineralumbildungen (Modifikationswechsel) bedingt und durch die Conrad-Diskontinuität getrennt werden.
- **Obere Begrenzung der Erdkruste:** Erdoberfläche (darüber → Erdatmosphäre)

Die Dicke der kontinentalen Kruste liegt zwischen 30–60 km. Sie setzt sich aus kristallinen Gesteinen zusammen, deren Hauptbestandteile Quarz und Feldspäte bilden. Chemisch ist die kontinentale Kruste zu 47,2 Gewichtsprozent (62,9 Atomprozent beziehungsweise 94,8 Volumenprozent) aus Sauerstoff aufgebaut, bildet also eine dichte, steinharte Packung aus Sauerstoff. Im Bereich der Erdkruste und an der Erdoberfläche sind die Gesteine einem ständigen Umwandlungsprozess unterworfen, den man auch als Kreislauf der Gesteine bezeichnet. Selten finden sich Gesteine, die seit der ersten Krustenbildungen in der Erdgeschichte unverändert geblieben sind. Die ältesten je gefundenen Gesteine haben ein Alter von 3,96 Milliarden Jahren.

Erforschung des Schalenbaus der Erde

Unsere Kenntnisse über den Aufbau der Erde stammen aus verschiedenen geophysikalischen Quellen.

Gravimetrie und Isostasie – Erste Hinweise auf das innere Material der Erde ergaben sich aus ihrer mittleren Dichte von $5,5\text{ g/cm}^3$, die man mittels Gravitationsgesetz aus dem → Mondumlauf berechnen konnte. Da oberflächennahe Gesteine im Durchschnitt $2,7\text{ g/cm}^3$ aufweisen, muss das Erdinnere zumindest zwei bis dreimal dichter sein (Eisen hat etwa 8 g/cm^3).

Messungen der Lotrichtung zeigten schon im frühen 19. Jahrhundert, dass das Erdinnere unter hohen Gebirgen eine geringere Dichte hat.

Durch genaue Schwerkraft-Messungen (Gravimetrie) erkannte man bald, dass dort die feste Erdkruste dicker als anderswo ist und dass der darunter befindliche Erdmantel aus schwereren Gesteinen besteht. Große Gebirgsmassive tauchen wie Eisberge umso tiefer ins Erdinnere, je höher sie sind. Durch Satellitengeodäsie lassen sich auf ähnliche Art auch tiefere Anomalien des Erdmantels orten.

Bohrungen – Die tiefste Bohrung, die je durchgeführt wurde, fand in Russland auf der Halbinsel Kola statt und führte bis in eine Tiefe von 12 km. Hier konnte die oberste Schicht der kontinentalen Kruste erforscht werden, die an dieser Stelle eine Mächtigkeit von etwa 30 km besitzt. Eine weitere Bohrung, die so genannte Kontinentale Tiefenbohrung (KTB), die 9,1 km erreicht hat, wurde in der deutschen Oberpfalz vorgenommen. Bei einer geplanten Tiefe von 14 km wäre es möglich gewesen, die kontinentale Kruste an der Nahtstelle zu erforschen, an der vor 300 Millionen Jahren die auf dem Erdmantel driftenden Kontinente Ur-Afrika und Ur-Europa kollidierten.

Tiefbohrungen bewegen sich im oberen Krustenbereich und können daher nur einen kleinen Einblick ins Erdinnere gewähren. Würde man die Erde auf Apfelgröße verkleinern, so würden unsere tiefsten Bohrungen noch nicht einmal dem Anritzen der Schale entsprechen. Durch Bohrungen in größere Tiefen vorzustoßen, übersteigt derzeit die technischen Möglichkeiten, die hohen Drücke (in 14 km Tiefe etwa 4 kbar) und Temperaturen (in 14 km Tiefe etwa 300°C) erfordern neue Lösungen.

Vulkanische Tätigkeit – Die größte Tiefe, aus der Magma an die Erdoberfläche dringt und dabei die verschiedenen Formen des Vulkanismus hervorbringt, findet sich an der Grenzschicht zwischen dem äußeren Kern und dem unteren Mantel, wie das zum Beispiel bei Plumes zu beobachten ist. Das bei einer Eruption zu Tage geförderte Material stammt also teilweise aus dem Mantel und kann entsprechend analysiert werden.

Weiteren Aufschluss über die Manteleigenschaften kann man über die Erforschung der mittelozeanischen Rücken gewinnen. Der hier direkt unter der Plattengrenze liegende Mantel steigt auf, um den Raum in den entstehenden Lücken zu füllen. Normalerweise schmilzt das Mantelgestein dabei durch die Druckentlastung und bildet nach Erkalten die neue Ozeankruste auf dem Meeresboden. Diese rund 8 km mächtige Kruste versiegelt den Zugang zum ursprünglichen Mantelgestein. Eine interessante Ausnahme bildet möglicherweise der mittelozeanische Rücken zwi-

schen Grönland und Russland, der Gakkel-Rücken, der weniger als 1 cm pro Jahr der langsamste spreizende Rücken der Erde ist. Der Erdmantel steigt hier nur sehr langsam auf. Daher bildet sich keine Schmelze und in Folge dessen auch keine Kruste. Das Mantelgestein könnte also direkt am Meeresboden zu finden sein.

Seismik – Die Erde wird täglich von Erdbeben erschüttert, die weltweit von Messstationen registriert werden. Wäre die Erde ein homogener Körper, könnte man genau ausrechnen, wann die sich gleichmäßig in alle Richtungen durch den Erdkörper ausbreitenden Erdbebenwellen bestimmte Orte erreichen. Die tatsächlichen Beobachtungen widerlegen diese Annahme. Die seismischen Signale treten verzögert oder vorzeitig auf. Das lässt nur eine Schlussfolgerung zu: Die seismischen Wellen durchqueren Materie unterschiedlicher Dichte, denn je flüssiger Materie ist, desto langsamer wird sie von Erdbebenwellen durchquert. Im Jahre 1912 hatte Beno Gutenberg erstmals die Grenze zwischen dem silikatischen Mantelmaterial und dem Nickel-Eisen-Kern in einer Tiefe von 2.900 km ausgemacht. Kurz zuvor entdeckte der kroatische Geophysiker Andrija Mohorovicic die nach ihm benannte Unstetigkeitsfläche zwischen Erdkruste und Erdmantel. Beides war möglich, weil markante Sprünge in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Erdbebenwellen – so genannte »seismische Diskontinuitäten« – gemessen werden konnten. Neben den seismischen Diskontinuitäten lassen sich auch »chemische Diskontinuitäten« beobachten. Sie beruhen auf einer plötzlichen Änderung der chemischen Zusammensetzung im Erdinneren. Im Allgemeinen stimmen beide Diskontinuitäten an den Grenzen Kern-Mantel und Mantel-Kruste überein. Es gibt jedoch Ausnahmen: In der »Übergangszone« gibt es Dichtesprünge ohne Änderung der chemischen Zusammensetzung. Man geht davon aus, dass sie durch Phasenumwandlung entstanden sind, wobei sich ein Mineral in einer bestimmten Tiefe in ein neues, dichteres Mineral derselben Zusammensetzung umbildet.

Meteoriten, Alter der Erde – Unsere Vorstellungen über den Stoffbestand des Erdinneren beruhen neben den oben genannten Methoden auf Analogieschlüssen anhand der Zusammensetzung von Meteoriten. Meistens wird angenommen, dass die chemische Gesamtzusammensetzung der Erde ähnlich derjenigen von chondritischen Meteoriten ist, da diese vermutlich wiederum den Planetesimalen, aus denen die Erde gebildet wurde, ähneln. Die weitaus überwiegende Zahl der Meteorite stammen von Asteroiden aus dem Asteroidengürtel.

Hin und wieder bewirken Bahnstörungen, dass kleine Körper als Meteoriten auf die Erdoberfläche stürzen. Rund ein Zehntel besteht fast gänzlich aus Eisen, der Rest aus verschiedenen Gesteinen. Grob vereinfacht kann man sagen, dass reine Eisen-Meteorite und Stein-Eisen-Meteorite aus dem Kern beziehungsweise dem Übergangsbereich Kern-Mantel von differenzierten Asteroiden stammen, Stein-Meteorite von undifferenzierten Asteroiden oder aus dem Mantel oder Kruste von differenzierten Asteroiden.

Meteoriten spielen außerdem eine große Rolle in der Datierung des Sonnensystem und auch der Erde. So wurde auf das Alter der Erde von 4,55 Milliarden Jahren zuerst in den 1950ern von Clair Cameron Patterson und Fritz G. Houtermans mittels Uran-Blei-Datierung an dem Eisenmeteoriten Canyon Diablo geschlossen. Datierungsmethoden basierend auf anderen Isotopensystem (zum Beispiel ^{87}Rb - ^{87}Sr , ^{147}Sm - ^{143}Nd) haben seither dieses Alter bestätigt. Das älteste auf der Erde gefundene Material sind Zirkon-Kristalle in Westaustralien mit einem Alter bis zu 4,4 Milliarden Jahre, was somit eine untere Grenze des Erdalters bildet.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Innerer_Aufbau_der_Erde. Historie: 4.8.04: Angelegt von Srbauer, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Saperaud, Arnomane, BWBot, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Erdmagnetfeld

Das Erdmagnetfeld ist ein Magnetfeld, dass die Erde umgibt. An der Erdoberfläche hat dieses Feld die Form eines magnetischen Dipols, wie es auch von einem sehr kleinen Stabmagneten erzeugt wird. Die Feldlinien treten auf der Südhalbkugel (dem magnetischen Nordpol der Erde) aus dem Kern aus und durch die Nordhalbkugel (dem magnetischen Südpol der Erde) wieder in den Kern ein. Das Erdmagnetfeld rührt jedoch nicht von einer Art Stabmagneten, sondern von dem so genannten Geodynamo her.

Geschichte

Im Jahre 1600 veröffentlichte der englische Arzt und Naturphilosoph William Gilbert sein Werk *De Magnete*, in dem er erstmals erkannte, dass die Erde die Ursache für die Ausrichtung der Kompassnadel ist. Messungen durch Henry Gellibrand in London ergaben zudem, dass das Magnetfeld nicht statisch ist, sondern sich langsam ändert.

Seit der ersten Vermessung in den 1830er Jahren hat sich die Stärke des Erdmagnetfeldes um fast 10 Prozent verringert, in den letzten hun-

dert Jahren allein um etwa sechs Prozent. Diese gewaltig schnelle Änderung ist noch nicht zu erklären, da selbst dann, wenn der Geodynamo sofort ausfallen würde, das Erdmagnetfeld sich viel langsamer in einem Zeitraum von 10.000 Jahre abbauen würde.

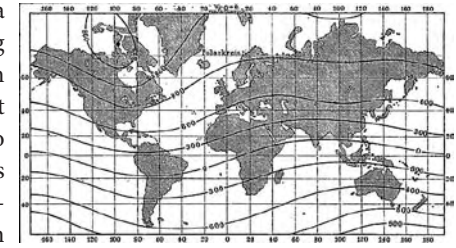


Abb. 48: Inklinationskarte für 1860

Man vermutet daher, dass sich das Erdmagnetfeld momentan umpolt und zurzeit ein Gegenfeld aufgebaut wird, welches das Erdmagnetfeld weit schneller vorübergehend zum Erliegen bringt.

Die magnetischen Pole sind nicht ortsfest, sie wandern derzeit etwa 7,5 Kilometer pro Jahr.

Aufbau

Das Erdmagnetfeld ist größtenteils statisch. Es weist in Nord-Süd-Richtung, also richtet sich eine Kompassnadel in diese Richtung aus. Dieser Umstand wird zur Navigation eingesetzt und war den Chinesen und Mongolen schon vor mehreren tausend Jahren bekannt. Die magnetischen Pole des Erdmagnetfeldes (die Pole, auf die die Kompassnadel zeigt) fallen aber nicht genau mit den geografischen Polen der Erdachse zusammen, sondern sind derzeit um etwa $11,5^\circ$ gegenüber der Erdachse geneigt. Daher unterscheidet man den geografischen Nordpol und Südpol, die durch die Richtung der Erdachse bestimmt sind, von den magnetischen Polen.

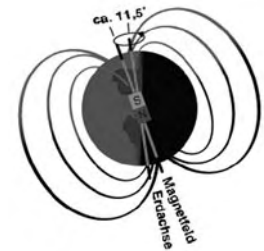


Abb. 49: Das Erdmagnetfeld ist gegenüber der Erdachse geneigt

In der Geophysik wird ein weiteres Polpaar definiert und verwendet, die geomagnetischen Pole, die sich von den magnetischen Polen um über 1.000 km unterscheiden. Sie sind so definiert, dass man sich das Erdmagnetfeld durch das Magnetfeld eines Stabmagneten erzeugt vorstellen kann.

Das Magnetfeld der Erde lenkt die geladenen Teilchen des Sonnenwindes ab. Satellitenmessungen ergeben, dass es durch diesen Sonnenwind auf der sonnenabgewandten Seite in großen Höhen stark verformt ist und nicht mehr einem Dipolfeld entspricht, es bildet sich sogar ein

Plasmaschweif aus. Durch magnetische Stürme, die durch den Sonnenwind verursacht werden, wird die Stärke des Feldes zudem kurzzeitig verändert, jedoch nur im Bereich von einigen 100 nT.

Die Stärke des Magnetfeldes der Erde ist mit etwa 30 bis 60 μT relativ klein, jedoch ist dieser Wert nur etwa ein Prozent der Feldstärke im Erdinneren. Aufgrund von magnetischen Materialien innerhalb der Erde treten kleine lokale Abweichungen (Anomalien) des Feldes auf. Im Jahr 2005 ergaben Messungen, dass das Erdmagnetfeld im Wesentlichen nur vier ausgedehnten Regionen der Übergangzone zwischen Kern und Mantel entspringt. So konzentriert sich der magnetische Fluss auf Regionen in Nordamerika, Sibirien und die Küste der Antarktis. Diese Flecken entstehen und vergehen wohl über Jahrtausende und sind Zeugen der Veränderung der Konvektionsströme im Erdinneren.

Das Erdmagnetfeld ist nicht parallel zur Erdoberfläche, sondern tritt mit einem Inklinationwinkel in die Oberfläche ein. Diesen Winkel der Feldlinien kann man durch eine horizontal aufgehängte Kompassnadel bestimmen. Er beträgt in Deutschland etwa 60° gegenüber der Horizontalen. Am Nordpol und Südpol ist er etwa 90° , am Äquator 0° .

Entstehung des Erdmagnetfeldes

Über die Entstehung des Erdmagnetfeldes gibt es verschiedene Theorien. Sicher ist, dass das Magnetfeld der Erde vom Erdkern ausgeht.

Für die Entstehung von planetaren Magnetfeldern müssen allgemein folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Es muss eine große Menge einer elektrisch leitenden Flüssigkeit oder eines solchen Gases vorhanden sein. Diese Bedingung erfüllt auf der Erde der flüssige äußere Erdkern, der stark eisenhaltig ist und den inneren festen Kern aus nahezu reinem Eisen umschließt.
- Es muss eine Energiequelle vorhanden sein, durch die sich das leitende Material bewegt. Der Erdkern ist etwa 5.000 Grad Celsius heiß, also in etwa so heiß wie die Sonnenoberfläche. Neben thermischer Energie aus der heißen Vergangenheit der Erde und Wärme durch den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium ist außerdem noch chemische Energie für die Wärme im Erdinneren verantwortlich. Wie in einer Lavalampe steigt heißes flüssiges, und damit weniger dichtes, Eisen im Erdkern zum Mantel auf, wo es einen Teil seiner Wärme abgibt und wieder absinkt (Konvektion). Erstarrt das Eisen wieder am festen Erdkern, so wird Bindungsenergie frei, was zur erneuten Aufheizung des Materials führt.

- Der Planet muss rotieren. Wie die Luftmassen der \rightarrow Erdatmosphäre werden auch die Konvektionsströme im Erdinneren durch die *Corioliskraft*, also durch ihre eigene Trägheit, abgelenkt und auf eine Schraubenbahn gezwungen.

Als eine Ursache des Erdmagnetfeldes gelten Konvektionsströme im äußeren flüssigen Erdkern, die durch den Temperaturunterschied zwischen dem festen inneren Erdkern und dem Erdmantel aufrecht erhalten werden. Dabei handelt es sich um flüssiges Eisen mit insgesamt dem sechsfachen Mondvolumen. Ähnlich dem in Dynamos und Stromgeneratoren angewandten Prinzip der Autoinduktion wird durch die Bewegung der elektrisch leitfähigen Schmelze ein elektrischer Strom induziert, von dem das Magnetfeld der Erde ausgeht. Das Erdmagnetfeld wird also aus der kinetischen Energie des Erdkerns erzeugt. Die Konvektion der Schmelze kann auch als Rotationsbewegung angesehen werden, die das Bestreben hat, die ursprüngliche Richtung der Rotationsachse, ähnlich dem Foucaultschen Pendel, beizubehalten. Daher liegen die magnetischen Pole etwa in der Nähe der geografischen Pole.

Einer anderen, von vielen Wissenschaftlern vertretenen Theorie zufolge tragen weiterhin auch die besonders vom \rightarrow Mond, aber auch von der Sonne und anderen Himmelskörpern ausgehenden Gezeitenkräfte zur Entstehung des Erdmagnetfeldes bei: Durch die Gezeitenkräfte wird die Erde in ihrer Rotation allmählich abgebremst. Die Gezeitenkräfte wirken dabei auf den Erdmantel stärker ein als auf den Erdkern, denn der größere Radius des Erdmantels führt zu einem größeren Unterschied der Anziehung durch den Mond, da die dem Mond zu- und abgewandten Bereiche des Erdmantels weiter voneinander entfernt sind als die entsprechenden Bereiche des Erdkerns. In der Konsequenz bedeutet die stärkere Abbremsung des Erdmantels, dass der innere Erdkern ein wenig schneller rotiert als der Erdmantel, was nicht zuletzt durch die Wirkung des äußeren flüssigen Erdkerns als Schmiermittel ermöglicht wird. Durch die schnellere Rotation des festen Erdkerns gegenüber dem Erdmantel wird ein elektrischer Strom induziert, der das Erdmagnetfeld hervorruft.

Mittlerweile kann man diese als *Superrotation* bezeichnete schnellere Drehung des Erdkerns tatsächlich nachweisen: Erdbebenwellen verschiedener Erdbeben vom gleichen Entstehungsort, die durch den Erdkern laufen, werden mit wachsendem Zeitabstand immer unterschiedlicher im Erdkern abgelenkt (unterschiedlicher Ankunftspunkt auf der gegenüberliegenden Erdseite). Die Ablenkungsunterschiede rühren sehr wahr-

scheinlich von Inhomogenitäten des inneren festen Kerns her, die durch eine leicht schnellere Drehung des Kerns ihren Ort ändern. Aus diesen Analysen ergibt sich, dass der innere Erdkern $0,3^\circ$ bis $0,5^\circ$ pro Jahr schneller als der Erdmantel und die Erdkruste rotiert. Damit macht er etwa alle 900 Jahre eine zusätzliche Drehung. Man geht jedoch aktuell davon aus, dass diese Superrotation durch den Geodynamo selbst und nicht durch die Gezeiten angetrieben wird, das heißt, dass die Superrotation eine Folge, aber nicht die Ursache des Geodynamos ist.

Paläomagnetismus und die Umpolung des Erdmagnetfeldes

Eisenhaltiges Gestein, das oberhalb des Curiepunktes erhitzt wird und sich dann abkühlt, wird in Richtung des äußeren Magnetfeldes, normalerweise des Erdmagnetfeldes, magnetisiert. Dies trifft für Vulkangestein zu, tritt aber auch bei Ziegeln oder Tongefäßen auf. Dadurch wird die damalige Magnetfeldrichtung gleichsam eingefroren und kann bis heute bestimmt werden. Das entsprechende wissenschaftliche Fach heißt Paläomagnetismus.

Aufgrund der Rekonstruktion des Paläomagnetfeldes an erstarrter Magma der ozeanischen Kruste, die sich im Rahmen der Plattentektonik am mittelozeanischen Rücken ständig nachbildet, weiß man, dass sich das Erdmagnetfeld im Mittel etwa alle 250.000 Jahre umkehrt. Zuletzt hat sich dies allerdings bereits vor etwa 780.000 Jahren ereignet. Der Polsprung, also die magnetische Feldumkehr, geschieht dabei in einer relativ kurzen Zeitspanne von



Abb. 50: Wanderung des magnetischen Nordpols

4.000 bis 10.000 Jahren. Offenbar verursachen Störungen im Geodynamo die Aufhebung der ursprünglichen Polarität. Umpolungen sind bis vor etwa 100 Millionen Jahren gut dokumentiert. Da das Magnetfeld derzeit abnimmt, könnte in nicht allzu ferner Zukunft eine Umpolung bevorstehen (Schätzung: Jahr 3000–4000), diese Vermutung ist wissenschaftlich jedoch noch nicht gesichert. Allgemein ist zu beobachten, dass die Häufigkeit der Polsprünge in den letzten 120 Millionen Jahren zunimmt.

Während der Phase der Umpolung wäre die Erde schutzlos dem Sonnenwind ausgesetzt. Das korrespondiert mit der Beobachtung, dass in den entsprechenden Sedimentschichten gehäuft ein Artenwechsel von Kleinorganismen festgestellt werden konnte. Möglicherweise war daher die Oszillation des Erdmagnetfeldes und die damit einhergehenden DNA-Mutationen durch hochenergetische Strahlung ein Schrittmacher und zugleich bedeutender Antrieb der Evolution.

Es gibt einige Anzeichen für eine bevorstehende Polumkehr. So gibt es Stellen in der Kern-Mantel-Zone, wo die Richtung des Magnetflusses umgekehrt ist als für die jeweilige Hemisphäre üblich. Die größte dieser Regionen erstreckt sich südlich unter der Südspitze Afrikas nach Westen bis unter die Südspitze Südamerikas. Weitere Flussrichtungswechsel zeichnen sich unter der Ostküste Nordamerikas und unter der Arktis ab. Diese Bereiche vergrößern sich messbar und bewegen sich immer weiter polwärts. Mit diesem Phänomen lässt sich die Schwächung und anschließende Umkehrung des Dipolfeldes erklären.

Beobachtung des Magnetfeldes

Derzeit wird das Magnetfeld in über 200 Laboratorien weltweit ständig gemessen und überwacht. Die Gesamtheit des Erdmagnetfeldes wird von Satelliten gemessen. Den Anfang markierte der NASA-Satellit Magsat im Jahre 1980, die momentan genauesten Daten liefert seit 2000 Champ, der vom Geoforschungszentrum Potsdam entwickelte Minisatellit. Seine Messungen erreichen in Stärke und Richtung eine überaus große Genauigkeit von 0,0002 Prozent. Seit Neuestem werden auch Computer für Simulationen eingesetzt, um herauszufinden, wie sich das Erdmagnetfeld in Zukunft verändern könnte beziehungsweise was die Ursachen für historische Veränderungen waren. Ergänzt werden diese Untersuchungen durch meist aufwändige Laborversuche.

Geomagnetik – Neben den globalen Messungen werden magnetische Messungen in großer Zahl für die Angewandte Geophysik und Erkundung von Lagerstätten vorgenommen. Nicht zuletzt sind Richtungsmessungen mit Magnetsonden und Kompassen für Zwecke der Navigation und Geodäsie zu erwähnen.

Die Südatlantikanomalie – Anfang der 1990er Jahre wurde durch Satellitenmessungen festgestellt, dass die Stärke des Erdmagnetfeldes über dem südlichen Atlantik wesentlich schwächer ist. Es existiert sozusagen ein Loch, durch das leichter hochenergetische Partikel fließen können. Es

wird vermutet, dass dieses Loch daher rührt, dass das Zentrum des magnetischen Feldes etwa 450 km vom geografischen Erdzentrum abweicht und die magnetischen von den geografischen Erdpolen abweichen. Der erhöhte Partikelstrom beeinflusst die Raumfahrt insofern, als Satelliten und Raumfahrzeuge, die die Anomalie während ihres Orbit überfliegen, einer stärkeren Strahlung ausgesetzt sind als gewöhnlich. Dies ist für bemannte Raumflüge wichtig, aber es erhöht auch den Verschleiß von Solarzellen, die sich zur Energieversorgung auf der Erde befinden.

Orientierung am Erdmagnetfeld

Einige Tiere, so zum Beispiel Blindmäuse, Brieftauben, Zugvögel, Meeresschildkröten, Haie und wahrscheinlich auch Wale nutzen das Erdmagnetfeld zur Orientierung.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Erdmagnetfeld>. Historie: 14.11.03: Angelegt von Hubi, danach bearbeitet von den Hauptautoren Hubi, Per aspera ad Astra, Arnomane, Root 42, Wolfgangbeyer, Schusch, Saperaud, Wolfgang1018, TomCatX, Stefan Kühn, Stern, Wissen, Zinnmann, Pikarl, Fristu, ChristophDemmer, Zwobot, MatthiasBauer, ErikDunsing, Darkone, ECeDee, MalteAhrens, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Plattentektonik

Die Plattentektonik ist die derzeit wichtigste Theorie der Geologie und Geophysik für die großräumigen Abläufe in der Erdkruste. Die Plattentektonik beschreibt die Bewegungen der Lithosphären-Platten – die so genannte Kontinentalverschiebung – und die damit verbundenen Folgen. Zu diesen zählen die Entstehung von Faltegebirgen (Orogenese) und Tiefseerinnen durch den Druck der Platten sowie die Phänomene der Erdbeben und des Vulkanismus (vgl. Farbtafeln Abb. 138).

Allgemeines

Grundlegend für die Plattentektonik ist die fragmentierte Struktur der Lithosphäre, die in sieben große Platten gegliedert ist:

- die Pazifische und die Antarktische Platte,
- die Nord- und die Südamerikanische Platte,
- die Afrikanische und die Eurasische Platte,
- sowie die Indisch-Australische Platte.

Daneben gibt es noch einige kleinere Platten wie zum Beispiel die Karibische Platte, die Cocosplatte, die Nazcaplatte, die Somaliplatte, die Ara-

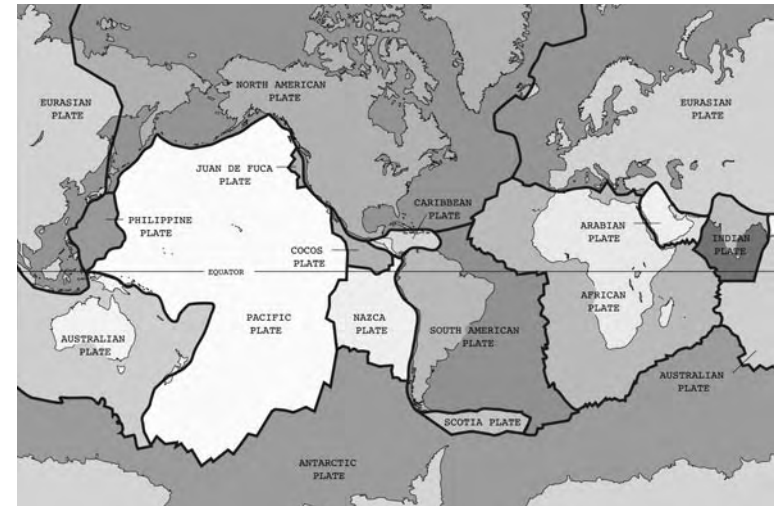


Abb. 51: Plattentektonik: Tektonische Platten mit Kontinenten (Hintergrund)

bische Platte und die Philippinische Platte), über deren Zusammenhang jedoch unterschiedliche Angaben vorliegen.

Die Platten sind durch Mittelozeanische Rücken oder durch Tiefseerinnen voneinander getrennt. An den Rücken entsteht aus basaltischem Magma, das aus dem Oberen Erdmantel emporsteigt, neue ozeanische Kruste, was man *Ozeanboden-Spreizung* oder *Seafloor Spreading* nennt.

In den Tiefseerinnen sinkt die Kruste wieder in den Mantel ab und wird »verschluckt« (subduziert). Die eigentlichen Kontinentalblöcke aus vorwiegend granitischem Material werden – zusammen mit den umgebenden Ozeanböden – wie auf einem langsamen Fließband von den Spreizungszonen weg und zu den Subduktionszonen hin geschoben. Nur eine Kollision mit einem anderen Kontinent kann diese Bewegung aufhalten. Da die kontinentale Kruste aber spezifisch leichter als jene der Ozeanböden ist, kann sie nicht mit dieser zusammen in die Subduktionszone abtauchen.

Gebirgsbildung und Vulkanismus im Licht der Plattentektonik

Heute geht man davon aus, dass die meisten gebirgsbildenden und vulkanischen Prozesse an die Plattenränder gebunden sind.

Mittelozeanische Rücken – Die Mittelozeanischen Rücken werden (als so genannte Rücken und Schwellen) als die größten zusammenhängenden Ge-

birgssysteme des Planeten Erde angesehen. Dort herrschen aber expansive Kräfte vor, so dass die Gesteine nicht gefaltet werden. Statt dessen herrscht Bruchtektonik mit der Bildung von tektonischen Gräben und Horsten vor. Charakteristisch für die Mittelozeanischen Rücken sind Transformstörungen, die die vulkanisch aktiven Zentralgräben in unregelmäßigen Abständen etwa rechtwinklig zerschneiden und die einzelnen Abschnitte gegeneinander versetzen. Auch die Transformstörungen sind seismisch aktiv, weil sich hier die tektonischen Spannungen entladen, die durch Plattenbewegungen schräg zu den zentralen Rücken aufgebaut werden. Ein bekanntes Beispiel ist die erdbebengefährdete San-Andreas-Verwerfung in Kalifornien, die die kleine Gorda-Platte von der Pazifischen Platte trennt.

Ein eigentümliches vulkanische Phänomen, das an die Mittelozeanischen Rücken gebunden ist, sind die Black Smoker – hydrothermale Schlote, an denen überhitztes, mineralgesättigtes Wasser austritt.

Intrakontinentale Gräben – Auch die tektonischen Gräben, die wie das Rift-Valley in Ostafrika als die allererste Phase der Ozeanbildung aufgefasst werden, sind mit vulkanischer Aktivität verbunden. Charakteristisch ist hier die Aufwölbung der umgebenden kontinentalen Kruste, die zur Heraushebung von ausgedehnten Grundgebirgs-Massiven oder Schilden führt. Gerade die ungewöhnliche durchschnittliche Höhenlage des Afrikanischen Schildes lässt viele Wissenschaftler vermuten, dass sich unter dem afrikanischen Kontinent eine stationäre Wärmequelle befindet, die die Kruste aufwölbt und zerreißt.

Bei zunehmender Ausweitung der Bruchzonen bilden sich schmale, langgezogene Meeresbecken, wie das Rote Meer, die sich mit der Zeit zu echten Ozeanen ausweiten können.

Kordilleren- oder Andentyp – Der klassische Kordillereotyp der Kettengebirge findet sich über den Subduktionszonen, in denen ozeanische Kruste direkt unter kontinentale Kruste subduziert wird, wie an der Westküste Amerikas. Hier herrschen besonders komprimierende Bedingungen, die die Gesteinspakete herausheben, in tektonischen Decken übereinander schieben und falten. In größeren Tiefen kann es in diesen Zonen durch die erhöhten Drucke und Temperaturen auch zu Regional-Metamorphosen und Aufschmelzungen (Anatexis) kommen. Es ist nicht ganz klar, warum die Subduktion an der Ostküste Asiens und in den Tiefseerinnen des West-Pazifiks, wie dem Marianen- und dem Tonga-Graben, zur Bildung von gekrümmten Inselbögen wie den Aleuten oder den japanischen Inseln führt.

Wahrscheinlich ist die relative Geschwindigkeit der aufeinander treffenenden Platten entscheidend. Während der amerikanische Kontinent die Pazifische Platte mit großer Geschwindigkeit überfährt, können sich zwischen den asiatischen Inselbögen und dem vorlagernden Kontinent noch so genannte »Back-arc Basin« entwickeln. In beiden Fällen werden jedoch die subduzierten Platten in der Hitze des Oberen Mantels aufgeschmolzen, und die erhitzten andesitischen bis granitischen Magmen dringen durch die Gesteine der überlagernden Faltengebirge bis an die Oberfläche. Dort speisen sie die zum Teil hochexplosiven vulkanischen Eruptionen.

Bei der Kollision von kontinentaler mit ozeanischer Kruste wird der Ozeanboden nicht immer vollständig subduziert. Kleine Reste von Meeresbodensedimenten und basaltischem Material (Ophiolithen) werden zuweilen bei der Subduktion von ihrer Unterlage abgeschabt und versinken nicht im Oberen Mantel. Stattdessen werden sie, zusammen mit den Gesteinen des Kontinentalrandes, deformiert, gefaltet und in die jeweiligen Gebirgsgürtel integriert. In der Regel werden diese Gesteinspakete keilförmig auf den Kontinentalrand aufgeschoben (Akkretionskeil) und so Teil der kontinentalen Kruste. Besonders an der Westküste Nordamerikas finden sich Anzeichen, dass die Kontinente auch durch die Kollision mit »Mikrokontinenten« und Inselbögen immer mehr Kruste ansetzen. Wenn in einem Faltengebirge, wie etwa dem Himalaja oder den Alpen, Ophiolithen gefunden werden, so deutet dies somit auf die ehemalige Existenz von ganzen Ozeanen hin, die zwischen zwei Kontinentalplatten verschwunden sind.

Kollisionstyp – Wenn die ozeanische Kruste zwischen zwei Kontinentalblöcken vollständig subduziert worden ist, kommt es zum Kollisionstyp der Gebirgsbildung, wie zum Beispiel beim Zusammenstoß des indischen Subkontinents mit der eurasischen Landmasse im Himalaja.

Das Bild kann aber bei schrägem Aufeinandertreffen der Blöcke und Vorhandensein von »Mikrokontinenten« wie der Apenninhalbinsel im Mittelmeer viel komplizierter werden. Es scheint, dass die ozeanische

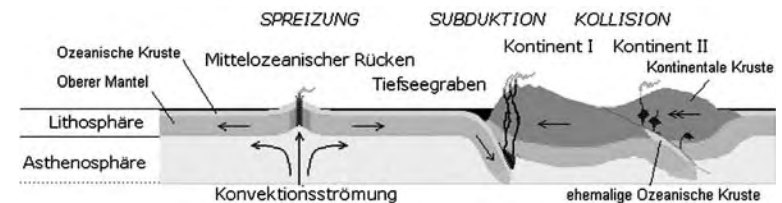


Abb. 52: Das Prinzip der Plattentektonik (nicht maßstäblich)

Mittelmeerkruste zeitweilig sowohl unter die Afrikanische als auch unter die Eurasische Platte subduziert wurde, während die Iberische Halbinsel, der Sardo-korsische Block und die Apenninhalbinsel zwischen den großen Kontinentalblöcken im Gegenuhrzeigersinn rotiert wurden.

Daneben existieren auch Gebiete wie die südostasiatische Inselwelt oder die Karibik, in denen zwei ozeanische Platten in gegenläufigem Sinn unter eine andere ozeanische Platte subduziert werden. Nicht zufällig gehören die vulkanischen Eruptionen in diesen Gegenden zu den gewaltigsten überhaupt.

Hot Spots – Es ist nicht ganz klar, wie der so genannte Hot-spot-Vulkanismus in dieses Bild passt. Sowohl auf Island wie auf Hawaii werden aus stationären Magmakammern im Oberen Mantel, den so genannten Diapiren oder Plumes, basaltische Laven gefördert. Während Island jedoch genau auf dem Mittelatlantischen Rücken liegt und vielleicht aktiv an der Spreizung des Nordatlantiks beteiligt ist, befindet sich Hawaii mitten in der Pazifischen Platte. Die langen Inselketten des Südpazifiks erklären sich dadurch, dass die ozeanische Kruste kontinuierlich über einen stationären Hot Spot gegliedert ist, dessen Vulkanschote in regelmäßigen Abständen den Ozeanboden durchschlägt haben.

Zumindest für die Inseln von Hawaii weisen neue Erkenntnisse darauf hin, dass es sich dort nicht um einen stationären, sondern um einen beweglichen Hot Spot handelt. Die Wissenschaftler untersuchten die magnetische Ausrichtung im ehemals geschmolzenen Gestein. Die Ergebnisse decken sich nicht mit der bisherigen Annahme, sondern legen die Vermutung nahe, dass sich die Wärmequelle unter der tektonischen Platte bewegt.

Plattentektonik auf anderen Himmelskörpern

Nach dem bisherigen Stand der Forschung scheint der Mechanismus der Plattentektonik nur auf der Erde wirksam sein. Das ist für den kleinen Planeten \Rightarrow Mercur und für die großen Monde der Gasplaneten und den Erdmond noch plausibel. Die Lithosphäre dieser relativ zur Erde viel kleineren Himmelskörper ist im Verhältnis einfach zu dick, um in Form von Platten mobil sein zu können. Jedoch ist bei der fast erdgroßen \Rightarrow Venus schwer zu verstehen, warum eine Plattentektonik trotz starkem Vulkanismus nicht in Gang gekommen sein dürfte. Eine erhebliche Rolle könnte dabei das nur auf der Erde vorkommende freie Wasser spielen. Offensichtlich dient es hier bis hinab auf die Kristallgitterebene als reibungsminderndes »Schmiermittel«. Man weiß, dass an den Subduktionszonen der

Erde nicht nur die Sedimente im Akkretionskeil in die Tiefe gezogen werden, sondern mit ihnen jährlich Milliarden Tonnen Wasser. Auf der Venus ist dies einfach nicht vorhanden.

Der \Rightarrow Mars dagegen scheint eine Zwischenstellung zu beanspruchen. Wasser beziehungsweise Eis ist vorhanden, und man vermeint, Ansätze einer Plattentektonik erkennen zu können. Die aufgereihten gigantischen Schildvulkane und Grabensysteme, die den halben Planeten umspannen, erinnern in gewisser Weise an das Rifting auf der Erde. Dem steht wiederum das Fehlen von eindeutigen Verschlusszonen gegenüber. Wahrscheinlich reichte die innere Hitzeentwicklung und daraus folgende Konvektion auf diesem relativ kleinen Planeten nicht ganz aus, um den Mechanismus wirklich in Gang zu setzen, oder der Vorgang kam bereits in der Frühgeschichte des Planeten wieder zum Stillstand.

Ob eine Art Plattentektonik auf anders aufgebauten Himmelskörpern stattfindet, ist nicht bekannt, aber vorstellbar. Als Kandidaten für konvektionsgetriebene weiträumige horizontale Krustenverschiebungen können die Eismonde Europa und Enceladus gelten. Flüssiges Wasser oder weiches Eis könnte an linearen Schwächezonen aufsteigen, das stahlharte Eis der Kruste zur Seite drücken, was wiederum folgen ließe, dass andernorts Kruste verschluckt werden müsste. Die Oberfläche dieser Monde ist jedenfalls geologisch aktiv oder zumindest aktiv gewesen, was Mechanismen der Krustenerneuerung erfordert. Der Vulkanismus auf Io dagegen scheint derartig stark zu sein, dass stabile Krustenbereiche in der Art der Platten erst gar nicht entstanden sind

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Plattentektonik> (gekürzt). Historie: 7.4.02: Angelegt von Kurt Jansson, danach bearbeitet von den Hauptautoren Galilea, Geoz, Pearl, Chd, Marc Tobias Wenzel, WHell, Geof, German angst, Saperaud, Zwobot, Arnomane, Anitagraser, TOMM, TomCatX, Nepheteres, Reykholt, Islandius, Kurt Jansson, Iwoelbern, Brudersohn, Lotse, AkaBot, Bjm, Arbo, Kku, Regiomontanus, Centic, Zellreder, Tsor, ErikDusing, Aberhorn, Atamari, Neumeier, Media lib, Citylover, BWBot, Wolfgangbeyer, Finanzer, Romankawe, Elya, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Erdatmosphäre

Die Erdatmosphäre (von griechisch *ατμός*, *atmós* »Luft, Druck, Dampf« und *σφαίρα*, *sfära* »Kugel«), die \Rightarrow Atmosphäre der \Rightarrow Erde, ist die gasförmige Hülle oberhalb der Erdoberfläche. Sie stellt eine der Geosphären dar, und ihr Gasgemisch, die Luft, ist durch einen hohen Anteil an Stickstoff und Sauerstoff und somit oxidierende Verhältnisse geprägt.

Geschichte

Die Geschichte der Erdatmosphäre ist ein Teil der chemischen Evolution unserer Planeten und durch vier wesentliche Entwicklungsstufen gekennzeichnet, die man auch als die vier Atmosphären bezeichnet.

Die erste Atmosphäre, die so genannte Uratmosphäre, ist mit der Erde selbst vor 4,6 Milliarden Jahren entstanden. Sie ging innerhalb einiger 100 Millionen Jahre jedoch wieder vollständig verloren. Verantwortlich hierfür waren vor allem das ständige Bombardement aus dem Weltall, was bedingt durch die sehr hohen Geschwindigkeiten der einschlagenden Objekte schließlich zu einer Aufschmelzung der Erde führte. Zu dieser sehr hohen Temperatur, die wohl schon allein genügt hätte, die frühe Gashölle der Erde aufzulösen, kam die Kernfusion in der Sonne. Der daraufhin einsetzende extrem starke \Rightarrow Sonnenwind beseitigte auch die letzten Reste der ersten Atmosphäre und wehte sie in die äußeren Bereiche des Sonnensystems.

Mit der Zeit nahmen die Intervalle und Intensitäten der Einschläge immer weiter ab, und die Erde konnte sich langsam über die Wärmestrahlung abkühlen. Der in der Folge auftretende Vulkanismus führte zu starken Ausgasungen und schuf damit die zweite Atmosphäre. Vor etwa vier Milliarden dürfte die damalige Atmosphäre zu etwa 80 % aus Wasserdampf, zu 10 % Kohlendioxid und zu 5 bis 7 % aus Schwefelwasserstoff sowie kleineren Spuren von Stickstoff, Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Helium, Methan und Ammoniak bestanden haben. Dabei handelt es sich um eben jene Produkte des Vulkanismus, wie wir sie auch heute noch beobachten können.

Der hohe Anteil des Wasserdampfs erklärt sich dadurch, dass die Atmosphäre zu diesem Zeitpunkt noch zu warm war, um Niederschläge bilden zu können, es gab also noch keine Gewässer auf der Erde. Dies änderte sich jedoch, es kam zu einem extrem langen Dauerregen, nach dessen Ende sich die Ozeane gebildet hatten. Die leichten Gase wie Wasserstoff oder Helium verflüchtigten sich in den Weltraum, andere wie Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff wurden in großen Mengen in den Ozeanen gelöst und lagerten sich durch chemische Reaktionen als Feststoffe am Ozeanboden ab. Die hohe UV-Einstrahlung bedingte zudem eine photochemische Zerlegung der Wasserdampf-, Methan- und Ammoniakmoleküle, wobei der hierdurch freigesetzte Wasserstoff wiederum ins Weltall entwich. Kohlenstoff- und Sauerstoffmoleküle sind chemisch sehr reaktiv und wurden durch die einsetzende Photosynthese sowie die stark reduzierenden Verhältnisse aus der Atmosphäre entzogen. Einzig unbeeindruckt

zeigte sich daher der inerte Stickstoff. Dieser sammelte sich mit der Zeit an, und so kam es vor etwa anderthalb Milliarden Jahren zur Ausbildung der dritten Atmosphäre mit den Hauptbestandteilen Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoff.

Der Sauerstoff spielte die Hauptrolle bei der Herausbildung unserer heutigen, der vierten Atmosphäre. Dabei spielte die Photosynthese eine dominante Rolle; andere Effekte wie die Photodissoziation des Wasserdampfs sind nahezu vernachlässigbar. Obwohl es jedoch wohl schon vor vier Milliarden Jahren erste photosynthetisch aktive Lebewesen gab, die Cyanobakterien, zeigte sich deren Effekt auf die Zusammensetzung der Erdatmosphäre erst sehr spät. Erst vor etwa zwei Milliarden Jahren überschritt die Konzentration des Sauerstoffs die Grenze von einem Prozent. Ursache war, dass der in den Ozeanen freigesetzte Sauerstoff chemisch sofort mit anderen Stoffen aus seiner Umgebung reagierte. Die Bändererze geben noch heute Zeugnis von dieser Etappe der Erdgeschichte. Nach diesem wichtigen Schritt nahm die Sauerstoffkonzentration vergleichsweise schnell zu; es kam zur Bildung von Ozon, das gerade für die Entwicklung des Lebens auf den Kontinenten eine entscheidende Rolle spielte. Der heutige Sauerstoffgehalt wurde schließlich vor 350 Millionen Jahren erreicht und blieb seitdem recht stabil.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Erdatmosphäre> (gekürzt). Historie: 28.4.03: Angelegt von Mikue, danach bearbeitet von den Hauptautoren Saperaud, Mikue, Dittmar-Ilgen, SiriusB, Jensob, Robbot, Robodoc, Hubi, Arnomane, Marilyn.hanson, FlaBot, Matthäus Wander, Nikai, Kku, Pit, Lotse, Joni2, Liberatus, Zwobot, Media lib, Brummfuss, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Mond

Der Erdmond (lateinisch *Luna*), der meist nur Mond genannt wird, ist der einzige natürliche Trabant der Erde. Von ihr abgesehen, ist er der einzige Himmelskörper, der jemals von Menschen betreten wurde und damit auch der am besten erforschte. Trotzdem birgt er noch viele Geheimnisse, etwa zu seiner \Rightarrow Entstehung und zu manchen Geländeformen. Die spätere Entwicklung und sein innerer Aufbau sind jedoch seit einigen Jahren weitgehend geklärt. Das Zeichen des Mondes ist eine Mondsichel: ☾ (vgl. Farbtafeln Abb. 151)

Bahn und Rotation des Mondes

Scheinbare Bewegung – Von der (rotierenden) Erdoberfläche aus betrachtet, umkreist der Mond die Erde von Osten nach Westen auf einer Bahn, die um 5,1 Grad gegen die Sonnenbahn geneigt ist. Seine scheinbare Bewegung ähnelt damit der der Sonne; sie dauert etwa 24 Stunden und 50 Minuten. Der Zeitpunkt des Mondauf- und -untergangs ist damit jeden Tag fast eine Stunde später. In 29 Tagen geht der Mond 28 Mal auf. Für einen Beobachter auf der Nordhalbkugel steht der Mond (wie auch die Sonne) an seinem höchsten Bahnpunkt im Süden, für einen Beobachter auf der Südhalbkugel im Norden. In Äquaturnähe kann man den Mond an seinem höchsten Punkt im Zenit sehen.

Mondbahn – Die Bahn des Mondes um die Erde ist eine Ellipse der Exzentrizität 0,055; die große Halbachse misst 384.400 Kilometer. Den erdnächsten Punkt der Bahn nennt man *Perigäum*. Er befindet sich 356.410 km vom Erdmittelpunkt entfernt. Der erdfernste Punkt heißt *Apogäum* und ist 406.740 km vom Erdmittelpunkt entfernt. Die Durchgänge des Mondes durch die Ekliptik nennt man *Mondknoten*, wobei der aufsteigende Knoten den Eintritt in die Nord-, der absteigende den in die Südhemisphäre beschreibt.

Der Mond umläuft zusammen mit der Erde die Sonne, durch die Bewegung um die Erde pendelt der Mond jedoch um eine gemeinsame Ellipsenbahn. Die Variation der Gravitation während dieser Pendelbewegung führt zusammen mit geringeren Störungen durch die anderen Planeten zu Abweichungen von einer exakten Keplerellipse um die Erde.

- Das Perigäum umläuft die Erde direkt mit einer Periode von 8,85 Jahren.
- Die Mondknoten umlaufen die Erde aufgrund einer Präzessionsbewegung retrograd, also gegen die Umlaufrichtung des Mondes, mit einer Periode von 18,61 Jahren. Sie bewirken daher eine schwache Modulation der Erdpräzession mit eben dieser Periode, die als *Nutation* bezeichnet wird.

Bahnperiode – Die Dauer eines Bahnumlaufs des Mondes (*Monat*) kann man nach verschiedenen Kriterien festlegen, die jeweils unterschiedliche Aspekte abdecken.

- Nach einem *siderischen* Monat (27,32 d) nimmt der Mond wieder die gleiche Stellung zu den Fixsternen ein.
- Nach einem *synodischen* Monat (29,53 d; Periode der Mondphasen) erreicht der Mond wieder die gleiche Stellung zur Erde.

- Einen *drakonitischen* Monat (27,2122 d) benötigt er, um wieder durch den gleichen Knoten seiner Bahn zu laufen; er ist wichtig für die Sonnen- und Mondfinsternisse.
- Einen *anomalistischen* Monat (27,555 d) benötigt der Mond von einem Perigäumdurchgang zum nächsten.

Mondphasen – Das Aussehen des Mondes variiert im Laufe seines Bahnumlafs und durchläuft die Mondphasen



Abb. 53: Die Mondphasen von Neumond über Vollmond zu Neumond

- Neumond – der Mond steht zwischen der Sonne und der Erde
- zunehmender Mond (abends sichtbar)
- Vollmond – die Erde steht zwischen der Sonne und dem Mond
- abnehmender Mond (morgens sichtbar)

Die nicht von der Sonne beleuchteten Teile der erdzugewandten Mondseite sind dabei nie völlig dunkel, sondern werden durch das



Abb. 54: Indirekte Aufhellung der erdzugewandten Seite des Mondes

Erdoberfläche und der Erdatmosphäre – indirekt ein wenig aufgehellt. Diese Aufhellung wird als aschgraues Mondlicht bezeichnet und ist am besten bei schmaler Mondsichel zu sehen.

Mondrotation – Durch die Gezeitenwirkung, die durch die Gravitation der Erde entsteht, hat der Mond seine Rotation der Umlaufzeit (siderischer Monat) angepasst (gebundene Rotation), das heißt, bei einem Umlauf dreht er sich einmal um die eigene Achse. Daher ist von der Erde aus immer die selbe Seite zu sehen. Die Rückseite des Mondes konnte 1959 erstmals durch Raumsonden beobachtet werden.

Wegen der gebundenen Rotation würde ein Beobachter auf dem Mond die Erde immer an der selben Stelle des Himmels sehen (abgesehen von leichten Schwankungen, die durch Librationen verursacht sind). Die Erde geht also niemals »auf« oder »unter«. Ein Beobachter auf der Mondrückseite kann die Erde dagegen niemals sehen. Wegen der fehlenden →Atmos-

phäre ist der Mondhimmel nicht blau, sondern schwarz. Sterne kann man jedoch auch auf dem Mond nur Nachts sehen, die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges stellt sich auf die hell leuchtende Mondoberfläche ein und kann die Sterne nicht mehr wahrnehmen. Die Erde erscheint als bläuliche Scheibe, fast viermal größer als der Mond von der Erde aus. Sie rotiert (in knapp 24 Stunden) und durchläuft Phasen, die den Mondphasen entsprechen und diesen entgegengesetzt sind. Bei Neumond herrscht »Vollerde« und bei Vollmond »Neuerde«.

Die Sonne wandert, vom Mond aus gesehen, sehr langsam über den Sternenhimmel. Von Sonnenaufgang bis zum Höchststand der Sonne dauert es eine Woche, und von dort eine weitere Woche bis zum Sonnenuntergang, worauf eine 14-tägige Nacht folgt. Ein Tag-Nacht-Zyklus auf dem Mond dauert somit einen Monat.

Finsternisse – Finsternisse treten auf, wenn Sonne, Erde und Mond auf einer Linie liegen, das heißt, nur bei Vollmond oder Neumond und wenn der Mond sich an einer der insgesamt vier Stellen befindet, an denen die Bahn des Mondes die Ekliptik schneidet – den so genannten Mondknoten. Dies passiert nur zweimal pro Jahr.

Mondfinsternis – Bei einer Mondfinsternis, die nur bei Vollmond auftreten kann, steht die Erde zwischen Sonne und Mond. Sie kann auf der gesamten Nachtseite der Erde beobachtet werden und dauert maximal 3 Stunden 40 Minuten. Man unterscheidet

- die *totale* Mondfinsternis, bei welcher der Mond völlig in den Erdschatten wandert. Die Totalität dauert höchstens 100 Minuten. Betrachtet man die geometrischen Verhältnisse bei einer totalen Mondfinsternis, so sollte der Mond im Kernschatten der Erde liegen, der sich theoretisch knapp 1,4 Millionen Kilometer in den Raum erstrecken sollte, tatsächlich aber wegen der starken Streuung durch die Erdatmosphäre nur etwa 250.000 Kilometer weit reicht. Der Mond wird deshalb auch bei totalen Finsternissen nicht völlig verdunkelt. Da die → Erdatmosphäre die blauen Anteile des Sonnenlichts stärker streut als die roten, erscheint der Mond bei totalen Finsternissen als dunkle rotbraune Scheibe.
- die *partielle* Mondfinsternis, bei der nur ein Teil des Mondes von der Erde abgeschattet wird, das heißt, ein Teil des Mondes bleibt während des gesamten Verlaufs der Finsternis sichtbar.

- die *Halbschattenfinsternis*, bei welcher der Mond nur (ganz oder teilweise) in den Halbschatten der Erde eintaucht. Halbschattenfinsternisse sind ziemlich unauffällig; es zeigt sich lediglich eine leichte Vergrauung derjenigen Mondseite, die dem Kernschatten der Erde am nächsten ist.

Vom Mond aus gesehen stellt sich eine Mondfinsternis als Sonnenfinsternis dar. Dabei verschwindet die Sonne hinter der schwarzen Erdscheibe. Bei einer totalen Mondfinsternis herrscht auf der ganzen Mondvorderseite totale Sonnenfinsternis, bei einer partiellen Mondfinsternis ist die Sonnenfinsternis auf dem Mond nur in einigen Gebieten total, und bei einer Halbschatten-Mondfinsternis herrscht auf dem Mond partielle Sonnenfinsternis. Ringförmige Sonnenfinsternisse gibt es auf dem Mond wegen des im Verhältnis zur Sonne viel größeren scheinbaren Durchmessers der Erdscheibe nicht; lediglich durch die beschriebene Lichtstreuung in der Erdatmosphäre wird der Rand der schwarzen Scheibe zu einem kupferrot schimmernden Ring, der dem Mond die entsprechende Farbe verleiht.



Abb. 55: Mondfinsternis

Sonnenfinsternis – Bei einer Sonnenfinsternis, die nur bei Neumond auftreten kann, steht der Mond zwischen Sonne und Erde. Sie kann nur in den Gegenden beobachtet werden, die den Kern- oder Halbschatten des Mondes durchlaufen; diese Gegenden stellen sich meist als lange, aber recht schmale Streifen auf der Erdoberfläche dar. Man unterscheidet:

- *totale* Sonnenfinsternis, bei der der Mond die Sonnenscheibe einige Minuten lang vollständig bedeckt und die Erde den Kernschatten (*Umbra*) des Mondes durchläuft
- *partielle* Sonnenfinsternis, bei welcher der Mond die Sonnenscheibe nicht vollständig bedeckt; der Beobachter befindet sich dabei im Halbschatten (*Penumbra*) des Mondes
- *ringförmige* Sonnenfinsternis, wenn der Mond durch zu große Entfernung die Sonnenscheibe nicht ganz abdeckt

Sarosperiode – Bereits den Chaldäern war (um etwa 1000 v. Chr.) bekannt, dass sich Finsternisse nach einem Zeitraum von 18 Jahren und 11 Tagen, der *Sarosperiode*, wiederholen. Nach 223 synodischen beziehungsweise 242 drakonitischen Monaten (von lat. *draco*, »Drache«, altes astrologisches Symbol für die Mondknoten, da man dort einen Mond- und Sonnenfressenden Drachen vermutete) besteht wieder fast dieselbe Stellung von Sonne, Erde und Mond zueinander, so dass sich eine Finsternisstellung nach 18 Jahren und 11,33 Tagen erneut ergibt.

Die Ursache dieser Periode liegt darin begründet, dass bei einer Finsternis sowohl die Sonne als auch der Mond nahe der Knoten der Mondbahn liegen müssen, welche in 18 Jahren einmal um die Erde laufen. Thales hat diese Periode, die er bei einer Orientreise kennenlernte, für seine Finsternisprognose 585 v. Chr. benutzt. Durch sie konnten die Griechen die militärisch überlegenen Perser besiegen.

Da die Übereinstimmung der 223/242 Monate nicht exakt ist, reißt die Sarosperiode etwa alle 1300 Jahre ab und eine neue beginnt.

Selenologie und Selenografie

Die Selenologie oder »Geologie des Mondes« beschäftigt sich mit seiner Entstehung, seinem Aufbau und seiner Entwicklung, sowie mit der Entstehung der beobachteten Strukturen und der dafür verantwortlichen Prozesse. Die Aufgabe der Selenografie besteht in der Erstellung von Mondkarten.

Eigenschaften und Entwicklung des Mondes – Der Mond hat einen Durchmesser von 3.476 km und weist mit 3,345 g/cm³ eine geringere Dichte als die Erde auf. Aufgrund seines, im Vergleich zu anderen Planeten, recht großen Größenverhältnisses zur Erde bezeichnet man Erde und Mond deshalb gelegentlich auch als Doppelplanet. Seine, im Vergleich zur Erde, geringe mittlere Dichte blieb auch lange ungeklärt und sorgte für zahlreiche Theorien zur Entstehung des Mondes.

Innerer Aufbau des Mondes – Unser Wissen über den Aufbau des Mondes beruht im Wesentlichen auf den Daten der vier von den Apollo-Missionen zurückgelassenen Seismometer, die diverse Mondbeben und Erschütterungen durch Meteoriteneinschläge aufzeichneten, sowie den Kartierungen der Oberfläche, des Gravitationsfeldes und der mineralischen Zusammensetzung durch die Clementine- und die Lunar-Prospector-Mission.

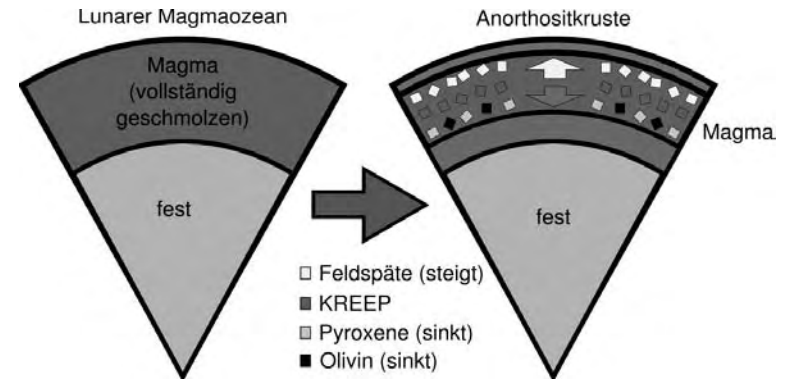


Abb. 56: Aufbau der äußeren Schichten des Mondes; KREEP: Kalium, Rare Earth Elements (d. h. Seltene Erden), Phosphor

Der Mond besitzt eine 70 (an der Mondvorderseite) bis 150 km (Rückseite) dicke Kruste, die von einer mehrere Meter dicken Regolithschicht bedeckt ist. Darunter liegt ein fester Mantel aus Basaltgesteinen. Es gibt Anzeichen für eine Unstetigkeitsfläche in 500 Kilometer Tiefe, an der ein Wechsel der Gesteinszusammensetzung vorliegen könnte. Der 200 bis 400 Kilometer große eisenhaltige Kern dürfte Temperaturen um 1.600 Grad Celsius aufweisen.

Die gebundene Rotation des Mondes hat auch Einflüsse auf Form und inneren Aufbau. Der Mond ist in Richtung Erde lang gezogen und sein Massenschwerpunkt liegt etwa 2 Kilometer näher zur Erde als sein geometrischer Mittelpunkt.

Mondbeben – Die zurückgelassenen Seismometer der Apollomissionen registrieren etwa 500 Mondbeben pro Jahr. Die Beben sind im Vergleich zu irdischen Beben sehr schwach, das stärkste erreichte eine Stärke von knapp 5 auf der Richterskala, die meisten liegen aber bei einer Stärke von 2. Die seismischen Wellen der Beben können ein bis vier Stunden lang verfolgt werden, sie werden im Mondinneren also nur sehr schwach gedämpft.

Mehr als die Hälfte der Beben entstehen in einer Tiefe von 800 bis 1.000 Kilometer und weisen Häufigkeitsspitzen beim Apogäum- und Perigäum-Durchgang auf, das heißt, alle 14 Tage. Auch sind Beben aus der

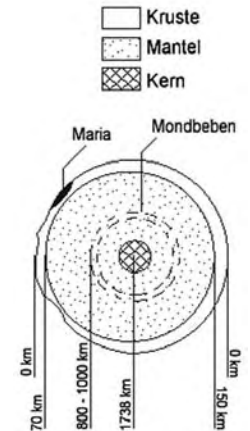


Abb. 57: Schematischer Aufbau des Mondes (links: Vorderseite, rechts: Rückseite)

oberflächennahen Region des Mondes bekannt. Die Ursache liegt darin, dass sich der Aufbau des Mondes dem Mittelwert der durch die Erde verursachten Gravitation angepasst hat. Durch die Beben werden die inneren Spannungen abgebaut, die am erdnächsten und erdfernten Punkt der Mondbahn ihr Maximum erreichen. Der Ursprung der Beben verteilt sich nicht gleichmäßig über eine komplette Mantelschale, sondern die meisten Beben entstehen an nur etwa 100 Stellen, die jeweils nur wenige Kilometer groß sind. Der Grund für diese Konzentration ist noch nicht bekannt.

Mascons – Durch ungewöhnliche Einflüsse auf die Bahnen der Lunar-Orbiter-Missionen erhielt man Ende der 1960er Jahre erste Hinweise auf Schwereanomalien, die man Mascons (*Mass concentrations*, Massenkonzentrationen) nannte. Durch Lunar Prospector wurden diese Anomalien näher untersucht, sie befinden sich meist im Zentrum der Krater und sind vermutlich durch die Einschläge entstanden. Möglicherweise handelt es sich um die eisenreichen Kerne der Impaktoren, die aufgrund der fortschreitenden Abkühlung des Mondes nicht mehr bis zum Kern absinken konnten. Nach einer anderen Theorie könnte es sich um Lavablasen handeln, die als Folge eines Einschlags aus dem Mantel aufgestiegen sind.

Mondoberfläche – Die Oberfläche des Mondes ist nahezu vollständig von einer trockenen, aschgrauen Staubschicht, dem Regolith, bedeckt. Der scheinbare »Silberglanz« wird einem irdischen Beobachter durch den Kontrast zum Nachthimmel nur vorgetäuscht, in Wirklichkeit hat der Mond sogar eine besonders geringe Albedo (Rückstrahlungsfähigkeit).

Die Mondoberfläche zeigt Kettengebirge, Gräben und Rillen (Fossa), flache Dome und große Magma-Ebenen, jedoch keinerlei aktive »Tektonik wie die Erde.

Regolith – Der Mond besitzt keine nennenswerte Atmosphäre, deshalb schlagen ständig Meteoriten jeder Größe ohne vorherige Abbremsung auf der Oberfläche ein und pulverisieren die Gesteine. Der durch diesen Prozess entstehende Regolith bedeckt bis auf die jungen Krater die gesamte Oberfläche mit einer mehrere Meter dicken Schicht, welche die Detailstruktur des Untergrundes verbirgt. Diese Deckschicht erschwert die Untersuchung der Strukturen und ihrer genauen Entstehungsgeschichte erheblich.

Der Regolith entsteht im Wesentlichen aus dem normalen Oberflächenmaterial, hat aber auch Beimengungen, die durch Einschläge an

die jeweilige Position verfrachtet wurden. Obwohl er gemeinhin als *Mondstaub* bezeichnet wird, entspricht der Regolith eher einer Sandschicht. Die Korngröße reicht von Staubkorngröße direkt an der Oberfläche über Sandkörner wenig tiefer bis hin zu Steinen und Felsen, die erst später hinzukamen und noch nicht vollständig zermahlen sind. Ein weiterer wichtiger Bestandteil sind kleine glasige Erstarrungsprodukte von Einschlägen. An manchen Stellen besteht der Regolith fast zur Hälfte aus diesen Agglutinaten, das heißt Glaskügelchen, die wesentliche Bestandteile des normalen mineralischen Regoliths enthalten. Sie entstehen, wenn die geschmolzenen Impaktprodukte erst nach dem Auftreffen auf die Regolithschicht erstarren.

Im Mondmeteoriten Dhofar 280, der im Jahr 2001 im Oman gefunden wurde, wurden neue Eisen-Silizium-Mineralphasen identifiziert. Eine dieser Mineralphasen (Fe_2Si), die damit erstmals in der Natur eindeutig nachgewiesen wurde, ist nach dem Forscher Bruce Hapke als Hapkeit benannt worden. Bruce Hapke hatte in den 1970ern die Entstehung derartiger Eisen-Verbindungen durch Weltraum-Erosion (engl. *Space Weathering*) vorhergesagt. Weltraum-Erosion ist für die zeitliche Veränderung speziell auch der optischen Eigenschaften (Reflexivität) der Oberfläche von atmosphärenlosen Körpern verantwortlich.

Der Mond hat kein nennenswertes Magnetfeld, das heißt, die Teilchen des Sonnenwindes – vor allem Wasserstoff, Helium, Neon, Kohlenstoff und Stickstoff – treffen nahezu ungehindert auf der Mondoberfläche auf und werden im Regolith implantiert, ähnlich der Ionenimplantation, die in Wissenschaft und Technik angewandt wird. Auf diese Weise bildet der Mond-Regolith eine Art »Klima«-Archiv des Sonnenwindes, vergleichbar den Gletschern in Grönland und der Antarktis für das irdische Klima. Dazu kommt noch, dass die kosmische Strahlung etwa einen Meter tief in die Mondoberfläche eindringt und dort durch Kernreaktionen (hauptsächlich Spallationsreaktionen) neue Elemente gebildet werden. Folge davon ist, dass Gesteine des Mondregoliths unter anderem bedeutend mehr Edelgase enthalten als irdische Gesteine oder auch als Meteoriten aus dem Asteroidengürtel. Insbesondere das ^3He könnte eines Tages für Fusionskraftwerke sogar wirtschaftlich bedeutend werden.

Da der Mondregolith durch Einschläge ab und zu umgewälzt wird, haben die einzelnen Bestandteile meist eine komplexe Bestrahlungsgeschichte hinter sich. Man kann jedoch durch radiometrische Datierungsmethoden für Mondproben oft herausfinden, zu welchem Zeitpunkt diese direkt oder nahe der Oberfläche waren und der kosmischen Strahlung und dem »Son-

nenwind ausgesetzt waren. Damit lassen sich Erkenntnisse über die kosmische Strahlung und den Sonnenwind zu diesen Zeitpunkten gewinnen.

Maria – Die dunklen Tiefebene der Mondvorderseite, die 16 Prozent der Mondoberfläche bedecken, hielt man früher für Meere. Sie werden deshalb nach Giovanni Riccioli als *Maria* (Singular *Mare*) bezeichnet. Sie bestehen aus 3,1 bis 3,8 Milliarden Jahre alten, dunklen Basalten, weisen nur wenige Krater auf und sind von einer 2 bis 8 Meter dicken Regolithschicht bedeckt, die reich an Eisen und Magnesium ist. Sie sind vermutlich durch große Einschläge in der Frühphase des Mondes entstanden. Da in diesem Entwicklungsstadium der Mantel noch flüssig war, sind sie anschließend mit Lava aus dem Inneren vollgelaufen.

Die Maria weisen, mit Ausnahme der Krater, nur sehr geringe Höhenunterschiede von maximal 100 Meter auf. Zu diesen Erhebungen gehören die *Dorsa* (Rücken), flache Aufwölbungen, die sich über mehrere Dutzend Kilometer erstrecken.



Abb. 58: Mare Imbrium mit dem großen Kopernikuskrater am oberen Bildrand (Apollo 17, NASA)

Terrae – Die Hochländer wurden früher als Kontinente angesehen und werden deshalb als *Terrae* bezeichnet. Sie weisen deutlich mehr Krater als die Maria auf und werden von einer bis zu 15 Meter dicken Regolithschicht bedeckt, die reich an hellem aluminiumreichen Anorthosit ist. Sie sind selenologisch älter als die Maria, die untersuchten Gesteine wurden auf 3,8 bis etwa 4,5 Milliarden Jahre datiert und sind vermutlich die Reste der ursprünglichen Mondkruste. Aus der Samarium-Neodym-Isotopensystematik von mehreren Mond-Anorthositen konnte ein Kristallisationsalter von $4,456 \pm 0,04$ Milliarden Jahren für diese Gesteine bestimmt werden, was als Bildungsalter der ersten Kruste und als Beginn der Kristallisation des ursprünglichen Magmazozeans interpretiert wird.

In den Hochländern gibt es mehrere Gebirge, die Höhen von etwa 10 Kilometern erreichen. Sie sind möglicherweise dadurch entstanden, dass der Mond infolge der Abkühlung geschrumpft ist und sich dadurch Faltengebirge aufwölbten. Nach einer anderen Erklärung könnte es sich um die Überreste von Kraterwällen handeln. Sie sind nach irdischen Gebirgen benannt worden, zum Beispiel Alpen, Apenninen, Kaukasus und Karpaten.

Krater – Die Krater entstanden größtenteils durch Asteroiden-Einschläge (Impaktkrater) vor etwa 3 bis 4,5 Milliarden Jahren in der Frühzeit des Mondes. Der Nomenklatur von Riccioli folgend, werden sie vorzugsweise nach Astronomen, Philosophen und anderen Gelehrten benannt. Ihre Größen reichen von 2.240 km Durchmesser, wie im Fall des Südpol-Aitken-Bekens, bis hin zu Mikrokratern, die erst unter dem Mikroskop sichtbar werden. Mit irdischen Teleskopen kann man allein auf der Vorderseite mehr als 40.000 Krater mit Größen von mehr als 100 Meter unterscheiden, auf der Rückseite gibt es jedoch ein Vielfaches mehr.

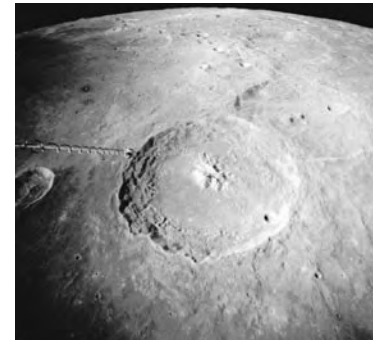


Abb. 59: Krater Theophilus (Apollo 16, NASA)

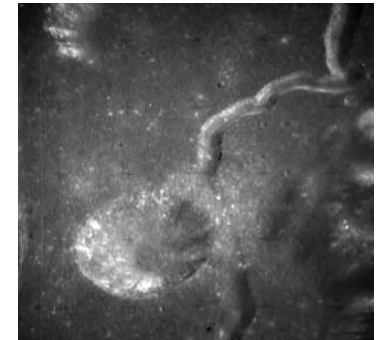


Abb. 60: Hadley-Rille (Apollo 15, NASA)

Vulkanische Krater dürften sehr selten sein, doch werden vereinzelte Gasaustritte registriert.

Mondrillen – Auf der Mondoberfläche gibt es auch Rillenstrukturen (Rima), über deren Ursprung vor dem Apolloprogramm lange spekuliert wurde. Man unterscheidet

- gerade Rillen,
- bogenförmige Rillen und
- mäanderförmige Rillen.

Seit den Untersuchungen der Hadley-Rille durch Apollo 15 geht man davon aus, dass es sich bei den mäanderförmigen Rillen um Lavakanäle handelt, die zum Teil »überdacht« waren. Die Decken sind jedoch im Laufe der Mondentwicklung eingestürzt und zu Regolith zermahlen worden. Die Entstehungsgeschichte der anderen Rillenformen ist deutlich unsicherer, sie könnten aber als Risse in der erkaltenden Lava entstanden sein.

Rückseite des Mondes – Über die Rückseite des Mondes war vor den ersten Raumfahrtmissionen nichts bekannt, da sie von der Erde nicht sichtbar ist, erst Lunik 3 lieferte die ersten Bilder. Sie unterscheidet sich in mehreren Aspekten von der Vorderseite. Sie besteht fast nur aus Hochländern, hat aber deutlich mehr Krater. Die Mondkruste ist an der Mondrückseite mit 150 km gegenüber 70 km an der Vorderseite auch etwa doppelt so dick. Es gibt noch keine Erklärung für diese fundamentalen Unterschiede zwischen Vorder- und Rückseite des Mondes.

Wasser – Der Mond ist ein extrem trockener Körper. In den Apollo-Proben kommt Wasser nicht mal in Form hydratisierter Minerale vor. Man schätzt, dass die gesamte Wassermenge des Mondes nur etwa der Wassermenge des Zürichsees entspricht. Umso erstaunlicher ist es, dass das Nachbarobjekt, die Erde, der wasserreichste Körper des inneren Sonnensystems ist.

Die Lunar-Prospector-Sonde hat Hinweise auf Wassereis in den Kratern der Polarregionen des Mondes gefunden, dieses Wasser könnte aus Kometenabstürzen stammen. Da die polaren Krater aufgrund der geringen Neigung der Mondachse gegen die Ekliptik niemals direkt von der Sonne bestrahlt werden, könnte es sein, dass dort noch im Regolith gebundenes Wassereis vorhanden ist. Der Versuch, durch den gezielten Absturz des Prospectors in einen dieser Polarkrater eindeutige Beweise zu erhalten, ist allerdings fehlgeschlagen. Es gibt bis heute keine zweifelsfreien Beweise.

Atmosphäre – Der Mond hat keine Atmosphäre im eigentlichen Sinn, sondern nur eine Exosphäre. Sie besteht zu etwa gleichen Teilen aus Helium, Neon, Wasserstoff sowie Argon und hat ihren Ursprung in eingefangenen Teilchen des Sonnenwindes. Ein sehr kleiner Teil entsteht auch durch Ausgasungen aus dem Mondinneren, wobei insbesondere ^{40}Ar , das durch Zerfall von ^{40}K im Mondinneren entsteht, von Bedeutung ist. Interessanterweise wird ein Teil dieses ^{40}Ar aber durch das im Sonnenwind mittransportierte Magnetfeld wieder auf die Mondoberfläche zurückgetrieben und in die oberste Staubpartikelschicht übernommen. Da ^{40}K früher häufiger war und damit mehr ^{40}Ar ausgasete, kann durch Messung des $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Verhältnisses von Mondmaterial bestimmt werden, zu welcher Zeit es in der obersten Schicht des Mondregoliths lag. Es besteht ein Gleichgewicht zwischen den eingefangenen Atomen und dem Verlust durch temperaturbedingtes Entweichen.

Sonstiges

Einflüsse des Mondes auf die Erde – Der Mond verursacht durch seine Gravitation auf der Erde Gezeitenwirkungen. Ebbe und Flut in den Meeren und im Erdmantel bremsen die Erdrotation und verlängern dadurch gegenwärtig die Tage um etwa 20 Mikrosekunden pro Jahr. Die Rotationsenergie der Erde wird dabei in Wärme umgewandelt, und der Drehimpuls wird auf den Mond übertragen, der sich dadurch um etwa vier Zentimeter pro Jahr von der Erde entfernt. Dieser schon lange vermutete Effekt ist seit 1995 durch Laser-Distanzmessungen abgesichert.

Der Mond stabilisiert durch seinen Anteil am Gesamtsystem des Erde-Mond-Systems auch die Drehachse der Erde, deren Lage ohne diesen Einfluss nicht über viele 100 Millionen Jahre konstant hätte bleiben können. Wäre die Erdachse nicht über diese langen Zeiträume stabil geblieben, hätte dies gravierende Konsequenzen für die Evolution und das Leben auf der Erde gehabt.

Ein Einfluss des Mondes auf die Menschen und andere Lebewesen auf der Erde ist noch umstritten. Allerdings wird in der Land- und Forstwirtschaft seit alters her darauf geachtet, dass bestimmte Arbeiten in der Natur zum richtigen Zeitpunkt erledigt werden. In neuerer Zeit werden dazu Mondkalender benutzt. Als streng wissenschaftliche Tatsache gesichert gilt der Einfluss des Mondes als Navigationshilfe für einige Arten von Zugvögeln und nachtaktiven Insekten.

Mondregenbogen – Auch bei Nacht kann durch Zusammentreffen von Mondlicht und Regentropfen ein so genannter Mondregenbogen entstehen, der analog zum physikalischen Prinzip des Regenbogens der Sonne funktioniert.

Hof-Effekt – An kalten Herbst- und Winternächten kann es zur Bildung eines so genannten Hofes des Mondes kommen. Es handelt sich dabei um eine grünlich gelbe, schwache Leuchterscheinung rund um den Mond herum. Dafür sind Eiskristalle in Luftschichten verantwortlich, die aus dünnem Höhennebel oder Dunst entstanden sind und das auf die Erde fallende Licht in einem sehr schwachen Winkel ablenken. Dadurch wird eine Art leuchtender Ring-Effekt hervorgerufen.

Mondtäuschung – Als Mondtäuschung bezeichnet man den Effekt, dass der Mond in Horizontnähe größer aussieht als im Zenit. Dies ist keine Folge der Lichtbrechung an den Luftschichten, sondern eine optische Täuschung, die von der Wahrnehmungspsychologie untersucht und erklärt wird.

Eigentumsverhältnisse – Der Weltraumvertrag verbietet Staaten, einen Eigentumsanspruch auf Weltraumkörper wie den Mond zu erheben. Der Vertrag gilt zwar nur für Staaten, aber das 1979 entworfene und am 11. Juli 1984 in Kraft getretene *Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies* der Vereinten Nationen, (Artikel 11, Absatz 2 und 3) schließt jedwede solche Ansprüche eindeutig aus.

Der Amerikaner Dennis M. Hope meldete trotzdem 1980 beim Grundstücksamt von San Francisco seine Besitzansprüche auf den Mond an. Da niemand in der nach amerikanischem Recht ausgesetzten Frist von acht Jahren Einspruch erhob, behauptet Hope, die Grundstücke über seine dafür gegründete *Lunar Embassy* legal vertreiben zu können. Aufgrund des Outer Space Treaty können jedoch keine Staaten Ansprüche anmelden, deshalb ist nach Ansicht aller Organisationen (Vereinte Nationen, Internationale Astronomische Union) auch eine Ausweitung innerstaatlichen Rechts nicht erlaubt. Die Grundstücksverkäufe könnten sogar als Betrug gewertet werden, es gibt aber noch keine gerichtliche Klärung dieser Frage.

Der Deutsche Martin Jürgens aus Westerkappeln in Westfalen erhebt ebenfalls Anspruch auf den Mond. Laut einer Schenkungsurkunde vom 15. Juli 1756, ausgestellt und unterzeichnet von König Friedrich dem Gro-

ßen von Preußen, wurden die Rechte am Mond an die Familie Jürgens als Dank für geleistete Dienste übertragen (»Jetzo soll ihm der Mond gehören«). In dieser Urkunde wurde festgelegt, dass der Himmelskörper jeweils an den jüngsten Sohn weitervererbt werden soll. Die Familie Jürgens verfügt so über die ältesten verbrieften Eigentumsrechte am Mond. Allerdings bleibt die Frage, wer Friedrich dem Großen das Recht verliehen hat, den Mond zu »verschenken«.

Geschichte der Mondbeobachtung

Es liegt in der Natur des Menschen, sich über seine Umwelt Gedanken zu machen. Der Mond mit seinen selbst mit bloßem Auge erkennbaren Details ist nach der Sonne das mit Abstand hellste Objekt des Himmels; zugleich kann man seinen einzigartigen Helligkeits- und Phasenwechsel zwischen Vollmond und Neumond sehr gut beobachten.

Mit der Erfindung des Fernrohrs begann seine intensive Erforschung um 1650 – mit Höhepunkten durch Hieronymus Schröters *Selenotopografie* 1791, die langbrennweitige Fotografie ab 1890 und die Raumfahrt in den 1970ern.

Mythologische Anfänge – Die älteste bekannte Darstellung des Mondes ist eine 5.000 Jahre alte Mondkarte aus dem irischen Knowth. Als weitere historisch bedeutende Abbildung in Europa ist die Himmelscheibe von Nebra zu nennen.

Das Stein-Monument Stonehenge diente eventuell als Observatorium und war so gebaut, dass damit auch Bahneigenschaften des Mondes vorhersagbar oder bestimmbar gewesen sind.

In allen archäologisch untersuchten Kulturen gibt es Hinweise auf die große kultische Bedeutung des Mondes für die damaligen Menschen. Der Mond stellte meist eine zentrale Gottheit dar. Beispiele für Göttinnen sind bei den Thrakern Bendis, bei den Ägyptern Isis, bei den Griechen Selene, Artemis und Hekate sowie bei den Römern Luna und Diana. Als männliche Gottheiten gab es beispielsweise bei den Sumerern Nanna, in Ägypten Thot, in Japan Tsukiyomi, bei den Azteken Tecciztecatl und bei den Germanen Mani. Fast immer wurden Sonne und Mond dabei als entgegengesetzt geschlechtlich gedacht, auch wenn die Zuordnung variierte.

Ein häufig vorkommender Gedanke ist das Bild von den drei Gesichtern der Mondgöttin: bei Neumond die verführerische Jungfrau voller Sexualität, bei Vollmond die fruchtbare Mutter und bei abnehmendem Mond das alte Weib oder die Hexe mit der Kraft, zu heilen. Beispiele sind

bei den Griechen mit Artemis, Selene und Hekate sowie bei den Kelten Blodeuwedd, Morrigan und Ceridwen.

Der Mond hat bis in die Neuzeit hinein seine Faszination nicht verloren und ist bis heute Gegenstand von Romanen und Fiktionen, von Jules Vernes *Reise zum Mond* über Jacques Offenbachs *Frau Luna* bis hin zum »modernen« Traum einer Besiedelung des Mondes.

Kalender – Neben der mythologischen Verehrung nutzten unsere Vorfahren schon sehr früh den regelmäßigen und leicht überschaubaren Rhythmus des Mondes für die Beschreibung von Zeitspannen und als Basis eines Kalenders, noch heute basiert der islamische Kalender auf dem Mondjahr mit 354 Tagen (12 synodische Monate). Mit dem Übergang zum Ackerbau wurde die Bedeutung des Jahresverlaufs für Aussaat und Ernte wichtiger. Um dies zu berücksichtigen, wurden zunächst nach Bedarf, später nach feststehenden Formeln, wie zum Beispiel dem metonischen Zyklus, Schaltmonate eingefügt, die das Mondjahr mit dem Sonnenjahr synchronisierten. Auf diesem lunisolaren Schema basieren zum Beispiel der altgriechische und der jüdische Kalender. Von den alten Hochkulturen hatten einzig die Ägypter ein reines Sonnenjahr mit 12 Monaten à 30 Tagen sowie 5 Schalttagen, das heißt, ohne strengen Bezug zum synodischen Monat von 29,5 Tagen, vermutlich, weil für die ägyptische Kultur die genaue Vorhersage der Nilüberschwemmungen und damit der Verlauf des Sonnenjahres überlebensnotwendig war.

Entwicklung der Mondforschung – Die erste, wenn auch nur skizzenhafte, Darstellung der sichtbaren Strukturen des Mondes stammt von Galileo Galilei (1609), die ersten brauchbaren stammen von Johannes Hevelius, der mit seinem Werk *Selenographia* (1647) als Begründer der Selenografie gilt. In der Nomenklatur der Mondstrukturen setzte sich das System von Giovanni Riccioli durch, der in seinen Karten von 1651 die dunkleren Regionen als Meere (*Mare*, Plural *Maria*) und die Krater nach Philosophen und Astronomen bezeichnete. Allgemein anerkannt ist dieses System jedoch erst seit dem 19. Jahrhundert.

Tausende Detailzeichnungen von Bergen, Kratern und Wallebenen wurden von Johann Hieronymus Schröter (1778–1813) angefertigt, der auch viele Mondtäler und Rillen entdeckte. Den ersten Mondatlas gaben Wilhelm Beer und Johann Heinrich Mädler 1837 heraus, ihm folgte bald eine lange Reihe fotografischer Atlanten. Die Qualität der Karten wurde in den 1960ern deutlich verbessert, als zur Vorbereitung des Apollo-Projekts

eine Kartierung durch die Lunar-Orbiter-Sonden aus einer Mondumlaufbahn heraus stattfand. Die heute genauesten Karten stammen aus den 1990ern durch die Clementine- und Lunar-Propector-Missionen.

Die Höhenbestimmung von Kratern, Gebirgen und Ebenen war mit Fernrohrbeobachtungen sehr problematisch und erfolgte meist durch Analyse von Schattenlängen, wofür Josef Hopmann Spezialmethoden entwickelte. Erst durch die Sonden-Kartierungen kennt man verlässliche Werte: die Krater, mit Durchmessern bis zu 300 Kilometer, wirken zwar steil, sind aber nur wenige Grad geneigt, die höchsten Erhebungen hingegen erreichen eine Höhe von bis zu 10 Kilometer über dem mittleren Niveau.

Ein bedeutender Fortschritt in der Untersuchung des Mondes wurde durch die Satellitenmissionen erzielt. Die sowjetische Sonde Lunik 1 kam erstmals dem Mond 65.000 km nahe, Lunik 2 traf ihn schließlich und Lunik 3 lieferte die ersten Bilder der Mondrückseite. Das amerikanische Apollo- und das sowjetische Luna-Programm brachten bei neun Missionen zwischen 1969 und 1976 insgesamt 382



Abb. 61: Das erste Foto der Rückseite des Mondes, aufgenommen von Lunik 3

Kilogramm Mondgestein von der Mondvorderseite zur Erde zurück. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Missionen, die Gesteinsproben zur Erde zurückführten.

Datum	Mission	Menge	Landestelle
20. Juli 1969	Apollo 11	21,6 kg	Mare Tranquillitatis
19. November 1969	Apollo 12	34,3 kg	Oceanus Procellarum
20. September 1970	Luna 16	100 g	Mare Fecunditatis
31. Januar 1971	Apollo 14	42,6 kg	Fra Mauro Hochland
30. Juli 1971	Apollo 15	77,3 kg	Hadley-Apenninen (Mare und Hochland)
21. Februar 1972	Luna 20	30 g	Apollonius Hochland
21. April 1972	Apollo 16	95,7 kg	Descartes
11. Dezember 1972	Apollo 17	110,5 kg	Taurus-Littrow (Mare und Hochland)
18. August 1976	Luna 24	170 g	Mare Crisium

1979 wurde der erste Mondmeteorit in der Antarktis entdeckt, dessen Herkunft vom Mond allerdings erst einige Jahre später erkannt wurde.

Mittlerweile kennt man noch mehr als zwei Dutzend weitere. Diese bilden eine komplementäre Informationsquelle zu den Gesteinen, die durch die Mondmissionen zur Erde gebracht wurden: Während man bei den Apollo- und Lunaproben die genaue Herkunft kennt, dürften die Meteorite, trotz der Unkenntnis ihres genauen Herkunftsortes auf dem Mond, repräsentativer für die Mondoberfläche sein, da einige aus statistischen Gründen auch von der Rückseite des Mondes stammen sollten.



Abb. 62: Karte der Landestellen der bemannten und unbemannten Missionen

Menschen auf dem Mond – Im Rahmen des kalten Kriegs unternahm die USA und die UdSSR in den 1960ern einen Anlauf zu bemannten Mondlandungen, die jedoch nur von den USA realisiert wurden. Am 21. Juli 1969 setzte mit Neil Armstrong der erste von zwölf Astronauten im Rahmen des Apollo-Projekts seinen Fuß auf den



Abb. 63: Stiefelabdruck von Edwin Aldrin auf dem Mond (Apollo 11)

Mond, wegen der hohen Kosten wurde das Programm nach sechs erfolgreichen Missionen 1972 eingestellt. Während des ausgehenden 20. Jahrhunderts wurde immer wieder über eine Rückkehr zum Mond und die Einrichtung einer ständigen Mondbasis spekuliert, aber erst durch Ankündigungen der US-Präsidenten George W. Bush und der NASA Anfang 2004 zeichnen sich konkrete Pläne ab. Demnach planen die USA im Jahr 2018 wieder vier Astronauten auf den Mond zu schicken.

In chronologische Reihenfolge waren die folgenden zwölf Menschen auf dem Mond:

- Neil A. Armstrong
- Edwin E. »Buzz« Aldrin
- Charles P. Conrad

- Alan L. Bean
- Alan B. Shepard
- Edgar D. Mitchell
- David R. Scott
- James B. Irwin
- John W. Young
- Charles M. Duke
- Eugene A. Cernan
- Harrison H. Schmitt

Als letzter Mensch verließ Eugene A. Cernan den Mond.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Mond>. Historie: 13.4.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Aglarech, Allen McC., Lothar Kimmeringer, Lotse, Epo, Phrood, Arnomane, Alexander.stohr, Zwobot, Neitram, Geof, Stefan h, Bricktop1, Fidi, BWBot, Franz Wikipedia, Ketchupfreak88, Schewek, Sikilai, LightWolf, Saperaud, Ben-Zin, Nephelin, JakobVoss, APPER, Saiki, StephanPsy, Ulrich.fuchs, Schusch, Wolfgangbeyer, ErnstA, Rivi, Spundun, Rho, Baumst, Gerhard Kemme, Alexanderrutz, Crux, Head, Uwe W., Sicherlich, Paddy, Matze12, Night Ink, Alkuin, Tsor, Miroslav Stimac, Inshanör, SiriusB, Autan, Kira Nerys, Mr. B.B.C., Leuband, Nornen3, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Entstehung des Mondes

Die Entstehung des Erdmondes wird seit Jahrhunderten von Wissenschaftlern diskutiert. Seit Mitte der 1980er Jahre hat sich die Ansicht durchgesetzt, dass der Mond nach einem seitlichen Zusammenstoß der Proto-Erde mit einem etwa marsgroßen Körper entstanden ist (Das Präfix »Proto-« verdeutlicht, dass es sich noch um die Vorläufer während der Entstehung handelt und nicht um die Himmelskörper, wie wir sie heute kennen.) Dabei wurde viel Materie in eine Umlaufbahn zurückgeworfen, aus der sich dann der Mond formte. Man spricht aus mehreren Gründen auch von der Entstehung des Erde-Mond-Systems. Zum einen gibt es im ganzen Sonnensystem (mit Ausnahme von Pluto und Charon) keinen weiteren Mond, der eine ähnliche Größe im Vergleich zu dem umkreisten Planeten aufweist. Zum anderen ist auch der Bahndrehimpuls des Mondes viel höher als bei allen anderen Monden, wiederum mit Ausnahme des Charon. Die Entwicklung des Pluto-Charon-Systems hat sich jedoch in einer sehr kühlen Region des Sonnensystems abgespielt und sehr wahrscheinlich keine Gemeinsamkeiten mit der Entwicklung des Erde-Mond-Systems.

Entstehung des Mondes

Soweit bekannt, stammen die ersten Überlegungen über die Entstehung des Mondes, die man als Vorläufer der *Einfangtheorie* betrachten kann, von Rene Descartes. Sie wurden erst 1664, lange Zeit nach Descartes Tod, publiziert.

Moderne Theorien – Seit dem 19. Jahrhundert sind zur Entstehung des Erde-Mond-Systems mehrere Theorien entwickelt worden. Dies sind im Wesentlichen

- die *Abspaltungstheorie*: Von einer heißen, (zäh)flüssigen und schnell rotierenden Proto-Erde schnürte sich ein Tropfen ab und bildete den späteren Mond.
- die *Einfangtheorie*: Erde und Mond entstanden unabhängig in verschiedenen Regionen des Sonnensystems; bei einer engen Begegnung fing die Proto-Erde den Proto-Mond durch ihre Gravitation ein.
- die *Schwesterplanet-Theorie*: Erde und Mond entstanden gleichzeitig und nahe beisammen.
- die *Öpik-Theorie*: Der Vorläufer des Mondes entstand aus der Materie, die von einer heißen Proto-Erde abdampfte.
- die *Viele-Monde-Theorie*: Mehrere Monde wurden gleichzeitig eingefangen und kollidierten nach einiger Zeit. Aus den Bruchstücken bildete sich der heutige Mond.
- die *Kollisionstheorie*: Die Proto-Erde kollidierte mit einem großen Körper, und aus der weggeschleuderten Materie bildete sich der Mond.

Ein gutes Modell muss nicht nur physikalisch möglich sein, sondern muss auch mit den Eigenschaften des Mondes beziehungsweise des Erde-Mond-Systems vereinbar sein und diese, wenn möglich, sogar erklären:

- Die Dichte des Mondes ist mit $3,3 \text{ g/cm}^3$ deutlich geringer als die der Erde mit $5,5 \text{ g/cm}^3$.
- Der Mond hat im Vergleich zur Erde ein großes Defizit an leicht flüchtigen Elementen sowie an Eisen.
- Die isotopische Zusammensetzung der Gesteine der Erdkruste und der Mondoberfläche ist nahezu identisch, im Gegensatz zum Rest des Sonnensystems.
- Der Drehimpuls des Erde-Mond-Systems ist ungewöhnlich hoch.
- Der Mond dreht sich im gleichen Drehsinn genauso schnell um sich selbst wie um die Erde. Er hat also eine an seine Umlaufbewegung gebundene Rotation und zeigt der Erde immer die gleiche Seite.

Abspaltungstheorie – Die Abspaltungstheorie wurde 1878 von George Darwin, dem Sohn von Charles Darwin, entwickelt. Demnach rotierte die Erde in ihrer Frühphase so stark, dass sich durch Instabilitäten ein Teil ablöste und den Mond bildete. 1882 fügte der Geologe Osmond Fisher die Feststellung hinzu, dass der Pazifische Ozean die heute noch sichtbare Narbe dieser Abspaltung darstellt.

Diskussion: Solch eine Herauslösung aus der extremen Äquatorwulst erklärt recht gut die Größe des Mondes. Auch seine geringere mittlere Dichte ist damit vereinbar, denn sie entspricht der Dichte des Erdmantels. Nach neueren Forschungen hat die Erde früher tatsächlich schneller rotiert, das heißt, die Tage waren früher kürzer; es gibt aber keine sinnvolle Erklärung für die hohen Rotationsgeschwindigkeiten (Tageslänge von etwa 2,5h), die für den heutigen Gesamtdrehimpuls des Erde-Mond-Systems nötig gewesen wären. Auch die Vorstellung, dass der Pazifik die *Narbe* dieser Abspaltung darstellt, ist durch die \rightarrow Plattentektonik widerlegt. Die Bahnebene des Mondes ist zudem viel zu stark gegen die Äquatorebene der Erde geneigt. In Hinsicht der Roche-Grenze bleibt offen, wie der Mond den zerstörerischen Gezeitenkräften dieses Nahbereiches entkommen sein soll. Des Weiteren gibt es keine plausible Erklärung für das Defizit bei leicht flüchtigen Elementen.

Einfangtheorie – Die Einfangtheorie wurde 1909 von Thomas Jefferson Jackson See vorgeschlagen. Sie besagt, dass sich der Mond als eigenständiges Planetesimal an einem anderen Ort im Sonnensystem gebildet hat und bei einer engen Begegnung mit der Erde eingefangen wurde.

Diskussion: Die Einfangtheorie kann den hohen Drehimpuls des Systems sowie den Unterschied der Dichte von Erde und Mond sehr elegant erklären. Sie erfordert jedoch eine sehr spezielle Einfangbahn, die einen großen Zufall bedeutet. Zudem müsste der Mond einen kurzen Eintritt in die Roche-Grenze überstanden haben, was bislang nicht erklärt werden kann. Auch macht diese Theorie keinerlei Aussage darüber, warum der Mond sowohl bei leichtflüchtigen Elementen als auch bei Eisen ein Defizit gegenüber der Erde hat. Bei der Ähnlichkeit der isotopischen Zusammensetzung scheidet die Theorie völlig.

Schwesterplanet-Theorie – Die Schwesterplanet-Theorie wurde 1944 von Carl Friedrich von Weizsäcker entwickelt, wesentliche Vorarbeiten zur Stabilität stammen von Édouard Albert Roche. Den ersten, rein qualitativen Entwurf verfasste Immanuel Kant. In seiner Kosmogonie von

1755, dem ersten naturwissenschaftlichen Erklärungsversuch des Ursprungs der Himmelskörper, entwickelten sich Erde und Mond aus einer gemeinsamen Verdichtung des präsolaren Urnebels direkt zu einem Doppelplaneten. Die Hauptmasse der lokalen Verdichtung ballte sich zur Erde, und aus der verbliebenen Staubhülle hat sich der Mond gebildet.

Diskussion: Wenn sich Erde und Mond eng beieinander entwickelten, ist es absolut unverständlich, warum sich die Dichte beziehungsweise der Anteil von leichtflüchtigen Elementen sowie von Eisen bei Erde und Mond so stark unterscheiden. Für den hohen Anteil des Bahndrehimpulses des Mondes im Vergleich zum Drehimpuls der Erde selbst gibt es keine plausible Erklärung. Auch die 5 Grad große Neigung der Mondbahnebene gegen die Bahnebene der Erde wird damit nicht begrifflich.

Öpik-Theorie – Ernst Öpik schlug 1955 eine Theorie vor, die man zwischen der Abspaltungs- und der Schwesterplanet-Theorie einordnen kann. Die von einem Ringsystem aus eingefangenen Gesteinstrümmern umgebene Proto-Erde heizte sich im Laufe ihrer Entwicklung durch die permanenten Einschläge auf etwa 2.000 °C auf und dampfte große Materiemengen wieder ab. Während der → Sonnenwind die leichteren Elemente weggeblasen hat, kondensierten die schwereren und bildeten zusammen mit Teilen des Ringsystems den Proto-Mond. Diese Aufheizung erfolgte erst in einer späten Phase der Erdentstehung, so dass durch einen bereits ausgebildeten Erdkern der Anteil von Eisen in den Mantelschichten der Proto-Erde schon deutlich verringert war.

Diskussion: Diese Theorie ist sehr gut mit den beobachteten geochemischen Eigenschaften des Mondes vereinbar, die Impulsprobleme der Schwesterplaneten-Theorie bestehen jedoch unverändert.

Viele-Monde-Theorie – Im englischen Sprachraum als *many-moons theory* bezeichnet, erlebte diese Theorie eine kurzzeitige Popularität, nachdem sie 1962 von Thomas Gold vorgeschlagen und in den darauffolgenden Jahren von Gordon MacDonald formalisiert wurde. Grundlegender Gedanke ist, dass es für die Erde einfacher ist, mehrere kleine als einen großen Himmelskörper einzufangen. Wenn nun sechs bis zehn kleine Monde von der Erde eingefangen werden und diese umkreisen, so wandern die Bahnen dieser Monde aufgrund der Gezeitenwirkung nach außen. Im Laufe von einer Milliarde Jahren stoßen die kleinen Monde dann zusammen, und aus den Bruchstücken entsteht der Erdmond.

Diskussion: Diese Theorie wurde durch die Gesteinsproben der Apollo-Missionen (isotopische Zusammensetzung) widerlegt. Auch ist nicht plausibel, warum die Vereinigung vieler Monde zu einem einzigen, ungewöhnlich großen, nur bei der Erde abgelaufen sein soll, während der Mars weiterhin zwei separate, kleinere Monde hat und die inneren Planeten ansonsten überhaupt keine Monde besitzen. Der lange Zeitraum, der für einen gezeitenkraft-basierten Vereinigungsprozess anzusetzen wäre, ließe erwarten, dass die inneren Planeten immer noch von einer Fülle kleiner Monde umkreist werden, bei denen die Vereinigung (noch) nicht stattgefunden hat.

Kollisionstheorie – Die Kollisionstheorie wurde von William K. Hartmann und Donald R. Davis 1975 entwickelt. Nach dieser Theorie kollidierte in der Frühphase der Planetenentwicklung ein etwa marsgroßer Planetoid, der nach der Mutter der griechischen Mondgöttin Selene bisweilen *Theia* genannt wird, mit der Proto-Erde, die damals bereits etwa 90 % ihrer heutigen Masse hatte. Die Kollision erfolgte nicht zentral, sondern fast streifend, so dass große Materiemengen, bestehend aus Teilen des Mantels des Impaktkörpers und des Erdmantels, in einen Erdorbit weggeschleudert wurden. Aus diesen Trümmern bildete sich innerhalb von weniger als 100 Jahren der Proto-Mond. In knapp 10.000 Jahren verdichtete er sich zum Mond und umkreiste die Erde in einem Abstand von rund 60.000 km.

Die Entwicklung dieser Theorie wird im Folgenden ausführlicher erläutert, da dieses Szenario die heute vorliegenden Fakten am besten beschreibt.

Entstehungsgeschichte der Kollisionstheorie – Der erste Vorschlag, den Ursprung des Mondes in einer kosmischen Katastrophe zu sehen, fand sich 1946 in einer Veröffentlichung Reginald Aldworth Dalys in den *Proceedings of the American Philosophical Society*; sie blieb, unter anderem auch aufgrund der kurz danach verbreiteten Theorien Immanuel Velikovskys, unbeachtet.

In den 1960ern entwickelte der russische Astrophysiker Victor S. Safronov die Theorie, dass die Planeten durch die Zusammenballung einer großen Anzahl kleinerer Planetesimale entstanden sind. Hartmann und Davis griffen diese Hypothese auf und konnten Safronovs rein analytische Arbeiten durch Computersimulationen verbessern. Sie untersuchten die Größenverteilung der entstehenden »Zusammenballungen« und erhielten dabei eine vergleichbare Größenverteilung wie im heutigen → Asteroidengürtel: Neben einem großen Körper (vergleichbar → Ceres mit etwa

1.000 km Durchmesser) bildeten sich mehrere Körper mit etwa 1/10 seiner Masse (vergleichbar →Pallas, →Vesta und Hygeia mit 400 bis 600 km Durchmesser). Die Grundidee der Kollisionstheorie liegt nun darin, dass einer dieser Körper erst in der Endphase der Planetenentstehung fast streifend mit der Proto-Erde kollidierte, wodurch ein Teil der Gesamtmasse in den Orbit geschleudert wurde und den Mond bildete. Hartmann und Davis veröffentlichten diese Theorie 1975. Unabhängig davon kamen Alastair G. W. Cameron und William Ward 1976 durch Überlegungen zum Drehimpuls zum gleichen Ergebnis.

1988 veröffentlichten A. C. Thompson und David J. Stevenson eine Untersuchung über die Bildung von kleineren Körpern aus dem Kollisionsmaterial im Orbit, aber es gab nur wenige, die sich ernsthaft mit der Kollisionstheorie auseinandersetzten. Den Durchbruch brachte eine internationale Konferenz 1984 in Kailua-Kona, Hawaii, über die Ursprünge des Mondes. Die Diskussion der ersten Untersuchungen des von den Apollo-Missionen zur Erde zurückgebrachten Mondgesteins führte bei den meisten Wissenschaftlern zu der Überzeugung, dass die Kollisionstheorie die Fakten deutlich besser beschreibt als alle anderen Theorien über die Entstehung des Mondes. Insbesondere zeigte sich, dass die isotopische Zusammensetzung der Elemente des Mondgesteins der von irdischem Gestein im Wesentlichen gleicht. So liegen etwa die Sauerstoff-Isotopenverhältnisse von irdischem Gestein, Apollo-Proben und Mondmeteoriten auf einer gemeinsamen Fraktionierungslinie, was zeigt, dass der Sauerstoff – als häufigstes Element im Erde-Mond-System – aus einem gemeinsamen durchmischten Reservoir kommen muss. Im Gegensatz dazu liegen etwa die Sauerstoffisotopenverhältnisse von sonstigen Meteoriten je nach Ursprung auf anderen Fraktionierungslinien.

In den 1990ern gab es einen Rückschlag für die Theorie, als erste Simulationsrechnungen den Impact eines Körpers mit der dreifachen Marsmasse erforderten, um genügend Material in den Orbit zu befördern. Dieser Einschlag, zu einem Zeitpunkt, als die Proto-Erde etwa die Hälfte ihrer jetzigen Größe erreicht hatte, hätte jedoch deutlich zu viel Drehimpuls übertragen; es wäre deshalb noch ein weiterer schwerer Impact gegen Ende der Akkretionsphase der Erde notwendig gewesen. 2001 konnten Robin M. Canup und Erik Asphaug jedoch mit verbesserten Modellen zeigen, dass ein einziger Impact gegen Ende der Akkretionsphase ausreicht, um sowohl Masse als auch Geochemie des Mondes sowie den Drehimpuls des Erde-Mond-Systems zu erklären. Die besten Ergebnisse erhält man nach diesen Simulationen für einen Impactkörper, der etwas größer als der Mars ist

und mit einer Relativgeschwindigkeit von weniger als 4 km/s (14.400 km/h) in einem Stoßwinkel von etwa 45° kollidiert. Durch Vergleich der Niob-Tantal-Verhältnisse des Mondes und der Erde mit dem Niob-Tantal-Verhältnis des übrigen Sonnensystems konnte inzwischen gezeigt werden, dass der Mond mindestens zur Hälfte aus Erdmaterial besteht.

