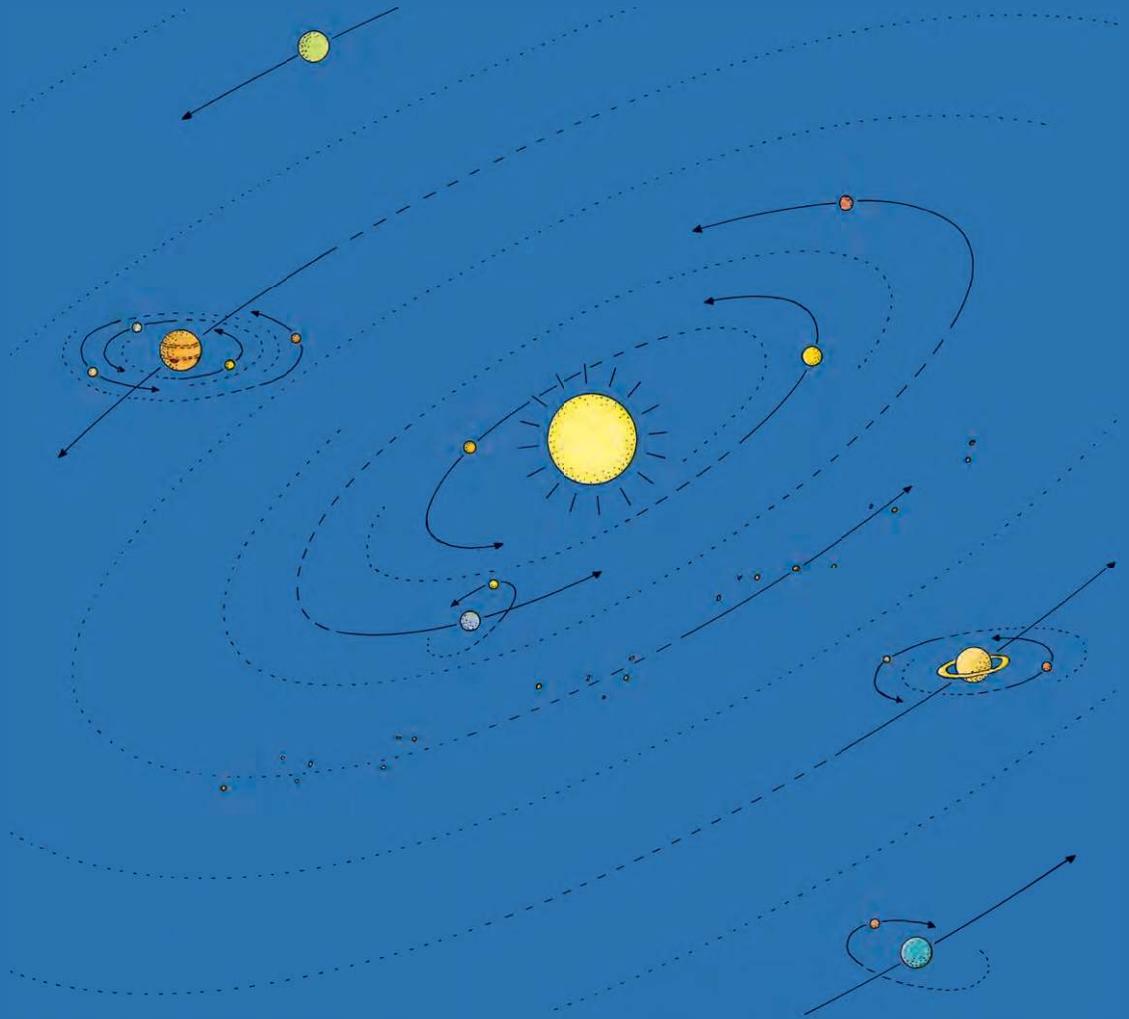


Unser Sonnensystem

Ein Führer zum Planeten-Wanderweg
St.Gallen–Steinach (Bodensee)



Oskar Keller
2008

Weiterführende Literatur

- BENACCHIO, L. 2003: Der Himmelsatlas. – Stern und Frederking & Thaler, München.
- GARLICK, M:A: 2006: Der grosse Atlas des Universums. – Franckh-Kosmos, Stuttgart.
- GEO KOMPAKT Nr 6, 2006: Planeten, Sterne, Galaxien. – Gruner und Jahr, Hamburg.
- HERRMANN, D.B. 2007: Die grosse Kosmos Himmelskunde. – Franckh-Kosmos, Stuttgart.
- HERRMANN, J. 2000: dtv-Atlas zur Astronomie. – Deutscher Taschenbuchverlag, München.
- LANG, B. 2007: Das Sonnensystem. – Spektrum Akademischer Verlag, München.
- RÜCKL, A. 1992: Welten, Sterne und Planeten. – Orbis, München.

Abbildungen

Fotos vorwiegend aus dem Bilderarchiv Men J. Schmidt, einige aus Wikipedia.
Zeichnungen: Oskar Keller

91. Band	Seiten 369–399	48 Abbildungen	1 Tabellen	St.Gallen 2008
----------	----------------	----------------	------------	----------------

Inhaltsverzeichnis

Einführung	371
Der Wanderweg	372
Das Sonnen-Planeten-System	374
Vorgeschichte	374
Die Frage nach der Entstehung	374
Entwicklungstheorie	375
Die Sonne	378
Merkur	380
Venus	381
Erde	382
Die Entwicklung der Erde – ein Sonderfall	383
Mond	385
Mars	386
Ceres; Planetoiden oder Asteroiden	388
Jupiter	390
Monde des Jupiter	391
Saturn	393
Monde des Saturn	394
Uranus	395
Neptun	396
Pluto	397
Planet, Zwergplanet oder Kleinkörper?	397
Rückblick und Ausblick	398
Intelligente Lebewesen	398

Einführung

Trotz Raumfahrt und Sonden-Missionen und trotz wachsendem Interesse für die Welt der Sterne ist für die meisten Menschen das Universum immer noch ungeheuerlich und unbegreiflich. Selbst über denjenigen Teil des Weltalls, zu dem die von uns bewohnte Erde gehört, über das Sonnen-Planeten-System können wir uns ohne Modell kaum eine Vorstellung machen.

Als gut verständliche Veranschaulichung bietet sich ein Planeten-Wanderweg an: Im Gelände werden Sonne, Planeten und auch Monde als Stationen mit Modellen eines zu erwandernden Weges aufgestellt und zwar so, dass die Distanzen zwischen den Gestirnen und deren Grösse den Verhältnissen im Sonnensystem massstabsgetreu entsprechen. Ein solcher Planetenweg führt von St.Gallen nach Steinach am Bodensee. An den einzelnen Stationen weisen erläuternde Tafeln auf die Charakteristiken des jeweiligen Gestirns hin, sodass die beliebte Wanderung von St.Gallen zum Bodensee mit der Aneignung von astronomischem Grundwissen verbunden werden kann.

Die vorliegende Schrift ist einerseits als etwas ausführlichere Wegleitung für den «Planeten-Wanderer» gedacht, andererseits auch als allgemeine Einführung in die Welt des Sonnensystems. Dieser Führer enthält zu jedem Himmelskörper, der unterwegs aufgestellt ist, eine Art Steckbrief. Dabei wurde darauf geachtet, spezielle Eigenheiten zu erklären und die jüngsten Erkenntnisse aus der Planetenforschung einfließen zu lassen. Zudem werden Entstehung und Entwicklung des ganzen Sonnensystems nach den heu-

tigen Vorstellungen dargelegt und die Besonderheiten der Erde hervorgehoben.

Nachdem seit 2000 ausserhalb des bisher letzten Planeten Pluto weitere planetenähnliche Himmelskörper entdeckt worden sind, steht nun bei den Astronomen der Planetenstatus von Pluto zur Diskussion. Darüber wird am Schluss des Führers berichtet.

Das erste Modell des Planetensystems wurde im Herbst 1979 durch eine Astronomiegruppe von Schülern der damaligen Mittelschule Talhof provisorisch erstellt, wobei dies nur dank dem Verständnis der Grundbesitzer verwirklicht werden konnte. Die endgültige Realisierung dieser Idee aber wurde erst durch die finanzielle Unterstützung der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft möglich. Als besonders wertvoll für die Anlage des Planetenweges erweist sich der Botanische Garten, indem ein Teil der Modelle durch das Entgegenkommen von Verwaltung und Leitung darin errichtet werden durfte. Nicht zu vergessen ist auch die uneigennützig und oft sogar unentgeltliche Arbeit und Mithilfe von Handwerkern und Bauleuten. Allen diesen direkten und indirekten Helfern gebührt ein herzlicher Dank.

Ein Vandalenakt im Frühsommer 1983 erforderte die Neuerstellung der Hälfte aller Modelle und Tafeln. Die hierzu nötigen Geldmittel wurden in grosszügiger Weise hauptsächlich von der Vereinigung der Freunde des Botanischen Gartens, aber auch von der Naturwissenschaftlichen Gesellschaft zur Verfügung gestellt. Beiden Vereinen sei diese namhafte Unterstützung bestens verdankt.

Leider sind inzwischen immer wieder Beschädigungen an Modellen und Tafeln erfolgt. Für die Zukunft kann im Interesse der Wanderer nur gehofft werden, dass weitere mutwillige Zerstörungen und ein «Diebstahl von Gestirnen» unterbleiben.

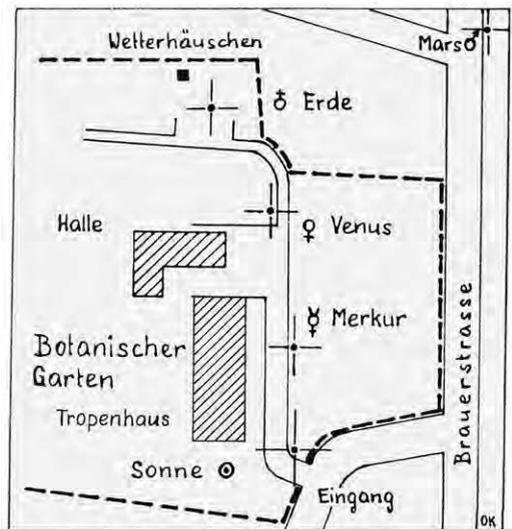
Plan
Botanischer
Garten

Der Wanderweg

Die Wanderung durch unser Sonnen-Planeten-System beginnt im Botanischen Garten im Osten von St.Gallen mit dem Sonnenmodell und endet auf der Glinzburg bei Obersteinach mit dem bisher entferntesten Planeten(?) Pluto. Die Modelle und die Distanzen sind eine Verkleinerung im Massstab 1:1 Milliarde. Demnach entsprechen 1000 km in der Wirklichkeit 1 mm am Modell. Jeder Meter oder grosse Schritt auf unserem Wanderweg steht für eine Reise von 1 Million km im Weltraum und entspricht 3 Lichtsekunden.

Der Botanische Garten kann mit dem Bus der städtischen Verkehrsbetriebe Linie 1, Haltestelle Neudorf oder Botanischer Garten, erreicht werden. Ab Steinach besteht die Möglichkeit zur Rückfahrt nach St.Gallen mit der SBB über Rorschach oder mit direkten Postautokursen.

Der Planetenweg gliedert sich in zwei Abschnitte. Der erste umfasst die Gestirne von der Sonne bis zur Erde und verläuft als kleiner Spaziergang innerhalb des Botanischen Gartens. Im zweiten Abschnitt, längs des eigentlichen Wanderweges nach Obersteinach, sind die übrigen Planeten aufgestellt. Vergleiche dazu die beiden Kartenskizzen.



Für die 8 km Weg muss mit etwa 2 Stunden reiner Wanderzeit gerechnet werden. Es ist nicht erforderlich, den gesamten Planeten-Wanderweg zu absolvieren. Es kann auch nur der erste Abschnitt im Botanischen Garten besucht werden.



Sonnenmodell (Ø 1,4 m) im Botanischen Garten.



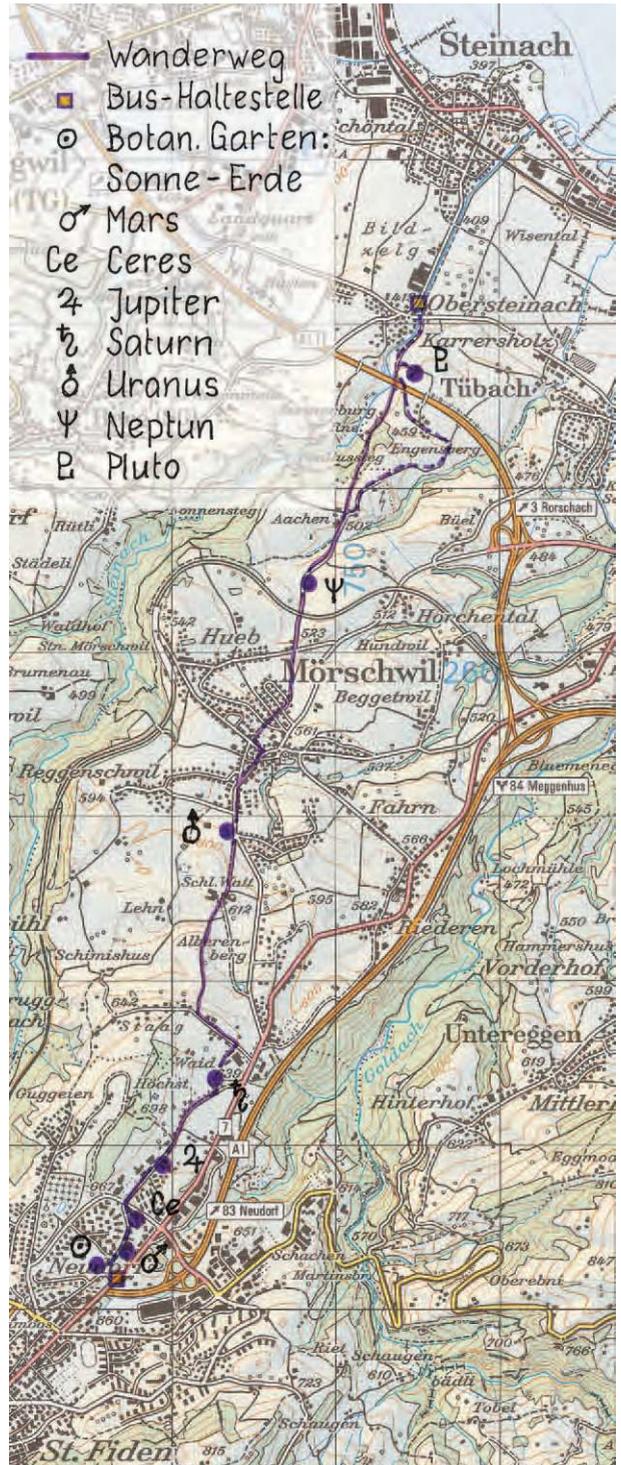
Saturn (Ø 12 cm) mit seinen Ringen bei der Oberen Weid.



