

UNSER SONNENSYSTEM

Kurzer Überblick über die Planeten unseres Sonnensystems
und deren Erkundung mit Raumsonden

zusammengestellt von Susanne Pieth
unter Mitarbeit von Ulrich Köhler



UNSER SONNENSYSTEM

Kurzer Überblick über die Planeten unseres Sonnensystems
und deren Erkundung mit Raumsonden

zusammengestellt von Susanne Pieth
unter Mitarbeit von Ulrich Köhler

Regional Planetary Image Facility
Direktor: Prof. Dr. Ralf Jaumann
Datenmanager: Susanne Pieth

2009

Inhalt

Geleitwort	3
Erkundung des Sonnensystems mit Raumsonden	5
Sonnensystem und vergleichende Planetologie	9
Sonne	12
Merkur	15
Venus	18
Erde	23
Mond	26
Mars	29
Asteroiden	33
Jupiter	36
Saturn	41
Uranus	45
Neptun	49
Kometen	51
Zwergplaneten	55
Kuipergürtel	59
<i>Anhang</i>	
Übersicht über die Missionen im Sonnensystem	62
Wie komme ich an Bilddaten?	73

Geleitwort

Eine Reise durch das Sonnensystem

Im Jahr 2009 wird das Internationale Jahr der Astronomie begangen. Der Anlass dazu ist, dass vor genau 400 Jahren Galileo Galilei zum ersten Mal den Blick durch ein Fernrohr auf die Gestirne richtete – und dabei wahrlich „Revolutionäres“ entdeckte. Was er sah und dann im Sidereus Nuncius zu Papier brachte, zementierte das Weltbild des Nikolaus Kopernikus. Nun stand nicht mehr länger die Erde im Zentrum des abendländischen Universums, sondern die Sonne bildete den Mittelpunkt unseres Planetensystems. Ebenfalls 1609 formulierte Johannes Kepler in seiner Astronomia Nova drei Gesetze, mit denen die Bahnen der Planeten beschrieben werden konnten. Damit schuf er die Grundlage, um heute mit Raumsonden sämtliche Körper des Sonnensystems in einer Präzision anzusteuern, die dem Vorhaben ähneln, das berühmte Kamel durch ein Nadelöhr zu manövrieren.

Der Jubiläum nicht genug, gelang es der Menschheit vor 50 Jahren zum ersten Mal, mit einer Raumsonde das Schwerfeld der Erde zu verlassen. Die sowjetische Sonde Luna 1 flog zum Mond und war der Vorreiter einer ganzen Armada von Raumschiffen, die zur Erkundung der Planeten, ihrer Monde, der Asteroiden und Kometen und nicht zuletzt der Sonne aufbrachen. Schließlich folgte vor 40 Jahren der berühmte riesengroße Schritt, der für Neil Armstrong ja nur ein ganz kleiner war – in der Nacht vom 20. auf den 21. Juli 1969 betraten Menschen zum ersten Mal einen anderen Himmelskörper, den Mond. Der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn dieses zunächst politisch motivierten Projekts der Apollo-Mondlandungen war enorm und im besten Sinne des Wortes grenzenlos.

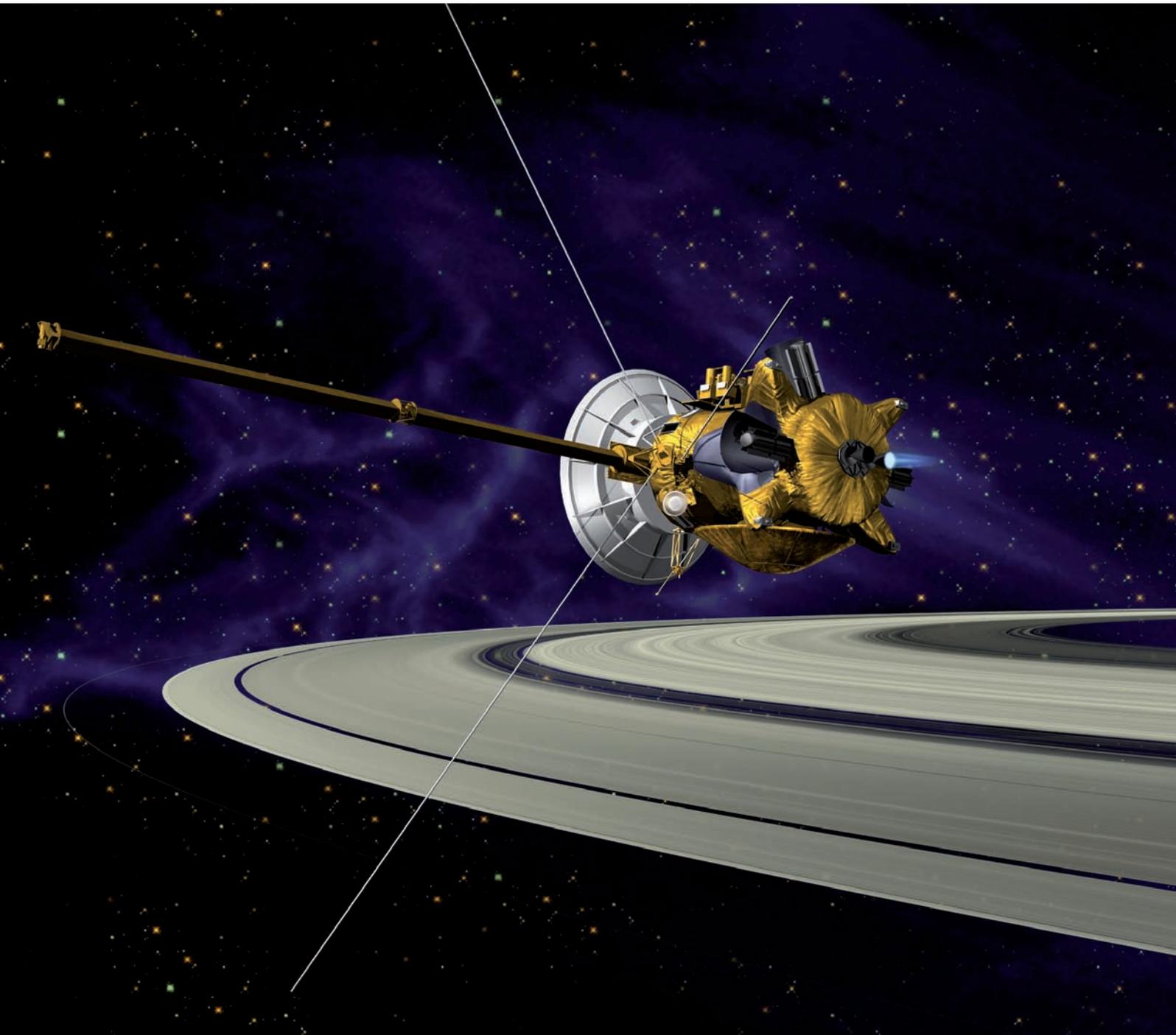
Der Wettlauf zum Mond führte auf allen Gebieten der jungen Raumfahrt zu beispiellosen technischen Fortschritten – was auch zum Segen für die Forschung wurde. Nicht nur der Mond, auch die um ein Vielfaches weiter entfernten Planeten unseres Sonnensystems waren nun mit robotischen Raumsonden erreichbar. Zunächst zur Venus und zum Mars, dann zu Merkur, Jupiter, Saturn und noch weiter. Es gelangen unzählige faszinierende und erhellende Beobachtungen, denn durch den Blick auf die anderen Planeten und Monde haben wir nicht nur unglaublich viel über das Sonnensystem erfahren, sondern auch Wichtiges über die Frühzeit und Entwicklung unserer Erde lernen können, die unter allen Planeten so beispiellos einmalig ist. Und nicht zuletzt erkannten wir, dass dieser „Blaue Planet“ fragil ist und geschützt werden muss.

Tatsächlich werden aber mit jedem gelösten Rätsel neue Fragen aufgeworfen. Wie entstand das Leben auf der Erde? Kommt es von einem anderen Himmelskörper? Wäre Leben auf der Erde ohne den Mond, der die Erdachse stabilisiert, denn überhaupt möglich? Schließlich die Frage, die den Rahmen des streng Wissenschaftlichen sprengt: Werden wir Leben auf einem anderen Himmelskörper finden, diesseits und jenseits der Grenzen unseres Sonnensystems?

Wie keine andere Wissenschaft werden Astronomie und Planetenforschung erst durch Bilder begreifbar. Die Fotos, die von Raumsonden seit 50 Jahren zur Erde gefunkt werden, eröffneten uns neue Welten, neue Perspektiven, neue Erkenntnisse. Die Planetologie, ein vergleichsweise junger Zweig, ist zumeist pure Grundlagenforschung. An den Erkenntnisgewinn ist aber auch eine Verpflichtung geknüpft – nämlich der Öffentlichkeit die Ergebnisse dieser Wissenschaft zu vermitteln.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) kommt dieser Verpflichtung auf vielfältige Art und Weise nach. Um die spannenden, faszinierenden Ergebnisse der Planetenforschung sichtbar zu machen, wurde am DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof in Kooperation mit der NASA die Regional Planetary Image Facility (RPIF) eingerichtet, eine planetare Bildbibliothek, die alle Bilddaten der vielen Raumsonden von NASA und ESA archiviert und der Öffentlichkeit zugänglich macht. Das kleine Werk „Unser Sonnensystem“ soll einen kurzen Überblick über den aktuellen Stand der Erkundung unserer unmittelbaren kosmischen Umgebung geben. Teilen Sie unsere Faszination und lassen Sie sich mitnehmen auf eine Reise von der Erde in die Tiefen des Sonnensystems – spannende Lesezeit wünscht Ihnen

Ralf Jaumann



Erkundung des Sonnensystems mit Raumsonden

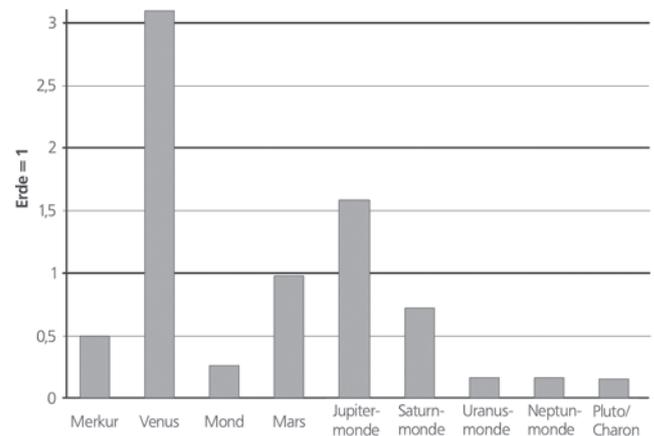
Mit dem Start von Sputnik 1 durch die Sowjetunion am 4. Oktober 1957 begann das Raumfahrtzeitalter. Bereits kurz danach verließen Sonden der USA, der damaligen UdSSR und später auch anderer Nationen das Schwerefeld der Erde. Ziele waren der Erdmond, andere Planeten und deren Monde, Asteroiden und Kometen, oder auch unsere Sonne und selbst die Untersuchung von interplanetarem und kosmischem Staub. Trotz einiger Fehlschläge haben die vielen erfolgreichen Missionen zu den Körpern unseres Sonnensystems eine Vielzahl von Erkenntnissen über unsere nähere Umgebung im Weltall erbracht. Eine wesentliche Rolle bei der Erkundung des Sonnensystems spielt dabei die bildhafte Erfassung der Oberflächen dieser vielgestaltigen Körper – oder, im Falle der großen Gasplaneten, der äußersten Schichten ihrer Atmosphären. Dies geschieht auf Raumsonden mit – zunächst konventioneller, später digitaler, schließlich multispektraler – Fotografie so wie der abbildenden Spektroskopie in Wellenlängen, die auch



kürzere und längere Wellenlängen erfassen. Gestatten dichte Atmosphären keine unmittelbare Sicht auf die Oberfläche wie bei der Venus oder dem Saturnmond Titan, können Radarexperimente zu ihrer Charakterisierung angewendet werden.

Umfang der Erkundung

Das nachfolgende Diagramm zeigt, welchen Umfang die planetare Fernerkundung nur der festen Oberflächen im Sonnensystem hat, ohne dass die vier Gasriesen des äußeren Sonnensystems und die vielen kleinen Körper berücksichtigt wären. Die bisherige Menge an optischen Bilddaten deckt noch nicht einmal die komplette Fläche aller Planeten und größeren Monde im Sonnensystem ab, selbst wenn man geringe Bildauflösungen im Kilometerbereich akzeptiert.



Die festen Oberflächen der Planeten und Monde im Verhältnis zur Landoberfläche der Erde (Erde = 1)

Für die planetare Fernerkundung werden neben Sensoren im sichtbaren Licht auch Detektoren in vielen weiteren Teilen des elektromagnetischen Frequenzspektrums eingesetzt. Bei diesen Sensoren ist die Auflösung aber vielfach geringer. Allein deshalb bleiben noch viele Fragen ungeklärt und können nur durch zukünftige Raumfahrtmissionen geklärt werden.

Bild: Start von Mars Pathfinder an Bord einer Delta-II-Rakete am 4. Dezember 1996 von Cape Canaveral. (© NASA/JPL)

Bild linke Seite: Künstlerische Darstellung der Raumsonde Cassini über den Saturnringen. (© NASA/JPL)

Vorgehensweise bei der Erforschung

Der klassische Prozess der Erkundung anderer Himmelskörper besteht aus den nachfolgend aufgeführten Stufen. Diese einzelnen Schritte stellen jeweils ein in Technik, Navigation und Antriebsbedarf komplexeres Missionsszenario dar:

- Start, ggf. kurzzeitiges „Parken“ in der Erdumlaufbahn, Einschuss in die interplanetare Flugbahn
- Vorbeiflug am Zielkörper
- Harte Landung auf der Oberfläche und/oder Atmosphärensonde
- Umlaufbahn um den Himmelskörper
- Weiche Landung auf der Oberfläche und Aktivierung einer Experimentalstation
- Roboterfahrzeuge (Rover), Ballon- und Flugzeugsonden/Drohnen
- Materialprobenrückführung
- Bemannte Expedition

Dieser Ablauf wird nicht immer in der Reihenfolge eingehalten. Oftmals werden Schritte zusammengefasst oder übersprungen, wie der Blick auf fast fünf Jahrzehnte Planetenerkundung zeigt. Dafür gibt es sowohl technisch-wissenschaftliche, als auch finanzielle bzw. politische Gründe.

Die ersten vier Jahrzehnte

Am 2. Januar 1959 erreichte die sowjetische Raumsonde Luna 1 erfolgreich die Fluchtgeschwindigkeit der Erde und läutete mit dem ersten Vorbeiflug am Mond das Zeitalter der Planetenerkundung ein. Damit verließ erstmals ein Raumfahrzeug nach vielen Fehlversuchen das Schwerefeld unseres Heimatplaneten. Die nachfolgend einsetzende Erkundung des Sonnensystems lässt sich zeitlich in vier Phasen einteilen.

Die erste Phase von 1959 bis 1967 ist geprägt durch die Erkundung zunächst des Mondes und schon wenig später der beiden Nachbarplaneten der Erde, der Venus und dem Mars mit unbemannten Raumsonden. Die Erforschung des Mondes diente vor allem der Vorbereitung bemannter Missionen und war stark vom Wettlauf zweier konkurrierender politischer bzw.

gesellschaftlicher Systeme um den technologischen Führungsanspruch gekennzeichnet. Der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn dieser Zeit war jedoch immens. Zu erwähnen sind hier die sowjetischen Missionen Luna 1 (Mondvorbeiflug), Luna 2 (harte Mondlandung) und Luna 3, die erste, wenn auch qualitativ schlechte Bilder von der Mondrückseite, die von der Erde aus nicht sichtbar ist, lieferte. Diese drei Sonden wurden alle im Jahr 1959 gestartet, gefolgt von weiteren Missionen der USA. Die Programme Ranger, Surveyor und Lunar Orbiter zur Erkundung des Mondes suchten bereits nach möglichen Landeplätzen für bemannte Missionen. Erste Aufnahmen von der Oberfläche und aus der Umlaufbahn des Mondes lieferten ab 1966 die Sonden Luna 9, Surveyor 1 sowie Lunar Orbiter 1 und 2. Die Erkundung von Venus und Mars bestand vor allem aus Vorbeiflügen, von denen nur wenige so erfolgreich waren wie Mariner 2 (Venus, 1964), Mariner 4 (Mars, 1964/65), oder der ersten Atmosphärensonde Venera 4 (Venus, 1967). Bereits in dieser Phase wurde bei den Trägersystemen der Umstieg auf leistungsfähigere Raketen mit teilweise hochenergetischen, kryogenen Oberstufen wie Atlas-Centaur (USA) oder Proton (UdSSR) vollzogen.

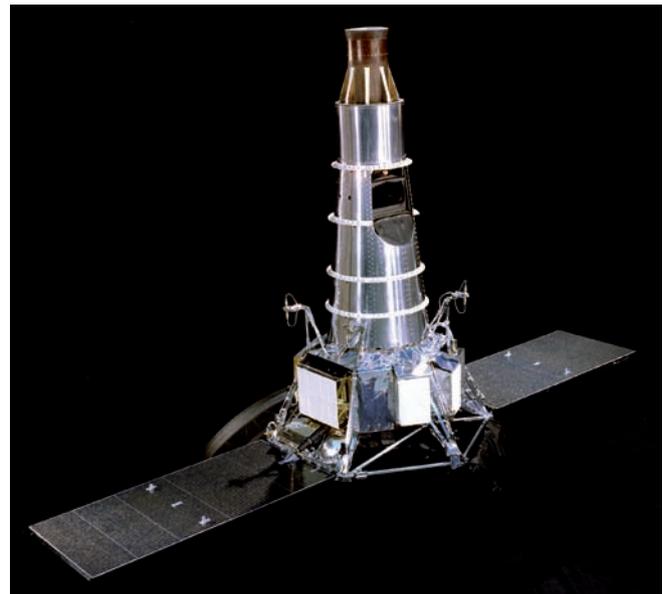


Bild: Ranger 7, gestartet am 28. Juli 1964, war die erste erfolgreiche Mission der Ranger-Serie zum Mond. Bis zum Aufschlag im Mare Nubium wurden über 4.000 Bilder zur Erde übertragen. (© NASA)

Die zweite Phase von 1968 bis 1972 ist von der Durchführung der ersten bemannten Mondmissionen gekennzeichnet. Neben den sechs erfolgreichen Mondlandungen durch die USA fanden weiterhin vor allem sowjetische unbemannte Missionen zu Mond, Mars und Venus statt. Technisch und wissenschaftlich gesehen, stellten die Apollo-Missionen einen bedeutenden Fortschritt dar, der hier nicht näher im Detail erläutert werden soll. Parallel dazu gab es auch unbemannte, vollautomatische Rückführungen von Mondgestein (Luna 16, 20 und 24), sowie das erste Roboterfahrzeug auf dem Mond (Luna 17/Lunochod 1). Neben weiteren erfolgreichen Vorbeiflügen an Venus und Mars landete 1970 die erste Sonde auf der Venus (Venera 7) und Mariner 9 schwenkte in eine Umlaufbahn um den Mars ein und wurde damit zum ersten künstlichen Satelliten um einen anderen Planeten (1971/72).



Die dritte Phase von 1973 bis 1983 wird einerseits von der intensiveren Erforschung von Mars und Venus, andererseits von der Erkundung des äußeren Planetensystems bestimmt. Der lange Zeit einzigen Vorbeiflüge an Merkur unter erstmaliger Ausnutzung der Swing-by-Technik fand mit Mariner 10 von 1973 bis 1975 statt. Daneben wurden weiteren Missionen zur Venus und zum Mars durch die UdSSR durchgeführt. Besondere Bedeutung erlangten in diesen Jahren zwei Programme: Viking und Voyager. Im Rahmen des amerikanischen Viking-Programms wurden 1975 zwei Lander und zwei Orbiter zum Mars geschickt, die dort ein Jahr später ihre Arbeit aufnahmen und teilweise bis in die achtziger Jahre hinein Daten zur Erde sandten. Die Ergebnisse, vor allem die Fotokartierung der Oberfläche im Rahmen dieser Missionen, bilden noch heute wichtiges Grundlagenwissen über diesen Planeten und dienen der Vorbereitung zukünftiger Missionen.

Ähnliche Bedeutung erlangte das Voyager-Programm. Nach Vorbereitung durch die Sonden Pioneer 10 und 11 starteten die beiden Voyager-Sonden zu ihrer „Grand Tour“ von 1977 bis 1989 zu den Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun und ihren jeweiligen Monden. Das gewonnene Bild-

material und die Messdaten stellen für das äußere Sonnensystem bis heute unabdingbares Grundlagenwissen dar. Die UdSSR setzte in dieser Phase ihr umfangreiches Venus-Programm mit Landungen, Oberflächenaufnahmen, Ballonsonden und Radarkartierungen fort. Die Venus wurde im Rahmen des US-amerikanischen Pioneer-Programms ebenso erkundet wie der Komet Halley, der bei seinem letzten Erscheinen im inneren Sonnensystem 1986 gleich von mehreren Raumsonden aus Europa, der UdSSR und Japan Besuch bekam. In diesen Jahren wurden neue oder modifizierte Sondentypen entwickelt, die jeweils eine höhere Nutzlastmasse er-

möglichten; in der UdSSR ab Mars 2 bzw. Venera 9 und in den USA nach Mariner 10 mit Raumfahrzeugen eines modifizierten Mariner-Bauplans.

Die vierte Phase beginnt 1989 und hat zwei Schwerpunkte; einerseits Start und Betrieb großer Raumsonden wie Magellan, Galileo oder Cassini-Huygens, andererseits die Durchführung kleiner, sehr spezialisierter Missionen. Dabei bezieht sich die Größeneinschätzung sowohl auf die Masse der Raumfahrzeuge als auch auf Kosten, Entwicklungs- und Betriebszeiten der Mission. Herausragende sind dabei Galileo als aufwändige Langzeitmission zur Erkundung des Jupitersystems (Start 1989, Missionsende 2003) und Mars Pathfinder mit dem Rover Sojourner als spezialisierte Mission zur Demonstration eines weichen Aufsetzens mit Airbags anstelle von Bremstriebwerken, die im Sommer 1997 auf dem Mars landete. Die Bilder beider Missionen sind auf großes Interesse in der Öffentlichkeit gestoßen und haben wesentlich zur gestiegenen Popularität der planetaren Raumfahrt beigetragen.

Zukünftige Missionen und Programme

Um die Jahrtausendwende herum sind im Wesentlichen zwei Schwerpunkte sichtbar geworden und markieren damit den Beginn der jüngsten, aktuellen Phase in der internationalen

Bild: Apollo 17-Astronaut Gene Cernan am Rover im Taurus-Littrow-Tal, vorn am Rover die TV-Kamera und die Antenne. (© NASA, Scan: JSC)

Planetenforschung: die intensive und langfristige Erkundung des Mars und die Rückkehr zum Mond sowie dessen weitere Erforschung und zukünftige Nutzung. Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer Missionen speziell zu den kleinen Körpern unseres Sonnensystems, aber auch zu Zielen, die bereits einige Zeit oder bisher völlig unerforscht waren. Dazu zählen Merkur, die großen Asteroiden Ceres und Vesta und vor allem Pluto, der zwischenzeitlich seinen Status als Planet verloren hat und einen der letzten „weißen Flecken“ unter den großen Körpern des Sonnensystems darstellt.

Insgesamt nahm im neuen Jahrtausend die Zahl der Planetenmissionen wieder zu. Da sich viele Sonden der kommenden Jahre in der Planung, der Entwicklung bzw. Integration oder sogar auf dem Weg zu ihren Zielen befinden, sind die Schwerpunkte und Trends im Missionsdesign deutlich erkennbar: kleine, spezialisierte Sonden, die zunehmend nicht nur von großen Raumfahrtagenturen entwickelt werden, sowie möglichst kurze Planungs- und Bauzeiten zur Verringerung der Kosten. Auch führte die Miniaturisierung von Kameras und Messinstrumenten, so wie die Möglichkeiten zur Verarbeitung großer Datenmengen bereits an Bord der Sonden zu enormen Fortschritten.

Innerhalb der nächsten Jahrzehnte sollen etwa alle zwei Jahre Sonden zu unserem äußeren Nachbarplaneten, dem Mars, geschickt werden. Fernziel ist dabei zunächst das Sammeln von Proben und deren Rückführung zur Erde, später die bemannte Landung auf dem Roten Planeten. Neben den USA mit dem Mars Surveyor-Programm, das Orbiter, Lander, Rover und in Zukunft auch Probenrückführungsmissionen – möglicherweise in einer gemeinschaftlich mit Europa durchgeführten Mission – beinhaltet, beteiligen sich daran auch andere Nationen mit Instrumenten bzw. eigenen Sonden. Europas Beitrag ist dabei die sehr erfolgreiche Mars Express-Mission, die seit Ende 2003 eine Fülle von Daten und Bildern vom Mars sendet. Seit Ankunft des Mars Reconnaissance Orbiters im März 2006 sind zum Zeitpunkt Mitte 2009 sogar fünf Sonden gleichzeitig in Betrieb, drei in der Umlaufbahn und zwei Rover auf der Oberfläche.

Die europäische Technologietestsonde SMART-1, die seit November 2004 den Mond umrundet und im Sommer 2006 ihre Mission mit einem Impakt beendet hat, ist gewissermaßen nur der Auftakt zu einer massiven Erforschung unseres Erdtraban-

ten. Innerhalb der nächsten Dekade sollen Raumfahrzeuge aus den USA, Japan, Indien, China und möglicherweise auch Deutschland folgen. Mit Orbitern und Rovern sowie später mit automatischen Probenrückführungen soll die Oberfläche und das Innere erkundet werden, um die Rückkehr des Menschen zum Mond vorzubereiten.