Diskussion: Nach Übereinstimmung einer Mehrzahl von Wissenschaftlern stimmt die Kollisionstheorie sehr gut mit den Beobachtungen überein, auch wenn noch sehr viel Detailarbeit notwendig ist. Vor allem in den Simulationsrechnungen wird noch mit sehr starken Vereinfachungen gearbeitet, und es gibt noch keine konsistenten mathematischen Modelle für die Bildung und die Struktur der orbitalen Scheibe nach dem Impact. Trotz der Unsicherheiten über den genauen Verlauf des Impakts und der nach derzeitigem Kenntnisstand geringen Wahrscheinlichkeit eines derartigen Zusammenstoßes mit einem Körper genau der richtigen Größe genau zur richtigen Zeit mit genau den richtigen Stoßparametern gibt es im Gegensatz zu den anderen vorgeschlagenen Hypothesen zumindest keine größeren Widersprüche zu den Beobachtungen.

Zusammenfassung

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts scheinen alle Fakten für die Kollisionstheorie zu sprechen, aber wegen der noch offenen Detailfragen kann eine andere Entstehungsgeschichte noch nicht ausgeschlossen werden. Genau wie das Impaktszenario Anfang der 1970er praktisch aus dem Nichts entstanden ist, könnten bei der weiteren Erforschung der Entstehung des Sonnensystems im Allgemeinen und des Erde-Mond-Systems im Speziellen Ideen entstehen, die noch nicht vorauszusehen sind.

Anmerkung

Ein Hauptziel der Apollo-Missionen war es, auf dem Mond Hinweise zu dessen Entstehung zu finden. Man suchte klare Beweise für eine der *Großen Drei Theorien* (Abspaltungstheorie, Einfangtheorie, Schwesterplanet-Theorie), aber die ersten Auswertungen warfen bei allen drei nur neue Widersprüche auf. Stattdessen spricht alles für eine Theorie, die zum Zeitpunkt des Apollo-Programms noch gar nicht existierte. Streng genommen handelt es sich in jedem dieser Fälle allerdings eigentlich nicht um eine Theorie, sondern um eine Hypothese.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Entstehung_des_Mondes. Historie: 12.3.04: Angelegt von Schewek, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Schewek, Epo, Norro, M-sch, Aglarech, Ralf5000, Arnomane, Herbye, Fidi, 217, Stern, Fedi, Coriolan, Wolfgangbeyer, Stw, Migra, Mike Krüger, Crux, Fubar, Bananeweizen, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Mars

Der Mars ist, von der Sonne aus gesehen, der vierte Planet in unserem Sonnensystem. Er zählt zu den erdähnlichen (terrestrischen Planeten). Aufgrund seiner (blut-) roten Farbe wurde er nach dem römischen Kriegsgott Mars benannt und wird oft auch als der *Rote Planet* bezeichnet.

Symbolisiert wird Mars durch einen Kreis mit einem schräg nach rechts oben zeigenden Pfeil: ♂. Das Zeichen, das einen Schild mit einem dahinter stehenden Speer darstellen soll, steht für den römischen Kriegsgott. In der Biologie symbolisiert es das männliche Geschlecht.

Mars besitzt zwei kleine, unregelmäßig geformte Monde, die Phobos und Deimos (griech. Furcht und Schrecken) genannt werden.

Wegen seiner mysteriösen roten Färbung hat der Mars schon immer die Menschen fasziniert. Die Färbung selbst verdankt der Planet Eisenoxid-Staub, der sich auf der Oberfläche und in der Atmosphäre verteilt hat. Somit ist der Mars ein »rostiger« Planet (vgl. Farbtafeln Abb. 143).

Bahndaten

Der Mars bewegt sich in einem Abstand von 206,62 bis 249,23 Millionen km (1,524 AE bis 1,666 AE) in 1 Jahr 321 Tagen und 18 Stunden auf einer elliptischen Bahn um die Sonne. Die Bahnexzentrizität (Abweichung von der Kreisform) beträgt 0,0935, wobei die Bahn 1,85° gegen die Ekliptik geneigt ist. Mars besitzt nach Pluto und Merkur die exzentrischste Bahn aller großen Planeten im Sonnensystem.

Physikalische Eigenschaften

Der Mars besitzt mit einem Durchmesser von 6.794 km etwa den halben Durchmesser der Erde, ein Viertel ihrer Oberfläche und ein Zehntel ihrer Masse. Die Fallbeschleunigung auf seiner Oberfläche beträgt 3,71 m/s², dies entspricht etwa 38 % der irdischen. Der Mars besitzt eine dünne Atmosphäre.

Er rotiert in rund 24 Stunden und 37 Minuten um die eigene Achse. Da die Rotationsachse des Planeten um 25° 12' gegen die Bahnebene geneigt ist, gibt es – wie auf der Erde – Jahreszeiten. Sie haben jedoch fast die doppelte Dauer der irdischen Jahreszeiten, da ihnen das Marsjahr mit 687 Tagen zugrunde liegt. Die Rotationsachse weist zudem eine Präzessionsbewegung mit einer Periode von 170.000 Jahren auf.

Das Magnetfeld des Mars ist nur sehr schwach ausgeprägt. Die Messung des Magnetfeldes wird erschwert durch die Magnetisierung der Kruste

(siehe weiter unten) mit Feldstärken von bis zu 220 nT und durch externe Magnetfelder mit Stärken zwischen wenigen nT und bis zu 100 nT, die durch die Wechselwirkung des Sonnenwindes mit der Marsatmosphäre entstehen und zeitlich sehr stark variieren. Nach den Analysen der Daten des Mars Global Surveyor konnte die Stärke des Magnetfeldes dennoch sehr genau bestimmt werden – sie liegt bei weniger als 0,5 nT, gegenüber 30 bis 60 μT beim Erdmagnetfeld.

Atmosphäre und Klima – Der Mars besitzt eine sehr dünne Atmosphäre, die zu 95 % aus Kohlendioxid besteht. Daneben kommen noch 2,7 % Stickstoff, 1,6 % Argon, geringe Anteile an Sauerstoff und Kohlenmonoxid sowie Spuren von Wasserdampf und anderen Verbindungen oder Elementen vor.

Im Jahre 2003 konnten mittels erdgestützter Teleskope Spuren von Methan nachgewiesen werden. Das Vorhandensein des instabilen Gases Methan in der Atmosphäre weist darauf hin, dass auf dem Mars »Methanquellen« vorhanden sein müssen oder zumindest vor hunderten von Jahren existierten. Als Quellen kommen aktiver Vulkanismus, Kometeneinschläge oder sogar methanproduzierende Mikroorganismen in Betracht. Das Methan ist nicht gleichmäßig verteilt, sondern weist ein Muster etwas erhöhter Konzentrationen auf. Offensichtlich wird oder wurde der Nachschub an Methan kurzfristig unterbrochen, bevor es sich gleichmäßig in der Atmosphäre verteilen konnte. Derzeit werden Untersuchungsprogramme aufgestellt, um zu klären, welche Quellen in Frage kommen. Bei der biologischen Erzeugung von Methan auf der Erde entsteht fast immer Ethan als Begleitgas, während bei einer vulkanischen Entstehung Schwefeldioxid freigesetzt wird. Die Messung dieser Gase in der Marsatmosphäre könnte eine Klärung bringen.

Der atmosphärische Druck beträgt auf der Oberfläche des Mars nur 6,36 mbar. Im Vergleich zu durchschnittlich 1.013 mbar auf der Erde sind dies nur 0,75 %, das entspricht dem Luftdruck der Erdatmosphäre in 35 km Höhe.

Die dünne Marsatmosphäre kann nur wenig Sonnenwärme speichern, daher sind die Temperaturunterschiede auf der Oberfläche sehr groß. Die Temperaturen erreichen im Sommer (bezogen auf das Marsjahr) in Äquaturnähe etwa 20 °C am Tag und bis zu –85 °C in der Nacht.

Abhängig von den Jahreszeiten und der Intensität der Sonneneinstrahlung finden in der Atmosphäre dynamische Vorgänge statt. Die vereisten Polkappen verdunsten im Sommer teilweise, und sublimierter Wasser-

dampf bildet ausgedehnte Zirruswolken. Die Polkappen selbst bestehen aus Kohlendioxid und Wassereis. Während des Marsfrühjahrs können in den ausgedehnten flachen Ebenen heftige Staubstürme auftreten, die mitunter große Teile der Marsoberfläche verhüllen.

Die Aufnahmen von Marssonden zeigen Windhosen, die über die Marsebenen ziehen und auf dem Boden dunkle Spuren hinterlassen.

Mars erscheint uns heute als trockener Wüstenplanet. Die bislang vorliegenden Ergebnisse der Marsmissionen lassen jedoch den Schluss zu, dass die Marsatmosphäre in der Vergangenheit (vor Milliarden Jahren) wesentlich dichter war und auf der Oberfläche des Planeten reichlich flüssiges Wasser vorhanden war.

Die Atmosphäre wurde offensichtlich im Laufe der Zeit vom Sonnenwind regelrecht abgetragen und in den Weltraum mitgerissen. Dies wurde durch die geringe Schwerkraft des Planeten und sein schwaches Magnetfeld begünstigt, das kaum Schutz vor den hochenergetischen Partikeln der Sonne bietet.

Vermutlich befinden sich unter der Oberfläche noch größere Mengen an Wasser in Form von Eis.

Geologie – Über den inneren Aufbau des Mars ist nur wenig bekannt, da bislang nur begrenzt seismische Messungen vorgenommen werden konnten. Durch die Analyse der Bahndaten des Mars Global Surveyor konnte jedoch nachgewiesen werden, dass der Mars einen flüssigen Kern mit einem Radius zwischen 1.520 und 1.840 km besitzt und damit eine höhere Temperatur aufweist als zuvor angenommen. Es kann jedoch derzeit keine Aussage getroffen werden, ob der Kern wenigstens zum Teil fest ist. Die Dichte des Kerns liegt niedriger, als es bei einem reinen Eisenkern der Fall wäre, so dass er auch Beimengungen von leichteren Elementen wie zum Beispiel Schwefel enthalten muss.

Auffallend ist die Dichotomie, die »Zweiteilung«, des Mars. Die nördliche und die südliche Hemisphäre unterscheiden sich deutlich, wobei man von den Tiefebenen des Nordens und den Hochländern des Südens sprechen kann. Der mittlere Großkreis, der die topografischen Hemisphären voneinander trennt, ist rund 40 Grad gegen den Äquator geneigt. Der Massenmittelpunkt des Mars ist gegenüber dem geometrischen Mittelpunkt um etwa drei Kilometer in Richtung der nördlichen Tiefebenen versetzt (vgl. Farbtafeln Abb. 145).

Auf der nördlichen Halbkugel sind flache, sand- und staubbedeckte Ebenen vorherrschend, die Namen wie Utopia Planitia oder Amazo-

nis Planitia erhielten. Dunkle Oberflächenmerkmale, die in Teleskopen sichtbar sind, wurden einst für Meere gehalten und erhielten Namen wie *Mare Erythraeum*, *Mare Sirenum* oder *Aurorae Sinus* (diese Namen werden heute nicht mehr verwendet). Die ausgedehnteste dunkle Struktur, die von der Erde aus gesehen werden kann, ist Syrtis Major, die »große Syrte«.

Die südliche Halbkugel ist durchschnittlich sechs Kilometer höher als die nördliche und besteht aus geologisch älteren Formationen. Die Südhalbkugel ist zudem stärker verkratert.

Die deutlichen Unterschiede der Topografie können durch innere Prozesse oder aber ein Impaktereignis verursacht worden sein. In letzterem Fall könnte in der Frühzeit der Marsentstehung ein größerer Himmelskörper, etwa ein Asteroid, auf der Nordhalbkugel eingeschlagen sein und die silikatische Kruste durchschlagen haben. Aus dem Innern könnte Lava ausgetreten sein und das Einschlagbecken ausgefüllt haben.

Die Kruste des Mars weist eine Dicke zwischen 40 km unter den nördlichen Tiefebenen auf und nimmt, im Gegensatz zum stufenartigen Übergang an der Oberfläche, nur langsam auf 70 km am Südpol zu. Dies könnte ein Indiz für innere Ursachen der Zweiteilung des Mars sein.

Der Mars besitzt zwei auffällige Polkappen, die zum größten Teil aus gefrorenem Kohlendioxid (Trockeneis) sowie einem geringen Anteil an Wassereis zusammengesetzt sind. Die nördliche Polkappe hat während des nördlichen Marssommers einen Durchmesser von rund 1.000 km. Ihre Dicke wird auf 5 km geschätzt. Die südliche Polkappe ist mit 350 km Durchmesser und einer Dicke von 1,5 km weniger ausgedehnt. Die Polarkappen zeigen spiralförmige Einschnitte, deren Entstehung bislang nicht geklärt ist.

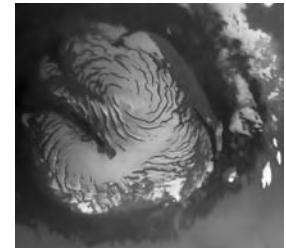


Abb. 64: Die Nordpolregion, aufgenommen von Mars Global Surveyor

Wenn im Sommer die jeweiligen Polkappen teilweise abschmelzen, werden darunter geschichtete Ablagerungen sichtbar, die möglicherweise abwechselnd aus Staub und Eis zusammengesetzt sind. Im Marswinter nimmt der Durchmesser der jeweils sonnenabgewandten Polkappen durch ausfrierendes Kohlendioxid wieder zu.

Längs des Marsäquators verläuft das größte bekannte Canyonsystem des Sonnensystems. Das Valles Marineris erstreckt sich über 4.000 km und ist stellenweise bis zu 7 km tief. Es handelt sich um einen gewaltigen tektoni-

schen Bruch, der nach Westen hin in einer chaotisch anmutenden Region mit zahlreichen Einbrüchen und Gräben mündet (vgl. Farbtafeln Abb. 142).

Nordwestlich des Valles Marineris liegt die Tharsis-Region, ein ausgedehntes Gebiet mit erloschenen Schildvulkanen. Der höchste, Olympus Mons, stellt mit einer Höhe von 27 km die höchste Erhebung im Sonnensystem dar. Die Tharsis-Region bildet einen gewaltigen Wulst auf der Mars-Lithosphäre mit einer Ausdehnung von etwa 4.000 x 3.000 km. Offensichtlich stehen die Tharsis-Region und das Valles Marineris in ursächlichem Zusammenhang. Möglicherweise haben vulkanische Kräfte die Oberfläche des Planeten empor gedrückt, wobei die Kruste im Bereich des Valles Marineris regelrecht aufgerissen wurde. Ein weiteres, wenn auch weniger ausgedehntes, vulkanisches Gebiet ist die Elysium-Region nördlich des Äquators, mit den Schildvulkanen Elysium Mons, Heetwaes Tholus und Albor-Tholus.

Auf der Südhalbkugel sind zahlreiche Impaktkrater sichtbar. Der größte, Hellas Planitia (das Hellas Einschlagbecken), hat bis 2.100 km Durchmesser. Der zweitgrößte Einschlagkrater des Mars ist Chryse Planitia.

An den Landstellen der Marssonden sind Gesteinsbrocken, sandige Böden und Dünen sichtbar. Die Gesteine weisen an der Oberfläche eine blasenartige Struktur auf. Sie ähneln in ihrer Zusammensetzung irdischen Basalten. Die Böden sind offensichtlich durch die Verwitterung von eisenhaltigen, vulkanischen Basalten entstanden.

Auf der Marsoberfläche verlaufen Stromtäler, die mehrere hundert Kilometer lang und mehrere Kilometer breit sein können. Die Täler beginnen ziemlich abrupt und haben keine Zuflüsse. Die meisten verlaufen nördlich des Valles Marineris und laufen in einer ausgedehnten Ebene namens Chryse Planitia zusammen. In den Tälern erheben sich mitunter stromlinienförmige Inseln. Sie weisen auf eine vergangene Flutperiode hin, bei der über einen geologisch relativ kurzen Zeitraum große Mengen Wasser geflossen sein müssen. Es könnte sich um Wassereis gehandelt haben, das sich unter der Marsoberfläche befand, danach durch vulkanische Prozesse geschmolzen wurde und dann abgeflossen ist.

Darüber hinaus finden sich an Abhängen und Kraterrändern Spuren von Erosionen, die möglicherweise ebenfalls durch flüssiges Wasser verursacht wurden.

Messungen der Magnetfeldlinien durch die Sonde Mars Global Surveyor ergaben, dass Teile der planetaren Kruste unterschiedlich magnetisiert sind, wobei gleichgerichtete Bänder von etwa 1.000 km Länge und 150 km Breite auftreten. Ihre Größe und Verteilung entspricht einem magneti-

schen Muster, das in ähnlicher Form auch auf dem Meeresboden der Erde auftritt. Einer im Jahre 1991 entwickelten Theorie nach, die allerdings noch nicht bestätigt werden konnte, können solcherart Muster das Ergebnis von \rightarrow Plattentektonik sein. Derartige Prozesse könnten die Entstehung einer dichteren Atmosphäre begünstigt haben, wobei kohlenstoffreiches Gestein aus dem Marsinnern an die Oberfläche gelangte.

Die Marssonde Opportunity fand im Gebiet des Meridiani Planum millimetergroße Kügelchen des Eisenminerals Hämatit. Diese könnten sich vor Milliarden Jahren unter Einwirkung von Wasser abgelagert haben. Darüber hinaus wurden Minerale vorgefunden, die aus Schwefel-, Eisen- oder Bromverbindungen aufgebaut sind, wie zum Beispiel Jarosit. Auf der entgegengesetzten Hemisphäre des Mars fand die Sonde Spirit in den »Columbia Hills« das Mineral Goethit, das ausschließlich unter dem Einfluss von Wasser gebildet werden kann.

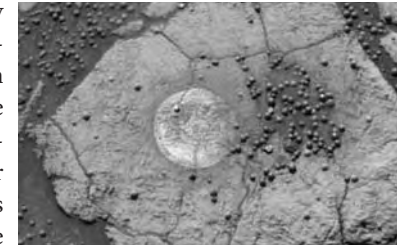


Abb. 65: Hämatitkügelchen auf dem Felsen »Berry Bowl«

Entstehungsgeschichte – Anhand der geologischen Formationenvielfalt und der Verteilung von Einschlagskratern kann die Entstehungsgeschichte des Planeten abgeleitet werden. Der Mars entstand vor etwa 4,5 Milliarden Jahren durch Zusammenballung kleinerer Körper, den Planetesimalen. Vor vier Milliarden Jahren bildete der im Innern noch glutflüssige planetare Körper eine feste Gesteinskruste aus, die einem heftigen Bombardement von \rightarrow Asteroiden und \rightarrow Kometen ausgesetzt war. Die ältesten der heute noch vorhandenen Formationen, wie das Einschlagbecken Hellas Planitia, und die verkraterten Hochländer, wie Noachis Terra, wurden vor 3,8 bis 3,5 Milliarden Jahren, in der so genannten *Noachischen Periode* gebildet. In dieser Periode setzte die Zerteilung der Marsoberfläche ein, wobei die nördlichen Tiefländer gebildet wurden. Durch starke vulkanische Eruptionen wurden weite Teile des Planeten von Ablagerungen vulkanischer Laven und Aschen bedeckt. Diese wurden an vielen Stellen wieder durch Wind und Wasser abgetragen und ließen ein Netzwerk von Tälern zurück. Das geologische »Mittelalter« des Mars wird als *Hesperianische Periode* bezeichnet. Sie umfasst einen Zeitraum vor 3,5 bis 1,8 Milliarden Jahren. In dieser Periode ergossen sich riesige Lavamengen aus ausgedehnten Spalten in der Marskruste und

bildeten weite Ebenen, wie Hesperia Planum. Es entstanden auch die ältesten Vulkane der Tharsis- und der Elysium-Region, wobei die Gesteinskruste stark verformt wurde und sich das Valles Marineris ausbildete. Es bildeten sich die gewaltigen Stromtäler, in denen große Wassermengen flossen und sich stellenweise aufstauten. Das jüngste geologische Zeitalter des Mars wird als *Amazonische Periode* bezeichnet und begann vor 1,8 Milliarden Jahren. In dieser Phase bildeten sich die jüngeren Vulkane der Tharsis- und der Elysium-Region, aus denen große Lavamassen flossen und weite Ebenen, wie Amazonis Planitia, ausbildeten. Gegenwärtig wird die Oberfläche des Mars hauptsächlich durch Winderosion und Hangrutschungen geformt.

Monde

Zwei kleine Monde, ➔Phobos und ➔Deimos (griech. Furcht und Schrecken) umkreisen den Mars. Sie wurden 1877 von dem US-amerikanischen Astronomen Asaph Hall entdeckt und nach den in der Ilias überlieferten Begleitern und Mitstreitern des Kriegsgottes Ares (lat. Mars) benannt.

Phobos und Deimos sind zwei unregelmäßig geformte Felsbrocken. Möglicherweise handelt es sich um ➔Asteroiden, die von der Gravitation des Mars eingefangen wurden.

Ihre Existenz war schon lange vorher mehrmals beschrieben worden, zuletzt von Voltaire, der in seiner 1750 erschienenen Geschichte *Micromégas* über zwei Marsmonde schreibt. Es ist wahrscheinlich, dass Voltaire diese Idee von Jonathan Swift übernommen hat, dessen Buch *Gullivers Reisen* 1726 erschienen war. Darin wird im dritten Teil beschrieben, die Astronomen des Landes Laputa hätten »ebenfalls zwei kleinere Sterne oder Satelliten entdeckt, die um den Mars kreisen, wovon der innere vom Zentrum des Hauptplaneten genau drei seiner Durchmesser entfernt ist und der äußere fünf.«

Damit hat er das Bahnverhalten der Monde für die damalige Zeit erstaunlich gut vorhergesagt. Es wird vermutet, dass Swift von einer Fehlinterpretation Johannes Keplers gehört hatte. Dieser hatte das Anagramm, das Galileo Galilei 1609 an ihn schickte, um ihm die Entdeckung der Phasen der ➔Venus mitzuteilen, als die Entdeckung zweier Marsmonde aufgefasst.

Die Umlaufzeit von Phobos ist kürzer als die Rotationszeit von Mars. Der Mond kommt dem Planeten durch die Gezeitenwechselwirkung auf einer Spiralbahn langsam immer näher und wird schließlich auf diesen stürzen oder durch die Gezeitenkräfte auseinandergerissen werden, so

dass er als Marsring enden wird. Für ihn berechneten DLR-Forscher, aufgrund neuerer Daten der europäischen Raumsonde Mars Express, dass der Mond in etwa 50 Millionen Jahren entweder auf den Roten Planeten stürzen oder auseinandergerissen werden wird. Deimos wird dagegen in einer noch fernerer Zukunft dem Mars entfliehen. Er driftet durch die Gezeitenwechselwirkung langsam nach außen, wie alle Monde, die langsamer (und nicht retrograd) um einen Planeten kreisen, als dieser rotiert.

Erforschung

In früheren Zeiten – Tycho Brahe (1546–1601) maß die Planetenpositionen des Mars mittels Mauerquadrant recht genau und schuf damit die Voraussetzung für Johannes Kepler (1577–1630), der aufgrund Brahes Aufzeichnungen die elliptische Bahn des Planeten berechnete und die drei Keplerschen Gesetze ableitete.

Christiaan Huygens (1629–1695) entdeckte eine dunkle, dreieckige Zone (Syrtis Major) auf der Marsoberfläche. Aus deren Positionsveränderungen errechnete er die Eigenrotation des Mars von rund 24,5 Stunden (heutiger Wert: 24,623 h).

Giovanni Domenico Cassini beschrieb 1666 die weißen Polkappen des Mars. Wilhelm Herschel (1738–1822) bestimmte 1784 die Neigung der Rotationsachse gegenüber der Umlaufbahn. Wilhelm Beer fertigte 1830 die erste Marskarte an.

Giovanni Schiaparelli (1835–1910) nahm 1877 auf der Marsoberfläche linienartige Strukturen wahr, die er *Canali* (ital., »Graben«) nannte und in einer detaillierten Karte einzeichnete. Schiaparelli machte zunächst keine Angaben über den Ursprung der Strukturen,



Abb. 66: Marsoberfläche nach Schiaparelli (1888)

doch wurden diese als Kanäle, und somit als Werk intelligenter Marsbewohner, interpretiert. Auf älteren Marskarten sind die Kanäle, die zudem Namen erhielten, eingezeichnet. Während weitere Astronomen seine Beobachtungen bestätigten, wurde die Existenz der Kanäle von anderen Astronomen angezweifelt. Erst der Vorbeiflug der amerikanischen Mariner-Sonden beendete die Spekulationen. Fotos der Marsoberfläche zeigten keine Anzeichen von Kanälen, diese waren offensichtlich das Ergebnis von optischen Täuschungen.

Raumfahrtzeitalter – Viele unbemannte Raumsonden sind schon zum Mars geschickt worden, einige waren sehr erfolgreich, aber eine bemerkenswerte hohe Anzahl von ihnen versagte. Im Gegensatz zum Erdmond gibt es bis heute keine Gesteinsproben, die vom Mars zurückgebracht wurden, so dass Marsmeteorite die einzige Möglichkeit sind, Material vom Mars in irdischen Laboratorien zu erforschen.

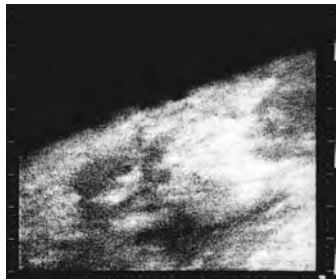


Abb. 67: Die erste Nahaufnahme vom Mars, aufgenommen von Mariner 4

Zwei sowjetische Sonden wurden im Oktober 1960 gestartet, um am Mars vorbeizufiegen, erreichten aber noch nicht einmal die Erdumlaufbahn. 1962 versagten drei weitere sowjetische Sonden, zwei von ihnen blieben in Erdborbit, die dritte verlor auf dem Weg zum Mars den Kontakt mit der Erde. Auch ein weiterer Versuch im Jahre 1964 schlug fehl.

Zwischen 1962 und 1973 wurden 10 Mariner-Raumsonden vom Jet Propulsion Laboratory der NASA entwickelt und gebaut, um das innere Sonnensystem zu erforschen. Es waren relativ kleine Sonden, die meistens nicht einmal eine halbe Tonne wogen. Mariner 3 und Mariner 4 waren identische Raumsonden, die am Mars vorbeifliegen sollten.

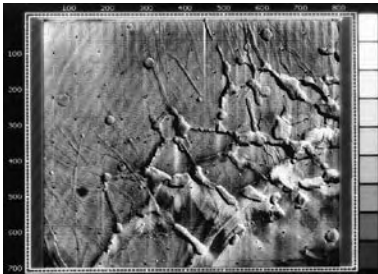


Abb. 68: Die Noctis Labyrinthus-Region, aufgenommen von Mariner 9

Mariner 3 wurde am 5. November 1964 gestartet, aber die Transport-Verkleidung löste sich nicht richtig und die Sonde erreichte den Mars nicht.

Drei Wochen später, am 28. November 1964, wurde Mariner 4 erfolgreich auf eine achtmonatige Reise zum roten Planeten geschickt. Am 14. Juli 1965 flog die Sonde am Mars vorbei und lieferte die ersten Nah-

aufnahmen – insgesamt 22 Fotos – des Planeten. Die Bilder zeigten monddähnliche Krater, von denen einige von Frost bedeckt zu sein scheinen.

1969 folgten Mariner 6 und Mariner 7 und lieferten insgesamt 200 Fotos.

1971 missglückte der Start von Mariner 8, dafür erhielt die NASA von Mariner 9 im gleichen Jahr mehrere tausend Bilder.

Ebenfalls 1971 landete mit der sowjetischen Mars 3 die erste Sonde weich auf dem Mars, Mars 2 war wenige Tage zuvor gescheitert; der Funkkontakt

brach jedoch 20 Sekunden nach der Landung ab, mögliche Ursache war ein gerade tobender, heftiger Staubsturm, der den Lander umgeworfen haben könnte.

In den 1970er Jahren landeten die Viking-Sonden erfolgreich auf dem Mars und lieferten die ersten Farbbilder sowie Daten von Bodenproben: Viking 1 schaffte am 20. Juni 1976 als erste US-amerikanische Sonde eine weiche Landung. Die Sowjetunion versuchte noch weitere Landungen auf dem Mars, scheiterte jedoch.

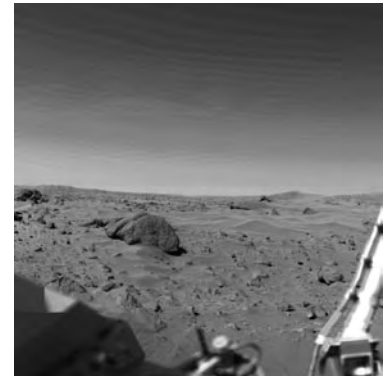


Abb. 69: Bild von Viking 1. Der große Felsen links von der Mitte ist etwa 2 Meter breit. Er wurde »Big Joe« getauft.

Die einzigen Raumsonden, die in den 1980er Jahren zum Mars flogen, waren die beiden sowjetischen Fobos-Sonden. Sie wurden 1988 von Baikonur aus gestartet und sollten den Mars und seinen Mond Phobos untersuchen. Dafür waren sie im Rahmen einer internationalen Kooperation neben sowjetischen auch mit zahlreichen westlichen Instrumenten bestückt. Der Kontakt zu Fobos-1 brach jedoch schon auf dem Weg zum Mars ab, so dass nur Fobos-2 eine Marsumlaufbahn erreichte. Bereits nach einem Monat Operationszeit brach der Kontakt zu Fobos-2 wegen eines falschen Ingenieur-Kommandos ebenfalls ab.

1992 wurde die US-Sonde Mars Observer gestartet. Sie ging 1993 kurz vor dem Einschwenken in die Umlaufbahn verloren.

1996 sollte die erste russische Raumsonde Mars 96 seit dem Zusammenbruch der Sowjetunion starten. Doch versagte am 16. November 1996 die Proton-Trägerrakete, so dass Mars 96 nach nur einem Tag in einer niedrigen Erdumlaufbahn wieder in die Erdatmosphäre eintrat und verglühte.

Besonderes Aufsehen erregte 1997 der Mars Pathfinder, bei dem zum ersten Mal ein kleines Fahrzeug – das Marsmobil (Rover) Sojourner – 16.000 Bilder von der Umgebung der Landestelle machen konnte. Die Sonde landete publikumswirksam am 4. Juli, dem



Abb. 70: Der Marsrover Sojourner

amerikanischen Unabhängigkeitstag, und lieferte viele Aufnahmen, die von der NASA zum ersten Mal sofort im Internet veröffentlicht wurden. Eine weitere erfolgreiche Mission war 1997 der Mars Global Surveyor, bei der die Marsoberfläche in einer hohen Auflösung kartografiert wird; dieser Satellit umkreist noch heute den Mars (vgl. Farbtafeln Abb. 144).

Die Marssonden Mars Climate Orbiter (ging wegen einem groben Programmierfehler in der Navigation verloren) und Mars Polar Lander (wahrscheinlich wegen eines fehlerhaften Sensors bei der Landung aus größerer Höhe abgestürzt) stellten 1999 herbe Rückschläge für die Marsforschung dar.

Auch die 1998 gestartete japanische Raumsonde Nozomi konnte den Mars nicht erreichen. Seit dem 24. Oktober 2001 umkreist außer dem Global Surveyor noch 2001 Mars Odyssey den roten Planeten, der spezielle Instrumente zur Fernerkundung von Wasservorkommen an Bord hat.

Von den bis 2002 insgesamt 33 Missionen zum Mars waren nur 8 erfolgreich, allesamt US-amerikanisch.

Am 2. Juni 2003 startete im Rahmen der ersten europäischen Mars-Mission die ESA-Raumsonde Mars Express mit dem Landegerät Beagle 2 erfolgreich zum Mars. Beagle 2 landete am 25. Dezember 2003 auf der Marsoberfläche, allerdings konnte der Kontakt niemals aufgebaut werden, so dass angenommen wird, dass Beagle 2 bei der Landung auf der Oberfläche zerschellte. Mars Express arbeitet jedoch erfolgreich in der Marsumlaufbahn und konnte unter anderem viele Aufnahmen von Formationen machen, von denen man annimmt, dass sie ausgetrocknete oder ausgefrorene Flusstäler sind.

Am 10. Juni 2003 wurde die US-amerikanische Marssonde Spirit (MER-A) zum Mars gestartet. An Bord befand sich ein Geländefahrzeug (Rover), welches nach der Landung drei Monate lang Gesteinsproben entnehmen



Abb. 71: Marsrover vom Typ Spirit/ Opportunity



Abb. 72: Sonnenuntergang auf dem Mars (Spirit am 19. Mai 2005)

und nach Spuren von ehemals vorhandenem Wasser suchen sollte. Die Landung erfolgte am 4. Januar 2004 im *Gusev Krater*, seitdem arbeitet die Sonde länger als erwartet erfolgreich auf der Marsoberfläche.

Am 8. Juli 2003 wurde die baugleiche Sonde Opportunity (MER-B) mit einer Delta II-Rakete gestartet. Opportunity ist die Schwestersonde von Spirit und gehört ebenfalls zur *Mars Exploration Rovers Mission*. Die Landung erfolgte am 25. Januar 2004 um 6.05 Uhr (MEZ) in der *Meridiani-Planum*-Tiefebene. Beide Sonden befinden sich auf den jeweils zueinander komplementären Marshemisphären. Die vom Rover Opportunity gesammelten Beweise, dass der Mars einst warm und feucht war, wurden im Jahresrückblick der Fachzeitschrift *Science* mit der Wahl zum »Durchbruch des Jahres 2004« gewürdigt.

Am 12. August 2005 ist die US-Sonde Mars Reconnaissance Orbiter mit einer Atlas-V Rakete auf die Reise geschickt worden. Die Sonde soll den Mars mit ihren hochauflösenden Kameras kartografieren, um unter anderem nach geeigneten Landstellen für spätere Rover-Missionen zu suchen. Außerdem soll die Sonde für die Hochgeschwindigkeitskommunikation zwischen zukünftigen Raumsonden auf der Marsoberfläche und der Erde dienen.

Als nächstes soll 2008 die Sonde Phoenix in der Nähe des Mars-Nordpols landen und dort mit ihren Instrumenten nach Wasser suchen. Dafür trägt sie einen Roboterarm mit sich, mit dem sie bis auf 1 m unter die Oberfläche kommen kann.

Im den Jahren 2009/2011 sollen gleich zwei große Rover-Missionen zum Mars fliegen: Mars Science Laboratory der amerikanischen NASA und ExoMars der europäischen ESA. Beide Rover können weite Strecken zurücklegen und werden daher umfassende Untersuchungen in großem Umkreis durchführen können. Dabei soll Mars Science Laboratory in erster Linie zu geologischen Untersuchungen ausgelegt sein und ExoMars speziell nach Spuren von Leben suchen. Nach gegenwärtigen Planungen soll 2009 auch die seit 1996 erste russische Raumsonde Fobos-Grunt zum Marsmond Phobos fliegen, dort Proben entnehmen und sie wieder zur Erde bringen. Weitere Pläne der NASA und ESA zur Erforschung des Mars nach 2010 enthalten unter anderem das Aussetzen von kleineren Flugzeugen in der Atmosphäre und Rückführung von Marsproben zur Erde.

Im Januar 2004 kündigte der US-amerikanische Präsident George W. Bush Anstrengungen der USA für eine bemannte Mars-Mission an. Auch das langfristig angelegte europäische Mars-Programm Aurora strebt die Landung eines Menschen auf dem Mars im Jahr 2030 an. Doch aufgrund

Kohlendioxid wurde dem Marsboden zugesetzt. Dieses Kohlendioxid hätte assimiliert werden und später nachgewiesen werden müssen. Auch dieses Ergebnis war positiv. Obwohl die Ergebnisse der biologischen Experimente positiv waren, gaben sie aufgrund des negativen Ergebnisses des Gaschromatografen-Massenspektrometer-Versuchs keinen schlüssigen Beweis für Existenz oder Nichtexistenz von Leben auf dem Mars.

Im Jahr 1996 fanden David S. McKay und seine Mitarbeiter Strukturen im Marsmeteoriten →ALH84001, die sie als Spuren von fossilen Bakterien deuteten. Allerdings wird die Beweiskraft der gefundenen Strukturen von vielen Wissenschaftlern angezweifelt, da diese auch auf rein chemischem Wege entstehen konnten.

Am 23. Januar 2004 entdeckte die europäische Marssonde Mars Express am Südpol des Mars große Mengen gefrorenen Wassers, Ende Juli 2005 auch in einem nahe dem Nordpol gelegenen Krater.

Ende März 2004 wurde bekannt, dass Forscher der NASA und der ESA unabhängig voneinander Methan in der →Marsatmosphäre nachgewiesen haben. Ob das Methan geologischen Ursprungs ist oder etwa durch den Stoffwechsel von Mikroorganismen gebildet wurde, sollen weitere Untersuchungen zeigen.

Ebenfalls Anfang 2004 entdeckte die Marssonde Opportunity Gesteine, die in offenstehendem Wasser abgelagert worden sein müssen und viele regelmäßig verteilte kugelige, bis 1 cm große Hämatit-Konkretionen enthalten. Solche Konkretionen kommen auch auf der Erde vor. Unter irdischen Bedingungen ist wahrscheinlich, dass bei ihrer Entstehung Bakterien beteiligt sind. Ob dies auch für den Mars gilt, könnten nur Laboruntersuchungen auf der Erde zeigen.

Weitere Mikrostrukturen, welche die Rover Spirit und Opportunity 2004 entdeckt hatten und in denen ein Teil der interessierten Öffentlichkeit Hinweise auf Leben hatte sehen wollen, erwiesen sich bei näherer Untersuchung als abiotisch oder künstlich, so zum Beispiel Schleifspuren auf durch die Instrumente bearbeiteten Gesteinsoberflächen oder Filamente, die sich als Textilfasern der Lande-Airbags herausstellten.

Höheres oder gar intelligentes Leben scheint es auf dem Mars also nicht zu geben, Wissenschaftler halten jedoch primitive Lebensformen (Mikroben) für denkbar.

Beobachtung

Aufgrund der Bahneigenschaften der Planeten »überholt« die Erde den Mars durchschnittlich alle 779 Tage auf ihrer inneren Bahn. Diesen Zeitraum,

der zwischen 764 und 811 Tagen schwankt, nennt man synodische Periode. Befinden sich Sonne, Erde und Mars in einer Linie, so steht der Mars von der Erde aus gesehen in Opposition zur Sonne. Zu diesem Zeitpunkt ist Mars besonders gut zu beobachten, er steht dann als rötlicher »Stern« auffallend hell am Nachthimmel. Beobachtet man Mars regelmäßig, kann man feststellen, dass er vor und nach einer Opposition am Himmel eine Schleifenbewegung vollführt. Diese Oppositionsschleife ergibt sich aus den Sichtwinkeln, die Mars bietet, während er von der Erde überholt wird.

Da die Planeten keine idealen Kreisbahnen aufweisen, sondern sich auf mehr oder weniger stark ausgeprägten elliptischen Bahnen bewegen, weisen Erde und Mars zum Zeitpunkt der Oppositionen unterschiedliche Entfernungen auf. Diese können zwischen 55,6 und 101 Millionen Kilometer betragen. Bei einer geringen Oppositionsentfernung spricht man von einer *Perihelopposition*, bei einer großen von einer *Aphelopposition*.

Periheloppositionen bieten die besten Gelegenheiten, den Mars von der Erde aus mittels Teleskop zu beobachten. Der Planet hat dann einen scheinbaren Durchmesser bis zu 25,8 Bogensekunden. Bei einer Aphelopposition ist er mit 14,1 Bogensekunden nur etwa halb so groß. Besonders erdnahe Oppositionen fanden zum Beispiel in den Jahren 1766, 1845, 1924 und 2003 statt. Am 28. August 2003 betrug die Distanz Erde – Mars 55,76 Millionen Kilometer. Dies war die geringste Distanz seit etwa 2.000 Jahren. Erst im Jahre 2287 wird der Mars der Erde noch näher kommen, der Abstand beträgt dann 55,69 Millionen Kilometer.

Im Teleskop erscheint Mars zunächst als rötliches Scheibchen. Bei stärkerer Vergrößerung können die Polkappen sowie dunkle Oberflächenmerkmale, wie die *Große Syrte*, ausgemacht werden. Treten auf dem Mars größere Staubstürme auf, verblassen die Merkmale, da die Oberfläche von einer rötlichen Dunstsicht eingehüllt wird, die sich mitunter über Wochen halten kann. Durch den Einsatz von CCD-Kameras sind mittlerweile auch Amateurastronomen in der Lage, detailreiche Aufnahmen der Marsoberfläche zu erzielen, wie sie vor etwa zehn Jahren nur von den leistungsfähigsten Großteleskopen erstellt werden konnten. Wegen der scheinbaren Rückläufigkeit des Mars entsteht für den Beobachter die so genannte Marsschleife.

Kulturgeschichte

Im alten Ägypten wurde Mars als »Horus der Rote« bezeichnet. Da der Planet sich während seiner Oppositionsschleife zeitweise rückläufig bewegt, sprachen die Ägypter davon, dass Mars rückwärts wandere. Der

Name der ägyptischen Hauptstadt »Kairo« leitet sich von »Al Qahira« ab, dem altarabischen Namen für den Planeten Mars.

Im indischen Sanskrit wird der Mars als »Mangal« (verheißungsvoll), »Angaraka« (Glühende Kohle) und »Kuja« (der Blonde) bezeichnet. Er repräsentiert kraftvolle Aktion, Vertrauen und Zuversicht.

Aufgrund seiner (blut)roten Färbung wurde der Mars in verschiedenen Kulturen mit den Gottheiten des Krieges in Verbindung gebracht. Die Babylonier sahen in ihm Nergal den Gott der Unterwelt, des Todes und des Krieges. Für die Griechen und Römer der Antike repräsentierte er deren Kriegsgötter Ares beziehungsweise Mars. In der nordischen Mythologie steht er für Tyr, den Gott des Rechts und des Krieges.

In der Astrologie ist Mars unter anderem das Symbol der Triebkraft. Es wird dem Element Feuer, dem Metall Eisen, den Tierkreiszeichen Widder und Skorpion und dem 1. Haus zugeordnet.

Mars in Literatur, Film und Musik – Der Mars und seine fiktiven Bewohner sind Thema zahlreicher Romane und Verfilmungen. Die klassische Figur des kleinen grünen Männchens mit Antennen auf dem Kopf erschien erstmals 1913 in einem Comic und ist seitdem als Klischee nicht mehr wegzudenken.

Vor allem durch Percival Lowells Veröffentlichungen wurde Mars weiterhin als eine sterbende Welt angesehen, in deren kalten Wüstenregionen alte und weit entwickelte Zivilisationen ums Überleben kämpften.

In H.G. Wells bekanntem Roman *Krieg der Welten*, der 1898 erschien, verlassen die Marsianer ihre Heimatwelt, um die lebensfreundlichere Erde zu erobern. Die Menschheit, die den hochtechnisierten kriegerischen Marsianern hoffnungslos unterlegen ist, entgeht ihrer Auslöschung nur dadurch, dass die Invasoren von harmlosen irdischen Mikroben dahin gerafft werden. Orson Welles verwendete den Stoff im Jahre 1938 in einem Hörspiel, wobei er die Marsianer in New Jersey landen ließ. Das Hörspiel wurde im Stil einer realistischen Reportage ausgestrahlt. Hörer, die sich später einschalteten, hielten die Invasion der Marsianer für Realität. Wells' Romanvorlage wurde 1952 verfilmt, wobei die Handlung wiederum in die USA der Gegenwart verlegt wurde. Der Film erhielt für die damals Bahn brechenden Spezialeffekte einen Osetwa.

Im Jahr 1978 entstand der Film *Unternehmen Capricorn*. Er griff das Thema der so genannten Mondlandungslüge auf, indem er es in sehr zugespitzter Form auf eine im Filmstudio vorgetäuschte Mars Expedition übertrug. Der 1996 entstandene Film *Mars Attacks* setzt sich ironisch mit

dem Thema Marsinvasion auseinander, wobei den Marsianern amerikanische Schnulzenmusik aus den 50er Jahren zum Verhängnis wird. Unter der Regie von Brian de Palma wurden im Jahr 2000 mit dem Film *Mission to Mars* die Spekulationen um das Marsgesichts der Cydonia-Region als hinterlassenes Bauwerk dramatisch thematisiert.

Steven Spielbergs 2005 entstandenes Remake von *Krieg der Welten* nahm noch einmal das Thema auf und zeigte die Invasion von Außerirdischen auf der Erde aus der Sicht eines Familienvaters aus den USA. Weitere bekannte Sciencefiction-Filme, die auf dem Mars handeln, sind *Red Planet* und *Total Reetwal*.

Edgar Rice Burroughs, der Autor von *Tarzan*, schrieb von 1917 bis 1943 die elfbändige Saga *John Carter vom Mars*, in der sich der irdische Held in marsianische Prinzessinnen verliebt, gegen Luftpiraten, grünhäutige Unholde, weiße Riesenaffen und andere Untiere kämpft. *Die Marschroniken*, eine stimmungsvolle Sammlung von Erzählungen des Schriftstellers Ray Bradbury, sind ebenfalls auf dem Mars angesiedelt.

Der wohl prominenteste Auftritt des Mars in der Musik dürfte der erste Satz von Gustav Holsts Orchestersuite *Die Planeten* (1914–1916) sein, deren erster Satz *Mars, the Bringer of War* mit seinem drohend-martialischen Charakter die mythologische Gestalt Mars eindrucksvoll porträtiert.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Mars_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Mars_(Planet)). Historie: 23.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Nephelin, S, Marco Krohn, Bricktop1, Phrood, Lotse, Arnomane, Zwobot, CWitte, Srbauer, Golden arms, RKraasch, Anton, Zahnstein, BWBot, LordKain, Pearl, Crux, Stefan Kühn, Batrox, Acf, Epo, Leki, Tsor, Boemmels, Mps, Ckeen, Imladros, TOMM, Elasto, U.jes, Fuzzy, T.a.k., Head, Threedots, AkaBot, GFJ, Karsten88, Jed, Ehrhardt, Tsui, Sansculotte, Autan, AlephNull, SebastianBreier, Schusch, HenrikHolke, Stefan h, Inschanör, Stephan75, CuttyP, GeroBrandenburg, Szs, RCBot, DaB., anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Phobos

Phobos ist neben Deimos einer der beiden Monde des Planeten Mars. Benannt ist er nach Phobos, dem Sohn und Begleiter des griechischen Kriegsgottes Ares (lateinisch Mars). Phobos steht dabei für Furcht (vergleiche Phobie).

Eigenschaften

Aufgrund seiner unregelmäßigen Form wird allgemein angenommen, dass Phobos ebenso wie Deimos ein von Mars eingefangener Asteroid ist. Phobos nähert sich, im Gegensatz zu Deimos, dem Mars immer

mehr. Der Abstand zum Planeten reduziert sich dabei in einem Jahrhundert um 9 m, so dass er in etwa 50 Millionen Jahren auf den Mars stürzen wird. Es wird jedoch vermutet, dass Phobos durch die Schwerkraft des Mars vorher auseinanderbricht und einen Ring um den Mars bilden wird. Mit einer Entfernung zum Mars von lediglich 9.270 km liegt er recht nahe an der dünnen Marsatmosphäre und läuft einmal in 7 h 39 m 12 s um den Mars, wobei seine Bahnneigung gegen die Äquatorebene des Mars 1,08° beträgt. Phobos hat wie der → Erdmond eine gebundene Rotation, das heißt, er wendet dem Mars immer dieselbe Seite zu. Phobos ist ein sehr unregelmäßig geformter Körper von $27 \times 22 \times 19$ km und weist eine mittlere Dichte von $2,0 \text{ g/cm}^3$ auf. Er ist überzogen von einer Staubschicht, dem so genannten Regolith, wie er auch auf unserem Mond vorkommt.

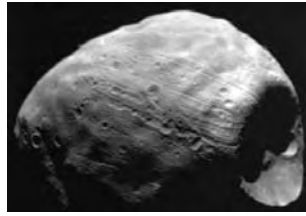


Abb. 75: Marsmond Phobos



Abb. 76: Der mehrere Kilometer große Krater Stickney auf Phobos

Für einen Beobachter auf dem Mars würde Phobos aufgrund seiner retrograden Umlaufbahn im Westen aufgehen und Osten niedergehen. Die schnelle Umlaufgeschwindigkeit bewirkt auf dem Mars zwei Phobosaufgänge pro Tag. Sie erfolgen in einem Intervall vom elf Stunden. Die scheinbare Größe Phobos' entspricht weniger als die Hälfte der unseres Vollmondes. Dennoch strahlt er weniger Licht in die Marsnacht ab als die Venus auf die Erde.

Oberfläche

Der auffälligste Krater auf Phobos Oberfläche ist *Stickney*. Er misst etwa 10 km im Durchmesser. Der verantwortliche → Einschlag muss den Mond beinahe zerrissen haben.

Weitere, nach bekannten Astronomen benannte Krater auf Phobos sind

- D'Arrest – nach Heinrich Ludwig d'Arrest (1822–1875),
- Hall – nach Asaph Hall (1829–1908), Entdecker der Marsmonde,
- Roche – nach Edouard Roche,
- Sharpless – nach Bevan Sharpless (1904–1950),
- Stickney – nach Angeline Stickney († 1938), Ehefrau Asaph Halls,
- Todd – nach David Todd (1845–1912),
- Wendell – nach Oliver Wendell (1845–1912).

Ferner besitzt Phobos einen nach Johannes Kepler (1571–1630) benannten Gebirgskamm namens *Kepler Dorsum* (lat. für »Kepler-Rücken«).

Erforschung

Aufgrund seiner großen Nähe zu Mars, der ihn förmlich »überstrahlt«, ist Phobos nur schwer im Fernrohr schwer zu erkennen. So wurde er erst im Jahre 1877 von dem Astronomen Asaph Hall entdeckt.

Die russischen Sonden Fobos 1 und 2 sollten auf dem Trabanten landen und mit einem raffinierten Mechanismus auf dem Mond »umherhüpfen«. Kurz vor dem Verlorengehen der beiden Sonden konnten diese Gasausbrüche auf Phobos feststellen. Wo diese herrühren, ist unbekannt.

Nahaufnahmen von Phobos entstanden 1971 durch Mariner 9, 1977 durch Viking 1, 1988 durch Fobos 2 und 1998 und 2003 durch Mars Global Surveyor.

Für den 1980 gefallenen → Meteoriten Kaidun wurde Phobos als möglicher Ursprungskörper vorgeschlagen. Sollte dies der Fall sein, würde Phobos hauptsächlich aus einem den kohligen CR-Chondriten entsprechenden Material bestehen.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Phobos_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Phobos_(Mond)). Historie: 5.9.03: Angelegt von Nephelin, danach bearbeitet von den Hauptautoren OliD, Nephelin, Richi, Spirit84, Zwobot, Banana341, Arnomane, Epo, BWBot, DrMurx, Phrood, Karsten88, ArtMechanic, Schusch, Karl-Henner, Binter, Elwood j blues, Stern, S, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.



Abb. 77: Phobos Großaufnahme

Deimos

Deimos (gesprochen *dimos*) ist neben → Phobos einer der beiden Monde des → Planeten → Mars und wurde von Asaph Hall im Jahr 1877 entdeckt. Benannt wurde er nach Deimos, dem Sohn und Begleiter des griechischen Kriegsgottes Ares (lat. für »Mars«). Der Name Deimos steht dabei für »Schrecken«.

Umlaufbahn

Deimos ist der entferntere der beiden Marsmonde und läuft auf einer fast exakten Kreisbahn von 23.459 km Radius um den Mars und benötigt für einen Umlauf 1 d 6 h 18 min. Er hat wie der → Erdmond eine gebundene Rotation, das heißt, er wendet dem Mars immer dieselbe Seite zu. Seine Umlaufbahn ist mit $1,79^\circ$ leicht gegen die Äquatorebene des Mars geneigt.

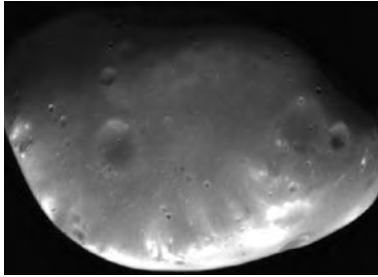


Abb. 78: Marsmond Deimos

Würde man auf dem Mars stehen, erschiene einem Deimos mit einem scheinbaren Durchmesser von der doppelten Größe, die die Venus von der Erde aus bei ihrer größten Annäherung hat. Er wäre trotzdem nur als verwachsenes Pünktchen am Marsfirmament zu erkennen, da er zudem einer der dunkelsten Himmelskörper im Sonnensystem ist. Deimos würde aufgrund seiner Rotationsgeschwindigkeit $2 \frac{1}{2}$ Sols auf dem Mars zu sehen sein.

Eigenschaften

Deimos ist der kleinere der zwei Marsmonde und ist einer der kleinsten Monde im Sonnensystem. Er misst $15 \times 12,2 \times 11$ km und hat eine mittlere Dichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$. Aufgrund seiner unregelmäßigen Form wird allgemein davon ausgegangen, dass Deimos ebenso wie Phobos ein von Mars eingefangener → Asteroid ist.

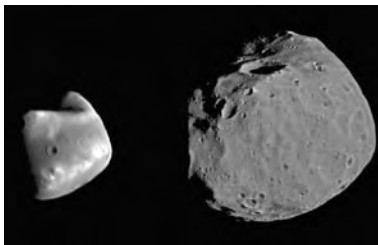


Abb. 79: Phobos (oben) und Deimos (unten) im richtigen Größenverhältnis

Die Oberfläche dieses Trabanten ist mit einer Staubschicht überzogen, dem so genannten Regolith. Die Regolithschicht ist auf Deimos dicker als auf Phobos, was zur Folge hat, dass auf ihm die Oberflächenmerkmale weniger stark ausgeprägt sind. Deimos hat auch eine sehr geringe Albedo von nur 0,07, wodurch er einer der dunkelsten Himmelskörper im Sonnensystem ist.

Deimos besitzt zwei Krater, die nach Autoren benannt wurden, welche die zwei Monde des Mars bereits vor ihrer Entdeckung durch Asaph Hall in ihren Werken erwähnten:

- Swift – nach Jonathan Swift (1667–1745)
- Voltaire – nach dem Pseudonym des Schriftstellers François-Marie Arouet (1694–1778)

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Deimos_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Deimos_(Mond)). Historie: 5.9.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Marco Krohn, Nephelin, Zwobot, Spirit84, OliD, Arnomane, Richi, Phrood, BWBot, Pkn, TomK32, DrMurx, Robbot, Baldhur, Head, Botteler, ArtMechanic, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Jupiter

Jupiter, benannt nach dem römischen Gott Jupiter, ist der fünfte und größte → Planet unseres Sonnensystems. Er zählt zu der äußeren Gruppe der massereichen → Gasriesen, die nach ihm als die jupiterähnlichen (jovianischen) Planeten bezeichnet werden. Zeichen: ♃.

Umlaufbahn

Jupiter ist der innerste der Gasriesen des Sonnensystems und läuft auf einer annähernd kreisförmigen Umlaufbahn mit einer Exzentrizität von 0,0489 um die Sonne. Sein sonnennächster Punkt, das Perihel, liegt bei 4,95 AE und sein sonnenfernster Punkt, das Aphel, bei 5,459 AE. Seine Umlaufbahn ist mit $1,305^\circ$ leicht gegen die Ekliptik geneigt. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Jupiter 11 Jahre 215 Tage und 3 Stunden.

Aufbau

Der Jupiter hat einen Durchmesser von 142.984 km und ist damit der größte Planet des Sonnensystems. Er hat mit $1,326 \text{ g/cm}^3$ wie alle Gasriesen eine geringe mittlere Dichte. Hauptbestandteile der → Atmosphäre, die etwa 1,4% des Jupiterradius einnimmt, sind Wasserstoff, Helium und in geringerer Menge Ammoniak und Methan. Auffällig sind die hellen und dunklen Bänder und der *Große Rote Fleck* – ein riesiger Antizyklon, der in seiner Längsrichtung zwei Erddurchmesser groß ist. Er ist sehr stabil und wird bereits seit 300 Jahren mit nur leichten Veränderungen beobachtet. Der Große Rote Fleck ist aufgrund seiner Größe bereits in einem Amateuerteleskop sichtbar (vgl. Farbtafeln Abb. 146 und Abb. 147).

Der Jupiter unterliegt nach neuen Forschungsergebnissen einem 70-jährigen Klimazyklus. In diesem Zeitraum kommt es zur Ausbildung etlicher Wirbelstürme, Zyklone und Antizyklone, die nach gewisser Zeit wieder zerfallen. Zudem verursacht das Abflauen der großen Stürme Temperaturunterschiede zwischen Polen und Äquator von bis zu 10°C ,

die bisher wegen der ständigen Gasvermischung durch die Stürme verhindert wurden.

Bis zum Jahr 2011 sollten die meisten Wirbelstürme auf Jupiter vorübergehend verschwunden sein, allerdings dürfte der Große Rote Fleck diese Entwicklung aufgrund seiner großen Energie überleben. Die letzte Klimaveränderung dieser Art auf Jupiter konnte 1939 beobachtet werden.

Unterhalb der Atmosphäre ist der Wasserstoff, aus dem Jupiter zur Hauptsache besteht, aufgrund des hohen Drucks flüssig, so dass der Planet von einem Wasserstoffmeer bedeckt ist. Ab etwa 25 % des Jupiterradius geht der Wasserstoff bei einem Druck jenseits von 300 Millionen Erdatmosphären in eine metallische Form über. Es wird vermutet, dass Jupiter unterhalb dieser metallischen Wasserstoffschicht einen Gestein-Eis-Kern hat, der aus schweren Elementen besteht.

Der Jupiter hat ein sehr schwach ausgeprägtes Ringsystem, das 1979 von Voyager 1 erstmals fotografiert werden konnte.

Rotationsverhalten

Der Jupiter rotiert nicht wie ein starrer Körper. Die Äquatorregionen benötigen für eine Rotation 9 h 50 m 30 s und die Polregionen 9 h 55 m 41 s. Die Äquatorregionen werden als System I und die Polregionen als System II bezeichnet. Seine Rotationsachse ist dabei nur sehr gering um 3,13° gegen seine Umlaufbahn um die Sonne geneigt. Jupiter hat somit im Gegensatz zu anderen Planeten keine ausgeprägten Jahreszeiten.

Funktion

Der Jupiter hat eine wichtige Funktion in unserem Sonnensystem. Da er schwerer als alle anderen Planeten zusammen ist, ist er eine wichtige Komponente des Massengleichgewichtes des Sonnensystems. Er stabilisiert durch sein Gewicht den →Asteroidengürtel. Ohne den Jupiter würde alle 100.000 Jahre ein Asteroid aus dem Asteroidengürtel die Erde treffen und Leben dadurch unmöglich machen. Die Existenz eines jupiterähnlichen Planeten in einem Sonnensystem ist dadurch Voraussetzung für Leben auf einem dem Stern näheren Planeten.

Monde

Der Jupiter besitzt 63 bekannte Monde (Stand: Mai 2004).

Die Galileischen Monde →Io, →Europa, →Ganymed und →Kallisto mit Durchmessern zwischen 3.122 km und 5.262 km (Erddurchmesser 12.740 km) wurden 1610 unabhängig voneinander durch Galileo Galilei

und Simon Marius entdeckt, alle anderen Monde mit Ausnahme der 1892 entdeckten Amalthea erst im 20. oder 21. Jahrhundert. Die Galileischen Monde sind die größten Jupitermonde und haben planetennahe, nur wenig geneigte Bahnen. Dies trifft auch auf Metis, Adrastea, Amalthea und Thebe zu, die aber mit Größen von 20 km bis 131 km wesentlich kleiner sind. Man vermutet, dass diese inneren acht Monde gleichzeitig mit Jupiter entstanden sind.

Die restlichen Monde sind kleine bis kleinste Objekte mit Radien zwischen 1 km und 85 km, die vermutlich von Jupiter eingefangen wurden. Sie tragen teilweise noch Zahlencodes als vorläufige Namen, bis sie von der Internationalen Astronomischen Union IAU endgültig benannt sind.

Kulturgeschichte

In der Astrologie steht Jupiter unter anderem für Expansion, Glück, Religion und Philosophie. Jupiter wird dem Element Feuer, dem Sternzeichen Schütze und dem 9. Haus zugeordnet.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Jupiter_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Jupiter_(Planet)) (gekürzt). Historie: 2.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren S. Arty, Ben-Zin, Alkuin, Pikarl, Arnomane, RobertLechner, Zwobot, Leipnizkeks, Gunter.krebs, Wst, Phrood, Nephelin, Karl-Henner, Bricktop1, Kuli, Paddy, JostJahn, Aglarech, RKraasch, BWBot, Allen McC., Crux, CdaMVvWgS, Ulrich.fuchs, Fidi, Chobot, AkaBot, Mps, CuttyP, AstroGK, Traroth, Schusch, Pjacobi, APPER, Bender235, Duesentrieb, Extrawurst, ArtMechanic, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Io

Io ist der innerste der großen Monde des →Planeten→Jupiter. Seine Besonderheit ist sein extremer Vulkanismus, der von keinem anderen Himmelskörper im Sonnensystem überboten wird. Bekannt wurde er durch die erste Messung der Lichtgeschwindigkeit durch Ole Rømer im Jahr 1676 anhand der beobachteten Verfinsterungszeiten von Io in Abhängigkeit von der Stellung des Jupiters zur →Erde (vgl. Farbtafeln Abb. 152).

Entdeckung

Ios Entdeckung wird dem italienischen Gelehrten Galileo Galilei zugesprochen, der im Jahre 1610 sein einfaches Fernrohr auf den Jupiter richtete. Die vier großen Monde Io, →Europa, →Ganymed und →Kallisto werden daher auch als galileische Monde bezeichnet.

Allerdings beanspruchte der Deutsche Simon Marius in seinem 1614 erschienenen Werk *Mundus Jovialis* deren Entdeckung für sich, indem er behauptete, die großen Jupitermonde bereits einige Tage vor Galilei entdeckt zu haben. Galilei zweifelte dies an und bezeichnete Marius' Werk als Plagiat.

Benannt wurde der Mond nach Io, in der griechischen Mythologie eine Geliebte des Zeus (entspricht dem römischen Jupiter). Obwohl der Name Io bereits kurz nach der Entdeckung von Simon Marius vorgeschlagen wurde, konnte er sich über lange Zeit nicht durchsetzen. Erst in der Mitte des 20. Jahrhunderts kam er wieder in Gebrauch. Vorher wurden die galileischen Monde üblicherweise mit römischen Ziffern bezeichnet und Io war der *Jupitermond I*.

Die galileischen Monde sind so hell, dass man sie bereits mit einem Fernglas oder einem kleinen Teleskop beobachten kann.

Bahndaten

Io umkreist Jupiter in einem mittleren Abstand von 421.600 Kilometern in einem Tag 18 Stunden und 27,6 Minuten. Die Bahn weist eine Exzentrizität von 0,0018 auf und ist um 0,04 Grad gegenüber der Äquatorebene des Jupiter geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Io besitzt einen mittleren Durchmesser von 3.643,2 Kilometern und hat eine relativ hohe Dichte von $3,56 \text{ g/cm}^3$. Sie weist damit eine etwas höhere Dichte und einen etwas größeren Durchmesser als der → Erdmond auf. Anders als die Monde des äußeren Sonnensystems scheint Io daher eher wie die terrestrischen (erdähnlichen) Planeten überwiegend aus silikatischem Gestein aufgebaut zu sein. Daten der Raumsonde Galileo lassen darauf schließen, dass Io einen Kern aus Eisen, eventuell mit Anteilen an Eisensulfiden, von mindestens 900 Kilometern Durchmesser besitzt.

Im Gegensatz zu den anderen galileischen Monden findet sich auf Io so gut wie kein Wasser. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass Jupiter in der Frühzeit seiner Entstehung hohe Temperaturen aufwies, die Wasser und andere flüchtige Elemente in der Umgebung der nahen Io entweichen ließen.

Io rotiert in 1 Tag 18 Stunden und 27,6 Minuten um die eigene Achse und weist damit, wie der Erdmond und die übrigen Jupitermonde, eine gebundene Rotation auf. Seine Albedo beträgt 0,61, das heißt 61 Prozent

des einfallenden Sonnenlichts werden von der Oberfläche reflektiert. Die Oberflächentemperatur beträgt im Durchschnitt -143 Grad Celsius.

Vor den Missionen der unbemannten Raumsonden war die Wissenschaft davon überzeugt, dass die galileischen Monde von Kratern übersäte Körper ähnlich dem Erdmond seien. Anhand der Anzahl und Verteilung der Krater sollten Rückschlüsse auf das Alter der Monde gezogen werden. Als die Sonden Voyager 1 und Voyager 2 erstmals detaillierte Aufnahmen zur Erde sandten, war man überrascht, dass die Monde ein gänzlich anderes Aussehen zeigten. Der Grund hierfür ist bei Io der bis dahin unerwartete Vulkanismus.

Vulkanismus

Ios Oberfläche weist so gut wie keine Impaktkrater auf, vielmehr ist sie von aktivem Vulkanismus geprägt und ständigen Veränderungen unterworfen. Io ist deshalb mit Abstand der vulkanisch aktivste Körper im ganzen Sonnensystem.

Bei Eruptionen werden flüssiger Schwefel und Schwefeldioxid mit Geschwindigkeiten bis zu 1 km/s ausgestoßen, die aufgrund der geringen Schwerkraft bis in 300 Kilometer Höhe gelangen können. Die Materialien fallen zurück auf die Oberfläche und bilden mächtige Ablagerungen.

Der Vulkanismus wurde erstmals 1979 auf fotografischen Aufnahmen der Raumsonde Voyager 1 nachgewiesen, die seinerzeit großes Aufsehen erregten, da dies die erste Entdeckung von aktivem Vulkanismus auf einem anderen Himmelskörper als der Erde war. Die Eruptionen variieren sehr stark. Bereits über einen Zeitraum von nur vier Monaten, die zwischen der Ankunft von Voyager 1 und Voyager 2 vergangen waren, konnte festgestellt werden, dass Eruptionen in bestimmten Bereichen zum Erliegen gekommen waren, während an anderen Stellen neue begonnen hatten. Die Ablagerungen rund um die vulkanischen Krater hatten sich ebenfalls deutlich verändert.

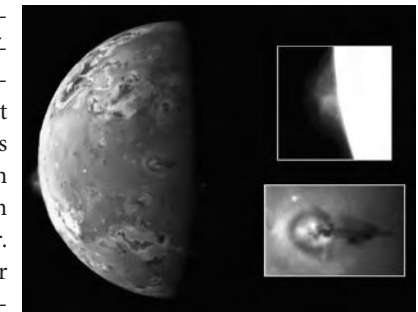


Abb. 80: Auf diesen Aufnahmen der Sonde Galileo sind zwei große vulkanische Eruptionen erkennbar. Die links am Horizont sichtbare hat eine Höhe von 140 km, die andere (vergrößert auf dem unteren Bildausschnitt) von 75 km.

Durch den Vergleich mit den 20 Jahre später aufgenommenen Bildern der Galileo-Sonde ist erkennbar, dass die permanenten Vulkanausbrüche die Oberfläche von Io durch Ablagerungen von ausgeworfenem Material ständig verändern. Io weist die geologisch jüngste Oberfläche im Sonnensystem auf. Ihr Alter wird auf etwa 10 Millionen Jahre geschätzt. Daher sind auch kaum Einschlagskrater zu erkennen, da diese durch die geologischen Prozesse eingeebnet werden.

Die vulkanische Aktivität wird durch Gezeitenkräfte verursacht, die den Mond regelrecht durchkneten und dadurch aufheizen. Allein die Gezeitenkräfte des Jupiter auf Io sind mehr als 6.000 Mal stärker als die des Erdmondes. Die zusätzlichen Gezeitenkräfte von Europa und Ganymed liegen noch immer in der Größenordnung der des Mondes auf die Erde. Durch die gebundene Rotation von Io ist jedoch nicht die absolute Stärke der Gezeitenkräfte des Jupiter entscheidend, sondern nur ihre Änderung. Io wird durch einen Resonanzeffekt mit den Monden Europa und Ganymed, deren Umlaufzeiten im Verhältnis 1:2:4 zueinander stehen, auf eine leicht elliptische Bahn um Jupiter gezwungen, so dass die Variation der Gezeitenkräfte des Jupiter allein durch die Variation des Abstandes noch 1.000 Mal so groß ist wie der Einfluss der Gezeitenwirkung des Mondes auf die Erde. Durch die elliptische Umlaufbahn schwankt Jupiter aus der Sicht eines Beobachters auf Io während eines Umlaufs am Himmel zusätzlich leicht hin und her. Aufgrund des geringen Abstandes zu Jupiter führt dies zu periodischen Deformationen der Größenordnung von 100 Metern. Die entsprechenden Deformationen der Erde betragen lediglich 20 bis 30 Zentimeter.

Oberflächenstrukturen

Ios Oberfläche hat ein Alter von nur wenigen Millionen Jahren und ist permanenten Veränderungen unterworfen. Sie ist im Wesentlichen sehr eben, mit Höhenunterschieden von weniger als einem Kilometer, aber es gibt auch Berge von bis zu neun Kilometern Höhe, die nicht vulkanischen Ursprungs sind und vermutlich durch tektonische Prozesse entstehen. Vergleiche der Bilder der Voyager-Sonden und der 20 Jahre jüngeren Bilder der

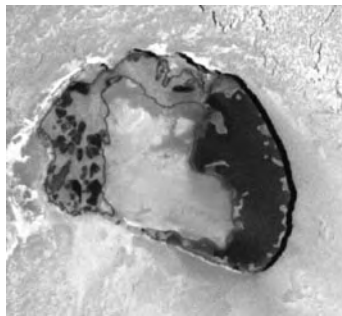


Abb. 81: Tupan-Patera, ein vulkanischer Schlot von 75 km Durchmesser, gefüllt mit flüssigem Schwefel

Galileo-Sonde deuten auch auf schnelle Verfallsprozesse hin, die bereits in diesem kurzen Zeitraum sichtbar sind.

Die markantesten Strukturen der Oberfläche sind jedoch hunderte vulkanischer Calderen, die im Durchmesser bis zu 400 km groß und teilweise mehrere Kilometer tief sind. Daneben gibt es auch zahlreiche Seen aus geschmolzenem Schwefel. Die Ablagerungen von Schwefel und seinen Verbindungen weisen ein breites Spektrum an Farbtönen auf, die dem Mond ein ungewöhnlich buntes Erscheinungsbild verleihen.

Weiterhin erstrecken sich Lavaflüsse einer niedrigviskosen Flüssigkeit über mehrere hundert Kilometer hinweg. Auswertungen der Voyagerdaten ließen vermuten, dass die Lavaflüsse überwiegend aus Schwefel- und Schwefelverbindungen zusammengesetzt sind. Dagegen zeigen erdgestützte Infrarotuntersuchungen so genannte *Hot Spots* mit Temperaturen bis zu 2.000 K. Dies ist viel zu heiß für geschmolzenen Schwefel. Möglicherweise bestehen die Lavaflüsse aus geschmolzenen Silikaten. Aktuelle Beobachtungen des Hubble-Weltraumteleskops weisen darauf hin, dass das Material reich an Natrium ist.

Atmosphäre

Io besitzt eine äußerst dünne Atmosphäre von 120 Kilometern Höhe, die sich aus Schwefeldioxid und möglicherweise Spuren anderer Gase zusammensetzt. Die 700 Kilometer hoch reichende Ionosphäre besteht aus Schwefel-, Sauerstoff- und Natriumionen. Sie wird durch die vulkanische Aktivität ständig erneuert, so dass der Teilchenverlust durch die Wechselwirkung mit der Magnetosphäre des Jupiter ausgeglichen wird.

Magnetfeld

Io bewegt sich auf seiner Bahn durch das starke Magnetfeld des Jupiter, wodurch elektrische Ströme induziert werden. Dabei werden rund 1.000 Gigawatt mit einem Spannungspotenzial von 400.000 Volt erzeugt. Unter diesen Bedingungen werden Atome in der oberen Atmosphäre ionisiert und in den Weltraum geschleudert. Io verliert so Partikel mit einer Masse von Tausenden von Kilogramm pro Sekunde.

Die Ionen bilden längs Ios Bahn einen Torus um Jupiter, der im infraroten Licht intensiv leuchtet. Partikel, die durch den Sonnenwind aus dem Torus fortgerissen werden, könnten mitverantwortlich für Jupiters ungewöhnlich ausgedehnte Magnetosphäre sein.

Daten der Sonde Galileo lassen darauf schließen, dass Io ein eigenes Magnetfeld besitzt.

Die Position von Io beeinflusst sehr stark die Emission von Radiowellen, die vom Jupitersystem abgestrahlt werden. Wenn Io von der Erde aus sichtbar ist, steigt die Intensität der Radiostrahlung deutlich an.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Io_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Io_(Mond)). Historie: 12.4.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Wolfgangbeyer, Srbauer, Opa, Martin Rasmussen, Bricktop1, BWBot, Ben-Zin, Phrood, Aglarech, Elwe, Haeber, Mhlusi, Arnomane, TomCatX, Ixitixel, DaTroll, Head, Zwobot, WiESi, Crux, ACK, Voyager, Mikue, G, RobotQuistnix, Stern, HenrikHolke, Pkn, Steffen Löwe Gera, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Europa

Europa ist der zweite und kleinste der großen Monde des Planeten →Jupiter (vgl. Farbtafeln Abb. 153).

Entdeckung

Europas Entdeckung wird dem italienischen Gelehrten Galileo Galilei zugesprochen, der im Jahre 1610 sein einfaches Fernrohr auf den Jupiter richtete.

Benannt wurde der Mond nach Europa, einer Geliebten des Zeus aus der griechischen Mythologie. Obwohl der Name Europa bereits kurz nach seiner Entdeckung von Simon Marius vorgeschlagen wurde, konnte er sich über lange Zeit nicht durchsetzen. Erst in der Mitte des 20. Jahrhunderts kam er wieder in Gebrauch. Vorher wurden die galileischen Monde üblicherweise mit römischen Ziffern bezeichnet; Europa war der *Jupitermond II*.

Die galileischen Monde sind so hell, dass man sie bereits mit einem Fernglas oder kleinen Teleskop beobachten kann.

Bahndaten

Europa umkreist den Jupiter in einem mittleren Abstand von 670.900 km in 3 Tagen 13 Stunden und 14,6 Minuten. Die Bahn weist eine Exzentrizität von 0,0101 auf und ist 0,470° gegenüber der Äquatorebene des Jupiter geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Europa besitzt einen mittleren Durchmesser von 3.121,6 km und eine Dichte von 3,01 g/cm³.

Er gleicht in seinem Aufbau den →terrestrischen (erdähnlichen) Planeten, da er überwiegend aus silikatischem Gestein aufgebaut ist. Seine

äußere Schicht besteht aus Wasser mit einer geschätzten Mächtigkeit von 100 km. Darüber hinaus dürfte Europa einen relativ kleinen Kern aus Eisen besitzen.

Europa besitzt mit einer Albedo von 0,64 eine der hellsten Oberflächen aller bekannten Monde im Sonnensystem. 64 % des eingestrahnten Sonnenlichts werden reflektiert.

Europas Oberfläche ist außergewöhnlich eben. Er ist von Furchen überzogen, die allerdings eine geringe Tiefe aufweisen. Nur wenige Strukturen, die sich mehr als einige hundert Meter über die Umgebung erheben, wurden festgestellt.

Auf Europa sind sehr wenige Impaktkrater sichtbar, von denen nur drei einen Durchmesser von mehr als 5 km besitzen. Der größte Krater, *Pwyll*, hat einen Durchmesser von 26 km. *Pwyll* ist eine der geologisch jüngsten Strukturen auf Europa. Bei dem Einschlag wurde helles Material aus dem Untergrund über Tausende von Kilometern hinweg ausgeworfen.

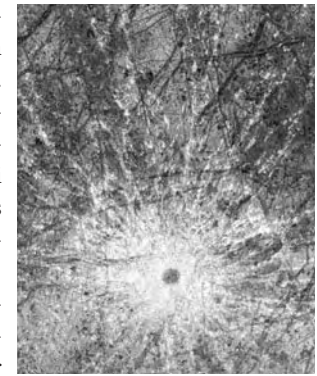


Abb. 82: Der 26 km große Impaktkrater Pwyll

Die geringe Verkraterung ist ein Hinweis darauf, dass Europas Oberfläche geologisch sehr jung ist. Schätzungen der Einschlagshäufigkeit von →Kometen und →Asteroiden ergeben ein Alter von höchstens 30 Millionen Jahren.

Die glatte Oberfläche und die Strukturen erinnern sehr stark an Eisfelder in Polarregionen auf der Erde. Es wird vermutet, dass sich unter Europas Kruste aus Wassereis ein Ozean aus flüssigem Wasser befindet, der durch die Wirkung von Gezeitenkräften erwärmt wird. Die Temperatur auf Europas Oberfläche beträgt nur 110 K (etwa -160 °C) am Äquator und 50 K (etwa -220 °C) an den Polen. Unter diesen Bedingungen ist Wassereis hart wie Gestein. Die größten sichtbaren Krater wurden offensichtlich mit frischem Eis ausgefüllt und eingeebnet. Dieser Mechanismus sowie Berechnungen der durch die Gezeitenkräfte verursachten Erwärmung lassen darauf schließen, dass Europas Eiskruste etwa 10 bis 15 km stark ist. Der darunter liegende Ozean könnte eine Tiefe von bis zu 90 km aufweisen.

Europas auffälligstes Merkmal ist ein Netzwerk von kreuz und quer verlaufenden Gräben und Furchen, *Linea* genannt, die die gesamte Oberfläche überziehen. Die *Linea* haben eine starke Ähnlichkeit mit Rissen

und Verwerfungen auf irdischen Eisfeldern. Die größeren sind etwa 20 km breit und besitzen undeutliche äußere Ränder sowie einen inneren Bereich aus hellem Material. Die Linea könnten durch Kryovulkanismus (Kälte-vulkanismus) oder den Ausbruch von Geysiren aus warmem Wasser entstanden sein, wodurch die Eiskruste auseinander gedrückt wurde.

Detaillierte Aufnahmen zeigen, dass sich Teile der Eiskruste gegeneinander verschoben haben und zerbrochen sind, wobei ein Muster von Eisfeldern entstand. Die Bewegung der Kruste wird durch Gezeitenkräfte hervorgerufen, die die Oberfläche um 30 m heben und senken. Europa weist, wie der Erdmond und die übrigen Jupitermonde, eine gebundene Rotation auf und zeigt stets mit derselben Seite zu dem Planeten. Die Eisfelder müssten dabei ein bestimmtes, vorhersagbares Muster aufweisen. Detaillierte Aufnahmen zeigen stattdessen, dass nur die geologisch jüngsten Gebiete ein solches Muster aufweisen. Andere Gebiete weichen mit zunehmendem Alter von diesem Muster ab. Das kann damit erklärt werden, dass sich Europas Oberfläche geringfügig schneller bewegt als ihr innerer Mantel und der Kern. Die Eiskruste ist vom Mondinnern durch den dazwischen liegenden Ozean mechanisch abgekoppelt und wird von Jupiters Gravitationskräften beeinflusst. Vergleiche der Aufnahmen der Raumsonden Galileo und Voyager zeigen, dass sich Europas Eiskruste in etwa 10.000 Jahren einmal um den Mond bewegt.

Ein weiterer Typ von Oberflächenstrukturen sind kreis- und ellipsenförmige Gebilde, Lenticulae (lat. Flecken) genannt. Viele sind Erhebungen (engl. Domes), andere Vertiefungen oder ebene dunkle Flecken. Die Lenticulae entstanden offensichtlich durch aufsteigendes wärmeres Eis, vergleichbar mit Magmakammern in der Erdkruste. Die Domes wurden dabei empor gedrückt, die ebenen dunklen Flecken könnten gefrorenes Schmelzwasser sein. Chaotische Zonen, wie Conomara Chaos, sind wie ein Puzzle aus Bruchstücken geformt, die von glattem Eis umgeben sind. Sie haben das Aussehen von Eisbergen in einer gefrorenen See.

Atmosphäre

Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops ergaben Hinweise auf das Vorhandensein einer extrem dünnen →Atmosphäre aus Sauerstoff, mit einem Druck von 10^{-11} bar. Es wird angenommen, dass der Sauerstoff durch die Einwirkung der Sonnenstrahlung auf die Eiskruste entsteht, wobei das Wassereis in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten wird. Der flüchtige Wasserstoff entweicht in den Weltraum, der massereichere Sauerstoff wird durch Europas Gravitation festgehalten.

Magnetfeld

Bei Vorbeiflügen der Galileosonde wurde ein schwaches Magnetfeld gemessen (seine Stärke entspricht etwa $\frac{1}{4}$ der von Ganymeds). Das Magnetfeld variiert, während sich Europa durch die äußerst ausgeprägte →Magnetosphäre des Jupiter bewegt. Die Daten von Galileo weisen darauf hin, dass sich unter Europas Oberfläche eine elektrisch leitende Flüssigkeit befindet, etwa ein Ozean aus Salzwasser. Darüber hinaus zeigen spektroskopische Untersuchungen, dass die rötlichen Linien und Strukturen an der Oberfläche reich an Salzen, wie Magnesia, sind. Die Salzablagerungen könnten zurückgeblieben sein, als ausgetretenes Salzwasser verdampft war. Da die festgestellten Salze in der Regel farblos sind, dürften andere Elemente wie Eisen oder Schwefel für die rötliche Färbung verantwortlich sein.

Leben auf Europa

Das Vorhandensein von flüssigem Wasser ließ Spekulationen darüber aufkommen, ob in Europas Ozeanen Formen von Leben existieren könnten. Auf der Erde wurden Lebensformen entdeckt, die unter extremsten Bedingungen, auch ohne das Vorhandensein von Sonnenlicht, bestehen können, etwa in den hydrothermalen Quellen (Black Smoker) der Tiefsee oder im antarktischen Wostoksee. Bislang gibt es keine Hinweise dafür, doch sollen spätere Missionen dies klären. Angedacht wird eine unbemannte Kryo-robot-Raumsonde, die auf der Oberfläche landen, sich durch die Eiskruste durchschmelzen und eine Art »Mini-U-Boot« (Hydrobot) in Europas Ozean ablassen soll.

Die Galileomission war 2003 beendet, wobei man die Sonde kontrolliert auf den Jupiter stürzen ließ. Damit sollte verhindert werden, dass ein nicht steriler Flugkörper möglicherweise irgendwann auf Europa einschlagen und diesen mit irdischen Mikroorganismen kontaminieren könnte.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Europa_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Europa_(Mond)). Historie: 12.4.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, BWBot, Zwobot, Opa, Bricktop1, Nephelin, Ben-Zin, Phrood, Mhlusi, Pikarl, Fidi, Jakob stevo, Chobot, ALE!, Maxim Kammerer, CdaMVvWgS, Vesta, ArtMechanic, Mathias Schindler, Luk, Odin, HenrikHolke, Pkn, S, Lawa, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Ganymed

Ganymed ist der dritte und größte der vier großen Monde des Planeten →Jupiter. Er ist noch vor →Titan der größte Mond unseres Sonnensystems und größer als der Planet →Merkur.

Entdeckung

Seine Entdeckung wird, wie die der anderen galileischen Monde, dem italienischen Gelehrten Galileo Galilei zugesprochen.

Benannt wurde der Mond nach dem Jüngling Ganymed, einem Mundschenk der Götter und Geliebten des Zeus aus der griechischen Mythologie. Der Name Ganymed wurde bereits kurz nach seiner Entdeckung von Simon Marius vorgeschlagen, konnte sich aber über lange Zeit nicht durchsetzen. Erst in der Mitte des 20.

Jahrhunderts kam er wieder in Gebrauch. Vorher wurden die galileischen Monde üblicherweise mit römischen Ziffern bezeichnet; Ganymed war der *Jupitermond III*.

Die galileischen Monde sind so hell, dass man sie bereits mit einem Fernglas oder kleinen Teleskop beobachten kann.

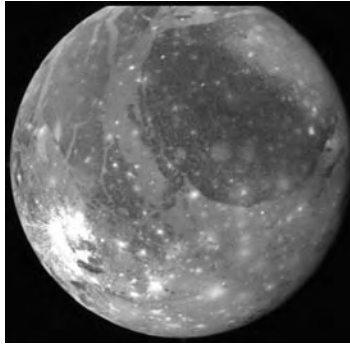


Abb. 83: Ganymed, aufgenommen im Jahre 1979 von der Raumsonde Voyager 2

Bahndaten

Ganymed umkreist Jupiter in einem mittleren Abstand von 1.070.600 km in 7 Tagen 3 Stunden und 42,6 Minuten. Die Bahn weist eine Exzentrizität von 0,0015 auf und ist 0,195° gegenüber der Äquatorebene des Jupiter geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Ganymed besitzt einen mittleren Durchmesser von 5268 km und ist damit der größte Mond im Sonnensystem. Er ist sogar größer als der Planet Merkur, wobei er allerdings mit seiner geringen Dichte von 1,936 g/cm³ nur die Hälfte von Merkurs Masse aufweist.

Die Auswertung der Daten der Raumsonde Galileo weist darauf hin, dass es sich bei Ganymed um einen differenzierten Körper handelt, der aus vier Schichten aufgebaut ist: Ein relativ kleiner Kern aus Eisen oder Eisensulfid ist von einem Mantel aus silikatischem Gestein umgeben. Darüber liegen eine ausgedehnte Schicht aus weichem Wassereis und eine äußere harte Eiskruste. Ferner zeigte die Bahnbewegung der Raumsonde kleine Anomalien im Schwerfeld, die auf ungleichmäßig verteilte Massen hinweisen und in den einzelnen Regionen offenbar auf größere Mengen

an im Eismantel eingeschlossenen Gesteinen zurückgehen. Der metallische Kern ist ein Anzeichen dafür, dass Ganymed in der Frühzeit seiner Entstehung im Innern höhere Temperaturen aufwies, als man zuvor angenommen hatte. Tatsächlich scheint Ganymed ähnlich aufgebaut zu sein wie Io, nur dass er zusätzlich von einer Eiskruste umgeben ist.

Ganymeds Oberfläche kann in zwei unterschiedliche Regionen unterteilt werden: Eine geologisch sehr alte, dunkle Region mit einer großen Anzahl an Impaktkratern und eine etwas jüngere, hellere Region mit ausgeprägten Gräben und Verwerfungen. Die beiden Regionen sind auf tektonische Aktivitäten zurückzuführen. Ganymeds Oberfläche besteht aus zwei kontinentalen Platten, die sich unabhängig voneinander bewegen, wobei an ihren Randzonen Gebirgszüge aufgeworfen werden können. Darüber hinaus sind Gebiete sichtbar, auf denen vor langer Zeit Lava geflossen sein muss. Hinsichtlich der Tektonik ähnelt Ganymed dem Planeten Erde, obwohl die Aktivitäten auf Ganymed zum Erliegen gekommen sind. Die dunklen Regionen ähneln der Oberfläche von Kallisto, ein ähnliches System von Gräben und Verwerfungen existiert auf dem Saturnmond Enceladus und den Uranusmonden Miranda und Ariel.

Beide Regionen weisen eine hohe Anzahl von Impaktkratern auf. Deren Anzahl und Verteilung ergeben für Ganymeds Oberfläche ein Alter von 3 bis 3,5 Milliarden Jahren, vergleichbar dem Erdmond. Dabei überlagern die Krater die Gräben oder werden von diesen durchbrochen, was darauf schließen lässt, dass die Gräben ebenfalls geologisch alt sind. Daneben gibt es auch Einschläge jüngerer Datums, bei denen Material aus dem Untergrund strahlenförmig ausgeworfen wurde. Anders als auf dem Erdmond oder dem Merkur sind die meisten Krater relativ flach und weisen keine Ringwälle oder Zentralberge auf. Offensichtlich hat die Eiskruste über geologische Zeiträume nachgegeben und diese Strukturen eingeebnet. Sehr alte Krater sind nur noch als dunkle Reliefs zu erkennen.

Die größte zusammenhängende Struktur auf Ganymed ist eine dunkle Ebene, die *Galileo Regio* genannt wird. Weiterhin sind ausgedehnte kon-

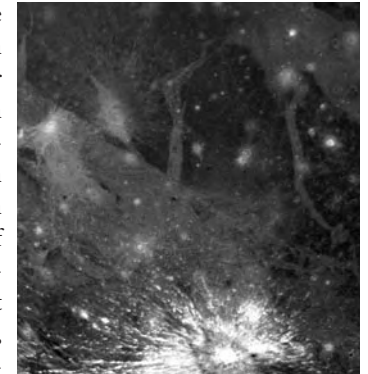


Abb. 84: Helle und dunkle Regionen auf Ganymeds Oberfläche. Am unteren Bildrand ist ein relativ frischer Impaktkrater sichtbar, bei dem helles Material aus dem Untergrund ausgeschleudert wurde.

zentrische Erhebungen sichtbar, die das Überbleibsel eines gewaltigen
 ➔Impaktereignisses sind, das vor sehr langer Zeit stattgefunden hat.

Ganymed rotiert in 7 Tagen 3 Stunden und 42,6 Minuten um die eigene Achse und weist damit, wie der Erdmond und die übrigen Jupitermonde, eine gebundene Rotation auf. Seine Albedo beträgt 0,43, das heißt 43 % des einfallenden Sonnenlichts werden von der Oberfläche reflektiert. Im Vergleich zu den Monden Io und Europa ist seine Oberfläche relativ dunkel. Die Oberflächentemperatur beträgt im Durchschnitt -160° Celsius.

Atmosphäre

Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops ergaben Hinweise auf das Vorhandensein einer extrem dünnen ➔Atmosphäre aus Sauerstoff. Es wird angenommen, dass der Sauerstoff durch die Einwirkung der Sonnenstrahlung auf die Eiskruste entsteht, wobei das Wassereis in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten wird. Der flüchtige Wasserstoff entweicht in den Weltraum, der massereichere Sauerstoff wird durch Ganymeds Gravitation festgehalten.

Science-Fiction

Ganymed spielt die Rolle eines »Referenzplaneten« oder einer Art zweiten Erde in vielen Erzählungen von Philip K. Dick. Dick verwendet praktisch immer Ganymed, um einen außerhalb der Erde von Menschen kolonisierten Himmelskörper in seine Geschichten einzubauen.

Der deutsche Spielfilm *Operation Ganymed* handelt von den Erlebnissen einer fiktiven Raumschiffbesatzung, die von einer Reise zu Ganymed zur ➔Erde zurückkehrt.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Ganymed_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Ganymed_(Mond)). Historie: 12.4.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, BWBot, Arnomane, Ben-Zin, Opa, Phrood, Abendstrom, Geof, Zwobot, Odin, Chobot, Stern, Mhlusi, Neitram, Juesch, Stalefish, CdaMVvWgS, Bricktop1, Wolfgang1018, Gabor, FlaBot, Galilea, Vulture, HenrikHolke, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Kallisto

Kallisto (Callisto) ist der äußerste der vier großen Monde des Planeten
 ➔Jupiter (vgl. Farbtafeln Abb. 154).

Entdeckung und Name

Auch Kallistos Entdeckung wird dem italienischen Gelehrten Galileo Galilei zugesprochen.

Benannt wurde der Mond nach Kallisto, einer Geliebten des Zeus aus der griechischen Mythologie. Der Sage nach wurden Kallisto und ihre Tochter später in Bären verwandelt und an den Sternenhimmel versetzt. Kallisto ist demnach gleich zweimal am Himmel zu sehen, als Sternbild Großer Bär (Großer Wagen) und als Mond des Jupiter.

Der Name Kallisto wurde von Simon Marius bereits kurz nach seiner Entdeckung vorgeschlagen, konnte sich jedoch über lange Zeit nicht durchsetzen. Erst in der Mitte des 20. Jahrhunderts kam er wieder in Gebrauch. Vorher wurde Kallisto als *Jupitermond IV* bezeichnet.

Die galileischen Monde sind so hell, dass man sie bereits mit einem Fernglas oder kleinen Teleskop beobachten kann.

Bahndaten

Kallisto umkreist Jupiter in einem mittleren Abstand von 1.833.000 km in 16 Tagen 16 Stunden und 32,2 Minuten. Die Bahn weist eine Exzentrizität von 0,007 auf und ist 0,281° gegenüber der Äquatorebene des Jupiter geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Kallisto besitzt einen mittleren Durchmesser von 4.820,6 km.

Sie weist die höchste Dichte an Impaktkratern im ganzen Sonnensystem auf. Krater und bei deren Einschlag entstandene konzentrische ringförmige Erhebungen prägen die Oberfläche, größere Gebirgszüge sind nicht vorhanden. Dies lässt darauf schließen, dass Kallistos Oberfläche überwiegend aus Wassereis zusammengesetzt ist. Die Eiskruste hat über geologische Zeiträume hinweg nachgegeben, wobei ältere Krater und Gebirgszüge eingeebnet wurden.

Zwei riesige Einschlagsbecken, umgeben von konzentrischen Ringwällen, sind die auffälligsten Strukturen auf Kallisto. Das größte Becken, *Valhalla*, hat einen Durchmesser von 600 km, eine helle Zentralregion und Ringe, die sich über 3.000 km ausdehnen. Das Becken *Asgard* dehnt sich insgesamt über 1.600 km aus. Eine andere interessante Struktur ist *Gipul Catena*, eine Kette von Impaktkratern, die als gerade Linie über die Oberfläche verläuft. Verursacht wurde die Struktur offensichtlich von einem Himmelskörper, der wie der ➔Komet➔Shoemaker-Levy 9 vor dem Einschlag durch die Gezeitenkräfte des Jupiter zerrissen wurde.

Das Alter von Kallistos Oberfläche wird auf vier Milliarden Jahre geschätzt; sie war seit der Frühzeit der Entstehung des Sonnensystems keinen größeren Veränderungen unterworfen, was bedeutet, dass der Mond seit dieser Zeit geologisch nicht mehr aktiv war. Anders als der benachbar-

te Ganymed mit seiner auffälligen Oberfläche weist Kallisto keine Anzeichen von Plattentektonik auf, obwohl sie in etwa gleich groß ist. Ihre geologische Entwicklung war offensichtlich wesentlich einfacher verlaufen beziehungsweise nach relativ kurzer Zeit abgeschlossen, während in den übrigen galileischen Monden komplexe Vorgänge stattfanden.

Die sichtbare Oberfläche liegt auf einer Eisschicht, mit einer geschätzten Mächtigkeit von 200 km. Darunter befindet sich vermutlich ein Ozean aus flüssigem Salzwasser mit einer Tiefe von 10 km, worauf magnetische Messungen der Raumsonde Galileo hinweisen. Ein weiteres Indiz für flüssiges Wasser ist die Tatsache, dass auf der entgegengesetzten Seite des Kraters Valhall keine Brüche und Verwerfungen sichtbar sind, wie sie auf massiven Körpern wie dem Erdmond oder dem Planeten →Merkur beobachtet werden können. Eine Schicht flüssigen Wassers hat offensichtlich die seismischen Schockwellen gedämpft, bevor sie sich durch das Mondinnere bewegten.

Mit 1,851 g/cm³ weist Kallisto die geringste Dichte der galileischen Monde auf. Das Innere Kallistos ist demnach aus etwa 60 % silikatischem Gestein und 40 % Wassereis aufgebaut, wobei mit zunehmender Tiefe der Silikanteil ansteigt. Von seiner Zusammensetzung her ähnelt Kallisto dem →Saturnmond →Titan und dem →Neptunmond →Triton.

Er besitzt im Vergleich zu den anderen galileischen Monden eine sehr dunkle Oberfläche mit einer Albedo von 0,2, das heißt nur 20 % des einstrahlenden Sonnenlichts werden reflektiert.

Kallisto rotiert in 16 Tagen 16 Stunden und 32,2 Minuten um die eigene Achse und weist damit, wie der Erdmond und die übrigen inneren Jupitermonde, eine gebundene Rotation auf.

Atmosphäre

Aktuelle Beobachtungen weisen darauf hin, dass Kallisto eine äußerst dünne Atmosphäre aus Kohlendioxid besitzt.

Magnetfeld

Die Galileo-sonde hatte bei ihren Vorbeiflügen ein schwaches Magnetfeld bei Kallisto gemessen, dessen Stärke variiert, während sich der Mond durch die extrem starke →Magnetosphäre des Jupiter bewegt. Dies deutet auf das Vorhandensein einer elektrisch leitenden Flüssigkeit, wie Salzwasser, unterhalb Kallistos Eiskruste hin.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Kallisto_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Kallisto_(Mond)). Historie: 12.4.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Wing, BWBot, Ben-Zin, Phrood, Opa, Arnomane, Bricktop1, FlaBot, S, Mhlusi, Zwobot, Geof, HenrikHolke, Galilea, Vulture, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Saturn

Der Saturn ist der sechste und zweitgrößte →Planet in unserem Sonnensystem. Sein Zeichen ist ♄. Er wird zu den →jupiterähnlichen (iovanischen) Planeten gerechnet und ist mit bloßem Auge sichtbar. Daher war er schon im Altertum bekannt (vgl. Farbtafeln Abb. 148).

Umlaufbahn

Saturn läuft auf einer annähernd kreisförmigen Umlaufbahn mit einer Exzentrizität von 0,0565 um die Sonne. Sein sonnennächster Punkt, das Perihel, liegt bei 9,041 AE und sein sonnenfernster Punkt, das Aphel, bei 10,124 AE. Seine Umlaufbahn ist mit 2,485° leicht gegen die Ekliptik geneigt. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Saturn 29 Jahre 166 Tage und 22 Stunden.

Aufbau

Saturn gehört zu den großen →Gasplaneten. Seine →Atmosphäre enthält wie die des →Jupiter überwiegend Wasserstoff und Helium, jedoch in einer anderen Zusammensetzung. Dadurch besitzt er eine sehr geringe durchschnittliche Dichte von nur 0,687 g/cm³. Das ist geringer als die Dichte von Wasser unter Normalbedingungen. Das heißt, dass der Saturn in einem ausreichend großen Wasserbecken schwimmen würde. Diese Eigenschaft teilt kein anderer Planet unseres Sonnensystems mit ihm.

Während die Jupiteratmosphäre diese Elemente im gleichen Verhältnis wie die Sonne enthält, ist der Heliumanteil bei Saturn wesentlich geringer. Dies hängt mit der niedrigeren Temperatur Saturns zusammen, durch die das Helium größtenteils auskondensieren konnte. Die eher detailarme, gelblich-braune Wolkendecke enthält überwiegend gefrorene Ammoniakkristalle.

Unterhalb der Atmosphäre besteht Saturn wie Jupiter aus Wasserstoff, der bei steigendem Druck vom gasförmigen Zustand in die flüssige und schließlich metallische Form übergeht. Diese Schichten haben jedoch im Gegensatz zum Jupiter aufgrund der kleineren Masse andere Dickenverhältnisse. So beginnt im Saturn die metallische Schicht erst bei 47 Prozent des Radius (Jupiter: 25 Prozent). Sein Gesteinskern hat jedoch einen Masseanteil von 25 Prozent, der des Jupiter lediglich 4 Prozent. Das Innere des Gesteinskerns ist sehr heiß, es herrscht eine Temperatur von 12.000 Kelvin. Als Grund dafür wird unter anderem der Kelvin-Helmholtz-Mechanismus, eine langsame gravitationsbedingte Kompression, angenommen.

Rotationsverhalten

Saturn rotiert nicht wie ein starrer Körper. Die Äquatorregionen rotieren schneller (eine Rotation in 10 Stunden 13 Minuten und 59 Sekunden) als die Polregionen (10 Stunden 39 Minuten und 22 Sekunden). Die Äquatorregionen werden als *System I* und die Polregionen als *System II* bezeichnet. Aus In-Situ-Messungen des Saturnmagnetfeldes von Raumsonden wurde für das Saturninnere eine noch etwas langsamere Rotationsperiode von 10 Stunden 45 Minuten und 45 Sekunden hergeleitet. Seine Drehachse ist $26,73^\circ$ gegen seine Umlaufbahn geneigt.

Saturnringe

Den Saturn umgibt ein auffälliges Ringsystem, das bereits durch ein Fernrohr mit etwa 30facher Vergrößerung zu erkennen ist. Das Ringsystem besteht im Wesentlichen aus Eisbrocken, aber auch aus Gestein und gefrorenen Gasklumpen. Die Partikelgröße variiert zwischen der von Staubkörnern und mehreren Metern. Das Ringsystem hat viele größere und kleinere Lücken und ist bei einem Durchmesser von fast einer Million Kilometern in weiten Bereichen nur wenige hundert Meter dick, und damit relativ betrachtet extrem dünn. Trotz ihrer geringen Dicke sind die Saturnringe erstaunlich lichtundurchlässig und werfen einen sichtbaren Schatten auf den Saturn.

Struktur – Heute ist bekannt, dass es mehr als 100.000 einzelne Ringe mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Farbton gibt, welche durch scharf umrissene Lücken voneinander abgegrenzt sind. Der innerste beginnt bereits etwa 7.000km über der Oberfläche des Saturn und hat einen Durchmesser von 134.000km, der äußerste hat einen Durchmesser von 960.000km. Die Gesamtmasse der Ringe ist sehr gering und würde eine Kugel von nicht einmal 100km Durchmesser ergeben.

Die Ringe des Saturns sind in der Reihenfolge ihrer Entdeckung benannt und werden von innen nach außen als D-, C-, B-, A-, F-, G- und E-Ring bezeichnet. Auf astronomischen Übersichtsaufnahmen ist gewöhnlich nur der A- und der B-Ring und die sie trennende Cassini-Teilung, allenfalls noch die Encke-Teilung im A-Ring zu sehen. Erst durch Raumsonden erkannte man, dass die Ringe wiederum Lücken aufweisen und sich in noch kleinere eng begrenzte Unterringe aufteilen.

Die Ringe umkreisen den Saturn parallel zu dessen Äquator und sind um 27° gegen seine Bahnebene geneigt. Alle 14,8 Jahre ist der dünne Rand der Ringe genau der Erde zugewandt, so dass das Ringsystem nahezu unsichtbar wird. Das wird das nächste Mal im Jahre 2009 der Fall sein.

Entstehung – Zur Entstehung der Saturnringe gibt es verschiedene Theorien. Nach der von Édouard Albert Roche bereits im 19. Jahrhundert vorgeschlagenen Theorie entstanden die Ringe durch einen Mond, der sich dem Saturn so weit genähert hat, dass er durch Gezeitenkräfte auseinandergebrochen ist. Der kritische Abstand wird als Roche-Grenze bezeichnet. Die räumliche Variation der Anziehungskräfte durch den Saturn übersteigt in diesem Fall die mondinternen Gravitationskräfte, so dass der Mond nur noch durch seine materielle Struktur zusammengehalten wird. Nach einer Abwandlung dieser Theorie zerbrach der Mond durch eine Kollision mit einem Kometen oder Asteroiden. Nach einer anderen Theorie sind die Ringe gemeinsam mit dem Saturn selbst aus derselben Materialwolke entstanden. Diese Theorie wird jedoch heute kaum noch vertreten, denn man vermutet, dass die Ringe ein nach astronomischen Maßstäben eher kurzlebiges Phänomen von höchstens einigen hundert Millionen Jahren darstellen.