Jupiter (Ø 14 cm) bei der Klinik Stephanshorn.



Erde (rechts, Ø 1,3 cm) mit Mond in masstäblich korrektem Abstand im Botanischen Garten.



Kartenausschnitt aus Landkarte 1:50000

Das Sonnen-Planeten-System

Vorgeschichte

Licht durchflutet die Welt, in der wir leben; und wenn die Natur nachts auf dunkel umstellt, dann versuchen wir, unsere Umgebung mit künstlichem Licht zu erhellen. Dunkelheit ist uns Menschen zuwider, es bereitet uns Mühe, uns mit unseren Sinnen in ihr zurecht zu finden. Jeden Morgen, wenn die Sonne aufgeht und die uns umgebende Erde in ihr gleissendes Licht taucht, erleben wir eine Art Lichtwerdung. Doch auch nachts strahlt Licht vom Himmel, sei es der milde Schein des Mondes, das Flackern des Abend- oder Morgensterns oder ein besonderes helles Gestirn, das hoch am Himmel funkelt. Immer wieder staunend, wenn in einer klaren Nacht Tausende von Lichtpunkten am Firmament glitzern, spüren wir einen Hauch der Unendlichkeit von Raum und Zeit. Der sternensüßes Himmel ist, wohl seit es denkende Menschen gibt, der Inbegriff des Unfassbaren, des Göttlichen.

Aus den himmlischen Lichtern und ihrer Ordnung den Willen der Götter zu erfahren, war die Triebfeder der Astronomen früherer Kulturvölker in China, Indien, Mesopotamien und Ägypten, aber auch der Azteken und Mayas in Mittelamerika, die Sternenwelt zu erforschen. Schon früh wurde erkannt, dass neben den fix am Himmel stehenden Gestirnen (Fixsterne) solche zu finden sind, die ihren Standort laufend ändern. Man hat sie als Wandelsterne (griechisch: Planeten) besonders beobachtet und studiert.

Für die Erkenntnis, dass innerhalb der unzählbaren Fülle winziger Sternenpunkte die Erde nicht im Zentrum steht, war die Menschheit aber erst im 16. Jahrhundert reif, nachdem der Globus umsegelt und in seiner Grösse und Gestalt bekannt war. Bedeutende Geister wie Kopernikus, Kepler und Galilei formulierten die neue Vorstellung, nach der die Sonne das Zentralgestirn aller Planeten und der Erde ist (heliocentrisches Weltbild) und verhalten ihr durch ihre Forschungen zum Durchbruch.

Bald wurde auch klar, dass die Sonne, wie Milliarden andere, ein ausserordentlich heisses und daher selbst leuchtendes Gestirn, ein Fixstern, ist. Im Gegensatz dazu erweist sich das sichtbare Äussere der Planeten als kalt und dunkel; ihr Leuchten beruht einzig auf der Reflexion des sie treffenden Sonnenlichtes. Da alle Planeten zusammen nur einen winzigen Bruchteil der Sonnenmasse umfassen, werden sie in ihren Bewegungen von der Sonne beherrscht. Sie umlaufen diese auf kreisähnlichen Ellipsenbahnen (Kepler 1611) und werden dabei durch die Gravitation und die Fliehkraft auf ihren Bahnen gehalten (Newton 1687).

Die Frage nach der Entstehung

Waren einmal die Zusammenhänge innerhalb des Systems Sonne-Planeten erkannt, so stellte sich bald auch die Frage: Wie und wann ist diese Sternenfamilie entstanden, die ja derart verschiedene Mitglieder umfasst wie Sonne, Erde, Jupiter oder den Mond? Viele Astronomen haben darüber nachgedacht und Theorien aufgestellt. Der Vorstoss des Menschen mit Raumfahrten zum Mond und mit unbemannten Sonden zu einzelnen Planeten hat in den letzten Jahrzehnten eine ungeheure Fülle neuer Erkenntnisse gebracht. Etliche Eigenarten des Sonnensystems bilden die Grundlage der heute gängigen und von den meisten Astronomen anerkannten Theorie der Entstehung von Sonne, Planeten und Monden. Es sind dies:

1. Die Bahnen aller Planeten (ausser Pluto) und auch diejenigen der meisten Trabanten (Monde) liegen nahezu in einer Ebene im Weltraum.
2. Der Umlaufsinn der Planeten um die Sonne, der meisten Monde um ihre Planeten und die Eigenrotation der Sonne, der Planeten (ausser Venus) und vieler Trabanten zeigt dieselbe Richtung.
3. Direkte und indirekte Altersbestimmungen der festen Kruste der Erde, des Mondes, von weiteren Planeten und Klein-

planeten sowie das Alter von Meteoritenmaterial ergeben Maximalwerte zwischen 3,7 und 4,5 Mia (Milliarden) Jahren.

4. Die Planeten lassen sich in eine innere und eine äussere Gruppe aufteilen, die unter sich in vielerlei Hinsicht vergleichbar sind. Die inneren erdähnlichen Wandelsterne haben eine hohe Dichte und sind überwiegend aus Gesteinen und Metallen aufgebaut. Die äusseren, jupiterähnlichen hingegen weisen nur geringe Dichten auf und bestehen aus kaum veränderter Sonnenmaterie (Wasserstoff, Helium und Wasserstoffverbindungen).

5. Die Sonne als Zentralstern vereinigt auf sich 99,9% der Gesamtmasse, während nur 0,1% auf die Planeten entfallen. Umgekehrt aber steuert die Gesamtheit der Planeten 99,5% zum Drehimpuls des Systems (Rotationsenergie) bei, die sich relativ langsam drehende Sonne aber nur 0,5%.

6. Das Sonnen-Planeten-System bildet gesamthaft im Weltraum eine mehr oder weniger in sich abgeschlossene Einheit und setzt sich deutlich von den auch nächsten Fixsternen ab.

Alle diese Punkte lassen kaum einen anderen als den Schluss auf gemeinsame und gleichzeitige Entstehung zu.

Entwicklungstheorie

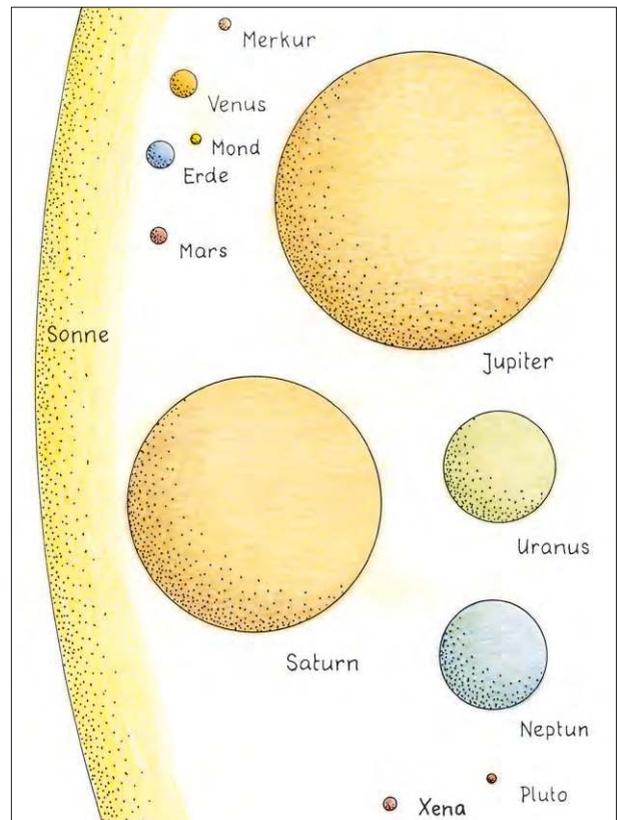
Der Urnebel

Wo heute das Sonnensystem in einem Nebenast der Milchstrasse durch das Weltall treibt, schwebte vor 5 Mia Jahren eine sich langsam drehende interstellare Gas- und Staubwolke. Vorwiegend aus Wasserstoff und Helium zusammengesetzt, enthielt sie auch Atome und Staubpartikel schwererer Elemente, darunter vor allem Eisen (das stabilste Element), aber auch Aluminium, Nickel, Gold oder Uran. Diese Bausteine müssen Überreste längst vergangener Riesensterne sein, die explodierten, denn nur

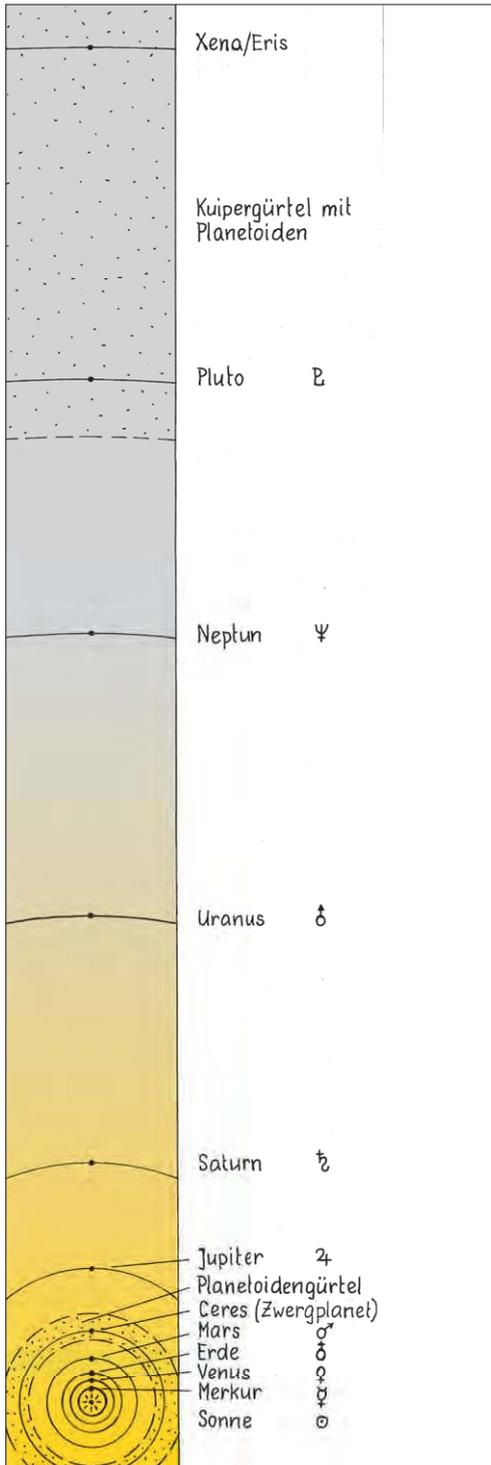
in ihrem Inneren können durch Kernfusion Atome so hoher Ordnungszahl entstehen.

Die rotierende Scheibe

Vor knapp 5 Mia Jahren begann sich diese kosmische Wolke von etwa 3000 Mia km Ausdehnung unter dem Einfluss der eigenen Gravitation (Schwerkraft) zusammenzuziehen. Welche Kräfte den einsetzenden Kollaps auslösten, ist unbekannt. Vielleicht waren es die Schockwellen einer nicht sehr weit entfernten Riesensternexplosion (Supernova). Die in sich zusammenfallende Wolke musste



Die <Sonnenfamilie> umfasst nebst dem Zentralgestirn der Sonne acht Planeten, die ihrerseits rund 170 bekannte Monde besitzen. Pluto und Xena/Eris zählen seit 2006 zu den Zwergplaneten. Zum System gehören ferner Asteroide oder Planetoiden, Meteoroiden und Kometen. Die Darstellung zeigt die Grössenverhältnisse unter den Planeten inklusive Sonne und Erdenmond.



immer schneller rotieren und nahm dabei nach einigen 100000 Jahren Scheibenform von etwa dem Durchmesser des heutigen Systems an (10 Mia km). Der innerste Bereich verdichtete sich durch die zum Zentrum einstürzenden Partikel weiter zur Ursonne, um die herum die übrige Materie sich als Sonnenebel aus gas- und staubförmigen Teilchen drehte. Während die weiter sich zusammenballende Ursonne durch Kontraktion sich immer mehr aufheizte, blieb der Urnebel weiterhin kalt. Dabei wurden zuerst die schweren Metalle, vor allem Eisen und Nickel, zu Klumpen, grösseren Brocken und schliesslich zu Urplaneten zusammengescheisst. Die bei der weiteren Abkühlung des Nebels kondensierenden Minerale, insbesondere Silikate, wurden in der Folge durch die wachsenden Gravitationskräfte den jungen Planeten einverleibt.

Der Sonnenwind

Im sonnennahem Bereich der erdähnlichen Planeten begann sich vor knapp 4,5 Mia Jahren das Aufheizen des Zentralgestirns bemerkbar zu machen. Die aus leichten Elementen aufgebauten Partikel und Gase verdampften und wurden durch den Sonnenwind aus dem System in den Weltraum hinausgetrieben. Eine unzählbare Menge fester Brocken von Metergrösse und Miniplaneten mit Durchmessern von über 1000 km umrundete die Ursonne auf weiterhin meist exzentrisch elliptischen Bahnen.