Die Erkundung der kleinen Körper unseres Sonnensystems stellt einen zusätzlichen Eckpunkt dar. Die Mission Stardust hat zu Jahresbeginn 2006 erfolgreich Staub vom Kometen Wild/2 zur Erde zurück gebracht. Trotz zahlreicher technischer Probleme bei der japanischen Sonde Hayabusa, die im November 2006 höchstwahrscheinlich Proben auf dem Asteroiden Itokawa entnommen hat, ist diese nun auf einem – infolge technischer Probleme – komplizierten Weg zurück zur Erde und wird im Juni 2015 in die Erdatmosphäre eintreten. Bisher ohne Probleme verläuft die Anfang 2004 gestartete europäische Rosetta-Mission, die sich auf ihrem Weg zum Kometen Churyumov-Gerasimenko befindet, in dessen Umlaufbahn sie Mitte 2014 eintreten wird, um wenige Monate später auf seinem Kern den Lander Philae abzusetzen.

Die Mission Cassini-Huygens als eine der letzten großen Missionen zur Erkundung des Saturnsystems ist seit ihrer Ankunft im Sommer 2004 ein weiterer Brennpunkt in der Planetenforschung. Sie liefert seither zuverlässig große Datenmengen aus dem Saturnsystem, die das Wissen über das äußere Sonnensystem auf eine völlig neue Grundlage stellen. Besonders komplex im Hinblick auf das Missionsszenario, aber auch spannend und wissenschaftlich hoch interessant war im Januar 2005 der Abstieg der Landesonde Huygens durch die Atmosphäre des Titan mit der anschließenden Landung auf seiner Oberfläche.

Weitere Ziele sind bereits abgesteckt, Sonden teilweise auf dem Weg dahin: Die Erkundung des Merkur durch die im August 2004 gestartete US-amerikanische Sonde MESSENGER (Eintritt in den Orbit 2011) und die geplante europäisch-japanische Mission BepiColombo (Start 2012/13), die Erforschung der Asteroiden Ceres und Vesta durch Dawn (Start 2007, Ankunft 2011 bzw. 2015) sowie 2015 der Vorbeiflug am Pluto durch die im Januar 2006 gestartete Mission New Horizons. Die Sonde Venus Express befindet sich nun bereits seit April 2006 in einer Umlaufbahn um die Venus.

Sonnensystem und vergleichende Planetologie

Das Sonnensystem, in dem wir leben, ist nur eines unter vielen in unserem Weltall. Von den acht Planeten, die die Sonne umkreisen, wissen wir nur von der Erde mit Sicherheit, dass dort Leben möglich ist. Über Jahrmillionen hat sich auf der Erde das Leben in seiner Vielfalt entwickelt, doch erst seit gut 50 Jahren wagt der Mensch den Schritt ins All mit unbemannten und später auch bemannten Raumsonden zur Erkundung der Planeten und ihrer Monde – einschließlich der Erde, deren Erkundung aus dem erdnahen Orbit völlig neue Forschungsmöglichkeiten eröffnete.

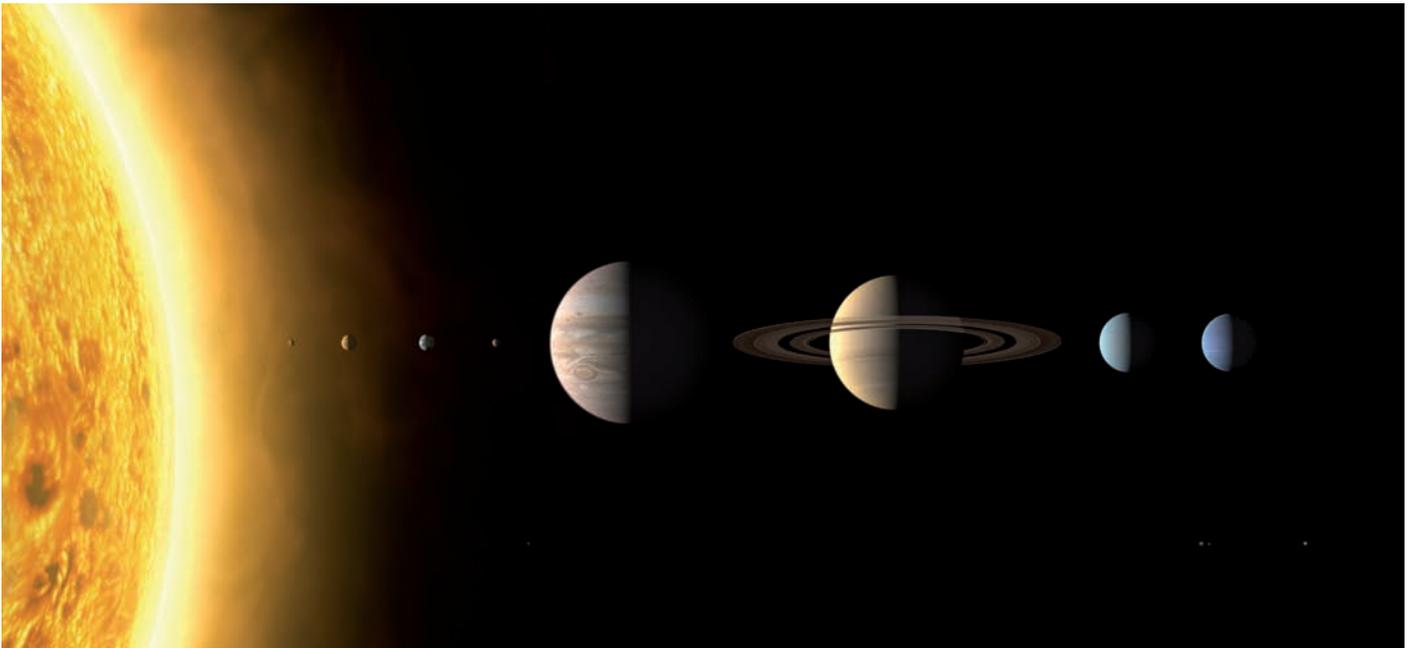
Bereits in der Antike beobachteten die Astronomen Lichtpunkte, die sich inmitten der Sterne zu bewegen schienen. Sie nannten diese Objekte Planeten, was soviel wie „Wanderer“ bedeutet.

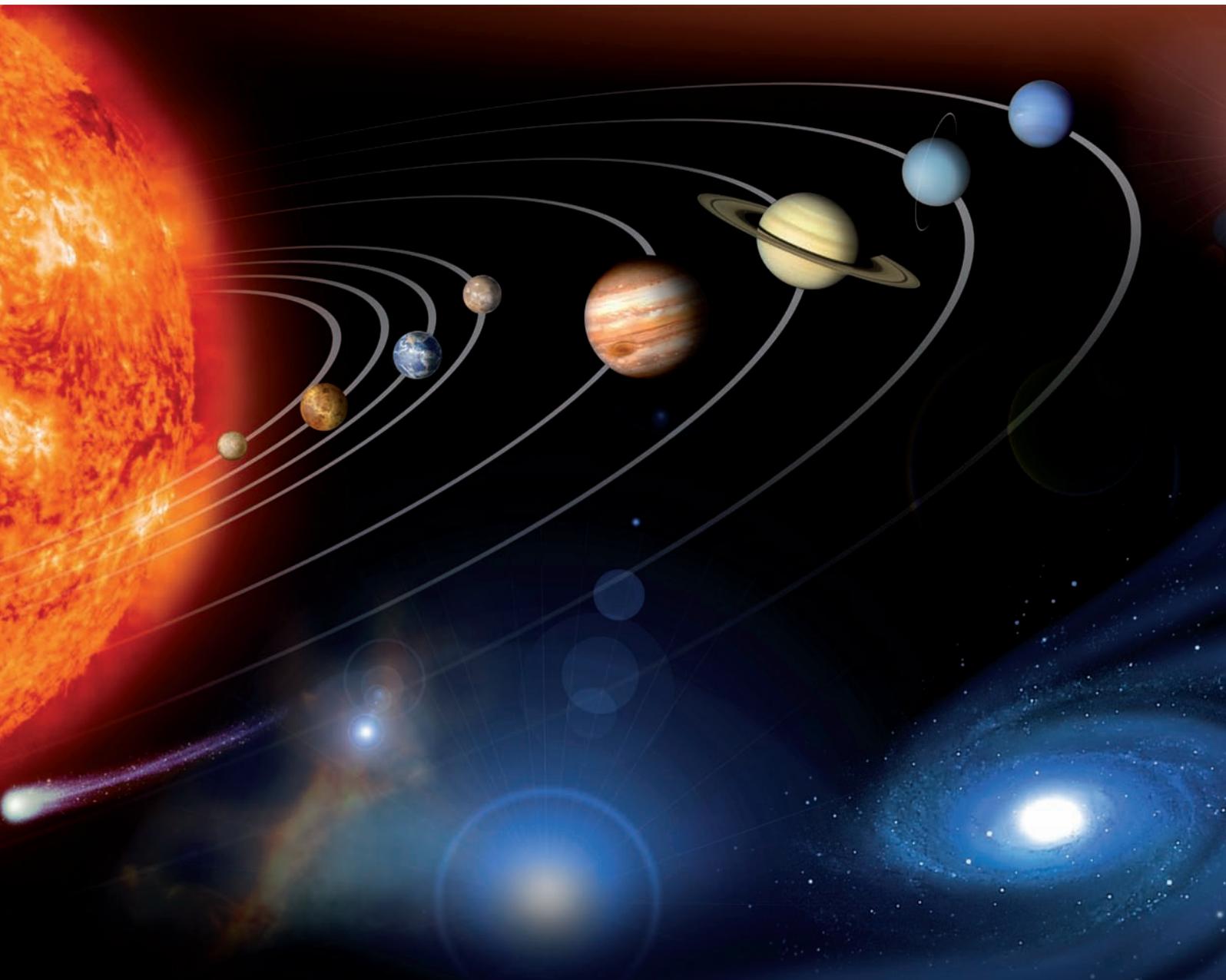
Später gaben sie den einzelnen Objekten die heute gebräuchlichen Namen römischer Gottheiten: Jupiter – der Göttervater, Mars – der Kriegsgott, Merkur – der Götterbote, Venus – die Göttin der Liebe und Schönheit und Saturn – der Vater von Jupiter und Gott der Landwirtschaft.

Zu unserem Sonnensystem gehört eine Vielzahl unterschiedlicher Körper, die von Ansammlungen aus Staub und gefrorenem Wasser bis hin zu gigantischen Gasbällen reichen. Diese Gasriesen haben einen bis zu elfmal größeren Durchmesser als die Erde.

Alle Planeten umlaufen die Sonne in der gleichen Richtung und ihre Umlaufbahnen liegen alle in einer nahezu gleichen Ebene. Diese Ebene der Planetenbewegung entspricht dem Äquator der Sonnenrotation. Die Bahnebene der Erde um die Sonne wird Ekliptik genannt. Die Achsen der Planeten weichen nur

*Bild: Unser Sonnensystem, Sonne und Planeten in den richtigen Größenverhältnissen, die Abstände sind nicht im Verhältnis dargestellt.
(© IAU, Martin Kornmesser)*





wenige Grad von der Senkrechten dieser Ebene ab. Ausnahmen bilden aber Uranus und Pluto, deren Achsen in dieser Ebene liegen. Der Zwergplanet Pluto ist so weit von der Sonne entfernt, dass eine Umrundung 248 Jahre dauert. Merkur als der innerste Planet benötigt dafür nur 88 Tage. Kleine Körper haben häufig elliptische Bahnen. Kometen beispielsweise bewegen sich über die Jupiterbahn hinaus und kehren auf elliptischen bis hyperbolischen Bahnen bis dicht an die Sonne zurück. So nähert sich der Komet Halley etwa alle 78 Jahre dem inneren Sonnensystem. Wenn die Erde auf ihrer Bahn in Regionen gelangt, durch die ein Komet gezogen ist, treten in der Erdatmosphäre periodische Meteorschauer auf. Diese sind ein spektakuläres Beispiel für die Bahnbewegung im Sonnensystem.

In Abhängigkeit von der Entfernung zur Sonne zeigt sich ein deutlicher Trend in der jeweiligen Masse und Zusammensetzung der einzelnen Planeten. Die terrestrischen Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mond* und Mars) im inneren Sonnensystem haben eine vergleichsweise geringe Masse und bestehen vor allem aus silikatischen Gesteinen und Metallen. Die großen Planeten des äußeren Sonnensystems (Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun) haben im Gegensatz dazu eine viel größere Masse und bestehen vorwiegend aus Gasen (hauptsächlich Wasserstoff und Helium) und haben Monde, die zumeist zu großen Teilen aus Eis bestehen. Einige dieser Substanzen (wie Wasser, Methan, Ammoniak oder Stickstoff) kondensieren bei niedrigen Temperaturen, andere (Wasserstoff und Helium) bleiben unter fast allen natürlichen Bedingungen gasförmig. In ihrem Inneren haben jedoch auch die Gasplaneten einen Kern aus silikatischem Gestein und Metall.

Die Planeten unseres Sonnensystems haben zusammen ohne die noch nicht bestätigten Entdeckungen über 151 Monde. Sie weisen dabei sehr unterschiedliche Größen auf, von kleinen Trümmern bis hin zu Monden, die größer sind als der Erdmond. Viele Monde wurden erst durch Raumsonden entdeckt. Nur einer von ihnen besitzt eine Atmosphäre (Saturnmond Titan), andere haben ein Magnetfeld (Jupitermonde Ganymed und Europa). Der Jupitermond Io ist der geologisch aktivste Körper im

ganzen Sonnensystem, was sich in einem extremen Vulkanismus äußert. Unter der gefrorenen Kruste des Jupitermondes Europa vermutet man einen Ozean, und Bilder vom Jupitermond Ganymed zeugen von Bewegungen der Eiskruste. Andere Monde wie der Saturnmond Phoebe oder die beiden Marsmonde Phobos und Deimos sind vielleicht von der Anziehungskraft der Planeten eingefangene Asteroiden.

Aktuelle Theorien zur Entstehung unseres Sonnensystems basieren alle auf der allgemein akzeptierten und erstmals von Immanuel Kant und Pierre Laplace formulierten Vorstellung, dass die Sonne und die Planeten nahezu gleichzeitig aus einem protostellaren Nebel vor 4,6 Milliarden Jahren entstanden. Dieser Nebel entwickelte sich durch den Kollaps einer interstellaren Staubwolke. Die gravitative Anziehung zwischen den einzelnen Teilchen, der durch den Kollaps erzeugte Drehmoment und andere Kräfte führten zu der heutigen Anordnung und Bewegung innerhalb des Sonnensystems. Die beobachtete Zusammensetzung der Planeten lässt annehmen, dass die Planetenentstehung von der Akkretion fester Teilchen dominiert war. Die inneren vier terrestrischen Planeten entstanden direkt durch den Prozess der Akkretion, beginnend mit Silikat- und metallischen Staubteilchen in einer Region, in der aufgrund der Temperatur Eispartikel nicht lange vorkamen. Im äußeren Sonnensystem dagegen kondensierten die leichteren Elemente zu Eis. Daraus bildeten sich feste Körper, die heute die teilweise festen eis- und metallreichen Kerne der äußeren Planeten bilden. Bei Jupiter und Saturn haben die massiven Kerne außerdem große Mengen des ursprünglichen interstellaren Gases eingefangen und die heute zu beobachtende Atmosphäre ausgebildet.

Aktuelle Theorien sagen aber auch, dass die Entstehung des Sonnensystems nicht einzigartig oder besonders bemerkenswert ist. Ähnliche Bedingungen finden wir ebenso auch bei Sternen, die gerade im Entstehen sind. Inzwischen kennen wir über 300 Sonnensysteme mit Planeten und die ständig verbesserten Beobachtungsmethoden werden zur Entdeckung unzähliger weiterer Planetensysteme führen.

* Im Sinne der vergleichenden Planetologie wird der Mond als Bestandteil des Erde-Mond-Systems aufgrund seiner Größe und Zusammensetzung als erdähnlicher Planet betrachtet.

Bild linke Seite: Künstlerische Darstellung unseres Sonnensystems, Größen und Abstände sind nicht maßstabsgerecht abgebildet. © NASA/JPL

Sonne

Die Sonne war und ist die Energiequelle für viele physikalische, chemische und biologische Prozesse im Sonnensystem. Astronomisch gesehen ist sie ein durchschnittlicher Stern vom Spektraltyp G2 V, der vor fünf Milliarden Jahren im Zentrum einer dichten, gashaltigen Staubscheibe leuchtend in Erscheinung trat. Die Sonne hat einen Radius von knapp 700.000 Kilometern und eine Masse von fast zweimal 10^{33} Gramm, ihre mittlere Dichte liegt entsprechend bei $1,41 \text{ g/cm}^3$. Über 330.000 Erdkugeln bräuchte man, um sie aufzuwiegen. Das Schwerefeld, das von dieser gewaltigen Zentralmasse ausgeht, prägt allen Planeten, Asteroiden und Kometen des Sonnensystems die verschieden geformten Umlaufbahnen auf. Bei Sonnenfinsternissen lässt sich sogar die Krümmung des Raums beobachten, die die Sonne in ihrer Umgebung hervorruft und die von Albert Einstein schon 1916 vorhergesagt wurde. Genau so wichtig wie die Masse ist aber auch die chemische Zusammensetzung der Sonne. Sie besteht aus 73 Prozent Wasserstoff, 25 Prozent Helium und zwei Prozent schwereren Elementen, die man sehr gut spektroskopisch nachweisen kann. Gesamtmasse und chemische Zusammensetzung sind – wie auch bei jedem anderen Stern – die entscheidenden Parameter, die den Lebenslauf der Sonne festlegen.

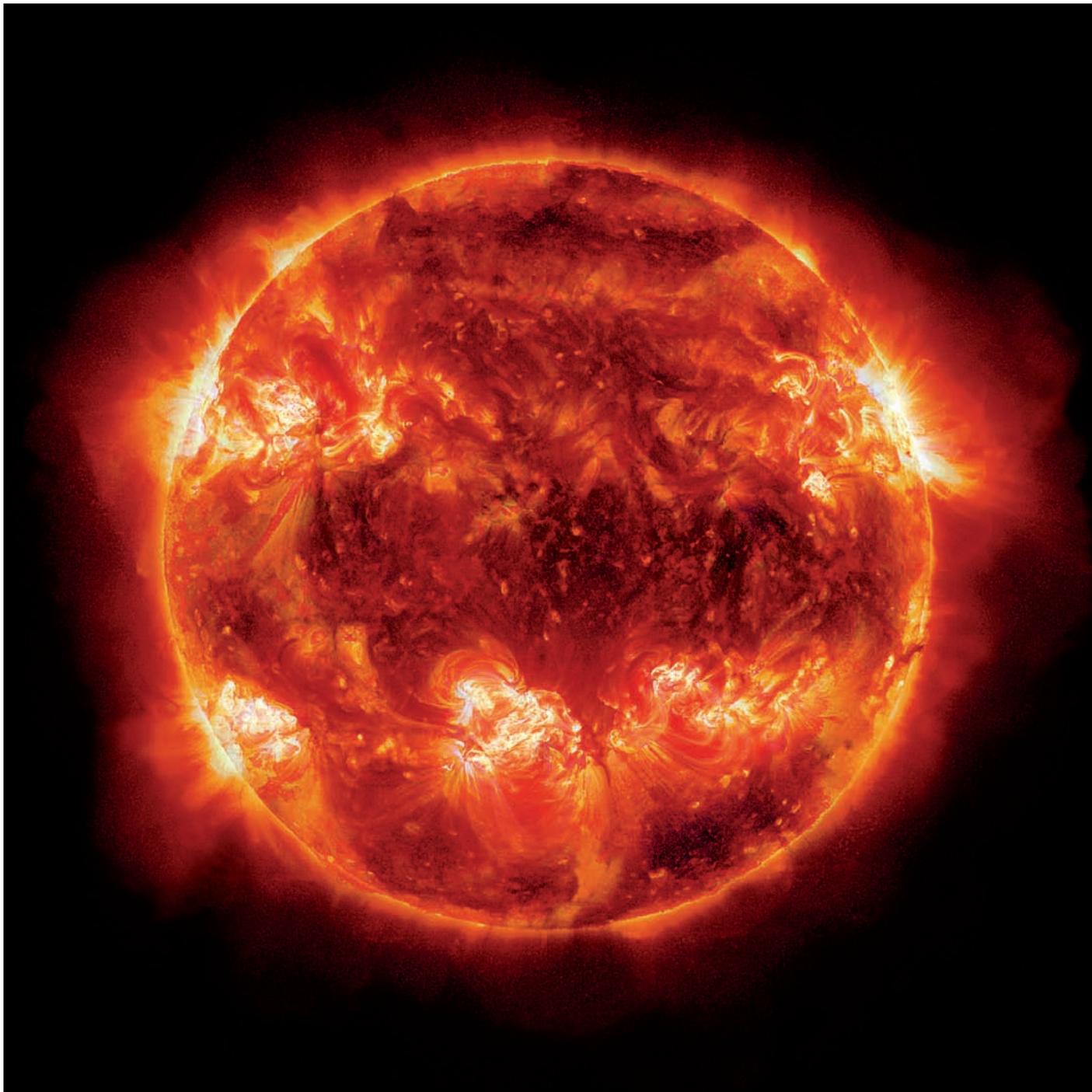
Seit der Erfindung des Fernrohrs hat man die Sonnenoberfläche, die Photosphäre, näher untersucht. Vor allem fielen dunkle Flecken auf, die im Laufe von 14 Tagen von einem Sonnenrand zum anderen wanderten. Daraus schloss man schon sehr früh, dass die Sonne mit einer Periode von rund einem Monat rotieren muss. Heute wissen wir, dass unser Heimatgestirn mit seiner gasförmigen Oberfläche je nach heliographischer Breite unterschiedlich schnell rotiert: am Sonnenäquator sind es 25 und an den Sonnenpolen über 30 Tage. Verglichen mit anderen Sternen rotiert die Sonne mit etwa zwei Kilometer pro Stunde eher langsam.

Fakten	
Masse	$1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Radius	695.500 km
Dichte	$1,409 \text{ g/cm}^3$
Rotationsperiode	26,8 - 36 Tage

Die Sonnenflecken selber erscheinen dunkel, weil es sich um bis zu 1.500 Kelvin kältere Regionen in der rund 6.000 Kelvin heißen Photosphäre handelt. Sie heben sich schwarz in dem heißeren Umfeld ab. 1843 gelang es Heinrich Schwabe nachzuweisen, dass die Zahl der Sonnenflecken mit einer elfjährigen Periode schwankt. Dem elfjährigen Sonnenfleckenzyklus sind vermutlich noch längere Perioden überlagert, die mitunter auch mit Klimaveränderungen – wie der sogenannten „Kleinen Eiszeit“ in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts – in Verbindung gebracht werden. Die größten Flecken auf der Sonne sind bis zu 20 Erdradien ausgedehnt und können mehrere Monate stabil bleiben. Als Ursache der Fleckenbildung nimmt man an, dass sich die Sonnenmagnetfeldlinien im differentiell rotierenden Geschwindigkeitsfeld der Sonne aufspulen und die „gestörten Zonen“ praktisch als dunkle, kältere Stellen sichtbar werden.

Die Sonnenkugel wird physikalisch in drei Zonen unterteilt: Im Bereich der inneren 20 Prozent des Sonnenradius wird die Energie durch Kernfusion erzeugt, wobei vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern verschmelzen. Dabei wird Bindungsenergie, das heißt Energie, die aufgewendet werden müsste, um einen Kern in einzelne Protonen und Neutronen zu zerlegen, frei – dem Einsteinschen Energie-Masse-Äquivalent zufolge etwa vier Millionen Tonnen pro Sekunde! Damit überhaupt Kernfusion stattfinden kann, muss im Zentrum der Sonne eine Temperatur von ca. 15 Millionen Kelvin bei einem gleichzeitigen Druck von über 20.000 Pascal herrschen. Zwischen 20 und 70 bis 80 Prozent des Sonnenradius liegt über der Zone der Energieerzeugung die Strahlungszone, in der die im Inneren erzeugten Energiequanten unzähligen Streuungen und Reflexionen unterworfen werden und erst im Mittel nach 170.000 Jahren an den oberen Rand der Strahlungszone gelangen. Dort angekommen, werden sie innerhalb von wenigen Tagen durch Konvektion an die Sonnenoberfläche transportiert, von wo aus sich Licht und Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit radial im Raum ausbreiten.