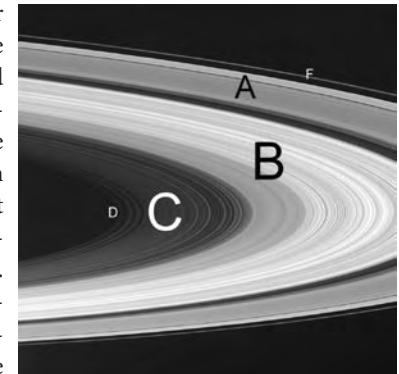


Abb. 85: Ringe des Saturn, die wichtigsten sind gekennzeichnet (NASA)

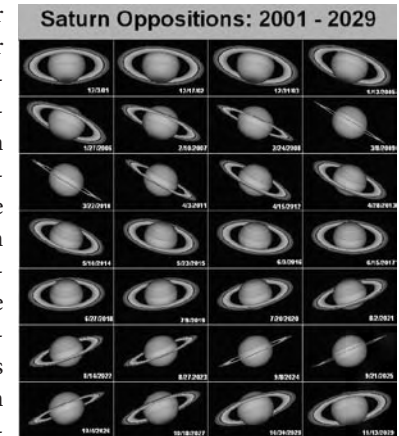


Abb. 86: Sichtbarkeit der Saturnringe bis 2029

Dynamik – Die Lücken zwischen den Ringen beruhen auf der gravitativen Wechselwirkung mit den zahlreichen Monden des Saturn sowie der Ringe untereinander. Dabei spielen auch Resonanzphänomene eine Rolle, die auftreten, wenn die Umlaufzeiten im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen stehen. So wird die Cassinische Teilung durch den Mond Mimas verursacht. Einige kleinere Monde, so genannte Hirten- oder auch Schäfermonde, kreisen direkt in den Lücken und an den Rändern des Ringsystems und stabilisieren dessen Struktur. Darüber hinaus hat die Sonde Voyager 2 bei

ihrer Passage im Jahr 1981 auch radiale, speichenartige Strukturen in den Ringen beobachtet, die aufgrund unterschiedlichen Umlaufzeiten jedoch sehr kurzlebig sein müssen. Als Ursache wird eine Wechselwirkung mit dem Magnetfeld des Saturn vermutet. Neue Messungen und Aufnahmen der Raumsonde Cassini-Huygens haben ergeben, dass die Ringkanten und damit die Abtrennung der Ringe noch schärfer sind als bisher angenommen. So hatte man vermutet, dass sich in den Lücken ebenfalls einige Eisbrocken befinden, was aber nicht der Fall ist.

Die extrem geringe Dicke des Ringsystems geht auf Stöße der Partikel zurück. Jeder Brocken kreist einzeln um den Mittelpunkt des Saturn und nicht die Ringe als starres Gebilde. Daher pendelt jeder Brocken, der sich irgendwann an der Oberfläche des Ringsystems befindet, während eines Umlaufs einmal vertikal durch das Ringsystem hindurch und wieder zurück. Durch inelastische Stöße mit anderen Brocken reduziert sich diese vertikale Geschwindigkeitskomponente und damit auch die Dicke des Ringsystems.



Abb. 87: Der Hirtenmond Prometheus stabilisiert den F-Ring (Cassini, 29. Oktober 2004).

Weitere Ring- und Scheibenphänomene in der Astronomie – Deutlich schwächere Ringe finden sich auch bei den anderen großen Gasplaneten des Sonnensystems, bei ➔Jupiter, ➔Uranus und ➔Neptun. Darüber hinaus sind kreisende Scheiben in der Astronomie ein häufiges Phänomen, das in sehr verschiedenen Größenordnungen auftritt. Neben Planetenringen zählen dazu Akkretionsscheiben bei Röntgendoppelsternen und solche, die sich in der Entstehungsphase von Sternen ausbilden, wie beispielsweise der ➔Asteroidengürtel, aber auch die Spiralgalaxien. Auch hier gilt, dass die Dicke dieser Scheiben durch die Häufigkeit inelastischer Stöße ihrer Komponenten bestimmt wird.

Monde

Von den 48 bekannten Monden ist ➔Titan der größte mit einem Durchmesser von 5.150 km. Die vier Monde ➔Rhea, ➔Dione, ➔Tethys und ➔Iapetus besitzen einen Durchmesser zwischen 1.050 km und 1.530 km. Die

beiden mit drei beziehungsweise vier Kilometern Durchmesser bislang kleinsten bekannten Monde wurden im August 2004 von der Raumsonde Cassini-Huygens entdeckt. Sie erhielten die Namen Methone und Pallene. Methone stimmt möglicherweise mit dem 23 Jahre zuvor von Voyager 2 aufgenommenem Objekt S/1981 S 14 überein, das damals nicht genau identifiziert werden konnte.

Eine Besonderheit stellen die Monde ➔Janus und Epimetheus dar, welche auf zwei fast gleichen Umlaufbahnen um den Saturn umlaufen. Alle vier Jahre kommen sie sich sehr nahe und tauschen durch die gegenseitige Anziehungskraft ihre Umlaufbahnen um den Saturn.

Geschichte der Erforschung

Im Jahre 1610 schickte der italienische Mathematiker, Physiker und Astronom Galileo Galilei an seinen Bekannten Giuliano de Medici eine verschlüsselte Nachricht folgenden Inhalts: *Smaismrmilmepoetaleumibunenvgttavrias*.

Dieser konnte das Wortungetüm jedoch nicht entziffern, und so musste Galilei die Lösung nachliefern. Sie lautet:

*Altissimum planetam tergeminum observavi –
Den obersten Planeten habe ich dreigestaltig gesehen.*

Galilei hatte kurz zuvor erstmals den Saturn mit einem der ersten Teleskope beobachtet und entdeckte die Saturnringe. Er erkannte sie jedoch nicht als isolierte Objekte, sondern deutete sie als Henkel (*ansae*).

1656 konnte der niederländische Physiker und Astronom Christiaan Huygens (1629–1695) beim Blick durch ein leistungsstärkeres Fernrohr das Phänomen enträtseln und beschrieb die Ringe korrekt: »Der Saturn ist von einem dünnen, flachen Ring umgeben, der ihn nirgends berührt und der zur Ekliptik geneigt ist.« Ein Jahr zuvor hatte Huygens bereits den größten Saturnmond ➔Titan entdeckt.

Giovanni Domenico Cassini vermutete als erster, dass die Ringe aus einzelnen Partikeln bestehen; er entdeckte 1675 die markanteste Lücke im Ringsystem, die nach ihm benannte Cassinische Teilung. Er entdeckte auch 1671 beziehungsweise 1672 die Saturnmonde Japetus und ➔Rhea, 1684 ➔Tethys und ➔Dione.

Forschungsmissionen

Als erste Sonde überhaupt flog Pioneer 11 am 1. September 1979 in 21.000 km Entfernung am Saturn vorbei. Trotz der sehr primitiven tech-

nischen und wissenschaftlichen Ausrüstung der Sonde gelangen etwa 400 Fotos und andere Messungen vom Saturn.

Nachdem am 13. November 1980 die Raumsonde Voyager 1 den Saturn besucht hatte, kam knapp ein Jahr später, am 26. August 1981, die Schwestersonde Voyager 2 beim Ringplaneten an. Beide Sonden lieferten erstmalige und einmalige Bilder aus nächster Nähe des Saturns sowie von seinen Ringen und seinen vielen Monden.

Im Juni 2004 erreichte die Raumsonde Cassini-Huygens das Saturnsystem nach siebenjährigem Flug. Der Orbiter (Cassini) führte eine zusätzliche Landungs- sonde (Huygens) mit sich, die am 14. Januar 2005 auf dem Mond Titan weich landete.

Kulturgeschichte

Da der Saturn mit bloßem Auge sichtbar ist und als Wandelstern auffällt, wurde er schon im Altertum mit mythologischen Deutungen belegt. Bei den Römern wurde er mit dem Gott Saturn und im antiken Griechenland mit dem Gott Kronos assoziiert.

Die Astrologie übernahm für die Deutung des Saturn insbesondere die charakterlichen Symbolisierungen der Eigenschaften *Abgrenzung*, *Verfestigung* und *Erstarrung*, wie sie sich aus der griechisch-römischen Mythologie für die Götter Saturn beziehungsweise Kronos ergaben.

Quellen: [http://de.wikipedia.org/wiki/Saturn_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Saturn_(Planet)), <http://de.wikipedia.org/wiki/Saturnringe>. Historie: 2.5.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren S, LaZeR, Wolfgangbeyer, Zwobot, Alkuin, Rgerhards, Extrawurst, Arnomane, Ben-Zin, EUBürger, LaScriba, Nephelin, Phrood, Bricktop1, BWBot, Arty, Schewek, Neitram, Crux, JostJahn, AstroGK, Head, RobertLechner, WHell, Lotse, Matthäus Wander, Holo-Doc, Carbidfischer, Pikarl, Skriptor, Inschanör, Gerrys, Izzoo, Andrej-schoeke, Chriki, Urbanus, Mikesb, Ckeen, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Tethys

Tethys ist einer der größeren Monde des Planeten Saturn.

Entdeckung

Tethys wurde im Jahre 1684 von Giovanni Cassini entdeckt. Benannt wurde der Mond nach der Titanin Tethys aus der griechischen Mythologie. Der Name »Tethys« und weiterer sieben Saturnmonde wurde von Wilhelm Herschels Sohn, dem Astronomen John Herschel, in einer 1847

erschienenen Veröffentlichung *Results of Astronomical Observations made at the Cape of Good Hope* vorgeschlagen.

Bahndaten

Tethys umkreist Saturn in einem mittleren Abstand von 294.660 km in 45 Stunden und 18 Minuten auf einer kreisförmigen Bahn, die 1,09° gegenüber der Äquatorebene des Saturn geneigt ist. Die Monde Telesto und Calypso laufen in Tethys' Lagrange-Punkten, jeweils 60° vor und hinter dem Mond, auf der gleichen Umlaufbahn um den Planeten. Tethys läuft darüber hinaus in einer 1:2-Resonanz mit dem Mond Enceladus um Saturn.

Aufbau und physikalische Daten

Tethys hat einen mittleren Durchmesser von 1060 km. Sie ist ein eisiger Himmelskörper, ähnlich den großen Saturnmonden Dione und Rhea. Ihre geringe Dichte von 1,21 g/cm³ weist darauf hin, dass sie größtenteils aus Wassereis mit Anteilen an silikatischem Gestein zusammengesetzt ist.

Tethys' Oberfläche ist stark verkratert und weist zahlreiche Risse auf. Zwei unterschiedliche Arten von geologischen Regionen konnten ausgemacht werden, eine Region mit zahlreichen Impaktkratern und ein dunkles, weniger verkrateres Band, das über den Mond verläuft. Die letztere Region ist ein Hinweis darauf, dass die Oberfläche zu einem späteren Zeitpunkt geologisch aktiv war, wobei ältere Gebiete der Oberfläche erneuert wurden. Die genaue Ursache der dunklen Verfärbung des Bandes ist nicht bekannt. Eine mögliche Erklärung könnten Aufnahmen der Raumsonde Galileo liefern, die die Jupitermonde Ganymed und Kallisto untersuchte. Beide Monde weisen helle Polkappen auf, die von großen Eisablagerungen an den Hängen von Kratern gebildet wurden. Aus der Entfernung erscheinen die Polkappen heller als das Muster, das von tausenden, nicht aufgelösten kleineren und vereisten Kratern gebildet wird. Tethys' Oberfläche könnte ähnlich gebildet worden sein und besteht aus Polarregionen mit einem undeutlichen Muster aus hellem Eis, zwischen denen eine dunklere Zone liegt.



Abb. 88: Tethys, aufgenommen von Cassini am 28. Oktober 2004

Auf der westlichen Hemisphäre ist der riesige Krater *Odysseus* mit 400 km Durchmesser das auffälligste Merkmal. Der Krater erscheint relativ flach und ähnelt den Kratern auf dem Jupitermond →Kallisto, wobei die typischen Ringwälle und der Zentralberg fehlen, wie sie auf dem →Merkur oder dem Erdmond zu finden sind. Dies ist wohl darauf zurück zu führen, dass die schwache eisige Kruste von Tethys über geologische Zeiträume hinweg eingebrochen ist.

Das zweite auffällige Merkmal auf Tethys ist ein riesiges Tal, *Ithaca Chasma*, das etwa 100 km breit und drei bis fünf Kilometer tief ist. Mit einer Länge von 2.000 km läuft es zu etwa drei Vierteln um den Mond herum. Es könnte gebildet worden sein, als flüssiges Wasser im Innern des Mondes ausfror und die Oberfläche infolge der Ausdehnung aufriss. Einer anderen Theorie nach könnte Ithaca Chasma entstanden sein, als beim Einschlag des riesigen Körpers, der den Krater Odysseus bildete, Schockwellen durch den Mond liefen und die zerbrechliche Kruste auf der gegenüber liegenden Seite aufbrach.

Die Oberfläche von Tethys weist eine hohe Albedo von 0,8 auf, das heißt, 80 % des einfallenden Sonnenlichts werden reflektiert. Die Oberflächentemperatur beträgt -187° Celsius. Tethys rotiert in 45 Stunden und 18 Minuten um die eigene Achse. Sie weist damit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf. Die Rotationsachse ist 0,034° geneigt

Tethys hat eine scheinbare Helligkeit von 10,3 mag. Um sie zu beobachten, benötigt man ein größeres Teleskop. Die Raumsonde Cassini-Huygens sollte den Mond bei einem Vorbeiflug am 23. September 2005 näher untersuchen.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Tethys_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Tethys_(Mond)). Historie: 31.5.04: Angelegt von Arty, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Arty, BWBot, Phrood, Bricktop1, Mhlusi, Arnomane, Asdert, FlaBot, Zwobot, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Dione

Dione ist einer der größeren Monde des Planeten → Saturn.

Entdeckung

Dione wurde am 21. März 1684 von Giovanni Cassini entdeckt.

Benannt wurde der Mond nach der Titanin Dione, der Mutter der Aphrodite, aus der griechischen Mythologie. Der Name »Dione« und weiterer sieben Saturnmonde wurde von Wilhelm Herschels Sohn, dem Astronomen John Herschel, in der 1847 erschienenen Veröffentlichung *Results of*

Astronomical Observations made at the Cape of Good Hope vorgeschlagen.

Bahndaten

Dione umkreist Saturn in einem mittleren Abstand von 377.420 km in 65 Stunden und 41 Minuten. Die Bahn weist eine Exzentrizität von 0,0022 auf und ist 0,02° gegenüber der Äquatorebene des Saturn geneigt. Der Mond Helene kreist im selben Abstand um Saturn und läuft Dione in einem Winkelabstand von 60° im führenden Lagrangepunkt, L₄ voraus.

Aufbau und physikalische Daten

Dione hat einen mittleren Durchmesser von 1.118 km. Sie ist überwiegend aus Wassereis zusammengesetzt. Mit 1,5 g/cm³ weist sie allerdings die größte Dichte aller Saturnmonde auf (abgesehen von →Titan, dessen Dichte durch gravitative Kompression erhöht wird). In ihrem Innern müssen daher größere Anteile an dichteren Material vorhanden sein, etwa silikatisches Gestein. Ihre Albedo beträgt 0,55, das heißt 55 % des einfallenden Sonnenlichts werden reflektiert. Im Vergleich zu den Monden →Tethys und Enceladus ist ihre Oberfläche relativ dunkel. Die Oberflächentemperatur beträgt -187° Celsius. Dione rotiert in 65 Stunden und 41 Minuten um die eigene Achse und weist damit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf. Die Rotationsachse ist um 0,006° aus der Senkrechten geneigt.

Dione gleicht in ihrer Zusammensetzung, Albedo und der Strukturen ihrer Oberfläche dem Saturnmond →Rhea. Beide Monde weisen unterschiedliche Hemisphären auf. Auf der folgenden Hemisphäre von Dione sind ein Netzwerk heller Streifen auf einer dunklen Oberfläche und Impaktkrater sichtbar. Die Streifen überdecken die Krater, was darauf hinweist, dass sie jüngerer Ursprungs sind. Die führende Hemisphäre ist stark verkratert und zeigt keine größeren Helligkeitsunterschiede. Der Ursprung des hellen Streifenmaterials ist nicht völlig geklärt. Es könnte aus Eruptionen entlang von Spalten und Rissen stammen und sich als dünne Ablagerung aus Eis oder Staub abgesetzt haben.

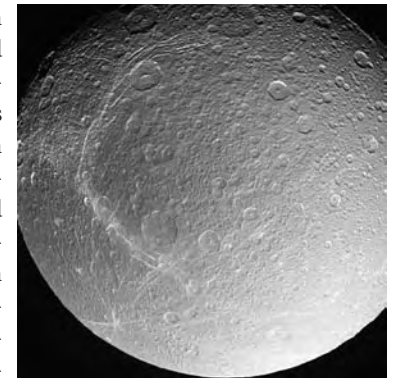


Abb. 89: Saturnmond Dione, aufgenommen von Cassini-Huygens aus 81.000 km im Dezember 2004

Wie beim ➔Jupitermond ➔Kallisto weisen die Impaktkrater keine Ringwälle oder Zentralberge auf, wie sie für den Erdmond oder den Planeten ➔Merkur typisch sind. Offensichtlich hat die dünne Eiskruste Diones über geologische Zeiträume hinweg nachgegeben, wobei derartige Strukturen eingeebnet wurden.

Es wird vermutet, dass Dione in der Frühzeit ihrer Entstehung geologisch aktiv war. Durch Prozesse wie den Kryovulkanismus (Kältevolkanismus) wurde ein Teil ihrer Oberfläche erneuert, wobei die beobachteten Streifenmuster zurückblieben. Nach dem Rückgang der Aktivität wurde die führende Hemisphäre durch Einschläge von ➔Asteroiden verändert, deren Krater die Streifenmuster weitgehend auslöschten.

Auf Diones Oberfläche sind stark verkraterte Regionen sowie Ebenen mit nur wenigen Kratern sichtbar. Die erstgenannten Regionen weisen zahlreiche Krater mit Durchmessern von mehr als 100 km auf, die Ebenen sind mit Kratern von weniger als 30 km Durchmesser überzogen. Einige der Ebenen sind sehr stark verkratert, andere kaum. Dabei sind stark verkraterte Regionen auf der folgenden, schwach verkraterte Ebenen auf der führenden Hemisphäre sichtbar. Das ist eigentlich genau das Gegenteil von dem, was die Wissenschaftler erwartet hatten. Der Astronom und Planetengeologe Shoemaker hatte ein Modell entwickelt, das die Verkraterung von Monden mit gebundener Rotation beschreibt. Demnach sind die meisten Krater auf der führenden, die wenigsten Krater auf der folgenden Hemisphäre eines Mondes zu finden. Im Fall von Dione scheint der Mond während der Phase des heftigsten Asteroidenbombardements genau entgegengesetzt orientiert gewesen zu sein. Da Dione relativ klein ist, kann bereits ein ➔Impakt ereignis, das einen 35 km großen Krater hinterlässt, die Rotation des Mondes stören. Da Dione eine Vielzahl derart großer Krater aufweist, könnte die Rotation während der Phase des intensiven Bombardements wiederholt gestört worden sein. Die Verteilung der Krater und die hohe Albedo auf der führenden Hemisphäre weisen darauf hin, dass der Mond seit mehreren Milliarden Jahren die heutige Orientierung beibehalten hat.

Dione besitzt eine scheinbare Helligkeit von 10,4 mag und ist damit, von der Erde aus gesehen, einer der hellsten Saturnmonde. Um sie zu beobachten, benötigt man allerdings ein Teleskop mit mindestens 10 cm Objektivöffnung.

Am 14. Dezember 2004 hat die Raumsonde Cassini-Huygens Dione erstmals in einem Abstand von 83.000 km passiert. Am 10. Oktober 2005 soll eine noch größere Annäherung erfolgen. Cassini wird dann in nur

500 Kilometer Entfernung an den Saturn Trabanten vorbeifliegen. Aus den Untersuchungen des Mondes erhofft man sich weitere Erkenntnisse über dessen Zusammensetzung und geologische Prozesse.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Dione_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Dione_(Mond)). Historie: 3.8.04: Angelegt von Alkuin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, BWBot, Bricktop1, Phrood, Arnomane, Kookaburra, Asdert, FlaBot, Mhlusi, Swgred, NightOnEarth, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Rhea

Rhea ist der zweitgrößte Mond des Planeten ➔Saturn.

Entdeckung

Rhea wurde am 23. Dezember 1672 von Giovanni Cassini entdeckt.

Benannt wurde der Mond nach der Titanin Rhea, der Tochter des Uranos und der Gaia, aus der griechischen Mythologie. Der Name »Rhea« und weiterer sieben Saturnmonde wurde von Wilhelm Herschels Sohn, dem Astronomen John Herschel, im 1847 erschienenen Werk *Results of Astronomical Observations made at the Cape of Good Hope* vorgeschlagen.

Bahndaten

Rhea umkreist Saturn in einem mittleren Abstand von 527.040 km in 108 Stunden und 25 Minuten. Die Bahn weist eine Exzentrizität von 0,001 auf und ist 0,35° gegenüber der Äquatorebene des Saturn geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Rhea hat einen mittleren Durchmesser von 1528 km. Ihre geringe Dichte von 1,240 g/cm³ lässt darauf schließen, dass sie zu etwa 2/3 aus Wassereis sowie einem Kern aus silikatischem Gestein zusammengesetzt ist. Ihre Albedo beträgt 0,65, das heißt, 65 % des einfallenden Sonnenlichts werden reflektiert. Im Vergleich zu den Monden ➔Tethys und Enceladus ist die Oberfläche relativ dunkel. Die Temperaturen an der Oberfläche betragen −174 °C im direkten Sonnenlicht und zwischen −200 °C und −220 °C im Schatten. Rhea rotiert in 108 Stunden und 25 Minuten um die eigene Achse und weist damit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf. Die Rotationsachse ist um 0,029° aus der Senkrechten geneigt.

Rhea gleicht in ihrer Zusammensetzung, der Albedo und den Strukturen ihrer Oberfläche dem Saturnmond ➔Dione. Beide Monde weisen unterschied-

liche Hemisphären auf. Offensichtlich machten die Monde gleiche Phasen der Entwicklung durch.

Rhea ist stark verkratert und weist stellenweise helle Strukturen auf. Ihre Oberfläche kann anhand der Verteilung und Größe der Krater in zwei unterschiedliche Terrains unterteilt werden, eines mit Kratern über 40 km im Durchmesser und ein zweites, in Teilen der Polar- und Äquatorregionen, mit Kratern unter 40 km Durchmesser. Dies deutet darauf hin, dass Teile der Oberfläche Rheas während ihrer Entwicklung durch geologische Prozesse erneuert wurden.

Die führende Hemisphäre ist stark verkratert und zeigt keine größeren Helligkeitsunterschiede. Wie beim \rightarrow Jupitermond \rightarrow Kallisto weisen die Einschlagkrater keine Ringwälle oder Zentralberge auf, wie sie für den Erdmond oder den Planeten \rightarrow Merkur typisch sind. Die dünne Eiskruste Rheas hat über geologische Zeiträume hinweg nachgegeben, wobei derartige Strukturen eingeebnet wurden. Auf der folgenden Hemisphäre von Rhea sind helle Streifen auf einer dunklen Oberfläche sowie einige Einschlagkrater sichtbar. Die Streifen entstanden in einer frühen Entwicklungsphase durch Kryovulkanismus (Kältevolkanismus), als das Innere des Mondes noch flüssig war.

Rhea besitzt eine scheinbare Helligkeit von 9,7 mag und ist damit, von der Erde aus gesehen, einer der hellsten Saturnmonde. Um sie zu beobachten benötigt man allerdings ein Teleskop mit einer Objektivöffnung von 10 cm. Am 25. November 2004 sollte die Raumsonde Cassini-Huygens den Mond bei einem Vorbeiflug erstmals genauer untersuchen.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Rhea_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Rhea_(Mond)). Historie: 1.6.04: Angelegt von Arty, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Arty, BWBot, Bricktop1, Phrood, Asdert, Mhlusi, Arnomane, FlaBot, Kookaburra, Gauss, Mvb, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.



Abb. 90: Der Saturn-Mond Rhea, fotografiert von der Raumsonde Cassini-Huygens in Echtfarben

Titan

Titan ist der mit Abstand größte Mond des Planeten \rightarrow Saturn und nach \rightarrow Ganymed zweitgrößter in unserem Sonnensystem. Er ist damit auch größer als der Planet \rightarrow Merkur.

Entdeckung

Titan wurde am 25. März 1655 von Christiaan Huygens entdeckt. Benannt wurde der Mond nach den Titanen, einem Geschlecht von Riesen aus der griechischen Mythologie. Wilhelm Herschels Sohn, der Astronom John Herschel, hatte in seinem Buch *Results of Astronomical Observations made at the Cape of Good Hope* diesen Namen vorgeschlagen. Zuvor war er mitunter als der *Huygenssche Saturnmond* oder der *sechste Saturnmond* bezeichnet worden. Huygens selbst nannte den Mond zu Beginn einfach nur »Mein Mond«.

Erkundung – Titan wurde beim Vorbeiflug der amerikanischen Sonde Voyager 1 im Jahr 1980 ausgiebig untersucht. Jedoch konnte sie wegen der dichten Smogschicht in der Atmosphäre nicht auf die Oberfläche schauen. Voyager 1 konnte deshalb nur die Zusammensetzung der Atmosphäre untersuchen und Basisdaten wie etwa die Größe, das Gewicht und die Umlaufzeit bestimmen.

Am 15. Oktober 1997 wurde von der Cape Canaveral Air Force Station die Doppelsonde Cassini-Huygens, ein Gemeinschaftsprojekt der ESA, NASA und der Italian Space Agency (ASI), zur Erkundung von Saturn und Titan im Speziellen gestartet. Während Cassini in einer Umlaufbahn verbleibt, wurde Huygens am 25. Dezember 2004 abgekoppelt und landete am 14. Januar 2005 auf der Oberfläche des Titans.



Abb. 91: Aufnahme im sichtbaren Licht von der Saturnsonde Cassini, Februar 2005

Bahndaten

Titan umkreist Saturn in einem mittleren Abstand von 1.221.850 km in 15 Tagen 22 Stunden und 41 Minuten. Mit diesem Abstand befindet

sich Titan weit außerhalb der Saturnringe, die nur bis zu einem Radius von etwa 480.000 km (äußerer Rand des E-Rings) reichen. Die Bahn Titans weist eine Exzentrizität von 0,0029 auf, was mit drei Prozent überraschend hoch ist. Daher ist Titan starken Gezeitenkräften von Saturn ausgesetzt, was zu einer Erwärmung des Inneren führt. Titan ist 0,33° gegenüber der Äquatorebene des Saturns, und damit auch den Saturnringen, geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Titan besitzt einen mittleren Durchmesser von 5.150 km. Damit ist er nur wenig kleiner als der →Jupitermond→ Ganymed und der zweitgrößte Mond im Sonnensystem. Er ist sogar größer als der →Planet→ Merkur (obgleich er weniger massereich ist).

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass Titan größer als Ganymed sei, doch haben neuere Messungen gezeigt, dass Titans dichte Atmosphäre dazu geführt hatte, seinen Durchmesser zu überschätzen. Wie andere große Monde des Sonnensystems ist Titan größer und massereicher als der äußerste Planet →Pluto.

Vom Aufbau her dürfte Titan den Monden Ganymed, →Kallisto, →Triton und möglicherweise Pluto ähnlich sein. Sehr umstritten ist die Frage, ob Titan von einem globalen Ozean, wie er auch auf dem Jupitermond →Europa vermutet wird, bedeckt ist. Er besteht aus einem Kern aus Silikatgestein, der von mehreren Schichten Wassereis umgeben ist. Die äußere Schicht besteht aus Eis und Methanhydrat, die innere aus Hochdruckeis. Nach Modellrechnungen von 2005 könnte sich zwischen diesen beiden Schichten ein Ozean aus flüssigem Wasser befinden. Der im Wasser enthaltene Ammoniak (etwa 10 Prozent) würde als Frostschutzmittel wirken, so dass der Ozean auch bei der zu erwartenden Temperatur von -20 Grad Celsius noch flüssig wäre.

Titan besitzt mit 1,88 g/cm³ die höchste Dichte aller Saturnmonde, obwohl er ähnlich wie diese zusammengesetzt ist. Die hohe Dichte ergibt sich durch die gravitative Kompression, die auch eine Aufheizung des Mondinneren bewirken dürfte.

Titan rotiert in 15 Tagen 22 Stunden und 41 Minuten um die eigene Achse und weist damit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf. Die Rotationsachse ist um 1,942° aus der Senkrechten geneigt. Er besitzt eine niedrige Albedo von 0,21, das heißt nur 21 % des eingestrahnten Sonnenlichts werden reflektiert.

Atmosphäre

Titan ist der einzige Mond im Sonnensystem und überhaupt der einzige bekannte Himmelskörper seiner Größenklasse, der eine dichte und wolkenreiche →Atmosphäre besitzt. Die Existenz einer Atmosphäre wurde erstmals im Jahre 1944 von Gerard Kuiper mittels spektroskopischer Untersuchungen nachgewiesen. Dabei wurde der Partialdruck der Kohlenwasserstoffverbindung Methan zu 100 mbar bestimmt. Seither haben Untersuchungen der Voyagersonden ergeben, dass der atmosphärische Druck auf Titans Oberfläche mehr als 1,5 bar beträgt und somit um rund 50 % höher ist als der auf der Erdoberfläche.

Die Atmosphäre besteht zu 94 % aus Stickstoff und zu etwa 6 % aus Methan und Argon. Außerdem finden sich auch Spuren von mindestens einem Dutzend anderer organischer Verbindungen (unter anderem Ethan, Propan, Ethin, Cyanwasserstoff, Kohlendioxid) sowie Helium und Wasser. Die Kohlenwasserstoffverbindungen entstehen wahrscheinlich aus Methan, das in der oberen Atmosphäre vorherrscht. Die Methanmoleküle werden durch Einwirkung der UV-Anteile der Sonnenstrahlung aufgespalten und rekombinieren dann zu anderen Verbindungen (vgl. Farbtafeln Abb. 155).

Oberfläche

Auf Titans Oberfläche beträgt die Temperatur im Mittel -179° C (94 K). Bei diesen Temperatur- und Druckverhältnissen sublimiert Wassereis nicht, so dass nur sehr geringe Spuren von Wasser in der Atmosphäre vorhanden sind. Neben dem überall vorherrschenden orangefarbenen Dunst, der Titan einhüllt, sind Muster von Wolken zu erkennen. Diese sind möglicherweise aus Methan, Ethan oder anderen einfachen Kohlenwasserstoffverbindungen zusammengesetzt. Die orange Einfärbung wird offensichtlich von den komplexeren Molekülen verursacht, die sich in der oberen Atmosphäre bilden. Aufgrund der dichten Atmosphäre konnten bei früheren Beobachtungen im sichtbaren Licht und bei den Voyagermissionen keine Einzelheiten auf Titans Oberfläche erkannt werden. Titan besitzt kein nennenswertes Magnetfeld, so dass seine Atmosphäre direkt dem →Sonnenwind ausgesetzt ist. Dadurch können Moleküle und Atome ionisiert und aus der äußeren Atmosphärenschiicht weggerissen werden.

Daten von der Raumsonde Cassini-Huygens legen eine vulkanische Aktivität auf Titan nahe. Die dortigen Vulkane sind jedoch keine Feuervulkane wie auf dem Mars oder der Venus, sondern so genannte Cryovulkane, also Eisvulkane.

Titan ist wegen seiner bemerkenswerten Atmosphäre ein erstrangiges Forschungsobjekt der Exobiologie, weil er in mancher Hinsicht Bedingungen aufweist, die denen der Ur-Erde gleichen könnten. Ein bedeutender Unterschied ist allerdings die eisige Oberflächentemperatur, die eine weitere Entwicklung der präbiotischen Umwelt in Richtung Leben, wie wir es kennen, verhindern würde. Es erscheint jedoch nicht sicher, ob nicht vielleicht doch Titan der zweite belebte Himmelskörper im Sonnensystem ist.

Die ESA landete im Rahmen der Cassini-Huygens-Mission der NASA am 14. Januar 2005 die Raumsonde Huygens auf den Titan, wobei Bilder der Oberfläche gesammelt wurden. Durch die allmähliche Annäherung von Cassini-Huygens an das Saturnsystem wurden danach auch höher aufgelöste Bilder von Titan möglich.

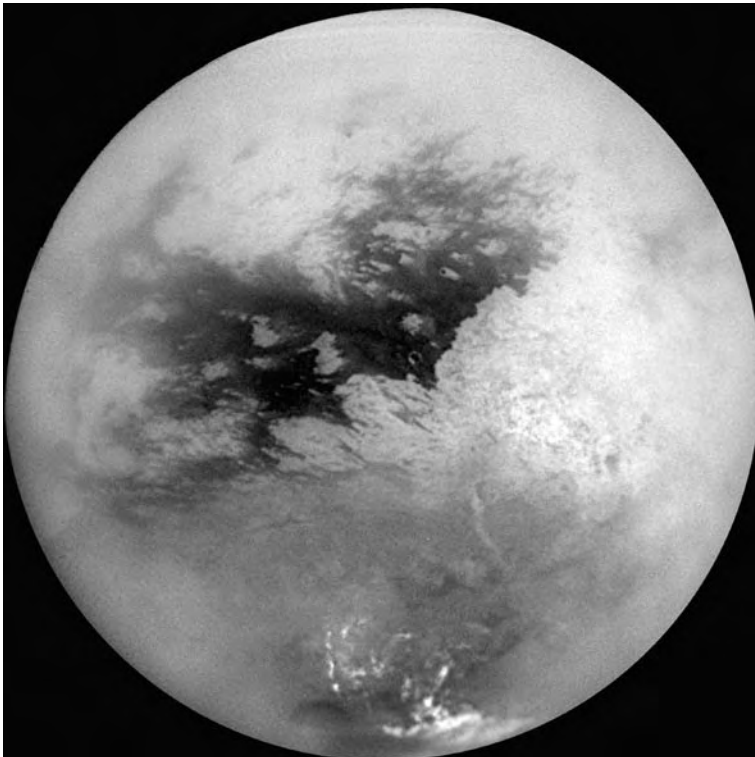


Abb. 92: Speziell bearbeitete Aufnahme von der Oberfläche Titans durch Cassini

Beobachtungen von NASA/ESA und Interpretation

Die auffälligen Hell-Dunkel-Kontraste, die auf Oberflächenbildern zu sehen sind, stehen in deutlichem Gegensatz zu den Oberflächenstrukturen, die von anderen Monden dieser Größenordnung bekannt sind. Konzentrische Strukturen (Krater und Einschlagbecken) sind hier zunächst nicht zu erkennen. Es liegt nahe, die dunklen Zonen für tiefer gelegen zu halten als die hellen Zonen. Vermutlich ist auch die stoffliche Zusammensetzung dieser Oberflächen unterschiedlich. Bei den hellen Zonen wird man eventuell an Wassereis denken müssen, wie es etwa auf den Jupitermonden häufig ist, bei den dunklen Bereichen möglicherweise an silikatische Gesteine oder organisches Material.

Inzwischen zeigen sich die Wissenschaftler der NASA überrascht davon, dass auf den bisherigen Fotos Lichtreflexe von der Oberfläche Titans zu fehlen scheinen. Diese waren in der Annahme erwartet worden, dass Teile des Mondes möglicherweise durch organische Flüssigkeiten bedeckt sind.

Die auf den ersten Bildern sichtbaren Oberflächenmerkmale werden nach ersten Auswertungen von den NASA-Wissenschaftlern für tektonische Strukturen, etwa Gräben und Krustenstörungen, gehalten, was für eine bedeutende geologische Aktivität des Himmelskörpers sprechen würde. Titan wäre wohl groß genug, um eigene Wärmequellen in Form radioaktiver Minerale zu besitzen, doch könnten, wie bei anderen Monden der großen Planeten (Jupitermond Io, Saturnmond Enceladus), hier auch Gezeitenkräfte des Mutterplaneten eine Rolle bei der für tektonische Bewegungen notwendigen Aufheizung und folgenden Mobilisierung des Mondinneren spielen.

Erdgebundene Beobachtung

Saturn mit seinem großen Mond Titan läßt sich bereits mit relativ kleinen Teleskopen gut beobachten. Im Allgemeinen sollte bereits eine 100fache Vergrößerung ausreichen, um Titan gut lokalisieren zu können. Einzelheiten Titans lassen sich wegen der Atmosphäre nicht erkennen, aber der Umlauf des Mondes um den Planeten läßt sich ohne weiteres verfolgen. Sollte ein Spektrometer zur Verfügung stehen, lassen sich außerdem Spektraluntersuchungen über die Zusammensetzung der Titanatmosphäre durchführen.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Titan_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Titan_(Mond)). Historie: 2.5.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Herbye, Pearl, Kl833x9, Pikarl, Bytee, Per aspera ad Astra, Phrood, BWBot, Uwe W., Richi, Crux, Arnomane, Stern, Rivi, BricktopI, FlaBot, Mhlusi, Srittau, Neitram, Surfguard, Zwobot, Steffen M., Müscha, Onlineamsel, Interpretix, GluonBall, Bender235, Karl-Henner, Wuzel, Schlumpf, Alien, AnjaK, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Iapetus

Iapetus (Japetus) ist der drittgrößte Mond des Planeten → Saturn.

Entdeckung

Iapetus wurde am 25. Oktober 1671 von Giovanni Cassini entdeckt.

Benannt wurde der Mond nach dem Titanen Iapetos aus der griechischen Mythologie.

Bahndaten

Iapetus umkreist Saturn in einem mittleren Abstand von 3.561.300 km in 79 Tagen 7 Stunden und 55 Minuten. Die Bahn weist eine Exzentrizität von 0,0283 auf und ist 7,52° gegenüber der Äquatorebene des Saturn geneigt. Iapetus ist neben dem Mond Phoebe der einzige Saturnmond, dessen Bahn eine signifikante Neigung aufweist.

Aufbau und physikalische Daten

Iapetus hat einen mittleren Durchmesser von 1.436 km. Seine geringe Dichte von 1,27 g/cm³ weist darauf hin, dass er fast vollständig aus Wasser- eis mit geringen Anteilen an silikatischem Gestein aufgebaut ist. Iapetus rotiert in 79 Tagen 7 Stunden und 55 Minuten um die eigene Achse und weist damit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf. Die Rotationsachse ist um 14,84° aus der Senkrechten geneigt.

Iapetus' Oberfläche kann anhand ihrer Verfärbung in zwei deutlich verschiedene Regionen unterteilt werden. Die führende Hemisphäre ist mit einer Albedo von 0,03 bis 0,05 sehr dunkel und rötlich gefärbt. Die dunkle Region wurde nach dem Entdecker in Cassini-Region benannt. Die folgende Hemisphäre ist mit einer Albedo von 0,5 so hell wie der → Jupitermond → Europa, sie wurde Roncevaux Terra getauft. Der Helligkeitsunterschied ist so auffällig, dass Cassini berichtete, den Mond mit seinem Teleskop nur auf einer Seite von Saturn beobachten zu können. Wandte der Mond der Erde die dunkle Region zu, blieb er unsichtbar. Die Raumsonde Voyager 2 passierte Iapetus am 22. August 1981 in einem Abstand von 966.000 km. Dabei konnten in der dunklen Region einzelne Strukturen aufgenommen werden. Die helle Seite ist vereist und stark verkratert. Die Polregionen sind frei von dunklen Materialien.

Die dunklen Materialien könnten Ablagerungen aus organischen Verbindungen sein, wie sie in primitiven → Meteoriten (zum Beispiel kohligen Chondriten) oder auf der Oberfläche von → Kometen vorkommen. Dar-

über hinaus könnten sie Cyanide wie ausgefrorene Cyanwasserstoffpolymere enthalten. Hierauf weisen erdgestützte Beobachtungen hin. Der Ursprung des dunklen Materials ist nicht geklärt, bislang liegen mehrere Theorien dazu vor. Die Schichtdicke des Materials ist ebenfalls unklar. In der dunklen Region finden sich keine hellen Einschlagskrater. Sollte die dunkle Schicht dünn sein, so müsste sie ständig erneuert werden, da bei einem → Impakt helleres Material aus dem Untergrund ausgeworfen wird.

Das dunkle Material könnte aus dem Innern des Mondes stammen und durch eine Kombination aus Impaktereignissen und Vulkanismus an die Oberfläche gelangt sein. Diese Theorie wird durch das konzentrierte Vorkommen am Boden von Kratern gestützt. Iapetus bildete sich in einem weiten Abstand von Saturn und war bei der Entstehung des Sonnensystems weniger hohen Temperaturen ausgesetzt, so dass er in sei-

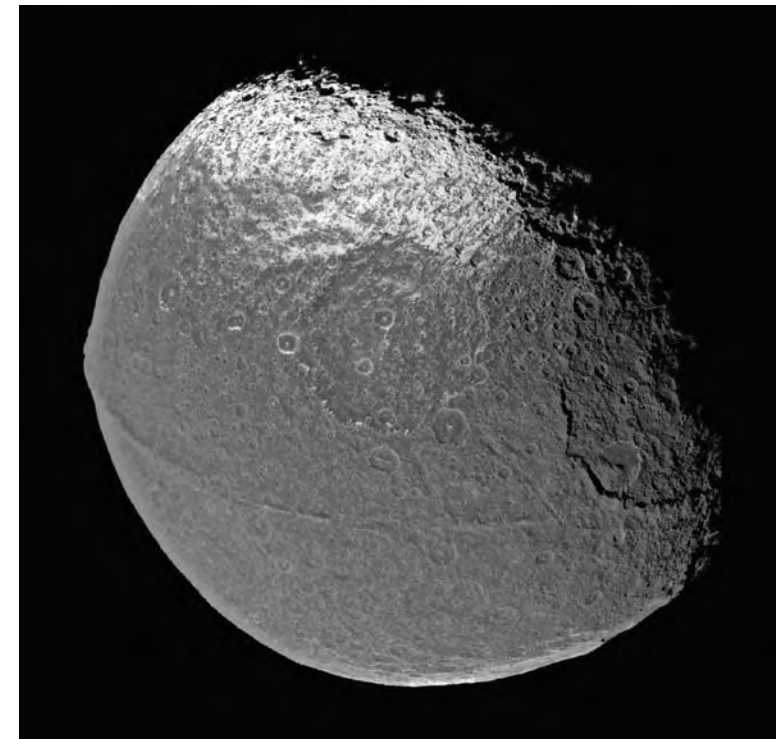


Abb. 93: Iapetus, aufgenommen von Cassini-Huygens am 31. Dezember 2004

nen Innern leichtflüchtige Komponenten wie Methan oder Ammoniak einbinden konnte. Diese könnten später durch geologische Prozesse wie den Kryovulkanismus (Kältevulkanismus) an die Oberfläche gelangt und durch UV-Strahlung der Sonne, ionisierte Partikel oder kosmische Strahlung in dunkle Verbindungen umgewandelt worden sein. An der Grenze zwischen der hellen und der dunklen Hemisphäre ist ein dunkler Ring von 100 km Durchmesser erkennbar, der an Strukturen auf dem Erdmond oder Mars erinnert, bei denen vulkanische Lava in Einschlagkrater mit einem Zentralberg geflossen sind.

Einer anderen Theorie nach stammt das dunkle Material vom Mond Phoebe. Es könnte durch den Einschlag von Mikrometeoriten freigesetzt und sich auf Iapetus' führender Hemisphäre gesammelt haben. Allerdings unterscheidet sich Phoebes Färbung etwas von den Ablagerungen auf Iapetus.

Ein weiteres großes Rätsel stellt ein auf den Cassini-Bildern entdeckter Bergrücken dar, der sich bis auf wenige Breitengrade genau auf dem geografischen Äquator von Iapetus erstreckt. Auf den Fotos ist das Phänomen deutlich als breites Band zu erkennen, durch das der Mond fast wie aus zwei Teilen zusammengesetzt erscheint. Der Bergrücken konnte bisher auf einer Länge von 1.300 Kilometer Länge beobachtet werden. Dabei erreicht er eine Breite von bis zu 20 Kilometern und eine maximale Höhe von 13 Kilometern.

Wie der Gebirgszug entstanden ist, liegt noch im Dunkeln. Wissenschaftler halten vor allem zwei Theorien für möglich: Zum einen hätte sich die Erhebung durch tektonische Vorgänge bilden können, also durch Auffaltung ähnlich wie die europäischen Alpen auf der Erde. Zum zweiten könnte durch einen Riss in der Kruste des Mondes flüssiges Material aus dem Untergrund an die Oberfläche getreten sein und sich bis zum heutigen Erscheinungsbild angehäuft haben.

Am 1. Januar 2005 passierte die Raumsonde Cassini-Huygens Iapetus erstmals in einem Abstand von 123.000 km und lieferte die ersten hochauflösenden Bilder des Mondes. Ein weiterer gezielter Vorbeiflug ist für den 10. September 2007 geplant, dann soll die Sonde in nur 1.000 Kilometern Abstand an dem Mond vorbeiziehen und dabei noch detailliertere Aufnahmen machen.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Iapetus_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Iapetus_(Mond)). Historie: 1.4.04: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Pikarl, Sodala, Bricktop1, BWBot, Phrood, Arnomane, Wst, AndiH, 217, Arty, Asdert, Mhlusi, Kookaburra, RobotQuistinix, FlaBot, FritzG, AHoerstemeier, CdaMVvWgS, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Uranus

Uranus ist der siebte Planet im Sonnensystem, er wird zu den jupiterähnlichen (jovianischen) Planeten gerechnet. Uranus wurde 1781 von Wilhelm Herschel als Planet entdeckt, allerdings war er schon lange vorher beobachtet worden. Das Zeichen des Uranus ist Υ und enthält die Initiale H nach seinem Entdecker (vgl. Farbtafeln Abb. 149).

Umlaufbahn

Uranus läuft auf einer annähernd kreisförmigen Umlaufbahn mit einer Exzentrizität von 0,0457 um die Sonne. Sein sonnennächster Punkt, das Perihel, liegt bei 18,324 AE und sein sonnenfernster Punkt, das Aphel, bei 20,078 AE. Seine Umlaufbahn ist mit 0,772° nur sehr leicht gegen die Ekliptik geneigt. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Uranus etwa 84 Jahre.

Aufbau

Uranus hat einen Durchmesser von 5118 km und eine für Gasplaneten typisch niedrige Dichte von 1,27 g/cm³. Er rotiert in 17 h 14 m 24 s einmal um seine Achse, wobei er sich gegenläufig zu seinem Umlauf um die Sonne dreht. Eine Besonderheit bei Uranus ist seine Achsenneigung von 97,77°. Die Folge dieser extremen Neigung ist, dass während eines Teils des Umlaufs ein Pol ständig der Sonne zugewandt ist, während der andere ständig von der Sonne abgewandt ist. Damit entspricht ein Uranus-Tag der Länge eines Uranus-Jahres, die thermischen Pole im Sinne der Erde sind zwei diametrale Punkte auf dem Äquator. Die Ursache der starken Achsenneigung ist unbekannt. Eine mögliche Ursache könnte eine Kollision mit einem großen Protoplaneten während der Entstehungsphase sein.

Während des Vorbeiflugs von Voyager 2 waren die Wolkenbänder sehr schwach ausgeprägt. Neuere Aufnahmen des Hubble-Teleskops zeigen viel stärker ausgebildete Bänder. Als Voyager 2 am Uranus vorbeiflog, zeigte sein Südpol fast genau in Richtung der Sonne. 2007 wird die Verbindungslinie zur Sonne senkrecht zu seiner Achse stehen.

Auch das Magnetfeld von Uranus ist ungewöhnlich. Sein Ursprung ist nicht im Zentrum des Planeten und um fast 60° gegenüber der Achse geneigt. Vermutlich wird es durch Bewegungen in nicht allzu großer Tiefe erzeugt. Neptun hat ein ähnlich verschobenes Magnetfeld, was darauf hindeutet, dass es nichts mit der großen Achsenneigung von Uranus zu tun hat. Die Magnetosphäre hinter dem Planeten ist durch die Rotation

korkenzieherartig verwirbelt. Es wird vermutet, dass ionisiertes Wasser die Quelle des Magnetfelds ist.

Die hellblaue Farbe von Uranus entsteht durch die Absorption von rotem Licht durch seine Methan-Atmosphäre. Darunter besteht Uranus hauptsächlich aus Gestein und Wasser, mit nur etwa 15 % Wasserstoff und wenig Helium (im Gegensatz zu ➔Jupiter und ➔Saturn, die zum größten Teil aus Wasserstoff bestehen). Uranus und ➔Neptun ähneln dem Kern von Jupiter und Saturn, nur ohne die massive Hülle aus flüssigem metallischem Wasserstoff. Man vermutet, dass seine Materie einigermaßen gleichmäßig verteilt ist, das heißt, Uranus besteht aus einem großen Ozean aus Wasser und geschmolzenem Gestein.

Uranus hat ein schwaches Ringsystem, das aus dunklen Brocken bis zu 10 Metern Durchmesser besteht. Derzeit sind elf Ringe bekannt, der hellste wird *Epsilon-Ring* genannt.

Monde

Es sind derzeit 27 Uranus-Monde zwischen 10 und 1.600 km Durchmesser bekannt. Die beiden ersten wurden von Wilhelm Herschel 1787 ent-

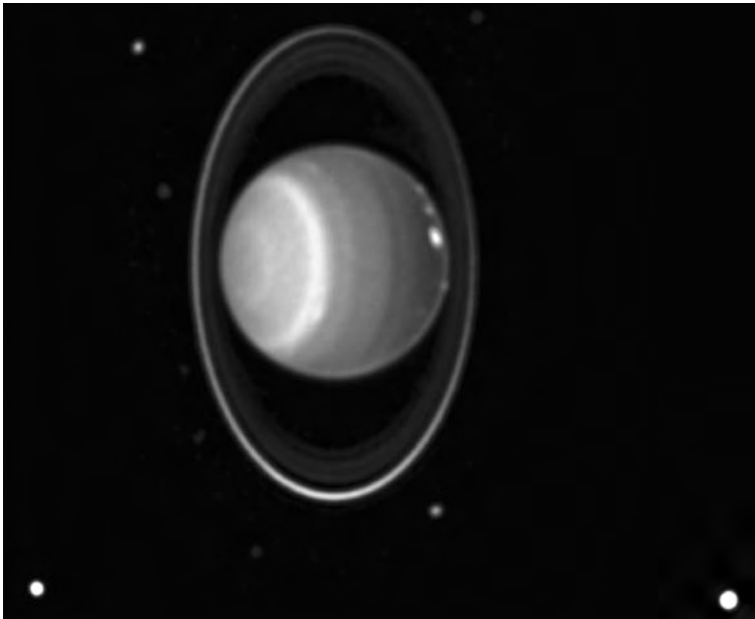


Abb. 94: Uranus mit Ring und Monden

deckt und von seinem Sohn John Herschel nach Figuren aus Shakespeares *Sommernachtstraum* ➔Titania und ➔Oberon benannt. Zwei weitere Monde, die William Lassell 1851 entdeckte, wurden ➔Ariel und ➔Umbriel getauft. Gerard Kuiper entdeckte 1948 den Mond Miranda. Alle weiteren Monde von Uranus wurden ebenfalls nach Figuren von Shakespeare oder Alexander Pope benannt. Durch den Vorbeiflug der Raumsonde Voyager 2 im Januar 1986 wurden zehn weitere Monde entdeckt, wobei einer bis heute nicht offiziell bestätigt wurde. Seitdem wurden weitere Monde durch Teleskope entdeckt.

Erforschung

Der Uranus ist bei guten Bedingungen mit bloßem Auge sichtbar, allerdings entspricht seine Helligkeit nur den schwächsten gerade noch erkennbaren Sternen – im Gegensatz zu den weiter innen liegenden Planeten bis ➔Saturn, die alle zu den auffälligsten Objekten am Himmel zählen. Daher blieb dem Westen der Uranus bis zur Neuzeit als Planet unbekannt. Die Polynesier aber kannten ihn und hatten einen eigenen Namen für ihn.

Sir Friedrich Wilhelm Herschel entdeckte Uranus am 13. März 1781 mit einem selbst entwickelten Teleskop von seinem Garten in der englischen Stadt Bath aus.

Der Planet fügte sich genau in die von dem deutschen Astronomen Johann Elert Bode veröffentlichte Titius-Bode-Reihe der Umlaufbahnradien. Auf Herschel deutet die Initiale H im astronomischen Symbol von Uranus hin. Von den Planeten, die nicht schon in der Antike bekannt waren, wurde Uranus als erster entdeckt. Herschel selbst benannte den Planeten zu Ehren des englischen Königs Georg III. *Georgium Sidus* (Georgs Stern). In Frankreich dagegen nannten ihn die Astronomen *Herschel*, bis Bode vorschlug, ihn nach dem griechischen Gott Uranos zu benennen. Der Name setzte sich allerdings erst gegen 1850 durch. Somit ist er der einzige Planet, der nicht nach einem römischen Gott benannt wurde. Uranus war schon zuvor beobachtet und katalogisiert worden, zuerst 1690 von John Flamsteed, jedoch nicht als Planet erkannt. Die Abweichung der beobachteten Positionen des Uranus von den berechneten führten zur gezielten Suche nach ➔Neptun.

Wetter – Auf dem Uranus halten sich häufig monatelang Wirbelstürme, wie Bilder des Keck-Teleskops auf Hawaii zeigten. Diese damit aufgenommenen Bilder gewährten bislang den besten Einblick in das rätselhafte Wettergeschehen des Planeten. In der nördlichen Hemisphäre des Uranus

entdeckten Forscher der Universität von Wisconsin in Madison eine rund 29.000 Kilometer lange Wolkenformation. Sie war die größte ihrer Art, die auf Uranus je beobachtet wurde, hatte sich aber nach einem Monat komplett wieder aufgelöst. Langlebiger hingegen sei ein großer Sturm in der südlichen Hemisphäre. Seit mehreren Jahren bewegt er sich über fünf Breitengrade hinweg auf und ab. Eine Erklärung für dieses Phänomen haben die Wissenschaftler noch nicht.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Uranus_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Uranus_(Planet)). Historie: 23.5.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Ben-Zin, S, Alkuin, Zwobot, SilentSurfer, Phrood, Arnomane, Jsgermany, BWBot, Flups, Rivi, Nephelin, CdaMVvWgS, Leipnizkeks, Arty, Traroth, Wolfgangbeyer, Botteler, Crux, Mps, Opa, AlephNull, RKraasch, ArtMechanic, Herbye, GNosis, AkaBot, Andre Engels, CuttyP, Hagbard, Sikilai, Rosa Lux, Ninjamask, ErikDunsing, Wst, Katharina, Vlado, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Ariel

Der Mond Ariel wurde am 24. Oktober 1851 von William Lassell entdeckt. Er wurde nach einer Sylphe in Alexander Popes Komödie *Der Raub der Locke* benannt. Die Namen der ersten vier entdeckten Uranusmonde (→Oberon, →Titania, Ariel, →Umbriel) wurden von John Herschel, dem Sohn von Wilhelm Herschel vorgeschlagen. W. Herschel war der Entdecker von Oberon und Titania.

Bahndaten

Ariel umkreist Uranus in einem mittleren Abstand von 190.900 km in 2 Tagen 12 Stunden und 29 Minuten auf einer fast kreisrunden Bahn. Die Bahnexzentrizität beträgt 0,0012, wobei die Bahn 0,041° gegenüber dem Äquator des Uranus geneigt ist.

Aufbau und physikalische Daten

Ariel hat eine etwas unregelmäßige Form mit Abmessungen von 1.162,2 × 1.155,8 × 1.155,4 km. Er besitzt eine mittlere Dichte von 1,7 g/cm³ und ist zu etwa 50 % aus Wassereis, 30 % silikatischem Gestein und 20 % Kohlenstoffverbindungen, wie Methan, zusammengesetzt. Er rotiert in 2 Tagen 12 Stunden und 29 Minuten um die eigene Achse und weist somit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf. Ariel besitzt eine helle Oberfläche mit einer Albedo von 0,39, das heißt, 39 % des eingestrahnten Sonnenlichts werden reflektiert. Die mittlere Oberflächentemperatur beträgt -193°Celsius.

Ariel wurde im Januar 1986 beim Vorbeiflug der Raumsonde Voyager 2 fotografiert und vermessen. Seine Oberfläche weist größere Regionen auf, in denen nur wenige Impaktkrater sichtbar sind. Es zeigt sich ein Netzwerk von Verwerfungen und Canyons. Einige Eisfelder scheinen relativ frisch gebildet zu sein. Das lässt darauf schließen, dass Ariel in der Vergangenheit ein Schauplatz intensiver geologischer Aktivitäten war.

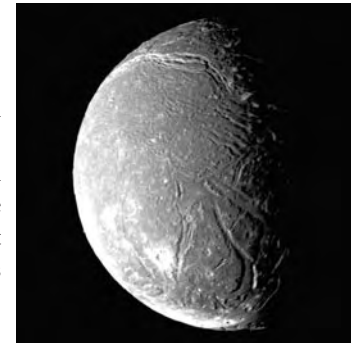


Abb. 95: Voyager-2-Aufnahme von Ariel

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Ariel_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Ariel_(Mond)). Historie: 8.12.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Srbauer, BWBot, Phrood, Zwobot, Mhlusi, AHoerstemeyer, Arnomane, Nikai, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Umbriel

Der Mond Umbriel wurde am 24. Oktober 1851 von dem Astronomen William Lassell entdeckt. Umbriel wurde nach einem ungunten Geist aus Alexander Popes Komödie *Der Raub der Locke* benannt. Die Namen der ersten vier entdeckten Uranusmonde (→Oberon, →Titania, →Ariel, Umbriel) wurden von John Herschel, dem Sohn des Uranus-Entdeckers Wilhelm Herschel, vorgeschlagen.



Abb. 96: Voyager 2-Aufnahme von Umbriel

Bahndaten

Umbriel umkreist Uranus in einem mittleren Abstand von 266.300 km in 4 Tagen 3 Stunden und 27 Minuten auf einer fast kreisrunden Bahn. Die Bahn weist eine Exzentrizität von 0,005 auf und ist 0,4° gegen den Äquator des Uranus geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Umbriel hat einen Durchmesser von 1169 km. Er besitzt eine mittlere Dichte von 1,4 g/cm³ und ist vermutlich überwiegend aus Wassereis so-

wie Anteilen von silikatischem Gestein und Kohlenstoffverbindungen, wie Methan, zusammengesetzt. Umbriel besitzt eine Albedo von 0,16, das heißt, 16 % des von der Sonne eingestrahnten Lichts werden reflektiert. Er ist damit der dunkelste der großen Uranusmonde. Er rotiert in 4 Tagen 3 Stunden und 27 Minuten um die eigene Achse und weist somit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf.

Umbriel wurde im Januar 1986 beim Vorbeiflug der Raumsonde Voyager 2 fotografiert und vermessen. Dabei zeigte sich, dass seine Oberfläche alt und verkrustet ist und nur wenige Spuren geologischer Aktivität aufweist. In der Nähe des Äquators (auf dem Voyagerfoto oben zu sehen) befindet sich das auffälligste Merkmal auf seiner Oberfläche, ein 140 km großer Ring aus hellem Material. Seine Entstehung ist bislang nicht vollständig geklärt, aber offensichtlich kann sie mit einem \rightarrow Impaktereignis in Verbindung gebracht werden. Beim Einschlag eines \rightarrow Asteroiden könnte helleres Eis aus tieferen Krustenschichten ausgeworfen worden sein.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Umbriel_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Umbriel_(Mond)). Historie: 12.5.04: Angelegt von Herbye, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Herbye, BWBot, Phrood, Anaximander, FlaBot, Mhlusi, Arnomane, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Titania

Titania ist der größte Mond des \rightarrow Planeten \rightarrow Uranus und wurde am 11. Januar 1787 von Wilhelm Herschel entdeckt und benannt. Titania ist in William Shakespeares *Sommernachtstraum* die Königin der Elfen.

Bahndaten

Titania umkreist Uranus in einem mittleren Abstand von 463.300 km in rund 8 Tagen und 17 Stunden. Die Bahn weist eine leichte Bahnexzentrizität von 0,0017 auf und ist rund 0,08° gegenüber dem Äquator des Uranus geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Titania hat einen Durchmesser von 1578 km. Ihre mittlere Dichte beträgt 1,71 g/cm³. Sie ist zu etwa 50 % aus Wassereis, 30 % silikatischem Gestein und 20 % Kohlenstoffverbindungen, etwa Methan, zusammengesetzt. Titania weist eine hohe Albedo von 0,28 auf, das heißt 28 % des eingestrahnten Sonnenlichts werden von der Oberfläche reflektiert. Die mittlere Oberflächentemperatur beträgt -190° Celsius. An der Oberfläche beträgt

die Schwerebeschleunigung 0,378 m/s², dies entspricht rund 4 % der irdischen.

Titania rotiert in 8 Tagen und 17 Stunden um die eigene Achse und weist somit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf.

Titania wurde beim Vorbeiflug der Raumsonde Voyager 2 fotografiert und vermessen. Das auffälligste Merkmal ihrer Oberfläche ist ein riesiger Canyon, gegen den der Grand Canyon auf der Erde winzig wirkt. Von seiner Ausdehnung ist er mit dem Valles Marineris auf dem \rightarrow Mars oder Ithaca Chasma auf dem \rightarrow Saturnmond \rightarrow Tethys vergleichbar.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Titania_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Titania_(Mond)). Historie: 19.9.02: Angelegt von Opa, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Opa, BWBot, Phrood, FlaBot, Mhlusi, Conny, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Oberon

Oberon ist der äußerste und zweitgrößte der großen Monde des \rightarrow Planeten \rightarrow Uranus. Er wurde am 11. Januar 1787 von Wilhelm Herschel entdeckt und benannt. Der namensgebende Oberon ist in Shakespeares *Sommernachtstraum* der König der Elfen.

Bahndaten

Oberon umkreist Uranus in einem mittleren Abstand von 583.519 km in rund 13 Tagen und 11 Stunden. Die Bahn weist eine leichte Bahnexzentrizität von etwa 0,0016 auf und ist rund 0,7° gegenüber dem Äquator des Uranus geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Oberon hat einen Durchmesser von 1523 km. Seine mittlere Dichte beträgt 1,63 g/cm³. Er ist zu etwa 50 % aus Wassereis, 30 % silikatischem Gestein und 20 % Kohlenstoffverbindungen, wie Methan, und Stickstoffverbindungen zusammengesetzt. Seine mittlere Dichte ist mit 1,63 g/cm³ geringer als die Dichte der Erde. Oberon weist eine hohe Albedo von 0,24 auf, das heißt, 24 % des eingestrahnten Sonnenlichts werden von der Oberfläche reflektiert. Die mittlere Oberflächentemperatur beträgt -188° Celsius. An der Oberfläche beträgt die Schwerebeschleunigung 0,346 m/s², dies entspricht rund 4 % der irdischen.

Oberon rotiert in 13 Tagen und 11 Stunden um die eigene Achse und weist somit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf.

Aufnahmen der Raumsonde Voyager 2 zeigten eine von Kratern übersäte, vereiste Oberfläche, die offensichtlich sehr alt ist und nur wenig geologische Aktivitäten aufweist. In vielen Kratern finden sich auf dem Boden Ablagerungen einer noch unbekanntes, dunklen Substanz.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Oberon_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Oberon_(Mond)). Historie: 19.9.02: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, BWBot, Opa, Phrood, Mhlusi, FlaBot, Arnomane, SilentSurfer, Nikai, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Neptun

Neptun ist der achte Planet im Sonnensystem. Er ist benannt nach Neptun, dem römischen Gott des Meeres und des fließenden Wassers, und wird zu den jupiterähnlichen (iovanischen) Planeten gezählt. Sein Zeichen ♆ ist ein stilisierter Dreizack, die Waffe des Poseidon (Poseidon ist die griechische Entsprechung zum römischen Neptun).

Umlaufbahn

Neptun ist der äußerste der großen Gasplaneten des Sonnensystems und läuft auf einer fast kreisförmigen Umlaufbahn mit einer Exzentrizität von 0,0113 um die Sonne. Sein sonnennächster Punkt, das Perihel, liegt bei 29,709 AE und sein sonnenfernster Punkt, das Aphel, bei 30,385 AE. Wegen der exzentrischen Umlaufbahn von Pluto ist der Neptun manchmal der von der Sonne am weitesten entfernte Planet. Seine Umlaufbahn ist mit 1,769° nur leicht gegen die Ekliptik geneigt. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Neptun etwa 165 Jahre.

Aufbau

Neptun kann nicht mit bloßem Auge beobachtet werden. In einem Teleskop erscheint er als blaugrüne Scheibe, ähnlich wie der Uranus. Die blaugrüne Farbe kommt vom Methan in seiner Atmosphäre. Sein Durchmesser beträgt 49.248 km, Neptun ist somit etwas kleiner als Uranus und der viertgrößte Planet des Sonnensystems (vgl. Farbtafeln Abb. 150).

Wegen seiner großen Entfernung zur Sonne erreicht den Neptun nur wenig Wärme. Seine Oberflächentemperatur liegt bei -218 °C (55 K). Der Planet scheint jedoch eine innere Wärmequelle zu besitzen. Man vermutet, dass es sich dabei noch um Restwärme aus seiner Entstehungszeit handelt. Die Atmosphäre von Neptun hat mit bis zu 2.000 km/h die höchsten Windgeschwindigkeiten im Sonnensystem, die vermutlich durch diese

innere Wärmequelle zustande kommen. Neptun rotiert insgesamt einmal in 16 h 6 min 36 s um seine Achse, wobei seine Drehachse um 28,32° gegen seine Umlaufbahn geneigt ist.

Der innere Aufbau von Neptun ähnelt dem des Uranus: Ein felsiger Kern, bedeckt von einer Eisschicht, darüber die dicke Atmosphäre. Wie bei Uranus, aber anders als bei Jupiter und Saturn, hat Neptun vermutlich klar unterscheidbare Schichten. Aufgrund seines felsigen Kerns ist auch seine Dichte höher als die von Jupiter und Saturn und beträgt 1,638 g/cm³. Wie auch bei Uranus ist das Magnetfeld von Neptun gegenüber der Rotationsachse geneigt, und zwar um 47°.

Neptun hat ein schwaches Ringsystem von unbekannter Zusammensetzung. Die Ringe haben eine eigentümlich »klumpige« Struktur, die Ursache dafür ist noch unbekannt, könnte aber mit der Gravitations-Wechselwirkung mit benachbarten kleineren Monden zu tun haben. Die ersten Anzeichen dafür, dass die Ringe nicht vollständig sind, gab es Mitte der 1980er Jahre, als bei Bedeckung von Sternen durch den Neptun ein zusätzliches Aufblitzen stattfand, kurz vor oder nachdem der Planet vor dem Stern vorübergezogen war. 1989 klärte Voyager 2 die Angelegenheit, als man auf ihren Aufnahmen mehrere schwache Ringe entdeckte, von denen der äußerste, Adams genannt, aus drei großen Kreisbögen bestand, die *Freiheit*, *Gleichheit* und *Brüderlichkeit* getauft wurden. Die Existenz von Ringbögen ist nur schwer zu erklären, weil sie sich eigentlich nach längerer Zeit zu einem kompletten Ring verteilen müssten. Möglicherweise sind Gravitationskräfte von Galatea, einem Mond an der Innenkante des Rings, dafür verantwortlich, dass sich die einzelnen Segmente nicht auflösen. Weitere Ringe wurden von den Kameras von Voyager 2 entdeckt. Zusätzlich zu dem schmalen Adams-Ring mit einem Radius von 63.000 km gibt es noch den *Leverrier*-Ring mit 53.000 km und den breiteren, aber schwächeren *Galle*-Ring mit 42.000 km Radius. Die äußeren Erweiterungen des Leverrier-Rings werden *Lassell* und *Arago* genannt.

Monde

Neptun hat 13 bekannte Monde. Der bei weitem größte ist der von William Lassell 17 Tage nach der Entdeckung von Neptun entdeckte Mond Triton. Im Gegensatz zu allen anderen großen Monden der anderen Planeten des Sonnensystems läuft er retrograd (entgegengesetzt der Rotation des Planeten) um Neptun und nähert sich diesem langsam auf einer Spiralbahn. Neptuns zweiter Begleiter Nereid hat eine der exzentrischsten Umlaufbahnen aller Monde des Sonnensystems.

Von Juli bis September 1989 entdeckte die Weltraumsonde Voyager 2 sechs neue Neptunmonde. Aus diesen sticht der irregulär geformte Proteus dadurch hervor, dass er gerade eben noch so klein ist, um nicht von seiner eigenen Schwerkraft in Kugelform gezogen zu werden. Die vier innersten Neptunmonde Naiad, Thalassa, Despina und Galatea haben Umlaufbahnen innerhalb der Neptunringe. Der von innen nächstfolgende Mond Larissa wurde ursprünglich 1981 entdeckt, als er einen Stern bedeckte. Zunächst dachte man, dass es ein Teil eines Neptunringbogens war, aber als Voyager 2 1989 Neptun erforschte, stellte sich heraus, dass diese Sternbedeckung durch einen Mond verursacht wurde.

Die Entdeckung von fünf weiteren irregulären Monden des Neptuns wurde 2004 bekanntgegeben.

Erforschung

Die Bewegung des →Uranus um die Sonne verlief nicht ganz so, wie sie nach den Keplerschen Gesetzen hätte sein sollen. Astronomen vermuteten daher, dass es einen weiteren Planeten jenseits des Uranus geben müsse, der durch seine Gravitationskraft die Bewegung des Uranus verändert. John Couch Adams sowie der französische Mathematiker Urbain Le Verrier errechneten unabhängig voneinander die Position, an der sich der unbekannte Planet befinden müsste, wobei die Berechnung von Leverrier wesentlich genauer war. Aufgrund dieser Berechnung gelang es Johann Gottfried Galle, dem Direktor der Berliner Sternwarte, gemeinsam mit seinem Assistenten Heinrich Louis d'Arrest am 23. September 1846 Neptun zu entdecken. Die tatsächliche Position wich nur geringfügig von der errechneten Position ab.

Später fand man heraus, dass schon Galileo Galilei den Neptun gesehen hatte. Aus seinen Aufzeichnungen geht hervor, dass er ihn jedoch für einen Fixstern gehalten hatte. Hätte er Neptun nur einige Tage früher beobachtet, wäre seine Bewegung am Himmel viel deutlicher gewesen.

Mit einer Umlaufzeit von 165 Jahren wird Neptun im Jahr 2011 erstmals wieder die gleiche Stelle passieren, an der ihn Johann Gottfried Galle entdeckt hat. Erst dann wird man einen kompletten Orbit Neptuns tatsächlich beobachtet haben.

Im August 1989 war Voyager 2 die erste und bislang einzige Raumsonde, die Neptun aus der Nähe erforscht hat. Sie flog über den Nordpol von Neptun und passierte den Planeten mit etwa 4.950 Kilometer Abstand.

Zurzeit (2005) wird bei der NASA über eine *Neptune-Orbiter*-Raumsonde nachgedacht, die möglicherweise über einen Kernreaktor als Energiequelle verfügen soll und in etwa 15–20 Jahren gestartet werden kann. Die Sonde könnte eine oder mehrere Atmosphärenkapseln auf Neptun abwerfen sowie einen Lander auf Triton absetzen.

Kulturgeschichte

In der Astrologie steht Neptun unter anderem für Spiritualität, Sucht und Illusion. Er wird dem Element Wasser, dem Sternzeichen Fische und dem 12. Haus zugeordnet.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Neptun_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Neptun_(Planet)). Historie: 30.4.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Ben-Zin, S, Arnomane, Zwobot, Phrood, Nephelin, Bricktop1, BWBot, Alkuin, Crux, RKraasch, Dbenzhuser, Robbot, Rivi, Wissen, ArtMechanic, Traroth, Herbye, Alvo, Pit, Mps, Regnaron, AkaBot, CuttyP, Steffen M., Katharina, Mikue, Berni2k, Sansculotte, Uwe W., JostJahn, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Triton

Triton ist der größte Mond des Planeten →Neptun (vgl. Farbtafeln Abb. 156).

Entdeckung und Benennung

Triton wurde am 10. Oktober 1846 von William Lassell entdeckt. Erst 17 Tage zuvor hatte Johann Gottfried Galle den Gasplaneten Neptun entdeckt.

Benannt wurde der Mond nach Triton, einem Meeresgott aus der griechischen Mythologie. Der Name wurde allerdings erst 1880 von Camille Flammarion und anderen Astronomen vorgeschlagen, aber lange Zeit offiziell nicht benutzt. Aus Aufzeichnungen von 1939 geht hervor, dass der Mond zwar einen Namen habe, dieser war jedoch allgemein nicht im Gebrauch. In der astronomischen Literatur war immer nur vom *Mond des Neptun* die Rede. Es mutet etwas seltsam an, dass Lassell selbst keinen Namen vergab, waren doch erst einige Jahre zuvor seine Entdeckungen, der achte →Saturnmond Hyperion und die →Uranusmonde →Ariel und →Umbriel, offiziell benannt worden.

Umlaufbahn

Triton umkreist Neptun in einem Abstand von 345.760 km auf einer fast kreisförmigen Bahn in 5 Tagen und 21 Stunden. Dabei umläuft er den Pla-

neten, anders als die meisten Monde des Sonnensystems, retrograd, das heißt entgegen dessen Rotationsrichtung. Die Bahn ist mit $156,834^\circ$ stark gegen den Äquator des Neptun geneigt. Vermutlich ist Triton ein größeres Objekt des Kuipergürtels, das von Neptun durch dessen Gravitationswirkung eingefangen wurde. Dabei könnte er vom Aufbau dem Planeten Pluto, dessen Mond Charon sowie anderen Mitgliedern des Kuipergürtels sehr ähnlich sein. Triton umläuft Neptun innerhalb eines kritischen Abstandes, wodurch er sehr stark den Gezeitenkräften des Riesenplaneten ausgesetzt ist. Berechnungen zufolge wird Triton in 100 Millionen Jahren zerrissen werden, wobei seine Bestandteile ein großes Ringsystem, ähnlich dem des Saturn, bilden werden.

Jahreszeiten

Tritons Rotationsachse ist 157° gegenüber der Rotationsachse des Neptun geneigt, die wiederum 30° gegenüber dessen Umlaufbahn um die Sonne geneigt ist. Daraus resultiert, dass Tritons Pole meistens direkt der Sonne zugewandt sind, ähnlich wie beim Planeten Uranus. Während Neptuns 166 Jahre dauernden Umlaufs um die Sonne herrscht einmal am Nordpol und einmal Südpol über 80 Jahre lang Sommer, während auf der abgewandten Seite Winter herrscht. Die damit verbundenen Temperaturunterschiede führen zu starken jahreszeitlichen Effekten. Zum Zeitpunkt des Vorbeiflug der Voyager-Sonde war der Südpol der Sonne zugewandt, während die Nordpolregion seit etwa 30 Jahren im Schatten lag. Dort waren Ablagerungen von gefrorenem Stickstoff und Methan erkennbar, die offenbar im Wechsel mit den Jahreszeiten immer wieder erwärmt werden, verdampfen und sich erneut als Eis auf der Oberfläche niederschlagen.

Aufbau, Oberfläche und physikalische Eigenschaften

Triton besitzt einen mittleren Durchmesser von 2.707 km und ist damit mit Abstand der größte Mond des Neptun. Seine mittlere Dichte beträgt $2,05 \text{ g/cm}^3$, vermutlich besteht er aus einem Kern aus silikatischem Gestein und einer Kruste aus Wassereis. Er weist eine hohe Albedo von 0,7 auf, das heißt, 70 % des eingestrahnten Sonnenlichts wird reflektiert. Dies rührt daher, dass ein großer Teil seiner Oberfläche von Eis bedeckt ist. Die mittlere Temperatur an der Oberfläche beträgt $34,5 \text{ K}$. Dies ist kalt genug, um trotz der geringen Gravitation eine Atmosphäre festzuhalten, die zu 99 % aus Stickstoff und 1 % aus Methan besteht. Allerdings ist der Druck mit 1 Pascal äußerst gering.

1989 flog die Raumsonde Voyager 2 an Neptun und seinen Monden vorbei und sandte dabei faszinierende Aufnahmen von Tritons Oberfläche. Es zeigte sich ein Netzwerk von Verwerfungen, an denen die Eiskruste deformiert und zerbrochen wurde, wobei nur wenige Krater vorhanden sind. Dies lässt darauf schließen, dass der Mond geologisch aktiv ist, wobei die Spuren älterer Krater durch geologische oder atmosphärische Prozesse verwischt wurden. Große Einschlagsbecken wurden offensichtlich mehrfach durch zähflüssiges Material aus dem Innern aufgefüllt.

Überraschend war der Nachweis einer Art von »kaltem« Vulkanismus, den man als *Kryovulkanismus* (Kälte- oder Eis-Vulkanismus) bezeichnet. Es wurden Geysire festgestellt, die ein Gemisch aus flüssigem Stickstoff und mitgerissenen Gesteinsstäuben bis in 8 km Höhe ausstoßen. Diese sind auf den Voyager-Aufnahmen als dunkle Rauchfahnen sichtbar. Ursächlich dafür dürfte die jahreszeitliche Erwärmung durch die Sonneneinstrahlung sein, die trotz ihrer geringen Intensität ausreicht, um gefrorenen Stickstoff zu verdampfen. Die ausgestoßenen Partikel setzen sich auf der Oberfläche ab und bilden Ablagerungen aus gefrorenem Methan und Silikaten. Das Methan wandelt sich infolge der Sonneneinstrahlung in andere organische Verbindungen um, die als dunkle Schlieren und Streifen sichtbar sind.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Triton_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Triton_(Mond)). Historie: 11.10.03: Angelegt von Robodoc, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Herbye, Robodoc, BWBot, Urbanus, Phrood, Arnomane, Bricktop1, Mhlusi, Steffen M., Rivi, FotoFux, Aglarech, Mathias Schindler, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Pluto

Pluto ist der äußerste und kleinste bekannte Planet des Sonnensystems, benannt nach Pluto, dem römischen Gott der Unterwelt. Das Zeichen des Planeten ist ♇. Sein Status als Planet wird durch die Entdeckung ähnlicher Objekte vergleichbarer Größe am Rand des Planetensystems zunehmend in Frage gestellt.

Bahn und Aufbau des Pluto

Plutos Umlaufbahn besitzt eine relativ hohe numerische Exzentrizität von 0,2444. Das heißt, dass die größte und die kleinste Abweichung vom mittleren Bahnradius 24,44 % beträgt. Diese ziemlich exzentrische Bahnellipse liegt um den Bereich des sonnennächsten Bahnpunktes, des Perihels, mit 29,646 AE näher an der Sonne als die fast kreisförmige Bahn des

→Neptun und erreicht im sonnenfernsten Punkt, dem Aphel, 48,826 AE. Das letzte Mal durchlief Pluto diesen sonnennäheren Bereich vom 7. Februar 1979 bis zum 11. Februar 1999. In dieser Zeit war Neptun der sonnenfernste Planet. Das Perihel durchlief Pluto 1989. Den sonnenfernsten Bahnpunkt, das Aphel, wird er im Jahr 2113 erreichen. Dort empfängt er 2430 Mal weniger Sonnenlicht als die →Erde. Das ist aber noch 164 Mal mehr als die Beleuchtung der Erde durch den Vollmond.

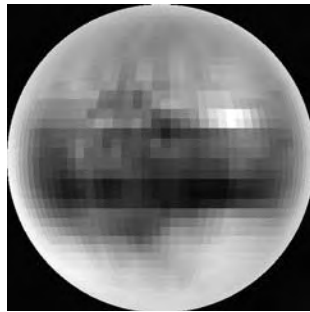


Abb. 97: Oberfläche des Pluto

Die Umlaufzeiten von Pluto und Neptun lassen sich durch ein Verhältnis von kleinen ganzen Zahlen ausdrücken: Ihr Umlaufverhältnis ist 3:2. Während Pluto zwei Umläufe vollzieht, hat sich Neptun ganze drei Mal um die Sonne bewegt. Im Unterschied zu allen anderen derart kommunisablen Umlaufverhältnissen zwischen den Planeten ist es bei diesen äußeren Bahnachbarn nicht nur nahe einer echten Resonanz, sondern besteht nach den bisherigen Beobachtungen sehr genau.

Über Pluto selbst ist nur wenig bekannt, da es von ihm noch keine Nahaufnahmen wie von allen anderen Planeten gibt. Mit einem Durchmesser von lediglich 2.246 km ist er deutlich kleiner als die sieben größten Monde im Sonnensystem. Seine →Atmosphäre ist sehr dünn. Die Annahme, dass sie nach der Passage des sonnennäheren Bahnbereiches bald ausfrieren würde, konnte bislang nicht bestätigt werden. Aus dem Vergleich von spektroskopischen Messungen, die 1988 und 2002 durchgeführt wurden, wäre sogar eine geringe Ausdehnung der Atmosphäre abzuleiten.

Aufgrund der auffallend exzentrischen Bahn und der geringen Größe Plutos nahmen früher viele Astronomen an, er sei ein entwichener Mond des →Neptun und auch seine große Bahnneigung von 17° gegen die Erdbahnebene sei ein Hinweis auf ein astronomisches Ereignis, das ihn »befreit« habe. Als Ursache der Herauslösung aus dem Neptunsystem wurde eine erhebliche Bahnstörung durch den Einfang des größeren Neptunmondes →Triton angenommen, der das ganze ursprüngliche Mondsystem beträchtlich durcheinandergewirbelt haben soll. Die extreme Bahnexzentrizität des Neptunmondes Nereid könne eine nachhaltige Folge davon sein. Für einen Einfang des Triton spricht sein rückläufiger Umlaufsinn.

Mit der Entdeckung des großen Mondes von Pluto galt auch dieser als ein abgelöster Neptunsatellit. Einer anderen Hypothese zufolge handelt es sich um zwei Bruchstücke eines einst zerschlagenen Neptunmondes.

Heute wird eher die These bevorzugt, Pluto sei einer der größten – jedenfalls der hellste – Vertreter der Transneptune. Dies sind tausende Asteroiden (Kleinplaneten und →Kometenkerne) jenseits der Neptunbahn im so genannten →Kuipergürtel. Viele von ihnen wurden durch den äußersten →Gasriesen ebenfalls in eine 3:2-Bahnresonanz »eingefangen« und werden daher →Plutinos genannt. Mit Methoden der Himmelsmechanik kann man zeigen, dass deren gewöhnlich sehr exzentrische, also stark gestreckte Umlaufbahnen über Millionen von Jahren stabil sind. Demnach wäre Pluto kein wirklicher Planet. Auch der Neptunmond Triton soll vor seinem Einfang ein Mitglied des Kuipergürtels gewesen sein.

Pluto und der noch kältere Triton sind sich auch vom Aufbau her wahrscheinlich sehr ähnlich. Somit wäre Pluto wie Triton von einer eher rötlichen Färbung, hat wahrscheinlich Polkappen und in Richtung des Äquators dunkler gefärbte Gebiete. Dies würde auch die schwankende Helligkeit erklären. Die äußeren Schichten bestehen vermutlich aus lockerem Gestein mit einem hohen Anteil an Eis. Im Inneren hat Pluto wahrscheinlich einen von einem Eismantel umgebenen Gesteinskern, der etwa 70 bis 80 % der Gesamtmasse ausmacht.

Ein ungewöhnlicher Mond

Plutos größter bekannter Begleiter →Charon hat nach Messungen im Januar 2006 einen Durchmesser von 1.207,2 km und ist damit im Vergleich zu Pluto sehr groß. Das System Pluto-Charon wird aufgrund dieses ungewöhnlichen Größenverhältnisses von rund 1:2 auch als *Doppelplanet* bezeichnet. Der gemeinsame Schwerpunkt, das Baryzentrum des Systems, liegt *außerhalb* des so genannten Zentralkörpers, ein in unserem Sonnensystem für einen Planeten einzigartiger Fall, der durch das ähnlich beeindruckende Masseverhältnis von gut 1:8 und auch durch einen hinreichend großen Abstand bedingt ist. Die große Halbachse der Umlaufbahn von Charon, also der mittlere Bahnradius seines Massezentrums vom gemeinsamen Schwerpunkt, misst 19.405 km. Entsprechend des Masseanteils von Pluto beträgt dessen analoger Abstand zum Baryzentrum umgekehrt proportional gut ein Achtel davon, also konkret etwa 2.360 km. Damit ist die Distanz der Oberfläche von Pluto zum Baryzentrum mit rund 1.170 km fast so groß wie sein Körperradius.

Auch das System \rightarrow Erde- \rightarrow Mond wird mitunter als Doppelplanet bezeichnet. In seinem Fall, mit dem Masseverhältnis 1:81, befindet sich der gemeinsame Schwerpunkt reichlich 4.700 km abseits des Erdzentrums beziehungsweise etwa 1.650 km unterhalb der Erdoberfläche. Die Zentrifugalkraft der Drehbewegung mit dem Umlauf des Erdmondes reicht aus, um auf der mondabgewandten Seite der Erde einen zweiten Gezeitenbuckel zu verursachen.

Als einziger Planet im Sonnensystem hat Pluto eine satellitengebundene Rotation (Hantelrotation, doppelt gebundene Rotation), das heißt Charon und Pluto haben ihre Eigenrotation aufgrund der Gezeitenkräfte gegenseitig soweit abgebremst, dass sich beide während eines Umlaufs umeinander auch genau einmal um ihre eigene Achse drehen. Sie wenden daher einander immer die gleiche Seite zu. Unter Paaren von annähernd gleich großen \rightarrow Asteroiden ist solch eine Synchronrotation wahrscheinlich relativ häufig.

Zwei weitere Monde?

Nach der Entdeckung des Mondes \rightarrow Charon im Jahre 1978 wurden mit dem Hubble Space Telescope zwei weitere kleine Monde entdeckt. Dies teilte die US-Weltraumbehörde NASA am 31. Oktober 2005 mit. Die beiden Monde wurden nicht früher entdeckt, weil sie aufgrund ihrer geringen Größe sehr lichtschwach und somit nur auf sehr lang belichteten Aufnahmen von Pluto erkennbar sind.

Aufgrund aufeinanderfolgender Aufnahmen von verschiedenen Tagen konnte bestätigt werden, dass diese kleinen Monde sehr wahrscheinlich um Pluto kreisen und nicht sehr schwache Hintergrundsterne sind, die nur zufällig ins Bild geraten waren.

Die beiden neuen Trabanten, die bis zu ihrer offiziellen Anerkennung und Namensgebung durch die International Astronomical Union (IAU) die Bezeichnungen S/2005 P1 und S/2005 P2 trugen, haben einen Durchmesser von etwa 100 und 160 Kilometer und umkreisen Pluto in einer Entfernung von etwa 65.000 beziehungsweise 50.000 km.

Die Entdeckung dieser neuen Trabanten des Pluto ist nach Angaben von Wissenschaftlern sehr überraschend, da im sogenannten \rightarrow Kuipergürtel jenseits der Umlaufbahn des \rightarrow Neptun noch nie zuvor ein Himmelskörper mit mehr als einem Satelliten beobachtet wurde.

Diese Funde sollen im Februar 2006 bei der nächsten Beobachtung des Pluto durch das Hubble Space Telescope bestätigt und genauer untersucht werden.

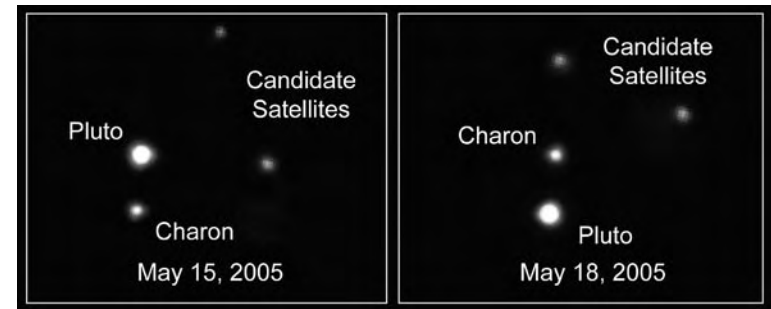


Abb. 98: Pluto und Charon mit den beiden neu entdeckten Monden an zwei verschiedenen Tagen; Pluto und Charon wurden in dieser Aufnahme viel dunkler abgebildet, damit die kleinen lichtschwachen Monde nicht überstrahlt werden.

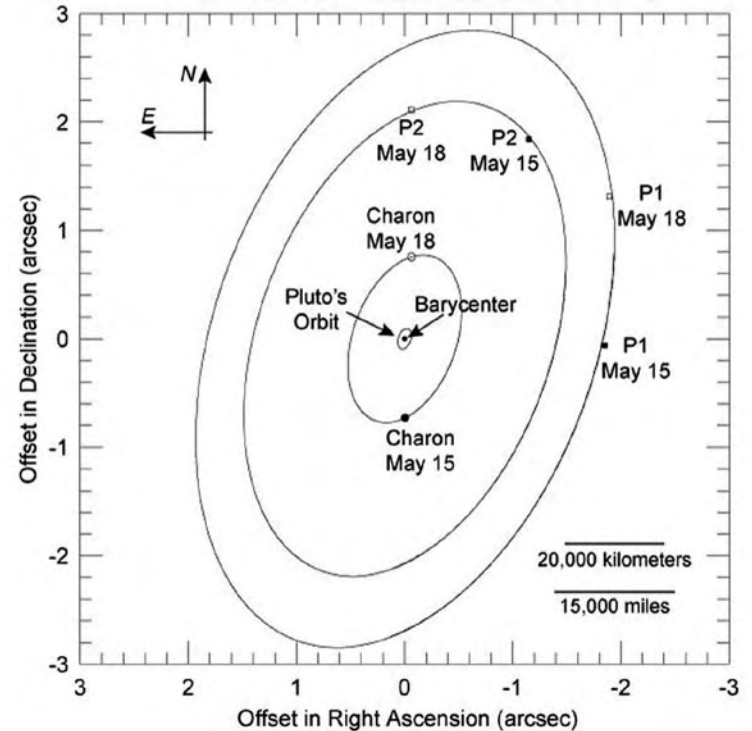


Abb. 99: Die Umlaufbahnen der Monde und Plutos um das Schwerzentrum des Pluto-Charon-Systems. Die kleinen Quadrate deuten die Messunsicherheit der beobachteten Positionen an.

Geschichte der Erforschung

Die Entdeckungsgeschichte des Pluto ähnelt in gewisser Weise der des gut 83 Jahre zuvor gefundenen Neptun. Beide Planeten wurden aufgrund von Bahnstörungen von Nachbarplaneten rechnerisch vorhergesagt und dann an den daraus hergeleiteten Bahnpositionen gesucht. Der hypothetische neunte Planet wurde für kleine Bahnabweichungen der Planeten Neptun und Uranus verantwortlich gemacht.

Pluto wurde am 18. Februar 1930 auf der Flagstaff-Sternwarte in Arizona durch Vergleiche einiger Himmelsaufnahmen nach rund 25jähriger Suche entdeckt, allerdings nicht an genau der Position, die man vorausgesagt hatte. Der junge Entdecker Clyde Tombaugh war erst kurz zuvor für die fotografische Suche nach dem legendären Transneptun angestellt worden. Der Marsforscher Percival Lowell hatte seit 1905 selbst nach einem solchen Himmelskörper gesucht und das Lowell-Observatorium auf einem Berg bei Flagstaff finanziert.

Die Entdeckung wurde der äußerst interessierten Öffentlichkeit am 13. März 1930 verkündet, dem 149. Jahrestag der Entdeckung des Uranus durch William Herschel 1781 und dem 75. Geburtstag von Percival Lowell.

Nun suchte man nach einem passenden Namen. Die Bezeichnung »Pluto« wurde von Venetia Burney, einem 11-jährigen Mädchen aus Oxford, vorgeschlagen; davor schon einmal 1919 von dem französischen Astronomen Reynaud. Bei der Namenswahl dürfte eine Rolle gespielt haben, dass sich das astronomische Symbol aus den Initialen Lowells zusammensetzen ließ, nachdem zuvor von seiner Witwe (er war 1916 gestorben) schon *Percival*, *Lowell* und sogar *Constance* (ihr eigener Name) vorgeschlagen worden war.

Aus der beobachteten scheinbaren Helligkeit Plutos (15 mag) und einer plausiblen Annahme für seine Albedo, dem Rückstrahlungsvermögen, schloss man, dass der neue Himmelskörper etwa Erdgröße habe. Andererseits war es zunächst auch in großen Fernrohren unmöglich, seinen Durchmesser direkt mikrometrisch zu messen. Daher tauchten bald Zweifel auf, ob seine Gravitationswirkung für die Bahnstörungen verantwortlich sein könne.

Also wurden die Nachforschungen nach dem störenden »Planet X« schon bald fortgesetzt – als Suche nach einem »Transpluto« – unter anderem von Clyde Tombaugh selbst. Mit der Entwicklung leistungsstarker Teleskope mussten Durchmesser und Masse des Pluto kontinuierlich nach unten revidiert werden, zunächst um 1950 nach Messungen der Sternwarte Mount Palomar auf halbe Erdgröße. Bald scherzte man, dass Pluto bei

Extrapolation der Messwerte wohl bald völlig verschwinden werde. Unkonventionelle Theorien wurden postuliert: Pluto sei in Wirklichkeit groß, man sehe aber nur einen kleinen, hellen Fleck auf der Oberfläche. Der Astronom Fred Whipple errechnete erstmals eine genaue Umlaufbahn. Dazu konnten Fotoplatten herangezogen werden, auf denen sich Pluto bis in das Jahr 1908 zurückverfolgen ließ. Die Entdeckung des Charon im Jahr 1978 ermöglichte dann eine genaue Massebestimmung mittels der Gravitationsdynamik des Systems. Von 1985 bis 1990 kam es zu wechselseitigen Bedeckungen zwischen den beiden, mit denen der Durchmesser von Pluto schließlich zu 2.390 km bestimmt werden konnte.

Durch seine Helligkeit wurde Pluto um über 60 Jahre früher entdeckt als andere, sehr dunkle Transneptune. Über die seinerzeit festgestellten Bahnabweichungen von Neptun und Uranus wird mittlerweile vermutet, dass sie nur durch kleine, unvermeidliche Messfehler vorgetäuscht wurden.

Ist Pluto wirklich ein Planet?

Seit im September 1992 die Entdeckung hunderter kleiner, transneptunischer Objekte jenseits der Plutobahn einsetzte, wurde der Status des Pluto neu bewertet. Heute gilt er als Teil des Kuipergürtels, und manche Astronomen erwarten, dort bald ähnlich große (aber dunklere) Objekte zu entdecken. Diese Neubewertung hat zu der Debatte geführt, ob man Pluto noch mit Recht einen Planeten nennen könne.

Der neuere Vorschlag einer Definition, nach der ein Planet ein Körper ist, dessen Masse die Gesamtmasse aller anderen Körper in seinem Bahnbereich übertrifft, lässt Pluto zu einem Planetoiden, also zu einem Kleinplaneten beziehungsweise Asteroiden werden. Zumindest als das größte Objekt der Plutinos entspricht er dann eher der Rolle des Asteroiden Hilda, dem größten Mitglied der Hilda-Gruppe. Hilda und mindestens 56 weitere Objekte bewegen sich ein Stück außerhalb des Hauptgürtels der Asteroiden zwischen Mars und Jupiter analog in einem 2:3-Verhältnis zur in diesem Fall längeren Umlaufzeit des benachbarten Riesenplaneten.

Fast interessanter erscheint uns heute die Frage, welchen Einfluss die Objekte des neu entdeckten Kuipergürtels auf unser Verständnis zu Entwicklung und Dynamik des Sonnensystems haben. Es gilt inzwischen als sicher, dass aus diesen fernen, eisigen Regionen viele der in das innere Sonnensystem vordringenden Kometen stammen. Sie dürften Restmaterial aus der Geburtsphase des Sonnensystems vor etwa 4½ Milliarden Jahren

sein. Der eisreiche Kleinkörpergürtel wurde vor seiner Entdeckung von Kenneth Edgeworth (1949) und Gerard Kuiper (1951) eigens postuliert, um die Herkunft der kurzperiodischen Kometen erklären zu können.

In den letzten Jahren wurden mehrere transplutonische Objekte wie →Sedna, →Quaoar, →Orcus und →2003 UB₃₁₃ entdeckt, die von den Medien häufig als »zehnter Planet« bezeichnet wurden. Keines dieser Objekte wurde jedoch bisher offiziell als Planet anerkannt, obgleich 2003 UB₃₁₃ sogar größer als Pluto ist.

Bei den laufenden Debatten in der Fachastronomie wird sich ergeben, wie viele Planeten es im Sonnensystem gibt, da dies auch eine Definitionsfrage ist. Auch die stark exzentrische Umlaufbahn Plutos und der transplutonischen Objekte spielt eine Rolle, weil sie sich von den anderen Planeten erheblich unterscheidet. Geht man von diesem Merkmal aus, könnte Pluto seinen Status verlieren. Es erscheint aber aus konventionellen Gründen als sehr wahrscheinlich, dass die Anzahl der Planeten des Sonnensystems weder herab- noch heraufgesetzt wird; eher wird es wohl bei der kulturellen Einbürgerung von Pluto als dem neunten und äußersten Planeten bleiben.

Forschungsmission zum Pluto

Die NASA plante bereits seit Anfang der 1990er Jahre unter dem Namen *Pluto Kuiper Express* beziehungsweise vormals *Pluto Fast Flyby* eine Mission zum Pluto. Diese sollte unter Leitung des Southwest Research Institute durchgeführt werden. Dabei wurde betont, dass eine Mission möglichst schnell starten sollte, um den Pluto zu erreichen, bevor

seine dünne Atmosphäre ausfriert. Dies hängt damit zusammen, dass die Umlaufbahn des Pluto stark elliptisch ist und der Planet 1989 seinen nächsten Sonnenpunkt erreicht hat und sich nun von der Sonne entfernt. Erst im Jahr 2247 wird Pluto seinen nächsten Sonnenpunkt wieder erreichen.

Doch die ersten Konzepte der Mission scheiterten an technischen Schwierigkeiten und Finanzierungsmangel und wurden 2001 durch die Mission New Horizons ersetzt, die nach einiger Verzögerung am 19. Januar 2006 erfolgreich startete. Die geplante Flugdauer beträgt etwa zehn Jahre, der Vorbeiflug an Pluto und Charon soll frühestens im Juli 2015 statt-

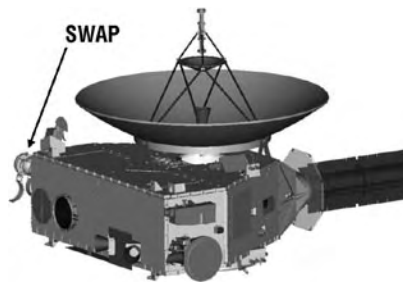


Abb. 100: Die Pluto-Sonde New Horizons

finden. Es sollen globale Karten des Planeten und seines Mondes erstellt, Hochauflösungsfotos mit bis zu 25 m pro Pixel Auflösung gewonnen, die Temperaturverteilung gemessen und die Atmosphäre des Pluto studiert werden. Geplant ist dabei, die Sonde in 9.600 km Entfernung an Pluto und in 27.000 km Entfernung an Charon vorbeifliegen zu lassen.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Pluto_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Pluto_(Planet)). Historie: 2.8.02: Angelegt von Wst, danach bearbeitet von den Hauptautoren Lotse, Schewek, S, Geof, Wst, FPM, Bricktop1, Zwobot, Fidi, Flups, Nephelin, Phrood, Arnomane, Leipnizkeks, Mundartpoet, Herbye, BWBot, Pkn, RKraasch, Ulrich.fuchs, ArtMechanic, Man-u, Fedi, Taprogge, EUBürger, Stefan h, Mps, Crux, Batrox, Gauss, AkaBot, Carbidfischer, CuttyP, Alkuin, Abu el mot, Lothar Kimmeringer, Marti7D3, Mikue, Stern, Szs, Langed, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Charon

Charon ist der einzige bekannte Mond des Planeten →Pluto.

Entdeckung

Entdeckt wurde der Mond am 22. Juni 1978 von dem Astronomen James W. Christy bei der Auswertung von fotografischen Platten, die Monate zuvor angefertigt worden waren. Christy stellte fest, dass Pluto auf den Fotografien periodisch eine leichte Ausbeulung aufwies. Dieses Phänomen, das auf einen Mond des Pluto hinwies, konnte später noch auf fotografischen Platten nachgewiesen werden, die bereits am 29. April 1965 belichtet worden waren.



Abb. 101: Pluto und Charon

Der Himmelskörper erhielt zunächst die vorläufige Bezeichnung *1978 P 1*.

Christy schlug den Namen Charon, nach dem Fährmann aus der griechischen Mythologie, vor. 1985 wurde der Name von der Internationalen Astronomischen Union (IAU) akzeptiert. Charons Entdeckung erlaubte den Astronomen, Plutos Masse und Größe genauer zu bestimmen.

Bahndaten

Charon umkreist Pluto in einem mittleren Abstand von nur 19.405 km in 6 Tagen 9 Stunden und 18 Minuten auf einer fast kreisrunden Bahn. Dabei ist die Bahn mit 99,089° sehr stark gegenüber der Äquatorebene des Pluto geneigt.

Aufbau und physikalische Daten

Charon ist mit einem Durchmesser von 1.172 km etwa halb so groß wie Pluto. Aufgrund des relativ geringen Größenunterschiedes werden Pluto und Charon auch als Doppelplanetensystem bezeichnet. Zu bemerken ist, dass der gemeinsame Schwerpunkt von Pluto und Charon außerhalb der Oberfläche von Pluto liegt. Charons Masse beträgt etwa 1/7 der von Pluto, seine Dichte wurde zu 2,24 g/cm³ bestimmt.

Er besitzt eine sehr helle Oberfläche mit einer Albedo von 0,37, das heißt, 37 % des einfallenden Sonnenlichts werden reflektiert. Anders als Plutos Oberfläche, die von gefrorenem Stickstoff überzogen ist, scheint Charons Oberfläche aus Wassereis zu bestehen. Charon rotiert in 6 Tagen 9 Stunden und 18 Minuten um die eigene Achse. In derselben Zeit umläuft er Pluto. Er weist damit, wie der Erdmond, eine gebundene Rotation auf. Plutos und Charons Rotationszeiten wurden durch Gezeitenkräfte synchronisiert. Beide weisen einander immer die gleiche Seite zu.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Charon_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Charon_(Mond)). Historie: 1.8.03: Angelegt von 3247, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, 3247, VanHelsing, Zwobot, Arnomane, Klingon, Leipnizkeks, BWBot, Turing, Kingruedi, Mhlusi, Phrood, Mathias Schindler, John Doe, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Hypothetische Planeten

Vulkan

Vulkan (oder Vulcanus) ist der Name eines hypothetischen →Planeten, der die Sonne noch innerhalb der →Merkurbahn umkreisen soll.

Die Hypothese für die Existenz von Vulkan

Im 19. Jahrhundert stellte man bei Bahnbeobachtungen des Merkur fest, dass seine tatsächliche Bahn von der nach der klassischen Himmelsmechanik vorhergesagten abweicht. Während jedes Bahnumlaufs vergrößert sich das Perihel des Merkur (Periheldrehung). Diese Abweichung beträgt etwa 42 Bogensekunden pro Jahrhundert. Auch wenn dieser Betrag sehr klein ist, bleibt das Ergebnis unvereinbar mit den Newtonschen und den Keplerschen Gesetzen. Erst mit der Allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein ist dieser Effekt der Periheldrehung vollständig erklärbar.

Die Existenz eines intramerkuriellen Himmelskörpers wurde 1859 von dem französischen Mathematiker und Astronom Urbain Le Verrier postuliert, um diese Abweichung zu erklären. 1854 hatte Leverrier bereits die Bahn des damals noch unentdeckten Planeten →Neptun durch Beobachtungen der Bahnstörungen des →Uranus berechnet. Zwei Jahre später entdeckte Johann Gottfried Galle den Planeten nur ein Grad von der vorhergesagten Position. Vor diesem Hintergrund erschien die Existenz von Vulkan plausibel, und zahlreiche Astronomen in aller Welt versuchten ihn zu finden.

Die Suche nach Vulkan

Beobachtungen eines Objekts innerhalb der Merkurbahn sind sehr schwierig, da das Teleskop auf einen Punkt gerichtet werden muss, der sehr dicht an der Sonne liegt, wo der Himmel niemals schwarz ist. Zudem kann ein Fehler in der Ausrichtung des Teleskops die Optik beschädigen und beim Beobachter schwere, irreversible Augenschäden verursachen. Die extreme Helligkeit kann außerdem Lichtreflexe in der Optik hervorrufen, die den Beobachter verwirren und ihn Objekte sehen lassen, die gar nicht existieren.

Über ein halbes Jahrhundert versuchten Astronomen den hypothetischen Planeten Vulkan aufzuspüren – vor allem während Sonnenfinster-

nissen. Dabei gab es zahlreiche falsche Alarmer und Verwechslungen, oder optisch sonnennahe Sterne wurden für Planeten gehalten. So erging es unter anderem dem Asteroidenforscher J.C. Watson.