Die Riesenplaneten

Im äusseren Bereich des Sonnensystems kondensierten bei niedrigen Temperaturen Gase wie Methan, Ammoniak und Wasserdampf an den bereits vorhandenen Gesteins- und Metallklumpen zu Eis, welche dadurch zu stetig grösser werdenden Körpern heranwachsen. Die Riesen unter ihnen, nämlich

Reihenfolge der Planeten und ihre mittleren Abstände von der Sonne massstäblich gezeichnet. Ceres, Pluto und Xena/Eris sind Zwergplaneten.

Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, vermochten zudem Helium und Wasserstoff in enormen Gashüllen an sich zu binden.

Das Aufschmelzen

Bereits vor nahezu 4,5 Mia Jahren dürften die Planeten und ihre Monde im wesentlichen aufgebaut gewesen sein. Die inneren inklusive Erdenmond heizten sich derart auf, dass sie schmolzen und dabei eine innere Differenzierung in Kern und Mantel durchmachten. Der enorme Temperaturanstieg wurde einerseits durch die Verdichtung unter dem gewaltigen inneren Druck und andererseits durch radioaktive Prozesse der beim Wachstum aufgenommenen instabilen Isotope ausgelöst und durch die bei Einschlägen von Meteoriten frei werdende Energie verstärkt. Nach wenigen Mio Jahren bildete der sich wieder abkühlende Mond seine feste Kruste, während dies bei der massereicheren Erde erst vor etwa 4 Mia Jahren eintrat.

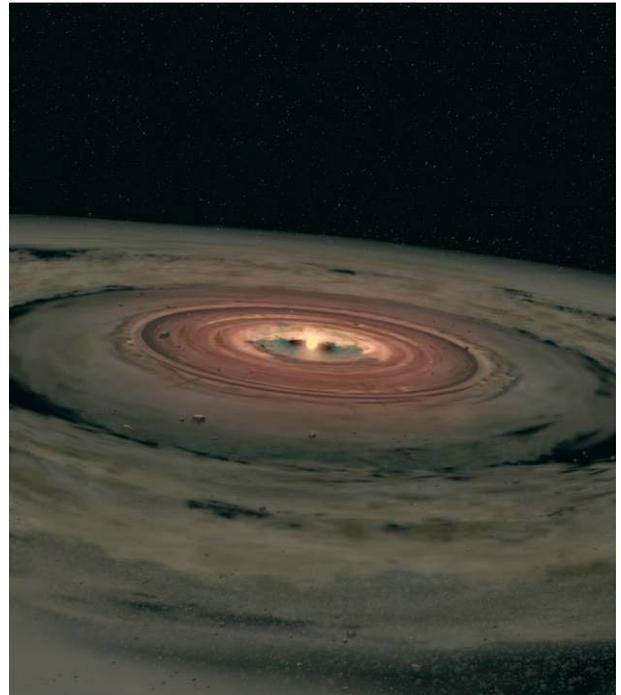
Das kosmische Bombardement

Die auf extremen Bahnen ziehenden Millionen von Kleinplaneten kollidierten mit den nahezu kreisförmig umlaufenden Urplaneten, womit ein rund 500 Mio Jahre dauerndes kosmisches Bombardement einsetzte, dessen Einschläge auf den bereits erstarrten Krusten der inneren Planeten, auf dem Erdenmond und auf den meisten Monden der Riesenplaneten bleibende Narben in Form kraterübersäter Oberflächen hinterliessen. Ziemlich abrupt muss dann vor 4 Mia Jahren der katastrophale Granatenhagel zu Ende gegangen sein.

Das werdende Sonnen-Planeten-System. Im Zentrum des rotierenden flachen Urnebels beginnt die Sonne aufzuleuchten. Bereits sind aus der interstellaren Materie die Kerne von Urplaneten auskondensiert. Sonne und Planeten nehmen weiterhin Partikel und Meteoriten auf bis die Nebelringe verschwunden sind.

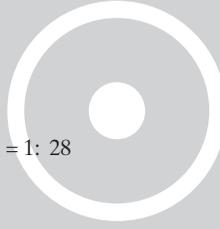
Die Zündung der Sonne

Parallel zu den Vorgängen im Sonnennebel, in dem eben vor 4,5 Mia Jahren die Urplaneten geboren worden waren, erhöhte sich im Kern der Ursonne die Temperatur weiter. Als schliesslich einige Millionen Grad erreicht waren, erfolgte die Zündung der thermonuklearen Reaktionen, die auch heute noch ablaufen. Der Wasserstoff als atomarer Brennstoff fusioniert dabei zu Helium, wobei unvorstellbar riesige Energiemengen freigesetzt werden. Vor etwas mehr als 4 Mia Jahren war dann die Zeit gekommen, da die Ursonne aufzuleuchten begann und das Planetensystem aus dem Dunkel der Weltallnacht heraus hob und mit ihrem Licht überflutete. Ein Stern war geboren. Die Masse aller Planeten um das 300000 fache übertreffend, wurde die Sonne zur absoluten, hell leuchtenden Herrscherin in ihrer Familie.



Die Sonne

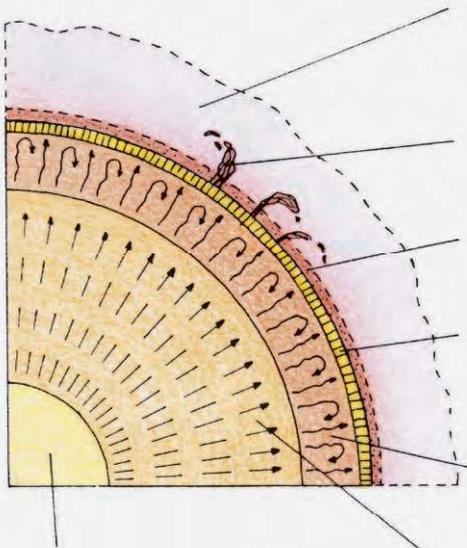
Äquatordurchmesser: 1 392 000 km
 Rotationszeit am Äquator: 25 Tage
 Masse in Erdmassen: 333 000
 Dichte in g/cm^3 : 1,4
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 28
 Oberflächentemperatur: 6000°C



Seit über 4 Mia Jahren beleuchtet und erwärmt die Sonne die Erde. Sie wirkt dadurch als grundlegender Motor für alles irdische Leben. Sie hält aber auch den Kreislauf des Wassers in Gang und ist gleichzeitig Hauptantrieb für Klima und Wetter. Von der in den Weltraum ausgestrahlten Energie trifft die Erde nur 1 Zweimilliardstel. Die Sonne besteht aus 78% Wasserstoff, 20% Helium und nur 2% schwereren Elementen.

Das riesige Volumen der Sonne hat zur Folge, dass der Druck in ihrem Inneren auf 10^{11} bar ansteigt (Erdoberfläche im Mittel 1 bar). Die Dichte der Materie erreicht dort 130 g/cm^3 (Gesteine an der Erdoberfläche $2,8 \text{ g/cm}^3$) und die Temperaturen liegen bei 15 Mio $^\circ\text{C}$. Diese unvorstellbar extremen Bedingungen führen zu thermonuklearen Kernreaktionen, bei denen vor allem Wasserstoffkerne zu Heliumkernen verschmelzen

Aufbau der Sonne



Innenkern: Kernreaktionen mit Energieerzeugung bei ca. 15 Mio $^\circ\text{C}$.

Korona: Schicht aus dünn verteilten Gasen, die sich bis 17 Mio km in den Weltraum erstrecken. Aus ihr entweicht der Sonnenwind mit 500 km/s in den Weltraum.

Protuberanzen: Wasserstoff-Eruptionen bis über 100 000 km Höhe.

Chromosphäre: rot leuchtende äussere Atmosphäre, etwas «kühler» als die Photosphäre und weniger dicht.

Photosphäre: untere Atmosphäre, bildet die sichtbare Oberfläche mit 6000°C . Phasenweise entstehen in ihr die weniger heissen Sonnenflecken und besonders heisse Gasexplosionen, die Flares.

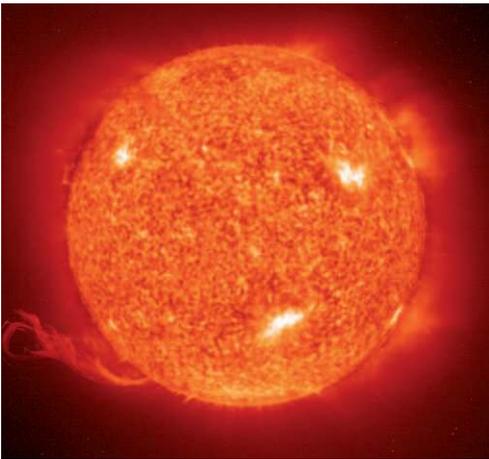
Konvektionszone: aufsteigende Gase transportieren die Energie nach oben und sinken wieder zurück.

Aussenkern: Energietransport von Materieteilchen zu Materieteilchen.

(Kernfusion). Dabei werden pro Sekunde 300 Mio Tonnen Wasserstoff in Helium verwandelt. Die frei werdende Energie wird nach aussen transportiert und in Form von Licht, Wärme, Röntgenwellen, Sonnenwind usw. in den Weltraum abgestrahlt. Die Kernfusionen haben einen gewaltigen Massenverlust von 4 Mio Tonnen je Sekunde zur Folge. Trotzdem wird die Sonne noch weitere 4 Mia Jahre so weiterstrahlen können bis der Wasserstoffvorrat verzehrt ist. Die Sonnenflecken (siehe Abbildung) sind Zonen mit etwas tieferen Temperaturen um 4500°C , weshalb sie dem Betrachter dunkel erscheinen. Sie treten in einem 11-Jahresrhythmus sowie in übergeordneten Grosszyklen auf. Ihre elektromagnetische Strahlung scheint unser Klima und Wetter zu beeinflussen.



Sonne in gedämpften grünlichen Falschfarben, sodass die Sonnenflecken deutlich hervortreten.



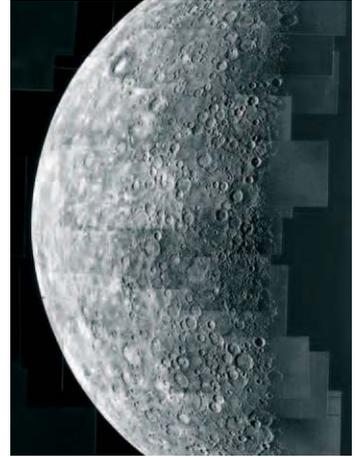
Sonne abgedunkelt und mit Rotfilter fotografiert. Die fleckige, körnige Struktur, die Granulation, ist die sichtbare Oberfläche der Sonne, die Photosphäre. Weisse Flecken sind sehr heisse Gasexplosionen, die Flares. Als rotes Dunstband umhüllt die Chromosphäre den Gasball. Protuberanzen strahlen weit in den Weltraum hinaus.



Die Korona umhüllt die Sonne strahlenförmig weit in den Weltraum hinaus. Sie wird nur sichtbar, wenn die Sonne selbst völlig verdeckt ist, wie hier während der Sonnenfinsternis von 1999.

Merkur

Äquatordurchmesser: 4880 km
 Rotationszeit um die eigene Achse: 59 Tage
 Masse in Erdmassen: 0,055
 Dichte in g/cm^3 : 5,4
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 0,37
 Mittlere Entfernung von der Sonne: 57 900 000 km
 Umlaufzeit um die Sonne: 88 Tage
 Bahngeschwindigkeit:
 Perihel (Sonnennähe): 209 000 km/h
 Aphel (Sonnenferne): 140 000 km/h
 Anzahl Monde: —

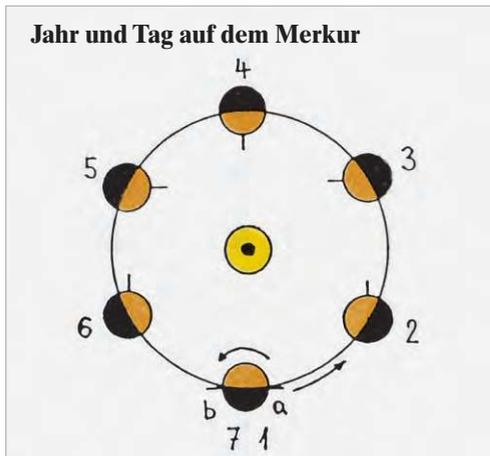


Der sonnennächste Planet Merkur kann heller leuchten als der hellste Fixstern, ist aber nur in der Dämmerung zu beobachten. Er steht der Sonne so nahe, dass ihr blendendes Licht das Auffinden erschwert. Er ist dann sichtbar, wenn er ganz niedrig über dem Horizont steht, also kurz vor Sonnenauf- oder nach Sonnenuntergang. Weil Merkur zwischen Sonne und Erde steht, weist er Phasen

wie der Mond auf, so erscheint er bei seiner grössten Helligkeit als kleine Sichel im Fernrohr. Er kann sich der Erde bis auf 76 Mio km nähern.

Mit seinem 4880 km Durchmesser ist Merkur nur wenig grösser als der Mond. Wie 1974 die amerikanische Sonde Mariner 10 enthüllte, ähnelt seine Landschaft verblüffend derjenigen des Mondes, indem er ebenfalls mit Kratern, Ringgebirgen und Rillen übersät ist (Bild oben). Nebst dem Mars ist er der einzige Planet, auf dem man auch mit Fernrohren Einzelheiten erkennen kann, denn er besitzt keine Atmosphäre. Deshalb und wegen der Sonnennähe kommen extreme Temperaturschwankungen vor: Auf der der Sonne zugewandten Seite steigt die Temperatur bis auf 430°C an, während sie auf der Nachtseite auf -200°C absinkt.