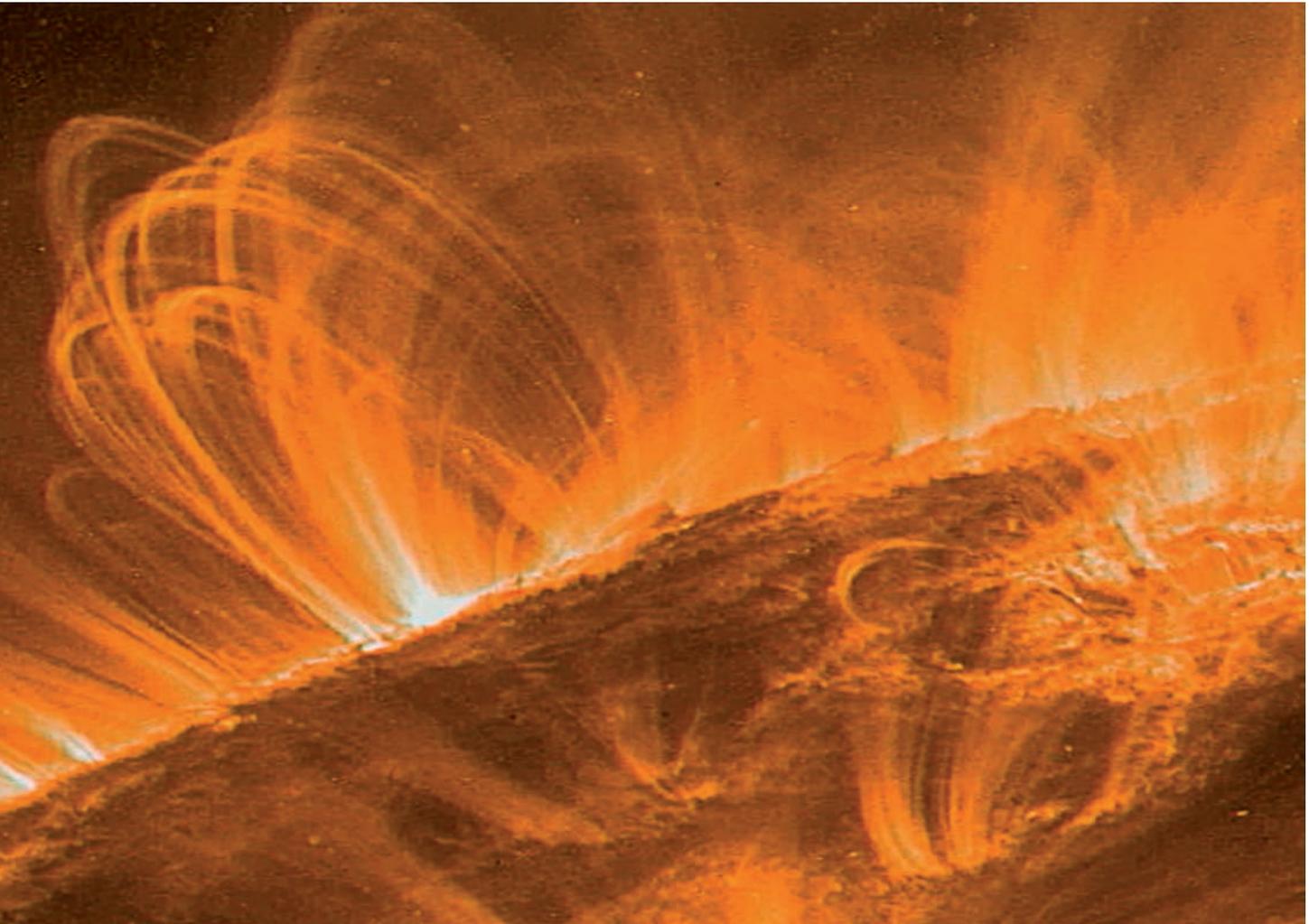
Bild rechte Seite: Globale Ansicht der Sonne im ultravioletten Licht. (© NASA/TRACE)



Energetisch herrscht in der Sonne ein Gleichgewicht zwischen dem nach außen gerichteten Gasdruck (und in geringerem Maße auch dem Strahlungsdruck) und der zentripetal wirkenden Gravitationskraft. Während ihrer gesamten Lebenszeit versucht die Sonne dieses Gleichgewicht aufrechtzuerhalten und passt sich mit ihrer äußeren Gestalt den sich wandelnden Fusi-

onsprozessen im Innern an, z.B. auch dann, wenn sie in etwa fünf Milliarden Jahren das Rote Riesen-Stadium durchläuft. Am Ende ihres zehnten Milliarden Jahre währenden Gesamtlebens wird die Sonne zu einem Weißen Zwergstern von Erdgröße schrumpfen.

Bild: Protuberanzen, heißes Gas entlang der Magnetfeldlinien, steigen aus der Korona auf, aufgenommen im ultravioletten Licht. (© NASA/GSFC)



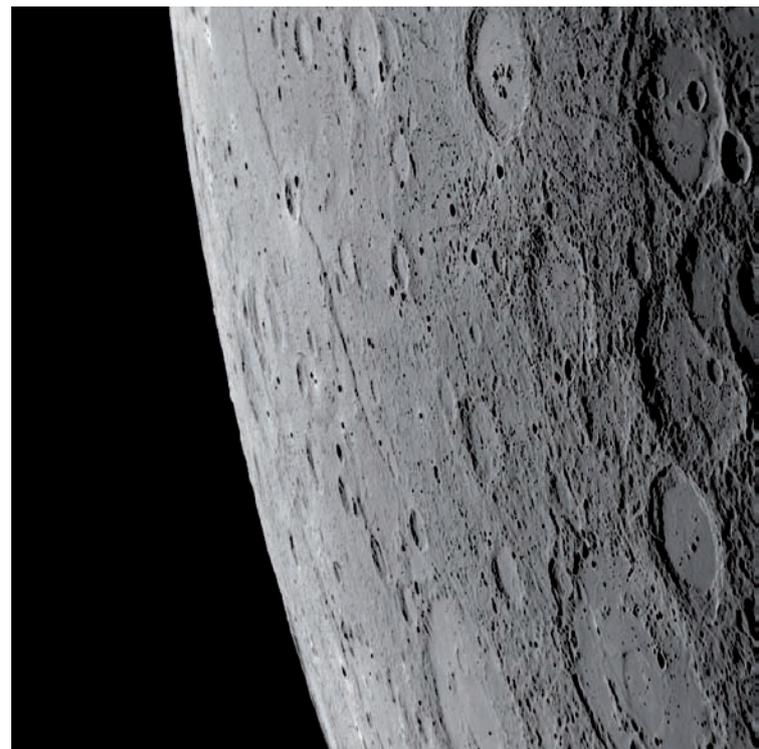
Merkur

Merkur ist der innerste Planet in unserem Sonnensystem. Wegen seiner Sonnennähe ist er von der Erde aus nur etwa zwei Stunden vor Sonnenauf- bzw. zwei Stunden nach Sonnenuntergang zu sehen und das auch nur dann, wenn zur Beobachtungszeit die Ekliptik möglichst steil zum Horizont verläuft. In jeweils 217 Jahren zieht Merkur von der Erde aus gesehen 20-mal im November und neunmal im Mai als schwarzer Fleck über die helle Sonnenscheibe, das nächste Mal am 9. Mai 2016.

Merkurs Bahn ist stark elliptisch und infolgedessen gibt es einen großen Unterschied zwischen der Aphel- und Periheldistanz. Im Perihel nähert sich der Planet bis auf 46 Millionen Kilometer der Sonne an (bezogen auf den Sonnenmittelpunkt), im Aphel ist er 70 Millionen Kilometer von ihr entfernt. Aufgrund der relativen Sonnennähe lässt sich bei Merkur recht gut der relativistische Anteil der Periheldrehung der Bahn nachweisen, die infolge des gravitativen Einflusses hauptsächlich der Sonne, aber auch der anderen Planeten eine langsame Rechtsdrehung in der Bahnebene um den gemeinsamen Schwerpunkt von Sonne und Merkur vollzieht, was dazu führt, dass der Merkur im Laufe der Zeit eine Rosettenbahn um die Sonne beschreibt.

Zwischen der Rotations- und der Orbitalperiode besteht eine Kopplung: während drei Rotationen um die eigene Achse umrundet Merkur zweimal die Sonne. Dies führt dazu, dass einer kompletten Tag-Nacht-Periode auf dem Planeten 176 irdische Tage entsprechen. Die Temperaturen auf Merkur schwanken dabei von -180 Grad Celsius bis $+430$ Grad Celsius.

Merkur ist der kleinste Planet im Sonnensystem und auch kleiner als der Jupitermond Ganymed und der Saturnmond Titan. Dennoch ist seine mittlere Dichte mit jener der Erde durchaus vergleichbar, was zu der Annahme



führt, dass Merkur einen relativ ausgedehnten, schweren Eisen- und nickelhaltigen Kern besitzen muss. Das Magnetfeld des Planeten beträgt nach Messungen etwa ein Hundertstel des Erdmagnetfeldes.

Merkurs Oberfläche ist voller Einschlagkrater in allen Größen, wie man sie vom Mond her kennt. Die imposanteste Oberflächenstruktur ist das Caloris-Becken mit einem Durchmesser von 1.300 Kilometern. Der für diesen Einschlag verantwortliche Körper scheint mit solch einer Wucht aufgeprallt sein, dass man noch auf der gegenüberliegenden Seite die Auswirkungen der im Planeten fokussierten Schockwellen glaubt erkennen zu können. Grob betrachtet

Fakten

Masse	$3,302 \times 10^{23} \text{ kg}$
Radius	2.439,7 km
Dichte	$5,427 \text{ g/cm}^3$
Rotationsperiode	58,65 Tage
Orbitalperiode	88 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$57,91 \times 10^6 \text{ km}$

Bild: Blick auf den Rand von Merkur. Deutlich erkennbar ist eine lange Böschung, die beim Schrumpfen des Planeten infolge seiner Abkühlung entstanden ist und sich über mehr als 400 Kilometer erstreckt. (© NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington)



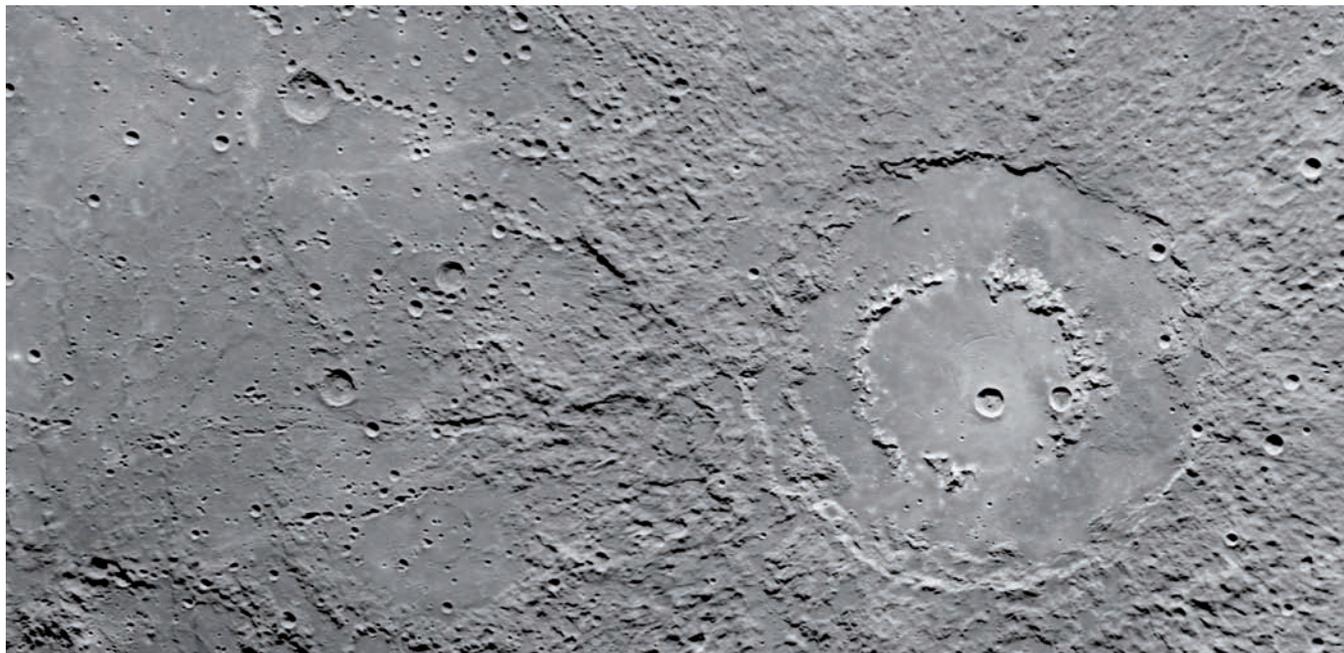
ähnelt der Merkur in seinem Inneren ein wenig der Erde und auf seiner Oberfläche mehr dem Erdmond. Doch anders als auf dem Mond findet man auf Merkur ausgeprägte Geländekanten („scarp“), die eine Schrumpfung des Kerns während der Abkühlphase nahe legen.

Über die Oberflächenzusammensetzung und den Aufbau des Merkurs herrscht noch immer große Unklarheit. Wegen seiner Nähe zur Sonne ist der Merkur mit Teleskopen von der Erde nicht gut zu beobachten und auch mit Raumsonden nur sehr schwierig anzusteuern: Bei Annäherungen an den Merkur sowohl die große Anziehungskraft des Zentralgestirns als auch die enorm hohe Strahlungsintensität berücksichtigt werden. Gegenwärtig befindet sich die Raumsonde MESSENGER auf einem komplizierten Kurs, der die Sonde bereits zweimal nahe am Merkur vorbeiführte und sie 2011 in eine Umlaufbahn um den Planeten bringen soll. Immerhin konnte bei den Vorbeiflügen weitere 25 Prozent der Merkur Oberfläche erfasst werden, von denen noch keine Aufnahmen existierten. Auf den neuen Bildern gibt es zahlreiche Hinweise auf einstigen Vulkanismus auf dem Merkur.

Wie der Mond ist auch Merkur außerstande, eine Atmosphäre an sich zu binden – dennoch offenbarte das Spektrometer an Bord von Mariner 10 eine hauchdünne Gashülle aus Wasserstoff, Helium und Sauerstoff mit Spuren von Natrium und Kalium. Die gesamte Masse dieser flüchtigen Elemente beträgt jedoch nur ungefähr tausend Kilogramm. Wahrscheinlich stammt ein großer Teil der Teilchen direkt von der Sonne, und nur wenig von Ausgasungen aus dem Inneren des Planeten selber. Auch könnte es sein, dass in einigen tiefen, nie von der Sonne beschienenen und deshalb permanent kalten Kratern an den Polen des Planeten Eis vorhanden ist: Hinweise darauf lieferten Radarbeobachtungen von der Erde.

Bild: Großes Doppelringbecken mit 260 Kilometern Durchmesser, dessen Inneres mit glattem Material vermutlich vulkanischen Ursprungs gefüllt ist. (© NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington)

Bild linke Seite: Globale Ansicht des Merkur in Echtfarbe, aufgenommen von der Sonde MESSENGER. Das helle Gebiet rechts oben im Bild ist das Innere des Caloris-Beckens. (© NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington)



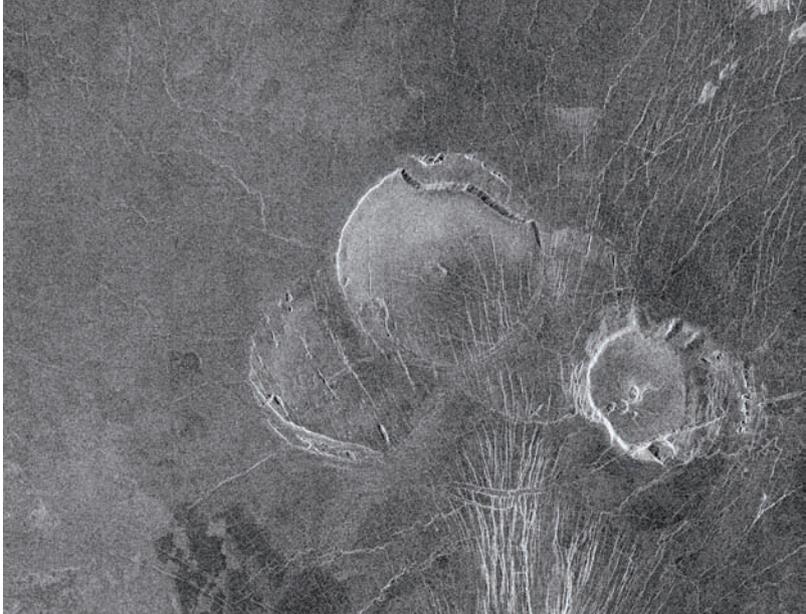
Venus

Von der Sonne aus gesehen ist die Venus der zweite Planet und gleichzeitig der nächste Planet zur Erde. Nach Sonne und Mond ist sie der hellste Himmelskörper, denn aufgrund ihrer Sonnennähe und der stets geschlossenen Wolkendecke ist der Anteil an reflektiertem Sonnenlicht besonders hoch. Bis zu vier Stunden vor Sonnenauf- bzw. nach Sonnenuntergang kann man den Planeten oft schon mit Beginn der Dämmerung sehr gut beobachten. Mit einem Durchmesser von 12.100 Kilometern ist der Planet fast genauso groß wie die Erde.

Nur selten ist die Venus genau vor der Sonnenscheibe sichtbar; da die Planeten die Sonne nicht exakt in einer Ebene umrunden, ziehen sowohl die Venus als auch der noch näher an der Sonne gelegene Merkur nicht bei jeder „Opposition“ – einer Konstellation, in der sich Sonne, Erde und der jeweilige Planet auf einer gedachten Linie befinden – von der Erde aus gesehen vor der Sonnenscheibe vorbei. Diese seltenen Ereignisse finden für beide Planeten nur in Abständen von acht Jahren, dann nach 121,5 Jahren, dann wieder in acht Jahren und wieder in 105,5 Jahren statt: Als kleine schwarze Pünktchen sind die Planeten dann mit einem durch eine spezielle Schutzfolie präparierten Teleskop vor der Sonne sichtbar. Der letzte Venusdurchgang fand am 8. Juni 2004 statt, der nächste Transit wird sich am 6. Juni 2012 ereignen.

Venus umrundet die Sonne in knapp 225 Tagen in einem durchschnittlichen Abstand von 108 Millionen Kilometern. Aufgrund einer im Vergleich zur Erde und den meisten anderen Planeten „retrograden“ – also einer gegen den Umlaufsinn um die Sonne verlaufenden – Rotation, währt ein Venustag (von einem Sonnenaufgang bis zum nächsten) 117 Erdentage. Wie der Mond weist auch die Venus

Fakten	
Masse	$4,869 \times 10^{24}$ kg
Radius	6.051,9 km
Dichte	5,24 g/cm ³
Rotationsperiode	243 Tage
Orbitalperiode	224,7 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$108,2 \times 10^6$ km



Phasen auf. Da die Rotationsachse des Planeten fast senkrecht auf der Bahnebene steht, gibt es jedoch so gut wie keine Jahreszeiten.

Venus hat eine sehr komplexe Landschaft. Siebzig Prozent der Oberfläche bestehen aus riesigen, zwei Kilometer über der Referenzhöhe liegenden Ebenen. Zwanzig Prozent der Oberfläche werden als tiefe Senken bezeichnet, die bis zu zwei Kilometer tief sind. Die restlichen zehn Prozent stellen das Venus-Hochland dar, das sich auf zwei Hauptgebiete konzentriert: Ishtar Terra im Norden mit den elf Kilometer hohen Maxwell Montes am östlichen Rand dieses Gebiets, und Aphrodite Terra in der Äquatorgegend mit Ovda Regio und Thetis Regio; beide Terrae haben Ausmaße irdischer Kontinente. In Aphrodite Terra liegt auch ein riesiges Tal, Diana Chasma, mit einer Tiefe von zwei Kilometern und einer Breite von fast 300 Kilometern. Dieses Tal

ist größtmäßig vergleichbar mit den Valles Marineris auf dem Mars und ist wahrscheinlich tektonischen Ursprungs, wurde also durch Spannungen in der Venuskruste aufgerissen. Ein großes vulkanisches Gebiet ist die bis zu vier Kilometer hohe Beta Regio.

Bild: Drei ungewöhnliche Vulkane in den Ebenen von Guinevere Planitia. (© NASA/JPL)

Bild rechte Seite: Computersimulierte globale Ansicht auf der Grundlage der Radardaten von Magellan. (© NASA/JPL)



Insgesamt hat man auf der Venus über 1.000 Vulkane und viele bizarr anmutende Formationen vulkano-tektonischen Ursprungs gefunden. Aber auch Einschlagskrater wurden entdeckt – jedoch weit weniger als beispielsweise auf dem Mars. Diese Beobachtung lässt den Schluss zu, dass die Oberfläche der Venus nicht sehr alt ist. Vor etwa 600 bis 500 Millionen Jahren wurde in einer globalen Katastrophe die Landschaft der Venus völlig neu gestaltet; vermutlich ereigneten sich unzählige, über den ganzen Planeten verteilte Vulkanausbrüche. Die Ursachen für diesen „Erneuerungsprozess“ sind noch nicht genau bekannt.

Auf Grundlage der globalen Radarkartierung der Raumsonde Magellan (1990-1994) wissen wir, dass die Kruste der Venus offenbar nicht wie auf der Erde in großräumige Kontinentalplatten geteilt ist. Es wird aber vermutet, dass die geologische Aktivität der Venus ein Stück Frühzeit der Erdgeschichte widerspiegelt, denn man weiß nicht genau, ob die Kontinentalplatten auch während der ersten zwei oder drei Milliarden Jahre über den plastischen Erdmantel drifteten. Bodenproben der russischen Sonden Venera 13 und 14 ergaben eine Gesteinszusammensetzung, die grob irdischem Ozeanboden ähnelt: Die Venuskruste besteht zu großen Anteilen aus Basalten, einem dunklen, vulkanischen Silikatgestein.

Die Atmosphäre der Venus ist rund 90-mal massereicher als die der Erde. Am Boden herrscht bei einer mittleren Oberflächentemperatur von 477 Grad Celsius ein Druck von 93 Bar. Die



Troposphäre des Planeten, also die Region, in der sich das Wetter abspielt, reicht bis in eine Höhe von 100 Kilometern (Erde: 10 Kilometern). Vom Venusboden aus nimmt die Temperatur bis in eine Höhe von 60 Kilometern kontinuierlich ab und bleibt bis zum Ende der Troposphäre relativ konstant. Anders als bei der Erde geht die Troposphäre direkt in die Thermosphäre über, die diesen Namen bei der Venus nur auf der Tageseite verdient. Auf der Nachtseite fallen die Temperaturen bis auf -173 Grad Celsius ab, so dass man hier von der Kryosphäre spricht.

Zwischen ca. 45 und 70 Kilometern liegen drei dicke Wolken-schichten, die den Planeten völlig einhüllen und verschiedene Windströmungen aufweisen. So zeigt die Wolkenoberseite eine äquatoriale, ebenfalls retrograde, viertägige Ost-West-„Superrotation“ mit Geschwindigkeiten von 360 Stundenkilometern, d.h. die oberste Atmosphärenschicht rotiert schneller als tiefer liegende Schichten und der Planet selbst. Darüber hinaus gibt es noch andere Zonen zirkularer Strömungen vom Äquator zu den Polen, die allerdings mit geringen Geschwindigkeiten ablaufen und vermutlich Wärme zu den Polen transportieren.

Ein Hauptgrund für die hohe Dynamik in der Venusatmosphäre dürfte in einem Zusammenspiel mehrerer Faktoren zu finden sein. Die sehr langsame Eigenrotation der Venus führt in Kombination mit der relativ großen Sonnennähe und der damit verbundenen Erwärmung des Planeten – immerhin empfängt der Himmelskörper doppelt so viel Strahlung von der Sonne wie die Erde – zu Konvektionsströmen, also zu großräumigen Umwälzungen in der Atmosphäre. An der Venusoberfläche herrscht erstaunlicherweise jedoch beinahe Windstille.

Die Zusammensetzung der Venusatmosphäre hat sich über viereinhalb Milliarden Jahren kaum verändert und spiegelt somit einen Zustand aus der Frühzeit der Planetenentwicklung wieder. Sie enthält 96,5 Prozent Kohlendioxid (CO_2) und nur 3,5 Prozent Stickstoff (N_2). Weiterhin findet man höhenabhängig u.a. Schwefeldioxid (SO_2), Wasser (H_2O) und damit auch Schwefelsäure (H_2SO_4). Kohlen- und Schwefeldioxid sowie auch etwas Wasser in der hohen Atmosphäre sind für den Treibhauseffekt auf der Venus verantwortlich; obgleich 80 Prozent

Bild: Vulkanische Aufwölbungen mit 65 Kilometern Durchmesser aber nur 600 Metern Höhe in der Region Eistla. (© NASA/JPL)

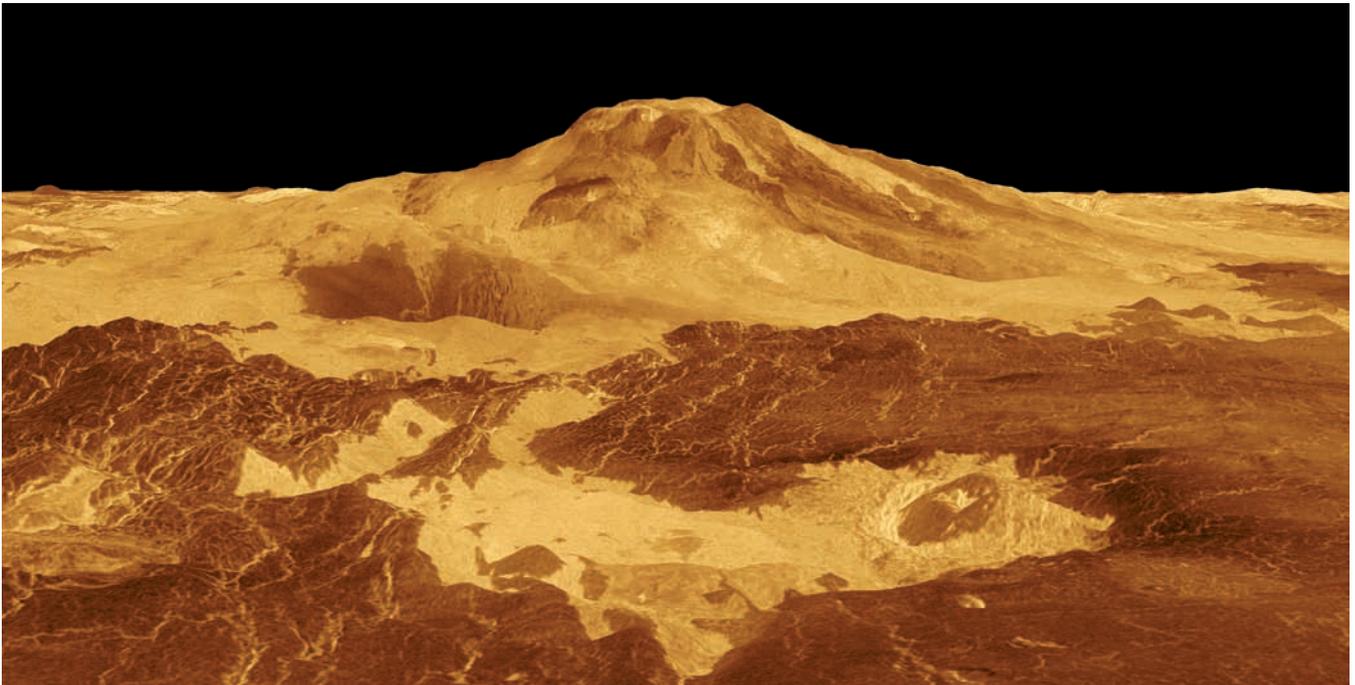
des einfallenden Sonnenlichtes von den Wolken reflektiert werden, reichen die verbleibenden 20 Prozent aus, um den Planeten aufgrund des intensiven Treibhauseffektes aufzuheizen. Wie man am Beispiel der Venus deutlich ablesen kann, hätte ein ähnlich effektiver Treibhauseffekt für die Biomasse auf der Erde langfristig verheerende Folgen.