Als Leverrier 1877 starb, war er immer noch davon überzeugt, Vulkan gefunden zu haben. Mit seinem Tod ging die Suche nach der Planetenfiktion stark zurück, da die meisten Astronomen dessen Existenz nach Jahren ergebnisloser Suche inzwischen anzweifeln. Der 123fache \blacktriangleright Asteroiden-Entdecker Johann Palisa versuchte es nochmals bei einer Tahiti-Expedition 1883.

Als schließlich Albert Einstein 1916 seine Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte, konnte die im Newtonschen Gravitationsgesetz unverständliche Bahndrehung des Merkur mit der theoretischen Wirkung der nahen Sonne auf die Raumstruktur fast genau erklärt werden. Seitdem ist die Vulkan-Hypothese zwar überflüssig, doch manche Forscher postulieren nun einen dünnen Vulkanoiden-Gürtel.

Eine frühere Erklärung für die Anomalien der Merkurbahn war eine Abplattung der Sonne, die aber nicht im »erforderlichen« Maße nachzuweisen war.

Vulkantransit

Vulkantransit bezeichnet die vor allem im 18. und 19. Jahrhundert immer wieder gemachte Beobachtung des Durchgangs eines unbekanntes Objektes vor der Sonnenscheibe. Es konnte nie geklärt werden, was die Beobachter im 18. und 19. Jahrhundert vor der Sonnenscheibe vorbeiziehen sahen. Zwar dürfte es sich in einigen Fällen um Fehler in der Optik gehandelt haben, doch ist zumindest ein Fall aus dem 18. Jahrhundert bekannt, an dem zwei Beobachter an verschiedenen Orten den Vorbeizug eines unbekanntes Objektes vor der Sonne notierten. Hierbei könnte es sich um einen \blacktriangleright Asteroiden gehandelt haben. Allerdings ist bis heute noch kein weiterer Transit eines Asteroiden vor der Sonne registriert worden.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Vulkan_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Vulkan_(Planet)) (gekürzt). Historie: 5.9.03: Angelegt von Andro96, danach bearbeitet von den Hauptautoren Flups, Elya, ThorstenS, Geof, Schewek, Studbeefpile, Arnomane, Andro96, Nephelin, Srbauer, RKraasch, WHell, RokerHRO, Zico, Head, Siggibeyer, Franz Xaver, HAL Neuntausend, Botteler, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Gegenerde

Die Gegenerde ist ein nichtexistierender, erdähnlicher \blacktriangleright Planet, der dieselbe Umlaufbahn um die Sonne wie die \blacktriangleright Erde hat, sich jedoch auf der gegenüberliegenden Seite der Erde im Lagrange-Punkt hinter der Sonne befindet. Sie wurde von der antiken griechischen Philosophenschule der Pythagoreer postuliert, welche die Gegenerde *Antichthone* nannten. In der modernen Science-Fiction-Literatur kommt die Gegenerde ebenfalls häufiger vor.

Die Pythagoreer glaubten, dass es zehn Planeten gebe, die um ein Zentralfeuer – die Sonne – tanzten. Um die Tatsache zu erklären, dass sie nur neun Himmelskörper im Sonnensystem (einschließlich der Sonne, des \blacktriangleright Mondes und der Erde) zählen konnten (\blacktriangleright Merkur wurde zweimal gezählt; er hatte bei den Griechen der Antike zwei Namen: Apollo, wenn er am Morgenhimmel sichtbar war, und Hermes, wenn er am Abendhimmel sichtbar war), erfanden sie die Antichthone, eine unsichtbare Gegenerde.

Existierte ein solcher Planet tatsächlich, so wäre er stets hinter der Sonne verborgen. Er wäre jedoch trotzdem von der Erde aus auf Grund seines Gravitationseinflusses auf die anderen Planeten des Sonnensystems feststellbar. Es würde kein solcher Einfluss festgestellt und Raumsonden zu den Planeten \blacktriangleright Venus, \blacktriangleright Mars und anderen Orten wären nicht an ihrem Ziel angekommen, wenn eine Gegenerde existierte, da ein solcher Einfluss nicht in die Berechnung der Flugbahn mit einbezogen wurde. Hinzu kommt, dass die Umlaufgeschwindigkeit der Erde aufgrund ihres elliptischen Orbits geringfügig variiert. Eine Gegenerde müsste sich also sehr präzise in einer bestimmten Umlaufbahn befinden, um ständig hinter der Sonne zu bleiben.

Die Umlaufbahn einer Gegenerde wäre zudem in einer geologisch relativ kurzen Zeitspanne instabil und würde aus der exakten Gegenposition zur Erde wegwandern. Dies würde dazu führen, dass die beiden Planeten entweder zusammenstoßen oder sehr nahe aneinander vorbeifliegen, was dazu führen würde, dass beide Planeten aus ihrem bisherigen Orbit geworfen würden. Eine Gegenerde kann sich auch nicht in den stabilen Lagrange-Punkten L_4 beziehungsweise L_5 befinden, welche in der Bahn der Erde 60° vor beziehungsweise 60° hinter der Erde liegen, da in diesen Lagrange-Punkten nur Körper mit im Verhältnis zu den anderen beiden großen Körpern verschwindend kleiner Masse positioniert werden können.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Gegenerde>. Historie: 13.9.04: Angelegt von Arnomane, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Hypnotoad, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Phaeton

Phaeton (griech., »der Strahlende«) ist ein hypothetischer Planet, der eine Umlaufbahn zwischen Mars und Jupiter haben sollte. Der Name des hypothetischen Planeten ist der griechischen Mythologie entlehnt: Phaeton ist zum einen der Beiname des Sonnengottes Helios und zum anderen der Name seines Sohnes.

Als Johann Daniel Titius 1766 die Titius-Bodesche Reihe, eine empirische Formel, die die Bahnradien der Planeten (bis auf Neptun) näherungsweise beschreibt, aufstellte, fand er, dass diese Reihe nur dann die Abstände ab Jupiter beschreiben konnte, wenn man zusätzlich noch einen Planeten zwischen Mars und Jupiter einschob.

Man fing deshalb in den Folgejahren an, nach diesem vermuteten Planeten systematisch zu suchen; 1801 fand schließlich Giuseppe Piazzi an der vermuteten Position den Asteroiden Ceres. Rasch wurden weitere Asteroiden zwischen Mars und Jupiter im (heute so bezeichneten) Asteroidengürtel gefunden.

Die ursprüngliche Annahme, dass es sich bei den Asteroiden um Bruchstücke des vermuteten ursprünglichen Planeten Phaeton handelt, stellte sich jedoch als sehr unwahrscheinlich heraus, da zum einen die Gesamtmasse aller Asteroiden des Asteroidengürtels kleiner als die des Erdmonds ist und zum anderen aufgrund der starken Gravitationsstörungen durch Jupiter sich wohl an dieser Stelle aus den Planetesimalen niemals ein Planet bilden konnte. Heute geht man deshalb davon aus, dass es niemals einen Planeten zwischen Mars und Jupiter gab.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Phaeton_\(Planet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Phaeton_(Planet)). Historie: 20.9.05: Angelegt von Arnomane, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Transpluto

Der Transpluto oder Planet X ist ein schon lange postulierter, hypothetischer zehnter Planet unseres Sonnensystems.

Vorgeschichte

Nachdem Neptun durch eine genaue Bahnanalyse des Uranus erfolgreich vorhergesagt wurde, postulierte Percival Lowell einen neunten Planeten, um Bahnabweichungen des Uranus und Neptun zu erklären. Der

durch das von ihm gegründete Lowell-Observatorium mit der Suche beauftragte Clyde Tombaugh fand 1930 beim intensiven Durchsuchen eines enger begrenzten Himmelsausschnittes eher durch Zufall Pluto.

Suche nach Transpluto

Schnell stellte sich heraus, dass Pluto zu klein ist, um die Bahn des Neptun merklich zu stören und dessen Bahnabweichungen zu erklären. So begann im Jahr 1930 am Lowell-Observatorium schon bald die Suche nach dem Transpluto jenseits der Umlaufbahn des Pluto.

Diese Suche durchzog das ganze 20. Jahrhundert, führte aber zu keinem wirklichen Ergebnis. Die der Suche zugrunde liegenden Bahnabweichungen des Neptun sind heute nicht mehr nachzuvollziehen, es ergab sich, dass es sich um die Auswirkungen kleiner, unvermeidlicher Messfehler gehandelt hatte.

Entdeckung kleinerer Objekte

Im März 2004 wurde das Thema »Zehnter Planet« für die Medien wieder aktuell, als die Entdeckung des etwa 1.600 km großen Sedna in doppelter Pluto-Entfernung gemeldet wurde, der aber von der Fachwelt nicht als Planet eingestuft wurde. Des Weiteren wurde am 29. Juli 2005 die Entdeckung von 2003 UB₃₁₃ bekannt gegeben, der von der NASA und der Presse zur Zeit der Entdeckung als »zehnter Planet« eingestuft wurde – allerdings wird dieser Status nicht von der IAU anerkannt.

Für die Astronomen zählen solche Himmelskörper allerdings zu jenen sonnenfernen Asteroiden wie den Plutinos, deren Umlaufbahnen sich im Kuipergürtel beziehungsweise jenseits desselben befinden. Auch Pluto selbst wird heute von den meisten Fachleuten nicht mehr als Planet angesehen, da er mit 2.400 km kleiner als viele Monde und außerdem an die Neptunbahn gekoppelt ist.

Zwar wurden in diesen Fernen seit 1992 zahlreiche große Körper entdeckt, aber keine über 1.500 km Durchmesser (mit Ausnahme von 2003 UB₃₁₃). Außerdem haben diese Objekte jenseits der Plutobahn kein festes Gestein, sondern setzen sich aus sehr dunklem Lockergestein zusammen. Sie sind den Asteroiden oder Kometen zuzuordnen (Kuipergürtel, Transneptune usw.). Die Existenz eines zehnten Planeten gilt daher als unwahrscheinlich.

Trotzdem wird – auch unter der Bezeichnung Planet X – immer wieder über die Existenz eines solchen zehnten Planeten spekuliert. Ein Grund dafür ist der offenbar unbegrenzte Vorrat an Kometen aus den Zonen

von Kuipergürtel und Oortsche Wolke. Ein weiter außen kreisender Planet könnte mit seiner Schwerkraft dafür sorgen, dass Materie aus der Oortschen Wolke in das Innere des Sonnensystems gelangt.

Bedingungen für einen zehnten Planeten

Nach heutigem Wissen kann es durchaus einen zehnten Planeten geben, aber man kann einige Bedingungen angeben. Seine Entfernung zur Sonne muss groß genug beziehungsweise er muss klein genug sein, damit er:

- keine merklichen Bahnstörungen der bekannten Planeten und Raumsonden im äußeren Sonnensystem verursacht,
- den vollständigen Himmelsdurchmusterungen für sich bewegende Objekte entgangen ist, die bis heute durchgeführt wurden.

Diese Bedingungen führen für einen Planeten von mindestens Erdgröße zu einem Abstand von mindestens 100 AE zur Sonne, dem 2,5fachen Abstand des Pluto. Die Größe eines solchen Transpluto müsste an jene von Neptun heranreichen und seine Bahn stark elliptisch sein.

Falls er existiert, könnte er in den nächsten Jahrzehnten durch Bahnstörungen von Raumsonden nachgewiesen werden. Optische Suchprogramme bis etwa 50 AE wurden in letzter Zeit durchgeführt, stoßen aber durch die dort meist extrem dunklen, kohleartigen Körper an die Grenzen der terrestrischen und der Weltraumteleskope.

Selbst ein Brauner Zwerg oder ein schwacher Stern (»Nemesis«), der unsere Sonne zum Mitglied eines Doppelsternsystems machen würde, ist auch heute noch durchaus möglich. Sämtliche bisher entdeckten Objekte jenseits der Pluto-Umlaufbahn sind aufgrund ihrer Größe und Zusammensetzung den Asteroiden oder Kometen zuzuordnen (Kuipergürtel, Transneptunische Objekte). Von vielen wird auch die Frage aufgeworfen, ob Pluto überhaupt als Planet bezeichnet werden sollte oder ob er nur das größte bekannte Mitglied der Plutino-Familie ist.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Transpluto>. Historie: 17.8.02: Angelegt von Flups, danach bearbeitet von den Hauptautoren Geof, Hansele, Nephelin, Srbauer, Flups, Maxmax, Arnomane, Phrood, Sig11, Peter Kramer, Ai, Ra'ike, Schewek, APPER, Zwobot, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Asteroiden und Kometen

Asteroid

Als Asteroiden bezeichnet man kleine planetenähnliche Objekte, die sich in Keplerschen Umlaufbahnen um die Sonne bewegen.

In der Terminologie der Astronomen wird ein Asteroid (sternähnliches Objekt) häufig als Kleinplanet oder Planetoid (planetenähnliches Objekt) bezeichnet.

Bislang sind etwa 220.000 Asteroiden bekannt, wobei die tatsächliche Anzahl wohl in die Millionen gehen dürfte. Nur die wenigsten haben allerdings mehr als 100 km Durchmesser. Bis vor einigen Jahren war Ceres der größte bekannte Planetoid. Diesen Rang musste er inzwischen abgeben. Im Kuipergürtel wurden Objekte wie Quaoar (vorherige vorläufige Bezeichnung 2002 LM₆₀) mit 1.250 km Durchmesser, Orcus (2004 DW) mit einem Durchmesser von 1.600–1.800 km und 2003 UB₃₁₃ mit 2.500–3.200 km Durchmesser gefunden. Jenseits des Kuipergürtel wurde Ende 2003 der ~1.700 km große Asteroid Sedna (2003 VB₁₂) entdeckt.

Weitere große Asteroiden sind Pallas, Vesta, Juno, Hebe, Iris, Hygeia, Parthenope, Eunomia, Arethusa und Astraea.

Die Geschichte der Asteroidenforschung

Bereits im Jahre 1760 entwickelte der deutsche Gelehrte Johann Daniel Titius eine einfache mathematische Formel (Titius-Bode-Reihe), nach der die Abstände der Planeten zu einander ins Verhältnis gesetzt werden. Die Reihe enthält jedoch eine Lücke, da zwischen Mars und Jupiter, im Abstand von 2,8 AE, ein Planet fehlt. Ende des 18. Jahrhunderts setzte eine regelrechte Jagd auf den unentdeckten Planeten ein. Das erste internationale Forschungsvorhaben wurde ins Leben gerufen, organisiert von Baron Franz Xaver von Zach, der seinerzeit an der Sternwarte Gotha tätig war. Der Himmel wurde in 24 Sektoren eingeteilt, die von Astronomen in ganz Europa systematisch abgesucht wurden. Für den Planeten hatte man bereits den Namen »Phaeton« reservieren lassen. Fündig wurde man allerdings nicht.

In der Neujahrsnacht des Jahres 1801 entdeckte der Astronom und Theologe Giuseppe Piazzi im Teleskop der Sternwarte von Palermo (Sizilien) bei der Durchmusterung des Sternbildes Stier einen schwachen Stern, der

in keiner Sternkarte verzeichnet war. Piazzi hatte von dem Forschungs- vorhaben gehört und beobachtete den Stern in den folgenden Nächten, da er vermutete, den gesuchten Planeten gefunden zu haben. Er sandte seine Beobachtungsergebnisse an Zach, wobei er das Objekt zunächst als neuen Kometen bezeichnete. Piazzi erkrankte und konnte seine Beobachtungen nicht fortsetzen. Bis zur Veröffentlichung von Piazzi's Beobachtungen verging viel Zeit. Der Himmelskörper war weiter in Richtung Sonne gewandert und konnte zunächst nicht wieder gefunden werden.

Der Mathematiker Gauß hatte allerdings ein numerisches Verfahren entwickelt, die es erlaubte, die Bahnen von Planeten oder Kometen anhand nur weniger Positionen zu bestimmen. Nachdem Gauss die Veröffentlichungen Piazzi's gelesen hatte, berechnete er die Bahn des Himmelskörpers und sandte das Ergebnis nach Gotha. Heinrich Wilhelm Olbers entdeckte das



Abb. 102: Asteroid Ida mit Mond Dactyl

Objekt daraufhin am 31. Dezember 1801 wieder, dass schließlich den Namen Ceres erhielt. Im Jahre 1802 entdeckte Olbers einen weiteren Himmelskörper, den er Pallas nannte. 1803 wurde Juno, 1807 Vesta entdeckt. Bis zur Entdeckung des fünften Asteroiden, Astraea im Jahre 1847, vergingen fast 40 Jahre. Es folgten allerdings rasch weitere Entdeckungen, wie die Düsseldorfer Planetoiden, so dass im Jahre 1890 etwa 300 Asteroiden bekannt waren.

Nach 1890 brachte die Einführung der Fotografie in die Astronomie wesentliche Fortschritte. Die Asteroiden, die bis dahin mühsam durch den Vergleich von Teleskopbeobachtungen mit Himmelskarten gefunden wurden, verrieten sich nun durch Lichtspuren auf den fotografischen Platten. Durch die im Vergleich zum menschlichen Auge höhere Lichtempfindlichkeit der fotografischen Emulsionen konnten äußerst lichtschwache Objekte nachgewiesen werden. Durch den Einsatz der neuen Technik stieg die Zahl der entdeckten Asteroiden entsprechend rasch an. Die Einführung der CCD-Kameratechnik um 1990 und die Möglichkeiten der computerunterstützten Auswertung der elektronischen Aufnahmen bedeutete einen weiteren wesentlichen Fortschritt. Bislang sind etwa 220.000 Asteroiden katalogisiert worden.

Ist die Bahn eines Asteroiden bestimmt worden, kann die Größe des Himmelskörpers aus der Untersuchung seiner Helligkeit und des Rück-

strahlvermögens, der Albedo, ermittelt werden. Dazu werden Messungen im optisch sichtbaren Licht sowie im Infrarotbereich durchgeführt. Diese Methode ist mit Unsicherheiten verbunden, da die Oberflächen der Asteroiden chemisch unterschiedlich aufgebaut sind und das Licht unterschiedlich stark reflektieren.

Genauere Ergebnisse können mittels Radarbeobachtungen erzielt werden. Dazu können Radioteleskope verwendet werden, die, als Sender umfunktioniert, starke Radiowellen in Richtung der Asteroiden aussenden. Durch die Messung der Laufzeit der von den Asteroiden reflektierten Wellen kann deren exakte Entfernung bestimmt werden. Die weitere Auswertung der Radiowellen liefert Daten zu Form und Größe. Regelrechte »Radarbilder« lieferte beispielsweise die Beobachtung der Asteroiden Castalia und Toutatis.

Eine Reihe von Asteroiden konnte mittels Raumsonden näher untersucht werden:

- Die Raumsonde Galileo flog auf ihrem Weg zum Planeten Jupiter im Jahre 1991 am Asteroiden Gaspra und 1993 an Ida vorbei.
- Die Sonde NEAR-Shoemaker flog 1997 an dem Asteroiden Mathilde vorbei und landete 2001 auf Eros.
- Die Sonde Deep Space 1 passierte 1999 den Asteroiden Braille in 26 km Abstand.
- Die Sonde Stardust zog 2002 in 3.300 km Entfernung am Asteroiden Anfrank vorbei.

Die Entstehung der Asteroiden

Zunächst gingen die Astronomen davon aus, dass die Asteroiden das Ergebnis einer kosmischen Katastrophe seien, bei der ein Planet zwischen Mars und Jupiter auseinanderbrach und Bruchstücke auf seiner Bahn hinterließ. Es zeigte sich jedoch, dass die Gesamtmasse der im Hauptgürtel vorhandenen Asteroiden sehr viel geringer ist als die des Erdmondes. Daher nimmt man heute an, dass die Asteroiden eine Restpopulation von Planetesimalen aus der Entstehungsphase des Sonnensystems darstellen. Die Gravitation von Jupiter, dessen Masse am schnellsten zunahm, verhinderte die Bildung eines größeren Planeten aus dem Asteroidenmaterial. Die Planetesimale wurden auf ihren Bahnen gestört, kollidierten immer wieder heftig miteinander und zerbrachen. Ein Teil wurde auf Bahnen abgelenkt, die sie auf Kollisionskurs mit den Planeten brachten. Hiervon zeugen noch die Impaktkrater auf den Planetenmonden und den inneren Planeten. Die größten Asteroiden wurden nach ihrer Entstehung

stark erwärmt (hauptsächlich durch den radioaktiven Zerfall des Aluminium-Isotops ^{26}Al und möglicherweise auch des Eisenisotops ^{60}Fe) und im Innern aufgeschmolzen. Schwere Elemente, wie Nickel und Eisen setzten sich infolge der Schwerkraftwirkung im Inneren ab, die leichteren Verbindungen, wie die Silikate, verblieben in den Außenbereichen. Dies führte zur Bildung von differenzierten Körpern mit metallischem Kern und silikatischem Mantel. Ein Teil der differenzierten Asteroiden zerbrach bei weiteren Kollisionen, wobei Bruchstücke, die in den Anziehungsbereich der Erde geraten, als \rightarrow Meteoriten niedergehen.

Die Zusammensetzung der Asteroiden

Die spektroskopische Untersuchung der Asteroiden zeigte, dass deren Oberflächen chemisch unterschiedlich zusammengesetzt sind. Analog erfolgte eine Einteilung in verschiedene spektrale oder taxonomische Klassen:

- C-Asteroiden: Dies ist mit einem Anteil von 75 % der häufigste Asteroidentyp. C-Asteroiden weisen eine kohlen- oder kohlenstoffartige (das C steht für Kohlenstoff), dunkle Oberfläche mit einer Albedo um 0,05 auf. Es wird vermutet, dass die C-Asteroiden aus dem gleichen Material bestehen wie die kohligen Chondriten, einer Gruppe von Steinmeteoriten. Die C-Asteroiden bewegen sich im äußeren Bereich des Hauptgürtels.
- S-Asteroiden: Der mit einem Anteil von 17 % zweithäufigste Typ (das S steht für Silikat) kommt hauptsächlich im inneren Bereich des Hauptgürtels vor. S-Asteroiden besitzen eine hellere Oberfläche mit einer Albedo von 0,15 bis 0,25. Von ihrer Zusammensetzung her ähneln sie den gewöhnlichen Chondriten, einer Gruppe von Steinmeteoriten, die überwiegend aus Silikaten zusammengesetzt sind.
- M-Asteroiden: Der überwiegende Rest der Asteroiden wird diesem Typ zugerechnet. Bei den M-Meteoriten (das M steht für metallisch) dürfte es sich um die metallreichen Kerne differenzierter Asteroiden handeln, die bei der Kollision mit anderen Himmelskörpern zertrümmert wurden. Sie besitzen eine ähnliche Albedo wie die S-Asteroiden. Ihre Zusammensetzung dürfte der von Nickel-Eisen-Meteoriten gleichen.
- E-Asteroiden: Die Oberflächen dieses seltenen Typs von Asteroiden bestehen aus dem Mineral Enstatit. Chemisch dürften sie den Enstatit-Chondriten, einer Gruppe von Steinmeteoriten, ähneln. E-Asteroiden besitzen eine hohe Albedo von 0,4 und mehr.
- V-Asteroiden: Dieser seltene Typ von Asteroiden (das V steht für \rightarrow Vesta) ist ähnlich zusammengesetzt wie die S-Asteroiden. Der einzige Un-

terschied ist der erhöhte Anteil an Pyroxen-Mineralen. Es wird angenommen, dass alle V-Asteroiden aus dem silikatischen Mantel von Vesta stammen und bei der Kollision mit einem anderen großen Asteroiden abgesprengt wurden. Darauf weist ein gewaltiger \rightarrow Impaktkrater auf Vesta hin. Die auf der Erde gefundenen HED-Achondrite, eine seltene Gruppe von Steinmeteoriten, könnten ebenfalls von Vesta stammen, da sie eine ähnliche chemische Zusammensetzung aufweisen.

- G-Asteroiden: Können als Untergruppe der C-Klasse angesehen werden, da sie ein ähnliches Spektrum aufweisen, jedoch im UV-Bereich unterschiedliche Absorptionslinien aufweisen.
- B-Asteroiden: Ähnlich zusammengesetzt wie die C- und G-Klasse. Abweichungen im UV-Bereich.
- F-Asteroiden: Ebenfalls eine Untergruppe der C-Klasse, jedoch mit Unterschieden im UV-Bereich. Außerdem fehlen Absorptionslinien im Wellenlängenbereich des Wassers.
- P-Asteroiden: Asteroiden dieses Typs besitzen eine sehr geringe Albedo und ein Spektrum im rötlichen Bereich. Sie sind wahrscheinlich aus Silikaten mit Kohlenstoffanteilen zusammengesetzt. P-Asteroiden halten sich im äußeren Bereich des Hauptgürtels auf.
- D-Asteroiden: Dieser Typ ist ähnlich zusammengesetzt wie die P-Asteroiden, mit einer geringen Albedo und einem rötlichen Spektrum.
- R-Asteroiden: Dieser Typ ist ähnlich aufgebaut wie die V-Asteroiden. Das Spektrum weist auf hohe Anteile an Olivin und Pyroxenen hin.
- A-Asteroiden: Das Spektrum der A-Asteroiden zeigt deutliche Olivinbande und weist auf einen völlig differenzierten Mantelbereich hin. A-Asteroiden halten sich im inneren Bereich des Hauptgürtels auf.
- T-Asteroiden: Dieser Asteroidentyp gehört ebenfalls zum inneren Bereich des Hauptgürtels. Er weist ein dunkles rötliches Spektrum auf, unterscheidet sich jedoch von den P- und R-Asteroiden.

In der Vergangenheit ging man davon aus, dass die Asteroiden monolithische Felsbrocken, also kompakte Gebilde sind. Die geringen Dichten sowie das Vorhandensein von riesigen Impaktkratern lassen jedoch den Schluss zu, dass die größeren Asteroiden locker aufgebaut sind und eher als lose »Schutthaufen«, die durch die Gravitation zusammengehalten werden, anzusehen sind. Locker aufgebaute Körper können die bei Kollisionen auftretenden Kräfte absorbieren, ohne zerstört zu werden. Kompakte Körper werden dagegen bei größeren \rightarrow Impakt ereignissen durch die Stoßwellen auseinander gerissen. Darüber hinaus weisen die großen

Asteroiden nur geringe Rotationsperioden auf. Eine schnelle Rotation um die eigene Achse würde dazu führen, dass die auftretenden Fliehkräfte die Körper auseinander reißen. Man geht davon aus, dass der überwiegende Teil der über 200 Meter großen Asteroiden derartige kosmische Schutthaufen darstellen.

Die Bahnen der Asteroiden

Asteroiden des Hauptgürtels – Etwa 90 % der bekannten Asteroiden bewegen sich innerhalb des Hauptgürtels um die Sonne, einem breiten Gebiet zwischen den Umlaufbahnen von ➔Mars und ➔Jupiter. Sie füllen damit die Lücke in der Titius-Bode-Reihe. Vertreter dieser Asteroiden sind ➔Ceres, ➔Pallas, ➔Juno und ➔Vesta.

Asteroiden innerhalb der Marsbahn – Asteroiden, deren Bahnen teilweise innerhalb der Marsbahn verlaufen, gliedert man in drei Gruppen:

- Amor-Typ: Dieser Asteroidentyp kreuzt die Marsbahn in Richtung Erde. Ein Vertreter ist der 1898 entdeckte ➔Eros (1898, der sich der Erdbahn bis 0,15 AE nähert). Nahe Vorbeigänge von Eros an der Erde dienten in den Jahren 1900 und 1931 zur genauen Vermessung des Sonnensystems. Der Amor-Asteroid Albert, 1911 von Johann Palisa entdeckt, ging später wieder verloren und konnte erst 2000 wiederentdeckt werden. Der Namensgeber der Gruppe, der 1932 entdeckte Amor, besitzt eine typische Bahn von 1,08 bis 2,76 AE.
- Apollo-Typ: Asteroiden dieses Typs bewegen sich zwischen der Mars- und Erdbahn, wobei einige ihrer Mitglieder sehr exzentrische Umlaufbahnen besitzen, die sie im Perihel-Durchgang ins Innere der ➔Venus-Umlaufbahn bringt (Apollo-Typ). Vertreter sind die 1918 von Max Wolf entdeckte Alinda, der 1932 von K. Reimuth entdeckte Apollo mit einer Bahn von 0,65 bis 2,29 AE und der 1937 entdeckte Hermes, der in nur 1½ facher Mondsdistanz an der Erde vorbeizog.
- Aten-Typ: Eine Gruppe von erdnahen Asteroiden, die sich typischerweise in einem Abstand von weniger als einer AE und somit innerhalb der Erdbahn um die Sonne bewegen. Benannt wurde sie nach dem 1976 entdeckten Aten. Aten-Asteroiden mit exzentrischen Bahnen können die Erdbahn von innen her kreuzen. Weitere Vertreter der Gruppe sind Ra-Shalom, Hathor und Cruithne.

Diese Gruppen werden zusammenfassend auch als ➔Erdbahnkreuzer (oder englisch Near-Earth Objects – kurz NEOs) bezeichnet, nach denen

wegen einer theoretischen Kollisionsgefahr mit der Erde seit einigen Jahren systematisch gesucht wird. Das erfolgreichste Suchprogramm ist *Lincoln Near Earth Asteroid Research* (LINEAR). Weitere Suchprogramme sind *Near Earth Asteroid Tracking* (NEAT) und *Lowell Observatory Near Earth Object Survey* (LONEOS).

Asteroiden, die sich auf Planetenbahnen bewegen – Asteroiden, die sich in den Lagrange-Punkten der Planeten befinden, nennt man ➔Trojaner. Zuerst entdeckte man diese Begleiter bei ➔Jupiter. Sie bewegen sich auf der Jupiterbahn vor beziehungsweise hinter dem Planeten. Jupiter-trojaner sind beispielsweise ➔Achilles und Aeneas. 1990 wurde der erste Marstrojaner entdeckt und Eureka getauft. In der Folgezeit wurden vier weitere Marstrojaner entdeckt.

Asteroiden zwischen Saturn und Uranus – Zwischen den Planeten ➔Saturn und ➔Uranus bewegt sich eine als ➔Zentauren bezeichnete Gruppe von Asteroiden auf exzentrischen Bahnen. Der erste entdeckte Vertreter war Chiron. Die Zentauren stammen vermutlich aus dem ➔Kuipergürtel und sind durch gravitative Störungen auf instabile Bahnen abgelenkt worden.

Transneptunische oder Kuipergürtel-Objekte – Im äußeren Sonnensystem, jenseits der ➔Neptunbahn, bewegen sich die Transneptunischen beziehungsweise ➔Kuipergürtel-Objekte (*Kuiper belt objects*, KBO). Hier wurden die bislang größten Asteroiden oder Planetoiden entdeckt. Vertreter sind ➔Quaoar, ➔Orcus, Varuna und ➔2003 UB₃₁₃.

Asteroiden innerhalb der Merkurbahn – Die Existenz einer weiteren Gruppe von Asteroiden, den ➔Vulkanoiden, konnte bislang nicht nachgewiesen werden. Diese Asteroiden sollen sich auf sonnennahen Bahnen innerhalb des ➔Merkur bewegen.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Asteroid> (gekürzt). Historie: 1.8.02: Angelegt von Pec-36-43.tnt2.f.uu.net.de, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Arnomane, ArtMechanic, Vesta, Rivi, Crux, Nephelin, Pec-36-43.tnt2.f.uu.net.de, Ebi, Ocrho, S, Epo, Zwobot, Wiegels, TOMM, Autan, Wst, AkaBot, Nobikles, Leipnizkeks, Jörg Knappen, BWBot, Schlurcher, Yarin Kaul, DaTroll, ECeDee, Mostpatiently, Attallah, JostJahn, Pikarl, Mundartpoet, Bsmuc64, Manfred Strumpf, Hinrich, Liquidat, AHoerstemeier, Flups, Srbauer, Achim Raschka, Pkn, FlaBot, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Benennung von Asteroiden und Kometen

Die Benennung von Asteroiden und Kometen läuft nach einem zweistufigen Verfahren ab. Unmittelbar nach ihrer Entdeckung erhalten sie zunächst einen so genannten *provisorischen Namen* aus Zahlen und Buchstaben, der im Wesentlichen das Entdeckungsdatum nach einem von der Internationalen Astronomischen Union (IAU) festgelegten Schema beinhaltet. Nachdem die genaue Umlaufbahn eines neuentdeckten Asteroiden bestimmt und durch unabhängige Beobachter bestätigt wurde, hat der Entdecker das Vorschlagsrecht für einen Namen dieses Objekts, welcher dann von der IAU unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien offiziell vergeben wird. Kometen werden hingegen heute immer nach ihren Entdeckern benannt.

Provisorischer Name

Das aktuelle Benennungsschema wurde aus älteren Systemen durch Erweiterung gebildet, so dass ältere Bezeichnungen mit neueren konsistent sind.

Zusammensetzung – Der provisorische Name eines neu entdeckten Asteroiden oder Kometen wird von der IAU anhand des Entdeckungsdatums aus folgenden Bestandteilen gebildet:

- das Beobachtungsjahr
- ein Leerzeichen
- Ein Buchstabe bezeichnet den Halbmonat der Entdeckung. Vom 1. Januar bis zum 15. Januar wird der Buchstabe *A* benutzt, ab dem 16. Januar bis Ende Januar *B* usw. bis schließlich in der zweiten Dezemberhälfte *Y* verwendet wird. Dabei wird der Buchstabe *I* übersprungen.
- Eine Zahl steht für einen Kometen beziehungsweise ein zweiter Buchstabe für einen Asteroiden. Für Kometen wird dabei einfach eine fortlaufende Zahl verwendet. Für Asteroiden hingegen wird das Alphabet wiederholt von *A* bis *Z* durchgegangen (auch hier wird das *I* ausgelassen), wobei die Anzahl der Durchläufe durch das Alphabet mit einer angehängten tiefgestellten Zahl, beginnend bei Null, für den ersten Durchgang bezeichnet wird. Die Null für den ersten Durchgang wird weggelassen, so dass die tiefgestellten Zahlen erst ab *1* für den zweiten Durchgang beginnen.

- Kometen bekommen zusätzlich noch einen weiteren Buchstaben, gefolgt von einem Schrägstrich, vorangestellt, sobald die Bahnelemente genauer bestimmt sind (siehe Tabelle).
- Objekte, die man ursprünglich als Asteroiden ansieht und sich als Kometen herausstellen, behalten ihre ursprüngliche Bezeichnung. Man stellt ihnen jedoch wie allen anderen Kometen den die Bahn charakterisierenden Buchstaben voran.

Tabellierte Buchstabenkodierung des Benennungsschemas:

erste Monatshälfte	A=Jan	C=Feb	E=Mär	G=Apr	J=Mai	L=Jun
zweite Monatshälfte	B=Jan	D=Feb	F=Mär	H=Apr	K=Mai	M=Jun
	I=ausgelassen					
erste Monatshälfte	N=Jul	P=Aug	R=Sep	T=Okt	V=Nov	X=Dez
zweite Monatshälfte	O=Jul	Q=Aug	S=Sep	U=Okt	W=Nov	Y=Dez
	Z=unbenutzt					

Buchstabenkodierung der Halbmonate

P	die Umlaufzeit ist kleiner als 200 Jahre (Periodischer Komet)
C	die Umlaufzeit ist größer als 200 Jahre
X	die Bahn ist nicht bestimmbar
D	Periodischer Komet, der verloren ging oder nicht mehr existiert
A	man stellt nachträglich fest, dass es sich nicht um einen Kometen, sondern um einen Asteroiden handelt

Buchstabenkodierung der Bahnen von Kometen

Beispiele – Im Jahr 2004 wurde also, beginnend vom 1. Januar, der erste entdeckte Asteroid *2004 AA* genannt. Dieses Schema läuft dann bis *2004 AZ* durch, welches dann vom nächsten Durchlauf *2004 AA₁* gefolgt wird. Dieses Schema wird solange durchgegangen, bis der 16. Januar beginnt und der erste Buchstabe auf *B* springt und es mit *2004 BA* weitergeht.

Der mittlerweile unter dem Namen Sedna bekannte Himmelskörper hatte die provisorische Bezeichnung *2003 VB₁₂*. Er wurde also in der ersten Hälfte des Novembers 2003 entdeckt und war die 302. Entdeckung in diesem Zeitraum ($B \rightarrow 2 + 12 \times 25 = 302$).

Kometenentdeckungen werden ähnlich benannt: *2004 A1* ist der erste entdeckte Komet des Zeitraums vom 1.-15. Januar 2004, *2004 A2* der zweite usw.

Der Komet →Hyakutake zum Beispiel wird auch unter der Bezeichnung *C/1996 B2* geführt. Hyakutake war also der zweite Komet, der in der zweiten Hälfte des Januars 1996 entdeckt wurde. Seine Umlaufzeit ist, wie das *C* anzeigt, größer als 200 Jahre.

Dauerhafter Name

Asteroiden – Die Namen der Asteroiden setzen sich aus einer vorangestellten Ziffer und einem Namen zusammen. Die Ziffer gibt die Reihenfolge der Entdeckung des Himmelskörpers an. Sie wird nur vergeben, wenn die Entdeckung des Asteroiden bestätigt wurde. Der Entdecker hat das Vorschlagsrecht für die Vergabe eines Namens. Dieser muss aber durch eine Kommission der IAU bestätigt werden, da es Richtlinien für die Namen astronomischer Objekte gibt. Dementsprechend existieren zahlreiche Asteroiden zwar mit Nummer, aber ohne Namen, vor allem in den oberen Zehntausendern.

Der erste Asteroid wurde 1801 von Giuseppe Piazzi an der Sternwarte Palermo auf Sizilien entdeckt. Piazzi taufte den Himmelskörper auf den Namen Ceres Ferdinandea. Die römische Göttin Ceres ist Schutzpatronin der Insel Sizilien. Mit dem zweiten Namen wollte Piazzi König Ferdinand IV., den Herrscher über Italien und Sizilien, ehren. Dies missfiel der internationalen Forschergemeinschaft und man ließ ihn weg. Die offizielle Bezeichnung des Asteroiden lautet demnach →(1) Ceres.

Bei den weiteren Entdeckungen wurde die Nomenklatur beibehalten und die Asteroiden wurden nach römischen und griechischen Göttinnen benannt; dies waren →(2) Pallas, →(3) Juno, →(4) Vesta, (5) Astraea, (6) Hebe, usw.

Als immer mehr Asteroiden entdeckt wurden, gingen den Astronomen die antiken Gottheiten aus. So wurden Asteroiden unter anderem nach den Ehefrauen der Entdecker, zu Ehren historischer Persönlichkeiten oder Persönlichkeiten des öffentlichen Lebens, Städten, Märchenfiguren und Gottheiten aus anderen Religionen benannt. Beispiele hierfür sind die Asteroiden Kleopatra, Albert, Annefrank, Jodiefoster, Lutetia, Rumpelstilz, Varuna, →Quaoar und Sedna. Diese Praxis trieb Blüten. So ist beispielsweise der 1935 entdeckte Planetoid Haremary zu Ehren beliebter Schauspielerinnen und der Freundinnen einiger Mitarbeiter des Astronomischen Rechen-Instituts in Heidelberg benannt – als Harem des ARI.

Kometen – Üblicherweise wird ein Komet nach seinen Entdeckern benannt, so ist zum Beispiel der Komet →Shoemaker-Levy 9 der neunte

Komet, den Eugene und Carolyn Shoemaker zusammen mit David Levy entdeckt haben. Einige wenige periodische Kometen sind aber auch nach jenen Astronomen benannt, die erstmals ihre Bahn berechnet haben: Der →Halley'sche Komet ist beispielsweise nach Edmond Halley benannt, der als erster erkannte, dass einige Kometenbeobachtungen der Vergangenheit zu einem in regelmäßigen Abständen von 76 Jahren wiederkehrenden Kometen gehören.

Durch systematische automatisierte Himmelsdurchmusterungen, insbesondere nach potenziell gefährlichen →Erdbahnkreuzern, werden neben vielen Asteroiden (daher auch die hohen Durchlaufzahlen neuerer Entdeckungen) auch viele neue Kometen durch diese Programme gefunden. Dem provisorischen Namen wird dann zusätzlich der Name der Beobachtergruppe in Klammern angehängt, in der Tradition der Benennung nach den Entdeckern. So haben alle vom Suchprogramm LINEAR gefundenen Kometen den Namensbestandteil »LINEAR«, oder (wenn die Entdeckung zugleich einem anderen Beobachter oder einer anderen Beobachtergruppe gelang) einen kombinierten, wie zum Beispiel »LINEAR-NEAT«. So zum Beispiel der Komet mit der Bezeichnung *C/2002 T7* (LINEAR), der am 14. Oktober 2002 entdeckt wurde, und im Mai 2004 eine scheinbare Helligkeit von etwa 2^m erreichte.

Periodische Kometen, die zumindest in einer zweiten Wiederkehr beobachtet wurden, erhalten schließlich eine permanente Nummer, gefolgt vom der Buchstabenkodierung der Bahnen und dem Namen des Entdeckers beziehungsweise Bahnrechners. So ist beispielsweise →2P/Encke der zweite Komet (nach Halley), der eine derartige permanente Nummer erhalten hat.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Benennung_von_Asteroiden_und_Kometen. Historie: 5.12.04: Angelegt von Arnomane, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Vesta, BWBot. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Vulkanoiden

Vulkanoiden (auch *Vulcanoiden*) sind hypothetische →Asteroiden, die in einem schwach besetzten »dritten →Asteroidengürtel« innerhalb der Bahn des Planeten →Merkur existieren könnten.

Trotz längerer Suchprogramme konnte ihre Existenz bisher nicht bewiesen werden. Sie ergibt sich vorerst allein aus theoretischen Überlegungen zur Stabilität schwach exzentrischer Umlaufbahnen in der Ekliptik

zwischen Sonne und Merkur. Als weiteren Hinweis kann man die Tatsache werten, dass Merkur als sonnennächster Planet in der Frühzeit des Sonnensystems einem intensiven Bombardement durch kleinere Himmelskörper ausgesetzt war.

Die Vulkanoiden müssen, wenn sie existieren, kleiner als 50 km im Durchmesser sein, denn größere Körper wären bereits entdeckt worden. Bisher fand man in diesem Bereich lediglich einige Asteroiden auf äußerst exzentrischen Bahnellipsen, die nur wenige Prozent ihres Umlaufs innerhalb der Merkurbahn verbringen: (1566) Icarus (1949, 0,19–1,97 AE) und der kometenähnliche, von IRAS 1984 entdeckte (3200) Phaeton (0,14–2,40 AE. Er ist im Perihel etwa 200 km/s schnell und erhitzt sich auf etwa 850 K.

Schon vor etwa 100 Jahren suchte der damalige Rekordhalter an entdeckten Kleinplaneten, der böhmisch-österreichische Astronom Johann Palisa, während einer Finsternisexpedition in die Südsee nach Vulcanus, einem hypothetischen »Intra-Merkur«. Zwar war seine Suche erfolglos, doch gab man nun den gesuchten Kleinkörpern die analoge Bezeichnung.

Mögliche bevorzugte Bahnbereiche von Vulkanoiden wurden bei 0,18 und 0,15 AE Sonnenabstand errechnet. Wie die Ringe des Saturn oder der Asteroidengürtel müsste auch ein Vulkanoidengürtel »Kirkwoodlücken« und Konzentrationen aufweisen.

Besonders schwierig ist die Entdeckung und Beobachtung von Vulkanoiden wegen ihrer Sonnennähe, denn sie wären nur im Dämmerungsbereich der auf- und untergehenden Sonne zu sehen. Große Teleskope mit empfindlicher Optik sind für solche Suchprogramme ungeeignet. Dem Einsatz von Weltraumteleskopen stehen die hohen Kosten entgegen, die eher für die Suche von eventuell kollisionsträchtigen Erdbahnkreuzern zu verantworten wären.

Inzwischen wird die Suche daher von Höhenflugzeugen aus im Infrarotbereich intensiviert, weil damit zu rechnen ist, dass Körper in dieser Sonnennähe sehr heiß sind und merkliche Wärmestrahlung abgeben. Erwartet werden Oberflächentemperaturen von 700 K bis 900 K.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Vulkanoiden>. Historie: 1.2.04: Angelegt von Herbye, danach bearbeitet von den Hauptautoren Herbye, Geof, Arnomane, Zwobot, AkaBot, Head, Robodoc, Glenn, Heck, Aglarech, RobotQuistnix, MiKo, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Erdbahnkreuzer

Erdbahnkreuzer oder englisch Near Earth Objects (NEOs) sind Asteroiden, Kometen und große Meteoroiden, welche die Erdbahn kreuzen und deshalb eine Kollisionsgefahr bergen. Um dieser Gefahr begegnen zu können, sind genaue Kenntnisse über solche Objekte notwendig.

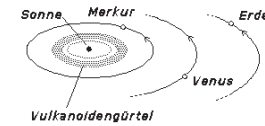


Abb. 103: Schema des Vulkanoidengürtels

In den USA hat die NASA vom Amerikanischen Kongress den Auftrag erhalten, alle Erdbahnkreuzer zu katalogisieren, die mehr als 1 km Durchmesser besitzen. Ein Meteoriteneinschlag dieser Größenordnung wäre lokal eine Katastrophe und hätte auch global ernste Auswirkungen. Gegenwärtig sind etwa 500 derartige Objekte bekannt, nach Expertenmeinung ist dies allerdings nur die Hälfte der Erdbahnkreuzer dieser Größe. Im Projekt Spaceguard arbeiten derzeit die USA und die Europäische Union zusammen. Mit der Einbindung eines australischen Teleskops soll die Überwachung auf den kompletten Himmel ausgedehnt werden.

Nach Art und Größe unterteilt man die Erdbahnkreuzer in Meteoriten mit weniger als 50 m Durchmesser, Asteroiden mit mehr als 50 m Durchmesser und Kometen.

Für die Risikoabschätzung gibt es zwei Einteilungen zur Klassifizierung des Einschlagsrisikos: die einfache *Torinoskala* und die komplexere *Palermo Technical Impact Hazard Scale*.

Torinoskala

Die Torinoskala ist eine Methode, das Einschlagsrisiko von Asteroiden und Kometen zu beurteilen. Sie soll als Hilfsmittel für Astronomen und die Öffentlichkeit zur Risikoabschätzung dienen, indem die Kollisionswahrscheinlichkeit und die Einschlagswirkung zu einem einzigen Wert zusammengefasst werden, vergleichbar zur Richterskala bei Erdbeben. Eine vergleichbare aber wesentlich komplexere Skala ist die *Palermo Technical Impact Hazard Scale*.

Die Torinoskala nutzt die Skala von 0 bis 10. Dabei bedeutet 0 ein Objekt mit einer vernachlässigbar kleinen Einschlagswahrscheinlichkeit auf der Erde, oder das Objekt ist zu klein, um als Ganzes durch die Erdatmosphäre zu kommen. Eine 10 bedeutet eine sichere Kollision mit globaler

Zerstörung. Es werden in dieser Skala keine Nachkommastellen verwendet.

Jedem Objekt wird ein Wert von 0 bis 10 zugeordnet, wobei die Einschlagswahrscheinlichkeit und die kinetische Energie (in Megatonnen) herangezogen werden.

Die Torinoskala wurde von Professor Richard P. Binzel (MIT) aufgestellt und auf einer UN-Konferenz 1995 als *Near-Earth Object Hazard Index* vorgestellt. Eine überarbeitete Version wurde im Juni 1999 auf der internationalen Konferenz zu erdnahen Objekten in Turin beschrieben. Der beschlossene Name Torinoskala (nach *Torino* für »Turin«) steht für den Geist der internationalen Kooperation dieser Konferenz hinsichtlich der Anstrengungen zur Erforschung und dem Verständnis der Risiken von erdnahen Objekten.

Die Torinoskala verwendet die Farbcodes von Weiss über Grün, Gelb und Orange zu Rot (vgl. Farbtafeln 158).

Als Konsequenz der Presseberichterstattung über den Fehlalarm zu Asteroiden 2003 QQ₄₇ planen die Astronomen, die Torinoskala neu zu formulieren, oder durch eine neue Skala zu ersetzen, die ein geringeres Risiko für Fehlalarme birgt. Damit soll das Vertrauen der Öffentlichkeit zurückgewonnen werden.

Bisher wurde nur ein einziges Objekt mit einer Gefahrenstufe von mehr als 3 eingestuft, nämlich im Dezember 2004 der Asteroid →(99942) Apophis mit der Gefahrenstufe 4. Für diesen Asteroiden, der im Jahre 2029 nahe an der Erde vorbeifliegen wird, wurde jedoch mittlerweile Entwarnung gegeben.

Palermoskala

Die Palermo Technical Impact Hazard Scale ist eine logarithmische Skala, die von Astronomen verwendet wird, um das potenzielle Risiko des Einschlags eines erdnahen Objekts zu beurteilen. Es kombiniert die Wahrscheinlichkeit des Einschlags und die geschätzte kinetische Energie des Objekts zu einem einzigen Wert. Ein Wert von 0 entspricht dabei einem Risiko, das dem Hintergrundrisiko entspricht. Dieses ist definiert als das durchschnittliche Risiko für ein Objekt vergleichbarer Größe, die Erde im entsprechenden Zeitraum zu treffen. Eine Palermozahl von +2 bedeutet eine 100fach höhere Gefahr als durch das Hintergrundrisiko. Die Palermoskala ist vergleichbar mit der weniger komplexen Torinoskala, die für eine einfache Darstellung in den öffentlichen Medien verwendet wird.

Die Palermozahl P ist definiert als Zehnerlogarithmus des Verhältnisses zwischen der Einschlagswahrscheinlichkeit p_i zum Hintergrundrisiko (dem Produkt aus dem jährlichen Hintergrundeinschlagsrisiko f_B und der Zeit bis zum erwarteten Einschlagsereignis in Jahren T):

$$P = \log_{10} \frac{p_i}{f_B T}$$

Das jährliche Hintergrundeinschlagsrisiko f_B ist definiert als

$$f_B = 0.03E^{-0.8}$$

mit der kinetischen Energie E des erwarteten Einschlags in Megatonnen.

Das Near-Earth-Objekt 2002 NT₇ war das erste Objekt mit einer positiven Palermozahl, das durch das aktuelle NEO-Programm der NASA entdeckt wurde. Der Wert wurde allerdings mittlerweile durch genauere Messungen von 0,06 auf -0,25 reduziert.

Der →Asteroid 1950 DA ist einer von zwei Himmelskörpern mit einer positiven Palermozahl von 0,17 für einen Einschlag im Jahre 2880. Sollte es bei dieser engen Begegnung zu einem Einschlag kommen, könnten durch ein Massensterben die meisten Lebensformen auf der Erde ausgelöscht werden. Der andere Himmelskörper mit einer positiven Palermozahl war der Asteroid Apophis, welcher sogar eine Palermozahl von 1,02 besaß. Mittlerweile wurde diese allerdings auch auf -1,06 korrigiert.

Größte Annäherungen

Das Objekt mit der bisher größten Annäherung war 2004 FU₁₆₂. Es passierte am 31. März 2004 mit nur 6.500 km Abstand die Erde. Mit etwa 6 m Durchmesser stellte es jedoch keine Gefahr für die Erde dar.

Bei einem Abstand von etwa 43.000 km kam →2004 FH (30 m Durchmesser) am 18. März 2004 der Erde ebenfalls recht nahe.

Am 13. April 2029 wird →(99942) Apophis (2004 NM₄) die Erde in einer Entfernung von 30.000 km passieren und Forschern somit eine Gelegenheit für genauere Beobachtungen geben.

Quellen: <http://de.wikipedia.org/wiki/Erdbahnkreuzer>, <http://de.wikipedia.org/wiki/Torinoskala>, http://de.wikipedia.org/wiki/Palermo_Technical_Impact_Hazard_Scale.
 Historie: 8.3.04: Angelegt von Srbauer, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Mundartpoet, Pkn, Arnome, Quo R, Alkuin, Butcherbird, Mhlusi, Fredstober, Liquidat, ChristophDemmer, Joney82, Waelder, Tfox, MalteAhrens, Zwobot, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Eros

(433) Eros ist ein ➔Asteroid, der am 13. August 1898 von Gustav Witt an der Berliner Urania-Sternwarte bei der Auswertung einer fotografischen Platte entdeckt wurde. Benannt wurde der Himmelskörper nach Eros, dem Gott der Liebe aus der griechischen Mythologie.

Eros war der erste bekannte Asteroid, dessen Bahn teilweise innerhalb der ➔Marsbahn verläuft. Er gehört somit zur Klasse der Amor-Asteroiden. Er bewegt sich in einem Abstand von 1,133 (Perihel) bis 1,783 (Aphel) astronomischen Einheiten in 1,76 Jahren um die Sonne. Die Bahn ist 10,83° gegen die Ekliptik geneigt, die Bahnexzentrizität beträgt 0,223.

Aufbau

Eros ist ein unregelmäßig geformter Himmelskörper mit 56 x 15 x 13 Kilometern Ausdehnung. Er weist eine relativ helle, silikathaltige Oberfläche mit einer Albedo von 0,16 auf. Seine Dichte entspricht mit 2,4 g/cm³ etwa der Dichte von silikatischem Gestein.

In rund 5 Stunden und 16 Minuten rotiert er um die eigene Achse. Messungen haben ergeben, dass die Temperaturen auf der sonnenzugewandten Seite (Tagseite) des Asteroiden auf 100°C ansteigen, während sie auf der Nachtseite auf -150°C abfallen. Während der Opposition erreicht er eine Helligkeit von 8,3 mag.

Eros wurde vom 14. Februar 2000 bis zum 12. Februar 2001 intensiv von der Raumsonde NEAR-Shoemaker untersucht. Die Sonde war auf eine Umlaufbahn um den Asteroiden gebracht worden und landete schließlich auf seiner Oberfläche, wobei detailreiche Aufnahmen erstellt wurden. Es zeigte sich, dass Eros von Kratern übersät und von Rillen und Spalten durchzogen ist. Der Asteroid war offensichtlich heftigsten Kollisionen mit anderen Himmelskörpern ausgesetzt. Fast überall liegen Gesteinstrümmer herum, die teilweise den Einschlagskratern zugeordnet werden können.

Nach den Wissenschaftlern der NEAR-Mission stammen die meisten der größeren Felsbrocken von einem Krater, der vor vermutlich einer Milliarde Jahren bei einer Kollision entstand. Dieser Einschlag könnte auch für eine mit kleinen Kratern unter 500m Durchmesser übersäte Region verantwortlich sein, die 40% der Oberfläche des Eros ausmacht. Ein Großteil der Oberfläche ist mit feinem Staub, dem Regolith, überzogen. Ursprünglich nahm man daher an, dass der Auswurf der Kollision die kleineren Krater aufgefüllt hat. Eine Analyse der Kraterdichte der Oberfläche zeigt jedoch, dass die Gebiete mit geringer Kraterdichte innerhalb

von neun Kilometern um den Einschlagpunkt verteilt liegen. Einige der weniger verkrateren Gebiete befinden sich auf der gegenüberliegenden Seite des Einschlags, sind aber trotzdem innerhalb des Abstands von neun Kilometer. Es wird angenommen, dass sich beim Einschlag Erdbebenwellen durch den



Abb. 104: NEAR-Aufnahme des Asteroiden Eros

Asteroiden ausbreiteten, die die kleineren Krater einebneten. Da Eros unregelmäßig geformt ist, kann eine direkte Linie durch das Innere des Asteroiden länger sein, als wenn man die Oberfläche entlang gehen würde, was somit zu dem ungleichförmigen Muster der Kraterdichte auf der Oberfläche führt.

Beim Vorbeiflug wurde die Sonde durch die Schwerkraftwirkung von Eros leicht abgelenkt. Hierdurch konnte dessen Masse bestimmt werden, die etwa $7,2 \cdot 10^{15}$ kg beträgt. Aufgrund der unregelmäßigen Form variiert die Schwerkraftbeschleunigung von Eros zwischen verschiedenen Punkten seiner Oberfläche sehr stark.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Eros_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Eros_(Asteroid)). Historie: 27.2.04: Angelegt von Alkuin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Arnomane, Pikarl, Zwobot, BWBot, RKraasch, ArtMechanic, Crux, Extrawurst, FlaBot, AHoerstemeier, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

2004 FH

2004 FH ist ein ➔Asteroid von etwa 30m Durchmesser. Er wurde am 16. März 2004 von der LINEAR-Himmelsüberwachung in New Mexico, USA, entdeckt. Er bewegt sich in einem Abstand von 0,581 (Perihel) bis 1,054 (Aphel) astronomischen Einheiten in 270 Tagen und 5 Stunden um die Sonne, die Bahnexzentrizität beträgt somit 0,289. Seine Bahn ist mit 0,021° fast nicht gegen die Ekliptik geneigt. 2004 FH rotiert recht schnell einmal in etwa drei Minuten um seine Achse.

2004 FH passierte die Erde am 18. März 2004 um 22.08 Uhr UTC im Abstand von nur etwa 43.000km (von der Erdoberfläche aus gemessen) mit 7.9km/s Relativgeschwindigkeit. Vom Zentrum der Erde aus gemessen entspricht dies 0,00035 AE oder etwa vier Erddurchmessern. Von allen derzeit bekannten Near Earth Objects ist nur der noch kleinere 2004 FU₁₆₂ der Erde bisher näher gekommen.

Eine Kollision mit der Erde hätte möglicherweise zu starken regionalen Verwüstungen geführt. Eine der Erklärungshypothesen des Tunguska-Ereignisses, einer bislang ungeklärten Explosion in Sibirien, geht zum Beispiel von einem etwa 50 m großen Körper aus, der mit der Erde kollidierte, was also mit 2004 FH vergleichbar wäre. Dass Objekte dieser Größe in solcher Nähe die Erde passieren, wird etwa alle zwei Jahre erwartet, 2004 FH ist jedoch das erste, das tatsächlich beobachtet wurde.



Abb. 105: Diese NEAR-Aufnahme zeigt deutlich die unregelmäßige Form von Eros

Zum Zeitpunkt der größten Annäherung war das Objekt mit einer scheinbaren Helligkeit von etwa 10 mag aber zu dunkel, um es mit dem bloßen Auge wahrzunehmen. Mit einem Fernrohr war 2004 FH von Deutschland aus praktisch unbeobachtbar. Im Süden stand er etwa drei Grad über dem Horizont am Südhimmel im Sternbild Luftpumpe. Im Norden Deutschlands war 2004 FH unter dem Horizont. In den darauf folgenden Nächten stand das Objekt weiter am Nordhimmel, war aber aufgrund der gewachsenen Entfernung wieder wesentlich schwächer.

Zum Zeitpunkt der größten Annäherung war das Objekt mit einer scheinbaren Helligkeit von etwa 10 mag aber zu dunkel, um es mit dem bloßen Auge wahrzunehmen. Mit einem Fernrohr war 2004 FH von Deutschland aus praktisch unbeobachtbar. Im Süden stand er etwa drei Grad über dem Horizont am Südhimmel im Sternbild Luftpumpe. Im Norden Deutschlands war 2004 FH unter dem Horizont. In den darauf folgenden Nächten stand das Objekt weiter am Nordhimmel, war aber aufgrund der gewachsenen Entfernung wieder wesentlich schwächer.

Durch die geringe Entfernung kam es zu einer großen Parallaxe von in Deutschland etwa fünf Grad, abhängig vom jeweiligen geografischen Standort, und damit zu Abweichungen von den in der Ephemeride angegebenen geozentrischen Positionen. 2004 FH bewegte sich mit maximal 33 Bogensekunden pro Zeitsekunde über den Himmel.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/2004_FH. Historie: 18.3.04: Angelegt von JostJahn, danach bearbeitet von den Hauptautoren JostJahn, Rivi, Arnomane, Ablaubauer, Vesta, Alkuin, Zwobot, Schusch, Pkn, Asteroid7687, Butcherbird, AkaBot, Hadhuey, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Apophis

Der Asteroid (99942) Apophis (vorläufige Bezeichnung 2004 MN4) wurde am 19. Juni 2004 durch Roy Tucker, David J. Tholen und Fabrizio Bernardi im Rahmen des durch die NASA finanzierten University of Hawaii Asteroid Survey im Kitt-Peak-Nationalobservatorium in Arizona entdeckt. Er ist ein Erdbahnkreuzer, weswegen er nach dem namensgebenden Asteroiden Aten als Aten-Typ klassifiziert wurde. Benannt wurde

er nach Apophis, dem Widersacher des Sonnengottes Ra in der ägyptischen Mythologie. Er bewegt sich in einem Abstand von 0,746 (Perihel) bis 1,098 (Aphel) astronomischen Einheiten in 323 Tagen und 12 Stunden um die Sonne, die die Bahnexzentrizität beträgt somit 0,191. Seine Bahn ist mit $3,331^\circ$ gering gegen die Ekliptik geneigt. Er rotiert einmal in 30 Stunden und 37 Minuten um seine Achse.

Erdbegegnung

Zwischenzeitlich bestand eine Wahrscheinlichkeit von 2,7 %, dass der Asteroid am Freitag, den 13. April 2029 die Erde treffen würde, was zu regionalen Verwüstungen hätte führen können. Apophis ist damit das erste Objekt, das eine höhere Gefahreinschätzung als Stufe 1 (mehrere Tage sogar 4) auf der Torinoskala erreichte. Inzwischen besitzt er nur noch eine Bewertung von 1. Auf der Palermoskala erreicht der Asteroid für kurze Zeit eine Bewertung von -1,80.

Durch die große Annäherung im Jahr 2029 ist die Bahnberechnung in der Folge mit größeren Fehlern behaftet, aber eine Gefahr in diesem Jahrhundert kann man nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand ausschließen.

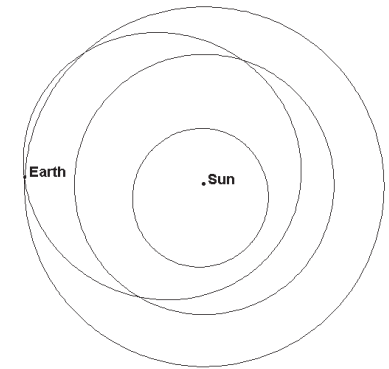


Abb. 106: Orbit des Asteroiden 2004 FH

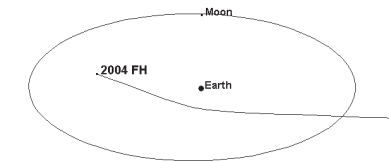


Abb. 107: Bahnstörung von 2004 FH beim Vorbeiflug an der Erde

Mögliche Folgen eines Einschlags

Nach Schätzungen der NASA (mit den Daten von Dezember 2004) würde Apophis im Falle eines Einschlags eine Energie von 1480 Megatonnen TNT freisetzen. Zum Vergleich entsprach die größte von Menschen verursachte Nuklearexplosion (durch die Zar-Bombe) etwa 50 Megatonnen TNT. Die über Hiroshima abgeworfene Atombombe Little Boy hatte eine Sprengkraft von etwa 0,015 Megatonnen TNT. Beim Tunguska-Ereignis 1908 wurde nach Schätzungen eine Energie von 10 bis 20 Megatonnen TNT freigesetzt.

Die genauen Folgen eines Einschlags würden von der Zusammensetzung des Asteroiden sowie dem Ort und Winkel des Einschlags abhängen. Langfristige globale Auswirkungen wären im Falle eines Einschlags von Apophis allerdings nicht zu befürchten.

Annäherung 2029

Durch die große Annäherung wird Apophis sehr starken mechanischen Belastungen durch die Gravitationskräfte der Erde ausgesetzt, die möglicherweise zu einem Zerbrechen des Asteroiden führen können. Durch eine genaue Analyse des Vorbeiflugs können neue Informationen über den inneren Aufbau und die mechanische Stabilität von Apophis und auch von vergleichbaren Asteroiden gewonnen werden.

Chronik der Prognosen

Der ursprüngliche NASA-Bericht vom 23. Dezember 2004 nannte eine Einschlagswahrscheinlichkeit von »etwa 1 zu 300«, welche auch in den Medien verbreitet wurde. Die tatsächliche Schätzung der NASA betrug zu diesem Zeitpunkt 1:233 und führte zur Einstufung auf der Stufe 2 der Torinoskala. Im weiteren Verlaufe des Tages wurde die NASA-Schätzung (nach 64 Beobachtungen) auf 1:62 (1,6 %) erhöht. Damit wurde Stufe 4 der Torinoskala erreicht.

Am 25. Dezember wurde die Wahrscheinlichkeit zunächst mit 1:42 (2,4 %) und später (nach 101 Beobachtungen) mit 1:45 (2,2 %) angegeben. Zugleich wurde der geschätzte Durchmesser von 440 m auf 390 m reduziert und die Masse von $1,2 \times 10^{11}$ kg auf $8,3 \times 10^{10}$ kg. Am 27. Dezember wurde die Einschlagswahrscheinlichkeit (nach 176 Beobachtungen) auf 1:37 (2,7 %) erhöht sowie die Masse auf $7,9 \times 10^{10}$ kg reduziert. Im Laufe dieses Tages wurde durch die zusätzliche Auswertung älterer Aufnahmen die Genauigkeit der Bahndaten erheblich verbessert. Dadurch konnte ein Zusammenstoß am 13. April 2029 völlig ausgeschlossen werden.

Am 3. Februar 2005 gab die NASA die Ergebnisse einer mehrtägigen Vermessung durch das Arecibo Observatorium bekannt. Demnach wird Apophis am 13. April 2029 in einer Entfernung von 30.000 km mit einer Winkelgeschwindigkeit von 42°/h im Sternbild Krebs passieren und dabei eine Helligkeit von 3,3 mag erreichen. Die Größe wurde auf 320 m nach unten korrigiert, die Einstufung auf der Torinoskala jedoch wieder auf Stufe 1 erhöht.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Apophis_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Apophis_(Asteroid)). Historie: 26.12.04: Angelegt von Fredstober, danach bearbeitet von den Hauptautoren Ben-Zin, Sys64738, Odin, Bierdimpfl, FlaBot, Vestas, Kaffianer, Arnomane, RobotQuistnix, Kurt Jansson, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Meteoroid

Meteoroiden (auch Meteoride, jedoch nicht Meteorit; siehe unten) sind kleinere Objekte des Sonnensystems, die die Erdbahn kreuzen. Ihre Größe reicht von Bruchteilen eines Millimeters (Mikrometeoroiden) bis zu etlichen Metern. Damit sind sie kleiner als Asteroiden.

Meteoroiden sind von unterschiedlicher Herkunft. Sie können durch die Gravitation der Planeten aus dem Asteroidengürtel herausgeschleudert worden sein, oder es sind Teile von Kometen, die diese auf ihrer Bahn verlieren.

Treten Meteoroiden in die Erdatmosphäre ein, so erzeugen sie durch die Reibung mit der Luft eine Leuchterscheinung, Meteor (Sternschnuppe) genannt. Ein hierbei übrigbleibender Rest, der die Erdoberfläche erreicht, wird Meteorit genannt.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Meteoroid>. Historie: 26.11.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Ben-Zin, Sys64738, Odin, Bierdimpfl, FlaBot, Mathias Schindler, Schewek, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Meteor

Meteor (griech. *metéoros*, bedeutet: »in der Luft schwebend«) nennt man die Leuchterscheinung am Himmel, welche durch Staub oder einen Gesteinsbrocken, den so genannten Meteoroid, hervorgerufen werden, wenn dieser vom Weltall aus in die Atmosphäre der Erde eindringt. Im Volksmund werden kleine Meteore auch *Sternschnuppen* genannt. Große dagegen heißen Boliden oder *Feuerkugeln*.

Die meisten Meteore dauern nur etwa eine Sekunde und werden von Teilchen erzeugt, die nur wenige Millimeter groß sind und im Allgemeinen mit 30–70 Kilometern pro Sekunde auf die Erdatmosphäre auftreffen. Sie verglühen dabei vollständig. Viel seltener sind dagegen größere Objekte von mindestens einigen Kilogramm Masse, die nicht vollständig verglühen und als Meteorit auf der Erdoberfläche auftreffen.

Der auftretende Leuchteffekt entsteht dabei nicht durch Verglühen des Teilchens, denn Meteore bilden sich in über 100 Kilometern Höhe, wo die Luft dafür noch zu dünn ist. Vielmehr werden durch die Bewegungsenergie Elektronen der Luftmoleküle auf ein höheres Energieniveau angeregt und strahlen diese Energie kurz darauf als sichtbares Licht ab. Bei anderen Molekülen werden Elektronen mitgerissen (Ionisierung), die sich anschließend wieder mit den Ionen vereinigen und dabei ebenfalls sichtbares Licht abstrahlen.

Neben dem sichtbaren Licht sind manchmal auch gleichzeitig Geräusche zu hören. Dieses Phänomen wurde oft für eine Einbildung gehalten, weil durch die begrenzte Geschwindigkeit des Schalls Geräusche erst viel später hörbar sein dürften. Heute geht man davon aus, dass die Geräusche durch niederfrequente Radiowellen, die durch Verwirbelungen im Plasma um den Meteor entstehen, erzeugt werden.

Neben einzeln auftretenden Meteoren (so genannte *sporadische Meteore*) gibt es so genannte Meteorströme. Diese entstehen, wenn die Erde die Flugbahn eines Kometen kreuzt. Bekannte Meteorströme sind die Quadrantiden im Januar, die Perseiden im Juli und August, die Leoniden im November sowie die Geminiden im Dezember.

Im volkstümlichen Aberglauben vieler Länder hat jemand, der zufällig eine Sternschnuppe am nächtlichen Himmel sieht, einen Wunsch frei, der angeblich in Erfüllung geht. Sobald man die Sternschnuppe gesehen hat, solle man die Augen schließen und sich etwas wünschen. Wichtig sei, dass man niemand anderem von dem Wunsch erzählt, sonst gehe er nicht in Erfüllung.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Meteor>. Historie: 26.11.02: Angelegt von Ben-Zin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Media lib, Ben-Zin, Kookaburra, ArtMechanic, Hoss, Jaques, Arnomane, Ckeen, Alexander.stohr, Enirac Sum, Marc Layer, Sascha Claus, Lukey, Hans-Peter Scholz, Epo, Hafenbar, Wst, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Meteorstrom

Neben einzeln auftretenden Meteoren gibt es so genannte Meteorströme (Meteoroidenströme wäre eigentlich die bessere Bezeichnung, ist aber nicht üblich).

Meteorströme entstehen, wenn die Erde die Flugbahn eines Kometen kreuzt. Kometen verlieren auf ihrer Bahn, insbesondere in Sonnennähe, einen Teil ihrer Masse in Form kleiner Partikel, die man Meteoroiden nennt. Im Laufe der Zeit verteilen sich diese Partikel über die gesamte Bahn des Ko-

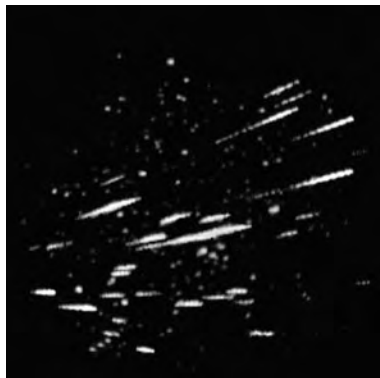


Abb. 108: Meteorschauer des Meteorstroms der Alpha-Monocerotiden im Jahr 1995

meten, weshalb ein Meteorstrom meist jährlich wiederkehrt. Die Stärke eines Meteorschauers lässt sich an der Zenithal Hourly Rate (ZHR), der Zahl der unter Idealbedingungen zum Höhepunkt pro Stunde sichtbaren Meteore, ablesen.

Alle Meteore eines Meteorschauers scheinen vom selben Punkt am Himmel auszugehen, dem Radianten. Die Benennung der Meteorschauer erfolgt meist nach dem Sternbild, in dem dieser Radiant liegt (zum Beispiel Perseiden: Sternbild Perseus).

Durchquert die Erde eine Kometenbahn kurz nach dem Vorbeiflug des Kometen, so ist die Partikeldichte und damit die Zahl der Meteore besonders groß. Im Extremfall können dabei, wie beispielsweise 2002 bei den Leoniden, Meteorstürme auftreten, bei denen mehrere tausend Meteore pro Stunde beobachtet werden können.

Zeit (Maximum)	Name	Herkunft	ZHR
1. Januar bis 5. Januar (3. Januar)	Quadrantiden (Bootiden)	unbekannt	120
25. Januar bis 15. April (24. März)	Virginiden	ekliptikal	5
16. April bis 25. April (23. April)	Lyriden	Komet 1861 I	18
19. April bis 28. Mai (5. Mai)	Mai-Aquariden (η-Aquariden)	Halley'scher Komet	60
15. April bis 15. Juli (19. Mai)	Sagittariden	ekliptikal	5
12. Juli bis 25. August (3. August)	Juli-Aquariden (δ-Aquariden)	ekliptikal	20
17. Juli bis 24. August (12. August)	Perseiden (Laurentius-Schwarm)	Komet 1862 III (Swift-Tuttle)	110
2. Oktober bis 7. November (21. Oktober)	Orioniden	Komet Halley	23
1. Oktober bis 25. November (5. November und 12. November)	Tauriden	ekliptikal	5
14. November bis 21. November (17. November)	Leoniden	Komet 1866 I (Tempel-Tuttle)	50+
7. Dezember bis 17. Dezember (13. Dezember)	Geminiden	Asteroid 3200 Phaeton	120

Wichtige wiederkehrende Meteorströme

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Meteorstrom>. Historie: 2.1.04: Angelegt von ArtMechanic, danach bearbeitet von den Hauptautoren ArtMechanic, Zwobot, Hoss, JostJahn, AHoerstemeyer, FlaBot, Anton, Bota47, Arnomane, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Perseiden

Perseiden wird der jährlich um den 12. August wiederkehrende Meteorstrom genannt. Der Name kommt daher, dass die Sternschnuppen scheinbar aus dem Sternbild des Perseus kommen, da der Radiant der Perseiden in diesem Sternbild liegt. Da ihr Erscheinen mit dem Namenstag des Märtyrers Laurentius (10. August) zusammenfällt, werden sie im Volksmund auch *Laurentiustränen* beziehungsweise *Tränen des Laurentius* genannt.

Die Perseiden bestehen aus den Auflösungsprodukten des Kometen 109P/Swift-Tuttle, deren Bahn die Erde immer um den 12. August kreuzt. Der gesamte Aktivitätszeitraum der Perseiden erstreckt sich vom 17. Juli bis zum 24. August. Die Zahl der Meteore wird immer dann größer, wenn sich der Komet der Erde nähert, wie es 1992 der Fall war. Dann erreicht der Meteorschauer ein Maximum von etwa 110 Meteoriten pro Stunde unter Idealbedingungen (ZHR). Vorhersagemodelle gehen davon aus, dass das auch im Jahr 2028 der Fall sein wird.

2004 war der Höhepunkt der Perseiden am 11. August zwischen 20:55 und 21:05 UTC (22:55 bis 23:05 MESZ). Die Erde passierte den Kometenschweif bei einer solaren Länge von 139,441° und in einer Entfernung von etwa 200.000 km.

2005 war der Höhepunkt der Perseiden in der Nacht vom 12. auf den 13. August, am besten sichtbar war das Ereignis zwischen 22 und 4 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit (MESZ).

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Perseiden>. Historie: 10.8.03: Angelegt von Johannes von Salem und Seborga, danach bearbeitet von den Hauptautoren Sansculotte, Alexander Grüner, Johannes von Salem und Seborga, JostJahn, Hoss, Vesta, Nobody0815, Wst, Gauss, Arnomane, DaTroll, Bierdimpfl, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Leoniden

Die Leoniden bilden einen Meteorstrom, der im November zu beobachten ist. Er geht scheinbar vom Sternbild des Löwen aus (lat. *leo* = »der Löwe«). Sein Ursprung ist aber der Komet Tempel-Tuttle, der auf seiner Umlaufbahn um die Sonne zahllose Bruchstücke (Meteoroiden) hinterlässt. Kreuzt die Erdbahn eine solche Wolke von Bruchstücken und geraten diese in die Atmosphäre, so verglühen sie und können als Sternschnuppen (Meteore) wahrgenommen werden.

Alle 33 Jahre kann es zu einem besonderen Spektakel kommen: Kreuzt die Erde die Umlaufbahn des Kometen Tempel-Tuttle, kurz nachdem

dieser das innere Sonnensystem durchquert hat, so ist die Zahl der sichtbaren Leoniden-Meteore besonders groß. Es kommt dann zu einem Meteorsturm mit mehreren tausend Meteoriten pro Stunde, wie es 1966 und in den Jahren nach 1998 der Fall war.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Leoniden>. Historie: 25.11.02: Angelegt von Gbust, danach bearbeitet von den Hauptautoren Interpretix, Gbust, Arnomane, Bierdimpfl, FlaBot, Alkuin, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Meteorit

Meteoriten sind Festkörper außerirdischen Ursprungs, welche die Atmosphäre durchquert und den Erdboden erreicht haben. Sie bestehen gewöhnlich überwiegend aus Silikatmineralen oder einer Eisen-Nickellegierung. Da es sich dabei fast immer um vielkörnige Mineralaggregate handelt, werden sie unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung zu den Gesteinen gezählt.

Als Meteoroid bezeichnet man den Ursprungskörper, während er noch durch das Sonnensystem fliegt; beim Eintritt in die Atmosphäre erzeugt er eine Leuchterscheinung, die als Meteor bezeichnet wird. Wenn er in der Atmosphäre nicht vollständig verglüht, sondern den Boden erreicht, wird er schließlich zum Meteoriten.

Allgemeines

Die Meteoriten werden in der Atmosphäre abgebremst und dabei an der Oberfläche erhitzt und geschmolzen, während sie in ihrem Inneren kühl bleiben und dadurch nicht verändert werden. Meteorite ermöglichen daher wertvolle Einblicke in die Frühzeit des Sonnensystems, in der sie gebildet wurden.

Eine große Zahl von Meteoriten mit einer Gesamtmasse von etwa 40 Tonnen dringt täglich in die Atmosphäre ein – die meisten davon sind Mikrometeorite: In Deutschland fallen beispielsweise jährlich nur zwei Meteorite von etwa Faustgröße auf die Erde. Etwa 20.000 Meteorite mit einer Masse von mehr als 100 Gramm erreichen pro Jahr die Erdoberfläche, wobei die meisten kaum größer als Kieselsteine sind. Meteoroiden, die aus dem Asteroidengürtel stammen, haben im Bereich des Erdborbits eine heliozentrische Geschwindigkeit von etwa 42 km/s. Da die Geschwindigkeit der Erde 30 km/s beträgt, sind Relativgeschwindigkeiten von bis zu 72 km/s oder 260.000 km/h möglich. Größere Meteoriteneinschläge erzeugen Einschlagkrater.

Einteilung und Benennung der Meteoriten

Nach ihrem inneren Aufbau werden Meteoriten in undifferenzierte und differenzierte Meteoriten unterteilt. Undifferenzierte Meteoriten enthalten die älteste und erste Materie, die im Sonnensystem entstand. Sie sind die bei weitem am häufigsten gefundenen Meteoriten und werden Chondrite genannt, man zählt sie zu den Steinmeteoriten. Die differenzierten Meteoriten stammen dagegen überwiegend von Asteroiden, einige auch vom Mars oder dem Erdmond, also solchen Himmelskörpern, die wie die Erde durch Schmelzprozesse einen schalenartigen Aufbau aufweisen. Diese Materialtrennung wird Differentiation genannt. Differenzierte Meteoriten lassen sich unterteilen in die nichtchondritischen Steinmeteorite, die man auch Achondrite nennt, und die aus einer Eisen-Nickel-Legierung bestehenden Eisen-Meteorite. Erstere stammen aus dem Mantel, Letztere aus dem Kern der Asteroiden. Daneben gehören auch die Stein-Eisen-Meteorite zu den differenzierten, sie stammen aus dem Übergangsbereich zwischen Kern und Mantel.

Je nachdem, ob der Fall eines Meteoriten beobachtet wurde oder ob der Meteorit bereits früher unbeobachtet gefallen ist und nur gefunden wurde, wird ein Meteorit als »Fall« oder »Fund« eingeteilt. Neben der chemischen und petrologischen Klassifizierung werden Meteoritenfunde auch nach dem Grad der Verwitterung seit ihrem Auftreffen auf der Erdoberfläche in die Verwitterungsklassen A, B oder C eingeteilt. Ein alternatives Klassifizierungssystem teilt die Verwitterungsklassen in W0 bis W6 ein. Schwach verwitterte Meteorite haben den Verwitterungsgrad A (beziehungsweise W0), während die am stärksten verwitterten Meteorite in den Verwitterungsgrad C (beziehungsweise W6) eingeteilt werden. Meteorite können auch eine Metamorphose durch ein Schockereignis, beispielsweise während des Losschlagens vom Mutterkörper, erlitten haben. Dies wird durch Einteilen in die Schockklassen S1 bis S6 beschrieben, wobei in S1 nicht oder nur sehr schwach geschockte Meteorite und in S6 die am schwersten geschockten Meteorite stehen.

Im Einzelfall kann die Entscheidung, ob ein gefundenes Gesteinsstück tatsächlich ein Meteorit ist, nur vom Fachmann beurteilt werden. Im Falle von metallischen Meteoriten bedient er sich dazu beispielsweise der Widmanstättenfiguren. Sie entstehen, wenn man einen Eisenmeteoriten auftrennt, die Schnittflächen poliert und dann mit einer Säure, zum Beispiel verdünnter Salpetersäure, anätzt. Es erscheinen dann die charakteristischen Kristallstrukturen des Metalls, eben die Widmanstättenfiguren, die nur in Meteoriten auftreten. Es gibt allerdings auch Eisenmeteoriten, die

keine Widmanstättenfiguren zeigen, ihr Nichtvorhandensein schließt einen Meteoriten also nicht aus. Eine weitere Möglichkeit, ein gefundenes Eisenstück als Meteorit zu identifizieren, ist ein Nickeltest, da alle Eisenmeteorite mindestens vier Prozent Nickel enthalten. Ein Indiz für einen Steinmeteoriten kann das Vorhandensein einer schwarzen Schmelzkruste sowie kleiner Kügelchen (Chondren) sein. Mit einem Magneten kann man ein gefundenes Steinstück auch auf Magnetismus testen, da Chondrite wegen der in ihnen vorhandenen kleinen metallischen Eisenteilchen magnetisch sind. Als Pseudometeoriten werden solche Funde bezeichnet, die wegen mehr oder weniger großer Ähnlichkeiten zu meteoritischem Gestein zunächst für einen Meteoriten gehalten wurden, sich bei genauerer Analyse jedoch als irdisches Gestein entpuppten.

Die genauen Regeln der Namensgebung wurden von der *Meteoritical Society*, einer internationalen Fachgesellschaft, aufgestellt. Demnach werden Meteorite nach ihrem Fundort (Ort, Fluss etc.) benannt. Orten, an denen sehr viele Meteorite gefunden werden, wie beispielsweise einigen Gebieten in der Sahara, wird eine laufende Nummer angehängt (beispielsweise DaG 262 von Dar al Gani). Bei Meteoriten, die in der Antarktis gefunden werden, werden an den Namen die Jahreszahl und eine laufende Nummer angehängt. Beispielsweise bezeichnet ALH 76008 den achten Meteoriten, der im Jahre 1976 im Alan Hills Gebiet in der Antarktis aufgesammelt wurde. Der Marsmeteorit →ALH 84001, bekannt geworden durch die angeblichen Spuren fossiler Bakterien, war demnach der erste im Jahre 1984 aufgelesene Meteorit in diesem Gebiet.

Herkunft der Meteoriten

Die meisten Meteoriten sind Bruchstücke von →Asteroiden und stammen aus dem →Asteroidengürtel zwischen →Mars und →Jupiter. Durch Kollisionen wurden sie von ihrem Mutterkörper losgeschlagen. Die typischen Widmanstättenfiguren in Eisen-Nickel-Meteoriten können zum Beispiel nur entstehen, wenn ein geschmolzener metallischer Körper sehr langsam, über Millionen von Jahren abkühlt. Solche Abkühlzeiten werden nur im Kern von Himmelskörpern erreicht, etwa Asteroiden.

Die Zeitdauer zwischen dem Abtrennen vom Mutterkörper und dem Einschlag auf der →Erde liegt typischerweise bei einigen Millionen Jahren, kann aber auch mehr als hundert Millionen Jahre dauern. Meteoriten repräsentieren das älteste Material unseres Sonnensystems und enthalten Materie, die vor 4,56 Milliarden Jahren entstand. Sie sind der einzige direkte und auf der Erde verfügbare Zugang zur Erforschung der Entste-

hung unseres Sonnensystems. Ähnlich altes Material findet sich sonst innerhalb des Sonnensystems in Kometen oder eben den Asteroiden und kann nur mit Hilfe von Raumsonden genauer untersucht werden.

Dass einige Meteoriten vom →Mond (Mondmeteoriten) und vom Mars (Marsmeteoriten) stammen, wurde inzwischen nachgewiesen. Für den kohligten Chondriten Kaidun wurde der Marsmond →Phobos und für den Enstatiten Abee gar der →Merkur als Ursprungskörper vorgeschlagen, was allerdings umstritten ist. Bisher wurden keine Meteoriten gefunden, die nachweislich von →Kometen oder gar aus dem interstellaren Raum stammen, obwohl bei Mikrometeoriten auch eine kometare Herkunft diskutiert wird und die meisten →Meteorströme mit Kometen in Verbindung stehen. Auch hier rührt die Mehrzahl aber vermutlich überwiegend von Asteroiden her.

Fundorte von Meteoriten

Meteoriten fallen zwar gleichmäßig überall auf die Erde, trotzdem gibt es Orte, an denen sie bevorzugt zu finden sind. Während sie in den gemäßigten Klimazonen recht schnell verwittern, können sie in trockenen Gegenden, etwa den nordafrikanischen Wüsten, oder in der Antarktis Zehntausende von Jahren, manchmal sogar über eine Million Jahre überdauern. Hilfreich ist auch, dass Meteorite wegen ihrer typisch schwarzen Schmelzkruste leicht auffallen. In der Antarktis gibt es zudem Gebiete, in denen Meteoriten durch Gletscher an so genannten Blaueisfeldern angesammelt werden. Es werden deshalb häufig Expeditionen dorthin unternommen, um neue Meteoriten aufzuspüren.

Der mit 60 Tonnen Gewicht weltweit größte Meteorit Hoba – ein Eisenmeteorit – wurde 1920 in Namibia gefunden.

Historisches über Meteoriten

Berichte über vom Himmel gefallene Steine gibt es seit frühester Zeit. So berichtet etwa der griechische Schriftsteller Plutarch über einen schwarzen Stein, der etwa 470 v. Chr. in Phrygien gefallen sein soll. Dieser Meteorit wurde im Namen der Göttin Kybele verehrt, bis er nach der Übernahme des Kybele-Kultes durch die Römer (die sie Magna Mater deum Idea nannten) im Jahr 204 v. Chr. in einer großen Prozession nach Rom gebracht wurde, wo er weitere Jahrhunderte verehrt wurde.

Bereits in prähistorischer Zeit waren Meteoriten Gegenstand von religiösen Kulturen. So wurde der Meteorit *Winona* 1928 in einem Steinbehälter in einem prähistorischem Pueblo in Arizona gefunden, wo er offenbar

kultischen Zwecken diente. Auch bei dem in der Kaaba, dem zentralen Heiligtum des Islam, eingemauerten schwarzen Stein *Hadschar al-Aswad* handelt es sich möglicherweise um einen Meteoriten, was allerdings wissenschaftlich nicht gesichert ist.

Der chinesische Historiker Ma Duanlin (1245–1325) berichtet über Meteoritenfälle in einem Zeitraum von 2.000 Jahren. Eine Auswertung früher chinesischer Aufzeichnungen durch die Meteoritenforscher K. Yau, P. Weissman und D. Yeomans ergab 337 beobachtete Meteoritenfälle zwischen 700 v. Chr. und 1920. Der Meteorit Nogata, gefallen im Jahr 861 n. Chr., ist der früheste beobachtete Fall, von dem heute noch Material aufbewahrt wird.

Der erste registrierte Meteorit in Europa, von dem noch Material vorhanden ist, fiel 1400 n. Chr. in Elbogen in Böhmen. Großes Aufsehen erregte der Fall von Ensisheim im Elsass, bei dem im Jahre 1492 ein Steinmeteorit unter großem Getöse vom Himmel fiel. Über das Ereignis berichteten zahlreiche Chroniken und Flugblätter. Die ältesten auf der Erde gefundenen Überreste von Meteoriten sind so genannte fossile Meteoriten, das heißt Meteoriten, die einen Stoffaustausch mit dem Gestein, in das sie eingebettet sind, erfahren haben und deren meteorische Herkunft nur noch an ihrer Struktur zu erkennen ist. In Kalksteinschichten in Schweden sind zum Beispiel eingebettete Fragmente von fossilen chondritischen Meteoriten gefunden worden, die im Ordovizium vor etwa 450–480 Millionen Jahren auf die Erde gefallen sind.

Als spektakuläres Ereignis der jüngeren Zeit gilt eine Beobachtung am 30. Juni 1908 (Tunguska-Ereignis). Zeugen beobachteten am Himmel über der sibirischen Tunguska-Region einen blassblauen Feuerball. Kurz darauf machte die Druckwelle einer Explosion rund 2.000 Quadratkilometer Wald dem Erdboden gleich, das entspricht einem Umkreis von etwa 50 Kilometer. Die durch die Explosion verursachten Luftdruckschwankungen konnten noch in London registriert werden. Neben anderen Theorien wird vermutet, dass es sich bei diesem Ereignis um die Explosion eines Meteoroiden, vermutlich eines Kometenkernfragments oder eines kleineren Asteroiden, von etwa 50 bis 100 Meter Durchmesser in einer Höhe von etwa 10.000 Metern handelte. Meteoriten oder ein Krater, die durch das Ereignis entstanden sein könnten, wurden in dem entsprechenden Gebiet bisher nicht gefunden, aber einige Stunden nach dem Ereignis fiel in der Nähe von Kiew der Meteorit Kagarlyk. Bisher ist ungeklärt, ob dies ein zufälliges Aufeinandertreffen der beiden Ereignisse ist oder ob ein Zusammenhang besteht.

Meteoritisches Eisen wurde schon vor der eigentlichen Eisenzeit zur Herstellung von Kultgegenständen, Werkzeugen oder Waffen benutzt. So wurden etwa in einem kleinen Gräberfeld aus der Zeit von 3500 bis 3000 v. Chr. bei der ägyptischen Siedlung Gerzeh Eisengegenstände mit einem Nickelgehalt von 7,5 Prozent gefunden, was den meteoritischen Ursprung nahe legt. Eine Dolchklinge aus meteoritischem Eisen wurde auch in der Grabkammer des Pharaos Tutanchamun gefunden. Auch heute wird das so genannte Meteoriteneisen, wegen seiner relativen Seltenheit, als Schmuck oder als Teil von handgemachten Messern verwendet. Ätzt man Meteoriteneisen mit Säure, zeichnet sich ein Muster ab, da die verschiedenen Metalle unterschiedlich stark von der Säure angegriffen werden. Man spricht dann auch von Meteoritendamast.

Geschichte der Meteoritenforschung

Die wissenschaftliche Erforschung von Meteoriten begann am Ende des 18. Jahrhunderts. Die erste Veröffentlichung über die chemische Analyse eines 1768 bei Lucé in Frankreich gefallenen Steines mit modernen chemischen Methoden wurde 1777 von den Chemikern Fourgeroux, Chadet und Lavoisier im *Journal de Physique* veröffentlicht. Allerdings kamen die Autoren zu dem falschen Schluss, dass der Stein irdischen Ursprungs und möglicherweise durch Blitzeinschlag in Sandstein entstanden sei.

Als Meilenstein in der Akzeptanz von Meteoriten als außerirdischen Objekten gilt die Veröffentlichung des Physikers Ernst F. F. Chladni *Ueber den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen*. In diesem 1794 veröffentlichten Aufsatz diskutiert Chladni historische Berichte über Meteorite und Feuerkugeln und stellt die Hypothese auf, dass diese Erscheinungen mit Berichten über vom Himmel gefallene Stein- und Eisenmassen verknüpft sind. Außerdem schlägt er vor, dass diese Körper aus dem Weltraum stammen. Auslöser für diese Arbeit waren Diskussionen mit dem Physiker Georg Christoph Lichtenberg, welcher 1791 selbst einen Feuerball beobachtet hatte.

Während an der Existenz von Meteoren und Feuerkugeln auch vorher nicht gezweifelt wurde, wurden Berichte über vom Himmel gefallene Steine oder Eisenmassen vor der Veröffentlichung Chladnis von Wissenschaftlern meist als Aberglauben abgetan. Wenn überhaupt, dann wurde höchstens ein atmosphärischer Ursprung von Meteoriten akzeptiert, beispielsweise durch Blitze verkohlte Vögel oder atmosphärische Staubbzusammenballungen. Besonders Behauptungen, dass Meteoriten außerirdischen Ursprungs seien, wurden oft auch von aufgeklärten und gebildeten

Menschen mit Spott und Polemik beantwortet. Ein Grund hierfür war der auf Aristoteles zurückgehende und von Isaac Newton bekräftigte Glaube, dass das Sonnensystem, abgesehen von den größeren Körpern wie Planeten, Monden und Kometen, frei von Materie ist und höchstens von einer Äther genannten Substanz erfüllt ist.

Auch Chladnis Thesen erfuhren zunächst bei den meisten Wissenschaftlern Ablehnung, durch weitere beobachtete Fälle (beispielsweise Wold Cottage 1795, L'Aigle 1803) und Forschungsberichte erhielten sie aber zunehmend Unterstützung. William Thomson lieferte 1794 die erste mineralogische Beschreibung eines bei Siena in Italien gefallenen Steins, in der er zeigte, dass dieser von allen bekannten irdischen Gesteinen verschieden ist. Edward C. Howard und Jacques-Louis de Bournon analysierten 1802 vier Meteoriten auf ihre chemische Zusammensetzung. De Bournon erwähnte dabei erstmals in diesen gefundene Silikatkügelchen, welche dann 1869 durch Gustav Rose als Chondren benannt wurden.

Während noch in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts die fälschlicherweise als Mondvulkane interpretierten Mondkrater oder Staubbzusammenballungen in der Hochatmosphäre als Herkunft der meisten Meteoriten diskutiert wurden, nahm man später den Asteroidengürtel oder gar einen interstellaren Ursprung an. Dass fast alle Meteoriten Bruchstücke aus dem Asteroidengürtel sind, hat sich letztendlich um 1940 durch fotografische Aufnahmen einiger Meteore durch F. L. Whipple und C. C. Wylie, aus denen auf elliptische Bahnen geschlossen werden konnte, abgezeichnet. Bei einem interstellaren Ursprung wären hyperbolische Bahnen zu erwarten gewesen. Im Jahr 1959 konnte die Bahn des Meteoriten *Pribam* durch mehrere Kameras aufgezeichnet und der Orbit berechnet werden, dessen Aphel im Asteroidengürtel lag. Allerdings konnte dann doch Anfang der 1980er Jahre auch nachgewiesen werden, dass etwa jeder tausendste Meteorit vom Mond und eine vergleichbare Anzahl sogar vom Mars stammt.

Aktuelle Meteoritenforschung

Meteoriten repräsentieren bisher neben den Mondproben der Apollo- und Luna-Missionen das einzige außerirdische Material, das in irdischen Labors untersucht werden kann. Deswegen ist die Forschung an Meteoriten sehr wichtig für die Planetologie und kosmochemische Fragestellungen. So können anhand von Isotopenmessungen an präsolaren Mineralen Modelle der Nukleosynthese in Supernovae und der Umgebung von Roten Riesen überprüft werden. Auch für die Erforschung der Entstehung

unseres Planetensystems sind Meteorite sehr wichtig. So konnte für kalzium-aluminium-reiche Einschlüsse in primitiven Chondriten mit verschiedenen Datierungsmethoden ein Alter zwischen 4,667 und 4,671 Milliarden Jahren nachgewiesen werden. Weil dies vermutlich die ältesten im Sonnensystem entstandenen Minerale sind, markieren sie den Beginn der Entstehung unseres Planetensystems. Die Datierung der verschiedenen Klassen von Meteoriten erlaubt so eine zunehmend genauere zeitliche Darstellung der einzelnen Prozesse im frühen Sonnensystem. Auch sind in Meteoriten zahlreiche Mineralien, wie beispielsweise Niningerit, entdeckt worden, die bisher auf der Erde nicht gefunden wurden.

Meteoriteneinschläge haben zudem die Erdgeschichte stark beeinflusst, deshalb sind sie auch aus diesem Grund von Interesse. So war die Erde nach ihrer Entstehung einige hundert Millionen Jahre lang bis vor etwa 3,9 Milliarden Jahren einem starken Bombardement durch außerirdische Objekte ausgesetzt. Weithin bekannt ist inzwischen der KT-Impakt genannte Meteoriteneinschlag vor 65 Millionen Jahren, der für das Aussterben der Dinosaurier verantwortlich gemacht wird. Auch das heute allgemein akzeptierte Alter der Erde von 4,55 Milliarden Jahren wurde zuerst 1953 von C. C. Patterson mittels Uran-Blei-Datierung am Meteoriten *Canyon-Diablo* bestimmt.

Beginnend mit der Entdeckung von organischen Verbindungen im kohligen Chondriten Murchison, spielen Meteoriten eine zunehmend größere Rolle in der Astrobiologie und der Erforschung des Ursprungs des Lebens. Neben Aminosäuren und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, welche inzwischen auch in anderen kohligen Chondriten nachgewiesen wurden, wurden in Murchison auch Fullerene und sogar Diaminosäuren nachgewiesen. Es wird vermutet, dass Diaminosäuren eine wichtige Rolle in den ersten präbiotischen Reaktionen, aus denen letztlich die RNA und die DNA hervorgingen, gespielt haben. Diese Entdeckung ist somit ein Indiz dafür, dass einige wichtige Bausteine des Lebens durch Meteoriten auf die Erde gelangt sein könnten. Ein noch aufsehenerregenderes Forschungsergebnis in diesem Bereich war die bis heute kontrovers diskutierte Entdeckung angeblich fossiler Spuren bakteriellen Lebens im Marsmeteoriten ALH84001.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Meteorit> (gekürzt). Historie: 25.11.02: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Epo, Aglarech, Alkuin, Galilea, Bertonymus, Srbauer, Odin, Crux, OinkOink, Media lib, Arnomane, Bigkahuma, Rivi, Redecke, Ulrich.fuchs, ASK, AkaBot, Werner Walter, El Dirko, Xantener, Attallah, TOMM, Mnolf, Terabyte, Fristu, Karl-Henner, Matthäus Wander, Rsuessbr, Andresluure, Meteorite-Martin, MIBUKS, Frank Dickert, Dannycool, Stefan Kühn, RKraasch, BWBot, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Impakt

Als den Impakt (Einschlag, Aufprall, von lat. *impingere* = »einschlagen«; PPP: *impactus*) bezeichnet man im Allgemeinen den Einschlag eines Himmelskörpers auf der Oberfläche eines anderen, zum Beispiel den den Einschlag eines Meteoriten auf der Erdoberfläche. Ein solcher Einschlag ist die Entstehungsursache für die so genannten Einschlagkrater.

Auswirkung auf die Erdgeschichte

Die etwa 4,5 Milliarden Jahre alte Erdgeschichte ist wesentlich durch die Einwirkung von Meteoriteneinschlägen geprägt. Die Entstehung unseres Planeten im jungen Sonnensystem ist ohne die fortwährenden Kollisionen mit Asteroiden jeder Größe nicht zu denken, denn diese Ereignisse sorgten möglicherweise nicht nur für die Herkunft des irdischen Wassers in Form der



Abb. 109: Zeichnung eines (heutzutage sehr unwahrscheinlichen extrem großen) Einschlags auf der Erde

Ozeane, sondern verhinderte bis vor etwa 3,9 Milliarden Jahren – durch eine »Heavy-Bombardement« genannten Phase – auch die Bildung einer stabilen Erdkruste.

Ein Großteil der Materie ist bereits seit dieser Zeit durch die Gravitationskraft der Erde oder anderer Himmelskörper eingefangen worden. Jährlich fallen jedoch noch etwa 20.000 Meteoriten zur Erde, meist ohne in der Landschaft deutliche Spuren zu hinterlassen. Die von den größten Meteoriten ausgelösten Naturkatastrophen der Vergangenheit lassen sich oft nur noch indirekt, zum Beispiel durch ein von ihnen ausgelöstes Artensterben oder einen globalen Klimawandel nachweisen.

Gefährlichkeit von Meteoriteneinschlägen

Global gefährliche Folgen bei Meteoriteneinschlägen entstehen nur dann, wenn die Objekte einen Durchmesser von mehr als 500 m besitzen. Wissenschaftler im amerikanischen New Mexico zählten mehr als 1.100 Asteroiden, die einen Durchmesser von mehr als 1 km haben und sich auf einer Umlaufbahn befinden, die sie einmal der Erde gefährlich nahe bringen könnte. Einschläge von Brocken mit einem solchen Durchmesser

würden heute verheerende Folgen haben: Milliarden von Menschen könnten Opfer von Flutkatastrophen und globalen Klimaveränderungen werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Meteorit im Meer aufprallt, wäre relativ groß, denn 71 % der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt. Die Folge eines solchen Aufpralls wäre ein Mega-Tsunami, der ganze Küstenlandschaften überschwemmen würde.

Rein statistisch gesehen muss man mit einem derartigen Einschlag alle 500.000 bis 10 Millionen Jahre rechnen. Ereignisse wie der im Tertiär stattgefundenen ➔KT-Impakt sollen etwa alle 100 Millionen Jahre eintreffen. Wäre ein Asteroid größer als 10 km, würde alles Leben auf der Erde vernichtet.

Frühere Meteoriteneinschläge

Zeugnisse von stattgefundenen Meteoriteneinschlägen sind auf der Erde weniger augenfällig als auf anderen Planeten und Monden, denn

- kleinere Meteoriten verglühen bereits in der schützenden Atmosphäre vor dem Aufprall auf die Erdoberfläche,
- die Krater größerer Meteoriteneinschläge werden durch atmosphärisch bedingte Verwitterung in geologisch kurzer Zeit bis zur Unkenntlichkeit verformt und
- die Erdkruste wird durch tektonische Prozesse ständig erneuert, so dass der Großteil der Erdoberfläche relativ jung ist.

Nur die Impaktkrater der größten und folgenschwersten Meteoriteneinschläge der letzten Jahrmillionen sind heute noch im Landschaftsbild sichtbar. Als Faustregel für das Verhältnis des Durchmessers des Einschlagkörpers zum Durchmesser des resultierenden Kraters gilt 1:20 für Steinmeteoriten und 1:40 für Eisenmeteoriten.

Quellen: <http://de.wikipedia.org/wiki/Impakt>, <http://de.wikipedia.org/wiki/Meteoriteneinschlag>. Historie: 4.12.03: Angelegt von Galilea, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Galilea, Ed.dunkel, Mex, Epo, Odin, Srbauer, Stefan Ruehrup, TOMM, Aglarech, Herbye, DFK, Soebe, Fristu, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Einschlagkrater

Ein Einschlagkrater (Impaktkrater) ist eine Senke oder Vertiefung auf der Oberfläche eines Planeten, Mondes oder ähnlichen Himmelskörpers, die durch Kollision mit einem ➔Asteroiden oder durch einen Meteoriteneinschlag entsteht.

Allgemeines

Alle Himmelskörper des Sonnensystems mit fester Oberfläche besitzen Einschlagkrater. Ein gutes Beispiel dafür ist der ➔Mond, dessen Oberfläche von ihnen übersät ist. Auf der Erde, deren Oberfläche ständigen Veränderungsprozessen durch Erosion, Ablagerungen von Sedimenten und geologische Aktivität unterworfen ist, lassen sich Einschlagkrater nicht so leicht erkennen wie auf von Erosion weniger betroffenen Himmelskörpern.