Auf diesem Planeten dauert der Tag (von Sonnenaufgang bis zum nächsten Sonnenaufgang) 176 Erdentage, das heisst halb so lang wie ein irdisches Jahr. Da die Eigenrotation des Merkur 59 Erdentage beträgt, also $\frac{2}{3}$ seiner Umlaufzeit um die Sonne, hat ein Ort auf ihm während einem Sonnenlauf andauernd Tag, anschliessend aber während dem nächsten Umlauf dauernd Nacht. Dies bedeutet, dass Tag-Nacht auf dem Merkur 2 Merkurjahre umfassen, also doppelt soviel wie sein Jahr. Man vergleiche dazu die Darstellung.



- a Sonnenaufgang eines Ortes auf dem Äquator
- b Sonnenuntergang eines Ortes auf dem Äquator
- 1–5 eine Drehung um die eigene Achse
- 1–7 ein halber Merkurtag = Tagzeit
- 1–7 ein Merkurjahr = ein Umlauf um die Sonne

Venus

Äquatordurchmesser: 12 100 km
 Rotationszeit um die eigene Achse: 243 Tage
 Masse in Erdmassen: 0,82
 Dichte in g/cm^3 : 5,2
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 0,9
 Mittlere Entfernung von der Sonne: 108 200 000 km
 Umlaufzeit um die Sonne: 225 Tage
 Mittlere Bahngeschwindigkeit: 126 500 km/h
 Anzahl Monde: —

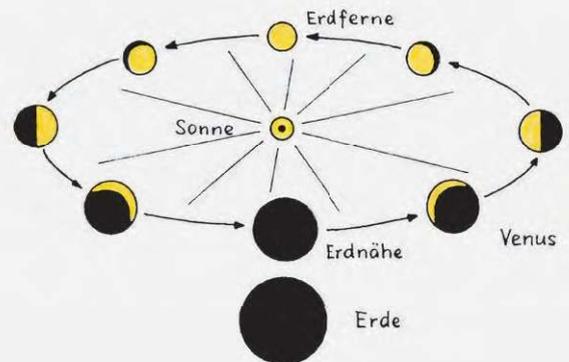


Die Venus ist derjenige Planet, der von allen der Erde am nächsten stehen und auch die grösste Helligkeit erreichen kann. Sie leuchtet entweder als Abend- oder aber als Morgenstern am Himmel. Sie besitzt eine ausserordentlich dichte Atmosphäre aus 96% Kohlendioxid, ferner Stickstoff, Kohlenmonoxid und nur Spuren von Sauerstoff und Wasserdampf. Da ihre feste Oberfläche unter einer undurchsichtigen Decke gelblich-weisser Wolken vorwiegend aus Schwefelsäure und Schwefeldioxid liegt (Bild oben), konnten die Wissenschaftler erst anfangs der 1960er Jahre feststellen, wie lange die Venus für eine Umdrehung um die eigene Achse braucht: 243 Tage. Sie dreht sich aufgrund neuester Radarmessungen auf die andere Seite als alle übrigen Planeten.

Ab 1978 kartierte eine Pioneer-Sonde mit einem Radar-Höhenmesser die Venus-Oberfläche. Wegen der Ähnlichkeit mit der Erde würde man auf diesem Schwestersplaneten auch ähnliche tektonisch-geologische Vorgänge erwarten. Die Bilder aber zeigen Strukturen, die auf eine starre, zusammenhängende Kruste, aber sehr aktiven Vulkanismus mit Schildvulkanen bis 10 000 m Höhe, schliessen lassen. Da die physikalischen Daten (Masse, Volumen, Dichte) denen der Erde erstaunlich nahe stehen, wurde unter anderem die Frage aufgeworfen, ob auf der Venus einfaches Leben möglich wäre. 1970

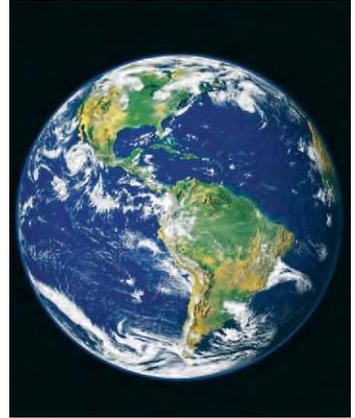
drangen zwei russische Raumsonden durch die Atmosphäre auf die Oberfläche der Venus vor. Sie meldeten über Funk und Fernsehen, dass dort eine Hitze von nahezu 500°C und ein Druck von 90 Atmosphären (auf der Erde 1 Atmosphäre) herrschen. Die extrem hohen Temperaturen sind eine Folge des Treibhauseffekts, der durch die Kohlendioxid-Atmosphäre hervorgerufen wird. Ferner vermutet man Orkane, die bis 6fache Windgeschwindigkeiten irdischer Wirbelstürme erreichen können. Somit kann selbst mit niedrigem Leben kaum gerechnet werden. Wegen der Umlaufbahn der Venus innerhalb der Erdbahn weist die Venus wie Merkur Lichtgestalten (Phasen) auf (Abbildung).

Entstehung der Venus-Phasen



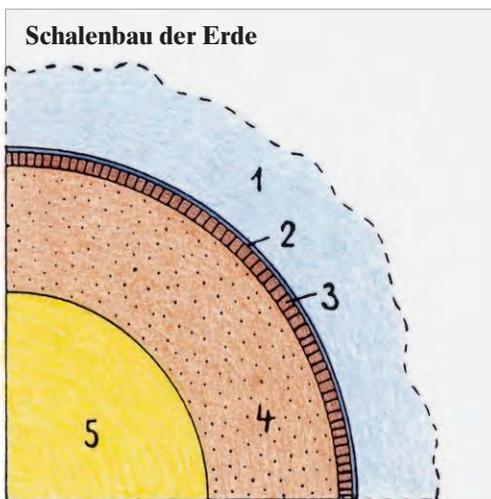
Erde

Äquatordurchmesser: 12756 km
 Rotationszeit um die eigene Achse: 23 h 56 min
 Masse in Erdmassen: 1
 Dichte in g/cm^3 : 5,5
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 1
 Mittlere Entfernung von der Sonne: 149 600 000 km
 Umlaufzeit um die Sonne: 365 Tage 57 min
 Mittlere Bahngeschwindigkeit: 127 280 km/h
 Anzahl Monde: 1



Die Erde reist wie alle Planeten auf einer ellipsenförmigen Bahn um die Sonne und wird dabei ständig vom Mond begleitet. Aus dem Weltraum betrachtet erschiene die Erde als Doppelplanet, denn der Mond verfügt mit mehr als $\frac{1}{4}$ Erddurchmesser über eine beachtliche Grösse. Die Erde stellt keine Kugel sondern näherungsweise ein Rotationsellipsoid dar; sie ist an den Polen um 43 km abgeplattet.

Die Erdoberfläche hat eine Ausdehnung von 510 Mio km^2 , wovon die Ozeane 71% bedecken. Das Wasser, das auf unserem Planeten überwiegend in flüssiger Form vorkommt, ist die Grundlage, dass auf der Erde Leben entstehen konnte.



- Schalenbau der Erde**
- 1 Atmosphäre
 - 2 Wasserhülle im Mittel 3 km
 - 3 Lithosphäre (Gesteinshülle) um 100 km
 - 4 Erdmantel 2800 km
 - 5 Erdkern 3500 km

Ozeane, Atmosphäre und Wasserdampf sind die Ursache der auffallenden Blaufärbung; die Erde – der blaue Planet (Bild oben).

Das Innere der Erde ist schalenförmig aufgebaut (Abbildung): Die Lithosphäre bildet die Gesteinshülle mit der Erdkruste als feste äussere Haut. Diese ist vergleichsweise dünner als eine Eischale. Unter den Kontinenten liegen Krustengesteine in einer Mächtigkeit von 20–60 km. Sie weisen eine etwas geringere Dichte auf als die basaltischen, welche die nur 5 km dicke Kruste unter den Ozeanen aufbauen. Die gesamte Lithosphäre besteht aus einem Mosaik von Platten, die sich entlang ihrer Ränder gegenseitig bewegen: Plattentektonik. Der Erdmantel ist eine zähe, 1000–3700°C heisse Masse aus schwereren Mineralien mit vorwiegend Silizium, Eisen, Magnesium und Calcium. Der Erdkern aus sehr dichtem Eisen und Nickel dürfte über 4000°C aufweisen. Der Erdmagnetismus entsteht vermutlich in der Grenzzone zwischen Mantel und Erdkern.

In mehreren Schichten umhüllt die Atmosphäre die Erde. In der untersten, der Troposphäre, spielen sich die eigentlichen Wettervorgänge ab. Ihre obere Grenze liegt zwischen 10 und 17 km Höhe. Darüber folgt die Stratosphäre, wo sich zwischen 30 und 50 km Höhe eine Ozonschicht gebildet hat, die die UV-Strahlung grösstenteils absorbiert. Von der Exosphäre, der Übergangszone in den Weltraum, weiss man, dass sie in Form verein-

zelter Wasserstoff-Moleküle bis 200000 km hinausreicht. Gesamthaft setzt sich die Luft-hülle aus 78% Stickstoff, 21% Sauerstoff, 1% Edelgasen sowie 0,04% Kohlendioxid zusammen.

Die Entwicklung der Erde – ein Sonderfall

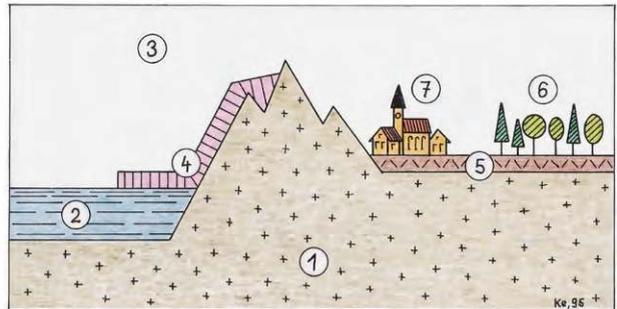
Was die Erde besonders auszeichnet

Wie eingangs dargelegt worden ist, entstand die Erde gleichzeitig mit den übrigen Planeten vor 4,5 Mia Jahren. Sie ist ein typischer Vertreter der erdähnlichen Gesteins- und Metallplaneten. Aus diesen allgemeinen Merkmalen zu schliessen, ist sie kein aussergewöhnlicher Wandelstern. Bei näherer Betrachtung aber setzt sie sich trotzdem von sämtlichen anderen Gestirnen des Sonnensystems deutlich ab: Ihre Kruste ist auch heute noch nicht stabil, sondern wird durch plattentektonische Vorgänge dauernd verändert. Ihre Oberfläche wird zu $\frac{2}{3}$ von flüssigem Wasser, den Ozeanen, bedeckt. Ihre Atmosphäre enthält einen hohen Prozentsatz freien Sauerstoffs (O_2) und eine Schicht Ozon (O_3). Sie besitzt eine Biosphäre, das heisst eine Hülle, in der sich Leben entwickelt hat (Abbildung Geosphären).

Diese wichtigsten Besonderheiten stehen im Planetensystem einzigartig da und sind daher einiger Erklärungen wert. Sie sind zuerst einmal eine Folge der Entfernung der Erde von der Sonne, indem diese auf der Erde gerade diejenige Strahlungsintensität bewirkt, die zu einem Temperaturspektrum führt, in welchem das Wasser vorwiegend in der flüssigen Phase (0–100°C) auftritt. Zudem liegen Volumen und Masse der Erde innerhalb einer kritischen Spanne, in der das Innere heiss und zähplastisch gehalten wird, aber doch eine kühle Oberfläche möglich ist. Die Erdmasse erzeugt genügend grosse Gravitationskräfte, um Gase und Dampf einer Atmosphäre festhalten zu können. Aus all dem geht hervor, dass die Erde parallel zu der normalen, üblichen Entwicklung eine ihr eigene Evolution durchgemacht haben muss.

Vom Materiehaufen zur hoch differenzierten Planetenkugel

Entgegen älterer Auffassungen begann die Erde ihre Laufbahn nicht als glühende, flüssige Kugel, sondern als «kühler», aus Materiebrocken zusammengestückelter Körper. In dieser Frühphase dürfte die Erde von einer solaren Gasatmosphäre aus Wasserstoff und Helium eingehüllt gewesen sein. Mit der zunehmenden Erhitzung der Ursonne und dem einsetzenden Sonnenwind wurde diese aber wohl bereits vor 4,4 Mia Jahren regelrecht in den Weltraum hinausgepflegt. Durch Einverleibung einschlagender Meteorite und durch Anschweissen kleinerer Sonnennebel-Partikel wuchs die Protoerde bis vor 4 Mia Jahren auf nahezu heutige Grösse heran. Die Massenzunahme liess die Gravitation und damit auch Druck und Temperatur im Erdinneren stark ansteigen. Die laufende Aufnahme von Partikeln und Brocken mit radioaktiven Isotopen sowie die durch das 500 Mio Jahre dauernde Meteoriten-Bombardement erzeugte Aufprallenergie führten zu zusätzlicher Erhitzung. Nach wenigen 100 Mio Jahren war der Schmelzpunkt des Eisens erreicht, worauf der Kern und in der Folge die gesamte Erdkugel aufschmolz. Diese Prozesse führten zu einer «inneren Differenzierung» der Materiemassen der Erde, indem die schwereren Metalle in den Kern absanken, während die leichteren Gesteinsschmelzen nach oben stiegen, in sich wieder nach Dichte gegliedert. Damit war die Grobstruktur des Schalenbaus hergestellt.



Als Einmaligkeit unter allen Planeten weist die Erde eine Reihe Geosphären auf, die alle miteinander vernetzt sind und sich gegenseitig beeinflussen.