Trotz fast identischer Größe entwickelten sich beide Planeten zwangsläufig unterschiedlich. Die Ursache hierfür liegt in einem zwar vergleichsweise nur geringen, aber doch entscheidend größeren Abstand der Erde zur Sonne. Beide Körper hatten zu Beginn des Sonnensystems etwa gleichgroße Anteile an flüchtigen Elementen wie beispielsweise Wasserstoff. Auf beiden Planeten wurde Wasser durch vulkanische Prozesse an die Oberfläche transportiert. Ein geringerer Anteil an Wasser stammt von Kometen und Asteroiden, die vor 4,5 bis 3,8 Milliarden Jahren in sehr viel größerer Zahl als heute auf die Erde stürzten. Auf der Erde bildete vermutlich dieses Wasser Ozeane, die seither Bestandteil des Planeten sind; auf der wärmeren

Venus ist fraglich, ob es überhaupt jemals zur Bildung stehender Gewässer kam; falls ja, wäre ihnen bestimmt keine lange Existenz beschieden gewesen – das Wasser wäre verdampft und zu großen Teilen ans Weltall verloren gegangen.

Das meiste Kohlendioxid der irdischen Uratmosphäre wurde über die Meeressedimente in Gestein oder durch Photosynthese über organische Prozesse in Sauerstoff und Kohlenhydrate umgewandelt. Auf der Venus hingegen wurde es nach anfänglich etwas moderateren Temperaturen schließlich so heiß, dass nicht nur alle hypothetisch vorhandenen Ozeane sehr früh verdampften, sondern möglicherweise auch das in den im Wasser abgelagerten Sedimenten gebundene Kohlendioxid aus dem Gestein heraus in die Venusatmosphäre wieder entlassen wurde. Insgesamt enthält die Erde heute ebensoviel Kohlendioxid wie die Venus, nur ist das Molekül in Kalk- und Karbonatgesteinen der Erdkruste gebunden.

Bild: Perspektivische Ansicht des acht Kilometer hohen Vulkans Maat Mons. (© NASA/JPL)





Erde

Die Erde ist der größte und schwerste der „inneren“ Planeten des Sonnensystems, die man aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit unserem Heimatplaneten auch die „terrestrischen“, die erdähnlichen Planeten nennt. Über 50 Prozent ihrer Gesamtmasse entfallen auf die Erde. Im Vergleich mit den anderen erdähnlichen Körpern hat sich die Erde höchst differenziert entwickelt: Im Laufe von über vier Milliarden Jahren brachte die Erde mehr Mineral- und Gesteinsvariationen hervor als alle anderen Planetennachbarn. Sie ist vor allem auch deshalb einzigartig, weil sie alle notwendigen physikalisch-chemischen Voraussetzungen für eine längerfristig angelegte Existenz vielfältiger, entwicklungsfähiger und hochorganisierter Lebensformen bietet.

Die Erde umkreist die Sonne einmal in 365,24 Tagen in einem durchschnittlichen Abstand von 149,6 Millionen Kilometern – dem Maß für die „Astronomische Einheit“ – mit einer mittleren Geschwindigkeit von 29,8 Kilometern pro Sekunde. Die Ebene der Erdbahn nennt man Ekliptik. Die Schiefe der Erdachse zum Lot auf die Ekliptik ist Ursache der Jahreszeiten, die sich infolge der Präzession sehr langsam verschieben. Die Eigenrotation der Erde bewirkt den allseits bekannten Wechsel von Tag und Nacht, deren Länge jahreszeiten- und breitenabhängig ist. Das Zusammenspiel zwischen Erdrotation und Gravitationseinfluss von Sonne und Mond auf die Erde führt zum Gezeitenwechsel der Meere, dem auch Land- und Luftmassen unterliegen.

Der Aufbau der Erde ist relativ gut bekannt. Untersuchungen zur Ausbreitung von Erdbebenwellen im Erdkörper haben ergeben, dass die Erde einen im Durchmesser knapp 6.000 Kilometer großen, innen festen und außen flüssigen Eisen-Nickel-Kern hat. Dieser ist von einem Mantel von gut 3.000 Kilometern Mächtigkeit umgeben. Der flüssige Teil des Kerns ist Ursache für das permanente, aber einem ständigen

Fakten

Masse	$5,976 \times 10^{24} \text{ kg}$
Mittlerer Radius	6.378,1 km
Dichte	5,515 g/cm ³
Rotationsperiode	23,93 h
Orbitalperiode	365,24 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$1,496 \times 10^8 \text{ km}$



Wandel unterworfenen Erdmagnetfeld. Im Erdzentrum herrscht eine Temperatur von über 6.000 Grad Celsius und ein Druck von mehreren Millionen Bar. Über dem Erdmantel befindet sich die weniger als 100 Kilometer mächtige dünne Erdkruste (Lithosphäre), die in sechs große und mehrere kleinere Platten zerbrochen ist, auf denen gemäß dem Archimedisches Prinzip isostatisch die Kontinente „schwimmen“, gleichsam wie Eisberge im Wasser.

Bild: Die Wüste Rub' al Khali auf der arabischen Halbinsel, eine der größten Sandwüsten der Erde. (© NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team)

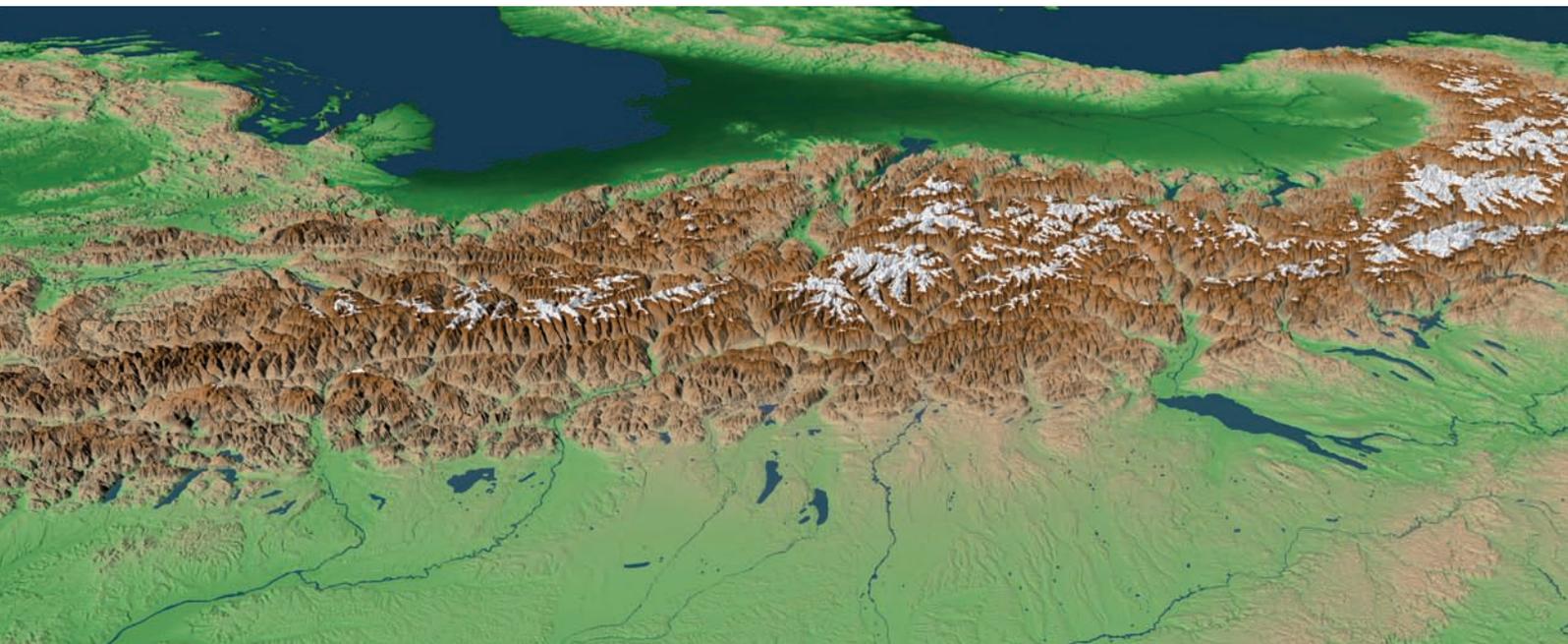
Bild linke Seite: Globale Ansicht der Erde mit Mittelamerika, aufgenommen von Apollo 16 auf dem Weg zum Mond. (© NASA)

Alfred Wegener (1880-1930) erkannte anhand kontinentaler Küstenverläufe, kristalliner Sedimente und seltener Fossilien, dass sich die Kontinente in bestimmte Richtungen mit einer Geschwindigkeit von einigen Zentimetern pro Jahr bewegen. Auf seinen Beobachtungen basieren die heutigen Modelle der Plattentektonik. Da die Erdkruste eine geringere Dichte besitzt als der Erdmantel, gleiten die Lithosphärenplatten elastisch auf dem äußeren Mantel, angetrieben durch Konvektionsströme des oberen Erdmantels. Wo die Krustenplatten auseinander driften, klaffen – meist submarine – Gräben auf, aus denen Magma emporsteigt (z.B. entlang des mittelatlantischen Rückens); wo sie aufeinander zulaufen oder aneinander vorbeidriften, sinken die Gesteine der Erdkruste an den sogenannten Subduktionszonen ins Erdinnere ab (z.B. Marianengraben), und es können sich, wenn auf diese Weise frontal zwei Kontinente kollidieren, hohe Gebirge bilden (z.B. die Alpen). So wird die Erdkruste permanent verändert und erneuert, was sich auch darin widerspiegelt, dass der überwiegende Teil der heutigen Erdoberfläche jünger als 100 Millionen Jahre alt ist. Erst wenn der Zerfall radioaktiver Elemente im Erdinneren nachlässt und die dabei frei werdende Energie zur Bildung von Gesteinsschmelzen nicht mehr

ausreicht, wird sich die Erdkruste nicht mehr erneuern und der einebnenden Erosion durch Wind und Wasser völlig ausgeliefert sein.

Knapp 71 Prozent der Erdoberfläche sind von Meerwasser bedeckt. Diese ozeanischen Wassermassen sind in der Lage, große Mengen (Wärme-) Energie zu speichern und zeitlich verzögert wieder an Luft und Land abzugeben. Neben dem Wind trägt auch das Wasser erheblich zur Erosion der Erdoberfläche bei. In der Frühzeit der Erdgeschichte hat das damals um mehrere Größenordnungen heftigere Meteoritenbombardement das Antlitz der Erde geprägt. Diskutiert wird seit einiger Zeit, ob nicht ein Großteil der ozeanischen Wassermassen von Kometen stammt, die mit der Erde kollidiert sind. Auch ein zunehmender Treibhauseffekt mit einer Zunahme des Wasserdampf- und CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre hätte heutzutage die Kraft, irdische Landschaften schneller umzuformen, als sich Fauna

Bild: Perspektivische Ansicht der durch den afrikanischen Kontinent aufgefalteten Alpen und des Voralpenlandes. (© DLR)





und Flora anpassen können. Hier kann die Fernerkundung vom Weltraum aus wertvolle Daten für Klimatrends und Langzeitprognosen liefern.

Die Masse der Erde reicht aus, dauerhaft eine Atmosphäre an den Planeten zu binden. Gegenwärtig enthält die „untere“ Erdatmosphäre (Troposphäre) 78 Prozent Stickstoff (N_2), 21 Prozent Sauerstoff (O_2) und ein Prozent Argon; die restlichen Gase kommen lediglich in Spuren vor. Der für aerobe Organismen lebenswichtige freie Sauerstoff wurde und wird ausschließlich durch die Photosynthese der Pflanzen und Algen gebildet; würde dieser Prozess global aussetzen, wäre der freie Sauerstoff

nach etwa 300 Millionen Jahren verschwunden und damit wieder ein chemisches Gleichgewicht hergestellt sein, wie es vor Beginn des Lebens gegeben war. Die Troposphäre reicht bis in eine Höhe von 10 Kilometer; in ihr spielt sich das Wettergeschehen ab. An die Troposphäre schließen sich die Stratosphäre (bis 50 Kilometer), Mesosphäre (bis 80 Kilometer) und Thermosphäre (etwa gleich Ionosphäre und Suprasphäre bis ca. 800 Kilometer) an; ihr folgt die ultradünne Exosphäre. In der irdischen Stratosphäre wird das Ozon (O_3) produziert, das vor allem die Landbewohner vor der lebensfeindlichen UV-Strahlung der Sonne schützt und zurzeit durch schädliche anthropogene Einflüsse insbesondere über den kalten Polgebieten schwindet.

Bild: Sonnenuntergang über dem Pazifischen Ozean, aufgenommen von der Internationalen Raumstation aus. (© NASA)

Mond

Der Erdmond ist der kleinste der erdähnlichen, der „terrestrischen“ Körper des inneren Sonnensystems. Die Oberfläche des Mondes lässt sich in zwei deutlich unterschiedliche Gebiete unterteilen: Über 80 Prozent sind Hochland und knapp 20 Prozent sogenannte Mare. Das Hochland hat eine hohe Albedo, strahlt also einen höheren Anteil des einfallenden Sonnenlichts ins All zurück als die dunklen, deutlich weniger Sonnenlicht reflektierenden Mareoberflächen. Das Hochland ist auch mit wesentlich mehr Einschlagskratern übersät, woraus sich ein höheres Alter dieser Oberflächeneinheiten ableiten lässt.

Bild: Panorama der Apollo 17-Landestelle mit Astronaut Harrison „Jack“ Schmitt bei der Untersuchung von Tracy's Rock. (© NASA/JSC)

Die Maregebiete finden sich hauptsächlich auf der erdzugewandten Seite. Sie sind jünger als die Hochländer und indirekt das Ergebnis von riesigen Meteoriteneinschlägen, die später durch vulkanisches Gestein gefüllt wurden. Der Umstand, dass sich auf der Mondvorderseite eine größere Zahl der großen Impaktbecken mit basaltischer Lava füllen konnten als auf der Rückseite des Mondes, ist darauf zurückzuführen, dass die Mondkruste auf der erdzugewandten Seite wesentlich dicker ist und so den Austritt von Magma aus dem Mondmantel erschwerte.

Fakten	
Masse	$7,3483 \times 10^{22} \text{ kg}$
Radius	1.737,4 km
Dichte	3,341 g/cm ³
Rotationsperiode	27,32 Tage
Orbitalperiode	27,32 Tage
Durchschnittliche Entfernung zur Erde	384.000 km

Die geologische Entwicklung des Mondes war schon relativ früh abgeschlossen. Vermutlich entstand der Erdbegleiter, als vor 4,4 bis 4,5 Milliarden Jahren ein planetarer Körper etwa von der Größe des Mars mit der noch jungen, aber schon in Kruste, Mantel und Kern differenzierten Erde kollidierte. Die ins All geschleuderten Massen sammelten sich schwerkraftbedingt in einer die Erde umgebenden Scheibe aus Staub und Gesteinspartikeln, aus der der Mond kondensierte. Bald bildete der neue Tra-



bant der Erde eine frühe anorthositische, d.h. feldspatreiche Silikatkruste auf einem noch geschmolzenen Magmaozean, der in der Folgezeit differenzierte und einen Mantel und möglicherweise auch einen metallischen Kern ausbildete.

In der Folgezeit zernarbten häufige und sehr heftige Einschläge von Meteoriten und Asteroiden das Antlitz des Mondes. Die größten Einschläge drangen so tief in die Kruste ein, dass der Aufstieg basaltischer (d.h. eisen- und magnesiumreicher silikatischer) Laven begünstigt wurde, so dass sie an der Oberfläche austreten konnten. In wenigen hundert Millionen Jahren füllten sich die riesigen Einschlagbecken mit den gegenüber den Hochlandgesteinen silikatärmeren und daher dunkleren Basalten. Beobachter auf der Erde vermuteten in den dunklen Flächen mit Wasser gefüllte Meere, und so erklärt es sich, dass Einschlagbecken noch heute als „Meere“ (lat. Mare) bezeichnet werden, wie das Mare Imbrium, das Mare Serenitatis oder der Oceanus Procellarum.

Bild: Anblick der Mondoberfläche mit zahlreichen Kratern, aufgenommen von Apollo 8, im Vordergrund der 72 Kilometer große Krater Glocenius, benannt nach dem deutschen Physiker Rudolf Gockel. (© NASA)



Diese Entwicklung war vor etwa drei Milliarden Jahren so gut wie abgeschlossen, nur noch vereinzelt erreichen Magmen die Mondoberfläche; seither ist der Mond ein geologisch nahezu inaktiver Körper, der infolge seiner geringen Anziehungskraft keine Atmosphäre aus flüchtigen Gasmolekülen an sich binden konnte und keine größeren Wassermengen aufweist. Allerdings lassen Daten der in den Jahren 1997 bis 1999 den Mond umkreisenden Sonde Lunar Prospector vermuten, dass sich in den tiefen, permanent abgeschatteten Kratern an Nord- und Südpol im Mondboden in nicht unbeträchtlicher Menge Wassereis befindet, das vermutlich kometaren Ursprungs ist.

Bis heute ist der Mond der einzige terrestrische Körper, der neben einer Vielzahl von Sonden auch von Menschen direkt untersucht werden konnte. In den Jahren 1969 bis 1972 besuchten zwölf Astronauten im Rahmen der Apollo-Missionen den Mond und brachten ca. 382 Kilogramm Proben unterschiedlicher Gesteine zur Erde zurück. Die Mondproben mit ihrem meist hohen Alter (über drei Milliarden Jahre) und ihrem sehr detailliert untersuchten Chemismus ermöglichen uns einen Rückblick in die Frühzeit des Sonnensystems und auf die Entwicklungsgeschichte des Erde-Mond-Systems. Sie sind für ein besseres Verständnis der Evolution des Sonnensystems von großer Bedeutung.

Der Mond ist in jüngerer Zeit wieder zu einem der wichtigsten Ziele der Planetenforschung geworden. Die Untersuchung der Oberflächenstrukturen auf dem Mond und seines inneren Aufbaus kann helfen, die Entstehung des Erdtrabanten zu entschlüsseln. Damit lassen sich die Geschichte des Erde-Mond-Systems und viele offene Fragen bezüglich der Frühzeit des



Sonnensystems und der Planetenentwicklung insgesamt beantworten. Gleichzeitig werden die Grundlagen für ein besseres Verständnis der jungen Erde und ihrer Entwicklung gelegt. Der Mond könnte bei der Evolution des Lebens auf der Erde eine entscheidende Rolle gespielt haben, da er durch seine Schwerkraft seit Milliarden von Jahren für die Stabilisierung der Erdachse sorgt. Auch eine Rückkehr zum Mond mit Astronauten ist in der Diskussion und könnte gegen 2020 erfolgen.

Bild: Blick auf den Nordpol und die Vorderseite des Mondes in nahezu Echtfarben, aufgenommen von Galileo. (© NASA/JPL/USGS)

Mars

Von der Sonne aus gesehen ist der Mars der vierte Planet. Er ist der Erde in vielem ähnlich. Zwar ist er nur halb so groß wie die Erdkugel und besitzt einen kleineren eisenhaltigen Kern, doch weist er ebenfalls Jahreszeiten auf, die infolge eines längeren Bahnumlaufs um die Sonne etwa sechs Monate dauern. Auch gibt es auf dem Planeten eisbedeckte Polkappen und eine dünne Atmosphäre.

Marsbeobachtungen lassen sich bis in die Zeit der frühen Hochkulturen zurückverfolgen. Wohl wegen seiner rötlichen, an Blut erinnernden Farbe wurde der Planet nach dem Kriegsgott Ares (Mars) benannt. Anfang des 17. Jahrhunderts stellte Johannes Kepler auf Grundlage von wenigen, für seine Zeit aber sehr präzisen Messungen der Marspositionen des dänischen Astronomen Tycho Brahe die wichtigen „Keplerschen Gesetze“ auf, mit denen die Planetenbewegungen beschrieben werden. In den vergangenen Jahrhunderten benutzte man bei Marsoppositionen gerne den trigonometrisch gemessenen Erde-Mars-Abstand zur Bestimmung der Astronomischen Einheit (dem Abstand zwischen Erde und Sonne). 1877 erlag Schiaparelli einer optischen Täuschung, als er graben- und rillenartige Strukturen auf dem Mars zu sehen wähnte, die er „canali“ nannte. Für viele Zeitgenossen Schiaparellis konnten sie nur künstlichen Ursprungs sein und wurden noch lange Zeit später, als in der Fachwelt bereits die optische Täuschung erkannt



war, zum Anlass genommen, an eine intelligente Zivilisation auf unserem Nachbarplaneten zu glauben. Wenngleich man heute aufgrund einiger Untersuchungen von inzwischen sechs auf dem Planeten gelandeten Sonden Lebensformen auf dem Mars bisher ausschließen kann, so ist der Planet nach wie vor das wichtigste langfristige Ziel der internationalen Raumfahrt im Hinblick auf die Suche nach existierendem oder ausgestorbenem Leben auf einem anderen Himmelskörper des Sonnensystems.

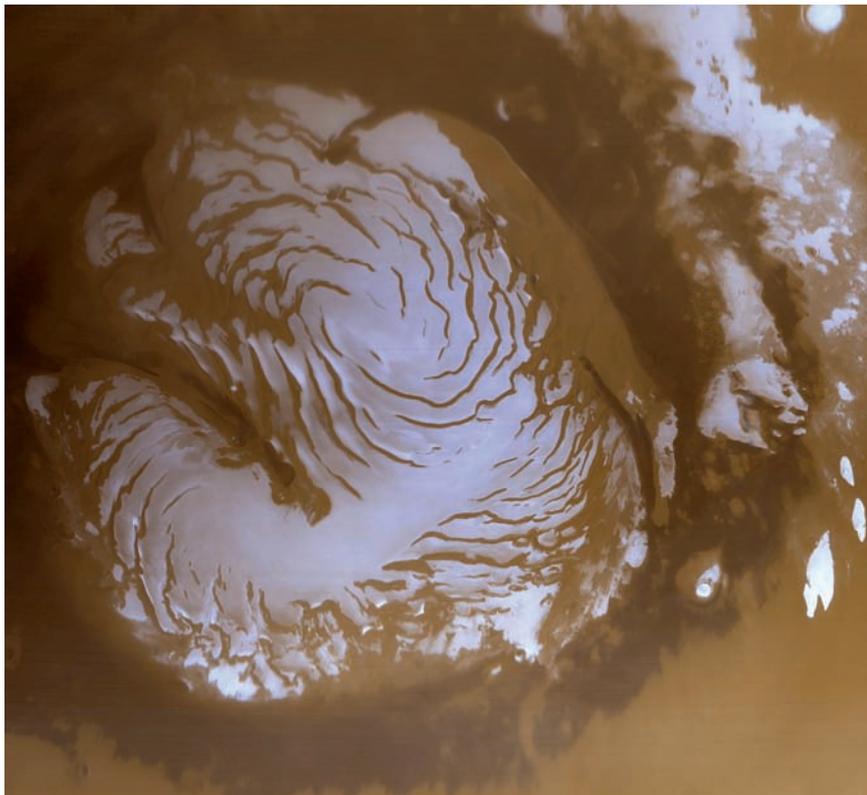
Dank Mariner 9 sowie Viking 1 und 2 und vor allem der jüngeren Orbitalmissionen wie Mars Express, Mars Global Surveyor oder Mars Reconnaissance Orbiter kennen wir die Oberflächenbeschaffenheit und -formationen recht gut. Grob kann

Bild: Südlicher Arm der Kasei Valles und die nördlich angrenzende Hochebene Sacra Mensa, aufgenommen von Mars Express. (© ESA/DLR/FU Berlin, G. Neukum)

Fakten

<i>Mars</i>	<i>Masse</i>	$6,4185 \times 10^{23} \text{ kg}$
	<i>Radius</i>	3.397 km
	<i>Dichte</i>	$3,94 \text{ g/cm}^3$
	<i>Rotationsperiode</i>	$24,62 \text{ h}$
	<i>Orbitalperiode</i>	687 Tage
	<i>Durchschnittliche Entfernung von der Sonne</i>	$227,9 \times 10^6 \text{ km}$
<i>Phobos</i>	<i>Masse</i>	$1,063 \times 10^{16} \text{ kg}$
	<i>Größe</i>	$26,8 \times 22,4 \times 18,4 \text{ km}$
	<i>Dichte</i>	$2,0 \text{ g/cm}^3$
	<i>Orbitalperiode</i>	$0,3189 \text{ Tage}$
<i>Deimos</i>	<i>Durchschnittliche Entfernung zum Marsmittelpunkt</i>	$9,378 \times 10^3 \text{ km}$
	<i>Masse</i>	$2,38 \times 10^{15} \text{ kg}$
	<i>Größe</i>	$15 \times 12,2 \times 10,4 \text{ km}$
	<i>Dichte</i>	$1,7 \text{ g/cm}^3$
	<i>Orbitalperiode</i>	$1,262 \text{ Tage}$
	<i>Durchschnittliche Entfernung zum Marsmittelpunkt</i>	$23,459 \times 10^3 \text{ km}$

man die Oberfläche in zwei große Regionen unterteilen: ein nördliches Gebiet mit Tiefebene und ein südliches Hochland mit zahlreichen Einschlagskratern. Besonders auffallend sind in Äquatornähe der 24 Kilometer hohe und im Durchmesser 600 Kilometer große Schildvulkan Olympus Mons sowie seine drei etwas kleineren Nachbarn (Arsia Mons, Ascraeus Mons und Pavonis Mons), die der sechs Kilometer hohen Tharsis-Region aufsitzen. Markant auch das gewaltige Canyonsystem der Valles Marineris, das fast 5.000 Kilometer lang und bis zu 200 Kilometer breit ist. An den tiefsten Stellen sind die Grabenbrüche bis zu elf Kilometer tief. Im Einzugsgebiet des Talsystems fällt eine Landschaft mit zahlreichen ausgetrockneten Flussbetten und kleineren Canyons auf – ein Hinweis darauf, dass früher einmal Wasser oder Gletschereis auf dem Mars gewirkt haben könnten. Auf der