Entstehung

Nicht alle ➔Meteoriten verglühen oder zerplatzen in der ➔Atmosphäre. Größere Objekte mit der Masse von einigen Tonnen werden vom Luftwiderstand kaum abgebremst. Sie erreichen mit Geschwindigkeiten von 10 bis 70 Kilometern pro Sekunde die Oberfläche. Beim Aufprall können sie bis zu einer Tiefe von 100 Metern in das Gestein eindringen. Da die kinetische Energie dabei in Sekundenbruchteilen in thermische Energie umgewandelt wird, kommt es zu einer Explosion. Das umliegende Material wird dadurch weggesprengt, und es entsteht eine kreisrunde Senke, an deren Rändern das ausgeworfene Material einen Wall bildet. Um den Krater herum findet sich ausgeworfenes Material, die so genannte Ejekta. Diese Ejekta kann Sekundärkrater um den primären Krater hervorrufen. Dringt ein Objekt mit sehr hoher Geschwindigkeit in die Oberfläche ein, kommt es zur Rückfederung des Materials, wodurch ein Zentralberg in der Kratermitte gebildet wird.

Große und bekannte Einschlagkrater

Krater der Erde – Auf der Erde wurden über 100 Einschlagkrater mit 150 bis 200 km Durchmesser entdeckt. Allerdings trifft die Bezeichnung Krater für viele der aufgezählten Strukturen nicht mehr zu, da der eigentliche Krater längst abgetragen (erodiert) wurde (zum Beispiel Vredefort-Krater) oder vollständig von jüngeren Sedimenten überdeckt wurde (zum Beispiel Chicxulub-Krater).

Der größte Einschlagkrater der Erde ist vermutlich der Vredefort-Krater nahe des Witwatersrand-Gebirges bei Vredefort in Südafrika. Der Einschlag eines Himmelskörpers bildete dort verschiedenen Angaben zufolge vor 2 bis 3,4 Milliarden Jahren einen bis 320 km langen und 180 km breiten Krater, von dem allerdings nur noch ein bis zu 50 km großer Rest vorhanden ist.

Der Chicxulub-Krater in Yucatán (Mexiko) hat etwa 180 km Durchmesser. Der dortige Einschlag eines Himmelskörpers vor etwa 65 Mil-

lionen Jahren soll durch globale Tsunamis, Waldbrände und die daraus resultierende Verunreinigung der Atmosphäre die Dinosaurier und viele andere Spezies ausgelöscht haben.

Zwei Einschlagkrater in Deutschland sind das Nördlinger Ries in Bayern, das etwa 24 km Durchmesser aufweist und vor 14,7 Millionen Jahren entstand, und das 40 km entfernte Steinheimer Becken in Baden-Württemberg. Beide Krater besitzen einen Zentralberg. Man geht davon aus, dass die beiden Krater zur gleichen Zeit entstanden sind, vielleicht sogar durch das gleiche Ereignis (dem so genannten Ries-Ereignis, vermutlich durch einen zerborstenen Asteroiden). Möglicherweise ist auch die Wipfelsfurt, ein von der Donau durchflossener und etwa 500 m großer Talkessel bei Kelheim, ein zeitgleich mit dem Nördlinger Ries entstandener Einschlagkrater.



Abb. 110: Gosses Bluff-Krater, Australien

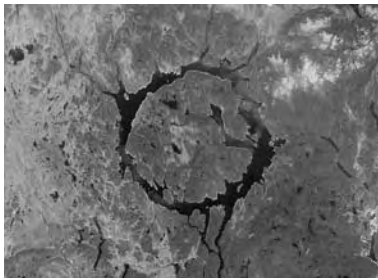


Abb. 111: Manicouagan-Krater, Kanada

Der sehr bekannte Barringer-Krater (auch einfach nur *Meteor Crater* genannt), der vor nur etwa 50.000 Jahren entstand, nur etwa 1,5 km Durchmesser aufweist und bis 170 m tief ist, befindet sich in der Wüste von Arizona (USA). Aufgrund der geringen Erosion befindet er sich in einem gut erhaltenen Zustand. Er ist ein typisches Beispiel für einen einfachen Krater ohne Zentralberg.

Krater anderer Himmelskörper – Der größte Einschlagkrater unseres Sonnensystems ist mit 2.240 km Durchmesser wohl das Südpol-Aitken-Becken auf dem Erd-→Mond. Hellas Planitia ist mit 2.100 km Durchmesser der größte Einschlagkrater auf dem →Mars. Caloris Planitia ist mit etwa 1.340 km Durchmesser der größte Einschlagkrater auf der zu 40% bekannten Oberfläche des →Merkurs. Mead ist mit etwa 280 km Durchmesser der größte Einschlagkrater auf der →Venus. Herschel ist mit etwa 130 km Durchmesser und bis 10 km Tiefe der größte Krater auf dem Saturn-Mond Mimas und hätte diesen fast zerstört.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Einschlagkrater> (gekürzt). Historie: 8.6.03: Angelegt von Stefan Ruehrup, danach bearbeitet von den Hauptautoren TOMM, Stefan Ruehrup, Mex, Bertonymus, Epo, Arnomane, Grabenstedt, Galilea, Odin, Sigg, Zwobot, Martin-DI, Erath, Attallah, Herbye, ArtMechanic, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Hoba-Meteorit

Der Hoba-Meteorit ist der bislang größte auf der Erde gefundene Meteorit. Er befindet sich auf dem Gelände der »Hoba« Farm, etwa 20 km westlich von Grootfontein in Namibia. Die Angaben über das Gewicht schwanken zwischen 50 bis 60 Tonnen. Sein Volumen beträgt etwa neun Kubikmeter. Der Meteorit schlug vor etwa 80.000 Jahren auf der Erde ein. Sein geschätztes Alter beträgt 190 bis 410 Millionen Jahre.

Der Meteorit besteht zu etwa 82 % aus Eisen, zu etwa 16 % aus Nickel und zu etwa 1 % aus Kobalt. Darüber hinaus enthält er eine Reihe von Spurenelementen, wie Chrom, Gallium, Germanium, Iridium, Kohlenstoff, Kupfer, Schwefel und Zink. Meteoriten mit Nickelgehalten von über 15 % werden als Ataxite bezeichnet.

Der Hoba-Meteorit wurde 1920 von Jacobus Hermanus Brits entdeckt. Am 15. März 1955 wurde er mit Genehmigung der damaligen Farmbesitzerin, Frau O. Scheef, zum nationalen Denkmal erklärt. Der Besitzer des Jahres 1987, Herr J. Engelbrecht, hat dem *Rat für Denkmäler*



Abb. 112: Hoba-Meteorit

das Gebiet um den Meteoriten herum geschenkt. Daraufhin wurde das Gelände um den Meteoriten herum vom *Rat für Denkmäler* und der *Rössing Uranium Ltd.* verschönert.

Das Erdreich um den Meteoriten wurde ausgegraben und eine Art Amphitheater angelegt. Ferner wurden Toiletten, ein ausgebauter Pfad zum Meteoriten, ein kleines Kassenhaus mit einem Geschäft und Grillplätze angelegt.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hoba-Meteorit>. Historie: 14.6.04: Angelegt von Frank Dickert, danach bearbeitet von den Hauptautoren Frank Dickert, Alkuin, Arnomane, Joli, Epo, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

ALH84001

ALH84001 ist ein 1,94 kg schwerer ➔Meteorit, der bereits 1984 im Allan-Hills-Eisfeld in der Antarktis gefunden wurde, aber erst 1993 als SNC-Meteorit (Marsmeteorit) identifiziert wurde. Er besteht hauptsächlich aus grobkörnigem kataklastischen Orthopyroxenit und definiert deshalb eine neue Untergruppe der SNC-Meteoriten, welche als SNC-Orthopyroxenit bezeichnet wird. Im Vergleich zu anderen Marsmeteoriten, welche meist ein relativ junges geologisches Alter haben, entstand ALH84001 bereits vor zirka vier Milliarden Jahren. Gemäß Messung des Bestrahlungsalters wurde ALH84001, vermutlich durch den ➔Impakt eines Asteroiden auf dem ➔Mars, vor etwa 15 Millionen Jahren von der Marsoberfläche weggeschleudert und landete vor etwa 13.000 Jahren auf der ➔Erde.

In ALH84001 wurden 1996 Strukturen gefunden, welche als Fossilien von früher auf dem Mars existierenden Einzellern gedeutet wurden, was jedoch bis heute kontrovers diskutiert wird. Auf diesen Strukturen baut unter anderem die Theorie der Panspermie auf, nach der das Leben auf der Erde durch Keime aus dem All entstanden ist.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/ALH84001>. Historie: 13.9.03: Angelegt von Epo, danach bearbeitet von den Hauptautoren Epo, Arnomane, Bertonymus, Achim Raschka, Acf, Srbauer, Vulture, Aglarech, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Neuschwanstein

Der ➔Meteorit Neuschwanstein fiel am 6. April 2002 bei Füssen in Bayern in der Nähe des Schlosses Neuschwanstein. Neuschwanstein wurde als Enstatit-Chondrit (Typ EL6) klassifiziert.

Obwohl der zugehörige 91 km lange ➔Meteor beobachtet wurde und die Bahn vom Europäischen Feuerkugelnetz aufgezeichnet wurde, konnte erst am 14. Juli 2002 bei einer gezielten Suche das erste Stück von 1,75 kg des Meteoriten gefunden werden. Dieses Fundstück ist heute im Rieskrater-Museum in Nördlingen zu sehen. Später wurden weitere Stücke von 1,63 kg und 2,84 kg (Letzteres auf Tiroler Gebiet) geborgen.

Aus den vom Europäischen Feuerkugelnetz aufgezeichneten Daten konnte die Umlaufbahn des ➔Meteoroiden um die Sonne berechnet werden, und es zeigte sich, dass diese nahezu exakt mit der Bahn des Meteoriten Pribram übereinstimmte, dessen Fall bereits 1959 in Tschechien

beobachtet worden war. Es wurde deswegen vermutet, dass beide Meteoriten vom gleichen Mutterkörper stammen. Pribram ist jedoch ein gewöhnlicher Chondrit, so dass dieser Mutterkörper heterogener Natur sein müsste. Es könnte sich dann um einen nur von der Gravitationskraft zusammengehaltenen »Schutthaufen« (engl. *rubble pile*) handeln.

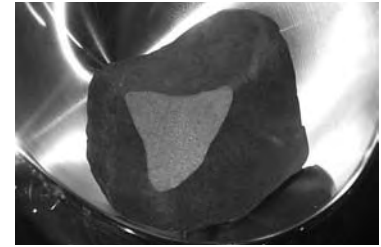


Abb. 113: Meteorit Neuschwanstein

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Neuschwanstein_\(Meteorit\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Neuschwanstein_(Meteorit)). Historie: 19.4.04: Angelegt von Epo, danach bearbeitet von den Hauptautoren Epo, Vesta, Arnomane, FrederikRamm, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

KT-Impakt

Als KT-Impakt (Kreide-Tertiär-Einschlag, engl. *Cretaceous-Tertiary Impact*) bezeichnet man einen Meteoriteneinschlag, der sich vor etwa 65 Millionen Jahren an der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär ereignet hat und oft für das Ende des Dinosaurierzeitalters (»Massenaussterben«) verantwortlich gemacht wird. Das Aussterben der meisten damals lebenden Tierarten markiert den Übergang vom Erdmittelalter zur Erdneuzeit (vom Mesozoikum zum Känozoikum).

Wegen der Ersetzung des Begriffs »Tertiär« durch die Epoche des Paläogens durch die Internationale Stratigrafische Kommission (ICS) spricht man seit dem Jahr 2004 auch vom KP-Impakt (engl. *Cretaceous-Paleogenic Impact*).

Indizien für Meteoriteneinschläge

Obwohl ein Eintrag extraterrestrischen Materials durch einen oder mehrere Meteoriteneinschläge in die Gesteinsschicht zu diesem erdgeschichtlichen Zeitpunkt durch Forschungsergebnisse stark unterstützt wird, ist die Frage, ob dieses Ereignis tatsächlich für das Massenaussterben zu dieser Zeit verantwortlich ist, noch nicht restlos geklärt. Als Ort des Einschlags wird oft der Chicxulub-Krater im Golf von Mexiko, nahe der Halbinsel Yucatán, genannt. Kontrovers diskutierte Untersuchungen an Bohrkernen aus dem Kratergebiet durch G. Keller und andere deuten allerdings darauf hin, dass der Chicxulub-Krater etwa 300.000 Jahre älter sein könnte als

die Kreide-Paläogen-Grenzschicht. Dieser Einschlag könnte so gesehen nicht das Massenaussterben verursacht haben, das im Falle eines global verheerenden Impakts in einem wesentlich kürzeren Zeitraum als den obigen 300.000 Jahren abgelaufen sein muss. Alternativ wird daher auch die Theorie vertreten, dass es sich bei dem KT-Impakt um den Einschlag mehrerer Asteroiden und Kometen innerhalb einer kurzen Zeitspanne handelt.

Ein wesentliches Indiz für die Hypothese eines Meteoriteneinschlags oder mehrerer Einschläge ist der ungewöhnlich hohe Iridium-Gehalt vieler Gesteine nahe der Kreide-Paläogen-Grenze. Da der Erdmantel im Vergleich zu Steinmeteoriten arm an Iridium ist, vermutet man, dass sich in diesen Schichten der beim Einschlag aufgewirbelte Staub wiederfindet. Starke Unterstützung erhält die Hypothese eines Meteoriteneinschlags durch eine Anomalie der Chrom-Isotopenverteilung in derselben Schicht, die auch die Iridium-Anomalie enthält – diese ist auf der Erde ansonsten homogen. Während bei der Iridiumanomalie noch eingewendet wurde, dass auch vulkanische Aktivitäten eine Iridiumanreicherung bewirken könnten, ist die Isotopenanomalie bei Chrom nur durch Beimischung von extraterrestrischem Material zu erklären. Ein möglicher Kandidat für den Einschlagskörper ist ein →Asteroid mit einer Zusammensetzung ähnlich den kohligen Chondriten, weil diese die gleiche Chrom-Isotopenverteilung zeigen wie die KT-Grenzschicht. Da →Kometen vermutlich aus Wassereis und Staubteilchen mit einer Zusammensetzung ähnlich den kohligen Chondriten bestehen, ist auch ein kometarer Ursprung des Einschlagkörpers nicht auszuschließen.

Klimaänderung durch den Impakt

Der Einschlag eines →Meteoriten mit dem Durchmesser von mehreren Kilometern bewirkt eine gewaltige Explosion, die den Eintrag von Staubpartikeln in die →Atmosphäre und eine dadurch bedingte weltweite Klimaänderung zur Folge haben kann. Durch die Abschwächung der Sonneneinstrahlung sinken die Temperaturen und das Pflanzenwachstum geht zurück, was sich auf die gesamte Nahrungskette auswirkt. Es wird daher vermutet, dass das Aussterben der Dinosaurier am Ende der Kreidezeit mit diesem Ereignis zusammenhängen könnte. Sollte sich allerdings bestätigen, dass die Entstehung des Chicxulub-Kraters nicht mit dem KT-Impakt identisch ist und daher kein Massenaussterben verursachte, ist fraglich, ob selbst Einschläge dieser Größenordnung ausreichen, um Massenaussterben zu verursachen.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/KT-Impakt> (gekürzt). Historie: 7.6.03: Angelegt von Stefan Ruehrup, danach bearbeitet von den Hauptautoren Epo, Regiomontanus, Stefan Ruehrup, Arnomane, Aglarech, TomCatX, Odin, Baddabing, Chd, FlaBot, Galilea, OliD, Head, Brummfuss, Nerd, Stefan Kühn, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Asteroidengürtel

Der Asteroiden- oder Hauptgürtel ist jener Bereich des Sonnensystems zwischen den Bahnen von →Mars und →Jupiter, in dem der Großteil der →Asteroiden oder Kleinplaneten um die Sonne wandert. Er wird heute mit etwa 2,0 bis 3,4 AE angegeben. Johann Palisa berechnete ihn schon vor 100 Jahren mit 2,2 bis 3,6 AE.

Entdeckung

Aufgrund einer als Titius-Bode-Reihe bezeichneten empirischen Formel, die Aussagen über die Ordnung der Planeten macht, wurde gegen Ende des 18. Jahrhunderts mit der systematischen Suche nach einem laut dieser Formel »fehlenden« Planeten in diesem Bereich begonnen. Mit seiner Entdeckung des später als →Ceres benannten größten Asteroiden am 1. Januar 1801 glaubte Giuseppe Piazzi, den Planeten gefunden zu haben. Doch kamen in den folgenden Jahren nach und nach weitere, ähnliche Entdeckungen hinzu – zum Beispiel →Pallas (1802) und →Vesta (1807). Bis 1890 wusste man schon von 300 Asteroiden in dieser »Planetenlücke« – bis heute sind es über 100.000 Objekte; darunter auch solche mit einem eigenen kleinen Mond wie beispielsweise Ida und sein Begleiter Dactyl.

Die Objekte

Bei den Asteroiden handelt sich um Objekte jeglicher Größe, von kleinen, unregelmäßig geformten Brocken bis zu Ceres, dessen Durchmesser mit etwa 945 Kilometern etwa einem Drittel des Durchmessers unseres →Erdmondes entspricht. Bis auf den hellsten, Vesta, sind sie von der Erde aus nicht mit bloßem Auge auszumachen. Die Gesamtmasse aller Asteroiden des Gürtels ist allerdings kleiner als die des Erdmondes.

Die Zusammensetzung der Asteroiden ist nicht im gesamten Hauptgürtel gleich. Im inneren Bereich (zwischen 2,0 und 2,5 AE) dominieren helle Objekte der Spektralklassen E (Albedo ~0,4) und S (Albedo ~0,2), auch die V-Klasse ist dort angesiedelt. Es handelt sich dabei um silikatreiche Objekte, die im Laufe ihrer Geschichte teilweise oder auch ganz aufgeschmolzen wurden. Ab einem Abstand von etwa 2,5 AE domi-

nieren die dunklen, kohlenstoffhaltigen Asteroiden der Spektralklasse C (Albedo $\sim 0,05$). Ihre Zusammensetzung unterscheidet sich deutlich von den Asteroiden im inneren Bereich des Hauptgürtels. Sie dürften aus einer Mischung von Eis und Gestein hervorgegangen sein, die nur mäßig erhitzt wurde. Im äußeren Bereich des Asteroidengürtels treten dann vermehrt Objekte der Spektralklassen D und P auf. Diese sind dem C-Typ zwar ähnlich, wurden aber in ihrer Geschichte offenbar kaum nennenswert erhitzt, so dass auf ihrer Oberfläche noch Eis vorhanden sein könnte. Mit zunehmendem Abstand von der Sonne ist also eine Entwicklung von Objekten mit komplexer geologischer Vergangenheit hin zu primitiven (wenig veränderten) Asteroiden feststellbar.

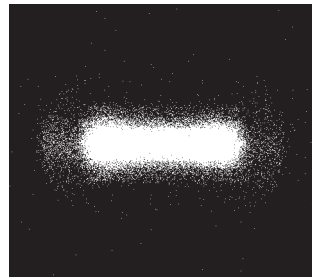


Abb. 114: Verteilung der Hauptgürtelasteroiden senkrecht zur Ekliptik

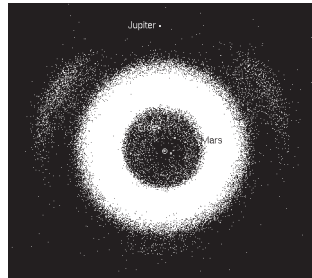


Abb. 115: Objektverteilung im Asteroidengürtel

Verteilung, Lücken

Die Asteroiden sind im Hauptgürtel nicht gleichmäßig verteilt, da die Gravitation des Planeten Jupiter – er vereint rund 70 Prozent der Gesamtmasse der Planeten unseres Sonnensystems in sich – Bahnstörungen verursacht. Bei ganzzahligen Verhältnissen der Umlaufzeiten der Asteroiden und des Jupiter treten Resonanzen auf, die den Gravitationseffekt verstärken. In diesen Bereichen sind keine stabilen Asteroidenbahnen möglich, so dass hier Lücken im Hauptgürtel auftreten. Nach dem Astronomen Daniel Kirkwood, der diese Lücken bereits 1866 festgestellt hatte, wurden sie Kirkwoodlücken genannt.

Entstehung

In der Wissenschaft gibt es momentan zwei wichtige Strömungen zur Erklärung der Entstehung des Asteroidengürtels:

- Die Urnebel-Hypothese besagt, dass der Asteroidengürtel gleichzeitig mit dem restlichen Sonnensystem aus einem Urnebel hervorgegangen ist und aufgrund der Einwirkung des Jupiter nicht zu einem Planeten zusammenwachsen konnte. Kritiker bemängeln daran die gering er-

scheinende Wahrscheinlichkeit, dass so viele Asteroiden in relativ großer Nähe zueinander 5 Milliarden Jahre lang nicht miteinander kollidieren und einen Planeten bilden sollten, insbesondere weil es offenbar Kräfte gibt, die derartige Konzentrationsprozesse wahrscheinlich machen. Das Argument wird aber durch die sehr großen Entfernungen zwischen den Asteroiden relativiert.

- Nach der Kollisions-Hypothese gab es an der entsprechenden Stelle einmal einen kleinen Planeten, der aber durch die Kollision mit einem größeren Asteroiden in Stücke gerissen wurde. Kritiker bemängeln an dieser Theorie die geringe Wahrscheinlichkeit derartiger Einschläge und die für einen Planeten sehr geringe Masse der verbleibenden Trümmer. Letzteres ist aber eventuell auch durch Abstürze einiger Asteroiden auf Mars und Jupiter erklärbar.

Alles in allem wird die Urnebel-Hypothese momentan in der Wissenschaft favorisiert. Entscheidendes wird man wohl erst durch eine genauere Untersuchung des Asteroidengürtels erfahren.

Sonstige Asteroidenvorkommen

Etwa zehn Prozent der bekannte Kleinplaneten laufen nicht auf Bahnen zwischen Mars und Jupiter:

- Innerhalb der Marsbahn bewegen sich die Amor-, Apollo- und Aten-Typ-Asteroiden.
- Auf den Bahnen der Planeten Mars, Jupiter und Neptun laufen Asteroiden um die Sonne, die als Trojaner bezeichnet werden.
- Jenseits des Neptun bewegen sich Transneptune beziehungsweise Objekte des Kuiper gürtels (KBO – *Kuiper Belt Objects*). In diesem Bereich werden mehr Objekte vermutet als im Hauptgürtel, aufgrund der großen Entfernung sind sie aber schwieriger nachzuweisen. Zudem finden sich unter den Transneptunen auch einige Objekte, deren Durchmesser über 1000 km liegt und die somit die größten Asteroiden im Hauptgürtel übertreffen.

Ein weiterer Asteroidengürtel, die Vulkanoiden, ist innerhalb der Merkurbahn zu erwarten, konnte aber bisher wegen der Sonnennähe nicht direkt nachgewiesen werden.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Asteroidengürtel>. Historie: 25.11.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Nephelin, Speck-Made, Vesta, Carl de, Alkuin, Arnomane, Herbye, Rivi, FlaBot, MGla, Zwobot, Echoray, AkaBot, Hashar, Tsui, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Ceres

(1) Ceres ist mit einem Äquatordurchmesser von 975 km der größte ➔Asteroid des ➔Asteroiden-Hauptgürtels mit seinen zahlreichen Objekten. Ceres wurde am 1. Januar 1801 von Giuseppe Piazzi als erster Asteroid entdeckt.

Entdeckung

Schon Johannes Kepler vermutete in der »Lücke« zwischen den Umlaufbahnen von ➔Mars und ➔Jupiter einen ➔Planeten, und die Entdeckung der Titius-Bode-Reihe um 1770 bestärkte derartige Vermutungen. Die von den Astronomen Franz Xaver von Zach und Johann Hieronymus Schröter gegründet »Himmelspolizey« machte sich ab 1800 daher gezielt auf die Suche nach dem vermuteten Planeten: Der Bereich um die Ekliptik wurde in 24 Abschnitte geteilt. Jeder dieser Abschnitte wurde einer Sternwarte zugeteilt, die ihn nach dem Planeten absuchen sollte. Piazzi, der das Objekt zunächst für einen ➔Kometen hielt, gelang seine Entdeckung allerdings zufällig während der Überprüfung eines Sternkataloges in der Neujahrsnacht 1801.

Nachdem Piazzi den neuen Himmelskörper aufgrund einer Erkrankung bald wieder aus den Augen verlor, entwickelte Carl Friedrich Gauß eine völlig neue Methode zur Bahnbestimmung, wodurch Ceres am 7. Dezember 1801 durch von Zach wieder aufgefunden werden konnte. Wie sich herausstellte, bewegt sich Ceres tatsächlich zwischen Mars und Jupiter, genau in dem von der Titius-Bode-Reihe vorhergesagten Abstand, um die Sonne. Ceres wurde daher, wie der 1781 entdeckte ➔Uranus, für einen Planeten gehalten, womit sich die Anzahl der Planeten im Sonnensystem zunächst auf acht erhöhte. Erst als die Zahl der zwischen Mars und Jupiter gefundenen Himmelskörper um 1850 rasch anstieg, setzten sich für diese Objekte die Bezeichnungen »Kleine Planeten«, »Kleinplaneten«, »Planetoiden« oder »Asteroiden« durch, womit auch Ceres ihren Status als Planet verlor.

Benennung – Piazzi ➔benannte den von ihm entdeckten Himmelskörper zunächst Ceres Ferdinandae, nach Ceres, der römischen Göttin des Ackerbaus und Patronin der Insel Sizilien, und zu Ehren von König Ferdinand IV von Neapel, der 1798 nach Palermo geflohen war. In Deutschland schlug Johann Elert Bode den Namen Juno vor (der dann für den dritten Asteroiden, ➔(3) Juno, aufgegriffen wurde), für kurze Zeit war auch der Name Hera in Gebrauch (der später an (103) Hera vergeben wurde). Von

Zach stellte aber klar, dass »Herr Prof. Piazzi nunmehr sein eigenes Kind getauft hat, [...] wozu er als erster Entdecker offenbar das Recht hat«. Da die Ehrung von König Ferdinand in anderen Nationen aber auf Widerstände stieß, wurde dieser Namensteil bald fallen gelassen.

Im Jahre 1803, also zwei Jahre nach der Entdeckung von Ceres, wurde das chemische Element Cer entdeckt und nach diesem Asteroiden benannt.

Umlaufbahn

Ceres bewegt sich in der Mitte des Asteroidengürtels, in einem mittlerem Abstand von 2,77 AE, in 1.682 Tagen um die Sonne. Die Periheldistanz beträgt 2,54 AE, die Apheldistanz 2,99 AE. Die Umlaufbahn ist um 10,6° gegen die Ekliptik geneigt, die Bahnexzentrizität beträgt 0,080.

Die synodische Periode von Ceres liegt bei 467 Tagen. Während der Opposition ist sie zwischen 1,59 AE und 2,00 AE von der Erde entfernt und erreicht eine scheinbare Helligkeit von bis zu 6,7 mag. Ceres kann daher bereits mit einem Fernglas oder einem kleinen Teleskop aufgesucht werden.

Beschaffenheit

Größe und Masse – Ceres ist der größte und massenreichste Asteroid im inneren Sonnensystem. Für die Masse wurde ein Wert von $4,70 \pm 0,04 \times 10^{20}$ Sonnenmassen ($9,35 \times 10^{20}$ kg) publiziert. Ceres hat damit etwa 3,5 mal mehr Masse als der zweitschwerste Asteroid ➔(4) Vesta und vereinigt etwa 30 % der Gesamtmasse des Asteroidengürtels in sich.

Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop haben gezeigt, dass Ceres beinahe kugelförmig ist, mit einem Äquatorradius von 487 km und einem Polarradius von 455 km (± 5 km). Die Rotationsperiode beträgt 9,075 Stunden, die mittlere Dichte wird mit $2,14 \pm 0,04$ g/cm³ angegeben.

Oberfläche – Ceres besitzt eine dunkle, kohlenstoffreiche Oberfläche mit einer Albedo von 0,09. Radarbeobachtungen haben ergeben, dass die gesamte Oberfläche gleichmäßig von pulverigem Regolith bedeckt zu sein scheint. Herausragende oder isolierte Oberflächenmerkmale wurden erst im Jahr 2001 nach Beobachtungen mit dem Hubble Space Telescope festgestellt: Es zeigte sich ein dunkler Fleck mit einem Durchmesser von etwa 250 km, der zu Ehren des Entdeckers von Ceres »Piazzi« benannt wurde. Weitere Beobachtungen mit Hubble in den Jahren 2003 und 2004 ermöglichten die Erstellung einer Karte, die neben »Piazzi« und einem auffälligen, hellen Fleck mit rund 400 km Durchmesser zahlreiche kleinere Oberflächenmerkmale zeigt, deren Ursprung noch unbekannt ist.

Zusammensetzung – Die Messungen des Hubble-Weltraumteleskops lassen auch Rückschlüsse auf die Zusammensetzung von Ceres zu: Man geht davon aus, dass es sich um einen differenzierten Asteroiden mit einem steinigen Kern sowie einem Mantel und einer Kruste aus leichteren Mineralien und Wassereis handelt. Die Differenzierung geht vermutlich auf die beim radioaktiven Zerfall des Aluminium-Isotopes Al^{26} freigesetzte Wärme zurück, wodurch sich bereits in der Frühzeit des Sonnensystems ein Mantel aus flüssigem Wasser gebildet haben dürfte. Die äußeren zehn Kilometer schmolzen allerdings nicht auf, sondern bildeten eine feste Kruste aus Eis, während sich schwereres Material (Silikate, Metalle) im Kern sammelten. Insgesamt dürfte Ceres zu 17 bis 27 Gewichtsprozent aus Wasser bestehen. Die Süßwassermenge auf Ceres wird auf etwa das Fünffache der auf der Erde verfügbaren Süßwasservorräte geschätzt.

Trotz des planetenähnlichen Aufbaus wurde aus Ceres nie ein richtiger Planet. Sie ist weitaus kleiner als \rightarrow Pluto und somit eindeutig kein Planet. Vermutlich verhinderte die starke Gravitation des benachbarten Jupiter, dass Ceres genügend Masse ansammeln konnte, um sich von einem Planetesimal zu einem großen Planeten zu entwickeln.

Ausblick

Die Raumsonde Dawn wird im August 2015 Ceres erreichen, in eine Umlaufbahn einschwenken und den Planetoiden danach mehrere Monate lang erkunden. Man erwartet sich von dieser Mission weitere Informationen über den Aufbau und die Entwicklung von Ceres. Dawn wird vor seiner Ankunft bei Ceres bereits den Asteroiden Vesta erforscht haben, so dass ein Vergleich zwischen der wasserreichen Ceres und der trockenen Vesta möglich sein wird.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Ceres_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Ceres_(Asteroid)). Historie: 10.5.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Alkuin, TekkenTec, Arnomane, Maxmax, Wildzer0, Kurt Jansson, RobotQuistnix, BWBot, Ckeen, Zwobot, ArtMechanic, Extrawurst, Jpp, Crux, Ishka, MichaelDiederich, Bricktop1, Mhlusi, Longamp, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Pallas

(2) Pallas ist mit einem mittleren Durchmesser von 523 km der zweitgrößte \rightarrow Asteroid im \rightarrow Asteroiden-Hauptgürtel. Er wurde am 28. März 1802 von Heinrich Wilhelm Olbers als zweiter Asteroid entdeckt.

Entdeckung

Pallas wurde nach der griechischen Göttin Pallas Athene benannt. Die Entdeckung erfolgte zufällig, als Olbers den ein Jahr zuvor entdeckten Asteroiden \rightarrow (1) Ceres aufsuchen wollte. Nach der Entdeckung von Ceres hatte Olbers, wie die anderen Astronomen seiner Zeit, nicht damit gerechnet, noch einen weiteren \rightarrow Planeten zwischen \rightarrow Mars und \rightarrow Jupiter zu finden, da man glaubte, den von der Titius-Bode-Reihe vorhergesagten Planeten in diesem Bereich des Sonnensystems gefunden zu haben. Olbers vertrat daher die Hypothese, dass es sich bei Ceres und Pallas um Bruchstücke eines größeren, zerbrochenen Planeten handelt.

Wilhelm Herschel, der 1781 \rightarrow Uranus entdeckt hatte, versuchte den Durchmesser von Ceres und Pallas zu bestimmen, was ihm einige Schwierigkeiten bereitete: Die beiden Objekte erschienen in seinem Teleskop praktisch sternförmig. Herschel schlug daher bereits 1802 vor, Ceres und Pallas als »Asteroiden« (griechisch für »sternartig«) zu bezeichnen und damit von den großen Planeten abzugrenzen. Seine Ansicht wurde zu dieser Zeit aber nur von wenigen Astronomen geteilt. Erst als um 1850 die Zahl der zwischen Mars und Jupiter gefundenen Himmelskörper rasch anstieg, wurden sie unter den Bezeichnungen »Asteroiden«, »Planetoiden«, »Kleine Planeten« oder »Kleinplaneten« zusammengefasst. Das im Jahr 1803 entdeckte chemische Element Palladium wurde nach diesem Asteroiden benannt.

Umlaufbahn

Pallas bewegt sich in einem mittleren Abstand von 2,77 AE in 4,62 Jahren um die Sonne. Die Bahnexzentrizität ist mit 0,230 relativ groß: Der Abstand von der Sonne variiert daher zwischen 2,14 AE im Perihel und 3,41 AE im Aphel. Die Umlaufbahn ist mit $34,9^\circ$ auch stark gegen die Ekliptik geneigt, wodurch es häufig vorkommt, dass sich Pallas fernab der Ekliptik am Himmel aufhält.

Während der Opposition erreicht sie eine scheinbare Helligkeit von bis zu 7,0 mag. Sie ist damit nach \rightarrow (4) Vesta und \rightarrow (1) Ceres der dritthellste Asteroid am Nachthimmel.

Eigenschaften

Die Rotationsperiode von Pallas beträgt 7 Stunden und 49 Minuten. Ihre Oberfläche hat ein mittleres Albedo von 0,159. Die Masse wurde zu $1,21 \times 10^{-10}$ Sonnenmassen ($2,41 \times 10^{20}$ kg) bestimmt. Aus der Beobachtung von Sternbedeckungen konnte die Größe von Pallas abgeleitet werden:

Die Form von Pallas entspricht demnach einem triaxialen Ellipsoid mit Achsenlängen von 574 ± 10 km, 526 ± 3 km und 501 ± 2 km. In guter Übereinstimmung damit wurde aus Beobachtungen des Infrared Astronomical Satellite ein mittlerer Durchmesser von 523 ± 20 km abgeleitet.

Pallas ist damit nach Ceres der zweitgrößte Asteroid, wird an Masse aber sowohl von Ceres als auch von Vesta übertroffen.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Pallas_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Pallas_(Asteroid)). Historie: 27.2.04: Angelegt von Alkuin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Alkuin, Arnomane, Zwobot, ArtMechanic, BWBot, RobotE, Crux, Longamp, Kku, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Juno

(3) Juno ist ein weiterer Asteroid des \rightarrow Asteroiden-Hauptgürtels. Er wurde am 1. September 1804 von Karl Ludwig Harding als dritter Asteroid entdeckt und nach Juno, der höchsten römischen Göttin, benannt.

Umlaufbahn

Juno bewegt sich in einem Abstand von 1,98 (Perihel) und 3,36 (Aphel) AE in 4,36 Jahren um die Sonne. Die Umlaufbahn ist $13,0^\circ$ gegen die Ekliptik geneigt, die Bahnexzentrizität beträgt 0,258.

Eigenschaften

Juno hat einen mittleren Durchmesser von etwa 267 km. Seine Masse wurde zu $2,82 \times 10^{19}$ Kilogramm bestimmt. Er besitzt eine relativ helle Oberfläche mit einer Albedo von 0,238. Während der Opposition erreicht er eine scheinbare Helligkeit von bis zu 7,7 mag, und ist damit einer der hellsten Asteroiden am Nachthimmel. In rund 7 Stunden und 13 Minuten rotiert er um die eigene Achse.

Im Jahre 2003 wurde Juno mit Hilfe eines 2,5 Meter Spiegelteleskops des Mount-Wilson-Observatoriums und einer adaptiven Optik eingehend untersucht. Es zeigte sich, dass Juno ein unregelmäßiger Himmelskörper ist, dessen Gestalt an eine Kartoffel erinnert. Die Aufnahmen im Infrarotbereich zeigen einen etwa 100 km großen Impaktkrater, der wahrscheinlich vor geologisch kurzer Zeit entstanden ist. Spektroskopische Untersuchungen lassen darauf schließen, dass Juno der Ursprungkörper von gewöhnlichen Chondriten sein könnte, einer häufigen Gruppe von Steinmeteoriten, die aus eisenhaltigen Silikatverbindungen, wie Olivin und Pyroxenen aufgebaut sind.

Juno war der erste Asteroid, bei dem eine Sternbedeckung beobachtet wurde: Am 19. Februar 1958 zog Juno genau vor einem lichtschwachen Stern vorbei und verdunkelte diesen für mehrere Sekunden. Seither sind noch mehrere Sternbedeckungen von Juno beobachtet worden. Die Größe von Juno wurde aus diesen Beobachtungen zu 290×245 km bestimmt.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Juno_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Juno_(Asteroid)). Historie: 4.3.04: Angelegt von Robodoc, danach bearbeitet von den Hauptautoren Ablaubaer, Alkuin, Vesta, Arnomane, Crux, BWBot, Phrood, RKraasch, ArtMechanic, Palica, Ellywa, Longamp, MGla, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Vesta

(4) Vesta ist mit etwa 516 km mittlerem Durchmesser der drittgrößte \rightarrow Asteroid im \rightarrow Asteroiden-Hauptgürtel. Sie wurde am 29. März 1807 von Heinrich Olbers als vierter Asteroid entdeckt.

Entdeckung

Nachdem Olbers 1802 bereits \rightarrow Pallas entdeckt und benannt hatte, übertrug er das Recht der \rightarrow Benennung diesmal an Carl Friedrich Gauß, der mit seiner neuen Methode der Bahnbestimmung entscheidend zur Sicherung der neu entdeckten Asteroiden beigetragen hatte. Gauß benannt den Himmelskörper nach Vesta, der römischen Göttin von Heim und Herd und Schwester von Ceres.

Wie die zwischen 1801 und 1804 entdeckten Asteroiden \rightarrow Ceres, \rightarrow Pallas und \rightarrow Juno wurde zunächst auch Vesta als \rightarrow Planet bezeichnet. Da bis zur Entdeckung von (5) Astraea noch mehr als 38 Jahre vergehen sollten, änderte sich daran zunächst auch nichts. Erst als nach etwa 1850 die Zahl der zwischen den Umlaufbahnen der Planeten \rightarrow Mars und \rightarrow Jupiter gefundenen Himmelskörper rasch anstieg, setzten sich für diese Objekte die Bezeichnungen »Kleine Planeten«, »Kleinplaneten«, »Planetoiden« oder »Asteroiden« durch.

Umlaufbahn

Vesta bewegt sich zwischen 2,15 AE (Perihel) und 2,57 AE (Aphel) in 3,63 Jahren um die Sonne. Ihre Umlaufbahn ist $7,1^\circ$ gegen die Ekliptik geneigt, die Bahnexzentrizität beträgt 0,089. Ihre Bahn liegt also im inneren \rightarrow Asteroidengürtel. Die synodische Periode von Vesta liegt bei 504 Tagen.

Beschaffenheit

Größe und Helligkeit – Vesta ist der drittgrößte Asteroid im Asteroiden-Hauptgürtel (nach Ceres und Pallas). An Masse wird sie unter den Planetoiden im inneren Sonnensystem aber nur von Ceres übertroffen.

Die Form von Vesta entspricht einem triaxialen Ellipsoid mit den Radien 280 km, 272 km und 227 km (± 12 km). Für die Masse wurde ein Wert von $1,36 \pm 0,05 \times 10^{-10}$ Sonnenmassen ($2,71 \times 10^{20}$ kg) und eine mittlere Dichte von $3,7 \pm 0,3$ g/cm³ publiziert. Die Rotationsperiode des Asteroid beträgt etwa 5,342 Stunden.

Vesta besitzt im Vergleich zu anderen Asteroiden eine relativ helle Oberfläche, mit einer Albedo von 0,423. Während der Opposition ist sie zwischen 1,14 AE und 1,59 AE von der Erde entfernt und erreicht eine scheinbare Helligkeit von bis zu 5,5 mag. Sie ist damit der hellste Asteroid am Nachthimmel und kann bei dunklem Himmel ohne Lichtverschmutzung gerade noch mit bloßem Auge gesehen werden.

Zusammensetzung und Oberfläche – Vesta ist ein differenzierter Asteroid mit einer basaltischen Kruste, ultramafischem Mantelgestein und, wie man aus der mittleren Dichte schließen kann, einem Eisen-Nickel-Kern. Vesta hat somit einen ähnlichen Aufbau wie die terrestrischen Planeten und unterscheidet sich dadurch von allen anderen Asteroiden im Hauptgürtel. Die auf der Erde gefundenen Eisenmeteorite lassen allerdings den Schluss zu, dass es in der Frühzeit des Sonnensystems weitere differenzierte Planetesimale gegeben haben muss, die offenbar durch Kollisionen zerstört wurden, denn die Eisenmeteorite werden als Bruchstücke der metallischen Kerne dieser Objekte gedeutet.

Auch Vesta muss schwere Kollision mit anderen massereichen Körpern erlitten haben. So ist auf Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops neben mehreren Impaktkratern mit Durchmessern bis zu 150 km ein herausragend großer Krater mit einem Durchmesser von etwa 450 km zu erkennen. Dieser Krater hat eine Tiefe von 8 km, seine Wälle sind zusätzlich zwischen 8 km und 14 km hoch, und in seiner Mitte ragt ein Zentralberg 13 km hoch auf.

Mit Hilfe des Hubble-Weltraumteleskops konnte nicht nur die Form und Größe von Vesta bestimmt werden, sondern es konnten auch helle und dunkle Regionen auf der Oberfläche erkannt werden. Sogar eine geologische Karte konnte erstellt werden. Die Oberfläche scheint vollständig aus magmatischen Gesteinen zu bestehen. Die geologische Aktivität von Vesta geht vermutlich auf die beim radioaktiven Zerfall des Aluminium-Isotopes Al²⁶ freigesetzte Wärme zurück und dürfte bereits vor etwa 4,4

Milliarden Jahren, also relativ kurz nach der Entstehung des Sonnensystems vor etwa 4,55 Milliarden Jahren, wieder zum Erliegen gekommen sein.

Spektroskopische Beobachtungen am Mauna-Kea-Observatorium haben gezeigt, dass auf der Oberfläche von Vesta auch geringe Mengen von wasser- oder hydroxid-haltigen Mineralien existieren. Man geht davon aus, dass dieses Material nach dem Abkühlen des Asteroiden beim Einschlag von Kometen oder kohligen Chondriten aufgebracht wurde.

Meteorite und Vestoide

Vermutlich ist Vesta auch der Mutterkörper der Meteoriten der HED-Gruppe (Howarite, Eukrite, Diogenite), welche eine Untergruppe der Achondrite bilden und die irdischen magmatischen Gesteinen ähnlich sind. Die Verbindung zwischen den HED-Meteoriten und Vesta wurde hergestellt, weil sich die Spektren dieser Meteoriten und des Asteroiden gleichen. Ge-



Abb. 116: Der Millbillillie-Meteorit: Ein Eukrit, dessen Ursprung auf Vesta vermutet wird

stützt wird diese Zuordnung durch die Tatsache, dass alle untersuchten HED-Meteoriten ein Alter von 4,4 bis 4,5 Milliarden Jahren aufweisen. Der Mutterkörper dieser Meteorite kühlte also nach der Entstehung des Sonnensystems rasch ab, was auf einen relativ kleinen Himmelskörper hindeutet und eine Herkunft von größeren Monden oder Planeten ausschließt.

Mit Vesta werden auch die Vestoiden in Verbindung gebracht, eine Klasse von kleineren Asteroiden, welche ebenfalls spektrale Ähnlichkeiten mit Vesta aufweisen und möglicherweise von dieser weggeschlagen wurden. Vermutlich wurden die Vestoiden vor weniger als einer Milliarde Jahren bei jenem Impakt aus der Kruste von Vesta herausgeschlagen, der den oben beschriebenen, großen Krater geformt hat. Die Verteilung der Vestoiden erstreckt sich von der Umlaufbahn von Vesta bis hin zu Regionen im Asteroidengürtel, die Störungen durch den Planeten Jupiter unterliegen. So könnten Bruchstücke von Vesta zu Erdbahnkreuzern werden, und auch HED-Meteoriten könnten so in die Nähe der Erde gebracht worden sein. Ob sie direkt von Vesta stammen oder indirekt über einen Vestoiden, ist bisher aber noch unklar.

Ausblick

Vesta ist das erste Ziel der Raumsonde Dawn, die im Juni 2006 gestartet werden, und im Oktober 2011 den Asteroiden erreichen soll. Die Raumsonde wird in eine Umlaufbahn um Vesta einschwenken und den Planetoiden danach mehrere Monate lang erkunden. Danach wird Dawn weiter zu \rightarrow Ceres fliegen. Man erwartet sich von dieser Mission, Vesta und ihre Beziehung zu den Meteoriten besser charakterisieren zu können. Auch ein Vergleich von Vesta zu den kohlenstoffhaltigen Asteroiden im äußeren Asteroidengürtel, die durch Ceres repräsentiert werden, wird möglich sein.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Vesta_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Vesta_(Asteroid)). Historie: 27.2.04: Angelegt von Alkuin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Alkuin, Arnomane, BWBot, Crux, ArtMechanic, Mhlusi, Epo, RKraasch, FlaBot, RobotE, Phrood, Longamp, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Koorbitales Objekt

Ein koorbitales Objekt oder koorbitaler Begleiter ist ein Himmelskörper, der sich in derselben oder einer sehr ähnlichen Umlaufbahn um ein Zentralgestirn wie ein zweiter größerer Himmelskörper befindet. Aufgrund ihrer sehr ähnlichen Umlaufbahn haben sie die gleiche mittlere Umlaufdauer um das Zentralgestirn wie der größere Himmelskörper. Koorbitale Objekte befinden sich in gravitativer Wechselwirkung mit dem größeren Himmelskörper, in dessen Umlaufbahn sie sich befinden, und sind aufgrund derselben mittleren Umlaufdauer in einer so genannten 1:1-Resonanz. Das bedeutet, dass derartige Umlaufbahnen nur unter bestimmten Voraussetzungen stabil sind, von denen im Normalfall die wesentlichste ist, dass der koorbitale Begleiter im Verhältnis zum größeren Körper eine verschwindend kleine Masse hat (so genanntes eingeschränktes Dreikörperproblem).

Trojaner

Die bekanntesten koorbitalen Begleiter sind die \rightarrow Trojaner des \rightarrow Jupiter. Zuerst entdeckte man in den Lagrangepunkten L_4 und L_5 (welche sich in der Bahn eines Himmelskörpers 60° vor beziehungsweise hinter ihm befinden) des Jupiter derartige Begleiter und nannte sie Trojaner. Der erste entdeckte Trojaner war \rightarrow Achilles. Später fand man auch in den Lagrangepunkten anderer Planeten und sogar von Monden trojanische Begleiter.

Begleiter auf Hufeisenumlaufbahnen

Eine weitere Gruppe von koorbitalen Objekten laufen auf so genannten \rightarrow Hufeisenumlaufbahnen innerhalb der Umlaufbahn des größeren Himmelskörpers mit ihm zusammen um das Zentralgestirn. Die koorbitalen Begleiter beschreiben vom mit der Bewegung des größeren Körpers um das Zentralgestirn mitbewegten Bezugssystem aus gesehen entlang der Umlaufbahn einen großen Bogen, den sie periodisch vor- und zurückschwingen. Die Form des Bogens erinnert an ein Hufeisen, daher der Name. Vom ruhenden Bezugssystem (Inertialsystem) aus betrachtet, beschreiben sie jedoch nach wie vor »normale« Umlaufbahnen. Bislang sind erst wenige Objekte auf Hufeisenbahnen bekannt. Eines der bemerkenswertesten ist der Asteroid \rightarrow 2002 AA₂₉ (ein Objekt mit nicht mal 100 m Durchmesser), welcher ein koorbitaler Begleiter der \rightarrow Erde ist. Zwei weitere interessante koorbitale Objekte auf sehr ungewöhnlichen Hufeisenbahnen sind die kleinen, fast gleich großen \rightarrow Saturn-Monde \rightarrow Janus und Epimetheus, die auf sehr ähnlichen Umlaufbahnen den Saturn umlaufen und sich alle vier Jahre sehr nahe kommen und ihre Umlaufbahnen tauschen.

Der Übergang von einem Trojaner zu einer gewöhnlichen Hufeisenbahn ist fließend: Wenn der Abstand eines Trojaners zum L_4 - oder L_5 -Punkt zu groß ist, dann wird er einmal auf der Umlaufbahn den dem größeren Himmelskörper entgegengesetzten Punkt überschreiten und dann in Richtung des anderen Lagrange-Punktes wandern und somit in einem großen Bogen vor- und zurückschwingen.

Quasisatelliten

Einen kleineren Himmelskörper, der relativ weit entfernt langsam um den größeren Himmelskörper einmal innerhalb einer Umlaufdauer des größeren Körpers um das Zentralgestirn kreist, nennt man \rightarrow Quasisatellit. Quasisatelliten stehen hauptsächlich unter dem Gravitationseinfluss des Zentralkörpers, um den beide rotieren, und nicht wie ein Mond unter dem hauptsächlich Gravitationseinfluss des \rightarrow Planeten. Dies ist in etwa analog zu zwei Autos auf einer Autobahn, die nebeneinander mit gleicher Geschwindigkeit fahren und sich wechselseitig überholen, jedoch nicht fest aneinander gebunden sind. Bislang ist ein Quasisatellit der Erde bekannt, der kleine Asteroid \rightarrow 2003 YN₁₀₇.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Koorbitales_Objekt. Historie: 22.9.04: Angelegt von Arnomane, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Pucktf. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Trojaner

Die Trojaner sind zwei Gruppen von →Asteroiden, welche die Sonne auf der gleichen Bahn wie der →Jupiter umkreisen, ihm jedoch mit einem mittleren Abstand von 60° vorausziehen beziehungsweise nachfolgen (siehe Abb. im Artikel →Asteroidengürtel). Sie sind nach den Personen aus Homers *Ilias* benannt: die vorausziehenden Asteroiden nach den griechischen (bis auf Hektor), die nachziehenden nach den trojanischen Helden.

Lage der Trojaner

Die Trojaner kreisen um die Librations- oder Lagrange-Punkte L_4 und L_5 (diese sind die Gleichgewichtspunkte im sonst nur schwierig lösbareren Dreikörperproblem). Das System Sonne – Jupiter – Trojaner bildet für jeden dieser Kleinkörper ein stabiles Dreikörpersystem. Bislang sind in L_4 und L_5 rund 900 beziehungsweise 600 Trojaner bekannt, die Gesamtzahl wird auf einige Tausend geschätzt. Der erste Trojaner, (588) →Achilles, wurde 1906 von Max Wolf entdeckt. Der weitaus größte Trojaner dürfte der 1907 entdeckte (624) Hektor sein, ein unregelmäßig geformter Asteroid von 370×195 km Ausdehnung.

Dunkle Körper – von weit draußen?

Der Planet →Jupiter hat durch seine riesige Masse enormen Einfluss auf das äußere Sonnensystem und verursacht zahlreiche Instabilitäten an den →Asteroiden und ihren Bahnen. Viele Astronomen meinen deshalb, dass auch im Bereich der Trojaner ein steter langsamer Wechsel im Gang ist.

Ihre unerwartet große Zahl (1960 kannte man erst 20) wird durch gegenseitige Kollisionen erklärt. Weil sie mit Albedos um 0,04 ähnlich dunkel oder dunkelrot sind wie die →Asteroiden des äußeren Sonnensystems, stammen viele vermutlich von dort (Transneptune). Vereinzelt dürften sich Trojaner wieder durch Bahnstörungen oder Stöße von den Librationspunkten lösen und in Richtung →Marsbahn abdriften.

Trojaner anderer Planeten

1990 wurde auch im Librationspunkt L_5 des →Mars ein Mars-Trojaner entdeckt, der Eureka getauft wurde. Mittlerweile hat man vier weitere Mars-Trojaner entdeckt, davon einen im L_4 -Punkt. Ende 2001 fand man auch 60° hinter →Neptun einen Trojaner. Mit dem 4-m-Spiegelteleskop am Cerro Tololo aufgenommen, erhielt der 230-km-Körper die Asteroiden-Nummer 2001 QR₃₂₂, war aber erst nach einem Jahr »gesichert«. Er umrundet

die Sonne – genau wie Neptun – in 166 Erdjahren. Weitere Trojaner gibt es im →Saturn-Sonne-System und in den Mondsystemen von Jupiter und Saturn. So hat der Saturnmond →Tethys die kleinen Monde Telesto in seinem L_4 - und Calypso in seinem L_5 -Punkt und der Saturnmond →Dione hat den Mond Helene in seinem L_4 -Punkt.

Erdbegleiter

Von der →Erde ist bis jetzt noch kein Trojaner bekannt. Es wurden bislang in den L_4 - und L_5 -Punkten des Erde-Sonne-Systems in den 1950ern Staubwolken gefunden. In den L_4 - und L_5 -Punkten des Systems Erde→Mond wurden ebenfalls sehr schwache Staubwolken gefunden, die noch schwächer als der schwache Gegenschein ausgeprägt sind. Jedoch gibt es einige Asteroiden, welche sich auf einer →Hufeisenumlaufbahn zusammen mit der Erde (also einer mittleren Umlaufdauer von einem Jahr) um die Sonne bewegen. Insbesondere die Bahn des am 9. Januar 2002 mit Hilfe der automatischen Himmelsüberwachung LINEAR (Lincoln Near Earth Asteroid Research) entdeckte Asteroiden →2002 AA₂₉ (ein Objekt mit einem Durchmesser von unter 100 m) ist bemerkenswert. Er umkreist die Sonne auf einer der Erdbahn sehr ähnlichen Umlaufbahn, wobei er, vom mit der Erdbewegung mitbewegten Bezugssystem aus gesehen, entlang der Erdbahn im Lauf von 95 Jahren einen Bogen von fast 360° beschreibt, den er in weiteren 95 Jahren wieder zurückschwingt. Die Form des Bogens erinnert an ein Hufeisen, daher der Name Hufeisenbahn.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Trojaner_\(Astronomie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Trojaner_(Astronomie)). Historie: 31.7.02: Angelegt von Flups, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Geof, Flups, Alkuin, Rivi, FlaBot, Head, Crux, Fgb, Ixitixel, RobotQuistnix, Jed, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Hufeisenumlaufbahn

Die Hufeisenumlaufbahn oder der Hufeisenorbit ist eine besondere Umlaufbahn eines →koorbitalen Objekts, welches zusammen mit einem zweiten, meist wesentlich größeren Körper in derselben oder einer sehr ähnlichen Umlaufbahn um ein Zentralgestirn umläuft. Im normalen ruhenden Bezugssystem sieht die Umlaufbahn des koorbitalen Begleiters wie eine normale Keplersche ellipsenförmige Umlaufbahn aus. Vom mit der Bewegung des größeren Objekts um das Zentralgestirn mitbewegten Bezugssystem aus, in dem der größere Himmelskörper zu ruhen scheint, sieht man dann nur noch die Relativbewegung des koorbitalen Begleiters.

Der koorbitale Begleiter beschreibt von diesem Bezugssystem aus gesehen entlang der Umlaufbahn des größeren Körpers einen großen Bogen, den er periodisch vor- und zurückschwingt. Die Form des Bogens erinnert an ein Hufeisen.

Stabilität

Aufgrund ihrer sehr ähnlichen Umlaufbahnen hat das koorbitale Objekt auf der Hufeisenumlaufbahn die gleiche mittlere Umlaufdauer um das Zentralgestirn wie der größere Himmelskörper. Es befindet sich in gravitativer Wechselwirkung mit dem größeren Himmelskörper und ist aufgrund derselben mittleren Umlaufdauer in einer so genannten 1:1-Resonanz. Das bedeutet, dass derartige Umlaufbahnen nur unter bestimmten Voraussetzungen stabil sind, von denen im Normalfall die wesentlichste ist, dass der koorbitale Begleiter im Verhältnis zum größeren Körper eine verschwindend kleine Masse hat (so genanntes *eingeschränktes Dreikörperproblem*).

Übergang zu Trojanern

Der Übergang von einem \rightarrow Trojaner zu einer Hufeisenbahn ist fließend: Wenn der Abstand eines Trojaners zum Lagrangepunkt L_4 - oder L_5 zu groß ist, dann wird er einmal auf der Umlaufbahn den dem größeren Himmelskörper entgegengesetzten Punkt überschreiten und dann in Richtung des anderen Lagrange-Punktes wandern und somit in einem großen Bogen vor- und zurückschwingen.

Beispiele

Bislang sind erst wenige Objekte auf Hufeisenbahnen bekannt. Eines der bemerkenswertesten ist der \rightarrow Asteroid \rightarrow 2002 AA₂₉ (ein Objekt mit nicht mal 100 m Durchmesser), welcher ein koorbitaler Begleiter der \rightarrow Erde ist. Zwei weitere interessante koorbitale Objekte auf sehr ungewöhnlichen Hufeisenbahnen sind die kleinen fast gleichgroßen \rightarrow Saturn-Monde \rightarrow Janus und Epimetheus, die auf sehr ähnlichen Umlaufbahnen den Saturn umlaufen und sich alle vier Jahre sehr nahe kommen und ihre Umlaufbahnen tauschen.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hufeisenumlaufbahn>. Historie: 23.9.04: Angelegt von Arnomane, danach anonym bearbeitet. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Quasisatellit

Ein Quasisatellit ist ein kleiner \rightarrow koorbitaler Begleiter eines größeren Himmelskörpers, der relativ weit entfernt einmal innerhalb einer Umlaufdauer des größeren Körpers um ein Zentralgestirn langsam um den größeren Himmelskörper kreist. Zumeist handelt es sich dabei um \rightarrow Asteroiden, die sich in der Nähe eines \rightarrow Planeten aufhalten.

Bahnform

Quasisatelliten stehen hauptsächlich unter dem Gravitationseinfluss des Zentralkörpers, den beide umlaufen, und nicht wie ein Mond unter dem hauptsächlichsten Gravitationseinfluss des \rightarrow Planeten. Im normalen ruhenden Bezugssystem sieht die Umlaufbahn des Quasisatelliten wie eine normale Keplersche ellipsenförmige Umlaufbahn aus. Vom mit der Bewegung des größeren Objekts um das Zentralgestirn mitbewegten Bezugssystem aus (in dem der größere Himmelskörper zu ruhen scheint) sieht man dann nur noch die Relativbewegung des Quasisatelliten. Der Quasisatellit beschreibt von diesem Bezugssystem aus gesehen aufgrund seiner leicht unterschiedlichen Umlaufbahn (leicht unterschiedliche Exzentrizität und Bahnneigung gegen die Ekliptik) innerhalb eines Umlaufs um das Zentralgestirn eine Schleife um den größeren Himmelskörper. Der radiale Bewegungsanteil wird direkt durch die Differenz der Exzentrizitäten zwischen Planet und Quasisatelliten verursacht, während der Bewegungsanteil längs der Planetenbahn durch die leicht unterschiedliche Geschwindigkeit im Perihel und im Aphel verursacht wird. Im Perihel überholt er den Planeten von innen, während er im Aphel weiter außen in Bezug auf den Planeten zurückfällt. Im Lauf eines Jahres wird daraus dadurch ein kompletter Umlauf um den Planeten. Dies ist in etwa analog zu zwei Autos auf einer Autobahn, die nebeneinander mit gleicher Geschwindigkeit fahren und sich wechselseitig überholen, jedoch nicht fest aneinander gebunden sind.

Stabilität

Auch wenn Quasisatelliten hauptsächlich unter dem Gravitationseinfluss des Zentralkörpers stehen, werden sie doch von dem Planeten beeinflusst, in dessen Nähe sie sich befinden. Da das Verhältnis der Umlaufzeiten von Planet und Quasisatellit 1:1 beträgt, sie sich also immer in ähnlicher Konstellation begegnen, wirkt die Störung des Planeten zudem immer in gleicher Weise und kann sich somit aufschaukeln und

den Quasisatelliten aus der Bahn werfen. Computersimulationen zeigen jedoch, dass die Bahnen von Quasisatelliten der äußeren Planeten →Uranus und →Neptun so stabil sind, dass sich Quasisatelliten seit der Entstehung des Sonnensystems vor 4,5 Milliarden Jahren dort aufhalten können. Für →Jupiter beträgt die Zeitspanne bis zur Instabilität nur 10 Millionen Jahre und für →Saturn mit unter 100.000 Jahren noch weniger. Falls die Bahnexzentrizität der Quasisatelliten in einem bestimmten Bereich liegt (für Uranus und Neptun zwischen 0,1 bis 0,15) und je geringer die Bahnneigung ihrer Orbits gegen die Ekliptik ist, desto stabiler sind die Bahnen dieser Quasisatelliten. Aufgrund dessen sollten Uranus und Neptun noch ursprüngliche Quasisatelliten besitzen, während Jupiter und Saturn nur vorübergehend eingefangene Quasisatelliten haben sollten.

Beispiele

Bislang ist ein Quasisatellit der →Erde bekannt, der kleine Asteroid →2003 YN₁₀₇. Ein weiterer Asteroid namens →2002 AA₂₉ wechselt annähernd zyklisch zwischen einer →Hufeisenumlaufbahn und einem Zustand als Quasisatellit der Erde, wobei er das nächste Mal um das Jahr 2600 für 45 Jahre ein Quasisatellit der Erde sein wird.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Quasisatellit>. Historie: 12.10.04: Angelegt von Arnomane, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, RKraasch. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Achilles

(588) Achilles ist ein →Asteroid aus der Gruppe der →Jupiter-Trojaner, er läuft also auf der Bahn des →Jupiters um die Sonne.

Entdeckung

Achilles wurde am 22. Februar 1906 von Max Wolf als erster Trojaner entdeckt und ist nach dem griechischen Helden Achilles aus der Ilias benannt. Der Name des Asteroiden wurde ursprünglich von Johann Palisa, einem Freund und Kollegen von Max Wolf, vorgeschlagen. Der Asteroid läuft Jupiter auf dessen Bahn um 60° voraus (er befindet sich am L₄-Punkt). Die vorauslaufenden Trojaner werden auch als *Griechen* bezeichnet und sind deshalb nach antiken griechischen Helden benannt.

Eigenschaften

Die Bahn von Achilles verläuft zwischen 4,429 (Perihel) und 5,956 (Aphel) astronomischen Einheiten und ist 10,3° gegen die Ekliptik geneigt. Die Bahnexzentrizität beträgt 0,147. Während der Opposition erreicht Achilles eine scheinbare Helligkeit von 16,6 mag. Er ist damit ein äußerst lichtschwaches Objekt am Nachthimmel.

Neben seiner geringen Größe ist auch Achilles geringe Albedo für seine geringe Helligkeit verantwortlich. Er reflektiert nur 3,3 % des auftretenden Lichts, ist also schwärzer als beispielsweise Asphalt. Seine Oberfläche besteht nach Messungen an der *Infrared Telescope Facility* (IRTF) der NASA wahrscheinlich zu 20 bis 40 % aus Pyroxen (verschiedene Silikate). Für die beobachtete Rotfärbung des reflektierten Anteils dürfte Eisen verantwortlich sein. Tholinanteile, also durch ultraviolettes Licht umgeformte Methan- und Ethanbestandteile, über 10 % auf der Oberfläche konnten durch Spektralanalysen ausgeschlossen werden. Ebenso ist die Oberfläche arm an Chlorit (maximal 1 %).

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Achilles_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Achilles_(Asteroid)). Historie: 8.3.04: Angelegt von Alkuin, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Alkuin, BWBot, ArtMechanic, Larynx, Crux, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

2002 AA₂₉

2002 AA₂₉ ist ein sehr kleiner →erdnaher Asteroid, der am 9. Januar 2002 durch die automatische Himmelsüberwachung LINEAR (Lincoln Near Earth Asteroid Research) entdeckt wurde. Der Durchmesser des →Asteroiden beträgt nur etwa 50 bis 110 Meter. Er umkreist die Sonne auf einer der Erdbahn sehr ähnlichen, fast kreisförmigen Umlaufbahn. Sie verläuft zum größten Teil innerhalb der Erdumlaufbahn und kreuzt diese im sonnenfernsten Punkt des Asteroiden, dem Aphel. Er wird wegen dieser Umlaufbahn nach dem namensgebenden Asteroiden Aten als Aten-Typ klassifiziert. Eine weitere Besonderheit ist, dass seine mittlere Umlaufdauer um die Sonne exakt einem siderischen Jahr entspricht. Das bedeutet, dass er in Wechselwirkung mit der →Erde steht, da eine solche Umlaufbahn nur unter bestimmten Voraussetzungen stabil ist. Bislang sind erst wenige derartige, in 1:1-Resonanz mit der Erde wechselwirkenden Asteroiden bekannt. Der erste war der 1986 entdeckte (3753) Cruithne. Asteroiden, die in 1:1-Resonanz mit einem →Planeten stehen, werden auch →*koorbitale Objekte* genannt, da sie der Bahn des →Planeten folgen. 2002 AA₂₉

befindet sich auf einer so genannten →Hufeisenumlaufbahn entlang der Erdbahn.

Umlaufbahn

Bahndaten – Wissenschaftler des Jet Propulsion Laboratory (JPL), der Athabasca University (Kanada), der Queen’s University in Kingston (Ontario, Kanada), der York University in Toronto und des Tuorlaobservatoriums der Universität von Turku in Finnland stellten schon kurz nach der Entdeckung durch LINEAR den ungewöhnlichen Orbit von 2002 AA₂₉ fest, der durch Nachuntersuchungen am Canada-France-Hawaii Telescope auf Hawaii bestätigt wurde:

- Seine Umlaufbahn befindet sich größtenteils innerhalb der Erdbahn. Die Bahnen der meisten Asteroiden befinden sich im so genannten →Asteroidengürtel zwischen →Mars und →Jupiter oder noch weiter draußen außerhalb der →Neptunbahn im so genannten →Kuipergürtel. Durch Bahnstörungen der großen →Gasplaneten, hauptsächlich durch Jupiter, und durch den Jarkowski-Effekt (Bahnänderung durch asymmetrische Ein- und Abstrahlung von Infrarotstrahlung) werden Asteroiden ins innere Sonnensystem abgelenkt, wo ihre Bahnen dann durch weitere nahe Vorbeiflüge an den inneren Planeten weiter beeinflusst werden. 2002 AA₂₉ ist wahrscheinlich ebenfalls aus dem äußeren Sonnensystem zur →Erde gelangt. Es wird jedoch auch spekuliert, dass er sich schon immer auf einer erdnahen Bahn befand und er oder ein Vorläuferkörper somit in der Nähe der Erdbahn entstand. Eine Möglichkeit wäre in diesem Fall, dass er ein abgesprengtes Bruchstück des Zusammenstoßes eines mittleren Asteroiden mit der Erde oder dem →Mond sein könnte.
- Seine mittlere Umlaufdauer beträgt ein siderisches Jahr. Nachdem er ins innere Sonnensystem abgelenkt wurde – oder auf einer Bahn in der Nähe der Erdbahn entstand –, muss der Asteroid auf eine mit der Erde korrespondierende Bahn geraten sein. Auf dieser Bahn wurde er immer

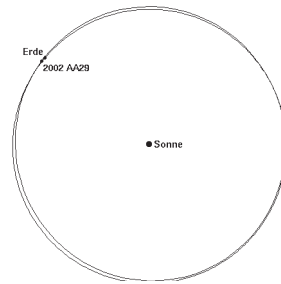


Abb. 117: Umlaufbahnen von 2002 AA₂₉ und der Erde um die Sonne in der senkrechten Sicht auf die Ekliptik

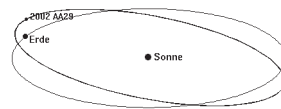


Abb. 118: Umlaufbahnen von 2002 AA₂₉ und der Erde um die Sonne seitlich betrachtet

wieder von der Erde derart abgelenkt, dass seine eigene Umlaufdauer sich der Umlaufdauer der Erde um die Sonne angleich. Auf seiner aktuellen Umlaufbahn wird er von der Erde also stets synchron zu ihrem eigenen Umlauf gehalten.

- Die Umlaufbahn des Asteroiden ist nahezu kreisförmig und hat mit 0,012 eine noch geringere Exzentrizität als die Erdbahn mit 0,0167. Die übrigen erdnahen Asteroiden haben im Durchschnitt eine wesentlich höhere Exzentrizität von 0,29. Auch alle übrigen vor 2002 bekannten Asteroiden in 1:1-Resonanz mit der Erde haben sehr stark elliptische Bahnen – die Exzentrizität von (3753) Cruithne beträgt beispielsweise 0,515. Die Bahn von 2002 AA₂₉ war zum Zeitpunkt der Entdeckung einzigartig, weswegen man den Asteroiden oft auch als ersten echten →koorbitalen Begleiter der Erde bezeichnet, da die Bahnen der übrigen davor entdeckten Asteroiden der Erdbahn nicht sehr ähnlich sind. Die sehr geringe Bahnexzentrizität von 2002 AA₂₉ ist auch ein Indiz dafür, dass er sich schon immer auf einer erdnahen Umlaufbahn befunden haben muss oder der Jarkowski-Effekt ihn vergleichsweise stark über Jahrmilliarden ins innere Sonnensystem spiralisieren ließ, da durch Planeten abgelenkte Asteroiden in der Regel Bahnen mit großer Exzentrizität haben.
- Die Bahnneigung gegen die Ekliptik von 2002 AA₂₉ ist mit 10,739° moderat. Somit ist seine Bahn leicht gegen die der Erde verkippt, ansonsten würden beide Bahnen direkt aufeinander liegen.

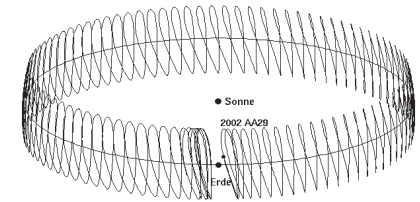


Abb. 119: Hufeisenumlaufbahn von 2002 AA₂₉ entlang der Erdbahn im Verlauf von 95 Jahren, vom mit der Bahnbewegung der Erde mitbewegten Bezugssystem aus betrachtet

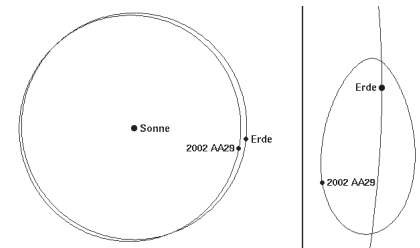


Abb. 120: Quasisatellitenumlaufbahn von 2002 AA₂₉ im Jahr 2589 aus der Sicht senkrecht auf die Ekliptik. Die linke Seite zeigt die Bahnen von 2002 AA₂₉ und der Erde aus dem ruhenden Bezugssystem, die rechte Seite ausschnittsvergrößert dieselbe Bahn von 2002 AA₂₉ aus dem mit der Bahnbewegung der Erde mitbewegtem Bezugssystem betrachtet.

Bahnform – Betrachtet man den mit der Erdbahn nahezu deckungsgleichen Orbit von 2002 AA₂₉ vom mit der Erdbewegung um die Sonne mitbewegten Bezugssystem aus, beschreibt er im Lauf von 95 Jahren entlang des Erdborbits einen Bogen von fast 360°, den er in weiteren 95 Jahren wieder zurückschwingt. Die Form des Bogens erinnert an ein Hufeisen, daher der Name →Hufeisenorbit für seine Umlaufbahn vom mit der Erde mitbewegten Bezugssystem aus gesehen. Bei der Bewegung entlang des Erdborbits windet er sich spiralförmig um diesen, wobei er für eine Spiraldrehung ein Jahr braucht. Diese Spiralbewegung im mit der Erde mitbewegten Bezugssystem kommt durch seine leicht von der Erdbahn abweichende Exzentrizität und Bahnneigung zustande, wobei der Unterschied in der Bahnneigung für den vertikalen und derjenige der Exzentrizität für den horizontalen Anteil der projizierten Spiralbewegung verantwortlich ist. Kommt er der Erde von vorn, also in Umlaufrichtung der Erde, nahe, so wird er durch deren Anziehungskraft in einen geringfügig schnelleren, etwas näher an der Sonne liegenden Orbit befördert. Er eilt der Erde auf ihrer Bahn nun voraus, bis er sie nach 95 Jahren einmal fast überrundet hat und sich ihr nun von hinten nähert. Jetzt gerät er erneut unter ihren Gravitationseinfluss und wird so auf eine langsamere Umlaufbahn etwas weiter weg von der Sonne gehoben. Dadurch kann er nun nicht mehr mit der Geschwindigkeit der Erde mithalten, bis diese ihn nach 95 Jahren wieder von vorn erreicht. Die Erde und 2002 AA₂₉ verfolgen sich also immer abwechselnd, kommen sich jedoch nie zu nahe. Am 8. Januar 2003 näherte sich der Asteroid der Erde von vorn bis auf 5,9 Millionen Kilometer, was seine größte Annäherung für fast ein Jahrhundert sein wird. Seit diesem Zeitpunkt eilt er ihr nun voraus, bis er sie von hinten eingeholt haben wird. Aufgrund der subtilen Wechselwirkung mit der Erde muss man jedoch nicht befürchten, dass dieser Asteroid wie andere →Erdbahnkreuzer mit der Erde zusammenstoßen könnte. Berechnungen zeigen, dass er in den nächsten Jahrtausenden der Erde niemals näher als 4,5 Millionen Kilometer nahekommen wird, was etwa dem Zwölffachen des Erde-Mond-Abstands entspricht.

Aufgrund seiner Bahnneigung von 10,739° gegen die Ekliptik wird 2002 AA₂₉ jedoch nicht immer von der Erde auf seine Hufeisenumlafbahn gezwungen, sondern kann manchmal quasi durchschlüpfen. Er ist dann für eine Weile in der Nähe der Erde gefangen, was das nächste Mal in ungefähr 600 Jahren, also um das Jahr 2600 passieren wird. Er wird sich dann innerhalb der kleinen Lücke der Erdbahn aufhalten, die er in seinem vorherigen Hufeisenorbit nicht erreichte, und sich nicht weiter als 0,2 AE (30 Millionen

Kilometer) von der Erde entfernen. Dabei wird er – fast wie ein zweiter Mond – langsam um die Erde kreisen; für einen Umlauf braucht er allerdings ein Jahr. Nach 45 Jahren wechselt er schließlich wieder zurück in den Hufeisenorbit, um sich dann um das Jahr 3750 und nochmal um 6400 wieder für 45 Jahre in der Nähe der Erde aufzuhalten. In diesen Phasen, in denen sich außerhalb seines Hufeisenorbits aufhält, schwingt er in dem schmalen Bereich entlang der Erdbahn, in dem er gefangen ist, innerhalb von 15 Jahren einmal vor und zurück. Da er nicht wie der Mond fest an die Erde gebunden ist, sondern hauptsächlich unter dem Gravitationseinfluss der Sonne steht, nennt man diese Körper →Quasisatelliten. Bahnrechnungen zeigen, dass 2002 AA₂₉ bereits ab etwa 520 n. Chr. für 45 Jahre in diesem Quasisatellitenorbit, jedoch aufgrund seiner winzigen Größe zu lichtschwach und somit nicht sichtbar war. Er wechselt somit annähernd zyklisch zwischen den beiden Orbitformen, hält sich aber immer für 45 Jahre im Quasisatellitenorbit auf. Außerhalb einer Zeitspanne von etwa 520 bis 6500 n. Chr. werden die berechneten Bahnen chaotisch, also nicht berechenbar, weswegen man über Zeiträume die darüber hinausgehen keine exakten Angaben machen kann. 2002 AA₂₉ war der erste bekannte Himmelskörper, der zwischen Hufeisen- und Quasisatellitenorbit wechselt.

Beschaffenheit

Helligkeit und Größe – Über 2002 AA₂₉ selber ist relativ wenig bekannt. Er ist mit einer Größe von ungefähr 50 bis 110 Metern sehr klein, weswegen er von der Erde selbst mit großen Teleskopen nur als kleiner Punkt erscheint und nur mit hochempfindlichen CCD-Kameras beobachtet werden kann. Um den Zeitpunkt der größten Annäherung am 8. Januar 2003 hatte er im visuellen Bereich nur eine scheinbare Helligkeit von etwa 20,4 Größenordnungen.

Über die Zusammensetzung von 2002 AA₂₉ ist bislang nichts Konkretes bekannt. Aufgrund der Sonnennähe kann er aber nicht aus leichtflüchtigen Substanzen wie beispielsweise Wassereis bestehen, da diese schmelzen, verdunsten oder sublimieren würden, was man etwa bei →Kometen an ihrem Schweif deutlich sichtbar beobachten kann. Vermutlich wird er wie die meisten Asteroiden eine dunkle kohlenstoffhaltige oder etwas hellere silikatreiche Oberfläche haben; im ersteren Fall läge die Albedo bei etwa 0,05, im letzteren etwas höher bei 0,15 bis 0,25. Aufgrund dieser Unsicherheit haben die Angaben für seinen Durchmesser eine relativ große Spanne. Eine zusätzliche Unsicherheit kommt dadurch zustande, dass bei Radar-Echomessungen mit dem Arecibo-Radioteleskop nur ein uner-

wartet schwaches Radarecho aufgefangen werden konnte, 2002 AA₂₉ also entweder noch kleiner ist als vermutet oder Radiowellen nur schwach reflektiert. Im ersteren Fall muss er eine ungewöhnlich hohe Albedo haben. Dies wäre ein weiteres Indiz für die Spekulation, dass er oder zumindest das Material, aus dem er besteht, anders als die meisten Asteroiden bereits auf einer erdnahen Umlaufbahn entstanden ist oder gar ein Bruchstück darstellt, dass durch den Zusammenprall eines mittleren Asteroiden mit der Erde oder dem Mond abgesprengt wurde.

Rotationsdauer – Mit Hilfe der Radar-Echomessungen am Arecibo-Radioteleskop konnte man die Rotationsperiode von 2002 AA₂₉ bestimmen. Bei diesem Verfahren der Radarastronomie werden Radiowellen mit fester Wellenlänge von einem Radioteleskop gezielt zu einem Asteroiden ausgesandt. An diesem werden sie reflektiert, wobei der Teil der Oberfläche, der sich wegen der Rotation auf den Beobachter zu bewegt, die Wellenlänge der reflektierten Radiowellen aufgrund des Dopplereffekts verkürzt, während der andere Teil, der sich von dem Beobachter wegdreht, die Wellenlänge aufgrund des gleichen Effekts verlängert. Im Ergebnis wird die Wellenlänge der reflektierten Radiowellen »verschmiert«. Aus der Breite dieser Wellenlängenverschmierung und dem Durchmesser des Asteroiden kann man nun auf die Rotationsdauer schließen. Für 2002 AA₂₉ erhielt man damit 33 Minuten als Obergrenze seiner Rotationsdauer, wahrscheinlich rotiert der Asteroid also noch schneller. Diese rasche Rotation lässt zusammen mit dem geringen Durchmesser und der somit geringen Masse einige interessante Schlüsse zu:

- Der Asteroid rotiert so schnell, dass die Fliehkraft an seiner Oberfläche größer ist als seine Gravitationskraft. Er steht somit unter Zugspannung und kann nicht aus einem Haufen lose zusammenhängenden Schutts oder aus mehreren Bruchstücken bestehen – was man von einigen anderen Asteroiden vermutet, beziehungsweise beim Asteroiden Hermes auch nachgewiesen hat. Stattdessen muss der Körper aus einem einzelnen, relativ festen Felsblock oder leicht zusammengebackenen Teilen bestehen. Allerdings ist seine Zugfestigkeit wahrscheinlich weitaus kleiner als die irdischen Gesteins und der Asteroid wohl auch recht porös.
- 2002 AA₂₉ kann sich niemals aus einzelnen kleineren Stücken zusammengelagert haben, da diese aufgrund der raschen Rotation vorher auseinander getrieben wären. Er muss also ein abgesprengtes Bruchstück sein, das beim Zusammenstoß zweier Himmelskörper entstand.

Ausblick

Aufgrund seiner sehr erdähnlichen Bahn ist der Asteroid für Raumsonden relativ leicht erreichbar. 2002 AA₂₉ wäre also ein geeignetes Studienobjekt zur genaueren Untersuchung des Aufbaus und der Zusammensetzung von Asteroiden und der zeitlichen Entwicklung ihrer Bahnen um die Sonne. Weitere derartige, auf Hufeisenbahnen oder auf einer Umlaufbahn als Quasisatellit befindliche, koorbitalen Begleiter der Erde wurden in der Zwischenzeit bereits gefunden, wie zum Beispiel der Quasisatellit →2003 YN₁₀₇. Des Weiteren vermutet man um die Lagrangepunkte L₄ und L₅ des Systems Erde-Sonne kleine trojanische Begleiter der Erde in der Größenordnung von 100 Metern Durchmesser.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/2002_AA29. Historie: 14.9.04: Angelegt von Arnomane, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Aglarech, Azdak, Necrophorus, BWBot, Juesch, Sansculotte, Finanzer, Nd, Alkuin, ASK, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

2003 YN₁₀₇

2003 YN₁₀₇ ist ein sehr kleiner →erdnaher Asteroid, der am 20. Dezember 2003 durch die automatische Himmelsüberwachung LINEAR (Lincoln Near Earth Asteroid Research) entdeckt wurde. Der Durchmesser des Asteroiden beträgt nur etwa 10 bis 30 m. Er ist ein →Erdbahnkreuzer, wird daher (nach dem namensgebenden Asteroiden Aten) als Aten-Typ klassifiziert und umkreist die Sonne auf einer der Erdbahn sehr ähnlichen, fast kreisförmigen Umlaufbahn. Eine weitere Besonderheit ist, dass seine mittlere Umlaufdauer um die Sonne ungefähr einem siderischen Jahr entspricht. Seine bemerkenswerteste Eigenschaft ist jedoch, dass er sich seit 1996 niemals weiter als 0,1 AE (etwa 15 Millionen km) von der →Erde entfernt und dass er die Erde langsam einmal innerhalb eines Jahres umkreist. 2003 YN₁₀₇ ist aber kein zweiter Mond der Erde, da er nicht fest an sie gebunden ist. Er ist der erste bekannte Vertreter einer schon länger postulierten Gruppe von →koorbitalen Objekten, den →Quasisatelliten, welche diese Bahneigenschaften aufweisen. Vor 1996 befand sich 2003 YN₁₀₇ in einer so genannten →Hufeisenumlaufbahn entlang der Erdumlaufbahn um die Sonne, welche der des Asteroiden →2002 AA₂₉ sehr ähnlich war. Auch nach 2006 wird er sich wieder für einige Zeit in einer derartigen Umlaufbahn aufhalten. Ein derartiger Orbitwechsel scheint bei diesen koorbitalen Begleitern relativ häufig zu sein, da 2002 AA₂₉ in etwa 600 Jahren ebenfalls für einige Zeit ein Quasisatellit der Erde sein wird.

Umlaufbahn

Bahndaten – Die Umlaufbahn von 2003 YN₁₀₇ befindet sich mit einem Sonnenabstand zwischen 0,974 AE für das Perihel, dem sonnennächsten Punkt, und 1,021 AE für das Aphel, dem sonnenfernsten Punkt, zum größten Teil innerhalb der Erdumlaufbahn. Die Bahnen der meisten Asteroiden befinden sich hingegen im so genannten →Asteroidengürtel zwischen →Mars und →Jupiter oder noch weiter draußen außerhalb der →Neptunbahn im so genannten →Kuipergürtel. Durch Bahnstörungen der großen →Gasplaneten, hauptsächlich durch Jupiter, und durch den Jarkowski-Effekt, also die Bahnänderung durch asymmetrische Ein- und Abstrahlung von Infrarotstrahlung, werden Asteroiden ins innere Sonnensystem abgelenkt, wo ihre Bahnen dann durch weitere nahe Vorbeiflüge an den inneren Planeten weiter beeinflusst werden. Bei Ablenkung von Asteroiden ins innere Sonnensystem durch Jupiter und die übrigen Planeten entstehen jedoch meist Umlaufbahnen mit hoher Exzentrizität. 2003 YN₁₀₇ hat mit einer Exzentrizität von 0,021 jedoch einen ähnlich niedrigen Wert wie die Erde mit 0,0167 und somit eine fast kreisförmige Umlaufbahn. Es ist also unwahrscheinlich, dass er durch Jupiter oder einen anderen Planeten aus einer Umlaufbahn im äußeren Sonnensystem ins innere Sonnensystem geschleudert wurde. Aufgrund seiner geringen Exzentrizität wird spekuliert, dass er sich schon immer auf einer erdnahen Bahn befand und dass er oder ein Vorläuferkörper in der Nähe der Erdbahn entstand. Eine Möglichkeit wäre in diesem Fall, dass er ein abgesprengtes Bruchstück des Zusammenstoßes eines mittleren Asteroiden mit der →Erde oder dem →Mond sein könnte.

Die mittlere Umlaufdauer von 2003 YN₁₀₇ beträgt ein siderisches Jahr. Nachdem er ins innere Sonnensystem abgelenkt wurde oder auf einer Bahn in der Nähe der Erdbahn entstand, muss der Asteroid auf eine mit der Erde korrespondierende Bahn geraten sein. Auf dieser Bahn wurde er immer wieder von der Erde derart abgelenkt, dass seine eigene Umlaufdauer sich der Umlaufdauer der Erde um die Sonne angleicht. Auf seiner aktuellen Umlaufbahn wird er von der Erde also stets synchron zu ihrem eigenen Umlauf gehalten.

Aufgrund seiner leichten Bahnneigung von 4,267° gegen die Ekliptik (Bahnebene der Erde) ist seine Bahn jedoch nicht mit der der Erde deckungsgleich, sondern gegen die der Erde leicht geneigt.

Bahnform – Betrachtet man den mit der Erdbahn nahezu deckungsgleichen Orbit von 2003 YN₁₀₇ vom mit der Erdbewegung um die Sonne mit-

bewegten Bezugssystem aus, stellt man fest, dass er – fast wie ein zweiter Mond – langsam um die Erde kreist; für einen Umlauf braucht er allerdings ein Jahr. Sein langsamer Umlauf um die Erde innerhalb eines Jahres wird durch seine leicht verschiedene Exzentrizität verursacht. Der radiale Bewegungsanteil wird direkt durch die Differenz der Exzentrizitäten zwischen Erde und 2003 YN₁₀₇ verursacht, während der Bewegungsanteil längs der Erdbahn durch die leicht unterschiedliche Geschwindigkeit im Perihel und im Aphel verursacht wird. Im Perihel überholt er die Erde von innen, während er im Aphel weiter außen in Bezug auf die Erde zurückfällt. Im Lauf eines Jahres wird daraus dadurch ein kompletter Umlauf um die Erde. Da er nicht wie der Mond fest an die Erde gebunden ist, sondern hauptsächlich unter dem Gravitationseinfluss der Sonne steht, nennt man diese Körper →Quasisatelliten. 2003 YN₁₀₇ ist seit 1996 ein Quasisatellit der Erde und wird dies noch bis 2006 bleiben. Aufgrund der Gravitation der Erde trifft er jedoch nach einem Umlauf um die Erde nicht wieder genau am Ausgangspunkt an, sondern beschreibt offene Schleifen um die Erde. So kam er der Erde am 21. Dezember 2003 mit 0,0149 AE (2,23 Millionen km) sehr nahe, was weniger als dem Sechsfachen des Abstandes Erde-Mond entspricht.

Nach 2006 verlässt er die Nähe der Erde und umkreist die Sonne auf einer so genannten →Hufeisenumlaufbahn entlang der Erdbahn, wobei er der Erde entlang ihrer Bahn vorausseilt. Der Name Hufeisenumlaufbahn wird dadurch klar, wenn man vom mit der Erde mitbewegten Bezugssystem aus nur die Relativbewegung von 2003 YN₁₀₇ betrachtet. Er beschreibt dabei entlang der Erdumlaufbahn einen großen Bogen von 360°, dessen Form an ein Hufeisen erinnert. Bei der Bewegung entlang des Erdorbits windet er sich spiralförmig um diesen, wobei er für eine Spiraldrehung ein Jahr braucht. Diese Spiralbewegung im mit der Erde mitbewegten Bezugssystem kommt durch seine leicht von der Erdbahn abweichende Exzentrizität und Bahnneigung zustande, wobei der Unterschied in der Bahnneigung für den vertikalen und derjenige der Exzentrizität für den horizontalen Anteil der projizierten Spiralbewegung verantwortlich ist.

Im Jahr 2066 erreicht 2003 YN₁₀₇ wieder die Erde auf der anderen Seite von hinten und kommt ihr bis auf etwa 0,026 AE (3,9 Millionen km) nahe. Er gerät wieder unter ihren Gravitationseinfluss und wird so auf eine langsamere Umlaufbahn etwas weiter weg von der Sonne gehoben. Dadurch kann er nun nicht mehr mit der Geschwindigkeit der Erde mithalten, bis diese ihn im Jahr 2120 wieder von vorn erreicht. Bei dieser erneuten Be-

gegnung mit der Erde wird 2003 YN₁₀₇ ihr allerdings sehr nahe kommen und von ihr sehr stark abgelenkt werden. Sehr wahrscheinlich wird 2003 YN₁₀₇ dann von der Erde eingefangen und zu einem echten zweiten Mond der Erde. Die Berechnungen werden jedoch chaotisch, so dass man nichts Genaues über die Zeit nach 2120 sagen kann.

Berechnet man die Bahn von 2003 YN₁₀₇ rückwärts in der Zeit, stellt man fest, dass er sich vor 1996 ebenfalls in einer Hufeisenumlaufbahn aufhielt, wobei die Periode für ein volles Vor- und Zurückschwingen 133 Jahre betrug. Diesen Hufeisenorbit kann man bis in das Jahr 1750 zurückberechnen. 1750 kam es zu einem chaotischen Übergang zwischen Quasisatellitenorbit und Hufeisenorbit, so dass man über die Zeit vor 1750 nichts mehr aussagen kann.

Physikalische Eigenschaften

Über 2003 YN₁₀₇ ist außer seiner Umlaufbahn recht wenig bekannt. Aus seiner geringen absoluten Helligkeit von 26,2 bis 26,7 und einem vermuteten Albedo (Reflektionsvermögen) von 0,04 bis 0,20 schließt man aber, dass er nur zwischen 10 und 30 m Durchmesser hat und somit ein sehr kleiner Asteroid ist. Nur aufgrund seiner sehr erdähnlichen Bahn vermutet man, dass er ein abgesprengtes Stück Erde oder Mond sein könnte, welches bei einem Zusammenstoß mit einem mittleren Asteroiden entstand.

Ausblick

Aufgrund seiner sehr erdähnlichen Bahn ist der Asteroid für Raumsonden relativ leicht erreichbar. 2003 YN₁₀₇ wäre also ein geeignetes Studienobjekt zur genaueren Untersuchung des Aufbaus und der Zusammensetzung von Asteroiden und der zeitlichen Entwicklung ihrer Bahnen um die Sonne. Wegen seiner Erdnähe kann man seine Bahn mittels Radarastronomie sehr genau verfolgen und vermessen. Dadurch kann man den vorhergesagten Jarkowski-Effekt, der zu einer geringfügigen Bahnänderung führt und kürzlich beim Asteroiden Golevka bestätigt wurde, schon nach relativ kurzer Zeit von wenigen Jahren feststellen und genauer überprüfen.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/2003_YN107. Historie: 12.11.04: Angelegt von Arnomane, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Nemonand, RKraasch, Zwobot, Weiacher Geschichte(n), Schlumpf, Leipnizkeks, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Janus und Epimetheus

Janus und Epimetheus sind zwei der inneren Monde des Planeten Saturn. Sie stammen wahrscheinlich von einem gemeinsamen Ursprungskörper ab, der durch eine Störung, zum Beispiel eine Kollision mit einem anderen Objekt, in einer frühen Phase des Satellitensystems in zwei Körper zerbrach.

Janus

Janus wurde am 15. Dezember 1966 von Audouin Dollfus entdeckt. Die Entdeckung wird Dollfus zugesprochen, obwohl kurz zuvor, am 29. Oktober 1966, Jean Texereau das Objekt fotografisch festgehalten hatte, ohne allerdings seine Bedeutung zu erkennen. Am 18. Dezember 1966 beobachtete Richard L. Walker ein ähnliches Objekt, den Mond Epimetheus. Man war allerdings der Auffassung, dass Walker ebenfalls Janus beobachtet hatte. Das Objekt wies jedoch ungewöhnliche Bahneigenschaften auf. Im Oktober 1978 fanden Stephen M. Larson und John W. Fountain heraus, dass sich die Beobachtungen am besten mit der Anwesenheit zweier einzelner Körper erklären ließ, die sich die gleiche Bahn teilten.

Janus wurde von der Raumsonde Pioneer 11 registriert, die am 1. September 1979 an Saturn vorbeiflog. Dabei nahmen drei Detektoren zum Nachweis energetischer Partikel seinen Schatten auf. Janus wurde dann eindeutig am 1. März 1980 von der Sonde Voyager 1 identifiziert.

Obwohl der Name Janus bereits 1966 vorgeschlagen wurde und seither für den Mond verwendet wurde, erfolgte die offizielle Benennung durch die Internationalen Astronomische Gesellschaft (IAU) erst 1983. Bis dahin hatte er die vorläufige Bezeichnung S/1966 S 2. Seinen Namen erhielt der Mond nach Janus, dem zweigesichtigen Gott aus der römischen Mythologie.

Janus ist ein unregelmäßig geformter Körper mit einer Ausdehnung von $196 \times 192 \times 150$ km. Seine Oberfläche ist stark verkratert und weist mehrere größere Krater mit einem Durchmesser von 30 km auf. Seine Oberfläche erscheint älter als die des benachbarten Mondes Prometheus, jedoch jünger als die der Pandora.

Aufgrund seiner sehr geringen Dichte von $0,65 \text{ g/cm}^3$ und seiner hohen Albedo von 0,5 scheint Janus ein eisiger poröser Körper zu sein. Er rotiert in 16 Stunden und 40 Minuten um die eigene Achse und weist damit wie der Erdmond eine gebundene Rotation auf. Seine Drehachse ist $0,015^\circ$ gegenüber der Umlaufbahn geneigt. Seine scheinbare Helligkeit beträgt 15,5 mag.

Epimetheus

Epimetheus wurde am 18. Dezember 1966 von Richard L. Walker entdeckt. Bei dem drei Tage nach Janus entdeckten Mond glaubte man zunächst, dass es sich um dasselbe Objekt handelte. Das Objekt zeigte allerdings ein ungewöhnliches Bahnverhalten. Im Oktober 1978 fanden Stephen M. Larson und John W. Fountain heraus, dass sich die Beobachtungen am besten mit der Anwesenheit zweier einzelner Körper erklären ließen. Allerdings gestaltete es sich sehr schwierig, die Bahnen der Monde aus den Beobachtungsdaten aufzuschlüsseln.



Abb. 121: Epimetheus, aufgenommen von der NASA-Raumsonde Cassini am 30. März 2005 aus 75.000 km Entfernung

1980 konnte dies beim Vorbeiflug der Raumsonde Voyager 1 bestätigt werden. Offiziell teilt sich daher Walker seine Entdeckung mit Larson und Fountain. Der von Voyager aufgenommene Körper wurde zunächst 1980 S 3 genannt. Der Name Epimetheus wurde offiziell 1983 vergeben. Zu diesem Zeitpunkt wurde auch der Name Janus von der Internationalen Astronomischen Union (IAU) offiziell anerkannt, obwohl er seit 1966 verwendet wurde. Seinen Namen erhielt der Mond nach Epimetheus, dem Bruder des Prometheus aus der griechischen Mythologie. Epimetheus öffnete trotz der Warnungen seines Bruders die Büchse der Pandora.

Epimetheus ist ein sehr unregelmäßig geformter Körper mit einer Ausdehnung von $144 \times 108 \times 98$ km. Auf seiner Oberfläche befinden sich mehrere größere Krater mit einem Durchmesser von 30 km sowie Höhenzüge und Vertiefungen. Aus der Struktur seiner Oberfläche wird geschlossen, dass es sich um einen relativ alten Himmelskörper handelt. Epimetheus und Janus stammen wahrscheinlich von einem gemeinsamen Ursprungskörper ab, der durch eine Störung, zum Beispiel eine Kollision mit einem anderen Objekt, in einer frühen Phase des Satellitensystems in zwei Körper zerbrach.

Aufgrund seiner sehr geringen Dichte von $0,6 \text{ g/cm}^3$ und seiner hohen Albedo von 0,5 scheint Epimetheus ein eisiger poröser Körper zu sein. Er rotiert in 16 Stunden und 40 Minuten um die eigene Achse und weist damit wie der Erdmond eine gebundene Rotation auf. Seine scheinbare Hel-

ligkeit beträgt 14,5 mag. Die Raumsonde Cassini-Huygens soll den Mond bei einem Vorbeiflug am 3. Dezember 2007 näher untersuchen.

Bahndaten

Beide Monde sind \blacktriangleright koorbitale Objekte zueinander, das heißt, die beiden Monde laufen auf fast gleichen Bahnen um den Saturn. Ihre mittleren Abstände von dem Planeten unterscheiden sich nur um 50 km.

Alle vier Jahre kommt es zu einer engen Begegnung der beiden Monde, die sich dann durch ihre Schwerkraft gegenseitig beeinflussen. Der innere Mond wird dabei beschleunigt und wandert auf eine höhere Umlaufbahn, wodurch er wiederum abgebremst wird. Der äußere wird abgebremst, wandert auf eine niedrigere Umlaufbahn und wird dadurch beschleunigt. Auf diese Weise tauschen Janus und Epimetheus ihre Umlaufbahnen, überholen sich dabei aber nicht. Dieses Verhalten der beiden Monde ist, soweit bekannt, einzigartig im Sonnensystem.

1980 wurden die Bahndaten von der Raumsonde Voyager 1 bestimmt. Der nächste Platzwechsel wird im Jahre 2006 stattfinden.

Janus umkreist Saturn derzeit in einem mittleren Abstand von 151.472 km in 16 Stunden und 40 Minuten. Die Bahn besitzt eine Exzentrizität von 0,007 und ist $0,14^\circ$ gegenüber der Äquatorebene des Saturn geneigt. Epimetheus umkreist den Saturn in einem mittleren Abstand von 151.422 km in 16 Stunden und 40 Minuten. Die Bahn besitzt eine Exzentrizität von 0,009 und ist $0,34^\circ$ gegenüber der Äquatorebene des Saturn geneigt. Janus umläuft Saturn derzeit in einem mittleren Abstand von 151.472 km, Epimetheus in einem mittleren Abstand von 151.422 km. Entsprechend ist Letzterer zurzeit der innere Mond.

Quellen: [http://de.wikipedia.org/wiki/Janus_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Janus_(Mond)), [http://de.wikipedia.org/wiki/Epimetheus_\(Mond\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Epimetheus_(Mond)). Historie: 14.11.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Baldhur, BWBot, Arnomane, Bricktop1, Mhlusi, Kookaburra, FlaBot, Jpp, Matthäus Wander, RobotQuistnix, CdaMVvWgS, Haeber, Bent, RedBot, IGEL, S, Ninjamask, Pikarl, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Zentauren

Die Zentauren, benannt nach den Zentauren der griechischen Mythologie, sind eine Klasse von \blacktriangleright Asteroiden, die zwischen \blacktriangleright Jupiter und \blacktriangleright Neptun um die Sonne kreisen. Bei einigen Zentauren, zum Beispiel Pholus, wurde gefrorenes Wasser auf der Oberfläche entdeckt, bei anderen wie Chiron konnte bisher kein Wassereis nachgewiesen werden.

Wahrscheinlich sind die Zentauren »erloschene« \rightarrow Kometen, deren ursprünglich vorhandene flüchtige Bestandteile, wie etwa Wassereis oder Methan inzwischen mehr oder weniger sublimiert sind. Jedoch wird zum Beispiel der Zentaur \rightarrow Chiron, seitdem ein Halo entdeckt wurde, auch als Komet klassifiziert.

Die drei zuerst entdeckten Zentauren sind \rightarrow (2060) Chiron (1977), (5145) Pholus (1992) und (7066) Nessus (1997).

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Zentauren_\(Astronomie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Zentauren_(Astronomie)). Historie: 12.12.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Epo, Lotse, Alkuin, Arnomane, Zwobot, ConBot, Marc Layer, Wst, LeonardoRob0t, Napa, Mu ma, Gauss, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Chiron

Der \rightarrow Asteroid (2060) Chiron wurde am 1. November 1977 von Charles Kowal auf dem Mount Palomar entdeckt und nach Cheiron benannt.

Chiron läuft in einem Abstand zwischen 8,453 AE (Perihel) und 18,899 AE (Aphel) in 50,6 Jahren um die Sonne. Die Bahn verläuft dabei zwischen den Planeten \rightarrow Saturn und \rightarrow Uranus, wobei jedoch ein Stück der Bahn in die Saturnbahn hineinragt. Chirons Umlaufbahn hat eine Exzentrizität von 0,382 und ist $6,9^\circ$ gegen die Ekliptik geneigt.

Er war das erste beobachtete Objekt, das zu den so genannten \rightarrow Zentauren zählt, die sich zwischen den äußeren Planeten auf instabilen Umlaufbahnen befinden. Vermutlich stammt er aus dem \rightarrow Kuipergürtel. Chirons Durchmesser wird auf rund 135 km geschätzt. In knapp sechs Stunden rotiert er um die eigene Achse.

1991 wurde um Chiron eine gasförmige Hülle (Koma) entdeckt, wodurch er heute nicht nur als Planetoid, sondern auch als der größte bekannte \rightarrow Komet eingeordnet wird. Neben seiner Bezeichnung als Asteroid trägt das Objekt daher auch eine Bezeichnung als periodischer Komet (95P/Chiron).

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Chiron_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Chiron_(Asteroid)). Historie: 12.12.03: Angelegt von Extrawurst, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Extrawurst, Nephelin, Vesta, BWBot, Zwobot, Phrood, ArtMechanic, RKraasch, Srbauer, Arnomane, Crux, Rivi, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Kuipergürtel

Der Kuipergürtel ist eine scheibenförmige Region, die sich hinter der \rightarrow Neptunbahn in einer Entfernung von ungefähr 30 bis 50 Astronomischen Einheiten nahe der Ekliptik erstreckt und schätzungsweise mehr als 70.000 Objekte beherbergt, die einen Durchmesser von mehr als 100 km haben.

Benennung

Der Kuipergürtel ist nach Gerard Kuiper benannt, der 1951 einen Artikel über Objekte jenseits des \rightarrow Pluto veröffentlichte. Da diese Theorie jedoch kaum mit der heutigen Sicht dieser Region übereinstimmt, ist vor allem im englischsprachigen Raum auch



Abb. 122: Kuipergürtel (nichtmaßstäbliches Schema)

häufiger vom *Edgeworth Belt* oder *Edgeworth-Kuiper Belt* (nach Kenneth Edgeworth, 1947) die Rede. Die in dem englischsprachigen Raum verwendete Bezeichnung »Edgeworth-Kuiper-Belt« ist auch die historisch korrektere Benennung, da sowohl Edgeworth (1949) als auch Kuiper (1951) unabhängig voneinander die These aufgestellt hatten, dass sich hinter der Neptunbahn ein Bereich befindet, in dem sich aus planetarischem Material (Staub) Kometen bilden. Die Objekte in diesem Bereich werden *Kuiper Belt Objects* (KBO) oder \rightarrow *transneptunische Objekte* (TNO) bezeichnet.

Klassifizierung

Die bis jetzt etwa 800 bekannten Objekte dieser Region lassen sich aufgrund ihrer Bahnelemente in mehrere unterschiedliche Gruppen unterteilen:

- *Resonante KBOs* sind Objekte, die sich auf resonanten Bahnen zu Neptun bewegen und dadurch in ihrer Bahn bei ungefähr 40 AE stabilisiert werden (zum Beispiel \rightarrow Plutinos mit einer 3:2 Resonanz). Ein Drittel der heute bekannten KBOs sind resonante KBOs.
- *Klassische KBOs* (CKBO) bewegen sich mit kleinen Exzentrizitäten auf nahezu kreisförmigen Bahnen zwischen 42 und 50 AE mit Bahnneigungen von bis zu 30° . Etwa zwei Drittel der bekannten KBOs bewegen sich auf einer solchen kreisähnlichen Bahn um die Sonne.
- *Gestreute KBOs* (SKBO) bewegen sich mit großen Exzentrizitäten auf Bahnen mit Periheldistanzen nahe 35 AE und Apheldistanzen bis 1000 AE. Bis jetzt sind erst wenige dieser gestreuten KBOs bekannt (zum Beispiel 1996 TL₆₆ mit einer stark elliptischen Bahn und einer Bahnneigung von 24°).