Atmosphäre und Ozeane

Die thermischen Umwälzungen im Erdinneren bewirkten auch eine Entgasung der Schmelzen. Vor 4 Mia Jahren setzte als Folge der Beruhigung im Erdinneren und der von aussen eindringenden Abkühlung die Erstarrung der Erdkruste ein, während sich die ausgestossenen Gase zu einer zweiten, diesmal erdeigenen Atmosphäre aus H_2O , CO_2 , CO (Kohlenmonoxid), N_2 (Stickstoff) sowie Methan und Ammoniak vereinigten. Diese Lufthülle war noch ohne O_2 (Sauerstoff), enthielt aber bald soviel Wasserdampf (H_2O), dass er abzuregnen begann und die Erde rascher abkühlte. Weitere grosse Mengen an Wasser dürften Wassereis-Meteoriten von aussen zugeführt haben. Die tieferen Becken der Erdoberfläche füllten sich mit Wasser, der Ozean war geboren.

Entstehung des Lebens

Nach neuen Erkenntnissen war bereits vor 3,8 Mia Jahren ein Entwicklungsstand erreicht, der für die Entstehung von Leben ein günstiges Milieu anbot: Komplexe Kohlenwasserstoffe hatten sich im Ozean angereichert. Sein Wasser wies genügend hohe Temperaturen für biologische Prozesse auf. Die Wolkendecke war nicht mehr geschlossen und liess Sonnenlicht durchstrahlen. Wie dann aber in und aus dieser «Ursuppe» Leben mit seiner hochorganisierten komplexen inneren Ordnung entstehen konnte, ist noch immer weitgehend rätselhaft. Die ältesten heute bekannten Strukturen in Gesteinen, die auf Organismen oder hochmolekulare organische Stoffe hinweisen, sind auf etwa 3,5 Mia Jahre datiert worden.

Fotosynthese und Evolution der Atmosphäre

Die frühesten Lebewesen gewannen ihre zum Leben und Wachsen nötigen Stoffe aus Schwefelverbindungen. Irgendwann vor mehr als 3 Mia Jahren machten dann gewisse Algen die fantastische und umwälzende Erfindung der Fotosynthese: Mit Hilfe von Chlorophyll und Sonnenlicht gelang ihnen

die Synthese von Zucker (Kohlenhydrate als körpereigene Stoffe) aus dem im Überfluss vorhandenen CO_2 der Atmosphäre. Der dabei anfallende und ausgeschiedene Sauerstoff reicherte sich vorerst im Ozean an und begann vor 2 Mia Jahren in die Atmosphäre zu diffundieren. Im Gegenzug wurde dadurch der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre auf schliesslich heute 0,04% heruntersetzt.

Als der Sauerstoff rund 1% der Gase der Lufthülle ausmachte, wurde daraus langsam unter der Einwirkung der Sonnenstrahlung die Ozonschicht aufgebaut. Damit war es vor 700 Mio Jahren möglich geworden, dass die Organismen die Meeresoberfläche und schliesslich auch die Kontinente besiedeln konnten. Angeregt durch die zahlreichen neu erschlossenen Lebensräume setzte vor 600 Mio Jahren eine sprunghafte Evolution der Lebewesen ein. Kurz hintereinander treten Frühformen aller heutiger Tierstämme auf. Die ersten ausgedehnten Wälder vor 420 Mio Jahren und die formenreiche Fauna lassen keinen Zweifel daran, dass das heutige Sauerstoff-Niveau erreicht war.

Das labile Gleichgewicht

Seither, also seit mehr als 400 Mio Jahren, muss ein ausgewogenes Gleichgewicht zwischen den Gasen der Atmosphäre und den sie verbrauchenden oder produzierenden Organismen geherrscht haben. Und heute? Heute ist der Mensch dabei, dieses höchst diffizile Gleichgewicht durch den ungeheuerlichen Ausstoss an schädlichen Stoffen ins Wanken zu bringen.

Mond

Äquatordurchmesser: 3476 km
 Rotationszeit um die eigene Achse: 27 Tage 7 h
 Masse in Erdmassen: 0,012
 Dichte in g/cm^3 : 3,3
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 0,165
 Mittlere Entfernung von der Erde: 384 400 km
 Umlaufzeit um die Erde: 27 Tage 7 h
 Mittlere Bahngeschwindigkeit: 3670 km/h

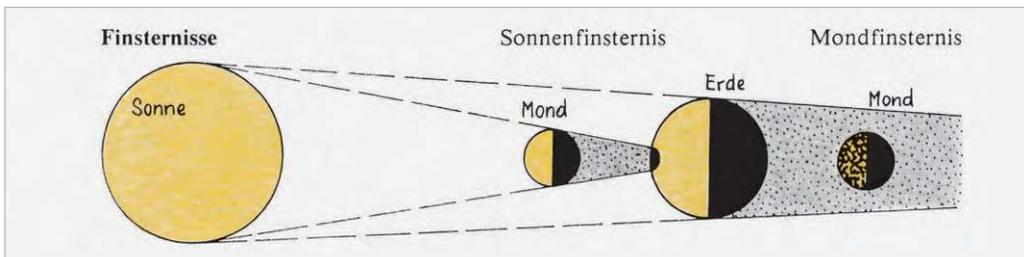


Der Mond kreist um die Erde und mit ihr um die Sonne. Er hat weder Lufthülle noch Wasser; darum ist auch kein Leben möglich. Die Oberfläche zeigt Täler, Ebenen und bis zu 11 000 m hohe Gebirge. Sie ist übersät mit Tausenden kleiner und grosser Krater, die fast ausschliesslich auf Meteoriteneinschläge zurückzuführen sind (Bild oben). Diese Impaktereignisse gehen vorwiegend auf das Konto des kosmischen Bombardements vor 4,5–4 Mia Jahren. Viele Ringgebirge, die bis mehrere Hundert km Durchmesser aufweisen können, sind von der Erde aus schon mit einem Feldstecher erkennbar. Vor 3,8–2,8 Mia Jahren führten gewaltige Ausflüsse von Magma zur Entstehung der «Mondmeere», welche als dunkle Flecken auch von blossen Auge sichtbar sind.

Zwischen 1969 und 1972 landeten 12 Astronauten auf dem Mond. Anhand der von ihnen gesammelten Gesteinsproben konnte festgestellt werden, dass das Mondgestein ähnliche Zusammensetzungen aufweist wie das Erdgestein: blasige, kristalline und magmatische Gesteine, vor allem Basalte, und

Mondstaub mit Teilchen auch unter 1 cm Grösse. Aus magnetisierten und eingeregelteten Mineralkörnern kann geschlossen werden, dass der Mond ähnlich wie die Erde einen eisenhaltigen Metallkern besitzt, der aber bereits vor etwa 3 Mia Jahren erstarrt ist.

Wegen der geringen Masse beträgt die Anziehungskraft des Mondes nur $\frac{1}{6}$ derjenigen der Erde. Auf der Sonnenseite herrschen Temperaturen bis zu $+120^\circ\text{C}$, auf der Nachtseite aber bis -150°C , da schützende Wolkendecke und Atmosphäre fehlen. Mondjahr und Mondtag dauern gleich lang, weil sich der Erdtrabant während eines Umlaufs um die Erde gerade einmal um seine Achse dreht; aus diesem Grund wendet er uns immer die gleiche Seite zu. Da er nicht selbst leuchtet, sondern nur das Sonnenlicht reflektiert, durchläuft er während eines Mondjahres alle Lichtgestalten von Neumond über Vollmond bis wieder zu Neumond. Besondere Stellungen des Mondes zu Sonne und Erde führen zu den Finsternissen (Abbildung).



Mars

Äquatordurchmesser: 6790 km

Rotationszeit um die eigene Achse: 24 h 37 min

Masse in Erdmassen: 0,11

Dichte in g/cm^3 : 3,9

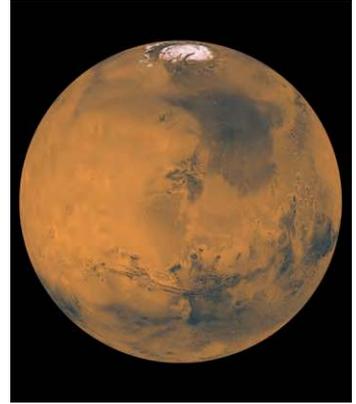
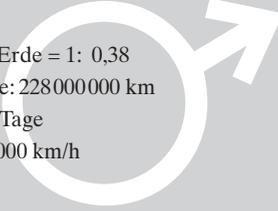
Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 0,38

Mittlere Entfernung von der Sonne: 228 000 000 km

Umlaufzeit um die Sonne: 1 J 312 Tage

Mittlere Bahngeschwindigkeit: 87 000 km/h

Anzahl Monde: 2

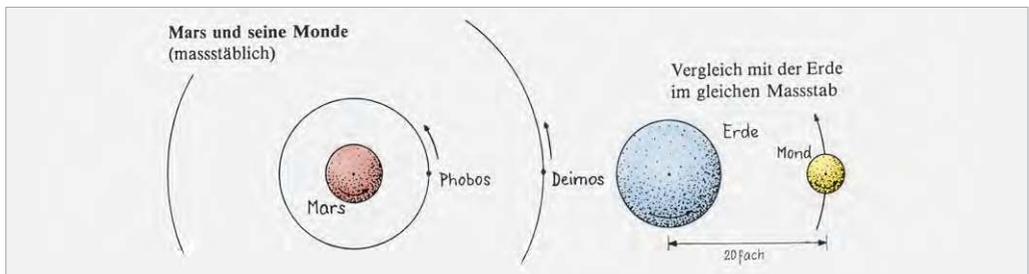


Mars erinnert in vielerlei Hinsicht an unsere Erde, weshalb man Leben auf diesem Planeten immer noch als möglich erachtet. Erst seit 1965, als die erste Sonde zum Mars geschickt worden war, kennt man die dortige Atmosphäre und die Struktur der Oberfläche genauer. Dabei erwiesen sich die berühmten Marskanäle, die intelligente Wesen erbaut hätten, als nicht existent. Die rötliche Farbe des Planeten wird durch Eisenoxide (Rost-ähnliche Verbindungen) im Boden hervorgerufen. Die dunkleren Flecken, die von den ersten Beobachtern für Meere gehalten wurden, sind wie auf dem Mond Magmaergüsse (Bild oben). Nebst vielen Meteoritenkratern besitzt Mars auch echte Vulkane. Unter ihnen ist Olympus Mons mit 26 000 m Höhe und 650 km Basisdurchmesser der gewaltigste und der höchste bekannte Berg im Sonnensystem. Gewaltige Bruchsysteme zeugen von der einstigen tektonischen Aktivität (Abbildungen).

Es gibt keine Anzeichen für derzeit flüssiges Wasser; die ganze Oberfläche ist Wüste.

Hingegen deuten Trockentäler mit Fließstrukturen auf ehemaliges Vorhandensein von Wasser. An beiden Polen finden sich weisse Kappen, die einerseits aus Wassereis wie auf der Erde, andererseits aber auch aus Trockeneis (Kohlendioxideis) bestehen. Ganz allgemein ist im Marsboden in Form von Permafrosteis viel Wasser gespeichert. Auf dem Planeten abgesetzte Marsmobile (Abbildung) suchen deshalb noch immer nach Spuren von eventuellem primitivem Leben.

Mars verfügt über eine Atmosphäre, die allerdings 125mal dünner ist als die irdische. Sie besteht grösstenteils aus Kohlendioxid (95%) und enthält ferner 3% Stickstoff sowie 0,4% Sauerstoff. Damit erklären sich auch die grossen Temperatur-Schwankungen von maximal $+20^\circ\text{C}$ am Äquator als Tageshöchstwerte und -123°C nachts. Die teils gewaltigen Trockentäler und kolossale Erdrutsche an Bergflanken sind Hinweise, dass Mars vor Jahrmilliarden in eine dichte, wasserdampfreiche Atmosphäre eingehüllt war.



Seit den 1970er Jahren laufen zahlreiche Forschungsprogramme zum Mars, indem Satelliten den Planeten umrunden, Sonden auf ihm landen und Roboterfahrzeuge seine Oberfläche erforschen. Bis 2030 soll schliesslich auch der Mensch auf dem Mars direkt Fuss fassen.

Zwei Monde umkreisen Mars: Phobos und Deimos. Ihre mittleren Durchmesser betragen 20 km und 13 km. Deimos benötigt für einen Umlauf um den Mutterplaneten 30 h 18 min, Phobos schafft es in 7 h 39 min. Beide sind mit Meteoriteneinschlägen bedeckte, Kartoffel-förmige Kleinkörper. Wahrscheinlich handelt es sich bei diesen Minimonden um eingefangene Planetoiden.



Marsfahrzeug Sojourner, das 1997 bei der spektakulären Mission «Mars-Pathfinder» für direkte Bodenuntersuchungen zum Einsatz kam.



Olympus Mons ist mit 26 400 m der höchste Berg im Planetensystem. Die Caldera (Einsturzkrater) hat allein schon einen Durchmesser von 130 km.



In die Kartenskizze der Schweiz und Umgebung sind massstäblich korrekt die Umrisse und die Caldera von Olympus Mons rot eingezeichnet.



Die Valles Marineris ziehen sich als Grabenbruchsystem wenig südlich des Mars-Äquators über 4000 km hin, sind bis 700 km breit und 7000 m tief. Vergleich: Oberrheinische Tiefebene als grösster Grabenbruch Europas: 400 km lang, 50 km breit, 4000 m tief (heute 2500 m aufgefüllt).