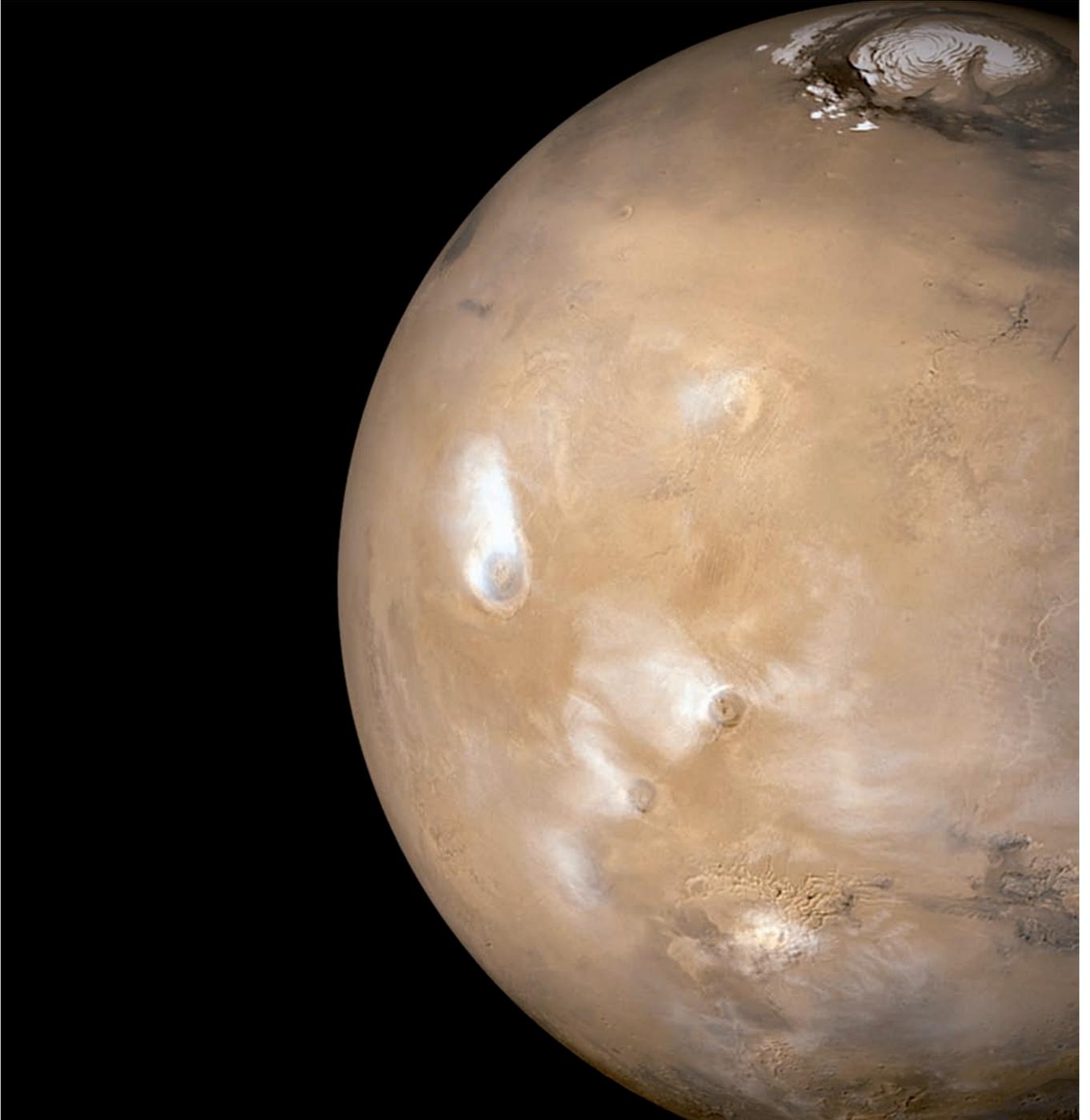
südlichen Hemisphäre liegen schließlich noch das Hellas- und Argyre-Einschlagsbecken; die Polkappen sind je nach Jahreszeit mit einer dicken Schicht aus Wasser- und/oder Kohlendioxyeis bedeckt. Die Temperaturen können tagsüber im Sommer in Äquatornähe bis nahe +30 Grad Celsius ansteigen, in winterlicher Marsnacht an den Polen dagegen bis auf -140 Grad Celsius abfallen. Die Tagesdurchschnittstemperaturen am Äquator liegen unterhalb des Gefrierpunkts.

Wie bei der Venus besteht die Marsatmosphäre überwiegend (zu 95 Prozent) aus Kohlendioxid (CO₂); der Druck an der Oberfläche beträgt jedoch nur sechs Millibar (auf der Erde 1013 Millibar). In der Marsatmo-

Bild oben: Blick über den Zentralteil der Valles Marineris. (© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum))

Bild unten: Nordpolkappe des Mars im Sommer, aufgenommen von Mars Global Surveyor. (© NASA/JPL/MSSS)

Bild rechte Seite: Staubsturm in Syria Planum südlich des Labyrinthus Noctis. In der Bildmitte der große Vulkan Olympus Mons, rechts davon die etwas kleineren Tharsis-Vulkane. (© NASA/JPL/Malin Space Science Systems)





sphäre können sich Wolken aus Wasserdampf und jahreszeitlich bedingt gewaltige Stürme entwickeln, die Sand und Staub bis in eine Höhe von 50 Kilometer aufwirbeln und über den ganzen Planeten verteilen, was zu einer gelbbraunlichen Trübung des Himmels und deutlich sichtbaren Dünenfeldern führt. Viele Staubstürme sind regional begrenzt, doch alle fünf bis zehn Jahre können sie globale Ausmaße annehmen.

Marsmonde

Die beiden Marsmonde Phobos und Deimos, 1877 von Asaph Hall entdeckt, weisen einige Ähnlichkeiten auf. Beide besitzen eine sehr unregelmäßige Form und haben eine sehr dunkle Oberfläche, die nur etwa 5 Prozent des Sonnenlichts reflektiert. Phobos weist einige Einschlagkrater auf, von denen Stickney mit zwölf Kilometern Durchmesser und Hall mit fünf Kilometern Durchmesser die größten sind.

Der Ursprung der beiden Marsmonde ist nicht geklärt. Es ist gut möglich, dass Phobos und Deimos nicht zusammen mit dem Mars als Monde entstanden sind. Auch gibt es Zweifel an der Theorie, dass es sich bei beiden Körpern um Fragmente

handelt, die in der Frühzeit des Mars bei einem großen Asteroideneinschlag herausgeschleudert wurden. Mit einiger Wahrscheinlichkeit handelt es sich um Kleinkörper, die im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter entstanden sind und von der Schwerkraft des Mars eingefangen wurden.

Die Auswertung von Bildern der Sonde Mars Express brachte die Erkenntnis, dass Phobos zum Zeitpunkt der Aufnahmen seiner vorhergesagten Orbit-Position um etwa fünf Kilometer voraus eilte. Möglicherweise ist dies ein Anzeichen für eine orbitale Beschleunigung, die den winzigen Mond dem Mars auf einer spiralförmigen Bahn immer näher bringt. Phobos könnte schließlich durch die Gravitationskräfte des Planeten in etwa 50 Millionen Jahren auseinander gerissen und zu einem kurzlebigen Marsring werden oder aber der Mond stürzt auf den Mars. Die russische Sonde Phobos Grunt, deren Start für Ende 2009 geplant ist, soll auf dem Marsmond landen und ihn eingehend untersuchen.

Bild: Marsmonde Phobos (links) und Deimos (rechts). (© NASA/JPL-Caltech/University of Arizona)

Asteroiden

Zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter befindet sich der Asteroidengürtel mit bald einer halben Million bekannter Asteroiden, die man auch Kleinplaneten nennt. Wie sie in diesem Gürtel verteilt sind, wird vor allem vom Gravitationseinfluss des Riesenplaneten Jupiter bestimmt; in etlichen Zonen des Gürtels findet man so gut wie keine Asteroiden, an anderen Stellen dagegen treten sie zuhauf auf. Denkbar ist, dass auch die beiden kleinen Marsmonde Phobos und Deimos einst dazugehörten, dem Planeten Mars irgendwann zu nahe kamen und von ihm eingefangen wurden. Insgesamt tragen etwa 7.000 Asteroiden Eigennamen, die tatsächliche Zahl aller Asteroiden bis zu einem Durchmesser über einem Kilometer ist wahrscheinlich um mehr als eine Größenordnung höher. Einige Asteroiden haben stark exzentrische Bahnen und kreuzen die Mars-, Erd- oder sogar die Merkurbahn (Aten-, Apollo- und Amor-Asteroiden). Insbesondere die 7.000 heute bekannten Near-Earth Asteroids (NEOs) werden in jüngster Zeit intensiver studiert, um langfristig ihre Kollisionswahrscheinlichkeiten mit der Erde und deren mögliche Auswirkungen zu bestimmen.

Im vorigen Jahrhundert gab es bei der Benennung neuer Kleinplaneten bisweilen heftige Kontroversen, wenn es darum ging, nach welchen „höheren“, philologischen Prinzipien die Namen vergeben werden sollten. Die Namen der Kleinplaneten spiegeln aber auch die menschlichen Seiten und Beziehungen ihrer Entdecker wider, und so manche Astronemgattin, Tochter und Geliebte – selbst Haustiere – wurden hierbei am Himmel verewigt.

Entdeckt wurde der erste Asteroid in der Neujahrsnacht 1801 von Giuseppe Piazzi (1746-1826), dem damaligen Direktor der Sternwarte Palermo. Bei der



Anfertigung einer Himmelskarte bemerkte er ein Objekt, das seit der vorangegangenen Beobachtung seine Position geändert hatte. Der Wandelstern entpuppte sich als kleiner Planet, und Piazzi nannte ihn nach der Göttin der Vegetation und Schutzheiligen Siziliens Ceres. Zugleich schloss Ceres jene Lücke, die nach der sogenannten Titius-Bodeschen Regel zwischen Mars und Jupiter auftrat, für die aber bis dahin noch niemand einen

Planeten gefunden hatte. Piazzi hatte jedenfalls das Glück, auf Anhieb den mit ca. 1.000 km Durchmesser bis heute unangefochten größten Kleinplaneten gefunden zu haben. Mittlerweile wird Ceres als Zwergplanet eingestuft. Der Durchmesser der meisten Asteroiden liegt zwischen 20 und 100 Kilometer.

Die Titius-Bodesche Regel ist eine einfache mathematische Reihe, aus der sich recht genau die Abstände der Planeten zur Sonne ergeben - und aus der sich für die Region zwischen Mars und Jupiter ein „fehlender“ Planet postulieren ließ. Sie wurde gegen Ende des 18. Jahrhunderts aufgestellt von Johann Daniel Titius (1729-1796) und Johann Elert Bode (1747-1826). Eine ähnlich simple Reihe (Venus: kein Mond, Erde: ein Mond, Mars: zwei Monde, Jupiter: vier Monde) führte bereits 100 Jahre vor der Entdeckung der Marsmonde im Jahre 1877 durch Asaph Hall (1829-1907) dazu, dass Jonathan Swift (1667-1745) in seinem Buch Cullivers Reisen von zwei Marsmonden sprach. Die Titius-Bodesche Regel ist jedoch nicht universell gültig.

Bild: Asteroid Eros, Blick auf den Krater Psyche, mit 5,3 Kilometern Durchmesser der größte Krater auf dem Asteroiden. (© NASA/JHUAPL)

Mit Raumsonden konnten in den letzten Jahren mehrere Asteroiden vor Ort inspiziert werden. Im Jahre 1991 und 1993 flog die Raumsonde Galileo auf ihrer Reise zum Jupiter nahe an den beiden Asteroiden Gaspra und Ida vorbei und warf unter verschiedenen Winkeln Blicke auf deren Oberfläche – und entdeckte an dem 60 Kilometer langen Asteroiden Ida einen etwas über einen Kilometer großen Trabanten, der den Namen Dactyl erhielt. Was man schon von photometrischen Lichtkurven her wusste, kam nun deutlich zum Vorschein: Asteroiden sind unregelmäßig geformte, rotierende Felsbrocken, die von Kratern übersät sind und sogar kleinste Monde haben können.



Ende Juni 1997 wurde schließlich der Asteroid Mathilde von der amerikanischen Raumsonde NEAR auf ihrem Weg zum Kleinplaneten Eros (Nr. 433) besucht, den sie ab Februar 2000 ein Jahr lang umrundet hat. Ferner hat die Saturnsonde Cassini auf ihrem Flug durch den Asteroidengürtel am 23. Januar 2000 aus einer Distanz von etwa 2 Millionen Kilometer einige nahezu punktförmige Aufnahmen des Asteroiden Masursky gewonnen, der nach dem Mondforscher und Planetologen Harold Masursky (1923-1990) benannt ist. Somit sind die Asteroiden Gaspra, Ida, Mathilde und Eros bislang die einzigen Körper aus dem Asteroidengürtel, von denen Bilder mit hoher Auflösung existieren. Von einigen erdnahen Kleinplaneten wie z.B. Toutatis und Geographos wurden Radar- und Teleskopbilder gewonnen, auf denen man Oberflächenstrukturen grob ausmachen kann.

Das Studium dieser kleinen Körper ist deshalb von Bedeutung, weil sie in vielen Fällen die frühesten Stadien der Entwicklungsgeschichte unseres Sonnensystems widerspiegeln und sich aus der Analyse ihrer Oberflächenmorphologie und Zusammensetzung unter anderem Erkenntnisse über die Anfangszeit unseres Sonnensystems gewinnen lassen.

Aus diesem Grund wurde die Raumsonde Dawn (engl. für Dämmerung) entwickelt, die sich seit 2007 auf einer Reise in den Asteroidengürtel befindet. Angetrieben durch ein Ionentriebwerk wird diese NASA Discovery-Mission im August 2011 den Asteroiden Vesta erreichen. Dawn wird in eine Umlaufbahn um den mit etwa 500 Kilometer Durchmesser drittgrößten – und zweitschwersten – Asteroiden einschwenken. Nach Abschluss der Experimente im April 2012 wird die Sonde zum Zwergplaneten Ceres weiterfliegen. Dawn wird die erste Mission in der Geschichte der Raumfahrt sein, die an zwei unterschiedlichen Körpern in eine Umlaufbahn einschwenken wird. Die Kamera an Bord von Dawn wurde vom DLR und der Max-Planck-Gesellschaft entwickelt.

Bild: Neun verschiedene Aufnahmen des Asteroiden Ida in Echtfarbe, aufgenommen während der Annäherung der Sonde Galileo an den Asteroiden. (© NASA/JPL)

Bild rechte Seite: Die Asteroiden Eros, Mathilde, Ida und Gaspra (von links nach rechts), sind die einzigen, die bisher von Raumsonden besucht wurden. (© Einzelbilder: NASA/JPL/JHUAPL und NASA/JPL/USGS, Montage: DLR)



Jupiter

Jupiter ist der größte Planet unseres Sonnensystems. Mit einer Masse von einem Tausendstel der Sonne bzw. 318 Erdmassen und einer zum Teil sonnenähnlichen Zusammensetzung wäre dieser Planet fast eine zweite Sonne geworden. Jupiter ist nach Venus der zweithellste Planet am Nachthimmel. Schon in einem kleinen Fernrohr kann man die typischen verschiedenfarbigen Wolkenbänder, den seit Galileo Galilei bekannten Großen Roten Fleck und das Bewegungsspiel der vier nach ihrem Entdecker benannten Galileischen Monde sehen.

Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Jupiter knapp zwölf Jahre. Pro Sekunde legt Jupiter dabei durchschnittlich 13 Kilometer zurück. Wegen seiner enormen Masse beeinflusst der Planetenriese die Bahnen aller anderen Körper im Sonnensystem. Jupiters Gravitationseinfluss verursacht z.B. die Lücken im Asteroidengürtel; er lenkt Kometen von ihrer ursprünglichen Bahn ab, fängt manche von ihnen ein und stört die Bahnen der anderen Planeten – ein Effekt, der bei langfristigen Bahnberechnungen stets berücksichtigt werden muss. Auch nutzt man sein starkes Gravitationsfeld, um Raumsonden zu beschleunigen und deren Kurs merklich zu ändern (Voyager, Ulysses, Cassini-Huygens). Jupiters Radius (R_J) beträgt 71.500 Kilometer, seine Rotationsgeschwindigkeit liegt

bei knapp zehn Stunden. Diese hohe Geschwindigkeit führt zusammen mit Jupiters geringer mittlerer Dichte von $1,33 \text{ g/cm}^3$ zu einer deutlichen Abplattung des Planetenkörpers.

Am Äquator treten Windgeschwindigkeiten von 150 Metern pro Sekunde auf (540 km/h). Der markante Große Rote Fleck (GRF) gilt als ein isoliertes gigantisches Wirbelsturmgebiet, das relativ zur Bewegung anderer Atmosphärenstrukturen in der Umgebung zurückbleibt. Die obersten Schichten der dichten Atmosphäre enthalten vorwiegend (von außen nach innen) Wasserstoff (H_2), Ammoniak-Eiskristalle (NH_3), Ammoniumhydrogensulfid (NH_4HS) sowie Wassereis und -tröpfchen (H_2O). Modellen zufolge besteht der Planet zwischen $1,0$ bis $0,75 R_J$ tief aus einem molekularen Wasserstoff-Helium-Gemisch, das dann oberhalb des hohen Druckes bis $0,2 R_J$ in einen metallischen Zustand übergeht. Nur im Innersten des Planeten ($0-0,2 R_J$) rechnet man mit einem kleinen kompakten Planetenkern von zehnfacher Erdgröße.

Aufschluss über die obersten Wolkenschichten hat die Sonde Galileo gebracht, von der aus im Dezember 1995 ein Eintrittskörper mit sechs wissenschaftlichen Experimenten an Bord erstmalig in die kalte Atmosphäre eines äußeren Planeten eingetaucht ist. Ein wichtiges Ergebnis dabei ist, dass den Messungen zufolge der Heliumgehalt der Jupiteratmosphäre tatsächlich der solaren Häufigkeit entspricht: Jupiter befindet sich also gewissermaßen noch in einem unverbrauchten, noch nicht entmischten „juvenilen“ Zustand, wie das Zentralgestirn zu einem sehr frühen

Bild rechte Seite: Jupiter mit dem Großen Roten Fleck, einem gigantischen Sturmsystem. (© NASA/JPL/Space Science Institute)

Fakten		
<i>Jupiter</i>	Masse	$1,8987 \times 10^{27} \text{ kg}$
	Radius (äquatorial)	71.492 km
	Radius (polar)	66.854 km
	Dichte	$1,33 \text{ g/cm}^3$
	Rotationsperiode	9,925 h
<i>Io</i>	Orbitalperiode	11,86 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$778,4 \times 10^6 \text{ km}$
	Masse	$8,93 \times 10^{22} \text{ kg}$
	Mittlerer Radius	1.821 km
	Dichte	$3,55 \text{ g/cm}^3$
<i>Europa</i>	Orbitalperiode	1,769 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	422.000 km
	Masse	$4,79 \times 10^{22} \text{ kg}$
	Radius	1.562 km
	Dichte	$3,01 \text{ g/cm}^3$
<i>Europa</i>	Orbitalperiode	3,551 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	671.000 km





Zeitpunkt in der Entwicklung des Sonnensystems. Derzeit sind im Jupitersystem 63 Monde bekannt. Jupiter hat ein maximal etwa 30 Kilometer dickes äquatoriales Ringsystem, das aus drei Einzelringen zu bestehen scheint.

Jupitermonde

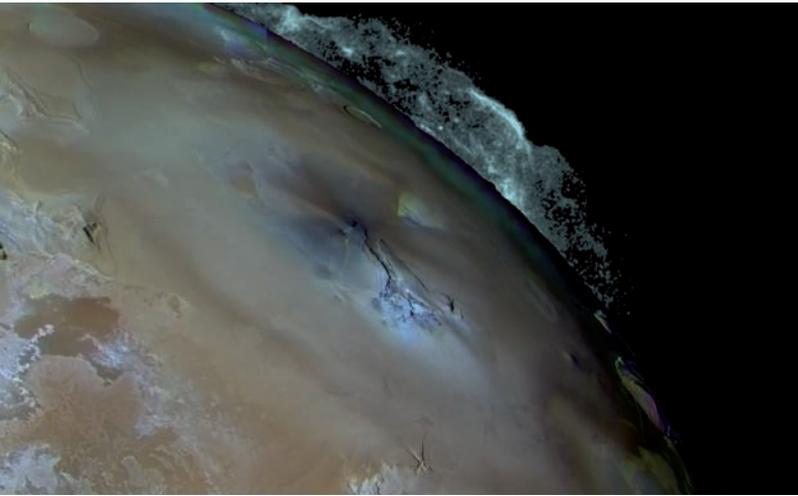
Die Galileischen Monde Io, Europa, Ganymed und Callisto wurden 1610 von Galileo Galilei entdeckt. Galileis Erkenntnis, dass es Trabanten gibt, die um einen größeren Körper kreisen, bekräftigte die These, dass die Erde nicht im Zentrum des Universums steht – oder wenigstens des damals bekannten Sonnensystems –, sondern die Sonne den Mittelpunkt des Planetensystems bildet und die Erde als einer von mehreren Planeten sie umrundet.

<i>Ganymed</i>	<i>Masse</i>	$1,48 \times 10^{23} \text{ kg}$
	<i>Radius</i>	2.632 km
	<i>Dichte</i>	1,94 g/cm ³
	<i>Orbitalperiode</i>	7,155 Tage
<i>Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter</i>		1.070.000 km
<i>Callisto</i>	<i>Masse</i>	$1,08 \times 10^{23} \text{ kg}$
	<i>Radius</i>	2.404 km
	<i>Dichte</i>	1,86 g/cm ³
	<i>Orbitalperiode</i>	16,69 Tage
<i>Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter</i>		1.883.000 km

Io ist der innerste der Galileischen Monde. Sein Volumen und seine Dichte sind dem Erdmond ähnlich. Io umläuft Jupiter in einer nahezu kreisförmigen Bahn, auf der er alle dreieinhalb Tage Europa begegnet. Durch diese Resonanz und infolge der enormen Anziehungskraft des Jupiters entsteht durch Gezeitenwirkung, die um ein Vielfaches stärker ist als die Wirkung des Mondes auf die Erde, Wärme im Inneren des Mondes. Dies hat sehr intensive vulkanische Prozesse zur Folge. Während der Voyager-Vorbeiflüge und im Zuge der Galileo-Beobachtungen wurden über ein Dutzend aktive Vulkane und über einhundert vulkanische Förderzentren registriert. Vulkanischen Ursprungs sind wahrscheinlich auch die bis zu 11.000 Meter hohen Berge, sowie vulkanisch geschichtete Strukturen bis zu Höhen von 1.700 Meter. Io ist ein Körper, dessen Oberfläche durch die vulkanische Aktivität ständig umgeformt wird. Aktive Vulkane schleudern Material mehrere hundert Kilometer hoch, das dann großflächig auf die Oberfläche niedergeht. Infolge der Bewegung des Mondes durch das starke Magnetfeld des Jupiter werden starke elektrische Ströme induziert und große Mengen der vulkanischen Auswurfprodukte ionisiert und ans Weltall verloren.

Europa ist der zweite der Galileischen Monde und etwas kleiner als der Erdmond. Seine Oberfläche besteht aus Eis und weist relativ wenige Einschlagkrater auf. Die obersten Schichten bestehen vor allem aus Wassereis, das Gesteins- und Mineralfragmente und möglicherweise auch Salze enthält. Dominierende Oberflächenstrukturen auf Europa sind langgezogene Bergrücken, die in fast allen mittel- und hochaufgelösten Aufnahmen zu sehen sind. Unter der Eiskruste existiert mit großer Wahrscheinlichkeit ein Wasserozean, der bis zu 200 Kilometer tief sein könnte. Die Frage nach der Existenz dieses hypothetischen Ozeans hatte eine so hohe Priorität für die Wissenschaftler, dass die Verlänge-

Bild: Galileische Monde und Jupiters Großer Roter Fleck im Größenvergleich. (© NASA/JPL/DLR)

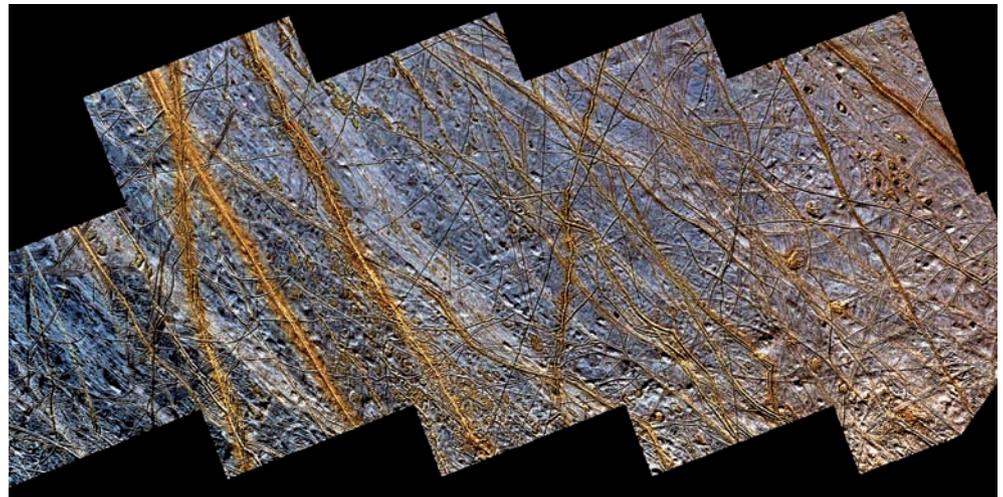


Die Galileo-Mission ist speziell dem Mond Europa gewidmet war. Könnte die Existenz des Ozeans endgültig nachgewiesen werden, wäre es die größte Wassermenge in flüssigem Zustand auf einem Körper des Sonnensystems. Europa ist deshalb nach Mars das vielversprechendste Ziel bei der Suche nach potentiellen Habitaten von Organismen außerhalb der Erde.