Seit 1978 ist bekannt, dass Pluto mit \rightarrow Charon einen sehr großen Begleiter hat, man spricht deshalb auch vom *Pluto-Charon-System*. Zwischen 1997 und 2001 wurden unter den bis dahin bekannten etwa 500 KBOs weitere acht Zweifachsysteme gefunden, die sich auf alle drei KBO-Gruppen verteilen.

Entstehung

Die KBOs sind während der Planetenbildung vermutlich nahe der Region entstanden, in der sie heute beobachtet werden. Während sich im dichteren inneren Bereich sehr schnell sehr viele Planetesimale bildeten und sehr bald zu \rightarrow Planeten heranwuchsen, vollzog sich dieser Vorgang in den dünneren äußeren Bereichen sehr viel langsamer. Die Überbleibsel bilden die heute beobachtbaren KBOs.

Die CKBOs bewegen sich nahezu kreisförmig, wie man es für in diesem Bereich entstandene Objekte erwartet. Die teilweise recht großen Inklinationen erfordern jedoch einen Mechanismus, der sie aus der Ekliptik ablenkt. Dieser Mechanismus ist noch nicht verstanden:

- Eine Möglichkeit besteht darin, dass Neptun in den frühen Phasen der Planetenentwicklung massive Planetesimale (größer als die Erde) in den Kuipergürtel gestreut hat. Diese massiven Objekte könnten die großen Bahnneigungen erklären, aber sie hätten auch die resonanten KBOs stärker abgelenkt, als es den heutigen Beobachtungen entspricht.
- Ein nahe vorbeiziehender Stern verursachte die Auslenkung aus der Ekliptik. Dieser Prozess würde die resonanten KBOs verschonen und auch den äußeren Rand des Kuipergürtels bei 50 AE erklären, aber der Stern hätte sich der Sonne auf einige hundert AE nähern müssen.

Die SKBOs wurden vermutlich während der Entstehung des Planetensystems von den großen Planeten nach außen gestreut. Ein Teil wurde von Neptun auf Bahnen nahe 35 AE Periheldistanz eingefangen, der Rest wurde weiter hinaus gestreut und hat sogar teilweise das Sonnensystem verlassen.

Die Bildungsprozesse der Zweifachsysteme sind bisher reine Spekulation. Das Hauptproblem der meisten Vorschläge ist dabei die große Anzahl dieser Systeme aus großen KBOs.

Kometen

Man vermutet, dass ein Großteil der \rightarrow Kometen mit mittleren Perioden aus dem Kuipergürtel stammt. Während man früher davon ausging, dass die

Kometenkerne nahezu unverändert aus ihrer Bahn geworfene KBOs sind, geht man heute jedoch davon aus, dass es sich bei den Kometenkernen um Fragmente handelt, die aus Zusammenstößen von KBOs stammen.

Große KBOs

Mit Stand 2005 sind acht KBOs bekannt, deren Durchmesser (bei Unsicherheiten von 10–15 %) um 1.000 km oder mehr liegt. Die größten bekannten Objekte im Kuiper-Gürtel sind:

- *Plutinos*: \rightarrow Pluto (2.320 km), \rightarrow Orcus (1.600–1.800 km), \rightarrow Charon (1.270 km), *Ixion* (400–550 km)
- *CKBOs*: 2003 *EL*₆₁ (1.300 × 1.800 km), \rightarrow Quaoar (1.250 km), *Varuna* (450–750 km)
- *SKBOs*: \rightarrow 2003 *UB*₃₁₃ (~ 2.500–3.000 km), 2005 *FY*₉ (1.800 km), 2002 *AW*₁₉₇ (890 km)

Geschichte

- 1951 veröffentlichte Gerard Kuiper eine Theorie über Objekte jenseits des Pluto.
- 1978 wurde \rightarrow Charon entdeckt.
- 1992 wurde mit 1992 *QB*₁ das erste Objekt des Kuipergürtels entdeckt.
- 1993 wurden die ersten Plutinos (nach Pluto) entdeckt, die auch eine Diskussion über den Planetenstatus des Pluto auslösten.
- 1996 wurde mit 1996 *TL*₆₆ das erste gestreute KBO entdeckt.
- 1998 wurde mit 1998 *WW*₃₁ das erste Zweifachsystem (nach Pluto) entdeckt.
- 2001 wurde mit *Varuna* das erste \rightarrow TNO (nach Pluto/Charon) mit einer Größe von etwa 1.000 km entdeckt.
- 2003 wurde mit *Sedna* (vorheriger Name 2003 *VB*₁₂) ein TNO entdeckt, das bisher in kein Schema passt. Es scheint nicht mehr zum Kuipergürtel zu gehören, aber auch noch nicht zur \rightarrow Oort'schen Wolke.
- 2005 wurde mit \rightarrow 2003 *UB*₃₁₃ ein TNO entdeckt, dessen Größe die von Pluto übersteigt.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kuipergürtel>. Historie: 26.9.02: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Nephelin, Herbye, Rivi, Alkuin, Arnomane, Zwobot, Bricktop1, Vesta, Schusch, Karl-Henner, Ben-Zin, Erik Streb, Crux, RKraasch, Ellywa, Robodoc, Ablaubauer, Hashar, Sansculotte, FlaBot, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Transneptunisches Objekt

Als Transneptunisches Objekt (TNO) oder auch seltener Transneptun bezeichnet man einen Himmelskörper, der sich außerhalb der \rightarrow Neptun-Umlaufbahn (äußerster Riesenplanet) um die Sonne bewegt. Die meisten TNO werden im \rightarrow Kuipergürtel vermutet. Heute kennt man einige hundert von ihnen, vermutet aber einige zehntausend Objekte über 100 km. Deswegen wird der Begriff Kuipergürtelobjekt (KBO, von englisch *Kuiper Belt Object*) heutzutage auch synonym für *Transneptunisches Objekt* verwendet.

Geschichte

Von etwa 1900 bis 1930 aber stand das Wort »Transneptun« für die Suche nach einem hypothetischen neunten Planeten, der (irrtümlich) für kleine Bahnstörungen der Planeten \rightarrow Uranus und \rightarrow Neptun verantwortlich gemacht wurde. Der Marsforscher Percival Lowell (1855–1916) hatte lange selbst nach ihm gesucht und dafür das »Lowell-Observatorium« bei Flagstaff finanziert.

Der schließlich am 18. Februar 1930 entdeckte \rightarrow Pluto ist bislang das einzige Transneptunische Objekt, das den Status eines \rightarrow Planeten hat, – obwohl dieser Status mittlerweile aufgrund zahlreicher Anomalien umstritten ist; es erhielt seinen Namen unter anderem wegen der Initialen Lowells. Ab etwa 1950 suchte man sogar nach einem \rightarrow Transpluto, doch wählte man 1977 nach der Entdeckung des ersten \rightarrow Zentauren eine andere Terminologie.

Eigenschaften

Die bisher entdeckten Transneptunischen Objekte sind in ihrer Zusammensetzung kometenähnlich. Viele bekannte \rightarrow Kometen stammen nach Bahn-Messungen aus den 1970er Jahren eher aus dem \rightarrow Kuipergürtel als, wie lange Zeit vermutet, aus der \rightarrow Oortischen Wolke.

Die Transneptune werden als spezielle Gruppe der \rightarrow Asteroiden angesehen und unterscheiden sich von jenen im \rightarrow Hauptgürtel vor allem durch

- ihre sonnenfernen und oft sehr langgestreckten Umlaufbahnen,
- ihre kohlenartige dunkle Farbe (Albedo nur etwa 0,04),
- ihre Zusammensetzung aus Lockergestein und Eis, die gleichzeitig den Übergang zu \rightarrow Kometenkernen darstellt.

Die Transneptune kreisen größtenteils im \rightarrow Kuipergürtel zwischen 30 und 50 AE, sammeln sich aber vielfach zu speziellen Gruppen wie zum Beispiel

den \rightarrow Plutinos. Der hellste von diesen ist der Planet \rightarrow Pluto. Alle Plutinos befinden sich auf stabilen Bahnen, deren Umlaufzeiten sich zu jener von Neptun genau wie 3:2 verhalten.

Andere wichtige Gruppen sind die CKBOs (klassische Kuipergürtelobjekte), zu denen die 1.000-km-Objekte \rightarrow Quaoar und Varuna zählen, und die SKBOs (gestreute KBO).

Ende 2003 wurde ein Objekt in doppelter Pluto-Entfernung entdeckt, das sich auf einer äußerst langgezogenen Ellipse beinahe bis zur \rightarrow Oortischen Wolke erstreckt und einen neuen Prototyp darstellt. Es ist rund 1.500 km groß und wurde nach einer sagenhaften Inuit-Göttin Sedna genannt. Dieser oder ein anderer noch unentdeckter » \rightarrow Transpluto« könnte für die langsame Loslösung von \rightarrow Kometen aus der interstellaren \rightarrow Oortischen Wolke verantwortlich sein.

Sonstiges

In der Astrologie wird der Name »Transneptuner« vereinzelt für einige fiktive Himmelskörper verwendet. Man schreibt ihnen symbolische Eigenschaften zu, die von den klassischen Planeten nicht abgedeckt werden.

Quellen: http://de.wikipedia.org/wiki/Transneptunisches_Objekt, <http://de.wikipedia.org/wiki/Transneptun>. Historie: 24.12.03: Angelegt von GEOFF, danach bearbeitet von den Hauptautoren Arnomane, Geof, Nephelin, Flups, RobotQuistnix, Phrood, RobertLechner, Alkuin, Zwobot, Moose, FlaBot, Nankea, Mumabox, RokerHRO, Robodoc, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Plutino

Als Plutinos werden in der Astronomie jene Objekte des \rightarrow Kuipergürtels bezeichnet, deren Bahnelemente mit denen von \rightarrow Pluto vergleichbar sind. Diese Umlaufbahnen werden durch eine 3:2-Resonanz zur Umlaufbahn des Planeten \rightarrow Neptun stabilisiert, das heißt, während dreier Neptunumläufe umrunden sie die Sonne zweimal. Durch diese Synchronisierung werden enge Begegnungen mit Neptun vermieden, so dass im Umkreis dieses äußersten \rightarrow Riesenplaneten nur solche Bahnen über längere Zeit stabil sind. Die ersten drei Plutinos wurden am 14. und 16. September 1993 – 63 Jahre nach Pluto – entdeckt. Gegenwärtig schätzt man die Anzahl der größeren Plutinos (über 100 km) auf mehr als 1.000. Diese Schätzungen sind jedoch noch sehr vage, da nur wenig Daten über die \rightarrow Kuipergürtelobjekte (KBO) vorliegen.

Vermutliche Entstehung

Während der Entstehung des Sonnensystems wurden durch Neptun Planetesimale in den äußeren Bereich (Kuipergürtel und \Rightarrow Oortsche Wolke) geschleudert, wodurch sich seine Umlaufbahn vergrößerte. Durch Simulationsrechnungen konnte nachgewiesen werden, dass er dabei auf seinem Weg die bereits vorhandenen Objekte in der 3:2-Resonanz wie ein Schneepflug vor sich »hergeschoben« hat.

Name	Durchmesser	große Halbachse	Perihel	Aphel	Umlaufzeit	Inklination	Exzentrizität
\Rightarrow Pluto	2320 km	39,2 AE	29,6 AE	48,8 AE	248 Jahre	17,1°	0,244
\Rightarrow Charon	1270 km	39,2 AE	29,6 AE	48,8 AE	wie Pluto	17,1°	0,244
1993 RO	~140 km	39,06 AE	31,5 AE	46,6 AE	~247 Jahre	3,7°	0,194
1993 SB	~200 km	39,24 AE	26,7 AE	51,8 AE	248 Jahre	1,9°	0,320
1993 SC	~300 km	39,37 AE	32,16 AE	46,58 AE	251 Jahre	5,2°	0,183
Huya	540 km	39,72 AE	28,6 AE	50,9 AE	~250 Jahre	15,5°	0,281
Ixion	1065 km	39,48 AE	29,9 AE	49,0 AE	~250 Jahre	19,6°	0,242
\Rightarrow Orcus	1500 km	39,47 AE	30,9 AE	48,1 AE	~250 Jahre	20,6°	0,218

Große und bekannte Plutinos

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Plutino>. Historie: 11.3.04: Angelegt von Srbauer, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Geof, Arnomane, Alkuin, Lotse, Nephelin, anonym. 21.9.05–31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Quaoar

(50000) Quaoar ist der Name eines Transneptunischen Objekts im \Rightarrow Kuipergürtel. Bevor er den Namen Quaoar erhielt, wurde er unter der \Rightarrow vorläufigen Bezeichnung 2002 LM₆₀ geführt. Entdeckt wurde der \Rightarrow Asteroid am 4. Juni 2002 von den Astronomen Chad Trujillo und Mike Brown am California Institute of Technology in Pasadena, USA, von denen er auch benannt wurde. Der Name Quaoar (gesprochen »kwah-o-wahr«) entstammt dem Schöpfungsmythos der nordamerikanischen Tongva-Indianer, die in der Gegend um Los Angeles leben. Die Internationale Astronomische Union (IAU) hat die Namensgebung mittlerweile offiziell bestätigt.

Eigenschaften

Quaoars Durchmesser wurde, unter anderem mit Hilfe des Hubble-Weltraumteleskops, zu 1.250 ± 50 km bestimmt. Damit war er, bis zur

Entdeckung von \Rightarrow (90482) Orcus und \Rightarrow (90377) Sedna, das größte seit \Rightarrow Pluto entdeckte Objekt im \Rightarrow Sonnensystem. Quaoar ist größer als alle im \Rightarrow Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter befindlichen \Rightarrow Asteroiden zusammen. Sein Durchmesser beträgt etwa ein Zehntel dessen der Erde beziehungsweise ein Drittel dessen des \Rightarrow Erdmondes. Er umkreist die \Rightarrow Sonne in einer fast perfekten Kreisbahn in etwa sechs Milliarden Kilometer Entfernung (43 AE; Perihel 41,914 AE – Aphel 44,896 AE), welche 7,983° gegen die Ekliptik geneigt ist. Die Umlaufdauer beträgt rund 286 Jahre.

Geschichte

Der Asteroid wurde bereits 1982 von dem Astronom Charlie Kowal fotografiert, aber nicht als solcher identifiziert. Im Dezember 2004 gelang mit dem japanischen 8-m-Teleskop Subaru der Nachweis von kristallinem Wassereis und auch Ammoniakhhydrat in der Oberfläche von Quaoar. Dies ist sehr überraschend, da man bei einer Oberflächentemperatur von 50 Kelvin eigentlich nur amorphes Eis ohne Kristallstruktur vermuten würde. Es sind Temperaturen bis zu 110 Kelvin notwendig, um den Prozess zu erklären. Nun wird vermutet, dass sich im Inneren von Quaoar noch genügend Radioaktivitätswärme befindet, um die Temperaturen zu erzeugen. Es entsteht dabei eine Art Kryovulkanismus, wie auch auf einigen Uranusmonden.

Die Entdeckung von Quaoar schwächt \Rightarrow Plutos Status als Planet, zumal Astronomen weitere Objekte von Quaoars Größe im Kuipergürtel vermuten. Mittlerweile wurde mit \Rightarrow 2003 UB₃₁₃ dort sogar ein Objekt gefunden, das größer als Pluto ist.

Sichtbarkeit

Amateurastronomen benötigen zur Beobachtung die genauen Koordinaten, ein 40-Zentimeter-Teleskop sowie zur Dokumentation eine Kamera. Auf Aufnahmen von hintereinander folgenden Nächten ist der Asteroid als langsam wandernder Punkt zu erkennen.

Sonstiges

Einige Fans des Romans *Per Anhalter durch die Galaxis* setzten sich vergeblich dafür ein, den damals noch als 2002 LM₆₀ bekannten Himmelskörper Rupert zu nennen, als Hommage an Douglas Adams, den Autor des Buchs (Im Roman ist Rupert der Spitzname für den fiktiven 10. Planeten Persephone).

Asteroiden und Kometen

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Quaoar_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Quaoar_(Asteroid)). Historie: 8.10.02: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Flups, Alkuin, Nephelin, Alexander Grüner, Arnomane, Majestic6, Hjad, Vesta, Srbauer, BWBot, Rivi, SiriusB, ArtMechanic, ChristophDemmer, Nankea, Crux, Bender235, Nd, Mw, Extrawurst, Denisoliver, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Orcus

(90482) Orcus (alte Bezeichnung: 2004 DW) ist die Bezeichnung für ein ➔Transneptunisches Objekt im ➔Kuipergürtel. Entdeckt wurde der ➔Asteroid am 17. Februar 2004 von einem Astronomenteam am California Institute of Technology in Pasadena, USA. Der von den Entdeckern vorgeschlagene Name wurde am 22. November 2004 offiziell angenommen. Orcus ist der Gott der Unterwelt aus der römischen Mythologie.

Orcus läuft in einem Abstand zwischen 30,872 AE (Perihel) und 48,076 AE (Aphel) in rund 248 Jahren um die Sonne, wobei seine Bahn um 20,555° gegen die Ekliptik geneigt ist. Da seine Bahnelemente im Wesentlichen mit denen des Planeten ➔Pluto übereinstimmen, wird er der Gruppe der ➔Plutinos zugeordnet.

Der Durchmesser von Orcus wird anhand seiner scheinbaren Helligkeit auf 1.600 bis 1.800 km geschätzt. Eine exakte Bestimmung war bisher noch nicht möglich. Damit handelt es sich womöglich seit der Entdeckung des Pluto um den größten, neu gefundenen Himmelskörper im Sonnensystem.

Ähnlich groß ist allerdings der Asteroid ➔(90377) Sedna, mit einem geschätzten Durchmesser zwischen 1.600 und 1.700 km. Sedna wurde von demselben Astronomenteam unmittelbar vor Orcus gefunden. Ihre Entdeckung wurde aber erst später veröffentlicht, da ihre extremen Bahnparameter und die riesige Entfernung eine längere Beobachtungszeit erforderlich machten. Die Asteroiden ➔(50000) Quaoar und ➔2003 UB₃₁₃ im ➔Kuipergürtel wurden ebenfalls von Trujillo und Mike Brown entdeckt.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Orcus_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Orcus_(Asteroid)). Historie: 22.2.04: Angelegt von Nankea, danach bearbeitet von den Hauptautoren Alkuin, Nankea, Herbye, Srbauer, Jörg Knappen, BWBot, Arnomane, Zwobot, Vesta, Crux, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

2003 UB₃₁₃

2003 UB₃₁₃ ist ein Objekt des ➔Kuipergürtels, das größer als ➔Pluto sein soll und von der NASA und vielen Medien als »Zehnter Planet« bezeichnet wird; jedoch wurde dieser Status nicht von der IAU anerkannt. Es befindet sich momentan in einer Entfernung von 97 AE (14,5 Milliarden km) und bewegt sich auf einer stark exzentrischen und geneigten Bahn um die Sonne. 2003 UB₃₁₃ zählt aufgrund seiner hohen Exzentrizität zu den gestreuten KBOs (SKBO).

Entdeckung

Das ➔Kuipergürtel-Objekt 2003 UB₃₁₃ wurde von Mike Brown (CalTech), Chad Trujillo (Gemini-Observatorium) und David Rabinowitz (Yale-Universität) entdeckt, also von denselben Astronomen, denen zuvor die Entdeckungen der großen Transneptune ➔(50000) Quaoar, ➔(90377) Sedna und ➔(90482) Orcus gelungen sind. Das Objekt wurde auf CCD-Aufnahmen gefunden, die bereits am 31. Oktober 2003 mit dem 1,2-m-Schmidt-Teleskop am Mount-Palomar-Observatorium gewonnen wurden. Aufgrund seiner langsamen Bewegung wurde es bei der ursprünglichen Verarbeitung der Bilder aber nicht erkannt. Bei einer neuerlichen Auswertung der Aufnahmen wurde das Objekt am 8. Januar 2005 schließlich aufgefunden.

Die Entdeckung sollte ursprünglich erst später, nach weiteren Beobachtungen, öffentlich gemacht werden. Nachdem aber bekannt wurde, dass die Ausrichtung eines der Teleskope, das die Entdecker zur Beobachtung von 2003 UB₃₁₃ benutzt hatten, über eine öffentliche Internetseite abgefragt werden konnte, gingen die Forscher am 29. Juli 2005 vorzeitig an die Öffentlichkeit. Nur 19 Stunden zuvor hatten spanische Astronomen ihre Entdeckung von 2003 EL₆₁ bekannt gemacht, den die Gruppe um Brown auch unabhängig davon im Jahr 2004 gefunden, aber bis dahin nicht veröffentlicht hatte. Am gleichen Tag publizierte Browns Gruppe auch die Entdeckung von 2005 FY₉, so dass die Entdeckungen von drei großen Objekten des Kuipergürtels innerhalb nur eines Tages bekannt wurden.

Der zehnte Planet?

Wie bereits ➔Quaoar und ➔Sedna wurde auch 2003 UB₃₁₃ in den Medien als zehnter ➔Planet betitelt. Auch ihre Entdecker und die NASA bezeichneten ihn als solchen. Eine solche Einordnung erscheint plausibel, da

2003 UB₃₁₃ größer ist als Pluto und andere Kriterien wie Exzentrizität oder die Bedingung, dass ein Planet eine größere Masse als alle anderen Objekte in seinem Orbit zusammen haben muss, bereits bei diesem ausgesetzt wurden. Allerdings tendieren viele Astronomen schon seit Ende der 1990er dazu, selbst Pluto nicht mehr zu den Planeten zu zählen, sondern bezeichnen ihn als das bis dahin größte transneptunische Objekt.

Es wird damit gerechnet, dass die Zuschreibung von 2003 UB₃₁₃ als Planet die Debatte neu entfachen wird, welche Merkmale erfüllt sein müssen, um als Planet gezählt zu werden. Nach den oben genannten Kriterien wären weder Pluto noch 2003 UB₃₁₃ Planeten, andererseits könnte man diese auch fallenlassen und beide als solche zählen. Andere schlagen vor, nur Pluto aus historischen Gründen als Planet zu zählen. Die IAU erkennt 2003 UB₃₁₃ bisher nicht den Status eines Planeten zu.

Größe

Um die Größe eines Objekts genau zu bestimmen, müssen sowohl seine Entfernung als auch seine Albedo bekannt sein. Ist dies der Fall, so lässt sich aus der scheinbaren Helligkeit seine Größe berechnen, wobei eine geringere Albedo eine höhere Größe bedeutet. Da die Albedo von 2003 UB₃₁₃ jedoch noch nicht genau bekannt ist, liegen bis jetzt nur Schätzungen vor.

Jedoch würde 2003 UB₃₁₃ selbst bei einer maximalen Albedo von 1, also wenn es sämtliches Licht reflektieren würde, nach Browns Berechnungen noch mindestens genauso groß wie Pluto sein. In ersten Meldungen hieß es, sein Durchmesser würde unter 3.200 km liegen, da das Spitzer-Weltraumteleskop nicht in der Lage war, es aufzufinden – inzwischen stellte sich jedoch heraus, dass das Teleskop durch einen Bedienungsfehler nicht auf das Objekt ausgerichtet war. Nach Angaben von Mike Brown sind für Ende August 2005 bereits neue Beobachtungen mit dem Spitzer-Weltraumteleskop angekündigt.

Brown selbst hält die ungefähr eineinhalbfache Größe Plutos für wahrscheinlich. Bezieht man diese Aussage auf die Fläche des Objekts, so erhält man einen Durchmesser von etwa 2.900 km.

Dem Entdeckerteam wurde nun Beobachtungszeit am Hubble-Weltraumteleskop zugesprochen, mit dessen Hilfe sie die Größe des Objekts genauer bestimmen wollen. Mit einer Entfernung von 97 AE und einem Durchmesser von etwa 3.000 km ergibt sich eine scheinbare Größe von 0,04". Diese Größe wird sich mit Hilfe von Hubble, obwohl sie bereits an die Grenzen von dessen Leistungsfähigkeit stößt, und speziellen Bildver-

arbeitungstechniken wie Dekonvolution genauer bestimmen lassen. Mit dieser Methode gelang es bereits, das Kuipergürtel-Objekt Quaoar mit einer Genauigkeit von ± 50 km zu vermessen, dieses ist jedoch noch nicht einmal halb so weit von der Erde entfernt wie 2003 UB₃₁₃.

Bahn

Die Bahn von 2003 UB₃₁₃ ist, nicht unüblich für ein Objekt des Kuipergürtels, hochgradig exzentrisch (numerische Exzentrizität 0,44). So liegt das Perihel seiner Bahn lediglich bei 37 AE. Dabei kann er zeitweilig der Sonne näher stehen als Pluto, dessen Aphel bei 49 AE liegt. Derzeit befindet sich 2003 UB₃₁₃ nahe dem Aphel seiner Bahn, etwa 97 AE von der Sonne entfernt. Das entspricht einer Distanz von etwa 13,5 Lichtstunden.

Eine weitere Besonderheit ist, dass die Bahn von 2003 UB₃₁₃ um 44° gegenüber der Ekliptik geneigt ist, was für einen Körper dieser Größe recht ungewöhnlich ist und auch wahrscheinlich die Erklärung für seine späte Entdeckung ist. Die meisten Suchprogramme für KBOs oder andere Asteroiden beschränken sich auf Positionen in der ungefähren Umgebung der Ekliptik, da dort auch der Großteil der Materie des Sonnensystems konzentriert liegt. Möglicherweise wurde es durch den gravitativen Einfluss Neptuns in diese Bahn »geschleudert«.

Aufbau

Einige Quellen sprechen von einer Zusammensetzung von ungefähr 70 Prozent Gestein und 30 Prozent gefrorenem Wasser. Solange aber weder Masse noch Durchmesser genauer bekannt sind, sollten solche Angaben eher skeptisch betrachtet werden. Spektroskopische Beobachtungen am Gemini-Observatorium auf Hawaii weisen außerdem auf das Vorhandensein von gefrorenem Methan auf der Oberfläche von 2003 UB₃₁₃ hin. Diese würde somit der von Pluto ähneln, was auch durch die, aufgrund der geringen Größe zu vermutende, hohe Albedo bekräftigt wird. Damit zeigt 2003 UB₃₁₃ mehr Ähnlichkeit mit Pluto und seinem Mond Charon als mit den anderen KBOs. Da Methan hochgradig flüchtig ist, kann das Objekt in seiner Vergangenheit zudem kaum weiter in das innere Sonnensystem vorgedrungen sein. Das Methan wäre sonst sublimiert und hätte sich verflüchtigt.

2003 UB₃₁₃ wäre außerdem groß genug, um ähnlich wie Pluto eine sehr dünne Atmosphäre aus Stickstoff, Methan oder Kohlenmonoxid zu halten. Diese würde periodisch mit der Umlaufdauer und damit dem Absinken

der Oberflächentemperatur auf der Oberfläche resublimieren und beim erneuten Ansteigen der Temperatur wieder sublimieren und eine neue Atmosphäre bilden. Da 2003 UB₃₁₃ sich derzeit sehr nahe seines Aphels aufhält, wäre diese momentan jedoch nicht vorhanden.

Die Oberflächentemperatur von 2003 UB₃₁₃ wird auf 30 K (etwa -242 °C) geschätzt. Er ist damit noch einmal deutlich kälter als Pluto. Dies verdankt er vor allem seiner größeren Entfernung zur Sonne, da er aufgrund seiner (im Vergleich zu geologisch aktiven Planeten wie der Erde) geringen Größe und seiner Entstehung am äußeren Rand des Sonnensystems kaum nennenswerte innere Energiequellen besitzen kann. Auch die Gezeitenwärme eines eventuellen Mondes, auf den es jedoch keinerlei Hinweise gibt, könnte geringen Einfluss auf die Temperatur nehmen, sollte dieser eine ausreichende Masse besitzen.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/2003_UB313. Historie: 30.7.05: Angelegt von Srbauer, danach bearbeitet von den Hauptautoren Tuchs, Vesta, Srbauer, Bricktop1, Sig11, Uwe W., Arnomane, Advocatus d, Phrood, Simplicius, FotoFux, Gunter.krebs, San Jose, MiKo, Achim Raschka, KAMiKAZOW, Japan01, HAL Neuntausend, Daniel B, Franz Wikipedia, Krido, Zaphiro, ElNuevoEinstein, Bota47, Xls, YurikBot, J.e, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Sedna

(90377) Sedna, auch bekannt unter der vorläufigen Bezeichnung 2003 VB₁₂, ist ein transneptunisches Objekt, das am 14. November 2003 von Mike Brown (California Institute of Technology), Chad Trujillo (Gemini-Observatorium) und David Rabinowitz (Yale-Universität) mit dem 1,2-m-Schmidt-Teleskop am Mount-Palomar-Observatorium entdeckt wurde. Weitere Untersuchungen wurden mit dem Spitzer-Weltraumteleskop und dem Hubble-Weltraumteleskop durchgeführt. Der Öffentlichkeit wurde die Entdeckung am 15. März 2004 vorgestellt.

Namensursprung

Wegen seines kalten und entfernten Wesens benannten die Entdecker das Objekt vorläufig nach Sedna, der Meereshöttin der Inuit, die der Sage nach in den kalten Tiefen des Atlantischen Ozeans lebte.

Beobachtete Eigenschaften

Sedna hat einen geschätzten Durchmesser von etwa 1.700 km. Die derzeitige Entfernung von der Sonne beträgt rund 13 Milliarden Kilometer

(etwa das 90fache der Entfernung der Erde von der Sonne), die Oberflächentemperatur dürfte aufgrund dessen lediglich bei eisigen 30 K (-243°C) liegen. Nachträglich konnte Sedna auf mehreren älteren Aufnahmen aus den Jahren 2001 bis 2003 gefunden werden, dies führt zur Berechnung sehr genauer Bahndaten. Die Umlaufbahn von Sedna ist extrem elliptisch mit einem Aphel von fast 915 AE und einem Perihel von etwa 76 AE und 11,931° gegen die Ekliptik geneigt. Die mittlere Umlaufzeit beträgt etwa 11.040 Jahre.

Sedna hat eine stark rötliche Färbung, die jener des viel sonnennäheren Zentauren Pholus oder des Planeten Mars ähnelt. Diese Färbung ist bisher unerklärt und weicht deutlich von der meist kohlgigen Farbe der bisher entdeckten Transneptune ab.

Das Objekt gehört vermutlich nicht mehr zum Kuipergürtel, ist aber auch zehnmal kleiner als die vermutliche Entfernung der Oortschen Wolke. Auch wenn die genaue Einordnung noch unklar ist, gehört Sedna auf jeden Fall einer ganz neuen Klasse von Objekten an.

Ist Sedna ein Planet?

In den Medien wurde Sedna vielfach als der 10. Planet unseres Sonnensystems bezeichnet – eine Aussage, die jedoch von Seite der Wissenschaft keine Unterstützung findet. Astronomen sehen in Sedna wegen seiner relativ geringen Größe und der hohen Bahnexzentrizität keinen »echten« Planeten. Letztlich ist es eine Frage der Definition, aber die allgemeine Auffassung unter Astronomen geht eher dorthin, selbst den deutlich größeren Pluto nicht mehr als Planeten zu führen.

Die Entdeckung von immer mehr großen transneptunischen Objekten macht jedoch klar, dass die Planeteneinstufung eine Definitionssache ist: Wann ist ein Objekt als Planet zu bezeichnen? Diese Frage ist nicht eindeutig geklärt. Geht man nur von der Größe des Objektes aus, so müsste das am 29. Juli 2005 bekannt gemachte Objekt 2003 UB₃₁₃ (dessen Durchmesser derzeit auf rund 3.000 km geschätzt wird) in jedem Fall als 10. Planet gelten, vorausgesetzt Pluto behält seinen Status bei. Setzt man als Maßstab eine stabile Umlaufbahn an, so unterscheiden sich Pluto und alle anderen Objekte hier erheblich von den anderen Planeten durch ihre stark exzentrische Umlaufbahn. In diesem Fall würden nur acht Planeten anerkannt werden.

Es ist eine Grundsatzfrage, ob das Sonnensystem acht oder zehn (und gegebenenfalls auch noch mehr) Planeten hat.

Hypothesen und Spekulationen

Als das am weitesten außen stehende Objekt des Sonnensystems, noch dazu auf einer unerwarteten Bahn, regt Sedna zu Spekulationen an – viel mehr als andere →Asteroiden. Die große Entfernung zur Sonne etwa wirft Fragen nach Alternativen zu bisherigen Entstehungsmodellen auf. So liefert das derzeitige Modell zur Planetenentstehung (Zusammenballung von Planetesimalen) bereits für zuvor bekannte Objekte des →Kuipergürtels aufgrund der geringen Dichte des protoplanetaren Materials eine Entstehungsdauer, die um Zehnerpotenzen länger ist (mehrere 100 Millionen Jahre) als die Lebensdauer der protoplanetaren Scheibe (weniger als 10 Millionen Jahre). Zur Erklärung dieser und anderer bislang unverständlicher Fakten gibt es einige Hypothesen, doch wird man ihren Wahrheitsgehalt erst nach intensiven Forschungsarbeiten beurteilen können.

Diskussion zu Ursprung und Herkunft – Die drei Entdecker äußern die Vermutung, Sedna gehöre zu einer *Inneren Oortschen Wolke*. Diese könnte sich aus der ursprünglichen →Oortschen Wolke durch eine Störung von außen gebildet haben. In Frage kommt dafür zum Beispiel eine frühere, enge Begegnung des Sonnensystems mit einem nahen Stern. Die ungewöhnlich exzentrische Bahn könnte aber auch von Störungen durch einen etwa →marsgroßen Körper unseres Sonnensystems weiter außen herrühren. Dann wäre Sedna ein Einzelfall und ein nach außen gestreutes Objekt des →Kuipergürtels. Wie erste Abschätzungen ergeben, müsste ein solches störendes Objekt allerdings etwa 200 AE von der Sonne entfernt kreisen. Die Existenz eines solchen Objektes wäre keine geringere Sensation als die Existenz von Sedna selbst.

Sednas hypothetischer Mond – Zunächst vermutete man, dass das von Sedna reflektierte Sonnenlicht sich periodisch alle 40 Tage ändert, woraus man auf eine gleichlange Rotationsperiode schließt. Für einen Kleinplaneten wäre dies eine außergewöhnlich langsame Rotation, was die Frage nach bremsenden Effekten erhebt. Eine der Möglichkeiten, einen schnell rotierenden Körper abzubremesen, wäre ein Mond und die von ihm verursachten Gezeitenkräfte. Das Beispiel der →Venus zeigt allerdings, dass eine langsame Rotation auch ohne Mond vorkommen kann.

Am 14. April 2004 veröffentlichte die NASA neue Bilder des Hubble-Weltraumteleskops, auf denen laut Untersuchung kein Begleiter zu erkennen ist. Ein Mond in der erforderlichen Größe müsste erkannt worden

sein, es sei denn, er hätte bei der Aufnahme unmittelbar vor oder hinter Sedna gestanden. Zudem konnte man auch aus den Beobachtungen mit Hubble die Rotationsperiode Sednas nicht exakt ableiten.

Von Oktober 2004 bis Januar 2005 führte eine Gruppe des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics um Scott Gaudi eine Beobachtungskampagne durch, die die Ergebnisse von Brown et. al. nicht bestätigen konnte. Diese Gruppe ermittelte Rotationsperioden von 10 beziehungsweise 18 Stunden, die zur Erklärung keinen bremsenden Effekt eines Mondes benötigen. Durch diese Messungen können Rotationsperioden von über zehn Tagen ausgeschlossen werden. Nach einer Vermutung von Gaudi könnte die ursprünglich gemessene Periode von 40 Tagen durch Hintergrundgalaxien vorgetäuscht worden sein – es sind jedoch noch weitere Beobachtungen nötig, um die genaue Rotationsperiode exakt zu bestimmen.

Mögliche Bedeutungen der roten Farbe – Die rote Farbe könnte auf Eisenverbindungen oder hohe Konzentrationen organischer Stoffe auf der Oberfläche hinweisen. Im ersten Fall böten sich Analogien zum →Mars, im zweiten zu einigen →Kometen an. Jedoch ist zur Entstehung von Eisenoxid nicht unbedingt eine Atmosphäre nötig. Ein Körper, der so weit außen, womöglich sogar in der →Oortschen Wolke, entstanden sein soll, ließe einen hohen Eisengehalt bisher nicht erwarten. Verbindungen der organischen Chemie kommen im Universum unabhängig von Leben vor, zum Beispiel als Alkohole in Gasnebeln.

Spekulative Atmosphäre – Zwar gibt es keinerlei Daten, die das Vorhandensein einer Atmosphäre auf Sedna stützen, doch besteht die theoretische Möglichkeit dazu. Sedna ist wahrscheinlich groß genug, um eine sehr dünne Atmosphäre zu halten, ähnlich wie sie bei →Pluto beobachtet wurde. Sie könnte bei zunehmender Entfernung von der Sonne vollkommen ausfrieren und eine einzigartige »Meteorologie« bieten: eine Gashülle, die wegen der extrem elliptischen Bahn nur alle 10.000 Jahre aktiv ist, wenn sich Sedna für einige Jahrzehnte bis Jahrhunderte in der Nähe ihres Perihels befindet.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Sedna_\(Asteroid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Sedna_(Asteroid)). Historie: 15.3.04: Angelegt von TriebÄster, danach bearbeitet von den Hauptautoren Rivi, Herbye, Srbauer, Triebtüter, Nankea, Vesta, FPM, Geof, Arnomane, SiriusB, AssetBurned, BWBot, Stechlin, Asteroid7687, Sikilai, RKraasch, CruX, Phrood, Silberchen, Zwobot, Don Carleone, AkaBot, Boehm, Peter Kramer, Docpi, Schweikhardt, Fristu, ASK, RobertLechner, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Oortsche Wolke

Die Oortsche Wolke, manchmal auch als zirkumsolare Kometenwolke oder Öpik-Oort-Wolke bezeichnet, wurde 1950 von Jan Hendrik Oort als Ursprungsort der langperiodischen Kometen postuliert, in dem dieser einen Vorschlag des estnischen Astronomen Ernst Öpik von 1932 aufgriff.

Oort kam zu seiner Hypothese aufgrund der Untersuchung von Kometenbahnen sowie der Überlegung, dass ein offensichtlicher Widerspruch in der Annahme zu finden ist, die Kometen stammten aus dem Sonnensystem selbst: Da Kometen nach mehreren Passagen durch das Sonnensystem zerstört werden, dürften unter dieser Voraussetzung heute keine Kometen mehr zu beobachten sein.

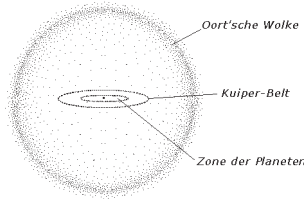


Abb. 123: Oortsche Wolke (unmaßstäbliches Schema)

Entstehung der Oortschen Wolke

Die Oortsche Wolke umschließt das Sonnensystem schalenförmig in einem Abstand von 300 bis zu etwa 100.000 Astronomischen Einheiten, was etwa 1,5 Lichtjahren entspricht, und enthält Gesteins-, Staub- und Eiskörper unterschiedlicher Größe, die bei der Entstehung des Sonnensystems übrig geblieben waren und sich nicht zu Planeten zusammenschlossen. Diese übrig gebliebenen Planetesimale wurden von Jupiter und den anderen großen Planeten in die äußeren Bereiche des Sonnensystems geschleudert. Durch den gravitativen Einfluss benachbarter Sterne wurden die Bahnen der Objekte mit der Zeit so gestört, dass sie heute nahezu isotrop in einer Schale um die Sonne herum verteilt sind. Die Objekte der Oortschen Wolke sind trotz ihres großen Abstandes zur Sonne gravitativ an diese gebunden, also feste Bestandteile des Sonnensystems. Vermutlich geht die Oortsche Wolke kontinuierlich in den Kuipergürtel über, dessen Objekte allerdings in der Ekliptik konzentriert sind. Schätzungen der Anzahl der Objekte in der Oortschen Wolke liegen zwischen 10^{11} bis 10^{12} .

Kometen

Durch den Einfluss der Gravitationsfelder der benachbarten Sterne werden die Objekte der Oortschen Wolke gestört und einige von ihnen geraten ins Sonnensystem. Dort erscheinen sie dann als langperiodische Kometen, mit einer Periode von mehreren tausend Jahren. Kurzperiodische Kometen

können sich nicht aus Kometen der Oortschen Wolke bilden, da eine hierfür benötigte Störung durch die großen Planeten zu ineffektiv ist.

Die Oortsche Wolke ist nicht der einzige Ursprungsort von Kometen: Kometen mit einer mittleren Periodenlänge stammen auch aus dem Kuipergürtel.

Unklare Abgrenzung

Ein direkter Nachweis der Oortschen Wolke durch Beobachtung ist auch in naher Zukunft nicht zu erwarten, aber es gibt genügend indirekte Anzeichen, so dass ihre Existenz als sicher gilt.

Von den Entdeckern des extrem weit außen umlaufenden Planetoiden Sedna wurde eine *Innere Oortsche Wolke* postuliert, um dessen Herkunft zu erklären, da selbst das Perihelion von Sedna weit außerhalb des Kuipergürtels liegt. Sednas Bahnneigung gegen die Ekliptik ist nur 11° , die Bahnen in der Oortschen Wolke sollten aber gleichmäßig im Raum verteilt

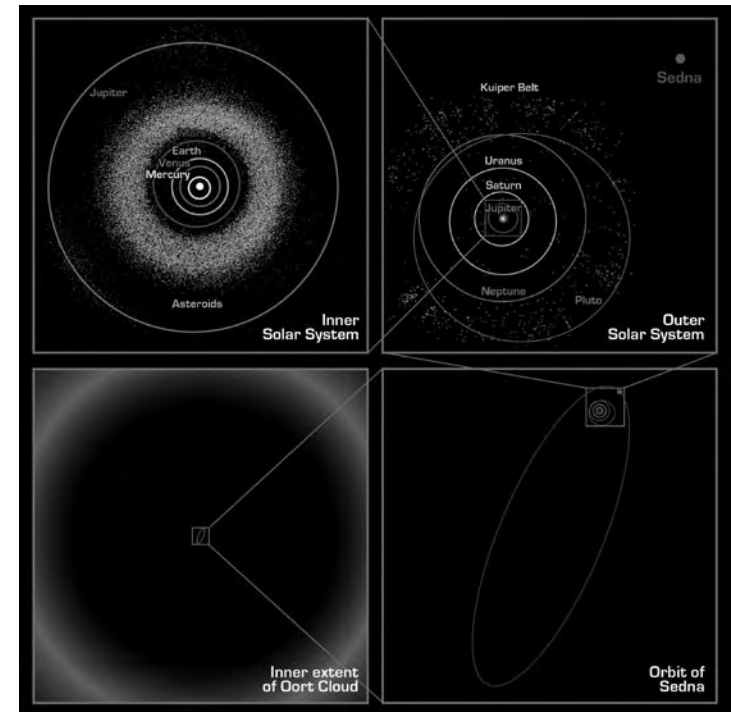


Abb. 124: Oortsche Wolke, Kuipergürtel und Umlaufbahn von Sedna im Vergleich

sein. Allerdings besitzt ein einziger Wert keine statistische Aussagekraft. Dennoch bleibt die Existenz dieser Inneren Oortschen Wolke vorerst sehr hypothetisch. Auch ist zweifelhaft, ob die Akkretion eines derart großen Körpers mit vielleicht bis zu 1.800 km Durchmesser in der zirkumsolaren Wolke selbst möglich gewesen wäre.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Oortsche_Wolke. Historie: 16.8.02: Angelegt von Schewek, danach bearbeitet von den Hauptautoren MarkusRedeker, Epo, Herbye, Nephelin, Robodoc, Schewek, Rivi, Arnomane, Srbauer, Crux, Zwobot, FlaBot, Alkuin, Pkn, BWBot, Alexander Nofftz, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Nemesis

Nemesis ist der Name eines hypothetischen Begleiters unserer Sonne, der als Stern oder Brauner Zwerg die Sonne in etwa ein bis drei Lichtjahren Entfernung umlaufen soll. Nemesis ist in der griechischen Mythologie die Göttin des gerechten Zorns und der Vergeltung.

Dieser Stern hinter der →Oortschen Wolke soll aufgrund seiner großen Entfernung alle 26 bis 32 Millionen Jahre in diese eintauchen, um aus ihr →Kometen ins Innere des Sonnensystems zu schleudern.

Postuliert wurde dieser Stern unter anderem von Richard Muller, der von Luis Alvarez, dem Physiknobelpreisträger und Erfinder der Hypothese, die Dinosaurier seien durch einen Kometeneinschlag auf der Erde umgekommen, dazu angeregt wurde, diese Ansicht auf eine wissenschaftliche Basis zu stellen. Dazu kommen die Erkenntnisse der Paläontologen David Raup und John Sepkoski, die frühere Artensterben untersucht und zeitlich eingeordnet hatten und zum Ergebnis gekommen waren, es komme regelmäßig, nämlich rund alle 32 Millionen Jahre zu einem Massensterben auf der Erde. Da auch die Meteoritenkrater auf der Erde eine eventuell übereinstimmende Altersstufung zeigen, bezieht Alvarez diese Hypothese zumindest mit in seine Überlegungen ein.

Prinzipiell angezweifelt werden diese Ergebnisse, da bei einem Messfehler von 10 % schon nach 320 Millionen Jahren die in Frage kommende Periodenlänge innerhalb des Messfehlers liegt und es andererseits bislang noch nicht den geringsten Hinweis auf diesen Stern gibt, der durch überprüfbare direkte Beobachtungen gestützt würde.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Nemesis_\(Stern\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Nemesis_(Stern)). Historie: 17.1.04: Angelegt von Robodoc, danach bearbeitet von den Hauptautoren Robodoc, Nephelin, Arnomane, Ishka, Ciciban, Alkuin, FlaBot, Modusvivendi, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Komet

Ein Komet (von griech. *kométes*, »Haarstern«, abgeleitet von *komé*, »Haupthaar«) oder *Schweifstern* ist ein kleiner Himmelskörper, der sich auf einer stark elliptischen Bahn um die Sonne bewegt und zumindest in den sonnennahen Teilen seiner Bahn eine durch Ausgasen erzeugte Koma aufweist.

In Sonnennähe ist der meist nur wenige Kilometer große Kometenkern von einer diffusen, nebligen, Koma genannten Hülle umgeben, die eine Ausdehnung von bis zu 100.000 km erreichen kann. Kern und Koma zusammen nennt man auch den Kopf des Kometen. Das auffälligste Kennzeichen der von der →Erde aus sichtbaren Kometen ist jedoch der Schweif, der eine sichtbare Länge von 10 bis 100 Millionen Kilometern erreichen kann.

Im Altertum und im Mittelalter wurden Kometen häufig als Schicksalsboten oder Zeichen der Götter angesehen. Den Beginn der wissenschaftlichen Sichtweise bei der Kometenforschung kann man mit der Erkenntnis Tycho Brahes ansetzen, dass Kometen keine Erscheinungen der irdischen →Atmosphäre sind. Ein latenter Aberglaube ist jedoch auch heute noch vorhanden, wie 1997 der Massenselbstmord der Sekte Heaven's Gate beim Erscheinen des Kometen →Hale-Bopp zeigt.

Übersicht

Charakterisierung – Kometen werden aufgrund ihrer Umlaufzeiten in langperiodische und kurzperiodische Kometen eingeteilt.

- Langperiodische Kometen mit einer Umlaufzeit von mehr als 200 Jahren kommen vermutlich aus der →Oortschen Wolke, ihre Bahnneigungen sind statistisch verteilt, und sie umlaufen die Sonne sowohl im gleichen Umlaufsinn wie die Planeten (prograd) als auch in Gegenrichtung zu den Planetenbahnen (retrograd). Die Exzentrizitäten ihrer Bahnen liegen nahe bei 1 – die Kometen sind in der Regel aber noch durch die Schwerkraft an die Sonne gebunden, obwohl sie für ihren Umlauf bis zu 100 Millionen Jahre benötigen. Exzentrizitäten größer als 1 (Hyperbelbahnen) werden nur in seltenen Fällen durch Störungen der großen →Planeten hervorgerufen. Diese Kometen kehren nicht mehr in Sonnennähe zurück, sondern verlassen das Sonnensystem.
- Kurzperiodische Kometen mit Umlaufzeiten kleiner als 200 Jahre stammen vermutlich aus dem →Kuipergürtel. Sie bewegen sich meist im üblichen Umlaufsinn und ihre Inklination liegt im Mittel bei etwa 20°, sie liegen also in der Nähe der Ekliptik. Bei mehr als der Hälfte der

kurzperiodischen Kometen liegt der größte Sonnenabstand (Aphel) in der Nähe der Jupiterbahn bei fünf und sechs Astronomischen Einheiten (*Jupiter-Familie*). Es handelt sich dabei um ursprünglich längerperiodische Kometen, deren Bahnen durch den gravitativen Einfluss des Jupiter verändert wurden.

Benennung – Neu entdeckte Kometen erhalten von der Internationalen Astronomischen Union zuerst einen Namen, der sich aus dem Entdeckungsjahr und einem großen Buchstaben zusammensetzt, der beginnend mit A am 1. Januar und B am 16. Januar im Halbmonatsrhythmus nach dem Zeitpunkt der Entdeckung festgelegt ist. Zusätzlich kommt noch eine Ziffer, damit man mehrere Kometen im halben Monat unterscheiden kann. Sobald die Bahnelemente des Kometen genauer bestimmt sind, wird dem Namen nach der folgenden Systematik ein weiterer Buchstabe vorangestellt:

P	die Umlaufzeit ist kleiner als 200 Jahre (Periodischer Komet)
C	die Umlaufzeit ist größer als 200 Jahre
X	die Bahn ist nicht bestimmbar
D	Periodischer Komet, der verloren ging oder nicht mehr existiert
A	man stellt nachträglich fest, dass es sich nicht um einen Kometen, sondern um einen Asteroiden handelt

Der Komet \rightarrow Hyakutake zum Beispiel wird auch unter der Bezeichnung C/1996 B2 geführt. Hyakutake war also der zweite Komet, der in der zweiten Hälfte des Januars 1996 entdeckt wurde. Seine Umlaufzeit ist größer als 200 Jahre.

Üblicherweise wird ein Komet zusätzlich nach seinen Entdeckern benannt, so ist zum Beispiel \rightarrow Shoemaker-Levy 9 der neunte Komet, den Eugene und Carolyn Shoemaker zusammen mit David Levy entdeckt haben.

Kometenbahnen – Da bei neu entdeckten Kometen nur kurze Bahnelemente sichtbar sind, werden zuerst parabolische Bahnen berechnet. Mit steigendem Beobachtungszeitraum kann dann entschieden werden, ob es sich um Ellipsen oder Hyperbeln handelt. Von etwa 660 untersuchten Kometen zeigt sich folgende Verteilung: 43 % Parabeln, 25 % langperiodische Ellipsen (Umlaufzeit über 200 Jahre), 17 % kurzperiodische Ellipsen (Umlaufzeit bis zu 200 Jahre) und 15 % Hyperbeln. Der hohe Anteil an Parabeln ist jedoch auf den zu kurzen Beobachtungszeitraum vieler Kometenscheinungen zurückzuführen, bei denen langgestreckte Ellipsen

nicht von einer Parabel unterschieden werden können. Bei einer längeren Sichtbarkeit von 240–500 Tagen beschreiben nur mehr 3 % der Kometen eine Parabelbahn. Somit dürften die Ellipsen vorherrschend sein.

Aufbau

Kern – In großer Entfernung von der Sonne bestehen Kometen nur aus dem Kern, der im Wesentlichen aus gefrorenem Wasser, Methan und Ammoniak mit Beimengungen aus \rightarrow meteoritenähnlichen kleinen Staub- und Mineralienteilchen (zum Beispiel Silikate, Nickeleisen) besteht, man bezeichnet Kometen deshalb häufig als *schmutzige Schneebälle* oder *dirty snowballs*. Aus Beobachtungen der Raumsonde Giotto am Kometen \rightarrow Halley weiß man, dass Kometen von einer schwarzen Kruste umgeben sind, die nur etwa 4 % des Lichts reflektiert (Albedo) – obwohl Kometen als spektakuläre Leuchterscheinungen beobachtet werden, sind ihre Kerne somit ironischerweise die schwärzesten Objekte des Sonnensystems, wesentlich dunkler als zum Beispiel Asphalt, der etwa 7 % des Lichts reflektiert.

Da nur kleine Regionen des Kerns ausgasen, wie im Abschnitt »Koma« näher erläutert wird, geht man nach neueren Vorstellungen davon aus, dass die Oberfläche von einer Art Gesteinsschutt gebildet wird, der aus Gesteinsbrocken besteht, die zu schwer sind, um die gravitative Anziehung des Kerns zu überwinden. Giotto entdeckte auch

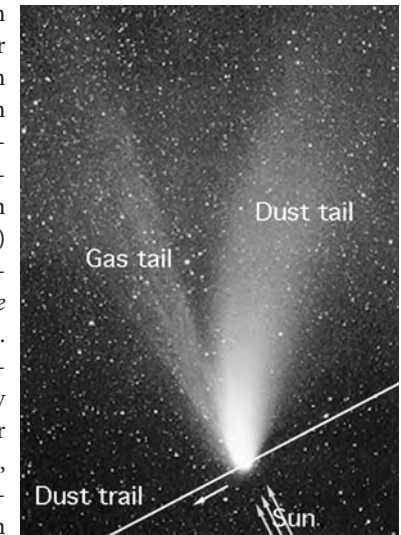


Abb. 125: Gas- und Staubschweif eines Kometen, mit der Richtung des Sonnenwinds und der Flugbahn des Kometen eingezeichnet

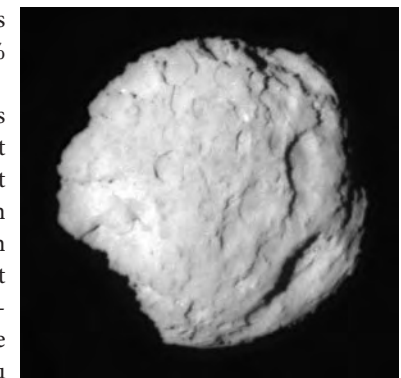


Abb. 126: Der 5 km große Kern von Wild 2

winzige Partikel, die reich an den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) sind und deswegen auch CHON-Partikel genannt werden. Diese könnten aus einer dünnen Rußschicht stammen, die die Oberfläche des Kerns überzieht und damit die niedrige Albedo erklären würde. Nähere Informationen soll die aktuelle Rosetta-mission liefern.

Einen besonderen Anteil an der Entdeckung des Aufbaus der Kometen hatte Fred Whipple.

Koma

Sobald ein Komet bei der Annäherung an die Sonne in einem Abstand von etwa 5 AE die Jupiterbahn kreuzt, bildet sich die schalenförmige *Koma*, die in Kernnähe auch strahlenartige Strukturen zeigt. Sie entsteht durch Sublimation leicht flüchtiger Substanzen auf der sonnenzugewandten Seite, die ins Eis eingebettete Staubteilchen mitreißen. Nach den Beobachtungen der Sonde Giotto findet diese Sublimation nur an etwa 10 bis 15 % der Kometenoberfläche statt, die flüchtigen Substanzen entweichen offenbar nur an brüchigen Stellen der schwarzen Kruste. Die an diesen Stellen entweichenden *Muttermoleküle* bilden die innere Koma. Durch weitere Aufheizung, Ionisation und Dissoziation vergrößert sich die Koma weiter und bildet die schließlich sichtbare Koma aus Ionen und Radikalen. Diese wird noch von einem im Ultraviolett strahlenden atomaren Wasserstoffhalo umgeben, der auch UV-Koma genannt wird und beim Kometen Hale-Bopp 1997 einen Durchmesser von 150 Millionen Kilometern erreichte. Da die atmosphärische Ozonschicht für die UV-Strahlung undurchlässig ist, kann die UV-Koma nur mit Satelliten untersucht werden.

Molekül	Häufigkeit
H2O	100
CO	20
CO2	6-20
H2CO	1
CH3OH	2
NH3	0,7–1,8
CH4	0,6
C2H2	0,1
C2H6	0,3
HCOOH	0,06
CH2CO	<0,03
CH3CHO	0,02
CH3CH2OH	<0,05
CH3OCH3	<0,45
HCOOCH3	0,06
HNCO	0,06–0,1
NH2CHO	0,01
HCN	0,25
HNC	0,04
CH2CN	0,02
HC3N	0,02
H2S	1,5
OCS	0,5
H2CS	0,02
SO	0,2–0,8
SO2	0,1

Zusammensetzung der Kometenkoma von Hale-Bopp (1997), normalisiert auf H2O

Schweif – Die Bestandteile der Koma werden durch Strahlungsdruck und Sonnenwind »weggeblasen«, so dass sich etwa innerhalb der Marsbahn ein *Schweif* ausbildet, oder exakter zwei Schweife:

- Ein schmaler, lang gestreckter Schweif (*Typ-I-Schweif*), der im Wesentlichen aus Molekülonen besteht und auch *Plasmaschweif* genannt wird. Für diese Teilchen reicht der Strahlungsdruck als Erklärung nicht aus, so dass Ludwig Biermann 1951 eine von der Sonne ausgehende Partikelstrahlung, die heute *Sonnenwind* genannt wird, als Erklärung hierfür postulierte. Heute geht man davon aus, dass die kometaren Ionen durch eine Wechselwirkung mit dem solaren Magnetfeld angetrieben werden, das von den geladenen Teilchen des Sonnenwinds mitgeführt wird.
- Ein diffuser, gekrümmter Schweif (*Typ-II-Schweif*), der auch *Staubschweif* genannt wird. Die kleinen Staubteilchen, die diesen Schweif bilden, werden durch den Strahlungsdruck der Sonne beeinflusst, dessen Wirkung durch eine Aufspaltung in zwei Komponenten erklärt werden kann:
 - Eine radiale Komponente, die der Gravitationskraft entgegengerichtet ist und wie diese quadratisch mit der Entfernung zur Sonne abnimmt. Dies wirkt wie eine effektive Abnahme der solaren Gravitationskraft, die Staubteilchen bewegen sich deshalb auf »Pseudo-Keplerbahnen«, die sich für Staubteilchen verschiedener Größe unterscheiden, da der Strahlungsdruck von der Teilchengröße abhängig ist. Dies führt zu einer relativ starken Auffächerung des Staubschweifs im Vergleich zum Plasmaschweif.
 - Die andere wirksame Komponente des Strahlungsdruckes ist der Bewegungsrichtung der Staubteilchen entgegengerichtet und führt zu einer Abbremsung der Teilchen, die größer als die Wellenlänge des Lichtes sind, das heißt größer als etwa 0,5 µm. Diese Teilchen bewegen sich langfristig genauso wie der sonstige interplanetare Staub auf Spiralbahnen Richtung Sonne (Poynting-Robertson-Effekt).
- Sehr selten, bei besonderen Bahnkonstellationen, ist ein Gegenschweif (*Typ-III-Schweif*) sichtbar. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um eigenständigen Schweif, sondern nur um einen geometrischen Projektionseffekt: Wenn sich die Erde zwischen Sonne und Komet hindurchbewegt, ragt ein Teil des Staubschweifs, bedingt durch seine Krümmung, scheinbar über den Kometenkopf hinaus.

Der Materialverlust eines Kometen wurde bei »neuen« Kometen, die das erste Mal in Sonnennähe kommen, auf etwa 10 bis 50 Tonnen pro Sekunde geschätzt, nach mehrfacher Sonnenannäherung sinkt der Masseverlust auf weniger als 0,1 t/s. Diese geringen Materiemengen von maximal 0,03

bis 0,2 Prozent der Kometenmasse pro Sonnendurchgang bedeuten, dass die Schweife nur eine sehr geringe Dichte aufweisen. Die enorme Helligkeit der Schweife erklärt sich im Falle des Staubschweifs durch die große Oberfläche der mikroskopisch kleinen Staubteilchen, im Plasmaschweif trägt sogar jedes Atom beziehungsweise Molekül zur Leuchtkraft bei. Dies führt im Vergleich zur Größe des Kometenkerns zu einer Erhöhung der Leuchtkraft um viele Größenordnungen.

Entstehung

Der hohe Anteil an leicht flüchtigen Substanzen, wie zum Beispiel Wasser und Kohlenmonoxid, bedeutet, dass die Kometenkern im äußeren Bereich des Sonnensystems entstanden sein müssen. Die Planetesimale aus dem Bereich der äußeren Planeten, die nicht durch die →Gasriesen aufgesammelt wurden, wurden dabei zu einem großen Teil so stark gestreut, dass sie das Sonnensystem verließen. Nur etwa zehn Prozent dieser gestreuten Körper bilden die →Oortsche Wolke. Die Objekte jenseits der →Neptunbahn unterlagen diesem Streuprozess nicht und bilden den →Kuipergürtel.

Die Kometen verlieren mit jedem Umlauf um die Sonne einen kleinen Teil ihrer Masse. Bei diesen Masseverlusten handelt es sich vor allem die flüchtigen Bestandteile der äußeren Schicht, so dass sie nach einigen hundert Sonnenumläufen kaum noch als Kometen zu erkennen sind. Diese Zeitspanne ist deutlich kürzer als das Alter des Sonnensystems. Die langperiodischen Kometen werden zudem bei ihrer Durchquerung des inneren Bereichs des Sonnensystems von den großen Planeten, vor allem durch Jupiter, so stark gestreut, dass sie nur für wenige Durchgänge als ehemalige Mitglieder der Oortschen Wolke identifiziert werden können. Es ist also ein Mechanismus notwendig, der die heute noch sichtbaren Kometen aus ihren sonnenfernen Bahnen in Sonnennähe bringt. Für die kurzperiodischen Kometen aus dem Kuipergürtel vermutet man hierfür Kollisionen originärer Kuipergürtelobjekte, wodurch Bruchstücke ins Innere des Sonnensystems gelangen. Der Streuprozess langperiodischer Kometen ist noch nicht bekannt, es wird allerdings häufig der Einfluss vorbeiziehender Sterne oder noch nicht entdeckte Planeten (Planet X) beziehungsweise ein noch unbekannter Begleitstern der Sonne (→Nemesis) als Ursache genannt.

Verschiedenes

Abgrenzung zu anderen Himmelskörpern – Die Unterscheidung zwischen →Asteroiden und Kometen ist nicht immer ganz eindeutig. Man

vermutet, dass einige der als Asteroiden klassifizierten Objekte mit stark elliptischen Bahnen, zum Beispiel die →Centauren, »ausgebrannte« Kometenkern sind, die von einer dicken Schicht nichtflüchtiger Substanzen bedeckt sind. Andererseits wird das ursprünglich als Asteroid →(2060) Chiron eingestufte Objekt seit der Entdeckung einer Koma als Komet klassifiziert und gemäß der Kometennomenklatur *95P/Chiron* genannt.

Heute wird der Begriff Komet sowohl im populärwissenschaftlichen als auch im wissenschaftlichen Sprachgebrauch, entgegen seiner ursprünglichen Definition, oft für alle vermutlich eisigen Kleinplaneten verwendet. Beispiele hierfür sind die Objekte des Kuipergürtels und der Oortschen Wolke, die zwar leichtflüchtige Substanzen enthalten, aber aufgrund ihrer Entfernung von der Sonne niemals stark genug erwärmt werden, um eine Koma zu bilden. Von solchen Objekten wird aber angenommen, dass ihr Aufbau eher den Kometenkernen gleicht als den Asteroiden aus dem Asteroidengürtel; aber erst bei Periheldistanzen innerhalb der Jupiterbahn ist die Sonnenstrahlung stark genug, dass durch einen Sublimationsprozess eine Koma gebildet werden kann.

Meteorströme und Meteoriten – Die Teilchen des Staubschweifs verteilen sich entlang der Kometenbahn um die Sonne. Wie Giovanni Schiaparelli gezeigt hat, treten →Meteorströme auf, wenn die Erde diese Bahn kreuzt. Bekannte Meteorströme sind die →Leoniden oder die →Perseiden.

Diese Ströme sind als Sternschnuppen leicht beobachtbar, das heißt, es fällt Kometenmaterial auf die Erde. Es wurden jedoch bisher noch keine Meteoriten entdeckt, die zweifelsfrei von Kometen stammen. Für einige sehr seltene Meteoritentypen wie zum Beispiel die CI-Chondriten wurde zwar eine Verbindung zu Kometen vorgeschlagen, ein Beweis konnte allerdings bisher noch nicht erbracht werden. Auch Mikrometeoriten stammen überwiegend aus dem Asteroidengürtel, obwohl auch hier eine kometare Komponente diskutiert wird. Bisher steht also kein Material für Forschungen zur Verfügung, das zweifelsfrei kometaren Ursprungs ist. Die direkte Untersuchung von Kometenmaterial ist jedoch für das Verständnis der Entstehung unseres Sonnensystems von großer Bedeutung, so dass man komplexe Raumfahrtmissionen mit Raumsonden wie Rosetta oder Stardust durchführt, die das Kometenmaterial vor Ort untersuchen oder sogar Proben zur Erde zurückbringen können.

Besonders erwähnenswerte Kometen

- Der →Enckesche Komet hat mit 3,31 Jahren die kürzeste Umlaufzeit aller bekannten Kometen, kann aber nicht mehr mit bloßem Auge beobachtet werden.
- Der Komet →Hale-Bopp war von 1996 bis 1997 mehr als 18 Monate mit bloßem Auge sichtbar und hält damit den Rekord unter allen bekannten Kometen.
- Der →Halleysche Komet war der erste Komet, der (von Edmond Halley) als periodisch erkannt wurde und dessen Kern von einer Raumsonde fotografiert werden konnte.
- Der Komet →Wild 2 ist der erste Komet, aus dessen Koma von einer Sonde Teilchen eingesammelt wurden, die im Jahre 2006 zur Erde zurückgebracht werden sollen.
- Auf dem Kometen Tschurjumow-Gerasimenko soll 2014 während der Rosetta-Mission erstmals eine Sonde landen.
- Der Komet →Shoemaker-Levy 9 zerbrach im Gravitationsbereich des Jupiter. Seine Bruchstücke schlugen zwischen dem 16. Juli und dem 22. Juli 1994 auf dem Planeten auf.
- Der Komet →Tempel 1 wurde das Ziel der Deep Impact Mission der NASA, bei der am 4. Juli 2005 ein 372 kg schweres, hauptsächlich aus Kupfer bestehendes Projektil mit einer relativen Geschwindigkeit von 10 km/s auf dem Kometen einschlug. Mit der Sonde selbst und mit zahlreichen erdgestützten Teleskopen, aber auch mit dem Weltraumteleskop Hubble und der ESA-Raumsonde Rosetta wurde die entstandene Partikelstaubwolke beobachtet. Wissenschaftler erhoffen sich durch die Ergebnisse dieser Mission Aufschlüsse über den Zusammenbau und die Entstehung des Sonnensystems.

Sungrazer (Sonnenstreifer) – Sonnenstreifer sind eine Gruppe von Kometen, die der Sonne extrem nahe kommen beziehungsweise sich durch die Sonnenkorona bewegen. Durch die Sonnensonde SOHO konnten über 1.000 Kometen fotografiert werden. Schätzungen belaufen sich auf über 200.000 Objekte. Die meisten Sungrazer sind kleiner als 10 m, und man nimmt an, dass diese die Bruchstücke größerer Kometen sind. Der 1965 von zwei japanischen Amateurastronomen entdeckte und später nach ihnen benannte Komet »Ikeya-Seki« war jedoch sogar bei Tageslicht zu sehen, so dass sein Durchmesser auf mehrere Kilometer geschätzt wurde. Der Großteil der Sungrazer gehören der Kreutz-Gruppe an.

Kometen und der Stern von Betlehem – Als Folge einiger eindrucksvoller Kometenerscheinungen wurde im 16. und 17. Jahrhundert ein Komet als Erklärung für den in der Bibel erwähnten Stern von Betlehem vorgeschlagen. Von den heute bekannten Kometen war keiner zur fraglichen Zeit (7–4 v. Chr.) am Himmel sichtbar, obwohl chinesische Astronomen von einem Kometen im Jahr 5 v. Chr. berichten. Dies war aber ein eher unspektakuläres kleines Objekt und deshalb wahrscheinlich nicht mit dem Stern von Betlehem identisch. In früheren Zeiten galt ein Komet zudem meist als Unheilsbote und wäre kaum als Ankündigung für die Geburt des Sohns Gottes gedeutet worden.

Offene Fragen

In den letzten 20 Jahren sind in der Erforschung der Kometen sowie des Kuipergürtels große Fortschritte erzielt worden, es gibt jedoch noch immer viele offene Fragen:

- Durch Spektralanalysen ist die Zusammensetzung der Koma mittlerweile sehr gut verstanden, über die molekulare Zusammensetzung des Kerns und der vom Kern entweichenden Muttermoleküle ist jedoch noch sehr wenig bekannt. Möglicherweise kommen in Kometen organische Moleküle vor, die ähnlich oder sogar noch komplexer als diejenigen sind, die in Meteoriten gefunden wurden. Viele Exobiologen setzen deswegen große Hoffnungen auf die weitere Erforschung der Kometen. Einige Theorien zur Entstehung des Lebens gehen davon aus, dass organische Moleküle aus Meteoriten oder Kometen die Entstehung des Lebens auf der Erde begünstigt oder gar erst ermöglicht haben. Die Anhänger der Panspermie vermuten sogar noch komplexere biologische Moleküle oder möglicherweise sogar einfache Lebensformen unter den CHON-Partikeln.
- Nach den derzeitigen Theorien sind die Kometen aus der Oortschen Wolke in geringerer Entfernung zur Sonne entstanden als diejenigen aus dem Kuipergürtel. Um dies zu bestätigen, sollten Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung nachgewiesen werden.
- Der Mechanismus, durch den die Objekte der Oortschen Wolke ins Innere des Sonnensystems gestreut werden, ist noch nicht bekannt.
- Es gibt Anzeichen für eine leichte Häufung von langperiodischen Kometen in Richtung des Sonnenapex. Sollte sich dies bei genaueren Untersuchungen bestätigen, hätte dies nicht nur Auswirkungen auf unser Verständnis der Oortschen Wolke, sondern auch des interstellaren Mediums in der Umgebung des Sonnensystems.

- Mindestens eines, vermutlich aber mehrere erdgeschichtliche Ereignisse wurde durch den Impakt großer, außerirdischer Körper verursacht, für die neben Asteroiden auch Kometen in Betracht kommen. So etwa der erdgeschichtliche Übergang von der Kreide zum Tertiär durch den →KT-Impakt.
- Die Erde hat verglichen mit anderen Körpern des inneren Sonnensystems einen deutlich größeren Wasseranteil, wofür von einigen Wissenschaftlern große Kometeneinschläge verantwortlich gemacht werden. Allerdings stimmen bisherige Messungen der Wasserstoffisotopenverhältnisse in einigen Kometen nicht gut mit dem Wasserstoffisotopenverhältnis von irdischem ozeanischem Wasser überein, was aber auch daran liegen könnte, dass die gemessenen Kometen nicht repräsentativ waren.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Komet>. Historie: 3.9.02: Angelegt von Schewek, danach bearbeitet von den Hauptautoren Srbauer, Epo, Alkuin, Tigerente, Arnomane, Vesta, Wolfgangbeyer, Zwobot, Mwka, Schubertfreak, Crux, Schewek, Ben-Zin, Nephelin, Nd, Bricktopf, Robodoc, S, Zwoenitzer, Tilo, Saperaud, Korre, Herbye, Darkone, Hoch auf einem Baum, RKraasch, Marvel, Stern, Elwe, MatthiasKabel, T. Kwapien, Ilja Lorek, Bobbl, RedBot, Paddy, Karsten88, Pearl, Jofi, Renderman, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Großer Komet

Als Großer Komet bezeichnet man einen →Kometen, der außerordentlich hell und spektakulär erscheint.

Definition

Es gibt offiziell keine anerkannte Definition, was einen Kometen zu einem »Großen Kometen« macht. Als Faustregel gilt aber, dass ein *Großer Komet* eine Erscheinung ist, die auch einem zufälligen Beobachter des Nachthimmels auffällt. Dazu muss der Komet eine scheinbare Helligkeit erreichen, die den hellsten Sternen gleichkommt.

Während die meisten Kometen nur mit Hilfe von Teleskopen beobachtet werden können, entwickeln manche eine Helligkeit, die sie auch freijugig zu auffälligen Erscheinungen werden lassen. Die Gründe dafür sind eine große Annäherung des Kometen an die Sonne oder an die Erde und meist auch ein ungewöhnlich großer oder aktiver Kometenkern. Bei den meisten großen Kometen handelt es sich daher um langperiodische Kometen oder um Kometen, die überhaupt das erste Mal in das innere

Sonnensystem vordringen. Kurzperiodische Kometen, die bei jeder Annäherung an die Sonne Material verlieren, entwickeln sich nur selten zu auffälligen Erscheinungen. Eine Ausnahme bildet lediglich der →Komet Halley, dessen oftmals spektakuläre Erscheinungen mehrfach als »Großer Komet« verzeichnet wurden.

Auswahl großer Kometen

Große Kometen des 20. Jahrhunderts

- →Komet Hale-Bopp (C/1995 O1):
Der Komet Hale-Bopp konnte 18 Monate lang freijugig gesehen werden, länger als irgendein anderer Komet. Um den Zeitpunkt seiner größten Annäherung an die Sonne am 1. April 1997 erreichte er eine scheinbare Helligkeit von etwa -1 mag, und seine zwei Schweife erreichten eine Länge von 30–40°.
- →Komet Hyakutake (C/1996 B2):
Der Komet näherte sich am 24. März 1996 bis auf 0,109 AE (16 Millionen Kilometer) der Erde. Er erreichte dabei eine scheinbare Helligkeit von etwa 0 mag und eine Schweiflänge von 75°.
- Komet West (C/1975 V1):
Der Komet West näherte sich am 25. Februar 1976 auf 0,196 AE (29 Millionen Kilometer) der Sonne. Der Kometenkern zerbrach dabei in vier Teile. Der Komet erreichte eine Helligkeit von -1 mag und eine Schweiflänge von bis zu 30°.
- Komet Ikeya-Seki (C/1965 S1):
Dieser Komet näherte sich am 21. Oktober 1965 auf nur 0,0078 AE (1,16 Millionen Kilometer) der Sonne. Der Kometenkern zerbrach dabei in drei Teile, und der Komet erreichte eine scheinbare Helligkeit von -15 mag. Nach dem Vorbeiflug an der Sonne konnte der Komet in der Morgendämmerung mit einem Schweif von bis zu 25° Länge gesehen werden.
- Komet Arend-Roland (C/1956 R1):
Der Komet erreichte im April 1956 eine maximale Helligkeit von etwa 0 mag. Der der Sonne abgewandte Schweif erreichte eine Länge von 25°. Zusätzlich zeigte der Komet einen auf die Sonne zeigenden Gegen Schweif mit 15° Länge.
- Komet Skjellerup-Maristany (C/1927 X1):
Der Komet konnte im Dezember 1927 nur 5° neben der Sonne am Taghimmel gesehen werden. Ende Dezember erreichte der Schweif eine Länge von 35°.

- ➔ **Komet Halley (1P/Halley):**

Bei seiner Wiederkehr im Jahr 1910 erreichte der bekannte Komet Halley eine scheinbare Helligkeit von bis zu 0 mag, und sein Schweif erstreckte sich mit einer maximalen Länge von 150° fast über den gesamten Himmel. Am 19. Mai 1910 durchquerte die Erde sogar den Schweif des Kometen Halley.

- **Johannesburger Komet (C/1910 A1):**

Nur wenige Wochen vor der Wiederkehr des ➔Kometen Halley konnte dieser Komet am 17. Januar 1910 nur 4° neben der Sonne am Taghimmel gesehen werden.

Weitere Große Kometen

- **Komet Tebbutt (C/1861 J1):**

Der Komet Tebbutt kam am 30. Juni 1861 bis auf 0,13 AE (19 Millionen Kilometer) an die Erde heran; sie könnte durch die Spitze seines Schweifes gegliedert sein. Der »Große Komet des Südens« war so hell, dass er einen Schatten warf und auch am Taghimmel sichtbar blieb.

- ➔ **Komet Donati (C/1858 L1):**

Der Komet Donati soll einer der schönsten Kometen gewesen sein, die je mit freiem Auge zu sehen waren. Er erreichte im Oktober 1858 eine scheinbare Helligkeit von 0 mag und ein Schweiflänge von 60°. Er war auch der erste Komet, der fotografiert werden konnte.

- **Tageslichtkomet (C/1843 D1):**

Im Perihel, das der Komet am 27. Februar 1843 durchlaufen hat, konnte der Komet nur 1° neben der Sonne am Taghimmel gesehen werden. Sein Schweif erreichte eine Länge von 330 Millionen km – mehr als die Distanz zwischen Sonne und ➔Mars.

- **Komet Flaugergues (C/1811 F1):**

Der Komet konnte über mehr als acht Monate freiäugig gesehen werden. Im Oktober 1811 erreichte er seine größte scheinbare Helligkeit von etwa 0 mag. Die Koma war 2 Millionen km breit, und der etwa 15 Millionen km lange Schweif überdeckte mehr als 90° des Himmels.

- **Komet Klinkenberg (C/1743 X1):**

Am 27. Februar 1743 konnte der Komet selbst bei Tag, nur 12° neben der Sonne, gesehen werden. Seine Helligkeit dürfte dabei etwa -6 mag betragen haben. In weiterer Folge entwickelte der Komet bis zu elf Schweifstrahlen, die eine Länge von bis zu 90° erreichten.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Großer_Komet. Historie: 7.8.05: Angelegt von Vesta, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Arnomane, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Halleyscher Komet

Der Komet Halley oder Halleyscher Komet zählt seit langem zu den hellsten und bekanntesten Schweifsternen, weil er alle 76 Jahre wiederkehrt. Zuletzt kam er 1986 in Erdnähe, seine nächste Wiederkehr wird für das Jahr 2061 erwartet.

Bekannter periodischer Komet

»Der Halley«, wie ihn Astronomen auch nennen, ist ein periodischer Komet und kann alle 75 bis 77 Jahre gut mit freiem Auge gesehen werden. Wie andere periodische Kometen – von denen die Mehrzahl eine Umlaufzeit zwischen 3 und 20 Jahren hat – verliert er bei jeder Sonnennähe durch Ausgasen Materie, so dass er zuletzt (1985/86) weniger Helligkeit als erwartet entwickelte.

Er wurde nach dem Physiker Edmond Halley (1656–1742) benannt, der wegen seiner Verdienste um die Bahnbestimmung von Kometen 1720 königlicher Astronom und Leiter der Sternwarte in Greenwich wurde. Während das Auftauchen von Kometen bis zu dieser Zeit noch als unvorhersagbar galt, entdeckte Halley im Jahr 1705, dass der 1682 beobachtete Himmelskörper mit früheren Kometenerscheinungen identisch sein müsse, und sagte eine Wiederkehr für 1759 korrekt voraus. Rückblickend wurde im Laufe der Zeit erkannt, dass der Komet seit 240 v. Chr. schon mindestens 25 Mal beobachtet worden war, und selbst Beobachtungen aus dem 3. Jahrhundert v. Chr. können möglicherweise diesem Kometen zugeordnet werden. Eine der ersten bildlichen Darstellungen des Kometen findet sich auf dem Teppich von Bayeux (um 1070), die bekannteste ist vielleicht jene des Malers Giotto di Bondone (1266–1337), der den Kometen 1301 gesehen hat und ihn als Stern von Betlehem in seinem Fresko *Anbetung der Könige* darstellte.

Der Halleysche Komet war 1985 das Ziel von fünf Raumsonden der ESA, Japans und der Sowjetunion, teilweise in internationaler Absprache. Von diesen Sonden war die Giotto-Mission (benannt nach dem oben erwähnten mittelalterlichen Maler) die erfolgreichste, der erstmals die direkte Beobachtung eines Kometenkerns gelang.

Kometenbahn und Geschichte der Erforschung

Halley hat eine sehr langgestreckte Ellipsenbahn, die sich vom sonnen-nächsten Punkt (Perihel) mit 0,586 AE zwischen den Bahnen der Planeten →Merkur und →Venus bis zum sonnenfernsten Punkt (Aphel) mit 35,082 AE im Bereich der →Uranusbahn erstreckt. Die Bahnneigung seiner Umlaufbahn gegen die Ekliptik beträgt 162,262°. Die Umlaufzeit variiert zwischen 75 und 77 Jahren, weil die Bahn zeitweilig vom →Jupiter deutlich beeinflusst wird.

Der englische Astronom Edmund Halley wies 1705 nach, dass der Komet von 1682 mit früheren Erscheinungen in den Jahren 1607 und 1531 identisch sein müsse, die Johannes Kepler und Petrus Apianus beschrieben hatten, und sagte seine Wiederkehr für 1759 voraus. Nachdem andere Forscher seine Berechnungen überprüften, erhielt der Schweifstern den Namen »Halley«. Wie vorausgesagt kehrte der Halley'sche Komet rund 17 Jahre nach dem Tod Halleys zurück und wurde am 25. Dezember 1758 vom sächsischen Amateurastronomen Johann Georg Palitzsch aufgefunden.

Noch bei seiner Wiederkehr im Jahre 1910 versetzte der Komet viele Menschen in Angst: Kurz bevor die Erde den Schweif des Kometen am 19. Mai durchquerte, hatten Astronomen darin das giftige Gas Cyan entdeckt: *»Während die wissenschaftlichen Beobachtungen, soweit heute bekannt wurde, meist nur negative Ergebnisse lieferten, hat das Volk besonders in den großen Städten den Durchgang in seiner Weise gefeiert, wobei Trinken und Skandal die Hauptsache waren«,* berichtete *Sirius*, Zeitschrift für populäre Astronomie (Heft Juni 1910, S. 129) rückblickend.

Kometenkern und Raumsonden

Vor der letzten Erdnähe des Halley'schen Kometen im Jahre 1986 wurden einige Raumsonden gestartet, um erstmals einen Kometenkern aus der Nähe zu beobachten. Man vermutet, dass Kometen aus einem Gemisch aus Eis, Gestein und Staub zusammengesetzt sind, das teilweise aus den Anfängen des Sonnensystems stammt. Daher ist die Erforschung dieser Himmelskörper auch zum Interessensgebiet der Kosmogonie und Kosmologie geworden.

Von den Sonden Giotto, Sakigake, Suisei, Vega 1 und Vega 2 war die ESA-Sonde Giotto die erfolgreichste; ihr gelang die direkte Beobachtung des Kerns, der sich auf den Fotos als unregelmäßig geformtes Gebilde mit Abmessungen von etwa $15,3 \times 7,2 \times 7,2$ km zeigte. Das Volumen wurde zu rund 420 km³, und die Dichte zu einem erstaunlich geringen Wert von $0,55 \pm 0,25$ g/cm³ ermittelt. Die Oberfläche des Kerns ist sehr dunkel (Al-

bedo 0,05) und leicht rötlich (ähnlich einem P-Typ-Asteroiden). Der Kern rotiert mit einer Periode von 3,7 Tagen um eine Achse, die 66° gegen seine Längsachse geneigt ist, und zusätzlich mit einer Periode von 7,1 Tagen um die Längsachse selbst. Die Bilder zeigten auch, dass ein Großteil der Oberfläche inaktiv ist: Nur von einigen abgegrenzten Regionen auf der der Sonne zugewandten Seite des Kerns wurden Gas und Staub in Form von Jets in den Weltraum geschleudert. Auch die Zusammensetzung dieses Materials wurde von Giotto gemessen: Wasser (80 % Vol.) und Kohlenmonoxid (10 %) dominieren, aber auch Methan, Ammoniak und andere Kohlenwasserstoffe wurden gefunden. Cyan trat nur in geringen Spuren auf.

Nach Forschungen der letzten Jahre besitzen langperiodische Kometen und jene Planetoiden, die außerhalb des Jupiter um die Sonne kreisen, viele Gemeinsamkeiten in Aufbau, Farbe, Dichte und Bahndynamik. Vielleicht ist der Halley'sche Komet noch vor 3.000 bis 10.000 Jahren ein derartiger Transneptun gewesen.

Ständiger Verlust an Material

Der Komet ist in Erd- und Sonnennähe mit freiem Auge sichtbar, verliert allerdings im Laufe der Jahrhunderte an Helligkeit. Dies hängt mit der Freisetzung von Gasen und Staub aus dem Kometenkern bei intensiverer Sonnenstrahlung zusammen. Das Material, das in weiterer Folge für die Bildung von Koma und Schweif verantwortlich ist, wird vom Sonnenlicht »weggeblasen« und geht dem Kometen so unwiederbringlich verloren. Für den Kometen Halley wurde in Sonnennähe ein Materialverlust von 200 Tonnen pro Sekunde ermittelt.

In seiner »geschichtlichen« Zeit ging dem Halley'schen Kometen daher mit jeder Annäherung an die Sonne ein merklicher Teil seines Materials verloren. Seit einigen Jahrhunderten ist sein »Ruf« als besonders heller Komet nicht mehr ganz gerechtfertigt. So gab es seit seiner letzten Wiederkehr einige neu entdeckte, langperiodische beziehungsweise nicht-periodische Kometen, die »Halley« deutlich an Leuchtkraft übertrafen, beispielsweise der Komet →Hale-Bopp im Jahre 1997. Allerdings ist der Halley'sche Komet noch immer der hellste unter den kurzperiodischen Kometen.

Reste des Halley'schen Kometen sind auch für zwei →Meteorströme verantwortlich, nämlich für die Orioniden, die im Oktober eines jeden Jahres auftreten, und die Eta-Aquariden im Mai. Diese nur wenige Milligramm schweren Körnchen haben sich im Laufe der Zeit längs der gesamten Kometenbahn verteilt; wenn die Erde diese Bahn kreuzt, verglühen tausende dieser Körnchen pro Tag in ihrer Atmosphäre als →Meteore oder »Sternschnuppen«.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Halleyscher_Komet. Historie: 6.7.03: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren HenrikHolke, Vesta, Geof, Srbauer, Arnomane, Falkue, Gunter.krebs, Zwobot, Martin-vogel, Head, J.e, Toaster76, AkaBot, Buecherfresser, Boemmels, FlaBot, Stefan h, Media lib, Stern, 217, Leipnizkeks, Bender235, Rivi, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Enckescher Komet

Der Enckesche Komet (offizielle Bezeichnung 2P/Encke) ist ein nach Johann Franz Encke benannter periodischer Komet. Encke war es durch umfangreiche Studien und Bahnberechnungen gelungen, verschiedene Sichtungen in den Jahren 1786, 1795, 1805 und 1818 miteinander in Verbindung zu bringen. Er veröffentlichte seine Ergebnisse 1819 in der Zeitschrift *Correspondance Astronomique* und sagte die Wiederkehr für das Jahr 1822 korrekt vorher.



Abb. 127: Komet 2P/Encke

Geschichte

Seine offizielle Bezeichnung besagt, dass er nach dem Halleyschen Kometen (1P/Halley) der zweite Komet ist, der als periodisch wiederkehrend erkannt wurde. Er wurde erstmal am 17. Januar 1786 von Pierre Méchain entdeckt. Bei seiner Wiederkehr 1795 wurde er von Caroline Herschel, 1805 von Jean-Louis Pons und 1818 nochmals von Pons aufgefunden, bevor Encke die vier Kometenerscheinungen einem einzigen Objekt zuordnen konnte. Während Kometen üblicherweise nach ihrem Entdecker benannt werden, wurde der Komet in diesem Fall nach der Person benannt, die seine Umlaufbahn berechnete, so dass der Komet heute die Bezeichnung 2P/Encke trägt.

Umlaufbahn

Der Enckesche Komet läuft auf einer langgestreckten elliptischen Umlaufbahn um die Sonne, deren sonnennächsten Punkt (Perihel) mit 0,339 AE im Bereich der Bahn des Planeten Merkur liegt, während der sonnenfernste Punkt (Aphel) mit 4,097 AE beinahe bis zur Bahn des Planeten Jupiter hinausreicht. Die Bahnneigung seiner Umlaufbahn gegen die Ekliptik beträgt 11,8°. Mit einer Umlaufzeit von nur 3,3 Jahren hat der

Enckesche Komet die kürzeste Umlaufzeit aller bekannten periodischen Kometen.

Schon im 19. Jahrhundert wurde festgestellt, dass sich die Umlaufzeit des Enckeschen Komet ständig geringfügig verkürzt, was als Beweis für die Existenz des Äthers angesehen wurde, dessen Reibungswiderstand für die Abbremsung verantwortlich gemacht wurde. Heute weiß man, dass die Abbremsung darauf zurückgeht, dass in Sonnennähe Materie vom Kometenkern in Form von Jets ausgestoßen wird und diese wie Bremsraketen wirken. Der ständige Verlust an Materie führt auch zu einer Abnahme der Helligkeit des Kometen: Die absolute Helligkeit des Kometen Encke geht in 50 Jahren durchschnittlich um etwa 0,5 mag zurück. Sein Durchmesser wird daher auch nur auf etwa 1–3 km geschätzt.

Meteore

Auf dem Enckeschen Komet geht der Meteorstrom der Tauriden zurück. Manche Wissenschaftler machen ein Bruchstück des früher größeren Kometen für Zerstörungen während der Bronzezeit im Fruchtbaren Halbmond verantwortlich. Ein großer Meteorkrater im Irak gilt als möglicher Beweis, eine detaillierte geologische Untersuchung dieser Struktur steht aber noch aus.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Enckescher_Komet. Historie: 3.12.04: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, LC, Nightwish62, Arnomane, FlaBot, Rdb, RKraasch, Kookaburra, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Shoemaker-Levy 9

Shoemaker-Levy 9 (kurz auch SL9) erhielt seinen Namen, weil er der neunte kurzperiodische Komet war, der von Carolyn und Eugene Shoemaker zusammen mit David Levy entdeckt wurde. Seine offizielle Bezeichnung ist D/1993 F2 (Shoemaker-Levy). Das »D« in seiner Bezeichnung steht für das englische »disappeared« (»verschwunden«) und zeigt an, dass der Komet nicht mehr existiert, nachdem er im Sommer 1994 auf den Planeten Jupiter einschlug.

Entdeckung

Der Komet wurde erstmals auf einem Foto nachgewiesen, das am 24. März 1993 mit einem 40-cm-Schmidt-Teleskop am Mount-Palomar-Observatorium in Kalifornien aufgenommen wurde. Die Beobachtung wurde in der Folge von anderen Astronomen bestätigt. Rasch wurde klar, dass es sich

um einen ungewöhnlichen Kometen handelt: Er befand sich offenbar nahe am Planeten →Jupiter und war in mehrere Fragmente zerbrochen.

Umlaufbahn

Vermutlich schon während der 1970er Jahre geriet der Komet unter die starken Gravitationskräfte des →Jupiter und wurde so als →Quasisatellit in eine stark elliptische Bahn um den Planeten Jupiter gezwungen. In der Folge passierte er im Juli 1992 Jupiter innerhalb der Roche Grenze. Durch die enormen Gezeitenkräfte zerbrach der Komet, der ursprünglich einen Durchmesser von rund 2 km gehabt haben dürfte, in 21 Fragmente zwischen 50 und 1.000 m Größe, die sich auf einer mehrere Millionen Kilometer langen Kette aufreiheten. Zur Unterscheidung wurden die Fragmente mit den Buchstaben »A« bis »W« bezeichnet.

Aufgrund der Nähe zu Jupiter unterlag die Bahn des Kometen großen Störungen. Für das Jahr 1993 hatte er folgende Bahnelemente: Mit einer großen Halbachse von 5,16 AE, einer Exzentrizität von 0,07 und einer Bahnneigung von 1,4° war die Bahn der des Jupiter (großen Halbachse 5,20; Exzentrizität 0,05; Bahnneigung 1,3°) sehr ähnlich, zumal der Komet ja von Jupiter »eingefangen« wurde. Aus Sicht des Jupiter bewegte sich der Komet auf einer stark elliptischen Bahn (Exzentrizität > 0,99) im Abstand von bis zu 0,33 AE um den Planeten.

Nur zwei Monate nach der Entdeckung zeigte die Bahnbestimmung der Astronomen, dass die Kometenstücke im Juli 1994 auf dem Planeten Jupiter einschlagen würden.

Einschlag auf Jupiter

Zwischen dem 16. Juli und dem 22. Juli 1994 schlugen die Bruchstücke des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiters südlicher Hemisphäre mit einer Geschwindigkeit von 60 km/s ein und setzten dabei die Energie von 50 Millionen Hiroshima-Bomben frei. Dies war das erste Mal, dass die Kollision zweier Körper des Sonnensystems und die Auswirkungen eines solchen →Impakts direkt beobachtet werden konnte.

Obwohl die Einschlagstelle aus Sicht der Erde knapp hinter dem »Rand« Jupiters lag und somit nicht direkt einsehbar war, konnten die Astronomen bei den Einschlägen so genannte »Plumes« (heiße Gasblasen, ähnlich einem »Atompilz«) über den Rand Jupiters aufsteigen sehen. Aufgrund der raschen Rotation von Jupiter wurden die Einschlagstellen nur wenige Minuten nach den Impakten von der Erde aus sichtbar. Es zeigte sich, dass sich dunkle Flecken mit Durchmessern bis zu 12.000 km in der

→Atmosphäre Jupiters hinterlassen hatten, die über Monate hinweg sichtbar blieben.

Einzig die Raumsonde Galileo konnte aus einer Entfernung von 1,6 AE die Einschläge direkt beobachten. Aufgrund einer defekten Parabolantenne waren die Kapazitäten der Raumsonde für die Datenübertragung allerdings beschränkt, und es konnten nicht alle Messwerte zur Erde übermittelt werden.

In den Spektren der Plumes wurden große Mengen von molekularem Schwefel (S₂) und Kohlenstoffdisulfid (CS₂) gefunden, mehr als durch die Explosion eines vergleichsweise kleinen Kometenkerns freigesetzt werden könnte. Man vermutet den Ursprung daher in tieferen Atmosphärenschichten des Jupiter. Weitere nachgewiesene Moleküle sind Kohlenstoffmonoxid (CO), Ammoniak (NH₃) und Schwefelwasserstoff (H₂S). Auch Emissionslinien von Eisen, Magnesium und Silizium wurden beobachtet, dass die Hitze der Explosionen ausgereicht haben muss, um diese Metalle zu verdampfen. Wasser wurde in geringeren Mengen beobachtet, als zunächst erwartet worden war. Vermutlich wurden die Wassermoleküle aber durch die Hitze aufgespalten.

Die Kollision wurde nicht nur von den Astronomen, die in dieser Woche nahezu alle verfügbaren Beobachtungsmöglichkeiten auf Jupiter richteten, sondern auch in den Massenmedien mit großem Interesse verfolgt. Erstmals wurden hierbei auch einer breiten Öffentlichkeit die Möglichkeiten des Internet bewusst, da sich nun jeder auf den diversen Websites die aktuellen Bilder und Informationen selbst besorgen konnte, ohne hierbei auf die traditionellen Medien angewiesen zu sein.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Shoemaker-Levy_9. Historie: 9.3.04: Angelegt von Srbauer, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Srbauer, Kulac, Arnomane, RobotE, Nightwish62, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Tempel 1

Tempel 1 (offizielle Bezeichnung 9P/Tempel) ist ein kurzperiodischer →Komet, der im Sommer 2005 durch die NASA-Raumsonde Deep Impact untersucht wurde.

Entdeckung

Der Komet Tempel 1 wurde am 3. April 1867 in der Sternwarte von Marseille von dem sächsischen Astronomen und Lithographen Ernst Wilhelm

Leberecht Tempel entdeckt. Spätere Berechnungen zeigten, dass er damals 0,71 astronomische Einheiten von der Erde und 1,64 astronomischen Einheiten von der Sonne entfernt war. Tempel beschrieb damals, dass der
 ➔ Komet einen scheinbaren Durchmesser von 4 bis 5 Bogenminuten hatte.

Umlaufbahn

Zur Zeit seiner Entdeckung hatte der Komet eine Umlaufzeit von rund 5,7 Jahren. Im Jahr 1881 näherte sich der Komet bis auf 0,55 AE an den Planeten ➔ Jupiter, wobei durch die Gravitationswirkung des Planeten die Bahn des Kometen sich so veränderte, dass sich die Umlaufzeit auf 6,5 Jahre verlängerte. Durch diese Bahnänderung ging der Komet zunächst verloren. Als in den 1960er Jahren seine Bahn unter Berücksichtigung der Bahnstörung durch die

➔ Planeten berechnet werden konnte, zeigte sich, dass sich der Komet in der Zwischenzeit noch zweimal an Jupiter annäherte (1941 auf 0,41 AE und 1953 auf 0,77 AE), so dass sich seine Umlaufzeit in etwa auf den heutigen Wert von 5,5 Jahren verkürzt hatte. Nach diesen neuen Bahnbestimmungen konnte der Komet nachträglich im Dezember 1968 auf einer Fotoplatte vom Juni 1967 aufgefunden werden. Endgültig bestätigt wurde die Wiederauffindung bei der Wiederkehr des Kometen im Jahre 1972. Aktuell ist er im Perihel 1,506 AE und im Aphel 4,738 AE von der Sonne entfernt, und seine Bahnneigung gegen die Ekliptik beträgt 10,530°.

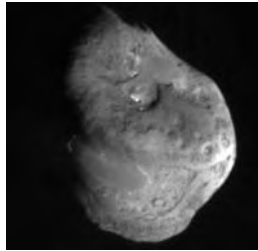


Abb. 128: Kern des Kometen 9P/Tempel 1

Raumsonde Deep Impact

Während seiner Erscheinung im Sommer 2005 wurde der Komet Tempel 1 nicht nur von Teleskopen, sondern auch von der Raumsonde Deep Impact untersucht. Die Raumsonde der NASA setzte ein 372 kg schweres, kühlstrahlendes Projektil frei, das auf dem Kometenkern aufschlug, und beobachtete den Einschlag dieses so genannten *Impaktors* aus einer Entfernung von rund 8.600 km. Dabei wurden rund 4.500 Bilder aufgenommen. Anschließend passierte die Raumsonde den Kometen in etwa 500 km Abstand, konnte dabei jedoch keine Beobachtungen durchführen, da ihre Instrumente zum Schutz vor den ausgeworfenen Partikel vom Kometen abgewendet werden mussten. Das Ereignis wurde auch von mehreren im Weltraum und auf der Erde stationierten Teleskopen beobachtet.

Ergebnisse – Die Größe des Kometen konnte durch die Aufnahmen auf $7,6 \times 4,9$ km und seine Albedo mit 0,04 bestimmt werden. Kurz nach dem Aufprall des Impaktors wurde zunächst ein thermischer Blitz beobachtet, in dem das Geschöß explosionsartig zerstört wurde. Als Folge der Explosion stieg eine Fontäne aus etwa 3.500 °C heißen, geschmolzenen Kernmaterial mit einer Gesamtmasse von rund vier Tonnen und einer Geschwindigkeit von 5 bis 8 km/s auf. Während sich auf dem Kometenkern ein Impaktkrater mit einem geschätzten Durchmesser von etwa 100 (-50/+100) Meter und eine Tiefe von etwa 30 Meter bildete, wurden weitere 10.000 bis 20.000 Tonnen Material ausgeworfen, davon 3.000 bis 6.000 Tonnen Staub. Das freigesetzte Gas breitete sich mit 1 km/s und mehr aus, während die Staubteilchen mit Geschwindigkeiten zwischen 10 und 400 m/s deutlich langsamer waren. Der Großteil des Staubes (etwa 80 %) fiel daher wieder auf den Kern zurück, der restliche Staub und das Gas wurden in die Koma des Kometen und in weiterer Folge in den interplanetaren Raum abgegeben. Das Auswurfmaterial verdeckte die Sicht auf den entstehenden Krater völlig, weshalb seine Größe nur aus der Masse des freigesetzten Materials abgeschätzt werden kann.

Aus der Flugbahn der ausgeworfenen Staubteilchen konnte die Dichte des Kometenkerns zu $0,62 (+0,47/-0,33)$ g/cm³ bestimmt werden: Der Kometenkern scheint aus porösem und zerbrechlichen Material zu bestehen. Spuren von Wassereis konnten auf dem Kern, dessen Temperatur auf der Oberfläche rund 600°C betrug, zunächst nicht nachgewiesen werden. Im Spektrum des Auswurfmaterials konnten aber Spuren Wasser ebenso gefunden werden wie Kohlendioxid, Karbonate, komplexe organische Verbindungen (wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), Silikate (wie das Mineral Olivin) und Tonminerale.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Tempel_1. Historie: 17.1.05: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Bricktop1, Alexander Grüner, Arnomane, Gunter krebs, Jpp, Bota47, AnjaK, Schwalbe, Ekuah, Pemu, RKraasch, Popp, Jonasschneider, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Wild 2

Wild 2 (offizieller Name 81P/Wild) ist ein kurzperiodischer ➔ Komet, der nach dem Schweizer Astronom Paul Wild benannt ist, von dem er am 6. Januar 1978 entdeckt wurde. Der Komet wurde im Januar 2004 von der NASA-Raumsonde Stardust untersucht.

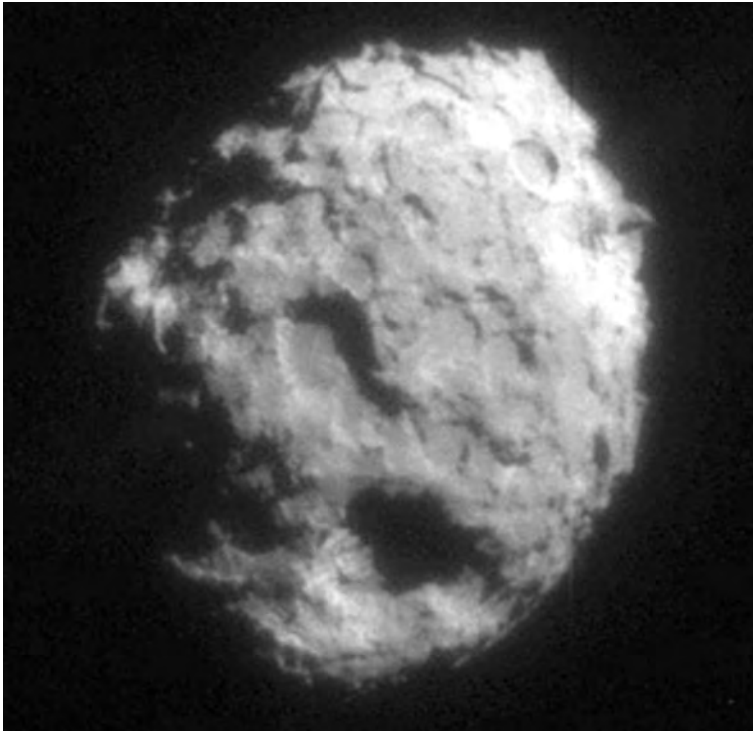


Abb. 129: Kern des Kometen 81P/Wild

Umlaufbahn

Man glaubt, dass Wild 2 während seiner mehr als 4,5 Milliarden Jahre dauernden Existenz eine weitere und weniger exzentrische Umlaufbahn hatte als heute. Nachdem er sich im Jahre 1974 auf rund 0,006 AE an den Planeten \Rightarrow Jupiter näherte, beeinflussten dessen starke Gravitationskräfte die Umlaufbahn des Kometen. In Folge dieser Bahnstörung wurde er ins innere Sonnensystem umgelenkt: Seine Umlaufzeit verkürzte sich von vierzig auf ungefähr sechs Jahre, und seine Periheldistanz wurde von rund 5 AE auf nur 1,591 AE verringert. Das Aphel seiner Umlaufbahn beträgt seitdem 5,306 AE und seine Bahnneigung $3,240^\circ$.

Raumsonde Stardust

Wild 2 wurde am 2. Januar 2004 von der Raumsonde Stardust untersucht. Sie sammelte Partikelproben aus der Koma und soll diese 2006 zur Untersu-

chung auf die Erde zurückbringen. Dann wird es erstmals möglich sein, Material von einem Kometen, das sich seit der Entstehung des Sonnensystems kaum verändert haben dürfte, direkt in irdischen Labors zu untersuchen.