Ceres; Planetoiden oder Asteroiden

Äquatordurchmesser: 1000 km

Rotationszeit um die eigene Achse: 9 h

Mittlere Entfernung von der Sonne: 414 000 000 km

Umlaufzeit um die Sonne: 4 J 221 Tage

Dichte in g/cm^3 : 5

Geschätzte Anzahl aller Planetoiden: über 1 000 000

Beobachtete Anzahl Planetoiden: 330 000

Gesamte Masse aller Planetoiden (unsicher): 1/100 Erdmasse

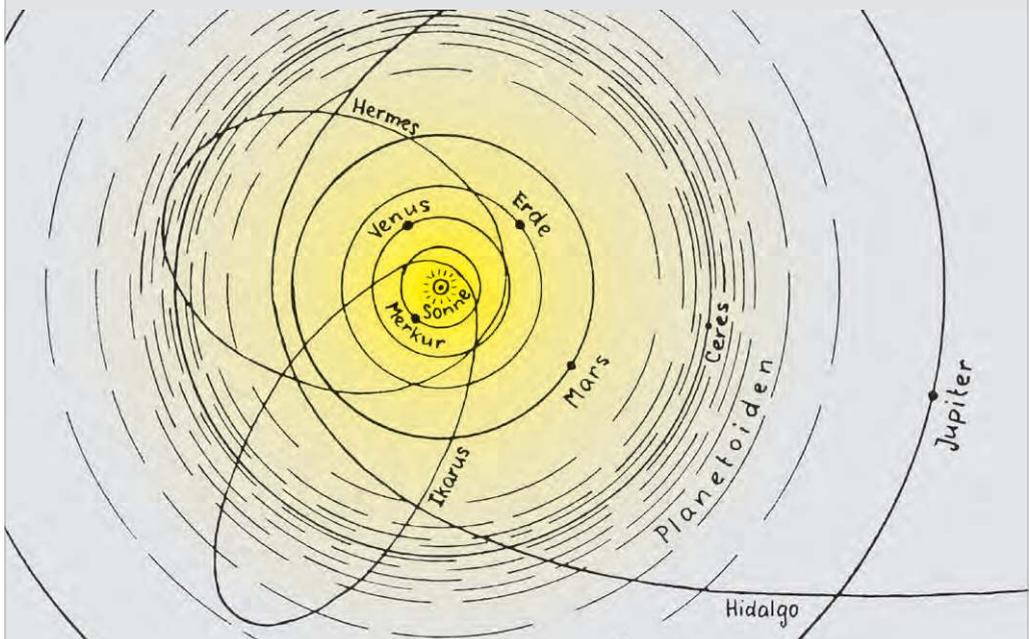
Erforschung der Ceres

Am 27.09.07 startete die Nasa die Raumsonde Dawn ins All. Sie soll in 8 Jahren und einer Reise von 5 Milliarden km Ceres und Vesta erreichen und aus nächster Nähe erforschen.

In der Lücke zwischen Mars und Jupiter laufen Tausende kleiner Weltraumkörper von der Grösse weniger km bis 1000 km als Kleinplaneten oder Planetoiden (Planeten-ähnlich) oder auch Asteroiden (Stern-ähnlich) um die Sonne. Es handelt sich ausser den grössten durchwegs um unregelmässig geformte Felsbrocken, die mit Einschlagkra-

tern bedeckt sind (Abbildung Ida). Ihre Splitterformen, ihre grosse Anzahl und ihre Häufung zwischen Mars und Jupiter legten die Vermutung nahe, dass es sich um die Überreste eines durch eine Naturkatastrophe zersprengten Planeten handeln könnte. Heute ist man aber der Auffassung, dass sie als unfertige Planeten, als kleinere Zusam-

Planetoiden-Bahnen mit Sonderfällen (massstäblich)



menballungen von Materie des Sonnennebels zu betrachten sind und somit Zeugen der Urzeit des Planetensystems darstellen.

Um dem Wesen dieser Urmaterie genauer auf die Spur zu kommen, wurde am 28.09.07 die Sonde Dawn gestartet. Sie wird allerdings erst in 8 Jahren ihr Ziel, die beiden grossen Planetoiden Ceres und Vesta, erreichen und erforschen können (Abbildung Grössen).

Der grösste dieser Kleinplaneten, Ceres, wurde erstmals 1801 beobachtet. Seither sind in jedem Jahr mehrere Planetoiden entdeckt worden, in den letzten Jahrzehnten gar Dutzende. Viele dieser Himmelskörper halten sich nicht an den Planetoiden-Gürtel, sondern beschreiben exzentrische Ellipsen, indem sie die Bahnen anderer Planeten kreuzen (Abbildung Bahnen). Ein grösserer Teil der die Erde treffenden Meteoriten scheint aus ihrem Bereich zu stammen (Abbildung Meteorit).

Aufgrund einer Entschliessung der IAU (Internationale Astronomische Union) im Jahre 2006 erhielt Ceres als deutlich grösster



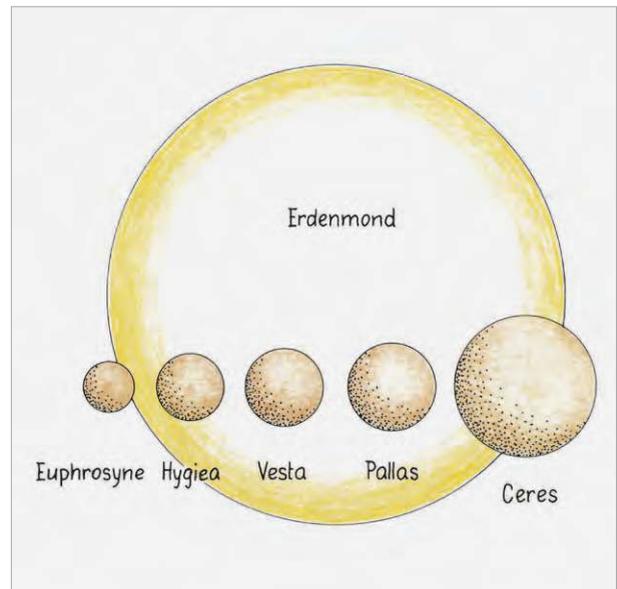
Der abgebildete Eisenmeteorit mit einigen 10er Tonnen Gewicht schlug in Vorzeiten in Namibia (Südafrika) ein. Meteoroiden sind Reste der Urmaterie des Sonnensystems und sind meist «Brocken» aus dem Planetoidengürtel. Geraten sie in den Anziehungsbereich der Erde, so stürzen sie als Meteorite auf sie herunter.

Die fünf grössten Planetoiden im Vergleich der Ausmasse mit dem Erdenmond. Ceres misst rund 1000 km, Pallas bereits nur noch gute 500 km.

Planetoid einen neuen, erhöhten Status als Zwergplanet. Siehe dazu am Schluss des Führers «Planet, Zwergplanet oder Kleinkörper?»



Ida als einer der Planetoiden umrundet wie Ceres auf eigener Bahn die Sonne. Sie ist aber mit 50x20 km so klein, dass ihre Schwerkraft keine Kugelform erzeugen kann. Sie erinnert daher an eine Kartoffel. Nebst ihrer Form weist sie noch die absolute Besonderheit des Besitzes eines winzigen Mondes auf, denn der nur 5x3 km messende Dactyl (am rechten Bildrand) umkreist Ida wie unser Mond die Erde.



Jupiter

Äquatordurchmesser: 144 000 km
 Rotationszeit um die eigene Achse: 9 h 50 min
 Masse in Erdmassen: 318
 Dichte in g/cm^3 : 1,3
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 2,6
 Mittlere Entfernung von der Sonne: 778 000 000 km
 Umlaufzeit um die Sonne: 11 J 315 Tage
 Mittlere Bahngeschwindigkeit: 47 200 km/h
 Anzahl Monde (2007): 63

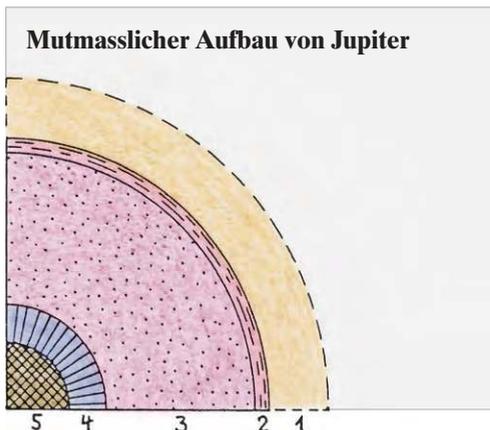


Jupiter ist nicht nur der grösste, sondern auch der lebhafteste Planet: Er rotiert in weniger als 10 h einmal, das heisst in kürzerer Zeit als alle anderen Planeten. Er übertrifft die Erde im Durchmesser 11mal, an Masse 320mal und an Volumen über 1000mal. Im weiteren beträgt seine Masse mehr als das Doppelte derjenigen aller übrigen Planeten. In der Wolkenhülle des Riesenplaneten zeichnen sich farbige Gase in gut sichtbaren Streifen ab, die sich dauernd verändern (Bild oben). Südlich des Äquators schwebt seit etlichen Jahrhunderten ein riesiger roter Fleck, der grösser ist als die Erde und dessen Ursprung erst Jupitersonden klären konnten. Es muss sich um einen gewaltigen Orkan in der Atmosphäre handeln. Seine Farbe dürfte auf roten Phosphor zurückzuführen sein. Die Oberseite der Wolkenhülle weist maximale

Temperaturen von -145°C auf. Die Zusammensetzung der Atmosphäre und das Innere des Riesenplaneten weichen völlig von den erdähnlichen Planeten ab (Abbildung).

Im Juli 1994 kam es zu einem spektakulären Einsturz des Kometen Shoemaker-Levy, nachdem er ins Gravitationsfeld des Riesenplaneten geraten war. Der Komet zerbrach in Teilstücke bis zu 4 km Grösse, die als Meteoriten in der Atmosphäre Jupiters einschlugen und verglühten.

Die Sonde Voyager I fotografierte 1979 einen «Jupiterrings», der allerdings viel weniger ausgeprägt ist als derjenige des Saturn. Er umgürtet den Jupiter 57 000 km über dem Wolkenmeer, ist rund 600 km breit und nur einige km dick. Er ist so lichtschwach, dass er von der Erde aus gesehen durch den Planeten überstrahlt wird. Vermutlich setzt er sich aus Gesteins- und Eisbrocken zusammen. Der Ring könnte einem innersten Jupitermond entsprechen, der sich nicht zu einem grösseren Körper verdichtet hat.



- 1 Atmosphäre: zur Hauptsache Wasserstoff und Helium, ferner Ammoniak und Methan
- 2 Übergangszone: flüssiger Wasserstoff
- 3 Mantel: Wasserstoff und Helium, verfestigt mit «metallischem Charakter»
- 4 Äusserer Kern: Gefrorenes Methan, Ammoniak und Wasser
- 5 Innerer Kern: Metalle und Gesteine

Monde des Jupiter

Jupiter bildet mit seinen vielen Satelliten, wobei die grössten Planeten- ausmasse wie Mars und Merkur erreichen, eine Art «Miniatur-Sonnen- system». Bereits Galilei entdeckte 1610 die 4 bedeutendsten Monde. Um 1985 kannte man total 14 Monde. Seither wurden von den Pioneer- und Voyager-Sonden weitere kleine Monde gefunden, sodass die Zahl bis 2007 auf 63 Satelliten angestiegen ist.

Das System der Jupitermonde

2 I E G K



Innere Monde

4 grosse mit Kugelform.
Durchmesser bis über 5000 km,
Vergleichbar mit Erdenmond.
Kreisförmige Umlaufbahnen in
der Äquatorebene Jupiters.
Rechtläufig (Drehsinn wie Jupiter).
Echte, ursprüngliche Monde.
Zudem einige Kleinstmonde.

0 2 4 Mio km

Mittlere Monde

kleine, unregelmässige «Felsbrocken».
Durchmesser 10–170 km sowie kleinste mit 1–10 km,
ähnlich Planetoiden oder Marsmonde.
Stärker elliptische Umlaufbahnen, bis 30° zur
Äquatorebene geneigt.

Meist rechtläufig

Vermutlich eingefangene Planetoiden.

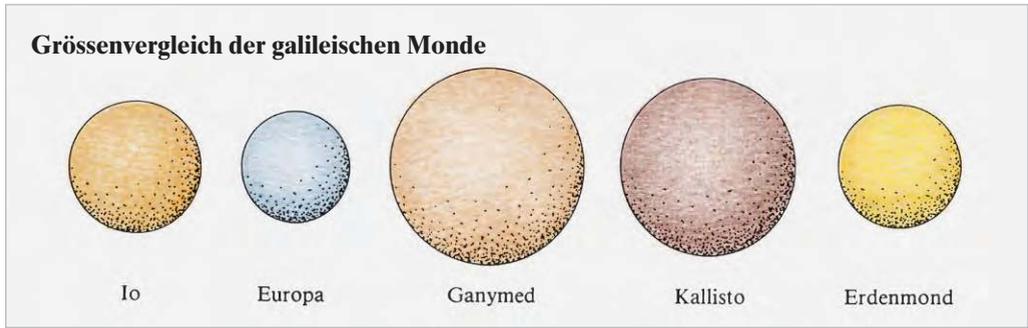
Äussere Monde

Meist rückläufig.

Die 4 galileischen Monde

Diese grossen Trabanten lassen sich in ihren Bewegungen bereits mit einem Feldstecher beobachten. Ihre wichtigsten Daten sind in der Tabelle zusammengestellt.

Nr.	Name	Durch- messer	Abstand von J (δ)	Umlaufzeit um J (δ)	Dichte	Reflexion (Albedo)	Temp. am Äquator	
							mittags	nachts
I	Io	3642 km	422 000 km	1,8 Tage	3,5 g/cm ³	63%	-133 °C	-190 °C
II	Europa	3188 km	671 000 km	3,6 Tage	3,0 g/cm ³	64%	-133 °C	-190 °C
III	Ganymed	5262 km	1 071 000 km	7,1 Tage	1,9 g/cm ³	43%	-119 °C	-190 °C
IV	Kallisto	4806 km	1 844 000 km	16,1 Tage	1,8 g/cm ³	17%	-106 °C	-190 °C
Vgl.	Erdenmond	3476 km	384 000 km	27,3 Tage	3,3 g/cm ³	7%	+120 °C	-150 °C



Die galileischen Monde geben Hinweise auf die Entstehungsgeschichte des Sonnensystems. In den frühesten Jahrmillionen müssen gewaltige Mengen Meteoriten auf die noch jungen Planeten und ihre Trabanten niedergeprasselt sein.