Ganymed ist der größte und von Jupiter aus gesehen der dritte der Galileischen Monde – mit einem Durchmesser von 5.262 Kilometern ist es der größte Mond im Sonnensystem. Ganymed hat eine sehr niedrige Dichte, was darauf hinweist, dass er einen Mantel aus Wassereis hat, der mehr als die Hälfte des Volumens einnimmt, und einen Kern aus Eisen oder Eisensulfid. Auf der Oberfläche befinden sich große, alte, dunkle, kraterreiche Gebiete und dazwischen helle, gefurchte Gebiete, die ca. 60 Prozent der Oberfläche bedecken. Ganymeds Inneres ist in Kern, Mantel und Kruste differenziert, und er besitzt ein Dipolmagnetfeld.

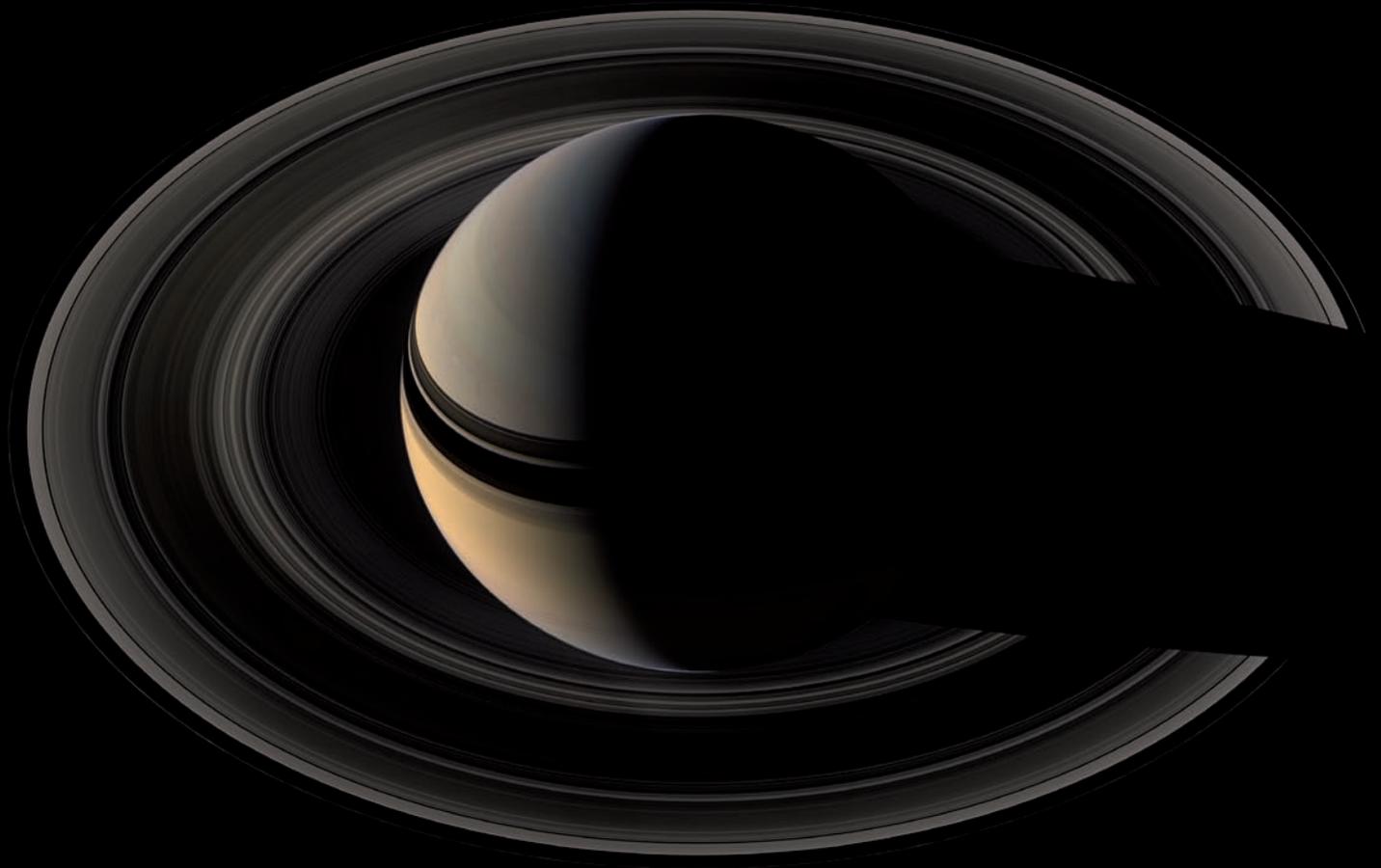
Bild oben: Ausbruch des Vulkans Pele auf Io. Der Auswurf erreicht bis 300 Kilometer Höhe. (© NASA/JPL/USGS)

Bild unten: Typische Oberflächenstrukturen auf Europa: doppelte Berggrücken, dunkle Flecken und glatte Eisebenen. (© NASA/JPL/DLR)



Callisto ist der äußere der Galileischen Monde. Er hat die niedrigste mittlere Dichte. Zusammen mit seinem großen Durchmesser deutet das darauf hin, dass Callisto große Mengen an Wassereis enthält. Die Oberfläche von Callisto ist mit Kratern übersät. Außerdem gibt es mindestens neun weitere große Einschlagsgebilde, die von einer Serie konzentrischer Ringe umgeben sind – in Anlehnung an antike, mehrfach beschriebene Manuskripte auf Papyrus werden diese eingeebneten Einschlagsstrukturen Palimpseste genannt. Der größte Palimpsest, Walhalla, besteht aus einem kraterarmen, zentralen Teil mit einem Durchmesser von etwa 600 Kilometern, der von einem System konzentrischer Ringe bis zu einem Abstand von 1.500 Kilometern umgeben ist. In Bildern mit hoher Auflösung erkennt man eine pulverartige Deckschicht, die offensichtlich die kleineren Krater zudeckt und jünger als die meisten Krater zu sein scheint. Ihre Herkunft ist noch völlig ungeklärt. Wie bei Ganymed auch, handelt es sich bei Callisto um einen geologisch heute inaktiven Körper. Magnetfeldmessungen der Raumsonde Galileo lassen jedoch die Interpretation zu, dass auch unter der Eiskruste von Callisto ein – wenn auch dünner – Ozean existiert.

Zum Jupitersystem gehören außerdem die folgenden Monde: Metis, Adrastea, Amalthea, Thebe, Leda, Himalia, Lysithea, Elara, Ananke, Carme, Pasiphae und Sinope und 47 weitere kleine Monde, die zum Teil erst in den letzten Jahren entdeckt wurden.



Saturn

Saturn ist mit einem Radius von etwa 60.000 Kilometern der zweitgrößte Planet in unserem Sonnensystem. Es ist der am weitesten entfernte, mit dem bloßen Auge sichtbare Planet. Bis 1781 galt er als äußerster Planet im Planetensystem. Seit der Erfindung des Fernrohrs beobachtet man um Saturn ein auffallendes Ringsystem, weswegen der Planet auch „Ringplanet“ genannt wird. Saturn ist etwa doppelt so weit wie Jupiter von der Sonne entfernt und benötigt für einen Bahnlauf knapp 30 Jahre. Alle 20 Jahre stehen Jupiter und Saturn, von der Erde aus betrachtet, recht nahe beieinander und bilden dann einen besonders markanten Lichtfleck am Nachthimmel; eine solche Nahkonstellation wird auch als eine plausible Erklärung für den berühmten Stern von Bethlehem herangezogen.

Mit der Gravitationskraft von 95 Erdmassen ist Saturn genau wie Jupiter in der Lage, Kometen von ihrer Bahn abzulenken und in seine „Saturnfamilie“ einzufangen. Saturns Aufbau ist ähnlich dem Jupiters. Vermutlich reicht die äußere relativ leichte Wasserstoff-Helium-Hülle aber sehr

Bild linke Seite: Globale Ansicht des Saturns in Echtfarben, Blick von hoch oben auf die unbeleuchtete Seite der Ringe. (© NASA/JPL/Space Science Institute)

viel tiefer, wofür auch die geringe Dichte Saturns von bloß 0,70 g/cm³ spricht. An der Wolkenobergrenze ist die Schwerkraft nur wenig geringer als auf der Erde. Da Saturn sehr rasch rotiert (rund zehn Stunden für eine Umdrehung) und von allen bekannten Planeten die niedrigste mittlere Dichte aufweist, ist bei ihm die Abplattung mit 1:10 stark ausgeprägt und schon in einem kleinen Teleskop zu erkennen.

Fakten		
Saturn	Masse	5,688 x 10 ²⁶ kg
	Radius (äquatorial)	60.268 km
	Radius (polar)	54.364 km
	Dichte	0,70 g/cm ³
	Rotationsperiode	10,233 h
	Orbitalperiode	29,4 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	1,429 x 10 ⁹ km
Mimas	Masse	3,8 x 10 ¹⁹ kg
	Mittlerer Radius	196 km
	Dichte	1,17 g/cm ³
	Orbitalperiode	0,942 Tage
Enceladus	Masse	8,4 x 10 ¹⁹ kg
	Mittlerer Radius	247 km
	Dichte	1,24 g/cm ³
	Orbitalperiode	1,370 Tage
Tethys	Masse	7,55 x 10 ²⁰ kg
	Mittlerer Radius	523 km
	Dichte	1,21 g/cm ³
	Orbitalperiode	1,888 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	294.660 km

Die Windgeschwindigkeiten in der Äquatorzone können 500 Meter pro Sekunde erreichen (1.800 km/h). Seit 1876 beobachtet man gut alle 30 Jahre in der nördlichen Saturnhemisphäre das Auftreten eines Wirbelsturms, der als Großer Weißer Fleck in die Literatur eingegangen ist und auf ein jahreszeitliches Verhalten des Planeten hinweist. Wie Jupiter strahlt der Planetenkörper mehr Wärme ab, als er von der Sonne empfängt.

Saturns Ringsystem besteht nach klassischer Einteilung aus sieben Ringgruppen. Sie werden mit zunehmendem Abstand zum Planeten mit den Buchstaben D, C, B, A, F, G und E bezeichnet. Seit dem Vorbeiflug der Voyager-Sonden 1980/81 wissen wir, dass Saturn in seiner Äquator-ebene, die um knapp 27 Grad gegen seine Bahnebene geneigt ist, in Wirklichkeit von über 1.000 Einzelringen umgeben ist, deren Entstehung, Form und Dynamik sowie Zusammensetzung es noch weiter zu erforschen gilt. Möglicherweise befand sich einst an Stelle der Ringe ein Mond, der vermutlich von einem Asteroiden getroffen wurde und dabei zerbrach. Weitere Astero-

identrefeffer und gegenseitige Zusammenstöße ließen die Felsbrocken nach und nach zerbröseln. Die dabei absplitternden Teilchen verteilten sich auf unterschiedlichen Umlaufbahnen und bilden das heutige Ringsystem. Dieser zerstörerische Prozess setzt sich kontinuierlich fort, gleichzeitig aber kommt es durch die Zusammenstöße zur Bildung von neuen kleinen Monden – in den Ringen spielt sich ein dynamisches Werden und Vergehen ab. Die Bestandteile einiger Ringe werden von sogenannten „Schäferhundmonden“ auf ihre Bahn gezwungen. Die Größe der Teilchen variiert je nach Ring zwischen der Größe eines Staubkorns und eines Hauses; einige Ringe bestehen vorwiegend aus festen Bestandteilen, während andere mehr flüchtige Gas- und Eispartikel enthalten. Für den äußersten der Ringe (E) verdichten sich die Hinweise, dass er mit Eispartikeln gespeist wird, die an vulkanisch aktiven Zonen des benachbarten Mondes Enceladus ausgestoßen werden.

Die Ringe reichen vier Planetenradien weit in den Raum hinein; da ihre Bahnebene auch gegen die Ekliptik geneigt ist, schauen wir von der Erde aus mal schräg von oben, mal schräg von unten auf die Ringebene, sehr selten auch direkt auf die Kante. Die Dicke des Ringsystems dürfte weniger als einen Kilometer betragen, denn in Kantenstellung verschwindet der Ring dann selbst beim Blick durch die größten irdischen Teleskope. Das

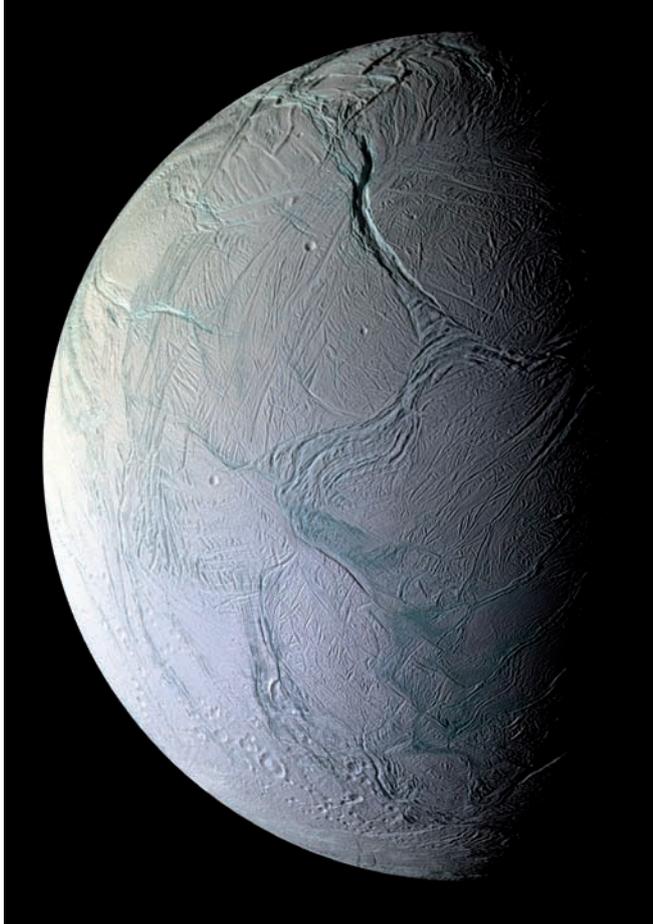
nächste Mal kann der Planet „ohne Ring“ im August 2009 beobachtet werden, wenn die Erde die Ringebene des Saturns von Süd nach Nord kreuzt.

<i>Dione</i>	<i>Masse</i>	$1,05 \times 10^{21} \text{ kg}$
	<i>Radius</i>	560 km
	<i>Dichte</i>	1.43 g/cm ³
	<i>Orbitalperiode</i>	2,737 Tage
	<i>Durchschnittliche Entfernung vom Saturn</i>	377.400 km
<i>Rhea</i>	<i>Masse</i>	$2,49 \times 10^{21} \text{ kg}$
	<i>Radius</i>	765 km
	<i>Dichte</i>	1,33 g/cm ³
	<i>Orbitalperiode</i>	4,518 Tage
	<i>Durchschnittliche Entfernung vom Saturn</i>	527.040 km
<i>Titan</i>	<i>Masse</i>	$1,35 \times 10^{23} \text{ kg}$
	<i>Radius</i>	2575 km
	<i>Dichte</i>	1,88 g/cm ³
	<i>Orbitalperiode</i>	15,9454 Tage
	<i>Durchschnittliche Entfernung vom Saturn</i>	1.221.850 km
<i>Hyperion</i>	<i>Masse</i>	$1,77 \times 10^{19} \text{ kg}$
	<i>Größe</i>	205 x 130 x 112,5 km
	<i>Dichte</i>	1,4 g/cm ³
	<i>Orbitalperiode</i>	21,277 Tage
	<i>Durchschnittliche Entfernung vom Saturn</i>	1.481.100 km
<i>Iapetus</i>	<i>Masse</i>	$1,88 \times 10^{21} \text{ kg}$
	<i>Radius</i>	730 km
	<i>Dichte</i>	1,21 g/cm ³
	<i>Orbitalperiode</i>	79,33 Tage
	<i>Durchschnittliche Entfernung vom Saturn</i>	3.561.300 km

Saturnmonde

Saturn wird von 18 schon länger bekannten Monden umkreist: Pan, Atlas, Prometheus, Pandora, Epimetheus, Janus, Mimas, Enceladus, Tethys, Telesto, Calypso, Dione, Helene, Rhea, Titan, Hyperion, Iapetus und Phoebe. Weitere 42 kleine Monde wurden bisher entdeckt, zum einen von Cassini aber auch durch Beobachtungen mit dem Teleskop von der Erde aus.

Titan, der größte Mond von Saturn, ist der einzige Satellit im Sonnensystem mit dichter, ausgedehnter Atmosphäre. Er besitzt eine rötlich-orange Färbung. Titans Atmosphäre besteht hauptsächlich aus Stickstoff mit Spuren von Methan, Äthan, Acetylen, Propan, Diacetylen, Methylacetylen, Wasserstoff, Cyanid, Cyanoacetylen, Kohlendioxid und -monoxid. Titan und die Erde sind die einzigen Körper im Sonnensystem, deren Atmosphäre hauptsächlich aus Stickstoff besteht. Die Atmosphäre ist undurchsichtig und verdeckt dadurch die direkte Sicht auf die Oberfläche. Titan war das Ziel der europäischen Landesonde Huygens, die am 25. Dezember 2004 von der Muttersonde Cassini abgetrennt wurde und am 14. Januar 2005 mehrere Stunden durch die Titanatmosphäre



schwebte und schließlich auf der Oberfläche des rätselhaften Saturnmondes gelandet ist. Die Cassini-Huygens-Mission führte zur Entdeckung von Seen aus flüssigen Kohlenwasserstoffen (Methan, Äthan) auf der -160 Grad kalten Titanoberfläche.

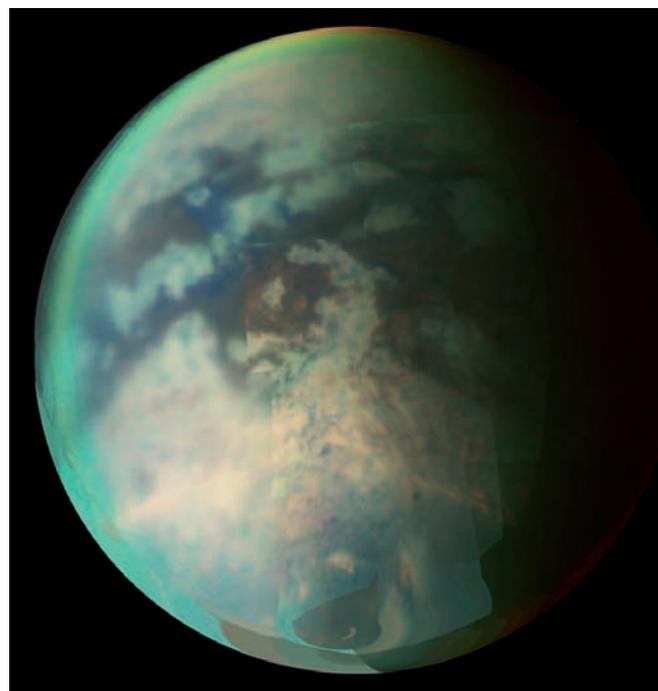
Mimas ist der innerste der großen Saturnmonde und besteht zu einem großen Teil aus Eis. Die Oberfläche ist stark mit Einschlagskratern bedeckt. Größere Krater (über 20 Kilometer) haben Zentralberge; der markanteste ist der Krater Herschel mit einem Durchmesser von etwa 130 Kilometern. Dieser Krater ist zehn Kilometer tief und sein Zentralberg 6.000 Meter hoch.

Bild oben: Mond Enceladus mit den etwa einem Kilometer tiefen Labrynth Sulci im oberen Teil des Bildes, farbverstärkte Ansicht. (© NASA/JPL/Space Science Institute)

Bild unten: Mond Titan, globale Ansicht mit einem alten Einschlagsbecken, Mosaik aus mehreren Aufnahmen im Infrarot, aufgenommen von Cassini. (© NASA/JPL/Univ. of Arizona)

Enceladus ist der zweitinnerste der großen Saturnmonde. Seine Oberfläche weist stark unterschiedliche Gebiete auf: altes Kratergelände mit abgetragenen Kratern, glatte Ebenen mit wenig Kratern und gefurchte Ebenen mit parallelen Spalten bis zu einer Tiefe von einem Kilometer. Die Cassini-Mission entdeckte am Südpol des Mondes aktiven Eisvulkanismus (Kryovulkanismus); nach der Erde und dem Jupitermond Io ist Enceladus damit der dritte Körper im Sonnensystem, auf dem aktuell ein aktiver Vulkanismus zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte.

Rhea ist mit 1.500 Kilometern Durchmesser der zweitgrößte Mond des Saturns und besteht vermutlich hauptsächlich aus Eis. Die beiden Hemisphären unterscheiden sich voneinander, die in Bewegungsrichtung um den Saturn vorausgehende Hemisphäre ist kraterbedeckt und heller als die entgegengesetzte Halbkugel, die helle, filamentartige Strukturen enthält, wie sie beispielsweise auch auf dem Saturnmond Dione zu beobachten sind.





Mit einem Durchmesser von 1.436 Kilometern ist Iapetus ist nach Titan und Rhea der drittgrößte Saturnmond. Die vordere Hemisphäre ist dunkler als die Rückseite oder die Pole und ist von einem sehr dunklen, rötlich-schwarzbraunen Material bedeckt. Es ist der Körper mit den höchsten Helligkeitskontrasten im Sonnensystem. Die Oberfläche ist dicht mit Kratern bedeckt. Die niedrige Dichte spricht dafür, dass Iapetus primär aus Eis besteht. Entlang des Äquator ist der Mond von einem bis zu 20 Kilometer hohen Bergrücken umgeben, dessen Entstehung noch nicht geklärt ist.

Dione ist der vierte der großen Saturnmonde und übertrifft mit seiner Dichte ($1,4 \text{ g/cm}^3$) alle anderen Saturnmonde mit Ausnahme von Titan und Phoebe. Die Oberfläche zeigt Krater von 30 bis 40 Kilometern Durchmesser und einige größere Krater mit Durchmessern über 100 Kilometern. Das auffälligste Gebilde ist Amata, ein Krater mit 240 Kilometern Durchmesser im

Zentrum eines Systems von hellen, feinen linearen Strukturen. Außerdem gibt es auf der südlichen Halbkugel breite Rücken und ein über 500 Kilometer langes Tal in der Nähe des Südpols.

Der am weitesten von Saturn entfernte Mond ist Phoebe mit fast 13 Millionen Kilometer Entfernung. Seine Eigenschaften lassen die Vermutung zu, dass Phoebe kein originärer Saturntrabant ist, sondern ein Kleinkörper, der aus dem Kuiper-Edgeworth-Gürtel jenseits des Neptun stammt und von der Schwerkraft des Saturn auf eine Umlaufbahn um den Ringplaneten gezwungen wurde.

Bild: Saturn und seine großen Monde, nicht maßstäblich. (Einzelbilder: © NASA/JPL/Space Science Institute, Montage: DLR)

Uranus

Im Jahre 1781 entdeckte William Herschel den siebten Planeten in unserem Sonnensystem, der bald darauf den Namen Uranus erhielt. Vermutlich ist der Planet aber schon früher gesehen worden, da seine Helligkeit gerade an der Sichtbarkeitsgrenze des bloßen Auges liegt. Fünf größere Monde umkreisen Uranus; 1977 wurden mit Hilfe einer Sternbedeckung von einem Flugzeugteleskop aus fünf Ringe entdeckt, deren Zahl inzwischen auf 13 angewachsen ist.