Die 72 Nahaufnahmen, die von Stardust gemacht wurden, zeigen einen Kometenkern mit rund 5 km Durchmesser und einer Albedo von 0,04. Seine raue Oberfläche ist mit flachen Mulden überzogene, deren Ränder aber steil und schroff sind. Neben sehr kleinen lassen sich auch bis zu zwei Kilometer große Strukturen erkennen. Man glaubt, dass diese Strukturen Einschlagskrater darstellen oder von ausströmende Gasjets gebildet wurden. Während des Vorbeiflugs von Stardust waren mindestens zehn Gasjets aktiv.

Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Wild_2. Historie: 12.12.04: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Nikolaus, Naddy, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Donati

Der \Rightarrow Komet Donati (offizielle Bezeichnung C/1858 L1) wurde am 2. Juni 1858 vom italienischer Astronom Giovanni Battista Donati entdeckt und soll einer der schönsten \Rightarrow Kometen gewesen sein, die je mit freiem Auge zu sehen waren.

Umlaufbahn

Der Komet läuft auf einer extrem langgestreckten elliptischen Umlaufbahn um die Sonne. Der sonnennächste Punkt (Perihel), den der Komet am 30. September 1858 durchlaufen hat, liegt mit 0,578 AE Abstand zwischen den Bahnen der Planeten \Rightarrow Merkur und \Rightarrow Venus, während sich der Komet im Aphel mehr als 300 AE von der Sonne entfernt. Die Bahnebene ist rund 63° gegen die Ekliptik geneigt. Da sich Donati aber retrograd (rückläufig) um die Sonne bewegt, wird die Bahnneigung mit 117° angegeben. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt der Komet rund 1.950 Jahre.

Sichtbarkeit

Der Komet Donati konnte im Jahr 1858 etwa von Mitte August bis Mitte November freiaugig gesehen werden. Anfang Oktober erreichte er seine kleinste Distanz zur Erde (0,54 AE) und auch seine größte scheinbare Helligkeit (etwa 0 mag). Er zeigte einen hellen Kopf, und zwei ausgeprägte Schweife: einen schmalen, geraden Ionenschweif und einen breiten, ge-



Abb. 130: Komet Donati, gezeichnet 1858

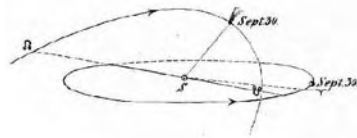


Abb. 131: Komet Donati und Erdbahn 1858

krümmten Staubschweif. Die Schweife erreichten am Himmel eine Länge von bis zu 60° , der Staubschweif war bis zu 10° breit.

Der Komet Donati war der erste Komet in der Geschichte der Kometenforschung, von dem eine Fotografie hergestellt werden konnte: Dies gelang dem englischen Fotografen William Usherwood mit Hilfe seiner Portrait-Kamera am 28. September 1858, und eine Nacht später auch dem US-amerikanischen Astronomen William Cranch Bond am Harvard-College-Observatorium. Donati war auch der erste Komet, der mit Hilfe eines Fotometers untersucht wurde.

Kometenangst wegen des großen Schweifes

Der äußerst helle Komet hatte einen unüblich breiten Schweif und war auch deshalb Gegenstand zahlreicher Gemälde.

Trotz der Schönheit der Himmelserscheinung empfanden viele Menschen auch Angst. Bis zum Mittelalter galten große, helle Schweifsterne, die früher auch »haarige Sterne« genannt wurden, für Unglücksboten und wurden zum Beispiel häufig mit Kriegen in Verbindung gebracht. Man sah in ihnen zum Beispiel das himmlische Symbol eines Schwertes oder einer großen Rute – ähnlich geformt wie die bis heute manchmal als Kinderschreck verwendeten Krampus-Ruten am 5./6. Dezember.

Noch 1736 wurde von William Whiston (dem Nachfolger Newtons als Mathematik-Professor an der Universität Cambridge) eine Panik ausgelöst, weil er einen Zusammenstoß mit einem Kometen vorhersagte, der am 16. Oktober zum Weltuntergang führen würde. Der Erzbischof von Canterbury verkündigte allerdings, dass selbst ein mehrere Kilometer großer Kometenkern zwar viele Schäden verursachen würde, aber ein Zusammenstoß unwahrscheinlich sei.

Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Donati_\(Komet\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Donati_(Komet)). Historie: 30.7.04: Angelegt von Geof, danach bearbeitet von den Hauptautoren Geof, Vesta, Arnomane, RedBot, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Hale-Bopp

Der Komet Hale-Bopp (C/1995 O1) wurde am 23. Juli 1995 unabhängig von Alan Hale in New Mexico und Thomas Bopp in Arizona entdeckt. Er wurde auch als Der Große Komet von 1997 bezeichnet. Der Komet konnte über einen Zeitraum von 18 Monaten freijugig gesehen werden – doppelt so lange wie der bisherige Rekordhalter, der Große Komet von 1811.

Entdeckung

Während der Astronom Hale gezielt nach Kometen suchte, fand der Amateurastronom Bopp den Kometen zufällig, während der Beobachtung des Kugelsternhaufens M70 mit einem geliehenen Teleskop. Bei der Entdeckung war Hale-Bopp noch 7,1 AE von der Sonne entfernt (also weiter entfernt als der Planet Jupiter). Nach Durchsicht älterer Aufnahmen konnte man ihn später auch auf einer Aufnahme des Siding-Spring-Observatoriums aus dem Jahr 1993 erkennen, bei einem Abstand von 13 AE von der Sonne. Der Komet war bereits in dieser Entfernung ungewöhnlich aktiv.

Umlaufbahn

Der Komet läuft auf einer extrem lang gestreckten Umlaufbahn um die Sonne (numerische Exzentrizität 0,995), seine Bahnebene steht fast genau senkrecht zur Ekliptik (Bahnneigung $89,4^\circ$). Der sonnennächsten Punkt seiner Bahn liegt knapp innerhalb der Erdbahn (0,914 AE), sein sonnenfernster Punkt, das Aphel, liegt bei 371,5 AE. Zuletzt stand der Komet vor etwa 4.200 Jahren im Perihel, die nächste Wiederkehr wird in rund 2.500 Jahren erwartet.

Sichtbarkeit

Viele Kometen haben in größeren Distanzen heftige Helligkeitsausbrüche, um danach wieder in eine Phase der Ruhe zu verfallen, Hale-Bopp jedoch konnte bei einem Abstand von 2 AE von der Sonne bereits mit bloßem Auge beobachtet werden und wurde in der Folge noch heller. Wenn er der Erde vergleichbar nahe gekommen wäre wie der Komet Hyakutake (C/1996 B2), der sich am 25. März 1996 bis auf 0,1 AE näherte, hätte Hale-Bopps Schweif den kompletten Himmel überspannt und an Helligkeit den Vollmond übertroffen. Hale-Bopp näherte sich allerdings nicht näher als 1 AE der Erde: Die meisten anderen Kometen wären in dieser Entfernung nicht mit bloßem Auge sichtbar, Hale-Bopp aber erreichte um den Zeitpunkt seiner größten Annäherung an die Sonne am 1. April 1997 eine

scheinbare Helligkeit von etwa -1 mag, und seine zwei Schweife erreichten eine Länge von 30–40 °.

Hale-Bopp war 569 Tage lang, vom 20. Mai 1996 bis zum 9. Dezember 1997, mit bloßem Auge sichtbar, also ungefähr 18,5 Monate, und damit mehr als doppelt so lange wie der vorherige Rekordhalter C/1811 F1 (Flaugergues), der Große Komet von 1811. Man kann davon ausgehen, dass kein anderer Komet jemals von so vielen Menschen gesehen wurde wie Hale-Bopp (vgl. Farbtafeln Abb. 157).

Die Größe des Kometenkerns wird auf 50 km geschätzt, er ist damit dreimal so groß wie der Halleysche Komet und größer als jeder andere bekannte Komet.

Im Februar und März 2001 wurde der Komet in einer Entfernung von 13 AE mit dem 2,2-m-Teleskop auf dem La-Silla-Observatorium beobachtet. Trotz seiner großen



Abb. 132: Hale-Bopp am 11. März 1997

Entfernung zur Sonne (jenseits der Bahn des Planeten Saturn) zeigte der Komet noch eine Koma mit einem Durchmesser von zwei Millionen Kilometern.

Die Sekte Heaven's Gate nahm das Erscheinen des Kometen als Anlass für ihre gemeinsame Massenselbsttötung.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hale-Bopp>. Historie: 9.3.04: Angelegt von Srbauer, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Srbauer, Ckeen, FlaBot, Arnomane, Olorin31k, Nuchber, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Hyakutake

Der Komet Hyakutake (offizieller Name: C/1996 B2) ist ein langperiodischer Komet, der im Jahr 1996 mit dem bloßen Auge beobachtet werden konnte. Er wurde auch als Der Große Komet von 1996 bezeichnet.

Entdeckung

Der Komet wurde am 30. Januar 1996 von Yuji Hyakutake entdeckt. Es war bereits der zweite unter diesem Namen bekannte Komet. Der erste, C/1995 Y1, wurde von Hyakutake nur wenige Wochen vorher entdeckt. Während er seinen ersten Kometen weiter beobachtete – dieser wurde nie

freiäugig sichtbar – fand er zu seiner großen Überraschung diesen zweiten Kometen an fast der gleichen Position, wo er schon den ersten entdeckt hatte.

Umlaufbahn

Der Komet Hyakutake läuft auf einer extrem langgestreckten, elliptischen Umlaufbahn um die Sonne. Der sonnennächste Punkt der Bahn (Perihel), den der Komet am 1. Mai 1996 durchlaufen hat, liegt mit 0,230 AE noch innerhalb der Bahn des Planeten Merkur, während der sonnenernste Punkt (Aphel) mit ungefähr 4700 AE beinahe ein Zehntel Lichtjahr von der Sonne entfernt ist. Seine Bahn ist rund 55° gegen die Ekliptik geneigt. Da sich Hyakutake aber retrograd (rückläufig) um die Sonne bewegt, wird die Bahnneigung mit 125° angegeben.

Der Komet hat das innere Sonnensystem bereits vor ungefähr 8.000 Jahren durchlaufen. Die Gravitationswirkungen der Gasriesen während seiner Passage 1996 haben seine Umlaufbahn so gestört, dass er erst in ungefähr 14.000 Jahren wieder zurückkehren wird.

Sichtbarkeit

Bereits die ersten Bahnbestimmungen zeigten, dass der Komet sehr nahe an der Erde vorbeiziehen würde, in einer Entfernung von nur 0,109 Astronomischen Einheiten. Da der 1995 entdeckte Komet Hale-Bopp bereits als möglicher großer Komet angekündigt war, brauchte die Astronomen allerdings einige Zeit, um sich darüber klar zu werden, dass auch Hyakutake eine spektakuläre Erscheinung werden würde.

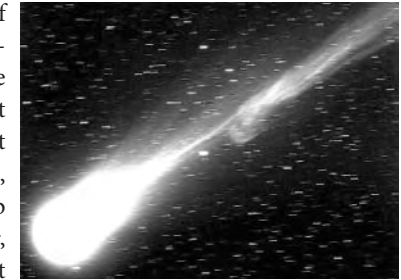


Abb. 133: Komet C/1996 B2 (Hyakutake)133

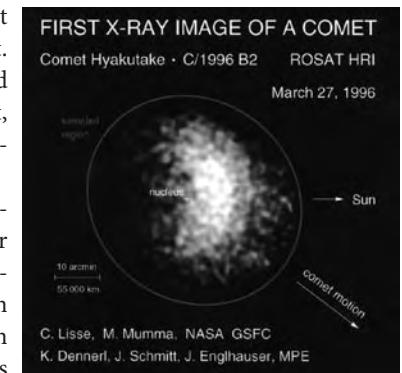


Abb. 134: Röntgenaufnahme des Kometen Hyakutake

Mitte März war der Komet noch ziemlich unauffällig. Er leuchtete mit der scheinbaren Helligkeit eines Sterns 4. Größe, und sein Schweif hatte eine Länge von ungefähr 5°. Als er sich Sonne und Erde weiter näherte, wurde er schnell heller und sein Schweif länger. Bei seiner größten Annäherung an die Erde am 24. März 1996 war er eines der hellsten Objekte am Nachthimmel, und sein Schweif erstreckte sich mit einer beeindruckenden Länge von 75° über den Himmel. Die Koma zeigte eine deutlich sichtbare blau-grüne Färbung.

Da Hyakutake nur wenige Tage in seiner größten Helligkeit sichtbar war, konnte er das öffentliche Interesse nicht so stark auf sich lenken wie der Komet Hale-Bopp im folgenden Jahr. Zudem konnten viele europäische Beobachter den Komet an seinen hellsten Tagen wegen ungünstiger Witterungsverhältnissen nicht beobachten. Viele Leute, die sowohl den Kometen Hyakutake, als auch Hale-Bopp sahen, halten Hyakutake für die beeindruckendere Erscheinung.

Die Ulysses-Raumsonde flog ungeplant und unerwartet im Mai 1996 durch den Schweif des Kometen. Basierend auf diesem Ereignis, wurde die Schweiflänge mit mindestens 500 Millionen Kilometer bestimmt. Beobachtungen von der Erde stellten die Existenz von Ethan und Methan im Kometen fest. Es war das erste Mal, dass diese beiden Gase in Kometen nachgewiesen wurden. Mit dem Röntgensatelliten ROSAT wurde auch festgestellt, dass Hyakutake Röntgenstrahlen aussendet, was ebenso bei noch keinem anderen Kometen beobachtet wurde. Radarmessungen des Goldstone-Observatoriums zeigten, dass der Kometenkern nur 2 km groß war. Beobachtungen mit dem Hubble Space Telescope ließen erkennen, dass sich kleine Fragmente vom Kometenkern lösten, die dann ihre eigenen, kurzen Schweife ausbildeten.

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hyakutake>. Historie: 12.12.04: Anonym angelegt, danach bearbeitet von den Hauptautoren Vesta, Arnomane, Olorin31k, Crux, anonym. 21.9.05-31.1.06: WikiPress-Redaktion.

Anhang

Das Sonnensystem in Zahlen

Übersicht der Eigenschaften der Sonne

	Sonne	Verhältnis Sonne/Erde
Sternklasse (Spektralklasse und Leuchtkraftklasse)	G2V	-
mittlerer Durchmesser	1.392.500 km	109,16
mittlerer scheinbarer Durchmesser	31' 59,3"	-
Masse	$1,988 \cdot 10^{30}$ kg	332.946
Massenverlust pro Sekunde durch Strahlung	$4,28 \cdot 10^9$ kg	-
Massenverlust pro Sekunde durch Sonnenwind	etwa $1 \cdot 10^9$ kg	-
Massenverlust bis heute durch Strahlung	etwa $520 \cdot 10^{24}$ kg = 87 Erdmassen	-
Zeit bis zum Ende des Wasserstoffbrennens im Zentrum	etwa $4,5\text{--}5 \cdot 10^9$ a	-
Dichte	$1,41$ g/cm ³	0,255
Dichte im Zentrum	150 g/cm ³	11,1
Druck im Zentrum	$> 2 \cdot 10^{16}$ Pa	-
Temperatur im Zentrum	$14,8 \cdot 10^6$ °C	2.114
Temperatur der Photosphäre	etwa 6.100 °C	-
Temperatur der Korona	etwa $1\text{--}2 \cdot 10^6$ K	-
Effektivtemperatur	5.777 K	-
Strahlungsmaximum	etwa 500 nm (grünes Licht)	-
mittlere scheinbare Helligkeit	-26,8	-
absolute Helligkeit	4,87	-
Leuchtkraft	$3,846 \cdot 10^{26}$ W	-
spezifische Ausstrahlung der Oberfläche	$6,318 \cdot 10^7$ W/m ²	-
solare Gravitationskonstante ($G \cdot M$)	$1,33 \cdot 10^{20}$ m ³ s ⁻²	332.946
Oberflächenbeschleunigung	$273,96$ m/s ²	27,9
Fluchtgeschwindigkeit	$617,319$ km/s	62,927
Radius des Ereignishorizontes	$2,953$ km	332.946
Rotationsdauer am Äquator	25 d 9 h 7 min	25,38
Rotationsdauer bei 75° Breite	31 d 19 h 12 min	-
Rotationsgeschwindigkeit am Äquator	$1856,847$ m/s	4,01
Neigung der Achse gegen die Ekliptik	7° 15'	-
Entfernung zum Zentrum der Galaxis	25.000 bis 28.000 Lichtjahre	-
Umlaufzeit um das Zentrum der Galaxis	etwa $210.000.000$ a	-
Umlaufgeschwindigkeit um das Zentrum der Galaxis	etwa 225 km/s	-

Sichtbarkeit

Übersicht über die Sichtbarkeit der hellsten Objekte im Sonnensystem

In der folgenden Tabelle sind die speziellen Positionen des Merkur für die für die nächsten Jahre angegeben. Elongationen mit einer Möglichkeit zur freitägigen Sichtbarkeit in Europa sind grau unterlegt (östliche Elongation bietet *Abendsichtbarkeit*, westliche Elongation *Morgensichtbarkeit*).

Größte östliche Elongation	Stationär, wird rückläufig	Untere Konjunktion	Stationär, wird rechtläufig	Größte westliche Elongation	Obere Konjunktion
24.02.2006 – 18.1°	02.03.2006	12.03.2006	24.03.2006	8.04.2006 – 27.8°	18.05.2006
20.06.2006 – 24.9°	04.07.2006	18.07.2006	28.07.2006	07.08.2006 – 19.2°	01.09.2006
17.10.2006 – 24.8°	28.10.2006	08.11.2006	17.11.2006	25.11.2006 – 19.9°	07.01.2007
07.02.2007 – 18.2°	13.02.2007	23.02.2007	07.03.2007	22.03.2007 – 27.7°	03.05.2007
02.06.2007 – 23.4°	15.06.2007	28.06.2007	10.07.2007	20.07.2007 – 20.3°	15.08.2007
29.09.2007 – 26°	12.10.2007	23.10.2007	01.11.2007	08.11.2007 – 19°	17.12.2007
22.01.2008 – 18.6°	28.01.2008	06.02.2008	18.02.2008	03.03.2008 – 27.1°	16.04.2008
14.05.2008 – 21.8°	26.05.2008	07.06.2008	19.06.2008	01.07.2008 – 21.8°	29.07.2008
11.09.2008 – 26.9°	24.09.2008	06.10.2008	15.10.2008	22.10.2008 – 18.3°	25.11.2008

In der folgenden Tabelle sind die speziellen Positionen der Venus für die für die nächsten Jahre angegeben.

Größte östliche Elongation	Stationär, wird rückläufig	Untere Konjunktion	Stationär, wird rechtläufig	Größte westliche Elongation	Obere Konjunktion
03.11.2005 – 47.1°	23.12.2005	13.01.2006	03.02.2006	25. 03.2006 – 46.5°	27.10.2006
09.06.2007 – 45.4°	25.07.2007	18.08.2007	07.09.2007	28.10.2007 – 46.5°	09.06.2008
14.01.2009 – 47.1°	05.03.2009	27.03.2009	15.04.2009	05.06.2009 – 45.9°	11.01.2010

In der folgenden Tabelle sind die Sichtbarkeiten der außerhalb der Erdbahn gelegenen Planeten für die für die nächsten Jahre angegeben. Neben dem Datum der Opposition ist jeweils auch die scheinbare Helligkeit, der Abstand zur Erde und der Winkeldurchmesser bei der Opposition angegeben.

	Stationär, dann rückläufig		Opposition		Oppositionsentfernung		Oppositionshelligkeit		Winkeldurchmesser		Ringneigung		Stationär, dann rechtläufig		Konjunktion zur Sonne	
Mars	01.10.2005	07.11.2005	0,464 AE	-2,3	20,17"	-	10.12.2005	23.10.2006								
	15.11.2007	24.12.2007	0,589 AE	-1,6	15,88"	-	30.01.2008	05.12.2008								
	21.12.2009	29.01.2010	0,664 AE	-1,3	14,10"	-	11.03.2010	04.02.2011								
Jupiter	05.03.2006	04.05.2006	4,413 AE	-2,5	44,63"	-	06.07.2006	21.11.2006								
	06.04.2007	05.06.2007	4,304 AE	-2,6	45,75"	-	07.08.2007	23.12.2007								
	09.05.2008	09.07.2008	4,161 AE	-2,7	47,33"	-	08.09.2008	24.01.2009								
Saturn	22.11.2005	27.01.2006	8,127 AE	-0,2	20,51"	-18,9°	05.04.2006	08.08.2006								
	20.12.2007	24.02.2008	8,291 AE	0,2	20,10"	-8,4°	03.05.2008	04.09.2008								
	01.01.2009	08.03.2009	8,394 AE	0,5	19,85"	-2,6°	17.05.2009	17.09.2009								
Uranus	15.06.2005	01.09.2005	19,060 AE	5,7	3,67"	-	16.11.2005	01.03.2006								
	19.06.2006	05.09.2006	19,075 AE	5,7	3,67"	-	20.11.2006	05.03.2007								
	23.06.2007	09.09.2007	19,086 AE	5,7	3,67"	-	24.11.2007	08.03.2008								
Neptun	22.05.2006	11.08.2006	29,039 AE	7,8	2,31"	-	29.10.2006	08.02.2007								
	25.05.2007	13.08.2007	29,032 AE	7,8	2,31"	-	31.10.2007	11.02.2008								
	26.05.2008	15.08.2008	29,024 AE	7,8	2,31"	-	02.11.2008	12.02.2009								
Pluto	29.03.2006	16.06.2006	30,121 AE	13,9	-	-	05.09.2006	18.12.2006								
	31.03.2007	19.06.2007	30,292 AE	13,9	-	-	07.09.2007	21.12.2007								
	02.04.2008	20.06.2008	30,469 AE	13,9	-	-	09.09.2008	22.12.2008								

Übersicht der Eigenschaften der Planeten im Sonnensystem

	→Merkur	→Venus	→Erde	→Mars	→Jupiter	→Saturn	→Uranus	→Neptun	→Pluto
Große Halbachse in Mio. km in AE	57,91 0,387	108,21 0,723	149,60 1,000	227,92 1,524	778,57 5,204	1,433,53 9,582	2,872,46 19,201	4,495,06 30,047	5,906,38 39,482
numerische Exzentrizität	0,206	0,007	0,017	0,094	0,049	0,057	0,046	0,011	0,249
Neigung der Bahnebene	7° 0'	3° 23'	0°	1° 51'	1° 18'	2° 29'	0° 46'	1° 46'	17° 10'
Umlaufdauer	87 d 23 h	224 d 17 h	365 d 6 h	1 a 322 d	11 a 315 d	29 a 167 d	84 a 5 d	164 a 289 d	247 a 250 d
mittlere Bahngeschwindigkeit in km/s	47,87	35,02	29,78	24,13	13,07	9,69	6,81	5,43	4,72
Äquatordurchmesser* in km Rel. zur Erde	4879 0,383	12.104 0,949	12.756 1,000	6794 0,533	142.984 11,209	120.536 9,449	51.118 4,007	49.528 3,883	2390 0,187
Masse in kg Rel. zur Erde	3.302 · 10 ²³ 0,055	4.869 · 10 ²⁴ 0,815	5.974 · 10 ²⁴ 1,000	6.419 · 10 ²³ 0,107	1,899 · 10 ²⁷ 317,83	5,685 · 10 ²⁶ 95,159	8,683 · 10 ²⁵ 14,536	1,024 · 10 ²⁶ 17,147	1,25 · 10 ²² 0,002
mittlere Dichte in g/cm ³	5,43	5,24	5,52	3,93	1,33	0,69	1,27	1,64	1,75
sphärische Albedo	0,12	0,75	0,31	0,25	0,34	0,34	0,30	0,29	0,4 – 0,6
Fallbeschleunigung* in m/s ²	3,70	8,87	9,81	3,71	24,79	10,44	8,87	11,15	0,58
Fluchtgeschwindigkeit in km/s	4,25	10,36	11,19	5,03	59,54	35,49	21,29	23,71	1,2
Rotationsdauer	58 d 15h 36m	-243 d 0 h 27 m (gegenläufig)	23h 56m 4s	1 d 0 h 22 m 26 s	9 h 55 m 30 s	10 h 39 m 22 s	-17 h 14 m 24 s (gegenläufig)	16 h 6 m 26 s	-6 d 9 h 16 m (gegenläufig)
Neigung des Äquators zum Orbit	36°	177° 21' 36"	23° 26' 22"	25° 11' 24"	3° 7' 48"	26° 43' 48"	97° 46' 12"	28° 19' 12"	122° 31' 48"
mittlere Temperatur auf Normalnull* in K	440	737	288	210	165	134	76	72	50
Hauptbestandteile der Atmosphäre	-	CO ₂ , N ₂	N ₂ , O ₂	CO ₂ , N ₂ , Ar	H ₂ , He	H ₂ , He	H ₂ , He, CH ₄	H ₂ , He, CH ₄	-
Anzahl (bekannter) Monde	0	0	→1	2	63	47	27	13	3
Ringe	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
Entdecker	-	-	-	-	-	-	Friedrich Wilhelm Herschel	Johann Gottfried Galle, Heinrich Louis d'Arrest	Clyde Tombaugh
Datum der Entdeckung	-	-	-	-	-	-	13.03.1781	23.09.1846	18.02.1930

*Für die Gasriesen Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun wurde der entsprechende Wert für die Höhe mit Luftdruck 1 bar genommen.

Übersicht der Eigenschaften der Monde im Sonnensystem über 1.000km Durchmesser (zusätzlich mit Janus und Epimetheus)

	↔ Ariel	↔ Charon	↔ Delimos	↔ Dione	↔ Epimetheus	↔ Europa	↔ Ganymed	↔ Iapetus	↔ Io	↔ Janus
natürlicher Satellit des	↔ Uranus	↔ Pluto	↔ Mars	↔ Saturn	↔ Saturn	↔ Jupiter	↔ Jupiter	↔ Saturn	↔ Jupiter	↔ Saturn
mittlerer Bahnradius in km	190.900	19.405	23.459	377.420	derzeit 151.422	670.900	1.070.600	3.561.300	421.600	derzeit 151.472
numerische Exzentrizität	0,0012	0,0	0,00033	0,0022	0,009	0,0101	0,0015	0,0283	0,041	0,007
Neigung der Bahnebene in °	0,04	99,09	1,79	0,02	0,34	1,47	0,20	7,52	0,04	0,14
Umlaufzeit in Tagen	2,52	6,39	1,26	2,74	0,69	3,55	7,16	79,33	1,76	0,70
Durchmesser in km	1157,8	1172	15×12,2×11	1118	119	3121,6	5268	1.436	3.643,2	178
Masse in kg	$1,35 \cdot 10^{21}$	$1,90 \cdot 10^{21}$	$1,8 \cdot 10^{15}$	$1,10 \cdot 10^{21}$	$5,35 \cdot 10^{17}$	$4,88 \cdot 10^{22}$	$1,48 \cdot 10^{23}$	$1,97 \cdot 10^{21}$	$8,94 \cdot 10^{22}$	$1,98 \cdot 10^{18}$
mittlere Dichte in g/cm ³	1,7	2,24	1,7	1,5	0,61	3,01	1,94	1,27	3,56	0,65
Albedo	0,39	0,37	0,07	0,55	0,5	0,64	0,43	0,04-0,5	0,61	0,5
scheinbare Helligkeit	-	-	-	10,4	14,5	5,3	4,6	10,0 (variabel)	5	-
Entdecker	William Lassell	James W. Christy	Asaph Hall	Giovanni Cassini	Richard L. Walker	Galileo Galilei, Simon Marius	Galileo Galilei, Simon Marius	Giovanni Cassini	Galileo Galilei, Simon Marius	Audouin Dollfus
Datum der Entdeckung	24.10.1851	22.06.1978	12.08.1877	21.03.1684	18.12.1966	1610	1610	25.10.1671	1610	15.12.1966

	↔ Kallisto	↔ Mond	↔ Oberon	↔ Phobos	↔ Rhea	↔ Tethys	↔ Titan	↔ Titania	↔ Triton	↔ Umbriel
natürlicher Satellit des	↔ Jupiter	↔ Erde	↔ Uranus	↔ Mars	↔ Saturn	↔ Saturn	↔ Saturn	↔ Uranus	↔ Neptun	↔ Uranus
mittlerer Bahnradius in km	1.883.000	384.405	583.519	9378	527.040	294.660	1.221.850	463.300	345.760	266.300
numerische Exzentrizität	0,007	0,0549	~0,0016	0,0151	0,001	0,0000	0,0292	~0,0017	0,0000	0,005
Neigung der Bahnebene in °	0,28	5,15	~0,7	1,08	0,35	1,09	0,33	~0,7	156,83	0,4
Umlaufzeit in Tagen	16,69	27,32	13,46	0,32	4,52	1,89	15,95	8,71	5,88	4,14
Durchmesser in km	4820,6	3.476	1522,8	27×22×19	1528	1060	5150	1577,8	2707	1169,4
Masse in kg	$1,08 \cdot 10^{23}$	$7,35 \cdot 10^{22}$	$3,01 \cdot 10^{21}$	$1,08 \cdot 10^{16}$	$2,32 \cdot 10^{21}$	$6,18 \cdot 10^{20}$	$1,35 \cdot 10^{23}$	$3,53 \cdot 10^{21}$	$2,15 \cdot 10^{22}$	$1,17 \cdot 10^{21}$
mittlere Dichte in g/cm ³	1,85	3,35	1,63	2,0	1,24	1,21	1,88	1,71	2,05	1,4
Albedo	0,2	0,07	0,24	0,06	0,65	0,8	0,21	0,28	0,7	0,16
scheinbare Helligkeit	5,7	-	-	-	9,7	10,3	8,4	-	-	-
Entdecker	Galileo Galilei, Simon Marius	-	Wilhelm Herschel	Asaph Hall	Giovanni Cassini	Giovanni Cassini	Christiaan Huygens	Wilhelm Herschel	William Lassell	William Lassell
Datum der Entdeckung	1610	-	11.01.1787	18.08.1877	23.12.1672	1684	25.03.1655	11.01.1787	10.10.1846	24.10.1851

Alle Monde in der Tabelle haben eine gebundene Rotation um ihren Planeten, zeigen ihm also immer dieselbe Seite.

Übersicht der Eigenschaften ausgewählter Asteroiden im Sonnensystem

Asteroid	→2002 AA ₂₉	→2003 UB ₃₁₃	→2003 YN ₁₀₇	→2004 FH	→(588) Achilles	→(99942) Apophis	→(1) Ceres	→(2060) Chiron _{95P/Chiron}
Orbittyp	Aten-Typ	→Kuipergürtel-Objekt	Aten-Typ	Aten-Typ	→Jupiter-Trojaner (L4)	Aten-Typ	→Hauptgürtelasteroid	→Zentaur
Große Halbachse in AE	1,000	67,709	0,997	0,818	5,192	0,922	2,766	13,676
Perihel.: Aphel in AE	0,988; 1,012	37,808; 97,610	0,974; 1,021	0,581; 1,054	4,429; 5,956	0,746; 1,098	2,544; 2,987	8,453; 18,899
numerische Exzentrizität	0,012	0,441	0,021	0,289	0,147	0,191	0,080	0,382
Neigung der Bahnebene in °	10,74	44,18	4,27	0,02	10,3	3,33	10,59	6,94
Siderische Umlaufzeit	1 a 0 d	557 a	1 a 0 d	270 d 5 h	11 a 303 d 1 h	323 d 12 h	4 a 219 d 15 h	50 a 210 d
mittlere Bahngeschwindigkeit in km/s	29,78	3,62	29,83	32,24	13,00	31,02	17,91	8,05
Durchmesser	50 – 110 m	2.500 - 3.200 km	10 – 30 m	30 m	136 km	0,32 km	975 x 909 km	132 - 142 km
Masse in kg	-	-	-	~2,8 · 10 ⁷	-	4,5 · 10 ¹⁰	9,35 · 10 ²⁰	2,4 – 3,0 · 10 ¹⁸
mittlere Dichte in g/cm ³	-	-	-	-	-	2,6	2,14	~2,0
Rotationsperiode	< 33 min	-	-	3,02 m	> 12 h	30h 37m	9h 4m 30s	5h 55m
Albedo	0,04 – 0,20	> 0,4	0,04 - 0,20	-	0,033	0,35	0,09	0,048
absolute Helligkeit	24,08 - 25,23	-1,1	26,2 - 26,7	26,42	8,67	19,23	3,34	6,50
Spektralklasse	C- bis S-Typ	-	C- bis S-Typ	-	D- oder G-Typ	Q-Typ	C-Typ	C-Typ
Entdecker	LINEAR	M. Brown, C. Trujillo D. Rabinowitz	LINEAR	LINEAR	Max Wolf	R. Tucker, D. J. Tholen, F. Bernardi	Giuseppe Piazzi	Charles Kowal
Datum der Entdeckung	09.01.2002	31.10.2003, bestätigt 2005	20.12.2003	15.03.2004	22.02.1906	19.06.2004	01.01.1801	01.11.1977
ältere Bezeichnung	-	-	-	-	1906 TG	2004 MN ₄	-	1977 UB

Asteroid	→(433) Eros	→(3) Juno	→(90482) Orcus	→(2) Pallas	→(50000) Quaoar	→(90377) Sedna	→(4) Vesta
Orbittyp	Amor-Typ	→Hauptgürtelasteroid	→Plutino	Hauptgürtelasteroid	→Kuipergürtel-Objekt	Transneptun	Hauptgürtelasteroid
Große Halbachse in AE	1,458	2,668	39,474	2,773	43,405	495,8 ± 4,6	2,362
Perihel.: Aphel in AE	1,133; 1,783	1,979; 3,358	30,872; 48,076	2,135; 3,412	41,914; 44,896	76,0 ± 1,7; 915,6 ± 9,2	2,151; 2,572
numerische Exzentrizität	0,223	0,258	0,218	0,230	0,034	0,846	0,089
Neigung der Bahnebene in °	10,83	12,97	20,56	34,85	7,98	11,93	7,13
Siderische Umlaufzeit	1 a 277 d 14 h	4 a 130 d 23 h	248 a 4 d 13 h	4 a 226 d 2 h	285 a 354 d 7 h	11,040 a	3 a 229 d 23 h
mittlere Bahngeschwindigkeit in km/s	24,36	18,23	4,74	17,89	4,52	1,35	19,38
Durchmesser	56x15x13 km	290x245 km	1.600 bis 1.800 km	574x526x501 km	1.250 ± 50 km	~1.700 km	560x544x448 km
Masse in kg	7,2 · 10 ¹⁵	2,82 · 10 ¹⁹	-	2,41 · 10 ²⁰	1,0 – 2,6 · 10 ²¹	1,7 – 6,1 · 10 ²¹	2,71 · 10 ²⁰
mittlere Dichte in g/cm ³	2,4	4,2	-	3,28	2,07	2,07	3,7
Rotationsperiode	5 h 16 m 12 s	7 h 13 m	-	7 h 49 m	-	~10 h	5 h 20 m 31 s
Albedo	0,16	0,238	-	0,159	0,10	>0,2?	0,423
absolute Helligkeit	11,16	5,33	-	4,13	2,613	1,57	3,24
Spektralklasse	S-Typ	S-Typ	-	B-Typ	-	-	V-Typ
Entdecker	Gustav Witt	Karl Ludwig Harding	Mike Brown, Chad Trujillo, David Rabinowitz	Heinrich Wilhelm Olbers	Chad Trujillo, Mike Brown	M. Brown, C. Trujillo, D. Rabinowitz	H. Olbers
Datum der Entdeckung	13.08.1898	01.09.1804	17.02.2004	28.03.1802	4.06.2002	14.11.2003	29.03.1807
→Hauptgürtelasteroidältere Bezeichnung	-	-	2004 DW	-	2002 LM ₆₀	2003 VB ₁₂	-

Übersicht der Eigenschaften ausgewählter Kometen im Sonnensystem

	→C/1858 L1 (Donati)	→2P/Encke	→C/1995 O1 (Hale-Bopp)	→1P/Halley	→C/1996 B2 (Hyakutake)	→D/1993 F2 (Shoemaker- Levy)	→9P/Tempel 1	→81P/Wild
Orbittyp	langperiodisch	kurzperiodisch	langperiodisch	kurzperiodisch	langperiodisch	kurzperiodisch	kurzperiodisch	kurzperiodisch
Große Halbachse in AE	156,132	2,218	186,2	17,834	~2350	5,162	3,122	3,448
Perihel; Aphel in AE	0,578; 311,685	0,339; 4,097	0,914; 371,5	0,586; 35,082	0,230; ~4700	4,822; 5,503	1,506; 4,738	1,591; 5,306
numerische Exzentrizität	0,996	0,847	0,995	0,967	0,9999	0,066	0,518	0,539
Neigung der Bahnebene in °	116,95	11,8	89,43	162,26	124,92	1,35	10,53	3,24
Siderische Umlaufzeit	1951 a	3 a 110 d	~2540 a	76 a 37 d	~14.000 a	11 a 266 d	5 a 189 d	6 a 147 d
Bahngeschwindigkeit im Perihel in km/s	55,35	69,53	44,01	54,57	87,83	14,00	29,90	29,29
Durchmesser	-	1–3 km	~50 km	15,3 × 7,2 × 7,2 km	2 km	~2 km	7,6 × 4,9 km	5 km
Masse in kg	-	-	-	2 · 10 ¹⁴	-	~10 ¹²	7,2 · 10 ¹³	~3 · 10 ¹³
mittlere Dichte in g/cm ³	-	-	-	~0,55	-	~0,5	0,62	~0,5
Albedo	-	0,05	-	0,05	-	-	0,04	0,04
Entdecker	G. B. Donati	Jean-Louis Pons	A. Hale, T. Bopp	-	Y. Hyakutake	C. S. Shoemaker, E. Shoemaker, D. Levy	E. W. L. Tempel	Paul Wild
Datum der Entdeckung	02.06.1858	27.11.1818	23.07.1995	-	30.01.1996	24.03.1993	03.04.1867	06.01.1978
ältere Bezeichnung	-	-	-	-	-	1993 E	-	-

In der folgenden Tabelle ist die Sichtbarkeit der hellsten Asteroiden des Buches für die nächsten Jahre angegeben. Die scheinbare Helligkeit und die Entfernung zur Erde beziehen sich dabei auf den Zeitpunkt der Opposition, wenn der Asteroid der Erde am nächsten ist und damit auch am hellsten erscheint.

	Stationär, dann rückläufig	Opposition	Oppositions-entfernung	Maximale Helligkeit	Stationär, dann rechtläufig	Konjunktion zur Sonne
Ceres	26.06.2006	12.08.2006	1,983 AE	7,6	27.11.2006	22.03.2007
	20.09.2007	09.11.2007	1,837 AE	7,2	01.01.2008	28.06.2008
	17.01.2009	24.02.2009	1,585 AE	6,9	16.04.2009	31.10.2009
Eros	26.02.2005	16.04.2005	0,366 AE	10,5	02.05.2005	03.03.2006
	23.05.2007	09.07.2007	0,748 AE	12	22.08.2007	11.10.2008
	14.07.2009	1.09.2009	0,689 AE	11,9	15.10.2009	02.01.2011
Juno	02.11.2005	09.12.2005	1,060 AE	7,5	16.01.2006	02.09.2006
	19.02.2007	10.04.2007	2,133 AE	9,7	05.06.2007	14.11.2007
	18.04.2008	12.06.2008	2,281 AE	10,1	10.08.2008	18.01.2009
Pallas	02.05.2006	01.07.2006	2,523 AE	9,5	24.08.2006	01.02.2007
	06.07.2007	03.09.2007	2,253 AE	8,8	22.10.2007	29.03.2008
	28.10.2008	04.12.2008	1,567 AE	8,0	21.01.2009	12.09.2009
Vesta	19.11.2005	06.01.2006	1,550 AE	6,2	23.02.2006	11.09.2006
	19.04.2007	31.05.2007	1,140 AE	5,4	15.07.2007	21.02.2008
	13.09.2008	30.10.2008	1,541 AE	6,5	20.12.2008	22.06.2009

Literatur

Bücher

- Rolf W. Bühler: *Meteorite – Urmaterie aus dem interplanetaren Raum*. Birkhäuser, 1988, ISBN 3764318767
- Ronald Greeley, Raymond Batson: *Der NASA-Atlas des Sonnensystems*. Droemer-Knauer, 2002, ISBN 3426664542
- Hermann-Michael Hahn: *Unser Sonnensystem*. Kosmos-Verlag, 2004, ISBN 344009796X
- Dieter B. Herrmann, Oliver Schwarz: *Duden, Basiswissen Schule – Astronomie*. Bibliographisches Institut Mannheim, ISBN 3-89818-015-8; Einführungsbuch für den Schulunterricht
- A. Unsöld, B. Baschek: *Der neue Kosmos*. Springer-Verlag, ISBN 3-540-42177-7; Einführung in die Astronomie und Astrophysik

Zeitschriften

- *Bild der Wissenschaft*. Konradin-Verlag, ISSN 0006-2375; Onlineauftritt: ▶ <http://bdw.wissenschaft.de>
- *Spektrum der Wissenschaft*. Verlag Spektrum der Wissenschaft, ISSN 0170-2971; Onlineauftritt: ▶ <http://www.spektrum.de>
- *Sterne und Weltraum*. Verlag Spektrum der Wissenschaft, ISSN 0039-1263; Onlineauftritt: ▶ http://www.wissenschaft-online.de/page/p_suw_home

Fachzeitschriften

- *arXiv* (▶ <http://de.arxiv.org>), Vorabveröffentlichungen von Fachartikeln aus allen Sparten der Physik und Mathematik
- *Astrophysics Data System* (▶ <http://adswwww.harvard.edu/>), Onlinearchiv von Publikationen aus der Astronomie und Astrophysik
- *Icarus*. American Astronomical Society, ISSN 0019-1035; Onlineauftritt: ▶ <http://icarus.cornell.edu/journal/>

- *Journal of Geophysical Research*. American Geophysical Union, ISSN 0148-0227; Onlineauftritt: ▶ <http://www.agu.org/journals/je/>
- *Meteoritics & Planetary Science*. The Meteoritical Society, ISSN 1086-9379; Onlineauftritt: ▶ <http://meteoritics.org>
- *Nature*. Nature Publishing Group, ISSN 0028-0836; Onlineauftritt: ▶ <http://deutsche.nature.com>

Fernsehen

- Alpha Centauri – von Harald Lesch auf BR-alpha; alle alten Sendungen online unter ▶ <http://www.br-online.de/alpha/centauri/archiv.shtml>

Weblinks

Artikelsammlungen

- Gary W. Kronk's Cometography (▶ <http://cometography.com>) (Englisch)
- »Die neun Planeten« (▶ <http://www.wappswelt.de/tnp/nineplanets/nineplanets.html>)

Multimediale Inhalte

- Animation zur Plattentektonik (▶ <http://www.urweltmuseum.de/museum/geologie/Uhr/uhrstart.htm>)
- Aufbereitete Digitalfotos der Venusoberfläche (▶ http://www.mentallandscape.com/V_DigitalImages.htm) (Englisch)
- »Cinema del Sol«: animierte Protuberanzen und Sonnenflecken (▶ <http://www.baschelden-network.de/ass/Sol/>)
- Entwicklung der plattentektonischen Situation während des Phanerozoikums (▶ <http://www.scotese.com/earth.htm>) (Englisch)
- Panoramabilder aller Mars-Missionen (▶ <http://www.spiegel.de/flash/0,5532,4150,00.html>)

Verbände

- IAU: Minor Planet Center (▶ <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html>) (Englisch)
- Internationale Astronomische Union (IAU) (▶ <http://www.iau.org/>) (Englisch)
- Vereinigung der Sternfreunde (VdS) (▶ <http://www.vds-astro.de/>)

Glossar

- **Absolute Helligkeit:** Die absolute Helligkeit ist eine Hilfsgröße in der Astronomie, um die tatsächlichen Helligkeiten von Himmelsobjekten (meist Sternen) vergleichen zu können. Dazu stellt man sich die Sterne in einheitlicher Entfernung von zehn Parsec (32,6 Lichtjahre) vor. Die Helligkeit, die ein Beobachter aus dieser Normdistanz messen würde, nennt man absolute Helligkeit. Bei Kometen und Asteroiden wird der Begriff Absolute Helligkeit abweichend definiert, da sie nur Licht reflektieren. Hier wird die in der Realität unmögliche Situation angenommen, dass die Erde und die Sonne an einer Stelle sind und das Objekt (der Komet oder Asteroid) genau eine astronomische Einheit entfernt steht. Die Helligkeit, mit der das Objekt dann zu sehen wäre, wird als absolute Helligkeit bezeichnet.
- **Absorption:** Der Begriff Absorption (lat. *absorptio* beziehungsweise *absorbere*: »ab-, (auf-)saugen«) bezeichnet in der Physik die Aufnahme von Energie in einem Körper und ist von einem Energiedurchgang dadurch abzugrenzen, dass bei Absorption die Energie in innere Energie (zumeist in Wärme) umgewandelt wird. Ganz allgemein kann Absorption durch eine Absorptionsrate oder einen Absorptionsgrad beschrieben werden. Egal ob es sich um Schallwellen, elektromagnetische Wellen oder Teilchen handelt, lassen sich diese von der Struktur gleich behandeln.
- **Albedo:** Die Albedo (lat. *albidus*: »weiß«) ist ein Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden (remittierenden), also nicht spiegelnden und nicht selbst leuchtenden Oberflächen. Das Verhältnis der Rückstrahlung zur Einstrahlung kann theoretisch Werte von 0 bis 1 annehmen. Je größer der Anteil der reflektierten Strahlung ist, desto heller ist die Oberfläche und um so höher ist die Albedo.
- **Apsis:** Als Apsis (griech., »Wölbung«; Plural Apsiden) bezeichnet man die beiden Hauptscheitel auf der elliptischen Umlaufbahn eines Himmelskörpers. Apoapsis ist dabei der Punkt mit der größten Entfernung zum Hauptkörper und Periapsis der mit der geringsten. Für die Hauptkörper Sonne, Erde und Mond haben die Apsiden eigene Namen, die aus den entsprechenden griechischen Wörtern abgeleitet sind (*apo/peri* = »fern«/»nah«, *Helios* = »Sonne«, *Ge* oder *gaia* = »Erde«, *Selene* = »Mond«). Im Sonnensystem ist dementsprechend das Perihel der sonnennächste, das Aphel (sprich Ap-hel) der sonnenfernste Punkt einer Planetenbahn.
- **Arecibo-Observatorium:** Das Arecibo Observatorium ist das größte Radioteleskop der Welt. Die Parabolantenne des Radioteleskops ist ein nicht schwenkbarer, sphärischer Reflektor mit einem Durchmesser von 305 Metern. Dieser ist in ein natürliches, schüsselförmiges Tal in der Nähe von Arecibo, Puerto Rico eingelassen.
- **Asteroiden innerhalb der Marsbahn:** Die Asteroiden innerhalb der Marsbahn unterteilt man im Wesentlichen in die drei Gruppen Amor-, Apollo- und Aten-Typ, die nach ihren Bahnelementen eingeteilt werden. Diese Asteroiden kreisen nicht wie die überwiegende Mehrheit im Asteroidengürtel um die Sonne, sondern näher in Richtung der Bahnen von Mars und Erde, teilweise auch Venus. Asteroiden vom Amor-Typ kreuzen die Marsbahn in Richtung Erde. Sie werden nach dem Asteroiden (1221) Amor benannt. Asteroiden vom Apollo- und vom Aten-Typ (benannt nach (1862) Apollo und (2062) Aten) sind Erdbahnkreuzer, welche nach ihren Bahnelementen unterschieden werden.
- **Astrologie:** Die Astrologie (griech. *αστρολογία* – wörtlich »die Sternkunde«, nicht zu verwechseln mit Astronomie) ist die systematisch betriebene anthropologisch-mythologische Deutung der Stellung bestimmter Himmelskörper (insbesondere der Planeten des Sonnensystems) und wird auch der Esoterik zugerechnet; aus wissenschaftlicher Sicht wird die Astrologie je nach Herangehensweise zu den Para- oder Pseudowissenschaften gezählt. Sie versucht unter anderem, aus dem Zusammenhang von Geburtsort, Geburtszeitpunkt und Stellung der Himmelskörper, je nach astrologischer Schule, das charakterliche Wesen und/oder das Schicksal eines Menschen abzuleiten.
- **Astronomie:** Die Astronomie (griech. *αστρονομία* – wörtlich »die Gesetzmäßigkeit der Sterne«, aus *άστρο*, *ástro*: »der Stern« und *νόμος*, *nómos*: »das Gesetz«) ist die Wissenschaft von den Gestirnen. Dazu zählen neben den Planeten und Fixsternen auch die Sonne, Sternhaufen, Galaxien, Galaxienhaufen (Cluster), die interstellare Materie und die im Weltall auftretende Strahlung. In die Astronomie gehen die Erkenntnisse zahlreicher anderer Fachgebiete ein.
- **Astronomische Einheit:** Die Astronomische Einheit (AE) ist definiert als 149.597.870.691 Meter und entspricht der großen Halbachse der Erdumlaufbahn (ungefähr der mittlere Abstand der Erde vom Zentrum der Sonne). Entfernungen innerhalb des Sonnensystems werden meist in AE angegeben.
- **Astronomisches Recheninstitut:** Das Astronomische Recheninstitut (ARI) ist ein Forschungsinstitut für Astrometrie und Stelldynamik

des Landes Baden-Württemberg und hat seit 1945 seinen Sitz in Heidelberg. Gleichzeitig ist es die international wichtigste Institution zur Berechnung astronomischer Daten und Dienstleistungen (Ephemeriden von Sternen, Körpern des Sonnensystems, Jahrbücher und astronomisches Fundamentalsystem).

- **Atom:** Das Atom (von griech. *ἄτομος*, *átomos* – »unteilbar«, »[unteilbare] Person«) ist der kleinste chemisch nicht weiter teilbare Baustein der Materie. Atome sind elektrisch neutral, jedoch werden oft auch Ionen unter dem Begriff Atom gefasst. Atome bestehen aus einem Atomkern mit positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen und einer Atomhülle aus negativ geladenen Elektronen.
- **Bahnelement:** Die Bahnelemente beschreiben die Bahn eines Planeten oder Kometen um die Sonne. Die Planetenbewegung wird mit den drei Keplerschen Gesetzen behandelt.
- **Bahngeschwindigkeit:** Die Bahngeschwindigkeit bezeichnet die Geschwindigkeit, die ein Punkt auf einer Kreisbahn besitzt.
- **Bahnneigung:** Die Bahnneigung oder Inklination eines Himmelskörpers ist der Winkel zwischen seiner Bahnebene und einer Referenzebene. Für Letztere wird im Sonnensystem meist die Ebene der Erdbahn (Ekliptik) gewählt, von der die Umlaufbahnen der großen Planeten und des Mondes nur um einige Grad abweichen.
- **Bar:** Das Bar ist in der Physik und Technik eine zulässige (SI-konforme) Einheit für den Druck. Der Name stammt von dem griechischen Wort *báros* = schwer ab. Das Bar wird aus der eigentlichen sehr kleinen Grundeinheit des Drucks, dem Pascal (Pa), definiert, um handlichere Zahlen zu erhalten: $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa}$.
- **Basalt:** Basalt ist ein vulkanisches, meist schwarzes Gestein, das aus einer Mischung von Eisen- und Magnesiumsilikaten mit Olivin und Pyroxen sowie Calcium-reichen Feldspäten (Plagioklas) besteht.
- **Beschleunigung:** Ein frei beweglicher Körper, der eine Krafteinwirkung erfährt und dadurch seine Geschwindigkeit ändert, vollführt eine Beschleunigung. Wenn er sich verlangsamt, spricht man besonders in der Physik von einer Verzögerung oder negativen Beschleunigung.
- **Bezugssystem:** Ein Bezugssystem ist ein Koordinatensystem, in dem die Lage (Position) oder die Bewegung eines Körpers beschrieben wird. Das theoretisch wichtigste System der Physik ist das Inertialsystem, welches frei von jeder Beschleunigung und Drehung ist.
- **Brauner Zwerg:** Ein Brauner Zwerg ist ein kompaktes astronomisches Objekt, das mit einer Masse zwischen 13 und 75 Jupitermassen eine

Sonderstellung zwischen Planeten und Sternen einnimmt. Gleiches gilt für die im Inneren ablaufenden Prozesse. Braune Zwerge sind massereicher als planetare Gasriesen und masseärmer als stellare Rote Zwergsterne.

- **California Institute of Technology:** Das California Institute of Technology, besser bekannt als Caltech, ist in Pasadena, Kalifornien, beheimatet. 1891 wurde es mit nur 31 Studenten gegründet, heute sind es etwa 2.000 Studenten. Mit 283 Professoren und 2.172 Studenten (2003) ist die wissenschaftlich hochproduktive Universität extrem klein. In der Geschichte der Universität haben Angehörige und Ehemalige insgesamt 31 Nobelpreise gewonnen, davon 13 in Physik, 9 in Physiologie oder Medizin, 6 in Chemie sowie 2 in Ökonomie und einen Friedensnobelpreis.
- **Chaostheorie:** Die Chaosforschung ist ein Teilgebiet der Mathematik und Physik und befasst sich im Wesentlichen mit Systemen, deren Dynamik unter bestimmten Bedingungen empfindlich von den Anfangsbedingungen abhängt, so dass ihr Verhalten nicht langfristig vorhersehbar ist. Da diese Dynamik einerseits den physikalischen Gesetzen unterliegt, andererseits aber irregulär erscheint, bezeichnet man sie als deterministisches Chaos.
- **Charge-coupled Device:** Ein Charge-coupled Device (CCD; der englische Begriff bedeutet etwa »ladungsgespeichertes Bauteil«) ist ein lichtempfindliches elektronisches Bauteil zur ortsauflösenden (fein garterten) Messung der Lichtstärke.
- **Deuterium:** Deuterium (von griech. *δεύτερον*: »das Zweite«) ist neben Protium und Tritium ein Isotop des Wasserstoffes. Sein Atomkern wird auch Deuteron genannt. Im Gegensatz zum ^1H Wasserstoff, bei dem der Atomkern aus einem einzigen Proton besteht, besteht der Deuteriumkern aus einem Proton und einem Neutron.
- **Dichte:** Die Dichte, Formelzeichen: ρ (griech.: *rho*), ist eine physikalische Eigenschaft eines Materials. Sie ist über das Verhältnis der Masse m eines Körpers zu seinem Volumen V definiert: $\rho = m/V$.
- **Doppler-Effekt:** Als Doppler-Effekt bezeichnet man die Veränderung der Frequenz von Wellen jeder Art, wenn sich die Quelle und der Beobachter einander nähern oder voneinander entfernen. Nähern sich Beobachter und Quelle einander, so erhöht sich die Frequenz, im umgekehrten Fall verringert sich die Frequenz. Bekanntes Beispiel ist die Tonhöhenänderung des Martinshorns eines Krankenwagens. Solange sich das Fahrzeug nähert, ist der Ton höher, wenn es sich entfernt, wird der Ton tiefer.

- **Drehimpuls:** Der Drehimpuls oder Drall ist eine physikalische Größe, welche die Drehbewegung beschreibt und im alltäglichen Sprachgebrauch Schwung genannt wird. Der Drehimpuls \vec{L} eines aus N Massepunkten bestehenden Systems bezüglich eines Punktes wird definiert durch:

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \vec{p}_i,$$

wobei m_i die Masse, \vec{r}_i der Ortsvektor und \vec{p}_i der Impuls des i -ten Massepunktes ist.

- **Druck (Physik):** Unter dem Druck p (engl. *pressure*) versteht man den Quotienten einer Kraft F (engl. *force*) und der Fläche A (engl. *area*), auf die diese Kraft senkrecht zur Fläche wirkt (entgegen der Flächennormalen). Hieraus ergibt sich die Gleichung $p = F/A$.
- **Eklptik:** Die Eklptik (griech. weibliches Adjektiv *εκλειπτική* [*τροχιά*], *εκλιπτική* [*trochiá*]: »die verdeckende [Umlaufbahn]«, von *έκλειψη*, *έκλψι*: wörtlich »die Überlagerung«, »Verdeckung« oder »Auslöschung«) ist die Projektion der scheinbaren Bahn der Sonne im Verlauf eines Jahres auf die Himmelskugel. Die Eklptik ist ein Großkreis am Himmel, das heißt, sie definiert eine Ebene, in der sowohl der Mittelpunkt der Erde als auch der Mittelpunkt der Sonne liegen. Diese Ebene ist die Bahnebene der Erde und wird auch Eklptikebene oder Eklptikalebene genannt.
- **Elektromagnetische Welle:** Elektromagnetische Wellen sind Schwingungen des elektromagnetischen Feldes, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Sie sind die uns im Alltag neben Wasserwellen und Schallwellen am häufigsten begegnenden Arten von Wellen. Die Wellenlänge bestimmt die Art der elektromagnetischen Welle im elektromagnetischen Spektrum. Im Gegensatz zu Schallwellen handelt es sich bei elektromagnetischen Wellen, wie bei Wasserwellen, um Transversalwellen, das heißt, Ausbreitungsrichtung und Schwingungsrichtung stehen senkrecht zueinander, was am Phänomen der Polarisation bemerkbar wird. Die Schwingungsrichtung des elektrischen und magnetisches Feldes stehen ebenfalls senkrecht aufeinander.
- **Elektromagnetisches Spektrum:** Das elektromagnetische Spektrum beschreibt die verschiedenen Arten elektromagnetischer Wellen, geordnet nach der Wellenlänge. An einem Ende des Spektrums sind Radiowellen, deren Wellenlänge von wenigen Zentimetern bis zu vielen Kilometern reichen. Am anderen Ende des Spektrums sind die sehr kurzwelligigen und damit energiereichen Gammastrahlen, deren Wel-

lenlänge bis in atomare Größenordnungen reicht, dazwischen sind Mikrowellen, Infrarotstrahlung, sichtbares Licht, ultraviolette Strahlung und Röntgenstrahlung. Materie absorbiert und emittiert charakteristische Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums. Man spricht dann bei der Spektralfarbenzerlegung der ausgesandten Strahlung (wie bei einem Regenbogen) von Absorptions- beziehungsweise Emissionsspektren. Aufgrund der charakteristischen Linien lässt sich die chemische Zusammensetzung von weit entfernten Objekten des Universums bestimmen.

- **Elektron:** Elektronen sind negativ geladene Elementarteilchen ohne räumliche Ausdehnung. Ihr Symbol ist e^- . Sie bilden die Elektronenhülle der Atome (und Ionen). Ihre freie Beweglichkeit in Metallen ist die Ursache für die elektrische Leitfähigkeit von metallischen Leitern. Elektronen gehören zu den Leptonen, einer Unterklasse der Fermionen. Deswegen besitzen sie einen Spin von $1/2$. Ihre Antiteilchen sind die Positronen, Symbol e^+ , mit denen sie bis auf ihre elektrische Ladung in allen Eigenschaften übereinstimmen.
- **Ellipse:** Eine Ellipse ist definiert als die Menge aller Punkte P der Zeichenebene, für die die Summe der Abstände zu zwei gegebenen Punkten F_1 und F_2 konstant ist. Die Punkte F_1 und F_2 heißen Brennpunkte.
- **Energie:** Energie ist die Fähigkeit eines Körpers, Arbeit zu verrichten. Der Begriff setzt sich aus den den griechischen Worten $\epsilon\nu =$ in, innen und $\epsilon\rho\rho\nu =$ Werk, Wirken zusammen. Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Sie kann nur von einer Form in die andere umgewandelt werden. Die Summe aller Energien ist somit in einem abgeschlossenen System konstant. Die beiden grundlegenden mechanischen Energieformen sind kinetische und potenzielle Energie. Alle anderen Energieformen sind Erscheinungsformen dieser beiden Energiearten. So ist die thermische Energie ungeordnete kinetische Energie der Atome und Moleküle. Des Weiteren sind Energie E und Masse m äquivalent über die berühmte Formel (c ist die Lichtgeschwindigkeit) $E = m \cdot c^2$
- **ESA:** Die European Space Agency (ESA) ist die europäische Raumfahrtorganisation mit Sitz in Paris, Frankreich. Sie wurde am 30. Mai 1975 zur besseren Koordination der europäischen Raumfahrtaktivitäten gegründet, da der technologische Rückstand in der Raumfahrt gegenüber der UdSSR und den USA auf Grund der immensen Anstrengungen beider Länder Mitte des 20. Jahrhunderts immer größer wurde. Sie hat 17 Mitgliedstaaten und beschäftigte 2004 1.904 Mitarbeiter (2003 – 1.790). Sie ist die Nachfolgeorganisation der ELDO und der ESRO.

- **Exzentrizität:** Die numerische Exzentrizität ist ein Maß für die Abweichung eines Kegelschnittes von der Kreisform. Die Exzentrizität eines Kreises ist 0, einer Ellipse zwischen 0 und 1, einer Parabel 1 und einer Hyperbel größer als 1.
- **Fluchtgeschwindigkeit:** Die Fluchtgeschwindigkeit oder Entweichgeschwindigkeit (auch 2. kosmische Geschwindigkeit) ist die minimale Geschwindigkeit, die ein unbeschleunigtes Objekt benötigt, um das Gravitationsfeld eines Himmelskörpers verlassen zu können.
- **Galaxie:** Als eine Galaxie (griech. *γαλαξίας*, *galaxías* [männlich]: »der milchige [Sternennebel]«, »die Milchstraße«) wird in der Astronomie allgemein eine gravitativ gebundene große Ansammlung von Materie wie Sternen und Sternsystemen, Gasnebeln, Staubwolken und sonstigen Objekten bezeichnet. Unsere Galaxie heißt auch die Galaxis oder die Milchstraße.
- **Gebundene Rotation:** Mit gebundener Rotation bezeichnet man in der Astronomie den speziellen Fall, dass ein Himmelskörper sich während eines Umlaufs um einen anderen Himmelskörper genau einmal um seine eigene Achse dreht. So umläuft der Mond die Erde in gebundener Rotation. Deswegen zeigt er uns immer die gleiche Seite. Auch die meisten anderen Monde im Sonnensystem sind in gebundener Rotation.
- **Gezeiten:** Unter den Gezeiten oder der Tide (niederdeutsch *tiet*: »Zeit«) versteht man den durch die Gravitation des Mondes und der Sonne verursachten Zyklus von Ebbe und Flut. Der Wasserstand, die Höhe der Gezeit, variiert je nach Stellung von Sonne und Mond: Stehen Sonne, Mond und Erde auf einer Geraden wie bei Voll- und Neumond, so addieren sich die Anziehungswirkungen und es kommt zu einer (höheren) Springtide. Stehen Sonne, Mond und Erde in einem rechten Winkel zueinander wie bei Halbmond, so wird die Anziehungskraft des Mondes von der Sonne abgeschwächt und es kommt zur (niedrigeren) Nipptide.
- **Gravitation:** Die Gravitation bezeichnet das Phänomen der gegenseitigen Anziehung von Massen. Sie ist die Ursache der irdischen Schwerkraft oder Erdanziehung, die die Erde auf massive Objekte ausübt. Sie bewirkt damit beispielsweise, dass Gegenstände zu Boden fallen. Die Gravitation bestimmt auch die Bahn der Erde und der anderen Planeten um die Sonne, und sie spielt eine bedeutende Rolle in der Kosmologie. Das Newtonsche Gravitationsgesetz besagt, dass sich die Gravitationskraft F , mit der sich zwei Massen m_1 und m_2 anziehen, proportional zu

den Massen beider Körper und umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes r der Massenschwerpunkte verhält:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- Den Proportionalitätsfaktor G bezeichnet man als Gravitationskonstante, wobei

$$G = (6,6742 \pm 0,0010) \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

- **Große Halbachse:** Die große Halbachse ist der längere der beiden Scheitelabstände vom Mittelpunkt einer Ellipse (eine Hälfte der sogenannten »Hauptachse«, also des größten Ellipsendurchmessers). Sie ist bei einer ungestörten Ellipsenbahn eines Planeten gleichzeitig auch der mittlere Abstand vom Zentralgestirn.
- **Helium:** Helium – der Name stammt vom altgriechischen Wort *ἥλιος* (*hēlios*): »Sonne« – ist ein farbloses, geruchloses, geschmackloses, ungiftiges, einatomiges chemisches Element. Helium gehört zur Gruppe der Edelgase, seine Ordnungszahl ist 2. Helium bleibt bis zu sehr tiefen Temperaturen gasförmig, erst bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt wird es flüssig.
- **Hubble-Weltraumteleskop:** Das Hubble-Weltraumteleskop (oder Hubble Space Telescope, HST; benannt nach dem Astronomen Edwin Hubble) ist ein Weltraumteleskop für sichtbares Licht, Ultraviolett- und Infrarotstrahlung, das die Erde in etwa 589 km Höhe innerhalb von 96 Minuten einmal umkreist. Das HST wurde am 24. April 1990 vom Space Shuttle Discovery auf der Mission STS-31 im Rahmen einer Zusammenarbeit von NASA und ESA ausgesetzt.
- **IAU (Internationale Astronomische Union):** Die Internationale Astronomische Union, gegründet 1919, ist die Vereinigung der nationalen astronomischen Gesellschaften weltweit.
- **Infrarotstrahlung:** Als Infrarotstrahlung (kurz IR-Strahlung) bezeichnet man elektromagnetische Wellen im Spektralbereich zwischen sichtbarem Licht und der langwelligeren Mikrowellenstrahlung. Dies entspricht einem Wellenlängenbereich von etwa 780 nm bis 1 mm.
- **Isotop:** Isotope sind Nuklide mit gleicher Ordnungszahl, aber unterschiedlicher Massenzahl. Isotope stehen am gleichen Ort (griech. *ἴσος* [*iso*]: »gleich«, *τόπος* [*topos*]: »Ort«) im Periodensystem, aber an unterschiedlichem Ort in der Nuklidkarte. Ein Isotop umfasst also Atome

- eines Elements, die sich nur durch die unterschiedliche Anzahl von Neutronen im Atomkern unterscheiden.
- **JAXA:** JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) ist die japanische Raumfahrtagentur. Sie entstand im Oktober 2003 aus ihrer Vorgängerorganisation NASDA (National Space Development Agency) sowie NAL (National Aerospace Laboratory) und ISAS (Institute of Space and Astronautical Science).
 - **Kelvin:** Das Kelvin ist die SI-Basiseinheit der thermodynamischen Temperatur und ihrer Skala, der Kelvin-Skala. Das Kelvin ist (neben dem Grad Celsius) in Deutschland und Österreich die gesetzlich vorgeschriebene Temperatureinheit. Die Kelvin-Skala ist per Definition seit 1968 nicht mehr in Grad unterteilt. Es heißt deshalb nicht mehr »19 Grad Kelvin« (oder »19°K«) sondern einfach nur »19 Kelvin« (19 K). Es wurde nach William Thomson, dem späteren Lord Kelvin benannt. Das Kelvin ist der 273,16te Teil der Temperatur des Schmelzpunktes des Wassers. Kelvin und Grad Celsius haben damit die selbe Einteilung, nur der Nullpunkt der Kelvinskala liegt beim absoluten Temperaturnullpunkt bei -273,16°C.
 - **Keplersche Gesetze:** Die Keplerschen Gesetze beschreiben die Planetenbewegungen um die Sonne. Die drei Keplerschen Gesetze sind:
 - Die Umlaufbahn eines Planeten ist eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
 - Der Radiusvektor überstreicht in gleichen Zeitabschnitten gleiche Flächen.
 - Die dritten Potenzen der großen Halbachsen der Planetenbahnen sind proportional zu den Quadraten der Umlaufzeiten.
 - **Kernfusion:** Kernfusion bezeichnet den Prozess des Verschmelzens zweier Atomkerne zu einem schwereren Kern. Je nachdem, welche Ausgangskerne beteiligt sind und welches Element daraus entsteht, wird bei diesem Prozess Energie freigesetzt oder aufgewendet.
 - **Kohlenstoff:** Kohlenstoff (von lat. *carbo*: »Holzkohle« und lat. *carbonium*: »Kohlenstoff«) ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 6. Im Periodensystem steht er in der 2. Periode und der 14. Gruppe, der Kohlenstoffgruppe. Es kommt in der Natur sowohl in gediegener Form als auch chemisch gebunden vor. Aufgrund seiner besonderen Elektronenkonfiguration (halbgefüllte L-Schale) besitzt es die Fähigkeit zur Bildung von komplexen Molekülen und weist von allen chemischen Elementen die größte Vielfalt an chemischen Verbindungen auf. Kohlenstoffverbindungen bilden die molekulare Grundlage allen irdischen Lebens.
 - **Lagrange-Punkt:** Die Librations- oder Lagrange-Punkte sind die nach Joseph-Louis Lagrange benannten Gleichgewichtspunkte des eingeschränkten Dreikörperproblems der Himmelsmechanik. Er konnte beweisen, dass das im Allgemeinen analytisch (durch exakte vollständige Lösung von Gleichungen) nicht lösbare Dreikörperproblem für einige Spezialfälle des eingeschränkten Dreikörperproblems doch analytisch lösbar ist: Für zwei umeinander kreisende Körper gibt es fünf Gleichgewichtspunkte – die Lagrange-Punkte –, in denen sich ihre Gravitationskraft und die Zentrifugalkraft auf einen dritten Körper mit im Verhältnis zu den anderen beiden verschwindend kleiner Masse aufheben, so dass er in diesen Punkten in Bezug auf die anderen beiden Körper immer denselben Ort einnimmt.
 - **Licht:** Licht ist der Bereich der elektromagnetischen Strahlung, der vom menschlichen Auge wahrgenommen werden kann. Das sind die elektromagnetischen Wellen im Bereich von etwa 380–780 Nanometer (nm) Wellenlänge.
 - **Lichtgeschwindigkeit:** Die Lichtgeschwindigkeit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes und anderer elektromagnetischer Wellen. Sie hat im Vakuum einen Wert von 299.792.458 m/s, also knapp 300.000 km/s oder etwas mehr als eine Milliarde km/h (1.079.252.849 km/h) und trägt als physikalisches Symbol den Buchstaben *c* (lateinisch *celeritas*: »Schnelligkeit«). Die heute angenommene Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit ist eines der grundlegenden physikalischen Prinzipien.
 - **Lichtjahr:** Das Lichtjahr ist eine astronomische Längeneinheit und nicht, wie der Name vermuten lassen könnte, eine Zeiteinheit. Ein Lichtjahr ist die Strecke, die eine elektromagnetische Welle wie das Licht in einem tropischen Jahr im Vakuum zurücklegt. Das sind etwa 9,5 Billionen ($9,5 \cdot 10^{12}$) Kilometer. Analog zum Lichtjahr existieren die Einheiten Lichtsekunde, Lichtminute und Lichtstunde. Das Lichtjahr ist keine gesetzlich gültige Maßeinheit.
 - **LINEAR:** LINEAR (Lincoln Near Earth Asteroid Research, zu Deutsch etwa Lincoln Zentrum zur Erforschung erdnaher Asteroiden) ist ein Projekt des Massachusetts Institute of Technology zur Himmelsüberwachung, mit dem Ziel alle erdnahen Asteroiden vor einer Kollision mit der Erde rechtzeitig zu entdecken (im Idealfall viele Jahre bis Jahrzehnte). Das Projekt wird von der US-Luftwaffe und der US-Raumfahrtbehörde NASA finanziert. Seit Projektbeginn 1996 wurden 211.849 neue Objekte identifiziert, darunter 1622 bestätigte Erdbahnkreuzer (Stand 21. Oktober 2004).

- **Lowell-Observatorium:** Das Lowell-Observatorium (Lowell Observatory) in Flagstaff (Arizona/USA) wurde von Percival Lowell 1894 gegründet, um den Planeten Mars und die von Giovanni Schiaparelli 1877–79 beobachteten Marskanäle (»Canali«) genauer zu untersuchen. Die Sternwarte wurde von den Brüdern Edward und William Henry Pickering geplant – auf trockenem Ödland in 2.210 m Höhe. Sie war seit Beginn mit den jeweils modernsten Instrumenten ausgestattet und hatte 1910 mit 1,1 m das damals weltweit drittgrößte Spiegelteleskop.
- **Materie:** Materie (lat. *materia*: »Stoff«) ist eine allgemeine Bezeichnung für alles Stoffliche, was uns umgibt und aus dem wir selbst bestehen. Im physikalischen Sinne ist Materie alles, was aus Quarks und Leptonen in mehr oder weniger komplexer Struktur aufgebaut ist.
- **Metall:** Metalle sind die größte Gruppe der chemischen Elemente, etwa 80 % der Elemente sind Metalle. Sie sind im Allgemeinen gute elektrische Leiter. Im Periodensystem der Elemente sind sie nicht bestimmten Reihen oder Perioden zugeordnet, vielmehr befinden sie sich links und unterhalb einer Linie vom Bor zum Polonium. Oben rechts befinden sich die Nichtmetalle, dazwischen die Halbmetalle. Abweichend davon bezeichnet man in der Astronomie jedes chemische Element mit einer Ordnungszahl höher als Helium als Metall.
- **Mond:** Ein Mond (auch Trabant oder natürlicher Satellit genannt) ist ein Himmelskörper, der einen Planeten oder einen Planetoiden in einem Sonnensystem umkreist. Der Planet oder Planetoid umkreist gemeinsam mit seinem Mond beziehungsweise seinen Monden das Zentralgestirn des Sonnensystems.
- **Mount Palomar:** Mount Palomar ist ein 1706 Meter hoher Berg etwa 80 Kilometer nordöstlich von San Diego in Kalifornien. Der Gipfel des Berges beherbergt eine Sternwarte, die vor allem durch ihr 5-Meter-Spiegelteleskop bekannt ist, welches von 1947 bis 1975 das größte Fernrohr der Welt war.
- **NASA:** Die National Aeronautics and Space Administration (NASA, gegründet 1958) ist die zivile US-Bundesbehörde für Luft- und Raumfahrt.
- **Opposition:** Von Opposition spricht man in der Astronomie, wenn sich zwei Himmelskörper von der Erde aus betrachtet am Himmel im Winkelabstand von 180 Grad befinden. Im Regelfall interessiert nur die Opposition eines Himmelskörpers zur Sonne, denn in diesem Fall hat der Himmelskörper den geringsten Abstand zur Erde und ist die ganze Nacht über zu sehen, wobei er um Mitternacht am höchsten über dem Horizont steht.
- **Präzession:** Präzession ist allgemein die Lageveränderung der Achse eines rotierenden Kreisel, wenn äußere Kräfte auf ihn einwirken. Im Speziellen ist damit die Präzession der Erdachse gemeint. Die Trägheit der rotierenden Kreiselmasse bewirkt bei »Störungen« durch Krafterwirkung F_1 an der Kreiselachse eine Ausweichbewegung, als ob am Angriffspunkt der Störkraft eine um 90° in Rotationsrichtung »weitergedrehte« Kraft F_2 wirken würde. Setzt man beispielsweise einen Kreisel schräg auf, würde er durch die Schwerkraft umkippen, wenn er nicht rotieren würde. Dieses »Kippmoment« bewirkt bei einem rotierenden Kreisel, dass seine Drehachse aufgrund der Ausweichbewegung eine Bewegung ausführt, die Präzession.
- **Proton:** Das Proton ist ein langlebiges, elektrisch positiv geladenes Elementarteilchen mit dem Formelzeichen p . Protonen bestehen aus zwei u-Quarks und einem d-Quark (Formel uud). Das Proton ist, wie das Neutron, ein Baryon und bildet mit jenen die Bausteine der Atomkerne, die Nukleonen. Die Anzahl der Protonen im Atomkern bestimmt die Ordnungszahl eines Elements und legt dieses somit fest.
- **Radarastronomie:** Die Radarastronomie ist ein Verfahren zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften und bildlichen Darstellung von Himmelskörpern unseres Sonnensystems. Bei dieser Technik werden Mikrowellen von einem großen Radioteleskop oder einem anderen Sender, der fähig ist, starke gebündelte Mikrowellenstrahlen auszusenden, in Richtung des zu untersuchenden Objekts ausgesandt und anschließend mit einem Radioteleskop oder Verbund von Radioteleskopen die reflektierten Mikrowellen, also das Echo, untersucht, ähnlich wie bei einem irdischen Radar-System.
- **Radioteleskop:** Ein Radioteleskop ist ein Messgerät, mit dem astronomische Objekte beobachtet werden, die elektromagnetische Wellen im Spektralbereich der Radiowellen ausstrahlen. Mit einem Radioteleskop betreibt man Radioastronomie.
- **Radiowelle:** Radiowellen sind elektromagnetische Wellen in einem Frequenzbereich (75 kHz bis etwa 10 GHz), der technisch häufig für die drahtlose Übertragung von Sprache, Bildern und anderen Daten zum Beispiel über den Rundfunk verwendet wird. Radiowellen entstehen auch auf natürliche Weise, zum Beispiel in der Milchstraße als 21-cm-Welle des Wasserstoffs. Andere von der Radioastronomie untersuchte Frequenzen stammen von Riesensternen, von Pulsaren oder von »aktiven Galaxien« (Quasaren).

- **Relativitätstheorie:** Die Relativitätstheorie befasst sich mit der Struktur von Raum und Zeit sowie mit dem Wesen der Gravitation. Sie besteht aus zwei maßgeblich von Albert Einstein geschaffenen physikalischen Theorien, der 1905 veröffentlichten speziellen Relativitätstheorie und der 1916 abgeschlossenen allgemeinen Relativitätstheorie. Die spezielle beschreibt das Verhalten von Raum und Zeit aus der Sicht von Beobachtern, die sich relativ zueinander bewegen, und die damit verbundenen Phänomene. Darauf aufbauend führt die allgemeine Relativitätstheorie die Gravitation auf eine Krümmung von Raum und Zeit zurück, die unter anderem durch die beteiligten Massen verursacht wird.
- **Sauerstoff:** Sauerstoff (auch *Oxygenium*; von griech. *oxýs*: »scharf, spitz, sauer« und *genese*: »erzeugen«) ist ein chemisches Element im Periodensystem der Elemente mit dem Symbol O und der Ordnungszahl 8. Das Element Sauerstoff stellt in der Erdhülle mit 49,4 Massenprozent das häufigste, im Weltall das dritthäufigste Element dar. Es ist ein Bestandteil der Luft (etwa 21 Volumenprozent) und in Gewässern gelöst. In der Luft hält sich der relativ reaktionsfreudige Sauerstoff auf Dauer nur wegen der Tatsache, dass die Erde Lebewesen beherbergt, die Sauerstoff produzieren – ansonsten würde er nur in Verbindungen vorkommen. Häufig kommt Sauerstoff in Verbindungen mit anderen Elementen als Oxid vor (zum Beispiel als SiO_2 – Sand oder H_2O – Wasser).
- **Scheinbare Helligkeit:** Die scheinbare Helligkeit gibt an, wie hell ein Himmelskörper für einen Beobachter auf der Erde erscheint. In der Astronomie wird für die scheinbare Helligkeit die Schreibweise $3,^m0$ oder $3,0\text{mag}$ oder $m = 3,0\text{mag}$ benutzt, wobei das kleine hochgestellte m für magnitudo (Größe) steht. Die Magnituden- beziehungsweise Helligkeits-Skala ist logarithmisch. Physikalisch ist die Helligkeitsskala durch die Energie des einfallenden Lichtes definiert. Wenn m die Magnituden und s die gemessenen Lichtströme zweier Sterne sind, gilt für ihren Helligkeitsunterschied: $\Delta m = m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log(s_1 / s_2)$ Als Referenz dieser an sich relativen Skala dient der Stern Vega, dessen Helligkeit mit der Magnitude 0 festgesetzt wird.
- **Siderische Periode:** Die siderische Periode ist die Zeit, die eine vollständige Umdrehung eines Himmelskörpers erfordert. Handelt es sich um eine Rotation um sich selbst, spricht man von einem Tag. Den Umlauf um ein Zentralgestirn nennt man ein Jahr.
- **Silikat:** Ein Silikat ist eine Verbindung von Silizium und Sauerstoff (Si_xO_y), einem oder mehreren Metallen und eventuell auch Hydroxid-Ionen. Mit Silikat bezeichnet man auch die Salze des Siliziums und der Kieselsäuren, wie zum Beispiel Quarz. In der Mineralogie bilden die Silikate oder Silikatminerale eine große Mineralgruppe. Die Erdkruste besteht zu über 90 Prozent, der Erdmantel fast vollständig aus Silikaten. Die häufigsten Silikate in der Erdkruste sind mit 50–60 Volumenprozent die Feldspäte.
- **Silizium:** Silizium (fachspr. *Silicium*; engl. *silicon*) ist ein chemisches Element im Periodensystem der Elemente mit dem Symbol Si und der Ordnungszahl 14. Silizium steht in der 4. Hauptgruppe (Tetrel) des Periodensystems der Elemente und zählt zu den Halbmetallen. Reines, elementares Silizium besitzt eine grau-schwarze Farbe und weist einen typischen metallischen Glanz auf. Etwa 26 Gewichtsprozent der Erdkruste bestehen aus Silizium. Es tritt in der Natur ausschließlich als Oxid auf, und zwar entweder in Form von Siliziumdioxid oder in Form silikatischer Mineralien. So bestehen Sand und Quarz vorwiegend aus Siliziumdioxid.
- **Solar and Heliospheric Observatory:** SOHO steht für »Solar and Heliospheric Observatory« (Sonnen- und Heliosphären-Observatorium) und ist eine Raumsonde beziehungsweise ein Weltraumobservatorium von ESA und NASA.
- **Spektroskopie:** Spektroskopie ist ein Sammelbegriff für eine Klasse experimenteller Verfahren, die untersuchen, wie eine Probe Energie aufnehmen oder abgeben kann. Historisch bezeichnet der Begriff in erster Linie solche Verfahren, die die Absorption oder Emission von Licht untersuchen. Mit Hilfe eines Spektrometers wird dabei ein Lichtspektrum – das ist die Intensität des absorbierten oder ausgestrahlten Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge – gemessen.
- **Spitzer-Weltraumteleskop:** Das Spitzer-Weltraumteleskop (engl. Spitzer Space Telescope, SST), früher auch SIRTf (von englisch Space Infrared Telescope Facility) genannt, ist ein Infrarotteleskop und nach dem Astrophysiker Lyman Spitzer benannt. Das Spitzer-Weltraumteleskop wurde am 25. August 2003 mit einer Delta-II-7920H-Rakete von Cape Canaveral aus gestartet. Es ist neben Hubble Space Telescope, Chandra X-Ray Observatory sowie Compton Gamma Ray Observatory Teil des Great Observatory Programs der NASA.
- **Stern:** Unter einem Stern versteht man einen selbstleuchtenden, aus Plasma bestehenden Himmelskörper, dessen Strahlungsenergie durch

Kernfusion im Sterninneren aufgebracht wird. Aber auch die kompakten Endstadien der Sternentwicklung, wie Neutronensterne und Weiße Zwerge, werden zu den Sternen gezählt, obwohl sie lediglich aufgrund ihrer Restwärme Strahlung abgeben. Der uns nächste und besterforschte Stern ist die Sonne, das Zentrum unseres Sonnensystems. Ohne die Wärmestrahlung der Sonne wäre auf der Erde kein Leben möglich.

- **Stickstoff:** Der Name Stickstoff bezeichnet das chemische Element aus dem Periodensystem der Elemente mit dem Symbol N und der Ordnungszahl 7. Elementar tritt Stickstoff jedoch nur in Form eines kovalenten Homodimers, einer chemischen Verbindung aus zwei Stickstoff-Atomen, auf. Molekularer Stickstoff ist ein Hauptbestandteil der Luft. Stickstoff ist ein zentrales Element im Stickstoffkreislauf der Ökosysteme und wurde, da es in Mineralien relativ selten auftritt, auf der Erdoberfläche und im Wasser fast ausschließlich biotisch angereichert. Das Elementsymbol N leitet sich von der lateinischen Bezeichnung *nitrogenium* (von altgriechisch *νιτρον* »Laugensalz« und altgriechisch *γενος* »Herkunft«) ab. Die deutsche Bezeichnung Stickstoff erinnert daran, dass molekularer Stickstoff Flammen löscht (»erstickt«).
- **Synodische Periode:** Die synodische Periode oder synodische Umlaufzeit (von griech. *synodos*: »Versammlung«) ist die Zeit, die ein Himmelskörper zum Wiedererreichen gleicher Elongation benötigt. Bezugspunkt ist der Winkel Sonne-Erde-Himmelskörper. Ein synodischer Tag beispielsweise ist die Zeit zwischen zwei Sonnenhöchstständen.
- **Teleskop:** Das Wort Teleskop setzt sich zusammen aus den griechischen Wörtern *tele* (fern) und *skopein* (betrachten). Früher war das Wort Teleskop gleichbedeutend mit Fernrohr. Heute bezeichnet man – allgemeiner – damit Instrumente, die elektromagnetische Wellen sammeln und bündeln können um weit entfernte Objekte vergrößert betrachten zu können. Je nach dem Frequenzspektrum beziehungsweise Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung unterscheidet man dabei zwischen:
 - Röntgenteleskopen
 - optischen Teleskopen (Spiegelteleskope, Linsenteleskope)
 - Infrarotteleskopen
 - Radioteleskopen
- **Tesla:** Das Tesla (T) ist eine abgeleitete SI-Einheit für die magnetische Flussdichte oder Induktion. Die Einheit wurde im Jahre 1960 auf der »Conférence General des Poids et Mesures« (CGPM) in Paris nach

Nikola Tesla benannt. $1\text{ T} = 1\text{ V}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = 1\text{ N}/(\text{A}\cdot\text{m}) = 1\text{ Wb}/\text{m}^2 = 1\text{ kg}/(\text{A}\cdot\text{s}^2)$.

- **Titius-Bodesche Reihe:** Die Titius-Bodesche Reihe ist eine empirisch gefundene Regel über die Abstände der Planeten von der Sonne. Nach ihr ist der Abstand d eines Planeten von der Sonne (in Astronomischen Einheiten) $d = 0,4 + 0,3\cdot k$, wobei $k = 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128$; das heißt k ist 0 beziehungsweise eine Zweierpotenz.
 - Zwischen Mars und Jupiter befindet sich kein Planet, dafür aber der Asteroidengürtel.
 - Neptun hat keinen Platz in der Titius-Bodeschen Reihe, stattdessen hat Pluto seinen Platz eingenommen.
- **Umlaufbahn:** Als Umlaufbahn oder Orbit wird die Bahnkurve bezeichnet, auf der sich ein Objekt periodisch um ein anderes (massereiches, zentrales) Objekt bewegt. Die Bahn, die ein künstlicher Satellit oder ein natürlicher Himmelskörper bei Umrundung eines anderen Himmelskörpers beschreibt, hat genähert die Form einer Ellipse.
- **UTC:** Die Koordinierte Weltzeit (UTC) ist die Referenzzeit, von der die Zeiten in den verschiedenen Zeitzonen der Erde abgeleitet werden. Die Abkürzung UTC ist kein Initialwort, die Anfangsbuchstaben passen weder für den französischen Ausdruck »Temps Universel Coordonné« noch für die englischsprachige Variante »Coordinated Universal Time«. Die UTC ist die Nachfolgerin der mittleren Greenwichzeit (GMT). Der UTC wird eine allgemeine Zeitzone zugeordnet, ausgehend vom Null-Meridian, der durch Greenwich verläuft.
- **Wasser:** Wasser ist eine chemische Verbindung aus den Elementen Sauerstoff und Wasserstoff. Die Bezeichnung Wasser wird besonders für den flüssigen Aggregatzustand verwendet, im festen, also gefrorenen Zustand wird es Eis genannt, im gasförmigen Zustand Wasserdampf oder einfach nur Dampf. Das Wort Wasser leitet sich vom althochdeutschen *wazzar*, »das Feuchte, Fließende«, ab. Das indogermanische Wort *wadar* ist bereits im Hethitischen des 3. vorchristlichen Jahrtausends belegt. Auch das altgriechische Wort *hydor* (»Wasser«), von dem sich alle Fremdwörter mit dem Wortbestandteil »-hydr(o)-« ableiten, gehört zu dieser Familie. Wasser hat bei $4^\circ\text{C} - 6^\circ\text{C}$ das kleinste Volumen und die größte Dichte ($0,999972\text{ g}/\text{cm}^3$). Daher dehnt es sich, wenn man von diesem Temperaturbereich ausgeht, sowohl bei Erwärmung als auch bei Abkühlung aus. Die Wasservorkommen der Erde belaufen sich auf etwa 1.386 Millionen km^3 , wovon allein 1.338 Millionen km^3 (96,5%) auf das Salzwasser der Weltmeere entfallen. Nur

48 Millionen km³ (3,5 %) des irdischen Wassers liegen als Süßwasser vor. Außerhalb der Erde kommt ebenfalls Wasser vor – zwar in gigantischen Mengen, dafür aber nur »dünn verteilt«: Entweder als Eis auf anderen Himmelskörpern oder als Wasserdampf. Als Eis wurde Wasser in Kometen (»schmutzige Schneebälle«), auf dem Mars und auf einigen Monden der äußeren Planeten nachgewiesen.

- **Wasserstoff:** Wasserstoff ist das chemische Element mit der Ordnungszahl 1 und wird durch das Elementsymbol H abgekürzt (für lat. *hydrogenium*: »Wassererzeuger«; von altgr. *ὕδωρ*: »Wasser« und *γεννάει*: »erzeugen«). Im Periodensystem steht es in der 1. Periode und der 1. Gruppe, nimmt also den ersten Platz ein. Wasserstoff ist das leichteste und das häufigste chemische Element im Weltall. Es ist Bestandteil des Wassers und aller organischen Verbindungen; insbesondere kommt es in sämtlichen lebenden Organismen vor. Wasserstoff macht 75 % der gesamten Masse beziehungsweise 90 % aller Atome im Universum aus. Sterne bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff-Plasma. In unserem Sonnensystem macht der in der Sonne enthaltene Wasserstoff den überwiegenden Großteil der gesamten Masse aus. Die Kernfusion von Wasserstoff ¹H über die Zwischenstufen Deuterium ²H und Tritium ³H zu Helium ⁴He in Sternen bildet deren Energiequelle.
- **Weißer Zwerg:** Ein Weißer Zwerg ist ein vergleichsweise kleiner Stern und repräsentiert die letzte Entwicklungsphase eines Sterns, der unmittelbar nach Versiegen seines Kernbrennstoffs weniger als 1,44 Sonnenmassen besitzt. Weiße Zwerge haben nur einen Durchmesser von einigen tausend bis etwa zehntausend Kilometern, sind also hinsichtlich der Größen mit der Erde vergleichbar. Die meisten Weißen Zwerge bestehen im Inneren zum größten Teil aus Kohlenstoff und Sauerstoff, die durch Kernfusion entstanden sind. Die Dichte beträgt dabei etwa eine Tonne pro Kubikzentimeter. Unter diesem Druck befindet sich das Gas in einem Zustand, der als entartet bezeichnet wird.
- **Wellenlänge:** Als Wellenlänge, Symbol λ (griech. *Lambda*), wird der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle bezeichnet. Dabei haben zwei Punkte die gleiche Phase, wenn sie sich in gleicher Weise begegnen, das heißt, wenn sie im zeitlichen Ablauf die gleiche Auslenkung und die gleiche Bewegungsrichtung haben. Bei Wasserwellen entspricht die Wellenlänge zum Beispiel dem Abstand zweier benachbarter Wellenberge oder Wellentäler.
- **Weltraumteleskop:** Ein Weltraumteleskop ist ein Teleskop, das sich außerhalb der störenden Erdatmosphäre im Weltraum befindet. Vorteile

des Weltraums für Teleskope sind fehlende Luftunruhe, Zugang zu von der Atmosphäre verschluckten Bereichen elektromagnetischer Strahlung wie Gammastrahlung, Röntgenstrahlung, und Infrarotstrahlung, sowie die Möglichkeit sehr langer Basislinien zum Beispiel in der Radiointerferometrie.

- **Winkel:** Der Winkel ist ein Objekt der Geometrie. Mit einem Winkel kann man messen, wie sich zwei Geraden oder zwei Ebenen schneiden. Ein gebräuchliches Maß, Winkel zu messen, ist der Winkelgrad »°«. 360° entsprechen dabei einem Vollkreis. Der 60. Teil eines Grads wird als Minute oder Bogenminute bezeichnet und mit »'« angegeben, der 60. Teil einer Bogenminute wird als Sekunde oder Bogensekunde bezeichnet und mit »"« angegeben.
- **Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft:** Die Zentripetalkraft ist eine physikalische Kraft, die an einem Körper angreift, der sich auf einer kreisförmigen Bahn bewegt. Sie hält den Körper auf seiner Kreisbahn und ist nach innen zum Kreismittelpunkt beziehungsweise zur Drehachse gerichtet. Bekannter als die Zentripetalkraft ist die Zentrifugalkraft, die auch als Fliehkraft bezeichnet wird. Diese leitet sich vom lateinischen Verb *fugere* (»fliehen«), die Zentripetalkraft von lateinisch *petere* (»ziehen«) her. Beide wirken senkrecht zur Bewegungsrichtung, die Zentrifugalkraft ist jedoch nach außen, vom Mittelpunkt oder der Achse weg (»fliehend«) gerichtet. Die Zentrifugalkraft ist eine Trägheitskraft beziehungsweise Scheinkraft.

Gesamtautorenliste

.x, 217, 24-online, 3247, 4tilden, A0QToF, Abendstrom, Aberhorn, Ablaubauer, Abu el mot, Acf, Achim Raschka, ACK, Adalbert, Advocatus d, Aendes, A-giäu, Aglarech, AHoerstemeier, Ai, Ain-eias, Aka, AkaBot, ALE!, AlephNull, Alexander Grüner, Alexander Nofftz, Alexander.stohr, Alexanderrutz, AlexR, Alien, Alkuin, Allen McC., ALoK, AlphaCentauri, Alvo, Ambrosius, AN, Anaximander, AndiH, Andre Engels, Andreas S., AndreasB, AndreasE, Andrej-schoeke, Andresluure, Andro96, Andrsvoss, Anitagraser, AnjaK, Anka, Antifaschist 666, Anton, Anton J Gamel, Apostate Tutor, APPER, Arbeo, Arcy, ArnoLagrange, Arnomane, ArtMechanic, Artos Mueller, Arty, Asdert, Asdrubal, ASK, AssetBurned, Asteroid7687, Astrofuzzi, AstroGK, Atamari, Atomos, Attallah, Autan, Avatar, AxelKing, Azdak, Azhai, Baddabing, Bahnmoeller, Baldhur, Balû, Banana341, Bananeuizen, Batrox, Baumst, Bdk, Bebe, Belz, Bender235, Benni Bärmann, Benson.by, Bent, Ben-Zin, BerndGehrmann, Bernhard55, Berni2k, Bertonymus, Bierdimpfl, Bigkahuna, Binter, Biobertus, BitterMan, Bjm, BladeRunner99, Blaite, Blaubahn, Blauer elephant, Blizzard, Blubbalsch, BLueFiSH.as, Bluemask, Bobbl, Boehm, Boemmel, Boenj, Bojan, Bota47, Botteler, Bradypus, Breeze, Bricktop1, Briemle, Brion VIBBER, Bronco, Brudersohn, Brummfuss, BS Thurner Hof, BSide, Bsmuc64, Buecherfresser, Buergi, Buschaot, Butcherbird, Buxul, BWBot, Bytee, C.Löser, Caliga, Calined, Calma, Carbenium, Carbidfischer, Carl de, Case-Berlin, Cat, CdaMVv-WgS, Ce, Centic, Chd, ChefSchlumpf, Chobot, Chriki, Chrisfrenzel, Christian Arntzen, Christian H., Christian List, ChristophDemmer, Ciciban, Citylover, Cjlp, Ckeem, Commandercool, ConBot, Concept1, Conny, Conversion script, Coriolan, Corporate world, Cpcgm, Crissov, Crux, CSonic, CuttyP, Cvk, CWitte, CyeZBot, Cymacs, D, DaB., Daboss, Daniel Akhtar, Daniel B, Daniel FR, Danimo, Dannycool, Dapete, Darkone, DaTroll, DavidHansen, Dbach, Dbenzhuser, Deadhead, Denisoliver, Denny, DFK, Dialin-145-254-190-228.arcor-ip.net, Diderot76, Dishayloo, Dittmar-Ilgen, Docmo, Docpi, Dominik, Don Carleone, Dreckige-lache, Dreiundvierzig, DrMurx, Duesen-trieb, Dumbthingy, Dundak, EBB, Ebi, Ebs, ECeDee, Echoray, Eckhart Wörner, Ed.dunkel, Efferfrodidi, Ehrhardt, Eibel, Eike sauer, Eikeschnuppertal, Ekuah, El, El Dirko, Elasto, Ellywa, ElNuevoEinstein, ElRaki, Elwe, Elwood j blues, Elya, Engelsblut, Engywuck, Enirac Sum, Epo, Erath, Erik Streb, ErikDunsing, ErnstA, Erwin E aus U, Esco, EUBürger, Eugen Ettelt, Extrawurst, Ezrimerchant, Falkue, FDE, Fedi, Fgb, Fidi, Filosel, Filzstift, Finanzer, Fire, Fisch1917, FlaBot, Flo-klk, Florian Huber, Florian K, Flups, FotoFux, FPM, Frank Dickert, Fransvannes, Frany, Franz Wikipedia, Franz Xaver, FrederikRamm, Fredstober, Freedomsaver, Freud, Friedemann Lindenthal, Fristu, FritzG, Fruge, Fschoenm, Fubar, FutureCrash, Fuzzy, G, Gabor, Galilea, Gauss, Gbust, Geminus, Generator, Geof, Georg Stenkamp, Geos, Geoz, Gerhard Kemme, German angst, Gero-Brandenburg, Gerrys, Geschichtsfan, GFJ, Glenn, Glggl, GluonBall, GNosis, Golden arms, Grabenstedt, GruppeCN, GSD, Guety, Gum'Mib'Aer, Gunter.krebs, Gurt, Gw.phinware.de, Hadhuy, Haeber, Hafenbar, Hagbard, HAL Neuntausend, Hannes Hirzel, Hansele, HansG, Hans-Peter Scholz, Haplochromis, Harro von Wuff, HarryB, HaSee, Hashar, Hati, HdEATH, Head, Heck, Heute, Heinz Wittenbrink, Heliozentrik, Hella, Helm, Henning.Schröder, Henriette Fiebig, Hen-

rikHolke, Herbert F., Herbye, Herrick, Hesse23, Hhdw, Hi-Lo, Hinrich, Hjard, Hoch auf einem Baum, Hoffmann.th, Hoheit, Hokanomono, Holo-Doc, Horgner, Horst Frank, Hoss, Hostelli, Hubi, HW, Hyperlink73, Hypnotoad, Hytrion, Idler, IGEL, Igelball, Igrim12, Iki, Ilja Lorek, Im-ladros, Immanuel Giel, Inschanöd, Insomnia, Interpretix, Intertorsten, Ishka, Islandius, Iwoelbern, Ixitixel, Izzoo, J budissin, J.e. Jailbird, Jakob stevo, JakobVoss, JannisR, Japan01, Jaques, Jed, JeLuF, Jensflorian, Jensob, Jergen, Jim Panse, Jmsanta, Jofi, Johannes von Salem und Seborga, John, John Doe, John Eff, Joli, Jonasschneider, Joni2, Jörg Knappen, Jörny, Joscha Feth, Josey82, Joslanke, JostJahn, Jphilips, Jpp, Jsgermany, Juesch, Juro, Jvano, Jyp, Kaeng, Kaffianer, Kai11, KAMiKA-ZOW, Karl Gruber, Karl-Henner, Karlscharbert, Karsten88, Kat1100, Kategobot, Katharina, Kaubuk, Kdwnv, Keimzelle, Ken Iso, Kerish, Ketchupfreak88, Kiko2000, Kingruedi, Kira Nerys, Kixx, Kku, Kl833x9, Klausbg, Klingon, Knarf12, Koethnig, Kohl, KokoBot, Kookaburra, Kopoltra, Korrelstar, Korre, Kosebame, Koyaanis Qatsi, Krido, Kris Kaiser, Krtek76, Kseiferlin, Kubi, Kubrick, Kucharek, Kulac, Kuli, Kurmis, Kurt Jansson, Langec, LarynX, LaScriba, Lawa, LaZeR, LC, Lec-tum, Leipnizkeks, Leki, Lentando, Leogfischer, LeonardoRob0t, Leopard, Leuband, Liberatus, Li-Bot, LightWolf, Liquidat, Lley, Loh, Longamp, LordKain, Lothar Kimmeringer, Lotse, LPX-XiL, Luk, Lukey, Lukian, Lutz Terheyden, Lyzzy, Mac, Macador, Madcat, Magnus, Magnus Manske, Majestic6, MAK, Makol, MalteAhrens, Malteser, Malteser.de, Mamue81, Manfred Strumpf, Manu, Man-u, Marc Layer, Marc Tobias Wenzel, Marco Krohn, Margrit, Mariachi, MarianSz, Marilyn.hanson, Mario23, MarioF, Markus Mueller, Markus Schweiß, MarkusHagenlocher, MarkusRede-ker, MarkusZi, Marti7D3, Martin Rasmussen, Martinb, Martin-D1, Martinroell, Martinvogel, Martinwilke1980, Marvel, Masato, Mathias Schindler, Matthäus Wander, MatthiasBauer, Matthi-asKabel, Matze12, Matze6587, Matze6n, Maxim Kammerer, Maxmax, Media lib, Melancholie, Me-teorite-Martin, Mex, MFM, MGla, Mh26, Mhlsi, Miaow Miaow, MIBUKS, Michael Mauch, Mi-chael Schubart, Michael w, MichaelB., MichaelDiederich, MichiK, Miesel, Migra, Mike Krüger, Mikesb, MiKo, Mikue, MilesTeg, Mintleaf, Miriel, Miroslav Stimac, MisterMad, Mkill, Mmg, Mnolf, Modusvivendi, Monalius, Moolsan, Moose, Mostpatiently, MovGP0, Mow-Cow, Mps, Mr. B.B.C., M-sch, MsChaos, Mschindwein, Mu ma, MuDavid, Mumabox, Mundartpoet, Müscha, Mvb, Mw, Mwka, Nachrichtenmonster, Naddy, Nankea, Napa, Nb, Nd, Necrophorus, Necrosausa-ge, Neitram, Nemonand, Neo23, Nephelin, Nepheteser, Nerd, Netslave, Neumeier, NewPapillon, Nicky knows, Nico Düsing, Night Ink, NightOnEarth, Nightwish62, Nikai, Nikolaus, Nils Reich-ardt, Ninjamask, Nobikles, Nobody0815, Nocturne, Nonanet, Nornen3, Norro, Novalin, Nuchber, Obersachse, Ocrho, Odin, OinkOink, Okapi, OliD, Ollinaie, Olorin31k, Onel, Onlineamsel, Opa, Osch, Ottsch, Owltom, Pacifier, Paddy, Palica, Papiermond, PartnerSweeny, Pasinger, Patrick, Paul Ebermann, Pco, Peacemaker, Pearl, Pec-34-202.tnt1.f.uunet.de, Pec-36-43.tnt2.f.uunet.de, Pelz, Pemu, Per aspera ad Astra, Peregrine981, Perrak, Perseus, Peter Kramer, PeterBonn, Peterlustig, Philipendula, Philipweb, Phmarek, Phoenix69, Phrood, Piefke, Pietz, Pikarl, Pik-Asso, Pinguin.tk, Pirat1876, Pischdi, Pit, Pjacobi, Pkn, Plasmagunman, Ploum's, Pluriscient, Pm, Polenta, Popp, Postman Lee, PrimQuackus, Proxima, Prui, Pucktf, PyBot, Pygmalion, Pz, Quo R, Ra'ike, Raimar, Rainer Bielefeld, Ralf5000, Rax, Raymond, Rayx, RCBot, Rdb, Rec, RedBot, Redecke, Rederik,

Redf0x, Reeno, Regiomontanus, Regnaron, Renato Caniatti, Renderman, Reykholt, Rgerhards, Rho, Richi, Rivi, RKraasch, Rob Hooft, Robbot, RobbyBer, RobertLechner, Robo, Robodoc, Robot Monk, RobotE, RobotQuistnix, Roger Zenner, RokerHRO, RolandHagemann, Romankawe, Romanm, Root 42, Rosa Lux, Rs, Rstrauss, Rsuessbr, S, S.K., Sadduk, Saforrest, Saiki, San Jose, Sandy II, Sansculotte, Saperaud, Sascha Claus, Sascha Teske, Saum, Scaevola, Schandi, Schewek, Schlumpf, Schlurcher, Schmittrich, Schnargel, Schubertfreak, Schulzjo, Schusch, Schwalbe, Schweikhardt, Sciurus, Seb1982, Sebastian, Sebastian Wallroth, SebastianBreier, Sebbelbabba, Sechmet, Seefahrt, Severin Heiniger, Shelog, Shiyaki, Shonyu, Shui-Ta, Sicherlich, Sig11, Sigg, Siggibeyer, Sikilai, Silberchen, SilentSurfer, Silvercork, Simplicius, SiriusB, Sjr, Skriptor, Slomox, Smartech, Sodala, Soebe, Solarwerner, Southpark, Sovereign, Spacebirdy, Spawn Avatar, Special, Speck-Made, Spektrum, Spike2050, Spirit84, Spundun, Srbauer, Srittau, Sschuste, Stalefish, StarFighter, Ste ba, Stechlin, Stefan h, Stefan Kühn, Stefan Ruehrup, Steffen, Steffen Löwe Gera, Steffen M., Steinbach, Stephan75, StephanPsy, Stern, Steschke, Stfn, StH, Stoerti, Strangemeister, Studbeefpile, Stw, SuckXez, Suisui, Suitcase, Surfguard, Svdmolen, Sven423, Swgreed, Sys64738, Szs, T. Kwapien, T.a.k., T34, Taprogge, Tarquin, Taube Nuss, TekkenTec, Terabyte, Tfox, The Hawk, TheK, Thire, Thoddi, Thomasgl, Thommess, Thorbojorn, ThorstenS, Threedots, Tigerente, Tilo, Tim, Tim Lehmann, Tim Pritlove, TJakobs, Tkarcher, Toaster76, Togo, Tombu, TomCatX, TomK32, TOMM, Tomparis, TopS, TorPedo, Traitor, Trancos, Traroth, Triebtäter, Troubleshooting, Tscabot, Tsor, T-st, Tsui, Tuchs, Turing, Ty von Sevelingen, Tzzzpf, U.jes, Uli, Ulrich.fuchs, Umaluagr, UncleOwen, Unscheinbar, Unukorno, Urbanus, Uwe W., Uxh, VanGore, VanHelsing, Varus, Venni, Ventrue, Vesta, VGreding, Vina, Vlado, Voyager, Vulture, Walter, W.J.Pilsak, Wa, Waelder, Warp, Webkid, Weiacher Geschichte(n), WeißNix, Welle, Werner Walter, Wfstb, WHell, Wiegand, Wiegels, WiE-Si, Wikiresearcher, Wildzer0, Wing, Wipape, Wiska Bodo, Wissen, W-j-s, Wofl, Wolfgang1018, Wolfgangbeyer, WRomey, Wst, Wuffff, Wuzel, Xantener, XJamRastafire, Xls, Xorx77, Yarin Kaul, Youandme, Yunusbunus, Yurik, YurikBot, Zahnstein, Zaphiro, Zeep, Zellreder, Zenogantner, Zenon, Zhou Yi, Zico, Zinnmann, Zis, Zoph, Zorglub, Zumbo, Zweiblum, Zwobot, Zwoenitzer, -zzz.