Der von Jupiter weit entfernte Mond **Kallisto** ist bereits in dieser Frühphase erstarrt, ist er doch mit Einschlägen und Riesenkratern geradezu übersät. Je näher die Monde den Jupiter umlaufen, umso stärker werden sie von diesem beeinflusst und desto später sind sie ausgefroren. In den letzten 4 Mia Jahren war die Meteoritenhäufigkeit nur noch ge-

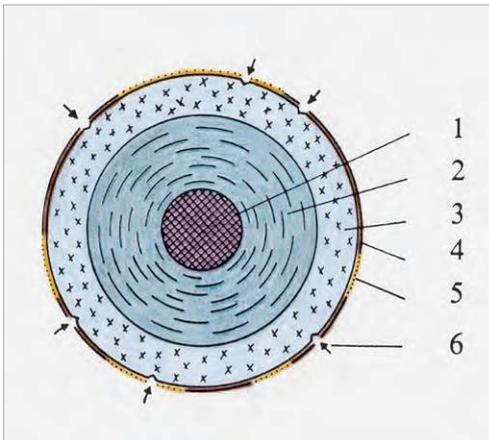
ring, sodass die Zahl der Astrobleme äusserst klein geworden ist.

Ganymed (Abbildung unten) hat bereits ausgedehnte helle Gebiete, die nur dünn mit Meteoritenstaub bedeckt sind. Einschlagkrater sind weniger häufig und kleiner als auf Kallisto.

Europa weist nur noch eine geringe Zahl kleiner Krater sowie unbedeutend Meteoritenstaub auf. Überall ist der weisse Eispanzer erkennbar, weshalb die Albedo (Rückstrahlvermögen) sehr hoch ist (Tabelle).

Die Oberfläche von **Io** ist mit Salzpflanzen, Schwefelverbindungen und Lavaergüssen bedeckt, welche die grellen Farben des Mondes erzeugen. Einschläge fehlen ganz. Io zeigt im Gegenteil äusserst aktiven Vulkanismus, wie er im Sonnensystem einzig dasteht. Die Nähe Jupiters ruft hier starke Gezeitenkräfte hervor, durch die das Innere dieses Trabanten ständig aufgeheizt wird.

Je weiter aussen der Satellit, desto geringer seine Dichte (Tabelle), das heisst sein Erstarren erfolgte so rasch, dass auf ihm auch noch leichter flüchtige Stoffe einfrieren konnten. In Jupiternähe erfolgte die Abkühlung viel langsamer, da auch der Riesenplanet seine Wärme (in der Frühphase der Entstehung war er oberflächlich um 1500°C heiss) nur langsam abgegeben hat. Bei langsamer Abkühlung und hohem Gezeitendruck in Jupiternähe wurden den inneren Monden mehr leichte Elemente und Substanzen ausgetrieben, ihre Dichte ist denn auch wesentlich höher.



- 1 fester, metallischer Kern
- 2 Mantel: Ozean aus heissem Wasser
- 3 Kruste: gefrorenes Wasser, Eispanzer
- 4 dunkle Platten, dicke Schichten Meteoritenstaub
- 5 helle Zonen, dünne Schichten Meteoritenstaub
- 6 Einschlagkrater, weiss, reichen bis auf den Eispanzer

Saturn

Äquatordurchmesser: 120 800 km
 Rotationszeit um die eigene Achse: 10 h 14 min
 Masse in Erdmassen: 95
 Dichte in g/cm^3 : 0,7
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 0,92
 Mittlere Entfernung von der Sonne: 1433000000 km
 Umlaufzeit um die Sonne: 29 J 167 Tage
 Mittlere Bahngeschwindigkeit: 34 600 km/h
 Anzahl Monde (2007): 60

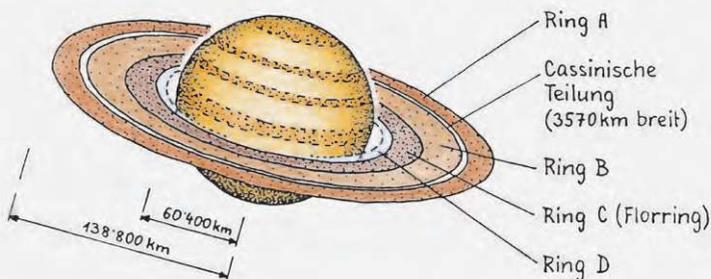


Der zweitgrösste Planet in unserem Sonnensystem und einzig in seiner Art ist Saturn (Bild oben). Er hat den 10fachen Durchmesser der Erde und rotiert doppelt so schnell um seine Achse, weshalb er an den Polen stark abgeplattet ist. Der innere Aufbau des Saturn ist jupiterähnlich. Er hat mit $0,7 \text{ g/cm}^3$ die geringste mittlere Dichte aller Planeten (Erde $5,5 \text{ g/cm}^3$). Seine Atmosphäre enthält über 80% Wasserstoff und über 10% Helium. Die Wolkenhülle aus Methan und Ammoniak zeigt wie bei Jupiter wirbelförmige Strömungen. Am Äquator herrschen Windgeschwindigkeiten bis 1700 km/h. Die Temperaturen liegen bei -180°C .

Die Saturnringe

1655 wurde das Ringsystem um den Riesenplaneten entdeckt, aber erst 1857 konnte nachgewiesen werden, dass es kein festes oder starres Gebilde ist, sondern dass es sich aus Einzelpartikeln zusammensetzen muss. Die äusseren Partien rotieren nämlich langsamer um Saturn als die inneren. Es handelt sich zum Teil um feinen Staub und um Eiskristalle aus Methan und Ammoniak; hauptsächlich aber sind es Gesteins- und Wassereisbrocken von cm bis 10 m Durchmesser. Die Raumsonde Voyager I lieferte 1980 spektakuläre Bilder. Darnach sind die bisher bekannten Ringe (Abbildung) in Hunderte von Einzelringen unterteilt, was den Eindruck einer gigantischen Schallplatte erweckt. Das Ringsystem liegt genau in der Äquatorebene des Planeten und ist nur 1–3 km dick.

Ansicht des Saturn



Monde des Saturn

Das System der Saturnmonde, das durch teleskopische Entdeckungen bis 1966 auf 10 Satelliten angewachsen war, wurde durch die zahlreichen Flüge von Raumsonden bis heute auf total 60 Trabanten erweitert; Saturn ist nebst Jupiter am reichsten an Monden.

Die Ringmonde bewegen sich an den Grenzlinien einzelner Ringe und spielen die Rolle von Wachhunden, indem sie durch Gravitation und Energieaustausch die Partikel innerhalb der Ringstreifen halten.

Die inneren Monde weisen eine geringe Dichte von wenig über 1 g/cm^3 auf; sie werden vorwiegend aus Wassereis mit einem Gesteinskern aufgebaut. Ähnlich dem Erdenmond sind sie von Kratern übersät.

Die äusseren Monde zeigen ausser Titan mit den inneren vergleichbare Merkmale: geringe Dichte, viel Wassereis, Meteoriteneinschläge.

Geheimnisvoller Mond Titan

Er ist mit 5150 km Durchmesser der zweitgrösste Mond im Sonnensystem und deutlich grösser als der Planet Merkur. Als einziger Trabant besitzt er eine Wolkenhülle, die orange-rot und vollkommen dicht ist. Sie besteht aus höheren Kohlenwasserstoffen (Äthan, Äthylen, Acetylen) und Cyanwasserstoffen. Die Atmosphäre enthält über 80% Stickstoff und zudem Methan. Damit scheint sie ähnlich zusammengesetzt zu sein wie die Uratmosphäre der Erde. Die Temperaturen an der Wolkenoberseite betragen -198°C .

Titan ist aufgrund der Dichte von 2 g/cm^3 je etwa zur Hälfte aus Silikatgestein (Kern) und Eis (Mantel) aufgebaut. Zur Zeit wird die Mission «Cassini», die der Erforschung von Saturn und mit der Sonde «Huygens» seinem Mond Titan diene, weiter ausgewertet (Abbildung). Es zeigt sich bisher, dass an der Mondoberfläche die Temperaturen bei -180°C liegen, weshalb das Methan teils flüssig, teils in festem Zustand vorkommt. Dieser Kohlenwasserstoff scheint auf Titan die entsprechende Rolle zu spielen wie auf der Erde das Wasser, das heisst es existieren Flüsse und Seen aus flüssigem und Gletscher aus gefrorenem Methan. Cyanwasserstoffe sind wichtige Vorstufen beim Aufbau von Aminosäuren, die ihrerseits die chemischen Bausteine der lebenden Substanz bilden. Für eine Synthese komplexer organischer Moleküle dürften aber die Temperaturen viel zu niedrig sein.

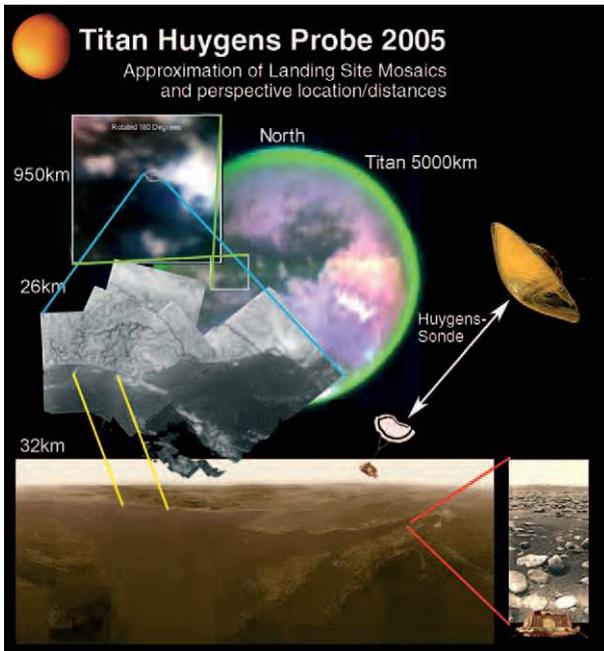
Die Huygens-Sonde nahm während ihrem Abstieg auf den Titan am 14.01.05 eine Reihe Bilder auf:

Oben links: Titan auf einer älteren Voyager-Foto.

Mitte: Titan aus etwa 5000 km Entfernung mit der hier grünlich schimmernden Atmosphäre. Titan-Ausschnitt aus 950 km Höhe. Senkrecht-Aufnahme aus 26 km Höhe.

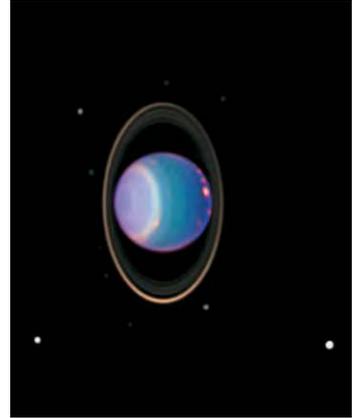
Unten: Schrägaufnahme aus 32 km Entfernung. Deutlich ist ein See aus flüssigem Methan und eine Landschaft mit Bergen zu erkennen.

Rechts unten: Umgebung der Landestelle der Sonde mit Geröllen aus gefrorenem Methan.



Uranus

Äquatordurchmesser: 51300 km
 Rotationszeit um die eigene Achse: ca 17 h
 Masse in Erdmassen: 14,6
 Dichte in g/cm^3 : 1,2
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 0,9
 Mittlere Entfernung von der Sonne: 2870000000 km
 Umlaufzeit um die Sonne: 84 J 5 Tage
 Mittlere Bahngeschwindigkeit: 24500 km/h
 Anzahl Monde (2007): 27



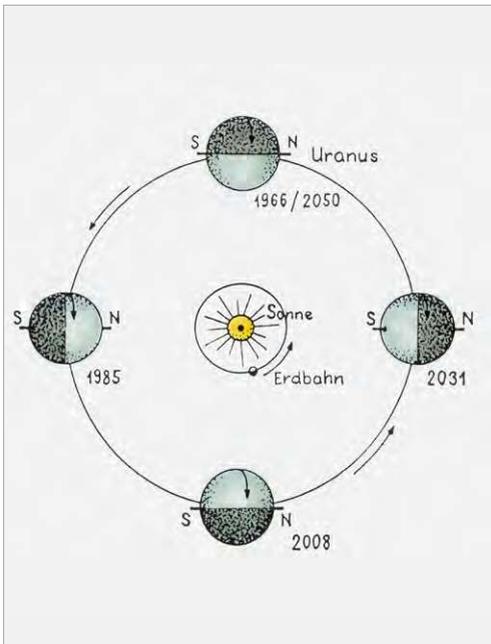
Uranus wurde im Jahre 1781 zufällig vom Astronomen Herschel entdeckt.

Der Planet hat eine dichte, leicht grünlich leuchtende Atmosphäre aus Wasserstoff, Helium und Methan, deren Wolken keinen Blick auf seine Oberfläche gestatten. Der Ammoniak ist bei den tiefen Temperaturen um -170°C ausgefroren. 1977 stellte man fest, dass Uranus ähnlich wie Saturn, aber weniger auffällig, von Ringen umgeben ist (Bild oben).

Uranus wird von vorläufig 27 Monden begleitet, von denen die meisten bereits Namen tragen. Die 5 grössten sind: Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, Oberon. Diese haben Durchmesser von 550 km (Miranda) bis 1630 km (Oberon) und sind damit wesentlich kleiner als der Erdenmond. Anhand des von ihnen reflektierten Sonnenlichtes und ihrer Massen muss angenommen werden, dass sie zu 60% aus Wassereis und zu 40% aus Fels-gestein bestehen.

Die amerikanische Raumsonde Voyager II, die 1981 den Saturn erkundet hat, flog 1986 auch an Uranus vorbei. Von ihr wurden zahlreiche Bilder auch der Monde mit Neuentdeckungen übermittelt.

Eigenartig ist die Neigung der Rotationsachse. Während diese bei anderen Planeten beinahe senkrecht zur Umlaufbahn steht, liegt sie beim Uranus nahezu in der Bahnebene, sodass der Planet gleichsam auf dieser abrollt. So ergibt sich, dass jede Polregion während eines halben Uranus-Jahres dauernd Tag, dann ebenso lang Nacht hat (Abbildung).