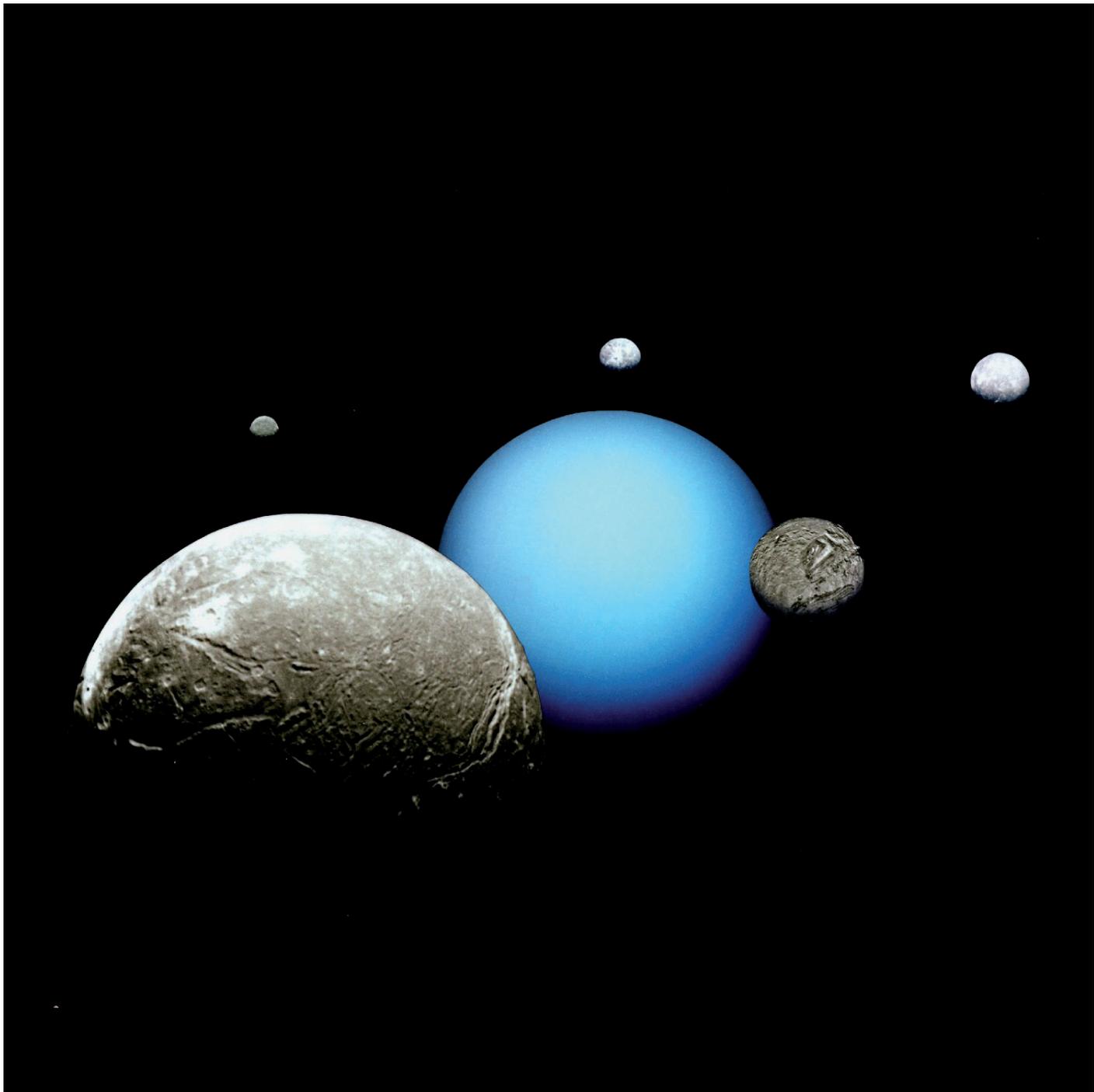
Gut ein Menschenleben, 84 Jahre, braucht Uranus, um die Sonne einmal zu umrunden. Der Planet ist 20 Astronomische Einheiten und damit doppelt so weit wie Saturn und viermal weiter als Jupiter von der Sonne entfernt. Er empfängt demzufolge pro Flächeneinheit vier- bzw. sechzehnmal weniger Sonnenenergie als seine beiden größeren inneren Nachbarplaneten. Auch besitzt Uranus keine innere Wärmequelle und unterscheidet sich darin wesentlich von Jupiter und Saturn. Da die Rotationsachse des Planeten mit einer Neigung von 98 Grad fast parallel zur Bahnebene liegt, „rollt“ der Planet gewissermaßen auf seiner Bahn um die Sonne und hat verglichen mit anderen Planeten ungewöhnliche

Jahreszeiten: Jeweils 21 Jahre lang wird der Nord- bzw. Südpol des Planeten von der Sonne intensiv beschienen; weitere zweimal 21 Jahre lang bekommen die Äquatorzonen und mittleren Breiten des Planeten mehr Sonnenenergie ab. Die relativ ungleich lange Dauer der Sonneneinstrahlung sollte in den verschiedenen Planetenbreiten zu einer großen Dynamik der Atmosphäre führen, was aber nach den Voyager-Messungen offenbar nur für die obersten Atmosphärenschichten des Planeten zutrifft, in denen man Wolkenbewegungen mit vorwiegend zonaler Zirkulation nachweisen konnte.

15 Erdmassen müsste man in einem 64fachen Erdvolumen unterbringen, wollte man die Dimensionen und Masse des Uranus mit Erdkugeln modellieren. Sein innerer Aufbau gleicht in erster Näherung dem des Jupiters und des Saturns. Anders als diese enthalten aber die obersten Gasschichten einen merklichen Anteil an Methan (CH_4), welches dem Planeten das blau-grünliche Aussehen verleiht. Ausgeprägte Wolkenbänder und -strukturen fehlen auf Uranus; trotzdem gelang es 1986 während des Voyager 2-Vorbeifluges die Rotationsdauer des Planeten zu 17,3 Stunden zu bestimmen. Zudem stellte man beim Vorbeiflug ein relativ starkes Magnetfeld fest, dessen Achse mit der Rotationsachse einen Winkel von 60 Grad einschließt.

Die 13 schmalen Ringe, die allesamt in der Äquatorebene liegen, sind 39.000 bis

Fakten		
Uranus	Masse	$8,684 \times 10^{25} \text{ kg}$
	Radius (äquatorial)	25.559 km
	Radius (polar)	24.973 km
	Dichte	1,30 g/cm ³
	Rotationsperiode	17,24 h
	Orbitalperiode	84,02 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$2,870 \times 10^9 \text{ km}$
Miranda	Masse	$6,6 \times 10^{19} \text{ kg}$
	Dichte	1,15 g/cm ³
	Radius	240,4 x 234,2 x 232,9 km
	Orbitalperiode	1,413 Tage
Ariel	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	129.872 km
	Masse	$1,35 \times 10^{21} \text{ kg}$
	Dichte	1,56 g/cm ³
	Radius	581,1 x 577,9 x 577,7 km
	Orbitalperiode	2,52 Tage
Umbriel	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	190.945 km
	Masse	$1,17 \times 10^{21} \text{ kg}$
	Dichte	1,52 g/cm ³
	Radius	584,7 km
Umbriel	Orbitalperiode	4,144 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	265.998 km





97.000 Kilometer vom Planetenzentrum entfernt. Die Ringe reflektieren nur knapp fünf Prozent des auftreffenden Sonnenlichtes und sind somit sehr dunkel und farblos. Möglicherweise enthalten sie einen hohen Anteil an Kohlenstoff.

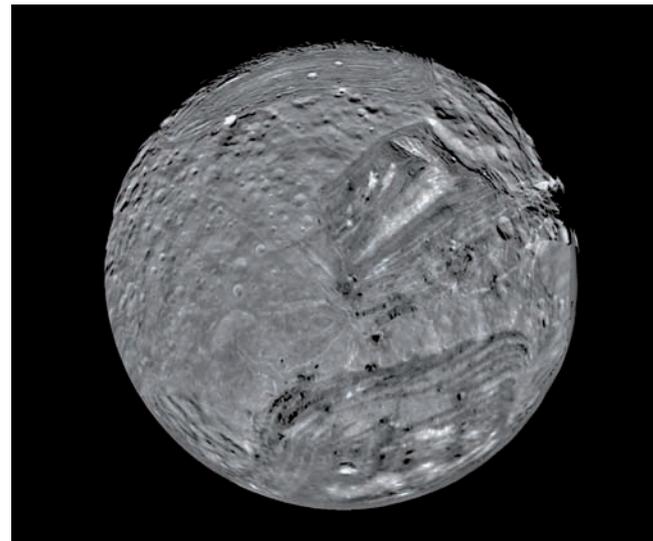
Uranusmonde

Uranus hat fünf schon länger bekannte größere Monde: Miranda, Ariel, Umbriel, Oberon, Titania und zehn weitere relativ kleine Satelliten: Cordelia, Ophelia, Bianca, Cressida, Desdemona, Juliet, Portia, Rosalind, Belinda und Puck, die von Voyager entdeckt wurden. In den letzten Jahren wurden noch weitere Monde entdeckt: Caliban, Stephano, Sycorax, Prospero, Trinculo und Setebos, sowie die winzigen Trabanten Francisco, Margaret, Ferdinand, Perdita, Mab und Cupid. Insgesamt sind bisher 27 Monde bekannt.

Bild links: Sichel des Uranus in Echtfarben. (© NASA/JPL)

Bild rechts: Uranusmond Miranda mit auffälligen Strukturen. (© NASA/JPL/USGS)

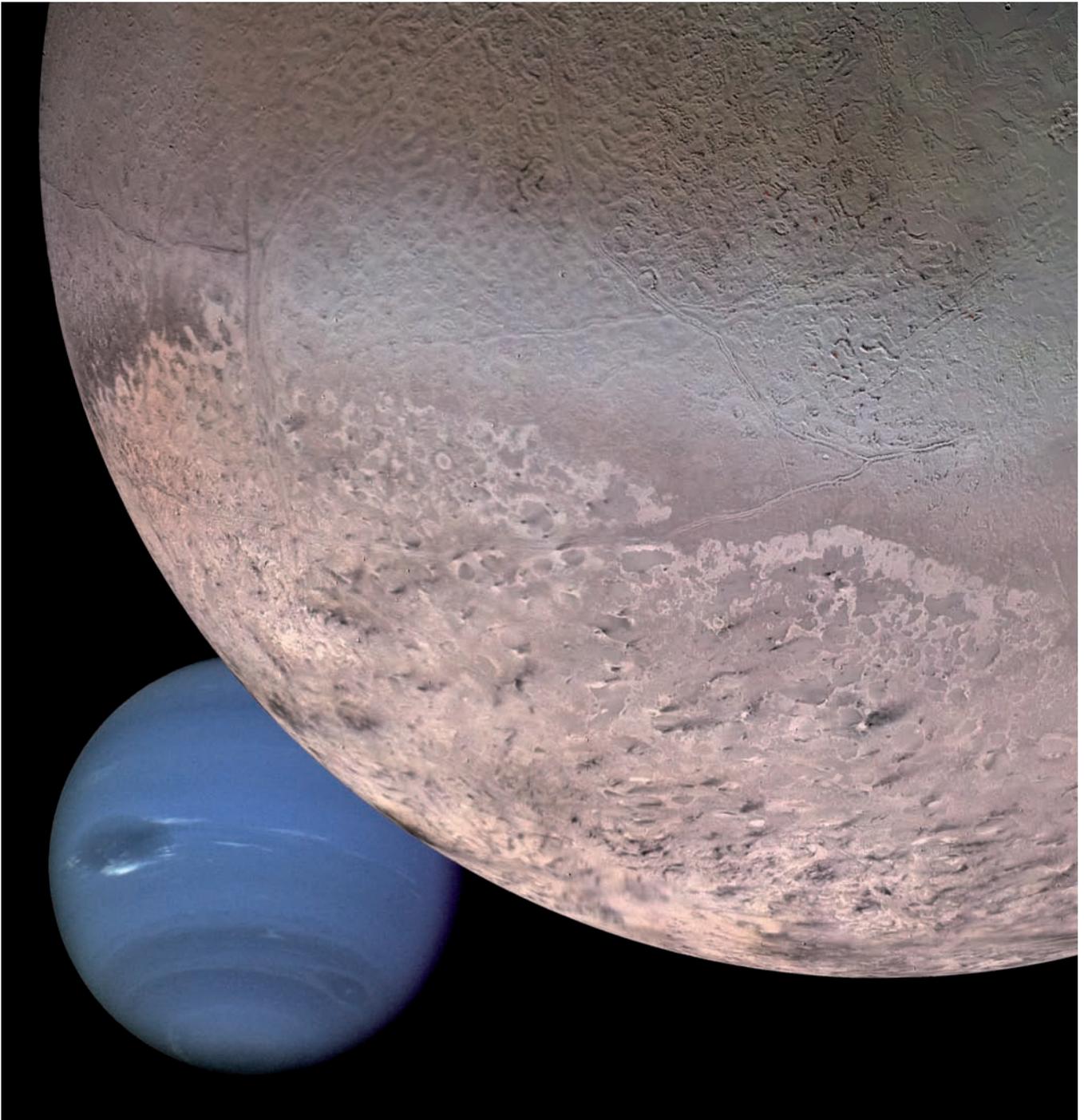
Bild linke Seite: Uranus mit den größten Monden Ariel, Miranda, Titania, Oberon und Umbriel (von groß nach klein). (© NASA/JPL)



Miranda ist der innerste und kleinste der bisher bekannten Monde. Seine Oberfläche ist erstaunlich vielfältig gegliedert und weist Krater, gefurchtes Gelände, Böschungen, Brüche und große Ringformationen auf. Ariel ist der zweite Uranusmond. Die Oberfläche zeigt viele Krater, was auf ein hohes Alter hinweist. Ariels Oberfläche ist die hellste und geologisch jüngste im Uransystem. Umbriel ist der drittgrößte Uranusmond. Seine Oberfläche ist relativ dunkel mit nur wenigen hellen Stellen. Titania, der größte Uranusmond, hat eine mit Einschlagskratern bedeckte Oberfläche. Sie weist auffällige, gerade Einsenkungen oder Täler auf, die infolge tektonischer Spannungen in der Eiskruste entstanden sind und die

hunderte Kilometer lang sein können. Oberon, der äußerste der Uranusmonde, hat wie Titania eine mit Einschlagskratern bedeckte Oberfläche. Einige Krater weisen in ihrem Inneren dunkles Material unbekanntem Ursprungs auf.

<i>Titania</i>	<i>Masse</i>	$3,53 \times 10^{21} \text{ kg}$
	<i>Dichte</i>	$1,70 \text{ g/cm}^3$
	<i>Radius</i>	$788,9 \text{ km}$
	<i>Orbitalperiode</i>	$8,706 \text{ Tage}$
	<i>Durchschnittliche Entfernung vom Uranus</i>	436.298 km
<i>Oberon</i>	<i>Masse</i>	$3,01 \times 10^{21} \text{ kg}$
	<i>Dichte</i>	$1,64 \text{ g/cm}^3$
	<i>Radius</i>	$761,4 \text{ km}$
	<i>Orbitalperiode</i>	$13,463 \text{ Tage}$
	<i>Durchschnittliche Entfernung vom Uranus</i>	583.519 km



Neptun

Neptun ist der äußerste der Riesenplaneten. Erst 1846 wurde der Planet aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Bahnbewegung des Uranus von Johann Galle und Heinrich Ludwig d'Arrest entdeckt. Vermutlich hat schon Galilei den Planeten 233 Jahre zuvor gesehen, ohne ihn aber als „Wandelstern“ erkannt zu haben. Wie die anderen großen Planeten besitzt auch Neptun Monde und ein Ringsystem. Wegen der großen Distanz zur Erde und der langsamen Bahnbewegung verweilt Neptun für den irdischen Beobachter scheinbar recht lange in ein und demselben Sternbild.

Fast 165 Jahre benötigt Neptun für einen Lauf um die Sonne. Er ist 30 Astronomische Einheiten von ihr entfernt und empfängt demzufolge pro Flächeneinheit nur $\frac{1}{900}$ der Sonnenenergie, die auf die Erde fällt. Dennoch hat man beim Voyager 2-Vorbeiflug in seiner Atmosphäre die höchsten Windgeschwindigkeiten, die man je bei einem Planeten gemessen hat, registriert – 560 Meter pro Sekunde oder 2.060 Kilometer pro Stunde. Der Planet scheint noch über andere Energiequellen als die reine Sonnenenergie zu verfügen, denn, wie man feststellte, strahlt er 2,7 mal mehr Energie ab, als er von der Sonne empfängt.

Von den Bildern der Voyager 2-Sonde her kennt man Neptun als eine ästhetische, leuchtend blaue Kugel mit einem großen und kleinen dunklen Fleck sowie auffallend hellen Strukturen und an irdische Cirren erinnernde Wolken in der hohen Atmosphäre.

Der Planet selber hat einen äquatorialen Durchmesser von 49.492 Kilometern und hätte in seinem Innern Platz für 60 Erdkugeln. Auch hat er eine etwas höhere Dichte als die anderen Gasplaneten. Eine Annahme ist, dass er während seiner Entstehung eine große Menge an Wasser, Methan und Ammoniak aufgenommen hat und alles zu einem Eiskern kondensierte. Die Atmosphäre besteht vorwiegend aus molekularem Wasserstoff mit einem wahrscheinlichen Heliumanteil von 10 bis 15 Prozent sowie Spuren von Methan und Äthan. In der Atmosphäre lassen sich veränderliche helle Wolken und verbreitet Dunst beobachten. Beim Großen Blauen Fleck oder auch Großen Dunklen Fleck handelt es sich um einen atmosphärischen Wirbel, der aber nach den jüngsten Beobachtungen des Hubble Space Telescope keineswegs so langlebig ist wie sein permanent anwesendes „Pendant“, der Große Rote Fleck auf Jupiter.

Fakten

<i>Neptun</i>	Masse	$1,024 \times 10^{26}$ kg
	Radius (äquatorial)	24.746 km
	Radius (polar)	24.341 km
	Dichte	1,76 g/cm ³
	Rotationsperiode	16,11 h
	Orbitalperiode	164,79 Jahre
<i>Triton</i>	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$4,498 \times 10^9$ km
	Masse	$2,14 \times 10^{22}$ kg
	Dichte	2,07 g/cm ³
	Radius	1.352 km
	Orbitalperiode	5,877 Tage
<i>Nereide</i>	Durchschnittliche Entfernung vom Neptun	354.800 km
	Masse	2×10^{19} kg
	Dichte	nicht bekannt
	Radius	170 km
	Orbitalperiode	360,14 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Neptun	5.513.400 km

Neptun rotiert in etwas mehr als 16 Stunden einmal um seine Achse. Magnetfeld- und Rotationsachse schließen einen Winkel von 47 Grad ein; zudem ist das Magnetfeld um 0,4 Planetenradien gegen das Planetenzentrum versetzt, was zu komplizierten Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind führt.

Seit man 1984 erstmals Ringbögen um Neptun entdeckt hatte, glaubte man, dass auch Neptun ein Ringsystem besitzt. In der Tat waren auf den Voyager 2-Bildern zwei schmale, vollständige, scharf begrenzte Hauptringe mit Radien von 63.000 bzw. 53.000 Kilometern und einer Breite von jeweils 10 bis 15 Kilometern zu sehen. Darüber hinaus konnte man noch zwei bis

Bild linke Seite: Neptun und sein größter Mond Triton, Montage. (© NASA/JPL/USGS)

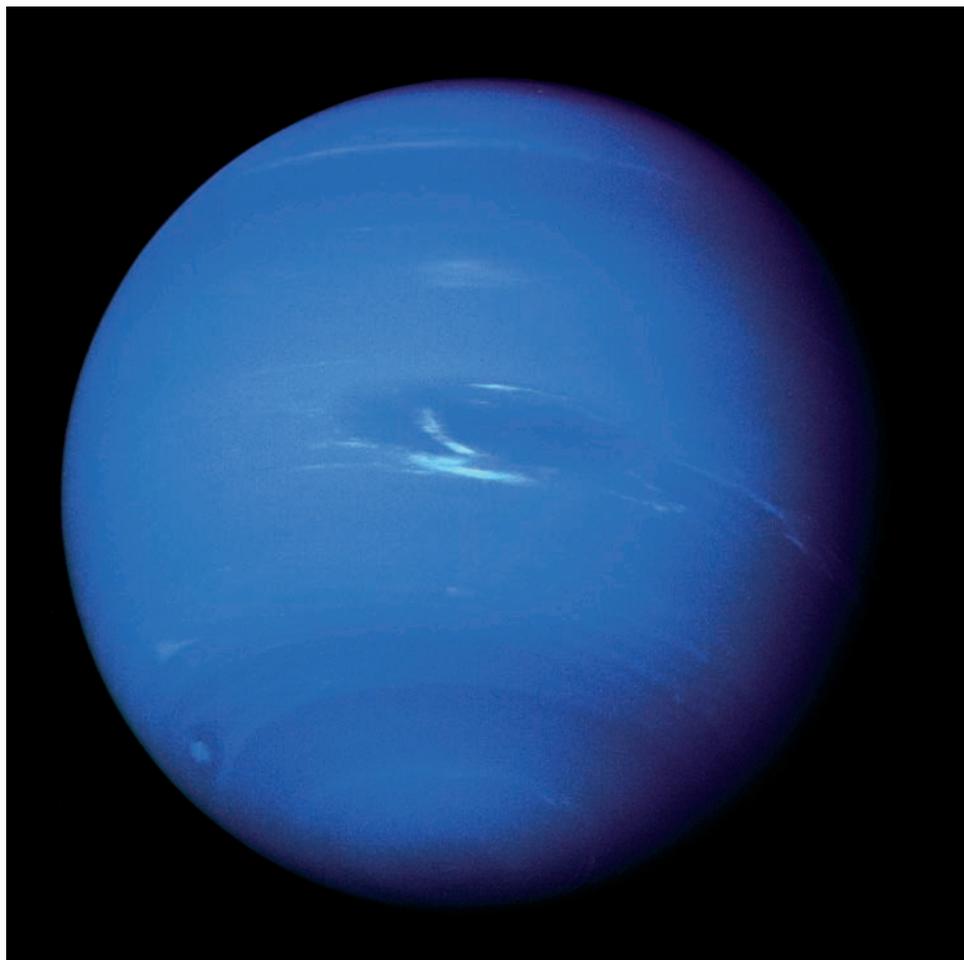
drei schwächere Ringe entdecken, die breiter sind und vermutlich aus kleineren, schlecht reflektierenden Teilchen bestehen.

Neptunmonde

Neptun hat 13 Monde, von denen Triton und Nereide schon vor dem Vorbeiflug von Voyager 2 an Neptun bekannt waren. Triton ist der größte Mond des Neptun. Er besitzt eine sehr dünne Atmosphäre aus Stickstoff und Methan. Triton hat eine sehr komplexe Oberfläche mit relativ wenigen Einschlagkratern. Es gibt mehrere große Becken, die wahrscheinlich durch Einschläge gebildet wurden. Mit einem Durchmesser von 2.760 Kilometern ist er etwas kleiner als der Erdmond, lässt aber eine überraschende Vielfalt an Oberflächenstrukturen erkennen. Während ein großes Gebiet um den Südpol herum rosa erscheint, ist der nördliche Teil grünlich-grau. Die Erklärung liegt in Tritons ungewöhnlichen Jahreszeiten. Wegen des langen Umlaufs um die Sonne und seiner starken Achsenneigung liegt jeder Pol für jeweils 82 Jahre in der Sonne und anschließend ebenso lange im Dunkeln. In den Sommerphasen verdampfen Stickstoff- und Methaneis, und die darunter befindliche dunkle Eiskruste wird sichtbar. Auf der kälteren Winterseite schlägt sich das Eis nieder und lässt diese Regionen heller erscheinen, weil Eis das Sonnenlicht gut reflektiert.

Außerdem sind mehrere Kilometer hohe dunkle Fontänen erkennbar. Sie scheinen aus dem Boden herauszuschießen und bis zu 150 Kilometer lange, ovale, schwarze Spuren auf der Oberfläche zu hinterlassen. Es könnte sich um geysirartige Ausbrüche handeln. Sie entstehen, wenn sich mit Stickstoffgas gefüllte Blasen unter der Oberfläche im Sonnenlicht erwärmen, ausdehnen und schließlich geradezu explodieren. Aber das Phänomen kann auch mit dem eher gemächlichen Verdampfen von Eis an der Oberfläche erklärt werden, ein Prozess, der mit zunehmender Sonneneinstrahlung an Intensität gewinnt.

Nereide ist der kleinere und äußere der beiden schon lange bekannten Monde. Er hat eine sehr elliptische Bahn. Nereide konnte von Voyager nicht aus der Nähe beobachtet werden.



Man nimmt aufgrund der beobachteten Lichtkurvenschwankungen an, dass der Satellit nicht kugelförmig ist, sondern langgestreckt, oder dass seine Oberfläche aus Materialien unterschiedlicher Albedo besteht.

Die von Voyager 2 entdeckten Monde tragen die folgenden Namen: Naiad, Thalassa, Despina, Galatea, Larissa und Proteus. Hinzugekommen sind die erst jüngst entdeckten Monde Halimede, Psamanthe, Sao, Laomedea und Neso.

Bild: Globale Ansicht des Neptun mit dem Großen Dunklen Fleck und erkennbarer Bänderstruktur der Atmosphäre. (© NASA/JPL)

Kometen

Seit alters her beobachtet man Schweifsterne – Kometen, die plötzlich und unerwartet am Himmel auftauchen und oft zu Furcht und Schrecken, mindestens aber zu großem Erstaunen unter den Menschen führten. Erst mit Beginn der modernen Astrophysik und Planetenforschung wurden diese seltsamen Erscheinungen „entzaubert“. Aristoteles siedelte diese haarförmigen leuchtenden Gebilde in den höchsten Schichten der irdischen Lufthülle an und hielt sie für Ausdünstungen. Erst Tycho Brahe konnte im Jahre 1577 anhand von Parallaxenmessungen zeigen, dass Kometen weiter als der Mond entfernt sein mussten. In der nachfolgenden Zeit dienten die imposanten, auffallend hellen Schweifsterne den Astronomen oft, ihre Bahnberechnungsmethoden analytisch zu verfeinern. Berühmte Mathematiker wie Gauß und Euler waren daran beteiligt.