GNU Free Documentation License

Version 1.2, November 2002

Copyright (C) 2000,2001,2002 Free Software Foundation, Inc. 59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA

Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed.

0. PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "Document", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "you". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "Modified Version" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "Secondary Section" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "Invariant Sections" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "Cover Texts" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "Transparent" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "Opaque".

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The "Title Page" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.

A section "Entitled XYZ" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "Acknowledgements", "Dedications", "Endorsements", or "History".) To "Preserve the Title" of such a section when you modify the Document means that it remains a section "Entitled XYZ" according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it.

In addition, you must do these things in the Modified Version:

- A. Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- B. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- C. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- D. Preserve all the copyright notices of the Document.
- E. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.
- F. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.
- G. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.
- H. Include an unaltered copy of this License.
- I. Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.
- J. Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.
- K. For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.
- L. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.
- M. Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.
- N. Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.
- O. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties – for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.

ADDENDUM: HOW TO USE THIS LICENSE FOR YOUR DOCUMENTS

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

Copyright (c) YEAR YOUR NAME.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the "with...Texts." line with this:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.

GNU Free Documentation License

Version 1.2, November 2002 (deutsch)

Dies ist eine inoffizielle deutsche Übersetzung der *GNU Free Documentation License*, Version 1.2, November 2002. Sie wird nicht von der Free Software Foundation herausgegeben und erläutert auch nicht die rechtskräftigen Bedingungen für die Verbreitung von Werken, die unter der GNU FDL stehen – dies leistet nur die englischsprachige Originalversion der GNU FDL. Dennoch hoffen wir, dass diese Übersetzung dazu beiträgt, deutschsprachigen Lesern das Verständnis der GNU FDL zu erleichtern.

This is an unofficial translation of the *GNU Free Documentation License*, Version 1.2, November 2002, into German. It is not published by the Free Software Foundation, and does not legally state the distribution terms for documentation that uses the GNU FDL – only the original English text of the GNU FDL does that. However, we hope that this translation will help German speakers understand the GNU FDL better.

0. PRÄAMBEL

Der Zweck dieser *Lizenz* ist es, ein Handbuch, ein Textbuch oder ein anderes nützliches Dokument freizugeben, im Sinne von Freiheit, und jedem die tatsächliche Freiheit zu gewähren, es sowohl kommerziell als auch nicht-kommerziell, mit oder ohne Änderungen zu vervielfältigen und zu verbreiten. Weiterhin ermöglicht diese *Lizenz* dem Autor oder Herausgeber, Anerkennung für seine Arbeit zu bekommen, ohne zugleich für Änderungen durch andere verantwortlich gemacht werden zu können.

Diese *Lizenz* ist eine Art »copyleft«, das heißt, dass Bearbeitungen dieses Dokuments ihrerseits in derselben Weise frei sein müssen. Sie vervollständigt die *GNU General Public License*, die eine »copyleft«-Lizenz für freie Software ist.

Diese *Lizenz* war ursprünglich für Handbücher über freie Software gedacht, denn freie Software braucht eine freie Dokumentation: Zu einem freien Programm sollte es Handbücher geben, die dieselben Freiheiten bieten, die auch die Software selbst bietet. Diese *Lizenz* ist aber nicht auf Handbücher für Software beschränkt; sondern kann auf jede Art von Text angewandt werden, unabhängig vom Thema oder davon, ob er als gedrucktes Buch veröffentlicht wird oder nicht. Wir empfehlen diese *Lizenz* prinzipiell für Werke, die als Anleitungen oder Referenzen dienen sollen.

1. ANWENDBARKEIT UND DEFINITIONEN

Diese *Lizenz* kann auf jedes Handbuch oder jedes andere Werk angewendet werden, in welchem Medium auch immer, sofern es einen Hinweis des Rechteinhabers enthält, der besagt, dass das Werk unter den Bedingungen dieser *Lizenz* verbreitet werden darf. Ein solcher Hinweis gewährt eine weltweit gültige, gebührenfreie und zeitlich unbefristete Lizenz, die es gestattet, das Werk unter den hier festgelegten Bedingungen zu nutzen. Der Begriff »Dokument« wird im Folgenden für ein jedes solches Handbuch oder Werk verwendet. Jede Person kann Lizenznehmer sein und wird im Folgenden mit »Sie« angesprochen. Sie akzeptieren die Lizenz, wenn Sie ein Dokument derart vervielfältigen, verändern oder verbreiten, dass Sie laut geltender Copyright-Gesetze eine Genehmigung dafür benötigen.

Eine »modifizierte Version« des Dokuments ist ein Werk, das das Dokument als Ganzes oder in Teilen enthält, sei es unverändert kopiert, mit Änderungen versehen und/oder in eine andere Sprache übersetzt.

Ein »sekundärer Abschnitt« ist ein eigens genannter Anhang oder ein das Dokument einleitender Abschnitt, der sich ausschließlich mit dem Verhältnis des Autors oder Herausgebers des Dokuments zum eigentlichen Thema des Dokuments (oder damit zusammenhängenden Fragen) beschäftigt und der nichts enthält, das direkt zum eigentlichen Thema gehört. (Wenn das Dokument beispielsweise in Teilen ein Buch über Mathematik ist, dann darf in einem sekundären Abschnitt nichts über Mathematik erklärt werden). Bei dem Verhältnis kann es sich um eine historische Verbindung zum Thema oder damit zusammenhängende Fragen handeln oder um darauf bezogene gesetzliche, gewerbliche, philosophische, ethische oder politische Standpunkte.

»Unveränderliche Abschnitte« sind bestimmte sekundäre Abschnitte, deren Titel in dem Hinweis, dass das Dokument dieser Lizenz unterstellt ist, als unveränderliche Abschnitte bezeichnet werden. Wenn ein Abschnitt nicht unter die oben stehende Definition eines sekundären Abschnitts fällt, dann ist es nicht erlaubt, ihn als unveränderlich zu bezeichnen. Es müssen in einem Dokument keine unveränderlichen Abschnitte vorkommen. Wenn das Dokument keine unveränderlichen Abschnitte festlegt, gibt es keine.

»Umschlagtexte« sind bestimmte kurze Textabschnitte, die als vordere Umschlagtexte oder hintere Umschlagtexte in dem Hinweis aufgelistet sind, der besagt, dass das Dokument dieser Lizenz unterstellt ist. Ein vorderer Umschlagtext darf höchstens fünf Worte enthalten, ein hinterer Umschlagtext höchstens 25 Worte.

Eine »transparente Kopie« des Dokuments ist eine maschinenlesbare Kopie in einem Format, dessen Spezifikation allgemein verfügbar ist. Das heißt, dass sie mit einem gewöhnlichen Texteditor oder (für Bilder, die aus Pixeln bestehen) mit einem gewöhnlichen Bildbearbeitungsprogramm oder (für Zeichnungen) mit einem üblichen Zeichenprogramm auf einfache Weise überarbeitet werden kann und dass sie eine geeignete Eingabe für Textformatierer oder für die automatische Konvertierung in eine Reihe von Formaten darstellt, die sich ihrerseits als Eingabe für Textformatierer eignen. Eine Kopie in ein eigentlich transparentes Dateiformat, dessen Auszeichnungen oder dessen fehlenden Auszeichnungen jedoch so aufgebaut sind, dass spätere Veränderungen durch Leser verhindert oder erschwert werden, heißt nicht transparent. Ein Bildformat ist nicht transparent, wenn es für eine erhebliche Menge Text verwendet wird. Eine Kopie, die nicht »transparent« ist, wird als »opak« bezeichnet.

Beispiele geeigneter Formate für transparente Kopien sind: einfaches ASCII ohne Auszeichnungen, Eingangsformat für Texinfo, Eingangsformat für LaTeX, SGML oder XML mit öffentlich zugänglicher DTD sowie standard-konformes einfaches HTML, Postscript oder PDF, das auf Veränderungen durch Menschen ausgelegt ist. Beispiele für transparente Bildformate sind: PNG, XCF und JPG. Opake Formate sind unter anderen solche proprietären Formate, die nur von proprietären Textverarbeitungsprogrammen gelesen und verarbeitet werden können, SGML oder XML, deren DTD und/oder Verarbeitungswerkzeuge nicht allgemein verfügbar sind, und maschinengeneriertes HTML, PostScript oder PDF, das von irgendeinem Textverarbeitungsprogramm nur zu Ausgabezwecken erzeugt wird.

Mit »*Titelseite*« wird in einem gedruckten Buch die eigentliche Titelseite bezeichnet sowie die darauf folgenden Seiten, die all das in lesbarer Form enthalten sollen, was dieser *Lizenz* gemäß auf der Titelseite erscheinen muss. Für Werke in Formaten, die keine Titelseite als solche haben, ist mit »*Titelseite*« der Text gemeint, der in der Nähe der auffälligsten Abbildung des Werkstitels steht und dem Haupttext vorausgeht.

Ein »*XYZ überschriebener*« Abschnitt ist eine eigens genannte Untereinheit des *Dokuments*, deren Titel entweder genau XYZ ist oder XYZ in Klammern hinter einem Text enthält, der XYZ in eine andere Sprache übersetzt. (Hier steht XYZ für einen bestimmten Abschnittsnamen, siehe weiter unten, etwa »Danksagungen«, »Widmungen«, »Empfehlungen« oder »Historie«.). Den »*Titel*« eines solchen Abschnitts beim Verändern des *Dokuments* zu »*erhalten*«, bedeutet, dass er entsprechend dieser Definition ein »*XYZ überschriebener*« Abschnitt bleibt.

Das *Dokument* kann neben dem Hinweis, der besagt, dass diese *Lizenz* auf das *Dokument* angewendet wird, *Haftungsausschlüsse* enthalten. Diese *Haftungsausschlüsse* werden betrachtet, als seien sie als Hinweise in dieser *Lizenz* enthalten, allerdings nur, um Garantien auszuschließen: Jede anderweitige Folgerung aus diesen *Haftungsausschlüssen* ist ungültig und wirkt sich nicht auf den Sinn dieser *Lizenz* aus.

2. UNVERÄNDERTE KOPIEN

Sie dürfen das *Dokument* in jedem Medium sowohl kommerziell als auch nicht-kommerziell vervielfältigen und verbreiten. Voraussetzung dafür ist, dass diese *Lizenz*, die Copyright-Hinweise sowie der Lizenzhinweis, der besagt, dass diese *Lizenz* auf das *Dokument* anzuwenden ist, in allen Kopien wiedergegeben werden und dass dieser *Lizenz* keine weiteren Bedingungen hinzugefügt werden. Sie dürfen in den Kopien, die Sie erstellen oder verbreiten, keinerlei technische Maßnahmen treffen, um das Lesen oder die spätere Vervielfältigung der Kopien zu erschweren oder zu kontrollieren. Dennoch dürfen Sie Gegenleistungen für Kopien akzeptieren. Wenn Sie eine entsprechend große Anzahl von Kopien vertreiben, müssen Sie zusätzlich die Bestimmungen in Paragraph 3 beachten.

Sie können außerdem unter denselben oben genannten Bedingungen Kopien verleihen und öffentlich wiedergeben.

3. KOPIEN IN STÜCKZAHLEN

Wenn Sie mehr als 100 gedruckte Kopien des *Dokuments* (oder Kopien in Medien, die üblicherweise gedruckte Umschläge haben) veröffentlichen und der Lizenzhinweis des *Dokuments Umschlagtexte* verlangt, müssen die Kopien in Umschlägen verpackt sein, auf denen diese *Umschlagtexte* deutlich zu lesen sind: die *vorderen Umschlagtexte* auf dem vorderen Umschlag, die *hinteren Umschlagtexte* auf dem hinteren Umschlag. Auf beiden Umschlägen müssen Sie außerdem deutlich lesbar als Herausgeber dieser Kopien genannt sein. Der vordere Umschlag muss den gesamten Titel zeigen, wobei alle Worte des Titels gleichermaßen auffällig und sichtbar sein müssen. Sie können den Umschlägen weiteres Material hinzufügen. Kopien, die Änderungen enthalten, die sich nur auf die Umschläge beziehen, können als unveränderte Kopien behandelt werden, so lange der Titel des *Dokuments* erhalten bleibt und diese Bedingungen erfüllt werden.

Wenn die erforderlichen Texte für einen der Umschläge zu umfangreich sind, sollten die ersten Texte auf dem eigentlichen Umschlag stehen (so viele, wie vernünftigerweise darauf passen) und der Rest dann auf den unmittelbar folgenden Seiten.

Wenn Sie mehr als 100 *opake* Kopien des *Dokuments* veröffentlichen oder verbreiten, müssen Sie entweder jeder *opaken* Kopie eine maschinenlesbare, *transparente* Kopie beilegen oder in bzw. mit jeder *opaken* Kopie eine Computer-Netzwerk-Adresse angeben, auf die jeder Netzwerknutzer Zugriff zum Download einer kompletten *transparenten* Kopie des *Dokuments* ohne zusätzliche Materialien über öffentliche Standardnetzwerkprotokolle hat. Wenn Sie sich für letztere Möglichkeit entscheiden, müssen Sie, wenn Sie *opake* Kopien in größerer Stückzahl vertreiben, angemessene Schritte unternehmen, um zu gewährleisten, dass die *transparente* Kopie noch mindestens ein Jahr nach dem Vertrieb der letzten *opaken* Kopie dieser Ausgabe (direkt oder über einen Agenten oder Händler) an der genannten Adresse öffentlich verfügbar bleibt.

Obwohl nicht erforderlich, wird darum gebeten, dass Sie im Vorfeld der Auslieferung einer größeren Stückzahl von Kopien Kontakt mit den Autoren des *Dokuments* aufnehmen, um ihnen die Möglichkeit zu geben, Ihnen eine aktualisierte Version des *Dokuments* zur Verfügung zu stellen.

4. VERÄNDERUNGEN

Unter den oben in den Paragraphen 2 und 3 genannten Bedingungen können Sie eine *modifizierte Version* des *Dokuments* vervielfältigen und verbreiten. Voraussetzung dafür ist, dass Sie die *modifizierte Version* unter exakt dieser *Lizenz* herausgeben, wobei die *modifizierte Version* die Rolle des *Dokuments* übernimmt und damit jedem die weitere Verbreitung und Veränderung der *modifizierten Version* ermöglicht, der eine Kopie davon besitzt. Darüber hinaus müssen Sie die folgenden Punkte in der *modifizierten Version* beachten:

- A. Verwenden Sie auf der *Titelseite* (und auf den Umschlägen, sofern vorhanden) einen Titel, der sich vom Titel des *Dokuments* und von früheren Versionen unterscheidet. (Die früheren Versionen sollten, sofern es welche gibt, im Abschnitt *Historie* des *Dokuments* aufgelistet sein.) Sie können den Titel der vorherigen Version verwenden, wenn der ursprüngliche Herausgeber damit einverstanden ist.
- B. Nennen Sie auf der *Titelseite* als Autoren eine oder mehrere Personen oder Rechtsträger, die für die Urheberschaft der Veränderungen in der *modifizierten Version* verantwortlich sind, zusammen mit mindestens fünf Hauptautoren des *Dokuments* (alle Hauptautoren, wenn es weniger als fünf sind), es sei denn, diese befreien Sie davon.
- C. Nennen Sie auf der *Titelseite* den Namen des Herausgebers der *modifizierten Version* in seiner Funktion als Herausgeber.
- D. Alle Copyright-Hinweise des *Dokuments* müssen erhalten bleiben.
- E. Fügen Sie einen passenden Copyright-Hinweis für Ihre Veränderungen direkt nach den anderen Copyright-Hinweisen hinzu.
- F. Schließen Sie direkt nach den Copyright-Hinweisen einen Lizenzhinweis an, der die Genehmigung erteilt, die *modifizierte Version* unter den Bedingungen dieser *Lizenz* zu nutzen, wie im *Anhang* weiter unten beschrieben.
- G. In diesem Lizenzhinweis müssen die vollständigen Listen der *unveränderlichen Abschnitte* und erforderlichen *Umschlagtexte* erhalten bleiben, die im Lizenzhinweis des *Dokuments* aufgeführt sind.
- H. Fügen Sie eine unveränderte Kopie dieser *Lizenz* ein.

- I. Der Abschnitt »*Historie*« muss erhalten bleiben, ebenso sein *Titel*. Fügen Sie einen Eintrag hinzu, der mindestens den Titel, das Jahr, die neuen Autoren und den Herausgeber der *modifizierten Version* enthält, so wie sie auf der *Titelseite* erscheinen. Sollte es keinen Abschnitt »*Historie*« im *Dokument* geben, erstellen Sie einen, der den Titel, das Jahr, die Autoren und den Herausgeber des *Dokuments* enthält, so wie sie auf der *Titelseite* erscheinen. Fügen Sie einen Punkt hinzu, der die *modifizierte Version* beschreibt, wie im vorherigen Satz erklärt.
- J. Sofern vorhanden, muss die Netzwerkadresse erhalten bleiben, die im *Dokument* als öffentlicher Zugang zu einer *transparenten* Kopie des *Dokuments* angegeben ist, sowie die im *Dokument* angegebenen Netzwerkadressen früherer Versionen, auf denen es basiert. Diese Angaben können im Abschnitt »*Historie*« erscheinen. Sie können eine Netzwerkadresse weglassen, wenn sie sich auf ein Werk bezieht, das mindestens vier Jahre vor dem *Dokument* selbst veröffentlicht wurde, oder wenn der ursprüngliche Herausgeber der *Version*, auf die sie sich bezieht, seine Erlaubnis dazu erteilt.
- K. Für alle mit »Danksagungen« oder »Widmungen« *überschriebenen* Abschnitte muss der Titel erhalten bleiben, ebenso wie der ganze Inhalt und Tonfall aller Danksagungen und/oder Widmungen der beteiligten Mitarbeiter.
- L. Alle *unveränderlichen Abschnitte* des *Dokuments* müssen erhalten bleiben, unverändert in Titel und Wortlaut. Abschnittsnummern oder dergleichen gelten hierbei nicht als Teil des Titels.
- M. Löschen Sie alle mit »Empfehlungen« *überschriebenen* Abschnitte. Ein solcher Abschnitt darf nicht in der *modifizierten Version* enthalten sein.
- N. Benennen Sie keinen vorhandenen Abschnitt in »Empfehlungen« oder in einen Titel um, der mit einem *unveränderlichen Abschnitt* in Widerspruch steht.
- O. Bewahren Sie alle *Haftungsausschlüsse*.

Wenn die *modifizierte Version* neue Vorspannabschnitte oder Anhänge enthält, die als *sekundäre Abschnitte* bezeichnet werden können und kein kopiertes Material aus dem *Dokument* enthalten, können Sie nach Belieben einige oder alle diese Abschnitte als *unveränderliche Abschnitte* kennzeichnen. Fügen Sie dazu Ihre Titel zum Verzeichnis der *unveränderlichen Abschnitte* im Lizenzhinweis der *modifizierten Version* hinzu. Diese Titel müssen sich von allen anderen Abschnittstiteln unterscheiden.

Sie können einen »Empfehlungen« *überschriebenen* Abschnitt hinzufügen, vorausgesetzt, dieser enthält nichts als Empfehlungen Ihrer *modifizierten Version* von verschiedenen Seiten – zum Beispiel Feststellungen aus einem Expertengutachten oder dass der Text von einer Organisation als maßgebliche Definition eines Standards empfohlen wurde.

Sie können einen Absatz mit bis zu fünf Worten als *vorderen Umschlagtext* und bis zu 25 Worten als *hinteren Umschlagtext* an das Ende der Liste mit den *Umschlagtexten* der *modifizierten Version* stellen. Von jedem Rechtsträger (oder auf seine Anordnung hin) darf nur je ein Absatz für den *vorderen* und *hinteren Umschlagtext* hinzugefügt werden. Wenn das *Dokument* bereits einen Umschlagtext für denselben Umschlag enthält, der zuvor von Ihnen oder auf Anordnung des Rechtsträgers, in dessen Namen Sie tätig sind, hinzugefügt wurde, dürfen Sie keinen weiteren hinzufügen. Sie können aber den alten ersetzen, wenn Sie die ausdrückliche Genehmigung des vorherigen Herausgebers haben, der den alten Absatz hinzugefügt hat.

Der/die Autor(en) und Herausgeber des *Dokuments* erteilen durch diese *Lizenz* nicht die Genehmigung, in ihrem Namen irgendeine modifizierte *Version* zu bewerben oder ihnen Billigung dafür zu unterstellen oder daraus herzuleiten.

5. DOKUMENTE VERBINDEN

Sie können das *Dokument* mit anderen Dokumenten verbinden, die unter dieser *Lizenz* freigegeben sind, unter den Bedingungen des Paragraphen 4, siehe oben, für modifizierte Versionen. Die Voraussetzung dafür ist, dass Sie bei dieser Verbindung alle *unveränderlichen Abschnitte* aller Originaldokumente unverändert einfügen, dass Sie diese vollständig als *unveränderliche Abschnitte* Ihres verbundenen Werks im Lizenzhinweis aufführen und dass Sie deren *Haftungsausschlüsse* vollständig bewahren.

Das verbundene Werk braucht nur eine Kopie dieser *Lizenz* zu enthalten, und mehrere identische, *unveränderliche Abschnitte* können durch eine einzige Kopie ersetzt werden. Gibt es mehrere *unveränderliche Abschnitte* mit gleichem Namen, aber verschiedenen Inhalten, so vergeben Sie für jeden solchen Abschnitt einen eindeutigen Titel, indem Sie am Ende, falls bekannt, den Namen des ursprünglichen Autors oder Herausgebers in Klammern hinzufügen oder andernfalls eine eindeutige Nummer anhängen. Verfahren Sie entsprechend mit den Abschnittstiteln im Verzeichnis der *unveränderlichen Abschnitte* im Lizenzhinweis des verbundenen Werks.

Beim Verbinden von Dokumenten müssen Sie jeden mit »*Historie*« *überschriebenen* Abschnitt der verschiedenen Originaldokumente zu einem einzigen »*Historie*« *überschriebenen* Abschnitt verbinden; entsprechend verfahren Sie mit allen Abschnitten, die mit »Danksagungen« und »Widmungen« *überschrieben* sind. Alle mit »Empfehlungen« *überschriebenen* Abschnitte müssen gelöscht werden.

6. SAMMLUNGEN VON DOKUMENTEN

Sie können eine Sammlung von Dokumenten erstellen, die aus dem *Dokument* und weiteren Dokumenten besteht, die unter dieser *Lizenz* freigegeben sind. Hierzu ersetzen Sie die einzelnen Kopien dieser *Lizenz* in den verschiedenen Dokumenten durch eine einzige Kopie, die in der Sammlung enthalten ist, vorausgesetzt, Sie befolgen die Regeln dieser *Lizenz* für unverändertes Kopieren aller Dokumente in jeder anderen Hinsicht.

Sie können ein einzelnes Dokument aus einer solchen Sammlung herauslösen und einzeln unter dieser *Lizenz* verbreiten, vorausgesetzt, Sie fügen eine Kopie dieser *Lizenz* in das herausgelöste Dokument ein, und folgen ansonsten in jeder Hinsicht dieser *Lizenz* in Bezug auf die unveränderte Vervielfältigung des Dokuments.

7. ZUSAMMENLEGUNG MIT UNABHÄNGIGEN WERKEN

Eine Zusammenstellung eines *Dokuments* oder seiner Bearbeitungen mit anderen eigenständigen und unabhängigen Dokumenten oder Werken in oder auf demselben Speicher- oder Verbreitungsmedium wird dann eine »Zusammenlegung« genannt, wenn das aus der Zusammenstellung resultierende Copyright nicht dazu verwendet wird, die Rechte der Benutzer der Zusammenstellung weiter zu beschränken, als es die einzelnen Werke erlauben. Wenn das *Dokument* in eine Zusammenlegung eingebunden ist, so gilt diese *Lizenz* nicht für diejenigen anderen Werke dieser Zusammenlegung, die selber keine Bearbeitung des *Dokuments* sind.

Wenn die Bestimmung für den *Umschlagtext* aus Paragraph 3 auf diese Kopien des *Dokuments* anwendbar ist, dann können, wenn das *Dokument* weniger als die Hälfte der gesamten Zusammenlegung ausmacht, die *Umschlagtexte* des *Dokuments* auf Umschläge gesetzt werden, die das *Dokument* innerhalb der Zusammenlegung umschließen oder auf das elektronische Äquivalent eines Umschlags, sofern das *Dokument* in elektronischer Form vorliegt. Andernfalls müssen sie auf gedruckten Umschlägen erscheinen, die die gesamte Zusammenlegung umschließen.

8. ÜBERSETZUNG

Bei Übersetzungen handelt es sich um eine Art von Veränderung; somit können Sie Übersetzungen des *Dokumentes* unter den Bestimmungen des Paragraphen 4 verbreiten. Um die *unveränderlichen Abschnitte* durch Übersetzungen zu ersetzen, benötigen Sie die spezielle Erlaubnis des Copyright-Inhabers. Sie können jedoch den Originalversionen der *unveränderlichen Abschnitte* Übersetzungen einiger oder aller *unveränderlichen Abschnitte* hinzufügen. Sie können eine Übersetzung dieser *Lizenz* und aller Lizenzhinweise im *Dokument* sowie aller *Haftungsausschlüsse* hinzufügen, vorausgesetzt, dass Sie ebenso die englischsprachige Originalversion dieser *Lizenz* und alle originalsprachigen Versionen dieser Hinweise und Haftungsausschlüsse aufnehmen. Für den Fall von Unstimmigkeiten zwischen der Übersetzung und der Originalversion dieser *Lizenz* oder einem Hinweis oder Haftungsausschluss hat die Originalversion Vorrang.

Ist ein Abschnitt des *Dokuments* mit »Danksagungen«, »Widmungen« oder »Historie« überschrieben, verlangt die Bedingung (Paragraph 4), den *Titel* zu erhalten (Paragraph 1), typischerweise eine Änderung des aktuellen Titels.

9. SCHLUSSBESTIMMUNGEN

Sie dürfen das *Dokument* nicht vervielfältigen, verändern, sublizensieren oder verbreiten, es sei denn, dass Sie es ausdrücklich unter diese *Lizenz* stellen. Jeder andere Versuch, das *Dokument* zu vervielfältigen, zu verändern, zu sublizensieren oder zu verbreiten, ist unzulässig und führt automatisch zum Entzug der durch diese *Lizenz* gewährten Rechte. Dennoch verlieren Parteien, die von Ihnen Kopien oder Rechte erhalten haben, die unter dieser *Lizenz* stehen, nicht ihre Lizenzen, solange sie sich in völliger Übereinstimmung damit befinden.

10. KÜNFTIGE ÜBERARBEITUNGEN DIESER LIZENZ

Die *Free Software Foundation* kann von Zeit zu Zeit neue, überarbeitete Versionen der *GNU Free Documentation License* veröffentlichen. Diese neuen Versionen werden den vorherigen im Geiste entsprechen, können aber in Details abweichen, um neuen Problemen oder Fragestellungen gerecht zu werden. Siehe: <http://www.gnu.org/copyleft/>

Jede Version dieser *Lizenz* bekommt eine eindeutige Versionsnummer. Wenn im *Dokument* steht, dass es dieser *Lizenz* in einer bestimmten Versionsnummer oder in »jeder späteren Version« unterstellt ist, dann haben Sie die Wahl, entweder den Bestimmungen und Konditionen der genannten Version oder denen jeder späteren Version zu folgen, die von der *Free Software Foundation* veröffentlicht wird (nicht als Entwurf). Wenn das *Dokument* keine Versionsnummer dieser *Lizenz* angibt, können Sie zwischen jeder beliebigen Version (nicht als Entwurf) wählen, die von der *Free Software Foundation* veröffentlicht wurde.

ANHANG: WIE SIE DIESE LIZENZ AUF IHRE DOKUMENTE ANWENDEN KÖNNEN

Um diese *Lizenz* auf ein Dokument anzuwenden, das Sie geschrieben haben, fügen Sie Ihrem Dokument eine Kopie der englischsprachigen Originalversion dieser *Lizenz* hinzu und setzen Sie den folgenden Copyright- und Lizenzhinweis gleich hinter die Titelseite:

Copyright (c) YEAR YOUR NAME.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled »GNU Free Documentation License«.

(Auf Deutsch:

Copyright (c) JAHR IHR NAME

Es ist erlaubt, dieses Dokument zu vervielfältigen, zu verbreiten und/oder zu verändern unter den Bedingungen der GNU Free Documentation License, Version 1.2 oder jeder späteren Version, die von der Free Software Foundation veröffentlicht wird; es gibt keine unveränderlichen Abschnitte, keinen vorderen Umschlagtext und keinen hinteren Umschlagtext. Eine Kopie der Lizenz ist unter dem Titel GNU Free Documentation License enthalten.)

Wenn Sie *unveränderliche Abschnitte*, *vordere* und *hintere Umschlagtexte* haben, ersetzen Sie die Zeile: »with... Texts« durch die folgende:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

(Auf Deutsch:

Mit den unveränderlichen Abschnitten, und zwar LISTE DER TITEL, mit den vorderen Umschlagtexten, und zwar LISTE, und den hinteren Umschlagtexten, und zwar LISTE.)

Wenn Sie *unveränderliche Abschnitte* haben, aber keine *Umschlagtexte*, oder irgendeine andere Kombination vorliegt, fassen Sie die beiden Alternativen entsprechend Ihren Anforderungen zusammen.

Wenn Ihr Dokument nicht-triviale Beispiele von Programmcode enthält, empfehlen wir, diese Beispiele parallel unter einer freien Softwarelizenz Ihrer Wahl, beispielsweise der *GNU General Public License* freizugeben, um ihre Verwendung in freier Software zu gestatten.

Quelle: http://wiki.wikipress.de/WikiPress:GFDL_deutsch. Übersetzung: Hugo Giese (<http://www.giese-online.de/gnufdl-de.html>), Thomas Hafki, Nicola Uther.

Bildnachweis

Alle Abbildungen stammen von <http://de.wikipedia.org> oder von <http://commons.wikimedia.org>. Nicht aufgeführte Bilder sind gemeinfrei.

Abb. 3: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Sonnegra.png>, NASA/Fisch
 Abb. 5: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Solar_eclips_1999_4.jpg, Lviatour
 Abb. 6: Namensnennung, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Sunspot-2004.jpeg>, Ralf Weber (www.ralfs-webgalerie.de).
 Abb. 7: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Son-2.jpg>, Birgit Kremer.
 Abb. 10: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Son-3.jpg>, Birgit Kremer.
 Abb. 11: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Sun_projection_with_spotting-scope_large.jpg, SiriusB
 Abb. 13: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Solare_Planeten99.jpg, NASA/Horst Frank.
 Abb. 14: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Aufbau-Erdatmosphäre.png>, Marcelo Reis/Roßbacher
 Abb. 18: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Merkur_schnitt.png, CWitte
 Abb. 19: GFDL, Quelle: http://www.wikiexpress.de/Bild:250px-Mercur_orbit_periheldrehung.png, Christian Kirchoff.
 Abb. 23: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Merkurdurchgang3Mai03.jpg>, Sjr
 Abb. 33: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Venus_structure.jpg, NASA/JPL/Vzb83
 Abb. 34: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Venusorbit.png>, NASA/Rachel Knott/Phrood
 Abb. 38: CC-by-sa-2.5, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Venuskonstellation.png>, Theresa Knott/Phrood
 Abb. 40: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Venustransit_2004-06-08_07-49.jpg, Klingon
 Abb. 41: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Landhalbkugel_gr.png, Stefan Kühn.

Abb. 42: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Wasserhalbkugel.png>, Stefan Kühn.
 Abb. 49: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Erdmagnetfeld.png>, Hubi
 Abb. 52: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Plattentektonik.png>, Pearl
 Abb. 53: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Mond_Phasen.jpg, Horst Frank.
 Abb. 55: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Lunar-eclipse-09-11-2003.jpeg>, Oliver Stein.
 Abb. 56: CC-by-sa-2.0-de, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Mondmagma.png>, Daniel Arnold.
 Abb. 86: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Saturnopositions.jpg>, Tom Ruen.
 Abb. 103: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Vulcanoiden.jpg>, Dr. Herbert Sulzer.
 Abb. 112: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Nam113.jpg>, Frank Dickert.
 Abb. 113: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:NeuschwansteinMeteorite.jpg>, Vesta
 Abb. 114: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Mainbelt_Latituden.png, Rivi.
 Abb. 115: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Mainbelt.png>, Rivi.
 Abb. 116: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:MillbillillieMeteorite.jpg>, Vesta
 Abb. 122: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Kuiperquertel.jpg>, Dr. H. Sulzer.
 Abb. 123: GFDL, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Oortschewolke.jpg>, Dr. H. Sulzer.
 Abb. 133: CC-by-sa-2.0-at, Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Hyakutake.jpg>, E. Kolmhofer, H. Raab.
 Abb. 157: CC-by-sa-2.0-at, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Comet-Hale-Bopp-29-03-1997_hires.jpg, Philipp Salzgeber.
 Abb. 158: GFDL, Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Torino_scale_big.png, Looxix

Index

Symbole

1950 DA 249
 2002 AA₂₉ 287, 289, 290, 292, **293**, 299, 360
 2003 EL₆₁ 309, 315
 2003 UB₃₁₃ 13, 14, 43, 44, 226, 233, 235, 241, 309, 313, 314, **315**, 319, 360
 2003 YN₁₀₇ 287, 292, 299, 360
 2004 FH 249, **251**, 360
 2004 FU₁₆₂ 249, 251
 2005 FY₉ 309, 315
 3753 Cruithne 240, 293, 295

A

Absolute Helligkeit 302, 341, 354, 360, 361
 Absorption 31
 Absorption (Physik) 25, 67, 70, 208, 239
 Achilles **292**
 Achilles (Asteroid) 241, 286, 288, 360
 Adams, John Couch 44, 216
 Afrika 100
 Ägypten 22, 96, 140, 165, 264
 Akkretion 121, 148, 324
 Akkretionsscheibe 190, 320
 Albedo 56, 70, 101, 105, 132, 170, 174, 179, 184, 186, 195, 197, 200, 204, 210, 212, 213, 218, 224, 228, 237, 238, 250, 275, 279, 281, 282, 284, 288, 293, 297, 302, 303, 304, 310, 316, 327, 338, 345, 347, 357, 358, 359, 360, 361, 362
 Albert (Asteroid) 240, 244
 ALH84001 164, 261, 266, **272**
 Alinda (Asteroid) 240
 Aluminium 99, 107, 135, 238, 280, 284
 Amalthea (Mond) 173
 Amateurastronom 34, 165, 313, 338, 349
 Amerika (Kontinent) 100
 Ammoniak 313
 Amor (Asteroid) 240
 Ampere 27, 53
 Annefrank (Asteroid) 237, 244
 Antarktis 100, 101, 133, 141, 181, 261, 262
 Antike 15, 22, 43, 130, 166, 192, 209
 Apollo-Projekt 140, 141, 142, 148, 149, 265
 Apollo (Asteroid) 240
 Apophis **252**
 Apophis (Asteroid) 248, 249, 360
 Apsis (Astronomie) 61, 83, 102, 126, 131, 171, 187, 207, 214, 219, 220, 229, 240, 246, 250, 251, 253, 265, 279, 281, 282, 283, 291, 293, 300, 306, 307, 313, 314, 317, 318, 319, 321, 326, 331, 336, 337, 338, 340, 344, 346, 347, 349, 351, 360, 361, 362
 Aquariden 257, 339
 Äquator 21, 27, 57, 71, 151, 174, 178, 179, 182, 185, 188, 193, 195, 197, 200, 204, 357, 206, 210, 211, 212, 213, 227, 278, 305, 354
 Arecibo-Observatorium 59, 254, 297
 Argon 41, 137, 151, 201
 Ariel **210**
 Ariel (Mond) 14, 183, 209, 211, 217, 358
 Aristarchos von Samos 23, 43
 Arizona 270, 349
 Arrest, Heinrich Luis d' 168, 216, 357
 Artensterben 267, 324
 Asphalt 293, 327
 Asteroid 13, 42, 59, 83, 84, 102, 111, 135, 147, 153, 155, 156, 167, 170, 179, 189, 190, 196, 212, 221, 222, 225, 230, 232, 233, 234, **235**, 242, 245, 247, 249, 250, 251, 252, 255, 257, 261, 267, 268, 272, 274, 275, 278, 280, 283, 288, 290, 291, 292, 293, 305, 306, 310, 312, 313, 314, 320, 326, 330, 339
 Asteroidengürtel 13, 14, 62, 83, 98, 102, 147, 172, 225, 232, 245, 255, 261, **275**, 278, 280, 282, 283, 294, 300, 310, 313, 360, 361
 Asteroiden innerhalb der Marsbahn 14, 250, 252, 277, 293, 299, 360, 361
 Asthenosphäre 101, 108
 Astraea (Asteroid) 235, 236, 244, 283
 Astrologie 22, 96, 97, 166, 173, 192, 217
 Astronomie 44, 46, 47, 64, 96, 140, 156, 163, 169, 190, 191, 209, 211, 220, 225, 227, 229, 233, 235, 236, 237, 244, 247, 248, 278, 281, 311, 312, 315, 319, 337, 341, 343, 345, 348, 349, 351
 Astronomisches Objekt 244, 281
 Astronomisches Recheninstitut 244
 Astronomische Einheit 96, 102, 250, 251, 253, 293, 307, 322, 326, 344, 351, 357, 360, 361, 362
 Astrophysik 22, 147
 Aten (Asteroid) 240, 293, 299
 Äther (Physik) 265, 341
 Atlantischer Ozean 100, 318
 Atmosphäre 40, 46, 47, **48**, 55, 70, 107, 123, 127, 137, 150, 164, 171, 177, 180, 184, 187, 357, 201, 214, 218, 220, 247, 255, 258, 259, 269, 274, 325, 328, 343
 Atom 21, 177, 201
 Äußerer Planet 14, 42, 330
 Australien (Kontinent) 73, 100, 104, 247

B

Babylon 22, 96, 166
 Bahnbestimmung 236, 278, 283, 337, 340, 342, 344, 351
 Bahnelement 243, 307, 311, 326, 342
 Bahngeschwindigkeit 354, 357, 360, 361, 362
 Bahnneigung 84, 220, 291, 307, 325, 338, 340, 342, 344, 357, 358, 359, 360, 361, 362

Bahnstörung 83, 112, 126,
224, 229, 276, 285, 288, 310,
320, 342, 344, 346, 351

Bakterien 105, 164

Barringer-Krater 270

Baryzentrum 62, 82, 221

Bar (Einheit) 180, 357

Basalt 57, 91, 108,
119, 131, 154, 284

Beer, Wilhelm 140, 157

Benennung von Asteroiden
und Kometen **242**,
278, 283, 312, 340, 341

Bernardi, Fabrizio 252, 360

Bezugssystem 287,
289, 291, 296, 301

Bibel 23, 333

Biosphäre 50, 104

Birkeland, Kristian 40, 52

Black Smoker 120, 181

Bode, Johann Elert
44, 209, 278

Bopp, Thomas 349, 362

Brahe, Tycho 86, 157, 325

Brauner Zwerg 21,
45, 47, 234, 324

Breitengrad 67, 206

Bronzezeit 23, 341

Brown, Michael E. 312,
314, 315, 318, 360, 361

Burroughs, Edgar Rice 97, 167

Bush, George W. 142, 161

C

California Institute
of Technology 43,
312, 314, 315, 318

Caloris Planitia 57, 270

Calypso (Mond) 193, 289

Canyon 153, 211, 213

Canyon-Diablo 112, 266

Cassini, Giovanni Domenico
86, 157, 191, 192, 194,
197, 204, 358, 359

Cassini-Huygens 51, 92,
190, 191, 192, 194, 196, 198,
199, 201, 202, 206, 305

Ceres **278**

Ceres (Asteroid) 14, 147,
232, 235, 236, 240, 244,
275, 281, 283, 286, 360

Ceres (Mythologie)
244, 278, 283

Chaostheorie 297, 302

Charge-coupled Device
165, 236, 297, 315

Charon **227**

Charon (Mond) 14, 15,
102, 143, 218, 221, 222,
308, 309, 312, 317, 358

Chemisches Element
17, 181, 238

Chemische Evolution
105, 124

Chemosphäre 50

Chicxulub-Krater 269, 273

Chimborazo 100

Chiron **306**

Chiron (Asteroid) 14,
241, 306, 331, 360

Chondrit 102, 111, 169, 238,
239, 260, 274, 282, 285, 331

Chrom 271, 274

Cyanwasserstoff 201,
205, 328

D

Dawn (Raumsonde)
280, 286

Deep Impact (Sonde)
332, 343, 344

Deimos **169**

Deimos (Mond) 14,
150, 156, 167, 358

Deuterium 47, 102

Dichotomie 100, 152

Dichte (Physik) 36, 40, 46,
48, 60, 99, 107, 109, 130,
144, 170, 187, 195, 200, 204,
210, 211, 212, 213, 228, 250,
279, 284, 303, 304, 354, 357,
358, 359, 360, 361, 362

Differenzierung 280, 284

Dinosaurier 266, 270

Dione **194**

Dione (Mond) 14, 190,
191, 193, 197, 289, 358

Dissoziation 49, 328

Dollfus, Audouin
64, 303, 358

Donati **347**

Donati, Giovanni
Battista 347, 362

Donati (Komet) 336, 362

Doppler-Effekt 29, 45, 298

Drehimpuls 18, 19,
65, 103, 137

Dreikörperproblem
286, 288, 290

Druck (Physik) 18, 48,
71, 107, 151, 218, 354

Dynamo-Effekt 27,
52, 60, 82, 115

E

Edelgas 101

Einschlagkrater 56, 74,
99, 177, 259, 267, **268**

Einstein, Albert 62, 229, 230

Eis 182, 210, 211, 212, 213,
221, 276, 297, 310, 338

Eisen 57, 60, 99, 107, 111,
112, 116, 131, 133, 134,
155, 166, 174, 179, 182,
238, 259, 260, 264, 271,
282, 284, 293, 343

Eisenmeteorit 238, 260, 284

Eisenoxid 108, 150, 321

Eisensulfid 174, 182

Ekliptik 16, 41, 42, 83, 95,
102, 126, 150, 171, 187, 191,
207, 214, 220, 245, 250,
251, 253, 278, 279, 281,
282, 283, 291, 292, 293,
295, 300, 306, 307, 313,
314, 317, 319, 322, 325, 338,
340, 344, 349, 351, 354

Ekman-Schicht 50

Elektrizität 27, 177, 181, 186

Elektromagnetisches
Spektrum 31, 238

Elektromagnetisches
Spektrum 16, 20, 28,
38, 285, 343, 345

Elektromagnetische Welle
24, 25, 32, 38, 49, 70, 71, 72,
117, 201, 206, 239, 293, 328

Elektron 39, 255

Ellipse 42, 62, 102,
150, 157, 176, 219, 231,
289, 291, 319, 325

Ellipsoid 282, 284

Elongation 67, 94

Enceladus (Mond) 123,
183, 193, 195, 197, 203

Encke, Johann Franz 340

Enckescher Komet 245,
332, **340**, 362

Energie 20, 24, 65, 70, 99,
106, 114, 115, 248, 269

England 348

Enstatit-Chondrit 238, 272

Entstehung des Mondes
125, 130, **143**

Erdähnlicher Planet 13, 42,
46, 55, 59, 69, 81, 150, 178

Erdatmosphäre 32, 34, 70,
101, 109, 115, **123**, 128

Erdbahn 293, 294, 299

Erdbahnkreuzer 14, 240,
245, 246, **247**, 248, 251,
252, 285, 293, 296, 299

Erdbeben 108, 111, 115,
118, 131, 247, 251

Erde (Planet) 13, 14, 20, 40,
42, 46, 50, 54, 59, 64, 69,
70, 81, **99**, 106, 112, 123,
125, 143, 150, 173, 175, 179,
183, 184, 201, 213, 220, 222,
231, 240, 247, 251, 258, 261,
267, 272, 279, 284, 287, 289,
290, 292, 293, 294, 299, 300,
318, 319, 325, 334, 336, 338,
342, 347, 349, 351, 357, 359

Erdfigur 106

Erdkern 99, 100,
111, 114, 280

Erdkruste 72, 99, 100,
110, 111, 118, 267, 280

Erdmagnetfeld 52,
60, 108, **112**

Erdmantel 99, 100, 110,
111, 115, 119, 274, 280

Erdoberfläche 109, 123, 268

Erdrotation 107, 137

Erdzeitalter 109

Eros **250**

Erosion 56, 154, 163, 269

Eros (Asteroid) 237, 240, 361

Eruption 195, 197

ESA 33, 66, 93, 160,
199, 202, 337

Ethan 151, 201, 293, 328, 352

Ethin 201, 328

Eureka (Asteroid) 241, 288

Europa 100, 123, **178**

Europa (Mond) 14, 46,
172, 173, 200, 204, 358

Evolution 117

Exobiologie 202, 266

Exoplanet 42, 46, 47, 50

Exosphäre 49, 56, 70, 137

Exzentrizität (Mathematik)
62, 84, 102, 150, 171, 174,
178, 182, 185, 187, 195, 197,
200, 204, 207, 210, 212, 213,
214, 219, 246, 250, 251, 253,
279, 281, 282, 283, 291, 292,
293, 295, 300, 305, 306, 307,
315, 317, 325, 342, 346, 349,
357, 358, 359, 360, 361, 362

F

Fallbeschleunigung
48, 150, 213

Faltengebirge 118, 135

Ferdinand IV. von
Neapel 244, 278

Fernrohr 139, 141, 173,
174, 178, 182, 185,
188, 224, 252, 279

Flagstaff 224

Flare 33, 40

Fluchtgeschwindigkeit 357

Fobos 159, 169

Fossa (Geologie) 132

Fossilien 103, 272

Fotografie 139, 224,
236, 336, 344, 348

Fountain, John W. 303, 304

Frankreich 209, 229

Freiäugig 284, 334, 335, 337,
339, 347, 349, 351, 355

Freie Atmosphäre 50

G

Galaxie 15, 190

Galilei, Galileo 24, 31, 86,
140, 156, 172, 173, 178, 182,
184, 191, 216, 358, 359

Galileischer Mond 172, 173

Galileo (Raumsonde)
51, 92, 174, 176, 182,
186, 193, 237, 343

Galle, Johann Gottfried
44, 216, 217, 229, 357

Ganymed **181**

Ganymed (Mond) 14, 46, 59,
172, 173, 193, 199, 200, 358

Gas 13, 48, 71, 123, 136,
321, 339, 345, 352

Gasriesse 14, 42, 45, 46,
47, 171, 187, 207, 221,
294, 300, 311, 330, 351

Gauß, Carl Friedrich
236, 278, 283

Gebirge 109, 132

Gebirgsbildung 108, 121

Gebundene Rotation 63,
127, 174, 176, 180, 184, 186,
194, 195, 197, 200, 204, 210,
212, 213, 222, 303, 304, 359

Gegenerde **231**

Gemini-Observatorium
315, 317, 318

Geminiden 256, 257

Genesis (Sonde) 33, 39, 41

Geodäsie 117

Geografische
Koordinaten 88

Geoid 99, 106

Geologie 61, 99, 118, 130,
145, 179, 183, 203, 219,
268, 269, 276, 341

Geophysik 109, 113, 118

Geozentrisches Weltbild 43

Gestein 56, 99, 109, 221, 233,
255, 259, 274, 276, 298, 338

Geysir 180, 219

Gezeiten 20, 63, 103,
115, 127, 137, 156, 176,
179, 180, 185, 189, 200,
222, 228, 320, 342

Gletscher 133, 262

Goldstone-Observatorium
59, 87, 352

Golf von Mexiko 79, 273

Gravitation 17, 18, 20, 35,
48, 56, 62, 106, 109, 110,
127, 130, 152, 156, 175, 180,
184, 189, 191, 195, 200, 216,
218, 224, 230, 231, 232,
234, 237, 239, 251, 255, 267,
273, 276, 280, 286, 290,
291, 297, 301, 305, 322, 325,
326, 342, 344, 346, 351

Griechenland 22,
64, 68, 96, 192

Griechische Mythologie 147,
174, 178, 182, 185, 192, 194,
197, 199, 204, 217, 227, 232,
244, 250, 304, 305, 324

Griechische Sprache 42,
48, 123, 255, 281, 325

Grönland 100, 104, 111, 133

Großer Komet **334**, 349, 350

Große Halbachse 82, 102,
126, 342, 357, 360, 361, 362

H

Hale, Alan 349, 362

Hale-Bopp 325, 332, 335,
339, **349**, 351, 362

Hall, Asaph 156, 168,
169, 170, 358, 359

Halley, Edmond 245,
332, 337

Halleyscher Komet 92,
245, 257, 327, 332, 335,
336, **337**, 340, 350, 362

Harding, Karl
Ludwig 282, 361

Hathor (Asteroid) 240

- Hawaii 122, 148, 209, 294, 317
 Heaven's Gate (Sekte) 325, 350
 Hebe (Asteroid) 235, 244
 Helene (Mond) 195, 289
 Heliopause 15, 40
 Helios 22, 232
 Heliozentrisches Weltbild 24, 43, 85
 Helium 17, 21, 39, 41, 47, 124, 133, 137, 171, 187, 201, 208
 Hellas Planitia 154, 155, 270
 Herkunft des irdischen Wassers 267
 Hermes (Asteroid) 240, 298
 Hermes (Mythologie) 64, 68, 231
 Herschel, John 192, 194, 197, 199, 209, 210, 211
 Herschel, Wilhelm 44, 157, 199, 207, 209, 210, 211, 212, 213, 224, 281, 357, 359
 Heterosphäre 50
 Himmelskörper 20, 42, 43, 48, 106, 125, 233, 244, 267, 269, 278, 286, 297, 310, 325, 337, 338
 Himmelsmechanik 24, 221
 Himmelsplatte von Nebr 23, 139
 Hiroshima 253, 342
 Hoba-Meteorit 262, 271
 Holst, Gustav 98, 167
 Homopause 50
 Homosphäre 50
 Hot Spot (Geologie) 122, 177
 Hubble-Weltraumteleskop 65, 177, 180, 184, 207, 222, 279, 284, 312, 316, 318, 352
 Hufeisenumlaufbahn 287, 289, 292, 294, 296, 299, 301
 Huygens, Christiaan 157, 191, 199, 359
 Hyakutake 244, 326, 335, 349, 350, 362
 Hyakutake, Yuji 350, 362
 Hydrothermal 120, 181
 Hygeia 148, 235
- I**
 Iapetus 204
 Iapetus (Mond) 14, 190, 191, 358
 IAU 13, 43, 64, 138, 173, 227, 233, 242, 303, 304, 312, 315, 316, 326
- Icarus (Asteroid) 14, 246
 Ida (Asteroid) 237, 275
 Ilias 156, 288, 292
 Impakt 57, 58, 73, 99, 112, 153, 168, 184, 196, 205, 212, 237, 239, 247, 259, 267, 268, 272, 273, 342
 Impaktkrater 135, 158, 168, 170, 175, 179, 183, 185, 195, 204, 211, 214, 239, 250, 268, 282, 284, 345, 347
 Induktion 52, 115, 177
 Infrarot Astronomical Satellite 282
 Infrarotstrahlung 71, 177, 237, 246, 282, 294, 300
 Innerer Aufbau der Erde 102, 106
 Innerer Planet 13, 14, 42
 Interstellare Materie 15, 30, 35, 40
 Ionisation 49, 177, 201, 206, 328
 Ionosphäre 50, 82, 177
 Ion (Chemie) 53, 255
 Io (Mond) 14, 46, 123, 172, 173, 203, 358
 Isis 96, 139
 Isotop 33, 39, 144, 238, 265, 274, 280, 284
 Italien 244, 347
 Ixion (Asteroid) 14, 309, 312
- J**
 Jahreszeiten 21, 103, 150, 172
 Janus 358
 Janus und Epimetheus 303
 Japan 160, 337
 Jarkowski-Effekt 294, 300
 JAXA 66, 93
 Jet Propulsion Laboratory 158, 294
 Juno 282
 Juno (Asteroid) 14, 235, 236, 240, 244, 278, 283, 361
 Jupiter 171
 Jupiter (Planet) 13, 14, 33, 42, 46, 47, 50, 54, 59, 82, 92, 99, 173, 178, 181, 184, 187, 190, 196, 198, 200, 204, 208, 215, 225, 232, 235, 237, 240, 241, 261, 275, 278, 281, 283, 286, 288, 292, 294, 300, 305, 322, 326, 338, 340, 341, 342, 344, 346, 349, 357, 358, 359
- K**
 Kaidun 169, 262
 Kalender 21, 23, 140
 Kalifornien 341
 Kalium 46, 137
 Kallisto 184
 Kallisto (Mond) 14, 46, 172, 173, 193, 194, 196, 198, 200, 359
 Kanada 294
 Känozoikum 273
 Kenneth Essex Edgeworth 226, 307
 Kepler, Johannes 31, 87, 95, 156, 169, 278, 289, 291, 338
 Keplersche Gesetze 42, 48, 157, 216, 229, 235
 Kernfusion 18, 21, 24, 39, 47
 Kirkwoodlücke 83, 246, 276
 Kleopatra (Asteroid) 244
 Klima 20, 103, 105, 133
 Klimageschichte 105
 Klimazone 262
 Kobalt 271
 Kohlendioxid 17, 49, 70, 71, 101, 124, 151, 164, 186, 201, 345
 Kohlenmonoxid 17, 124, 151, 328, 330, 339, 343
 Kohlenstoff 17, 21, 133, 155, 163, 210, 212, 213, 238, 239, 271, 276, 279, 286, 297, 328
 Kohlenwasserstoffe 201, 339
 Kohlgiger Chondrit 204, 238, 274, 285
 Kollision 119, 246, 267, 288, 342
 Komet 31, 40, 42, 51, 59, 102, 151, 155, 179, 185, 189, 204, 221, 225, 233, 234, 236, 242, 246, 247, 255, 256, 258, 262, 274, 278, 285, 297, 306, 308, 310, 311, 321, 322, 324, 325, 334, 337, 340, 341, 343, 344, 345, 347, 348, 349
 Kometenforschung 325, 348
 Kondensation 18, 187
 Konjunktion (Astronomie) 93
 Kontinent 72, 100, 106, 109
 Kontinentale Erdkruste 109
 Konvektion 26, 49, 71, 114
 Koorbitales Objekt 286, 289, 291, 293, 295, 299, 305
- Kopernikus, Nikolaus 23, 43, 86
 Korona 27, 40, 332, 354
 Kosmische Strahlung 53, 133, 206
 Kosmogonie 81, 145, 338
 Kosmologie 338
 Kowal, Charles Thomas 306, 313, 360
 Krater 135, 198, 219, 303, 304, 341
 Kristallstruktur 260, 313
 Kryovulkanismus 180, 196, 198, 206, 313
 KT-Impakt 266, 268, 273, 334
 Kuiper, Gerard Peter 201, 209, 226, 307, 309
 Kuipergürtel 13, 14, 42, 218, 221, 222, 225, 233, 234, 235, 241, 277, 294, 300, 306, 307, 310, 311, 312, 314, 315, 319, 320, 322, 323, 325, 330, 360, 361
- L**
 Lagrange-Punkt 33, 41, 193, 195, 231, 241, 286, 288, 290
 Larson, Stephen M. 303, 304
 Lassell, William 209, 210, 211, 215, 217, 358, 359
 Lava 57, 78, 136, 155, 177, 183, 206
 Leben 20, 30, 99, 104, 162, 249, 333
 Lebewesen 105, 137
 Legierung 107, 260
 Leitfähigkeit 26, 108
 Leoniden 256, 257, 258, 331
 Levy, David 245, 326, 341, 362
 Librationspunkt 288
 Licht 56, 237
 Lichtgeschwindigkeit 25, 173
 Lichtjahr 15, 44, 317, 322, 324, 351
 Lichtverschmutzung 284
 LINEAR 241, 245, 251, 289, 293, 299, 360
 Lithosphäre 75, 81, 100, 108, 118, 154
 LONEOS 241
 Lowell, Percival 64, 162, 224, 232, 310
 Lowell-Observatorium 224, 233, 310
- Luft 123
 Luftdruck 101
 Lunar Prospector 130, 141
 Lutetia (Asteroid) 244
- M**
 Magma 57, 102, 108, 116, 119, 180
 Magnesium 107, 134, 343
 Magnetfeld 26, 27, 40, 48, 50, 112, 150, 177, 181, 186, 190, 207
 Magnetischer Sturm 51, 54, 114
 Magnetismus 60, 82, 117
 Magnetosphäre 50, 60, 177, 181, 186, 207
 Mariner 41, 56, 65, 88, 89, 158, 169
 Marius, Simon 173, 174, 358, 359
 Marsmeteorit 158, 164, 261, 262, 272
 Mars (Mythologie) 150, 166, 167, 169
 Mars (Planet) 13, 14, 42, 46, 56, 59, 80, 97, 123, 150, 167, 168, 169, 201, 206, 213, 225, 231, 232, 235, 240, 250, 261, 270, 272, 275, 278, 281, 283, 288, 294, 300, 319, 320, 321, 336, 357, 358, 359
 Mars Global Surveyor 151, 154, 160, 163, 169
 Massenaussterben 249, 273
 Materie 267, 341
 Meer 268
 Meeresspiegel 72, 106
 Merkur 54
 Merkurtransit 68
 Merkur (Planet) 13, 36, 42, 46, 50, 69, 71, 74, 82, 84, 86, 93, 122, 150, 181, 182, 14, 186, 194, 196, 198, 199, 200, 229, 231, 241, 245, 262, 270, 338, 340, 347, 351, 357
 Mesopause 49
 Mesosphäre 49, 70
 Mesozoikum 273
 MESSENGER 65, 66, 93
 MESZ 95, 258
 Metall 47, 107, 166, 187, 238, 280, 284, 343
 Meteor 99, 255, 256, 258, 259, 264, 272, 339
- Meteorit 19, 99, 111, 130, 169, 204, 238, 255, 259, 267, 269, 271, 272, 274, 285, 327
 Meteoroid 13, 56, 74, 247, 255, 256, 258, 259, 272
 Meteorstrom 256, 258, 262, 331, 339, 341
 Methan 18, 47, 124, 151, 164, 171, 201, 206, 210, 212, 213, 214, 218, 293, 306, 327, 328, 339, 352
 Mexiko 23, 269
 Mikrometeorit 259, 331
 Mikroorganismus 151, 181
 Milchstraße 15, 20, 354
 Mimas (Mond) 189, 270
 Mineral 99, 111, 238, 280, 285, 345
 Miranda (Mond) 14, 183, 209
 Mittelalter 325, 348
 Mittelzoeanischer Rücken 108, 110, 116, 119
 Molekül 201, 343
 Monat 126, 326, 343, 349
 Mond 14, 15, 46, 50, 56, 69, 74, 99, 100, 109, 115, 125, 143, 158, 168, 170, 174, 175, 176, 183, 186, 189, 194, 195, 196, 197, 198, 200, 204, 210, 212, 213, 222, 228, 231, 232, 233, 237, 262, 269, 270, 275, 289, 294, 300, 303, 304, 313, 357, 359
 Mondmeteorit 141, 262
 Mondphase 94, 127
 Mondtäuschung 34, 138
 Mond (Trabant) 15, 42, 50, 63, 86, 125, 156, 167, 169, 172, 173, 178, 181, 190, 192, 194, 197, 199, 204, 208, 212, 213, 217, 220, 222, 227, 268, 285, 286, 289, 291, 299, 303, 357
 Mount Palomar 224, 306, 315, 318, 341
 Mt. Everest 99
 Mythologie 96, 192, 253
- N**
 Nachthimmel 16, 69, 334
 Namibia 262, 271
 NASA 13, 43, 72, 142, 158, 199, 202, 203, 217, 222, 226, 247, 249, 252, 293, 315, 343, 344, 345

Natrium 107, 177
 Navigation 113, 137
 NEAR 237, 245, 250
 NEAT 241
 Nemesis **324**
 Nemesis (Stern) 234, 330
 Neon 41, 133, 137
 Neptun (Planet) 14, 42,
 43, 47, 186, 190, 207, 208,
 209, **214**, 217, 220, 222,
 229, 232, 241, 277, 288,
 292, 294, 300, 305, 307,
 310, 311, 317, 330, 357,
 359
 Nereid (Mond) 14, 215, 220
 Neuschwanstein **272**
 Newton, Isaac 62, 265,
 348
 New Mexico 251, 267,
 349
 Nickel 60, 107, 111, 238,
 259, 260, 261, 271, 284
 Nil 23, 79, 140
 Nordische Mythologie
 22, 166

O

Oberer Planet 42, 93
 Oberon **213**
 Oberon (Mond) 14,
 209, 210, 211, 359
 Olbers, Heinrich Wilhelm
 236, 280, 283, 361
 Olivin 108, 239, 282, 345
 Olympus Mons 76, 154
 Oortsche Wolke 13, 14,
 15, 16, 234, 309, 310,
 311, 312, 319, 320, 321,
322, 324, 325, 330
 Öpik, Ernst Julius 146, 322
 Opposition (Astronomie)
 93, 165, 250, 279,
 281, 282, 284, 356
 Orcus (Asteroid) 14, 44,
 226, 235, 241, 309, 312,
 313, **314**, 315, 361
 Organische Chemie
 163, 321, 345
 Organische Verbindung
 201, 204, 219
 Orioniden 257, 339
 Ozean 100, 267
 Ozeanboden 72, 119
 Ozeanische Kruste 108, 116
 Ozon 125
 Ozonschicht 50, 328

408

P

Palermo 235, 244
 Palermo Technical Impact
 Hazard Scale 247, 253
 Palisa, Johann 230,
 240, 246, 275, 292
 Pallas **280**
 Pallas (Asteroid) 14,
 148, 235, 236, 240,
 209, **214**, 217, 220, 222,
 244, 275, 283, 361
 Panspermie 272, 333
 Pasadena (Kalifornien)
 312, 314
 Patterson, Clair
 Cameron 112, 266
 Pazifischer Ozean 100, 145
 Pepsosphäre 50
 Periheldrehung 62, 229
 Periodenlänge 323, 324
 Perseiden 256, 257, **258**, 331
 Perseus (Sternbild) 257, 258
 Phaeton **232**
 Phaeton (Asteroid) 246, 257
 Phaeton (Planet) 98, 235
 Pharao 22, 264
 Phobos **167**
 Phobos (Mond) 14, 150,
 156, 169, 262, 359
 Pholus (Asteroid)
 305, 306, 319
 Phosphor 70
 Photosynthese 105, 163
 Physik 35, 40
 Piazzini, Giuseppe 232,
 235, 244, 275, 278, 360
 Pioneer-Venus 41, 90
 Pioneer 11 191, 303
 Planet **42**, 46, 47, 50,
 54, 69, 99, 106, 150, 167,
 169, 171, 173, 187, 192,
 194, 197, 200, 204, 207,
 212, 213, 214, 217, 219, 227,
 229, 231, 232, 235, 246,
 255, 266, 267, 278, 281,
 283, 284, 285, 287, 291,
 293, 303, 308, 310, 315,
 319, 322, 323, 325, 344
 Planeten 98, 167
 Planetesimal 14, 60, 106, 111,
 145, 147, 155, 232, 237, 280,
 284, 308, 312, 320, 322, 330
 Planetologie 46, 55, 265
 Planet X 44, 315, 319, 330
 Plasma (Physik) 24,
 40, 51, 114

Plattentektonik 56,
 76, 82, 101, 108, 116,
118, 132, 145, 155
 Plume 108, 110, 122
 Plutino 13, 14, 221, 233,
 234, 307, 311, 314, 361
 Pluto **219**
 Pluto (Planet) 13, 14, 40,
 42, 59, 84, 102, 143, 150,
 200, 214, 218, 227, 233, 280,
 307, 309, 310, 311, 312, 313,
 314, 315, 321, 357, 358
 Polargebiet 71
 Polarlicht 30, 40, 52
 Polyzyklische Aromatische
 Kohlenwasserstoffe
 266, 345
 Pol (Geographie)
 106, 113, 188
 Pons, Jean-Louis 340, 362
 Pope, Alexander 209
 Prandtl-Schicht 50
 Präsolare Minerale 17,
 255, 265, 329
 Präzession 62, 126, 150
 Protium 102
 Proton 39, 47
 Proton (Rakete) 89, 159
 Protoplanet 61, 102
 Protostern 18, 35
 Pyroxen 108, 239, 282, 293

Q

Quadrantiden 256, 257
 Quaoar 14, 44, 226,
 235, 241, 244, 309, 311,
312, 314, 315, 361
 Quasisatellit 287, **291**,
 297, 299, 301, 342

R

Ra 22, 253
 Ra-Shalom 240
 Rabinowitz, David Lincoln
 315, 318, 360, 361
 Radar 63, 72, 80, 87, 92, 297
 Radarastronomie 237,
 279, 298, 302, 352
 Radiant (Astronomie)
 257, 258
 Radioaktivität 31, 61,
 101, 107, 114, 163,
 238, 280, 284, 313
 Radioteleskop 59, 237, 298
 Radiowelle 32, 40,
 178, 237, 298

Raumfahrt 118, 139
 Raumsonde 32, 41, 56, 127,
 158, 160, 174, 182, 186, 188,
 189, 193, 196, 198, 206, 211,
 212, 213, 214, 219, 231, 234,
 237, 250, 280, 286, 299, 302,
 304, 305, 332, 337, 343, 344
 Raumstation 32
 Regolith 131, 132,
 168, 170, 250, 279
 Relativitätstheorie 24,
 62, 87, 229, 230
 Resonanz (Physik) 30, 63,
 83, 85, 176, 189, 193, 220,
 276, 286, 290, 293, 307, 311
 Retrograd 215, 218
 Rhea **197**
 Rhea (Mond) 14, 190,
 191, 193, 195, 359
 Richterskala 131, 247
 Ries-Ereignis 270
 Rieskrater-Museum 272
 Ringsystem 215
 Roche, Édouard Albert
 145, 168, 189
 Roche-Grenze 145, 189, 342
 Rom 15, 22, 192, 262
 Römische Mythologie 15,
 43, 214, 244, 303, 314
 Roter Riese 35, 265
 Rumpelstilz (Asteroid) 244
 Russland 93, 110, 111

S

Satellitengeodäsie 110
 Satellit (Raumfahrt)
 32, 40, 54, 113
 Saturn **187**
 Saturnringe 83, 200
 Saturn (Planet) 14, 42, 47,
 51, 59, 82, 83, 92, 183, 186,
 192, 194, 197, 199, 204, 209,
 208, 213, 215, 217, 218, 241,
 287, 289, 290, 292, 303,
 306, 350, 357, 358, 359
 Sauerstoff 21, 99, 101,
 107, 123, 151, 163,
 177, 180, 184, 328
 Scheinbare Helligkeit 67,
 94, 194, 196, 198, 224, 245,
 252, 279, 281, 282, 284, 297,
 303, 304, 314, 334, 335, 347,
 350, 352, 354, 356, 358, 359
 Schiaparelli, Giovanni
 64, 157, 331
 Schildvulkan 76, 123

Schröter, Johann Hieronymus
 64, 86, 140, 278
 Schwefel 60, 70, 91, 107, 155,
 175, 177, 181, 271, 343
 Schwefeldioxid 71,
 151, 175, 177, 328
 Schwefelwasserstoff
 124, 328, 343
 Schwerpunkt 221
 Science-Fiction 97, 167, 231
 Sediment 103, 269
 Sedna (Astronomie) 44,
 233, 235, 243, 244,
 309, 311, **318**, 323
 Seismik 30, 57, 100,
 111, 152, 186
 Selene 139, 147
 Selenologie 57, 130
 Shakespeare, William 209
 Shoemaker, Carolyn
 Jean Spellmann 245,
 326, 341, 362
 Shoemaker, Eugene 196,
 245, 326, 341, 362
 Shoemaker-Levy 9 185,
 244, 326, 332, **341**, 362
 Siderisches Jahr 102,
 293, 294, 299, 300
 Siderische Periode 126,
 299, 357, 360, 361, 362
 Silikat 18, 46, 60, 99, 107,
 108, 111, 174, 177, 178, 182,
 186, 193, 195, 197, 200,
 204, 210, 212, 213, 218, 238,
 239, 250, 259, 275, 280,
 282, 293, 297, 327, 345
 Silizium 17, 99, 107, 133, 343
 Sizilien 235, 244
 Solar and Heliospheric
 Observatory 26, 33, 41, 332
 Sommernachtstraum
 209, 212, 213
 Sonne **20**, 313
 Sonnenfinsternis 21, 26,
 27, 68, 103, 129, 229
 Sonnenlicht 20, 26,
 56, 70, 71, 220, 339
 Sonnenmasse 20,
 279, 281, 284
 Sonnenscheibe 68, 94
 Sonnensystem **13**, 313
 Sonnensystem in
 Zahlen **354**
 Sonnenwind 15, 18, 27, 30, 33,
39, 51, 56, 113, 124, 133, 137,
 146, 151, 177, 201, 328, 329

Sowjetunion 141,
 142, 147, 158, 337
 Spektroskopie 28, 50, 181,
 201, 220, 282, 285, 317
 Spitzer-Weltraumteleskop
 316, 318
 Stardust (Sonde) 237,
 331, 345, 346
 Staub 13, 71, 133, 338, 339, 345
 Steinmeteorit 238, 239,
 260, 268, 274, 282
 Stern 13, 15, 20, 42, 43,
 47, 86, 126, 128, 190,
 216, 320, 322, 324, 334
 Sternbedeckung 281, 283
 Sternbild 16, 235, 252, 258
 Sternwarte 250, 278, 337
 Stern von Betlehem 333, 337
 Stickstoff 70, 101, 123,
 124, 133, 151, 201,
 213, 218, 228, 328
 Stoffwechsel 104, 163
 Stonehenge 23, 30, 139
 Stratopause 49
 Stratosphäre 49
 Strom, Robert G. 58, 75
 Subduktion 109, 119
 Sublimation (Physik) 151,
 201, 297, 306, 317, 328
 Südamerika 72
 Südpol-Aitken-
 Becken 135, 270
 Sumerer 22, 139
 Supernova 17, 265
 Süßwasser 280
 Swift, Jonathan 156, 171
 Swift-Tuttle 257, 258
 Swing-By 33, 92
 Synodische Periode 95,
 126, 165, 279, 283

T

Tauriden 257, 341
 Tektonik 100, 176,
 183, 186, 206
 Teleskop 17, 26, 31, 32, 33, 34,
 45, 65, 67, 94, 151, 165, 174,
 178, 182, 185, 191, 194, 196,
 198, 204, 209, 214, 224, 229,
 235, 247, 279, 281, 282, 288,
 315, 318, 334, 341, 349, 352
 Telesto (Mond) 193, 289
 Tempel, Ernst Wilhelm
 Leberecht 343, 362
 Tempel-Tuttle 257, 258
 Tempel 1 332, **343**, 362

409

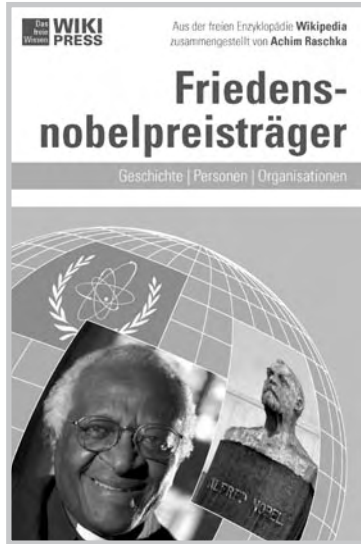
Anhang

- Terrestrischer Planet 234, 280, 284
Tertiär (Geologie) 268, 273
Tethys **192**
Tethys (Mond) 14, 190, 191, 195, 197, 213, 289, 359
Theia 76, 147
Thermosphäre 49, 70
Tholen, David J. 252, 360
Tiefsee 181
Titania **212**
Titania (Mond) 14, 209, 210, 211, 359
Titan (Element) 57, **199**
Titan (Mond) 14, 46, 59, 71, 181, 186, 190, 191, 192, 195, 359
Titan (Mythologie) 192, 194, 197, 199, 204
Titius, Johann
 Daniel 232, 235
Titius-Bodesche Reihe 209, 232, 235, 240, 275, 278, 281
Tombaugh, Clyde W. 44, 224, 233, 357
Torinoskala 248, 253, 254
Transneptunisches Objekt 14, 42, 102, 221, 224, 225, 233, 234, 241, 277, 288, 307, 309, **310**, 312, 314, 315, 316, 318, 319, 330, 339, 361
Transpluto 44, 224, 226, **232**, 310, 311
Treibhauseffekt 71, 101
Triton **217**
Triton (Mond) 14, 46, 186, 200, 215, 220, 359
Trojaner **288**
Trojaner (Astronomie) 241, 277, 286, 290, 292, 360
Tropopause 49
Troposphäre 49, 70
Trujillo, Chad 312, 314, 315, 318, 360, 361
Tsunami 268, 270
Tucker, Roy 252, 360
Tunguska-Ereignis 252, 253, 263
- U**
Ulysses (Sonde) 33, 41, 51, 352
Umbriel **211**
Umbriel (Mond) 14, 209, 210, 217, 359
- Umlaufbahn 42, 45, 69, 158, 216, 219, 231, 233, 234, 242, 245, 272, 279, 281, 282, 283, 286, 357, 289, 299, 300, 310, 311, 340, 346, 347, 349, 351
Umlaufzeit 311, 337, 338, 346
Universum 56
Unterer Planet 42, 69
Untere Konjunktion 68, 93
Uran 46, 114
Uran-Blei-Datierung 112, 266
Uranos (Gott) 197, 209
Uranus (Planet) 14, 42, 47, 82, 84, 183, 190, **207**, 212, 213, 214, 215, 216, 218, 217, 224, 229, 232, 241, 278, 281, 292, 306, 310, 313, 338, 357, 358, 359
Uratmosphäre 124
Urozean 107
USA 141, 142, 247, 251, 267, 270, 312, 314, 348
UTC 251, 258
- V**
Vakuum 25, 55
Valles Marineris 153, 213
Varuna (Asteroid) 14, 241, 244, 309, 311
VeGa 41, 91, 338
Venustransit 87
Venus (Planet) 13, 14, 36, 41, 42, 46, 50, 59, 64, **69**, 122, 156, 201, 231, 240, 270, 320, 338, 347, 357
Verrier, Urbain Le 44, 62, 216, 229
Verwerfung (Geologie) 58, 183, 186
Verwitterung 262, 268
Vesta **283**
Vesta (Asteroid) 14, 148, 235, 236, 238, 240, 244, 275, 279, 281, 361
Vier-Elemente-Lehre 166, 173
Viking 159, 163, 169
Viskosität 177
Vollmond 127, 128, 139, 220, 349
Voyager 1 41, 172, 175, 180, 192, 199, 201, 303, 304, 305
Voyager 2 40, 175, 189, 191, 192, 204, 209, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 219
- Vulkan 154, **229**
Vulkanismus 56, 108, 110, 118, 124, 151, 173, 205, 219, 274
Vulkanoiden 14, 230, 241, **245**, 277
Vulkan (Planet) 62, 246
- W**
Walker, Richard
 L. 303, 304, 358
Wasser 17, 47, 56, 101, 102, 122, 136, 151, 174, 179, 201, 268, 280, 285, 305, 327, 328, 330, 339, 343, 345
Wasserdampf 71, 101, 124
Wassereis 179, 185, 193, 195, 197, 204, 218, 228, 280, 313, 345
Wasserstoff 16, 17, 21, 47, 124, 133, 137, 171, 180, 184, 187, 208, 328
Weißer Zwerg 35, 104
Wellenlänge 25, 71, 298
Weltraumteleskop 234, 246
Wetter 101, 352
Whipple, Fred 225, 328
Wild, Paul 345, 362
Wild 2 332, **345**, 362
Winkel (Geometrie) 62, 94, 165, 229, 252, 281, 282, 283, 295, 306, 335, 342, 344, 348, 350, 358, 359, 360, 361, 362
Witt, Gustav 250, 361
Wolf, Max 240, 288, 292, 360
Wolke 70, 152, 187
- Y**
Yucatán (Halbinsel) 269, 273
- Z**
Zach, Franz Xaver
 von 235, 278
Zenit 63, 126, 138
Zenithal Hourly Rate 257, 258
Zentauren **305**
Zentauren (Astronomie) 14, 241, 306, 310, 319, 331, 360
Zentralberg 269, 284
Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft 18, 99, 106, 222, 240, 298
Zeus 174, 178, 182, 185
Zodiaklicht 289
Zugvogel 118, 137

Friedensnobelpreisträger

Dieses Buch über sämtliche Friedensnobelpreisträger seit 1901 liest sich wie eine Geschichte der Konflikte und Krisen des 20. und 21. Jahrhunderts. Martin Luther Kings riskanter Kampf gegen den Rassismus, Willy Brandts mutiges Eintreten für eine entspannte Ostpolitik oder amnesty internationals anhaltendes Engagement für die Einhaltung der Menschenrechte: Die Geschichte des Friedensnobelpreises ist reich an Beispielen interessanter Biographien und Hintergrundberichte im Spannungsfeld der großen globalen Themen der Zeitgeschichte.

Friedensnobelpreisträger
Geschichte, Personen, Organisationen
WikiPress 10
ISBN 3-86640-010-1
9,90 €



DTP professionell

Wie gestalte ich eine Seite? Welche Satzprogramme gibt es auf dem Markt? Wie erstelle ich ein druckfähiges PDF, und welche Möglichkeiten bieten XML-basierte Druckvorlagen?

Dieses Handbuch bietet konzentrierte, aktuelle Informationen für alle, die sich beruflich oder im Rahmen einer Ausbildung mit den Themen Desktop Publishing, Bildbearbeitung, Farbmanagement und Druckvorstufe beschäftigen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf modernen Techniken, geltenden Standards (Normen) und den Entwicklungen in naher Zukunft, wie der automatisierten Erstellung von Druckvorlagen mit XML.

DTP professionell
Grundlagen, Standards, Perspektiven
WikiPress 9
ISBN 3-86640-009-8
9,90 €



Robben

Robben bestechen durch ihr niedliches Aussehen und wecken den Beschützerinstinkt des Menschen, außerdem sind sie aufgrund ihrer Lebensweise im Meer geheimnisvoll und spannend. Auf der einen Seite wurden die Tiere in den vergangenen Jahrhunderten grausam gejagt, auf der anderen stellen einige Arten selbst gefährliche Jäger dar, deren Opfer vor allem Pinguine sind. Wie die 33 verschiedenen Robbenarten aussehen, wie sie sich ernähren und fortpflanzen und wo sie vorkommen, wird in diesem Buch umfassend und kenntnisreich beschrieben.

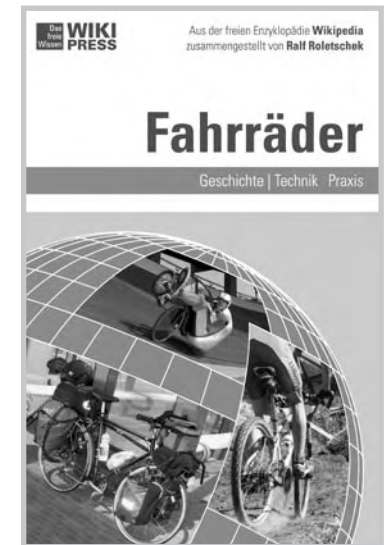
Robben
Verbreitung, Lebensweise, Artenschutz
WikiPress 5
ISBN 3-86640-005-5
8,90 €



Fahrräder

Für viele Menschen ist das Fahrrad ein Alltagsgegenstand, den sie wie selbstverständlich benutzen. Spätestens jedoch, wenn irgendetwas nicht funktioniert, macht man sich Gedanken über die Funktionsweise der Teile. Dieses Buch ist keine Reparaturanleitung, sondern erklärt die vielfältigen Fahrradtypen sowie den Aufbau von Schaltungen, Bremsen und Beleuchtungen. Auf das wichtigste Zubehör – von der Packtasche bis zur Luftpumpe – wird ebenso eingegangen wie auf Fahrradwerkzeug und die passende Bekleidung. Doch nicht nur die Technik wird dem Leser leicht verständlich näher gebracht, er findet auch Tipps zu Radtouren quer durch ganz Deutschland.

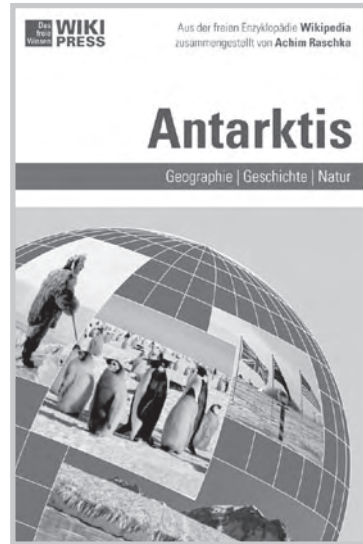
Fahrräder
Technik, Typen, Praxis
WikiPress 8
ISBN 3-86640-008-X
8,90 €



Antarktis

Bereits lange vor der Entdeckung der Antarktis im Jahre 1820 gab es Theorien über einen unbekanntenen und geheimnisvollen Südkontinent namens »Terra australis«, wo paradiesische Zustände herrschen sollten. Mit der Erforschung wurde diese Vorstellung jedoch durch eine eisige und unwirtliche Realität ersetzt, die sich lebensfeindlicher und unbequemer als alle bislang bekannten Regionen der Welt präsentierte. Das Buch berichtet über diesen Lebensraum, seine Bewohner und die Menschen, die sich der Herausforderung Antarktis stellen. Es bietet gleichermaßen spannende und faszinierende Fakten über den sechsten und unbekanntesten Kontinent der Erde.

Antarktis
Geographie, Geschichte, Natur
WikiPress 4
ISBN 3-86640-004-7
9,90 €



Computersicherheit

Loveletter, MyDoom, W32.Blaster – Wer hat nicht bereits davon gehört. Das Buch beschreibt die unterschiedlichen Typen an Computer-Malware, die zur Zeit im Umlauf sind. Neben Viren, Würmern und Trojanern wird auch auf Hoax- und Massenmails sowie auf Phishing-Versuche dreister Abzocker eingegangen. Es wird beschrieben, wie die Programme funktionieren, welchen Schaden sie anrichten und wie man sich effektiv dagegen schützen kann. Alles in allem eine gut verständliche aktuelle und praktisch orientierte Einführung in die Computersicherheit für den normalen Anwender.

Computersicherheit
Technik, Verbreitung, Schutz
WikiPress 7
ISBN 3-86640-007-1
7,90 €



Wikipedia – Das Buch
Mit der DVD-ROM Wikipedia 2005/2006
WikiPress 1
272 Seiten + 1 DVD-ROM
ISBN 3-86640-001-2
9,90 €

»Lies kritisch!« – »Sei mutig!« –
»Mach mit!«: Wikipedia ist und bleibt faszinierend! Dieses Buch ist das erste vollständige Handbuch über die rasant wachsende, freie Online-Enzyklopädie. Es informiert ausführlich über die Hintergründe und enthält einen umfassenden Referenzteil. Alle Texte wurden von erfahrenen Wikipedianern zusammengestellt und zeigen auch Neulingen den Weg in eine neue enzyklopädische Ära. »Wikipedia – das Buch« gibt somit auch einen Anreiz, sich in dem offenen Projekt zu engagieren.

Farbtafeln

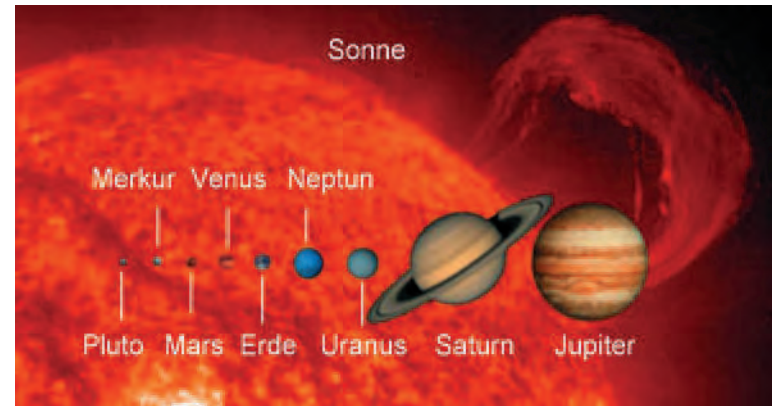


Abb. 135: Größenvergleich der Planeten des Sonnensystems mit dem Sonnenrand zum Vergleich

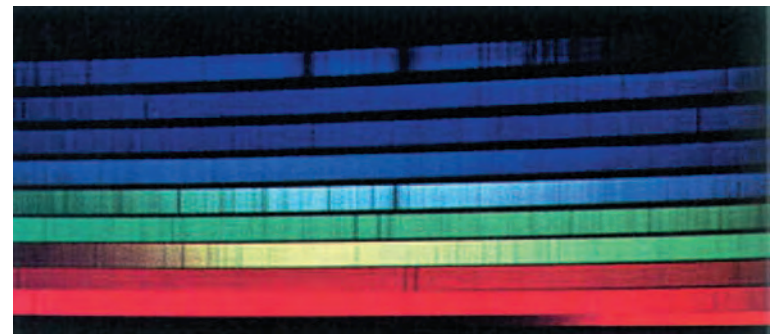


Abb. 136: Das vollständige Spektrum der Sonne im sichtbaren Licht mit den Absorptionslinien. Auf diesem Bild wurde das gesamte Spektrum, das eigentlich ein ganz langes dünnes Band ist, in mehrere Streifen unterteilt und untereinander angeordnet. Die dunklen »Flecken« sind die Spektrallinien der einzelnen Wellenlängenbereiche

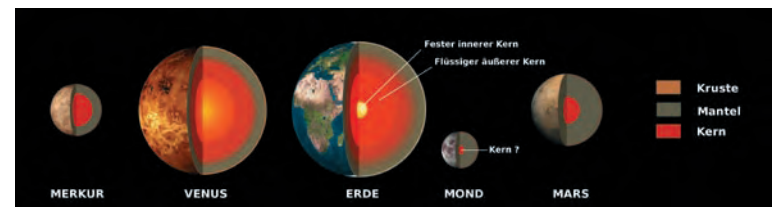


Abb. 137 : Die innere Struktur der Planeten des inneren Sonnensystems neben der des Mondes im gleichen Größenverhältnis.

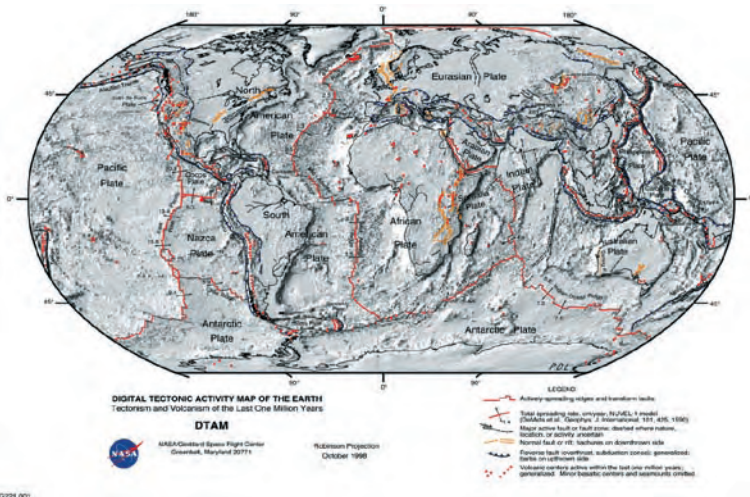


Abb. 138: Karte der tektonischen Aktivität der Erde



Abb. 139: Die Erde, aufgenommen von Apollo 17



Abb. 140: Größenvergleich zwischen Merkur, Venus, Erde und Mars (v.l.n.r.)

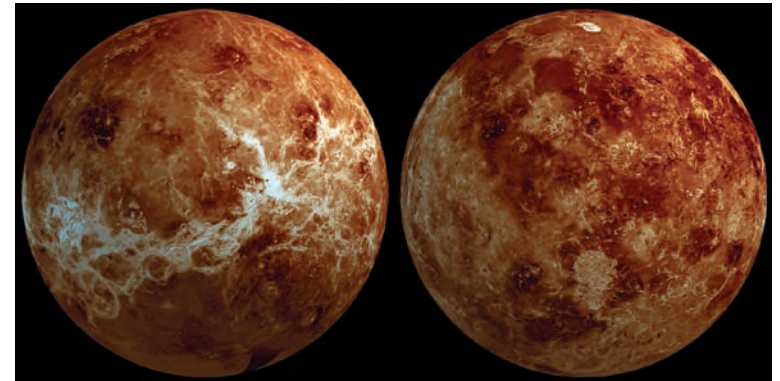


Abb. 141: Die 180°- (links) und die 0°-Hemisphäre der Venus

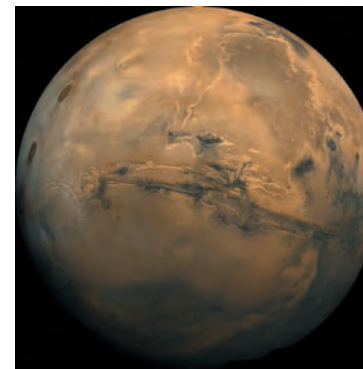


Abb. 142: In der Bildmitte ist Valles Marineris, die größte Schlucht im Sonnensystem. Am linken Rand die Vulkane der Tharsis-Region.

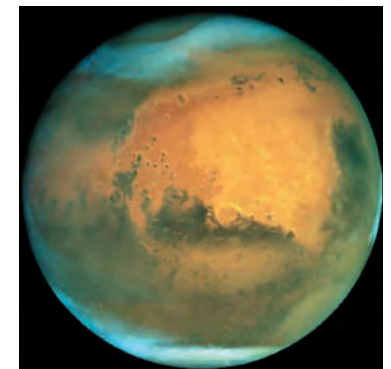


Abb. 143: Mars

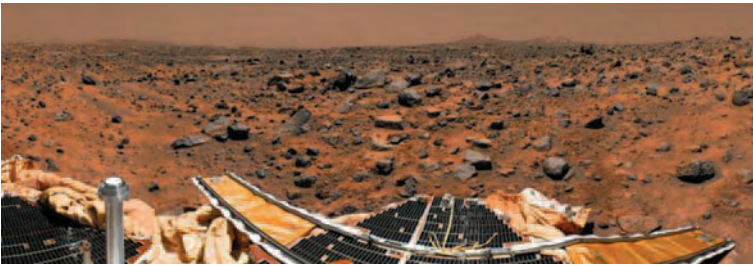


Abb. 144a: Panoramabild der Marsoberfläche, aufgenommen von der Sonde Pathfinder (Teil 1)

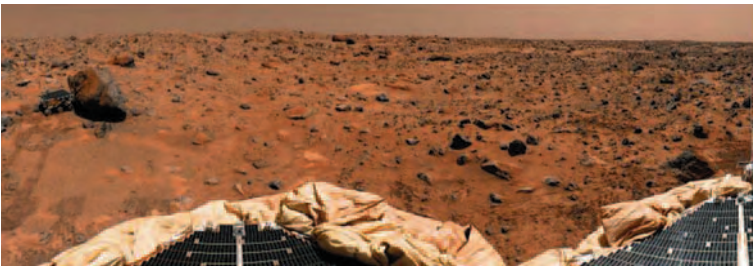


Abb. 144b: Panoramabild der Marsoberfläche, aufgenommen von der Sonde Pathfinder (Teil 2)

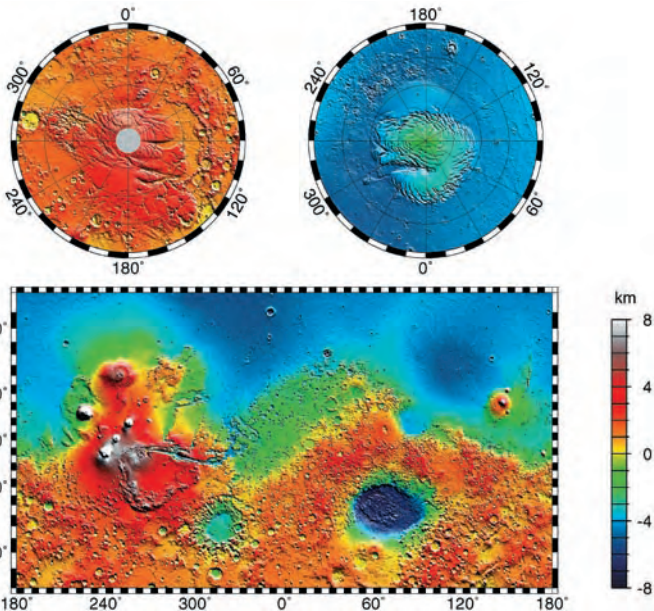


Abb. 145: Topografische Karte des Mars. Die blauen Regionen befinden sich unterhalb der festgelegten Nulllinie, die roten oberhalb



Abb. 146: Jupiter in Echtfarben, fotografiert von der Raumsonde Cassini



Abb. 147: Der Große Rote Fleck umkreist als größter Wirbelsturm des Sonnensystems ständig den Jupiter.

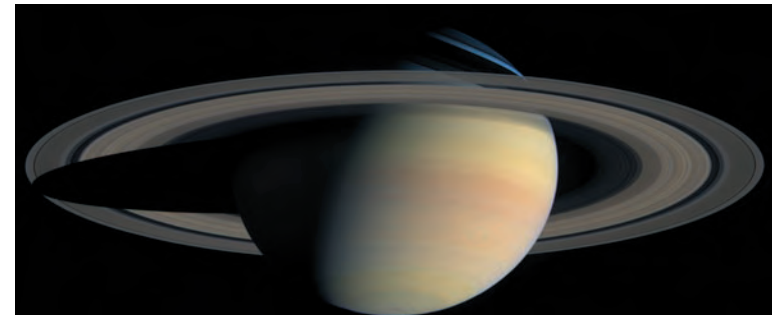


Abb. 148: Saturn in natürlichen Farben, fotografiert von der Raumsonde Cassini

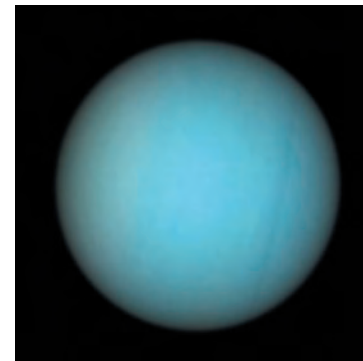


Abb. 149: Uranus

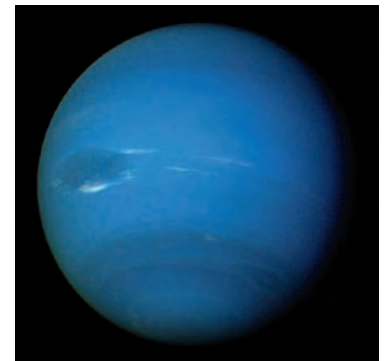


Abb. 150: Neptun, aufgenommen von Voyager 2 (Falschfarben)



Abb. 151: Im Weltraum erscheint der Mond als graue Kugel, die von Kratern unterschiedlicher Größe übersät ist.

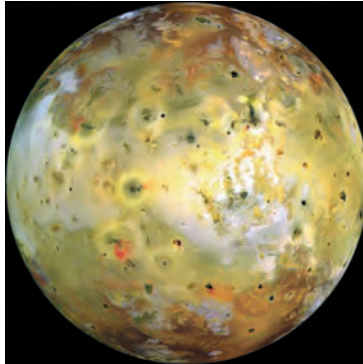


Abb. 152: Jupitermond Io, aufgenommen von der Raumsonde Galileo aus einer Entfernung von 130.000 km am 3. Juli 1999

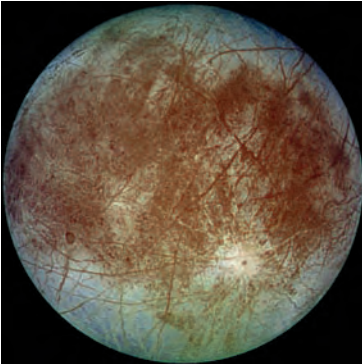


Abb. 153: Jupitermond Europa, aufgenommen von der Raumsonde Galileo im Jahre 1996

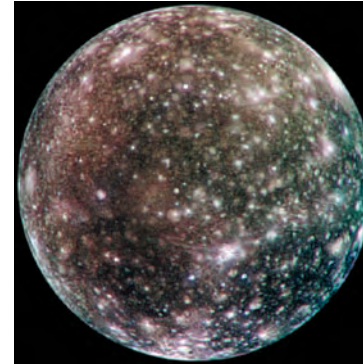


Abb. 154: Jupitermond Kallisto, aufgenommen von der Raumsonde Galileo im Jahre 2001



Abb. 155: kontrastverstärkte Aufnahme der Atmosphäre des Saturnmondes Titan, die von der Raumsonde Voyager 1 erstellt wurde

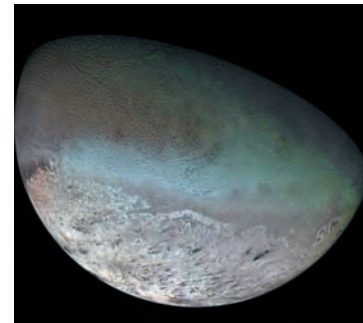


Abb. 156: Triton, aufgenommen von Voyager 2



Abb. 157: Foto des Kometen Hale-Bopp am 29. März 1997

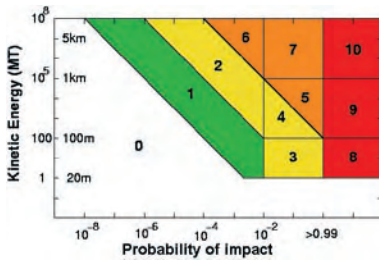


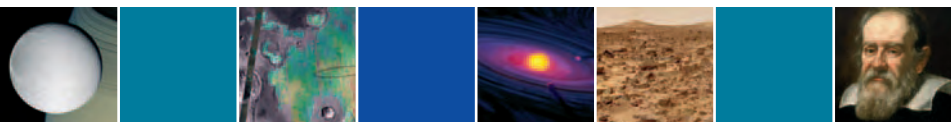
Abb. 158: Torinoskala

Die Torinoskala verwendet die Farbcodes von Weiss über Grün, Gelb und Orange zu Rot mit folgender Bedeutung:

Ereignisse, die wahrscheinlich keine Konsequenzen haben	0	Die Kollisionswahrscheinlichkeit ist Null oder deutlich geringer als die Wahrscheinlichkeit, dass ein beliebiges Objekt vergleichbarer Größe die Erde in den nächsten Jahrzehnten trifft. Diese Einstufung gilt gleichfalls für jedes kleine Objekt, das im Kollisionsfall die Erdoberfläche nicht als ganzes erreicht.
Ereignisse, die eine genaue Beobachtung erfordern	1	Die Kollisionswahrscheinlichkeit ist sehr gering und vergleichbar damit, dass ein beliebiges Objekt vergleichbarer Größe die Erde in den nächsten Jahrzehnten trifft.
Ereignisse, die Besorgnis erregen	2	Eine nahe, aber keine ungewöhnliche Annäherung. Eine Kollision ist sehr unwahrscheinlich.
	3	Eine Annäherung, für die die Kollisionswahrscheinlichkeit über 1 % liegt. Die Kollision würde lokale Zerstörung verursachen.
	4	Eine Annäherung, für die die Kollisionswahrscheinlichkeit über 1 % liegt. Die Kollision würde regionale Zerstörung verursachen.
bedrohliche Ereignisse	5	Eine große Annäherung mit einer großen Kollisionswahrscheinlichkeit, die regionale Zerstörungen verursachen kann.
	6	Eine große Annäherung mit einer großen Kollisionswahrscheinlichkeit, die globale Zerstörungen verursachen kann.
	7	Eine große Annäherung mit einer sehr großen Kollisionswahrscheinlichkeit, die globale Zerstörungen verursachen kann.
sichere Kollisionen	8	Eine Kollision, die lokale Zerstörung verursacht. Solche Ereignisse finden alle 50 bis 1000 Jahre statt.
	9	Eine Kollision, die regionale Zerstörung verursacht. Solche Ereignisse finden alle 1000 bis 100.000 Jahre statt.
	10	Eine Kollision, die globale Zerstörung verursacht. Solche Ereignisse finden alle 100.000 Jahre oder seltener statt.

Sonne und Planeten faszinieren die Menschen bereits seit Zehntausenden von Jahren. War der Himmel zuerst nur Sitz der Götter und Quelle verschiedener Kalender, revolutionierte das Wissen um das Sonnensystem zu Beginn der Neuzeit unser gesamtes Weltbild und Selbstverständnis.

Auch wenn wir heute nur noch selten in den Sternenhimmel schauen, regen wissenschaftliche Entdeckungen unsere Neugier und Phantasie immer wieder an. Verbesserte Teleskope und Raumsonden liefern ein immer detaillierteres Bild von Sonne, Planeten, Monden, Asteroiden und Kometen. Dieses Buch stellt grundlegende Zusammenhänge umfassend dar und bietet einen Einblick in neue Erkenntnisse.



Die Inhalte dieses WikiPress-Buchs entstammen der deutschsprachigen Wikipedia, der freien Enzyklopädie.

Autoren der Wikipedia verzichten grundsätzlich auf ein persönliches Honorar. WikiPress unterstützt mit einem Teil der Erlöse dieses Buchs die Wikipedia und ihre Schwesterprojekte durch finanzielle Zuwendungen an den Verein »Wikimedia Deutschland – Gesellschaft zur Förderung Freien Wissens e.V.« (<http://www.wikimedia.de>).

ISBN-10 3-86640-006-3
ISBN-13 978-3-86640-006-1



9 783866 400061
€ 9.90 [D] € 10.30 [A]