Neptun

Äquatordurchmesser: 49500 km
 Rotationszeit um die eigene Achse: ca 16 h
 Masse in Erdmassen: 17,2
 Dichte in g/cm^3 : 1,7
 Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 1,2
 Mittlere Entfernung von der Sonne: 4 500 000 000 km
 Umlaufzeit um die Sonne: 164 J 288 Tage
 Mittlere Bahngeschwindigkeit: 19400 km/h
 Anzahl Monde (2007): 13



Aufgrund von Bahnstörungen, die sich bei Uranus zu Beginn des 19. Jahrhunderts zeigten, berechneten zwei Mathematiker, Leverrier und Adams, unabhängig voneinander die Bahn eines weiteren Planeten ausserhalb Uranus, der dann 1846 vom Astronomen Galle in Berlin gefunden wurde.

Neptun hat eine Atmosphäre, die derjenigen des Jupiters gleicht, aber mit höherem Methan-Anteil. Seine Farbe ist bläulich-grün (Bild oben).

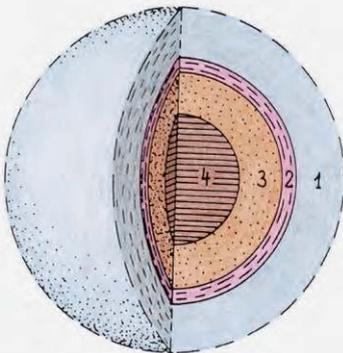
Am 22. Juli 1984 wurde, während Neptun vor einem Fixstern vorbeizog, noch vor der eigentlichen Bedeckung ein kurzfristiger Abfall der Lichtintensität des Stern um 35% registriert. Die Analyse ergab, dass ein etwa

15 km breiter Partikelring 50000 km über der Neptun-Oberfläche die Lichtabsorption hervorgerufen haben müsse. Damit weist auch der äusserste Riesenplanet ähnlich wie Saturn ein allerdings bescheidenes Ringsystem auf. Der Innenbau des Neptun ist nicht bekannt. Aufgrund von Analysen und Berechnungen können aber Modelle aufgestellt werden (Abbildung).

Der ebenfalls 1846 entdeckte erste Neptunmond Triton gehört mit 2700 km Durchmesser zu den grössten Trabanten im Sonnensystem. Sein Abstand von Neptun beträgt 354000 km. Grösse und Abstand sind gut mit dem Erdenmond vergleichbar. Allerdings bewegt sich Triton rückläufig und viel schneller als dieser, nämlich in 5 Tagen 21 h um seinen Zentralplaneten. Er besitzt, was bei Monden eine Ausnahme ist, eine Atmosphäre wie der Saturnmond Titan. Sie ist aber viel dünner und durchsichtig. Bei einer Temperatur von -235°C ist Triton die kälteste Welt im Sonnensystem. Seine Oberfläche ist von gefrorenem Stickstoff überzogen, der aus der Atmosphäre ausfällt.

1949 wurde der zweite Mond Nereide entdeckt. Er ist nur 340 km gross, im Mittel 5560000 km von Neptun entfernt und umläuft diesen in 359 Tagen 21 h. Nereide ist rechtläufig, weist aber für einen Mond eine einmalig exzentrische Bahn auf. Die weiteren Monde wurden von Voyager II entdeckt.

Das Neptunmodell nach Wildt



- 1 Atmosphäre
- 2 Mantel aus verfestigten Gasen
- 3 Eisschicht, gefrorenes Methan
- 4 Steinkern

Pluto

Äquatordurchmesser: 2300 km

Rotationszeit um die eigene Achse: 6 Tage 9 h

Masse in Erdmassen: 0,0026

Dichte in g/cm^3 : 1,75

Schwerkraft/Anziehungskraft bei Erde = 1: 0,02

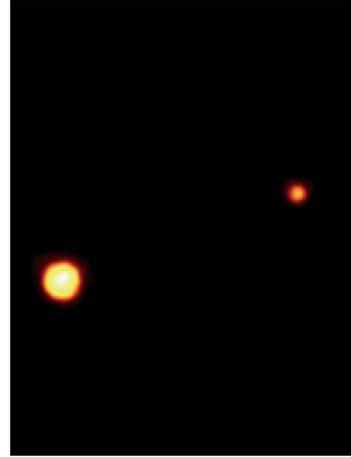
Grösste Entfernung von der Sonne: 7400000000 km

Kleinste Entfernung von der Sonne: 4400000000 km

Umlaufzeit um die Sonne: 247,7 J

Mittlere Bahngeschwindigkeit: 16900 km/h

Anzahl Monde: 1



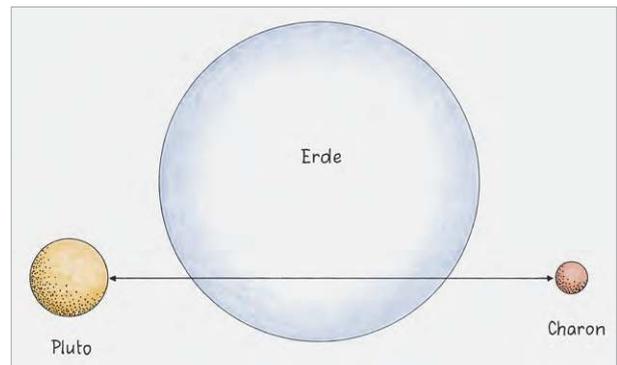
Pluto ist der kleinste und leichteste Planet in unserem Sonnensystem. Er wurde 1930 aufgrund von Berechnungen entdeckt. Da er auf seiner stark elliptischen Bahn sogar diejenige von Neptun schneidet und grosse Ähnlichkeit mit Triton aufweist, nehmen Astronomen an, dass dieser von Neptun eingefangen wurde, Pluto aber diesem Schicksal entgehen konnte.

Ganz überraschend entdeckte man im Juli 1978 einen Plutomond, für den der Name *Charon* vorgeschlagen wurde. In der griechischen Mythologie ist *Charon* der *Fährmann der Unterwelt*. Dieser Trabant hat einen Durchmesser von 1200 km und umkreist seinen Zentralstern gleich schnell, wie dieser rotiert. Das bedeutet, dass vom Pluto aus gesehen der Mond immer an derselben Stelle am Himmel steht.

Bisher hat noch keine Sonde Pluto – Charon erreicht. Das Foto (Bild oben) wurde mit dem Hubble-Teleskop von der Erde aus aufgenommen. Aus Lichtanalysen geht hervor, dass Pluto wie Charon vorwiegend aus Wassereis mit einem Gesteinskern aufgebaut sein dürfte. Die Aussenschicht ist ausgefrorenes Methan, das bei Charon fehlt. An Plutos Oberfläche herrschen Temperaturen von -220°C . Seine dünne Atmosphäre besteht vorwiegend aus Methan, das bei Sonneneinstrahlung von der Oberfläche verdampft und nachher wieder ausfriert.

Planet, Zwergplanet oder Kleinkörper?

Seit den 1990er Jahren sind im Kuiper Gürtel, der ausserhalb des Neptuns liegt, mehr als 800 Asteroiden-Objekte gefunden worden, etliche davon mit Ausmassen wie Pluto. Diese müssten deshalb alle als Planeten anerkannt werden, was aber zu einer *Planeten-Inflation* führen würde. Deshalb und weil Pluto bereits zum Kuiper Gürtel gehört, wurde anlässlich des Astronomen-Kongresses in Prag 2006 beschlossen, Pluto den Planeten-Status abzuerkennen und ihn herunterzustufen. Gleichzeitig wurde eine neue Kategorie von Himmelskörpern festgelegt: *Zwergplaneten*. Diese umrunden die Sonne wie Planeten, sind aber deutlich kleiner als diese, jedoch grösser als Planetoiden/Astero-



Massstäblicher Vergleich in Ausmassen und Abstand von Pluto-Charon mit der Erde.

iden. In Zahlen ausgedrückt heisst das ein Durchmesser zwischen knapp 1000 km und um 3000 km. Das hat zur Folge, dass Pluto und weitere ähnlich grosse Körper des Kuiper Gürtels wie Xena/Eris, aber auch Ceres im Planetoiden- oder Asteroidengürtel neu als Zwergplaneten bezeichnet werden.

Über die Degradierung Plutos dürfte allerdings aus historischen Gründen wohl noch öfters diskutiert werden. Hier in diesem Planeten-Wanderweg bleibt deshalb Pluto noch die Ehre ein Planet zu sein.

Rückblick und Ausblick

Der Planeten-Wanderweg endet hier mit dem äussersten Wandelstern, dem Pluto. Rückblickend wird ein Wanderer sich sagen müssen: Erstaunlich, dass die $1\frac{1}{2}$ m grosse Sonne, 6 km entfernt im Botanischen Garten, über eine derartige Distanz immer noch soviel Macht und Kraft besitzt, dass sie das winzige Kügelchen Pluto in ihrem Bann halten und zwingen kann, unaufhörlich auf elliptischer Bahn um sie zu reisen!

Das Sonnensystem reicht aber noch weiter hinaus. Der Kuiper Gürtel mit seinen wohl Abermillionen Kleinstkörpern würde auf unserem Modellweg erst Mitte Bodensee enden, und bedenken wir, dass darunter einige Tausend Objekte von Pluto-Grösse zu erwarten sind.

Doch wie ginge die Reise ins Weltall nun weiter? Der nächste Fixstern, der vielleicht wie die Sonne auch ein Planetensystem beherrscht, liegt im Sternbild Kentaur und ist rund 4 Lichtjahre von uns entfernt. Dies ergäbe in unserem Modell 40000 km, was bedeutet, dass ein Wanderer die ganze Erde umrunden müsste, um dorthin zu gelangen. Dazwischen fände er nichts als die Leere und Weite des Weltalls. Und trotzdem leuchten in unserer Milchstrasse 100000 Millionen Sonnen. Lässt uns da der Sternenhimmel nicht wieder staunen und bescheiden werden?

Intelligente Lebewesen auf der Erde – und wo noch?

Seit dem 20. Jahrhundert und insbesondere seit den letzten Jahrzehnten stellen sich gebildete Menschen immer wieder die Frage: Gibt es ausser auf der Erde noch irgendwo im Weltall Leben oder sogar Lebewesen auf einer hohen Entwicklungsstufe wie die Menschheit?

In jüngster Zeit erlauben es die technischen Fortschritte in der Instrumentierung den Astronomen, bei fernen Sternen (Sonne) nach Planeten zu forschen. Bisher entdeckten sie bereits zahlreiche planetenähnliche dunkle Begleiter in Jupitergrösse und zudem einige kleinere Körper mit Ausmassen wie unsere Erde. Offen ist aber weiterhin die Frage, ob solche erdähnliche Planeten die Bedingungen für die Entstehung und Entwicklung von Lebewesen überhaupt aufweisen. Erdengrösse hat auch die Venus, aber Leben ist dort absolut undenkbar (siehe bei Venus). Auf der Erde sind die Voraussetzungen für Leben nur aufgrund einer sehr grossen Zahl ganz spezieller Besonderheiten unseres Planeten gegeben. Und selbst bei günstigen Bedingungen müssen noch längst nicht Lebewesen entstehen.

Vor allem aber stellt sich die brennende Frage, ob noch irgendwo im Kosmos menschenähnliche intelligente Wesen existieren. Falls ja, so können sie von der Erde aus nur gerade dann aufgespürt werden, wenn sie eben «jetzt» hoch technisiert sind, sodass ein Kontakt über elektromagnetische Wellen zustande kommen kann. Und bedenken wir, dass die Menschheit seit höchstens 100 Jahren einen hohen Stand der Technik erreicht hat. Was sind schon 100 Jahre innerhalb der

Ausschnitt aus unserer Milchstrasse mit dem offenen Sternhaufen HaChi. Jeder der immensen Zahl heller Punkte ist ein selbst leuchtender Fixstern wie unsere Sonne. Viele von ihnen dürften grössere dunkle Begleiter wie Jupiter besitzen. Ebenfalls sind kleine Planeten zu erwarten. Gibt es unter diesen auch erdähnliche, gar mit Leben?



13,5 Mia. Jahre (13500000000 Jahre) des Bestehens des Weltalls! Wie unwahrscheinlich ist es da, dass Lebewesen auf einem fernen Planeten gerade «jetzt» auf der mindestens gleich hohen Stufe der kulturellen und technischen Entwicklung angelangt sind wie wir. Wenn das nicht übereinstimmt, werden die dort draussen nichts von uns und wir nichts von ihnen erfahren.

Trotz der geringen Chance einer kulturell-technischen Übereinstimmung werden seit 1970 allen Sonden, die unser Sonnen-Planetensystem in die Weite des Weltalls verlassen, Plaketten mit einer Reihe eingraviertes Zeichen als Botschaft mitgegeben (Abbildung Plakette). Diese Symbole sollen, falls eine der Sonden auf einem Planeten mit denkenden menschenähnlichen Wesen landet, erklären, was für Lebewesen dieses Objekt geschaffen haben und woher es kommt. Falls!

Schliesslich ist heute auch zu bedenken, dass die Menschheit eine kritische Phase durchmacht, indem sie im Gefolge ihrer Technisierung das höchst labile Gleichgewicht der irdischen Lebenssphären zu zerstören droht. Dies könnte das bittere Ende der menschlichen Kultur bedeuten. Die weit vorgeschrittene Zivilisation hätte dann nur wenige Jahrhunderte innerhalb des gesamten Alters des Kosmos überstanden. Um ein solches Ende zu vermeiden, ist es unabdingbar, dass die Menschheit – und wir alle – zu ihrer absolut einzigartigen Erde Sorge trägt.

Diese Goldplakette wurde 1972 an den Raumsonden Pioneer 10 und 11 befestigt. Beide Sonden haben Kurs ins Weltall hinaus. Falls eine von ihnen auf eine ausserirdische Zivilisation treffen sollte, könnte man dort auf Herkunft und Erbauer schliessen.