Heute wissen wir, dass es sich bei den Kometen um kleine Körper von einigen zehn Kilometern Durchmesser handelt, deren ursprüngliche Heimat in den fernen Zonen des Sonnensystems liegt, jenseits des bekannten Reiches der Planeten. In diesen sonnenfernen Bezirken in einem Abstand von 40 bis 10.000 Astronomischen Einheiten vermutet man eine riesige kugelförmige Wolke von Milliarden Kometenkörpern, die sich extrem langsam um die Sonne bewegen. Geringfügige gravitative Bahnstörungen können den einen oder anderen Kometen auf eine Bahn Richtung Sonne ablenken, auf der dann seine gefrorenen Gasbestandteile allmählich auftauen, von seinem Kern abströmen und dabei Staubpartikel von seiner Oberfläche mitreißen. Um den kleinen Kern herum entsteht so eine neblig-diffuse Kometenatmosphäre (Koma) von zehn- bis hunderttausend Kilometer Durchmesser, von der – wenn der Komet etwa die Marsbahn erreicht hat – ein auffallend heller Schweif ausgeht. Er ist stets der Sonne abgewandt und kann im Extremfall zwei Astronomische Einheiten (300 Millionen Kilometer) lang werden. Physikalisch unterteilt man den Schweif in einen Gas- und einen Staubschweif; letzterer fällt durch seine Krümmung auf. In der Koma und dem Gasschweif der Kometen hat man spektroskopisch viele Moleküle nachgewiesen, die man auch vom

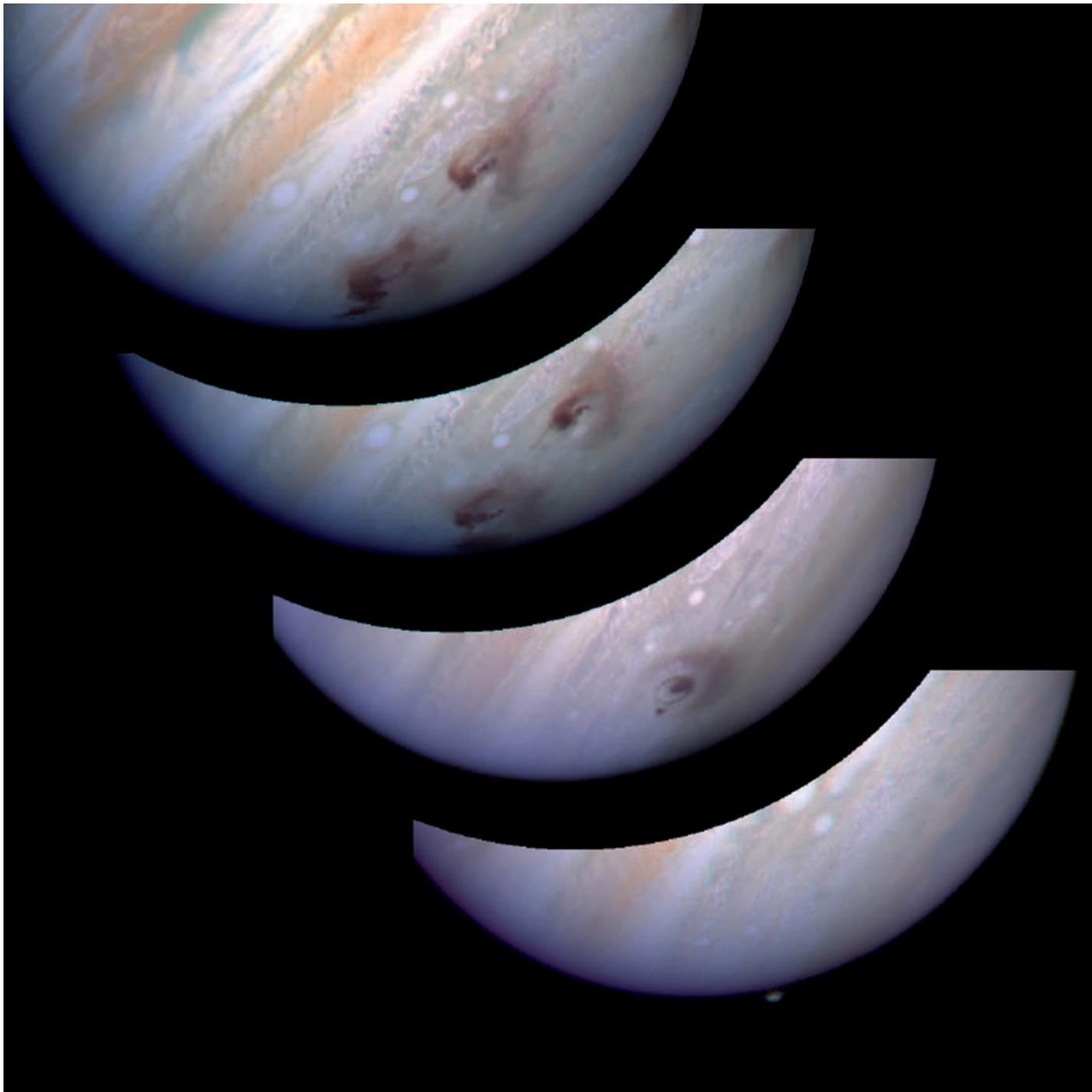


interstellaren Medium her kennt. Zu Recht nimmt man an, dass Kometen kleine, unveränderte Überbleibsel aus der frühesten Zeit des Sonnensystems sind.

Kometen, die den großen Planeten, vor allem dem Jupiter, nahe kommen, ändern merklich ihre Bahnform und Umlaufzeit. Viele einst langperiodischen Kometen wurden auf diese Weise zu kurzperiodischen Kometen, die in wenigen Jahren die Sonne umlaufen. Dies hat zur Folge, dass sie schneller „altern“ und sich im Laufe der Zeit ihr Gas- und Staubvorrat erschöpft. Ob einige der bekannten Asteroiden Kometen sind, die keine Aktivität mehr entwickeln können, ist derzeit eine aktuelle Frage in der Planetologie und Kometenforschung.

Kometen haben nur einen geringen inneren Zusammenhalt. Mitunter zerfallen sie, insbesondere wenn sie der Sonne zu nahe kommen, und einige stürzen sogar in sie hinein. Der Zerfall eines Kometen hat zur Folge, dass sich seine Trümmer entlang seiner Bahn verteilen. Kreuzt die Erde diese Trümmerschwärme, dringen die kleinen Partikel als Meteore in die Erdatmosphäre.

*Bild: Komet Hale-Bopp mit zwei Schweifen, aufgenommen im April 1997.
(© Observatory Slovenia)*



sphäre ein und verglühen. Viele bekannte Meteorschauer lassen sich auf zerfallene Kometen oder Kometenausströmungen zurückführen.

Jedes Jahr werden zahlreiche neue Kometen entdeckt. Im Oktober 1997 entdeckten Mitarbeiter des DLR-Instituts für Planetenforschung zusammen mit ihren Kollegen vom Observatorium in Uppsala, Schweden im Rahmen einer Beobachtungskampagne den Kometen P/1997 T3. Um die Entdecker, wie in solchen Fällen stets üblich, zu ehren, erhielt er den Namen Lagerkvist-Carsenty.

Komet 1P/Halley

Der Halleysche Komet ist wegen seiner regelmäßigen Wiederkehr und seinem ausgeprägten Schweif der bekannteste unter den periodischen Kometen und neben Tempel 1 der einzige, von dem Bilder mit hoher Auflösung existieren. Der Komet wird vermutlich schon seit über 3.000 Jahren beobachtet, mit Sicherheit seit dem Jahre 240 v. Chr. Er umrundet die Sonne auf einer langgestreckten elliptischen Bahn, die zudem zur Erdbahnebene geneigt ist. Seine Umlaufzeit beträgt im Mittel 76 Jahre. Die größte Entfernung von der Sonne, das Aphel, erreicht der Komet jenseits der Neptunbahn; sein Perihel, den sonnennächsten Punkt, durchläuft er zwischen der Merkur- und Venusbahn. Der letzte Periheldurchgang fand am 9. Februar 1986 statt.

Komet P/Shoemaker-Levy 9

Der Komet P/Shoemaker-Levy 9 (SL9) wurde im März 1993 von den Astronomen Carolyn und Eugene Shoemaker und David Levy am Mount Palomar-Observatorium in Kalifornien entdeckt. Schnell wurden drei ungewöhnliche Eigenschaften festgestellt: Erstens handelte es sich nicht um einen einzigen Kometen, sondern um viele „Einzelteile“, die wie Perlen an einer Schnur aufgereiht waren. Zweitens kreisten diese etwa 20 Bruchstücke in einem Orbit mit einer Umlaufzeit von zwei Jahren um Jupiter. Und drittens befanden sich alle Kometenteile auf Kollisionskurs mit dem Planeten. Vom 16. bis zum 22. Juli 1994 fanden dann die Zusammenstöße auf dem erdabgewandten Teil der Jupitersüdhälfte mit einer Geschwindigkeit von etwa 60 Kilometer pro Sekunde (216.000 km/h) statt. Die einzigen Messinstrumente, die einen direkten Blick auf die Einschlagstellen hatten, waren die Fernerkundungsexperimente der Galileo-Sonde, welche sich zu dieser Zeit rund 240 Millionen Kilometer vor der Ankunft am Jupiter befand. Wenige



Minuten nach den Einschlägen rotierten die Impaktstellen auch ins Blickfeld der irdischen Teleskope. Die Folgeerscheinungen in der Jupiteratmosphäre waren Forschungsgegenstand der bislang größten weltweit koordinierten Beobachtungskampagne in der Astronomie. Die Auswertung der Messungen ergab, dass bei den Einschlägen das Energieäquivalent von 10-20 Kilotonnen TNT freigesetzt wurde, was etwa 30-60 Millionen Hiroshima-Atombomben entspricht. In der Jupiteratmosphäre hinterließen die Einschläge Spuren, die größer waren als der Durchmesser der Erde.

Komet C/1995 O1 Hale-Bopp

Am 23. Juli 1995 wurde ein ungewöhnlich heller Komet außerhalb der Jupiterbahn von Alan Hale, New Mexico, und Thomas Bopp, Arizona, unabhängig voneinander entdeckt. Der neue Komet war zum Zeitpunkt seiner Entdeckung der am weitesten entfernte Komet, der je von Amateurastronomen entdeckt wurde. Er erhielt den Namen Hale-Bopp. Der Kometenkern

Bild: Kern des Kometen Tempel 1. (© NASA/JPL/UMD)

Bild linke Seite: Spuren des Einschlags des Fragments G des Kometen Shoemaker-Levy 9 in der Jupiteratmosphäre über fünf Tage. (© R. Evans, J. Trauger, H. Hammel and the HST Comet Science Team and NASA)

hat einen Durchmesser von 40 km und wäre in gleicher Entfernung 1.000fach heller als der Komet Halley. Zum Zeitpunkt der größten Annäherung an die Sonne am 1. April 1997 betrug der Abstand 136 Millionen Kilometer. Die Erde passierte der Komet in 195,2 Millionen Kilometer Abstand am 22. März 1997. Die Länge des Schweifs betrug Ende März 1997 zwischen 80 und 96 Millionen Kilometer. Der Vorbeiflug des Kometen im Frühjahr 1997 wurde von Teleskopen auf der ganzen Welt beobachtet.

Komet 9P/Tempel 1

Tempel 1 ist ein kurzperiodischer Komet, der ursprünglich aus dem Kuipergürtel stammt. Er wurde am 3. April 1867 von dem sächsischen Astronomen Ernst Wilhelm Leberecht Tempel entdeckt. Seit 1881 näherte sich der Komet dem Planeten Jupiter dreimal bis auf 0,41 AE, wodurch sich seine Umlaufzeit auf den heutigen Wert von etwa 5,5 Jahren verkürzt hat. Durch diese mehrmalige Veränderung ging der Komet vorerst „verloren“. In den 60er Jahren konnte dann die Bahn des Kometen unter Berücksichtigung der Bahnstörung durch die Planeten berechnet werden. So wurde Tempel 1 schließlich 1968 auf einer Fotoplatte festgehalten. Endgültig bestätigt wurde die Wiederauffindung bei der Rückkehr des Kometen aber erst im Jahre 1972.

Während seiner Erscheinung im Sommer 2005 wurde der Komet Tempel 1 von der Raumsonde Deep Impact untersucht. Am 3. Juli 2005 hat die Raumsonde ein etwa 370 kg schweres, kühlstrankgroßes Geschoss auf den Kometenkern gelenkt und den Einschlag dieses sogenannten „Impaktors“ mit einer Geschwindigkeit von etwa 37.000 Stundenkilometern aus einer Entfernung von rund 8.600 Kilometern beobachtet. Dabei entstand ein Krater von etwa 250 Metern Durchmesser. Bei diesem Experiment wurden rund 4.500 Bilder aufgenommen. Da dies der erste

direkte Blick auf das Innere eines Kometenkerns und somit auf die Urmaterie unseres Sonnensystems war, wurde das Ereignis von allen verfügbaren Teleskopen, im Weltraum wie auch auf der Erde, beobachtet.

Komet 67P/Churyumov-Gerasimenko

Der Komet 67P ist das Ziel eines der ehrgeizigsten Unternehmungen der europäischen Raumfahrt – der Mission Rosetta zur Erkundung eines Kometen aus der Nähe. Die im März 2004 gestartete Sonde soll nach mehr als zehn Jahren Flug im Mai 2014 den Kometen erreichen. Die Sonde wird zunächst in eine Umlaufbahn einschwenken, um erste Messungen durchzuführen und nach einer geeigneten Landestelle zu suchen. Dann wird sich das vom DLR entwickelte Landegerät Philae vom Mutterschiff lösen und auf dem Kometen aufsetzen. Erste Bilder vom Kern des Kometen lieferte das Hubble-Weltraumteleskop am 12. März 2003. Es zeigt einen ovalen Himmelskörper von drei mal fünf Kilometern Größe. Aus der Analyse von Lichtkurven weiß man, dass der Komet sich im Laufe von etwa zwölf Stunden einmal um die eigene Achse dreht.



Bild: Rosetta-Lander Philae auf dem Kern des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko, künstlerische Darstellung. (© ESA/AOES Medialab)

Zwergplaneten

Am 24. August 2006 beschlossen die anwesenden Mitglieder der Internationalen Astronomischen Union (IAU) auf ihrer 25. Vollversammlung in Prag erstmals die Definition eines Planeten in unserem Sonnensystem. Fortwährende Beobachtungen und neue Erkenntnisse über Planetensysteme machten dieses notwendig. Die IAU fasste deshalb den Beschluss, dass Planeten und andere Körper unseres Sonnensystems mit Ausnahme der Monde sich in eine der Kategorien einordnen lassen sollen, die folgendermaßen definiert sind:

1. Ein Planet ist ein Himmelskörper, der selbst kein Stern ist und a) sich im Orbit um die Sonne befindet, b) genügend Masse besitzt, um durch die eigene Schwerkraft eine annähernd kugelförmige Gestalt anzunehmen (d.h. sich im hydrostatischen Gleichgewicht befindet) und c) die Umgebung seiner Bahn von anderem kosmischen Material frei geräumt hat.
2. Ein Zwergplanet ist ein Himmelskörper, der a) sich im Orbit um die Sonne befindet, b) genügend Masse besitzt, um durch die eigene Schwerkraft eine annähernd kugelförmige Gestalt anzunehmen (d.h. sich im hydrostatischen Gleichgewicht befindet), c) die Umgebung seiner Bahn nicht von anderem kosmischen Material frei geräumt hat und d) kein Mond ist.
3. Alle anderen Objekte, die die Sonne umkreisen, mit Ausnahme der Monde, sollen gemeinsam als kleine Körper im Sonnensystem bezeichnet werden. Zu dieser Kategorie gehören fast alle Asteroiden, die meisten Objekte des Kuiper-Edgeworth-Gürtels und der Oortschen Wolke, sowie andere kleine Körper.

Als ersten Schritt hat die Internationale Astronomische Union den bislang zu den Planeten gezählten Pluto, den Asteroiden Ceres und Eris (2003 UB₃₁₃), ein Objekt aus dem Kuipergürtel, zu Zwergplaneten erklärt. Auf einer bei der IAU geführten „Beobachtungsliste“ befinden sich bereits zwölf (Zeitpunkt 2009) weitere Kandidaten für den Status des Zwergplaneten. Dabei handelt es sich sowohl um Objekte aus dem Kuipergürtel als auch um große Asteroiden. Mit weiteren Entdeckungen und genaueren Untersuchungen bereits bekannter Objekte wird diese Liste sicherlich noch anwachsen. Mittlerweile sind Makemake (2005 FY₉) und Haumea (2003 EL₆₁) jetzt als Zwergplanet klassifiziert worden.

Ceres

Der nun als Zwergplanet eingestufte Asteroid Ceres wurde am 1. Januar 1801 von Giuseppe Piazzi entdeckt und nach der römischen Göttin der Vegetation benannt. Mit einem Durchmesser von etwa 975 Kilometern ist Ceres das größte und zugleich massivste Objekt des Asteroidengürtels und vereint ein Drittel der gesamten Masse des Asteroidengürtels auf sich. Die Klassifikation von Ceres hat sich im Laufe der Geschichte wiederholt geändert: Bei seiner Entdeckung zunächst als Planet eingestuft, zählte er später für mehr als 150 Jahre zu den Asteroiden, da er den anderen Körpern im Asteroidengürtel gleicht.

Pluto

Schon immer wurde Plutos Status als Planet kontrovers diskutiert. Diese Diskussionen hat die Vollversammlung der Internationalen Astronomischen Union im August 2006 mit dem Beschluss einer Planetendefinition beendet, die Pluto sowie zwei weitere Objekte als Zwergplaneten einstuft. Kleiner, kälter und sonnenferner als alle großen Planeten hat Pluto noch eine weitere Identität aufzuweisen: Er gehört zu einer Gruppe von möglicherweise bis zu 100.000 Objekten, die Durchmesser von mehr als 100 Kilometern haben und die Sonne jenseits der Umlaufbahn des Neptun in einer scheibenförmigen Zone, dem so genannten Kuiper-Edgeworth-Gürtel umkreisen. In dieser

Liste weiterer Kandidaten

Objekt	Monde	Durchmesser
<i>Orcus</i>	-	1.000 ± 200 km
<i>Sedna</i>	-	1.500 – 1.800 km
2002 TX ₃₀₀	-	< 700 km
2002 AW ₁₉₇	-	800 ± 100 km
<i>Quaoar</i>	-	~ 1.200 km
<i>Ixion</i>	-	500 – 1.000 km
<i>Varuna</i>	-	700 ± 150 km
<i>Vesta</i>	-	578 x 560 x 458 km
<i>Pallas</i>	-	570 x 525 x 500 km
2007 OR ₁₀	-	875 – 1.400 km



Region umlaufen auch Pluto und seine Begleiter die Sonne. Diese weit entfernte Gebiet ist von Tausenden kleinster Eiswelten bevölkert, die sich in der Frühzeit des Sonnensystems gebildet haben.

In einem größeren Fernrohr entpuppt sich Pluto als ein schwaches Lichtpünktchen 15. Größenklasse, und man muss schon sehr gut seine Position kennen, um ihn nicht mit einem Stern zu verwechseln. Entdeckt wurde Pluto im Jahre 1930 von Clyde Tombaugh nach einer jahrzehntelangen Suche, ausgelöst durch das Wissen um Störungen der Uranus- und Neptunbahn, die auf einen weiteren Planeten hindeuteten. Heute weiß man jedoch, dass Pluto als kleinster aller planetaren Körper dafür zu wenig Masse besitzt.

Pluto läuft auf einer recht exzentrischen Bahn ($e = 0,25$) in knapp 248 Jahren einmal um die Sonne. Die relativ hohe Bahnexzentrizität führt dazu, dass Pluto mitunter der Sonne näher ist als Neptun, zuletzt zwischen 1979 und 1998. Dennoch können die beiden Planeten niemals zusammenstoßen, da Plutos Bahn gegen die Ekliptik um 17 Grad geneigt ist. Im Mittel ist Pluto 39 Astronomische Einheiten von der Sonne entfernt, also zehn Astronomische Einheiten weiter als Neptun.

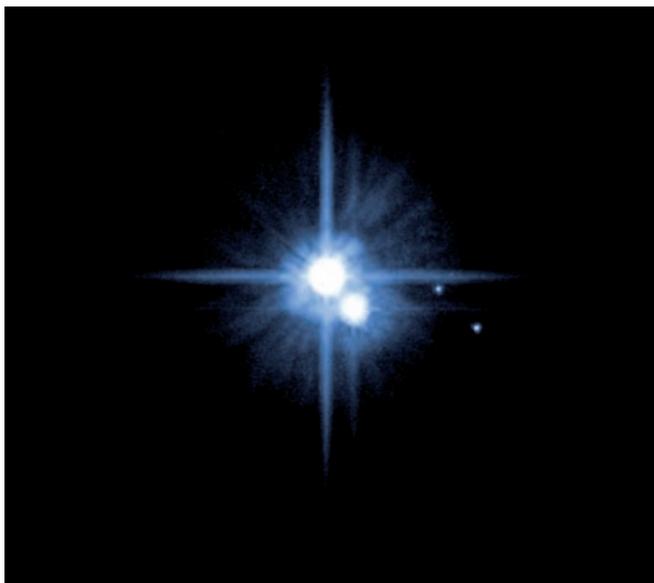
Plutos Durchmesser liegt nach neueren Messungen bei etwa 2.390 Kilometern. Über seine Oberfläche wissen wir nicht

viel. Vermutlich ist sie bedeckt von einem Gemisch aus Wasser-, Methan- und Ammoniak eis und umgeben von einer dünnen Atmosphäre aus Methan, Stickstoff und schwereren Gasen wie Argon. Die Oberflächentemperatur am Äquator des Planeten beträgt Abschätzungen zufolge 50 Kelvin (-223 Grad Celsius).

1978 entdeckte James Christy am 1,5 m-Reflektor des U.S. Naval Observatoriums eine kleine Ausbuchtung am Plutoscheibchen, den Mond Charon. Charon hat nach neueren Messungen einen Durchmesser von 1.200 Kilometern und umkreist Pluto in einem mittleren Abstand von 19.600 Kilometern einmal in 6,4 Tagen. Beide Körper rotieren gebunden, d.h. sie wenden sich gegenseitig stets dieselbe Hemisphäre zu. Das Massenverhältnis Mond zu Planet ist mit $1/10$ das größte im Sonnensystem gefundene, so dass man Pluto und Charon auch als einen Doppelplaneten ansehen kann. Der Massenschwerpunkt des Systems liegt 1.200 Kilometern über der Oberfläche Plutos. Mit Charons Entdeckung war man in der Lage, die Neigung der Rotationsachse Plutos verlässlicher zu bestimmen.

Bild linke Seite: Künstlerische Darstellung des Zwergplaneten Eris und seines Mondes Dysnomia. (© NASA, ESA, and A. Schaller (for STScI))

Fakten		
Ceres	Mittlerer Sonnenabstand (AE*)	2,77
	Umlaufdauer (Jahre)	4,60
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,08
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	10,58°
	Durchmesser (km)	952
	Bekannte Monde	0
Pluto	Mittlerer Sonnenabstand (AE*)	39,5
	Umlaufdauer (Jahre)	247,92
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,2488
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	17,6°
	Durchmesser (km)	2.390
	Bekannte Monde	3
Eris	Mittlerer Sonnenabstand (AE*)	67,7
	Umlaufdauer (Jahre)	557
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,441
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	44,179°
	Durchmesser (km)	2.400 ± 100
	Bekannte Monde	1
Makemake	Mittlerer Sonnenabstand (AE*)	45,6
	Umlaufdauer (Jahre)	310
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,156
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	28,998°
	Durchmesser (km)	1.600 ± 300
	Bekannte Monde	0
Haumea	Mittlerer Sonnenabstand (AE*)	43,342
	Umlaufdauer (Jahre)	285,3
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,189
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	28,194°
	Durchmesser (km)	2.200-1.100
	Bekannte Monde	2



Weil Pluto und Charon sich synchron um ihren gemeinsamen Schwerpunkt „drehen“, muss die Bahnebene Charons mit der Äquatorebene des Planeten zusammenfallen. Die Rotationsachse Plutos sollte demzufolge um 122 Grad gegen die Bahnebene geneigt sein. Nur Venus und Uranus weisen – mit 177 Grad (Kopflage) bzw. 98 Grad (Schräglage) – eine ähnlich ungewöhnliche Orientierung der Polachse auf.

Ob man Pluto als einen „entlaufenen“ Mond des Neptun ansehen kann, ist spätestens seit der Entdeckung Charons wieder fraglicher geworden. Denkbar ist aber, dass sich einst in großer Sonnenferne die Reste des solaren Urnebels zu kleinen mondgroßen Planeten formten. Immerhin hat man seit 1992 über 40 kleine „transneptunische“ Objekte mit Durchmessern von 100 bis über 1.000 Kilometern im Kuiper-Edgeworth-Gürtel entdeckt.

Im Mai 2005 sind zwei weitere kleine Plutomonde – Nix und Hydra – entdeckt worden, die sich in der gleichen Bahnebene wie Charon bewegen. Das deutet darauf hin, dass die Monde nicht eingefangen wurden sondern zusammen mit Charon entstanden, der vermutlich das Ergebnis einer gigantischen Kollision zweier Objekte in Plutogröße vor vier Milliarden Jahren ist.

Bild: Pluto und seine Monde Charon, Nix und Hydra. (© NASA, ESA, H. Weaver (JHU/APL), A. Stern (SwRI), and the HST Pluto Companion Search Team)

Eris (2003 UB₃₁₃)

Im Juli 2005 gab Michael E. Brown vom California Institute of Technology die Entdeckung eines Objekts aus dem Kuipergürtel bekannt, welches mit 2.400 Kilometern Durchmesser Pluto an Größe ein wenig übertrifft. Nach der provisorischen Bezeichnung 2003 UB₃₁₃ erhielt dieses Objekt den Namen Eris nach der griechischen Göttin der Zwietracht und des Streits. Sein Mond S/2005 (2003 UB₃₁₃) 1 wurde nach Eris' Tochter und dem Dämonen der Ungesetzlichkeit Dysnomia benannt.

Diese neuen Beobachtungen von Eris wurden mit einem empfindlichen Sensor des 30 m-Teleskopes am französisch-spanischen Institute de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) auf dem Pico Valeta (Sierra Nevada) durchgeführt, der die Wärmeemission messen und eine ähnliche Reflexion wie Pluto ermitteln konnte. Das ermöglichte die Bestimmung seiner Größe. Eris ist auch insofern bemerkenswert, weil der Zwergplanet sich auf seiner sehr lang gestreckten und um 44 Grad geneigten Bahn zur Zeit nahe dem am weitesten entfernten Punkt – dem Aphel – befindet, in einer Entfernung von 96 Astronomischen Einheiten. Im sonnennächsten Punkt der Bahn – dem Perihel – wird der Abstand zur Sonne 38 Astronomische Einheiten betragen und seine Helligkeit etwa der Plutos entsprechen. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Eris insgesamt 557 Jahre.

Makemake (2005 FY₉)

Dieser Zwergplanet und Plutoid wurde 2005 entdeckt und umkreist die Sonne weit außerhalb der Umlaufbahn des Neptun. Er hat mit etwa 1.600 Kilometern Durchmesser circa zwei Drittel der Größe von Pluto. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Makemake etwa 310 Jahre, der Abstand zur Sonne beträgt zwischen sechs und acht Milliarden Kilometer.

Haumea (2003 EL₆₁)

Seit September 2008 gehört auch Haumea zu den Zwergplaneten. Haumea wurde 2003 entdeckt. Seine äußere Form ähnelt einer dicken ovalen Zigarre mit einem Durchmesser, der dem des Pluto entspricht. Er rotiert sehr schnell – in vier Stunden um die eigene Achse. Möglicherweise ist das der Grund für seine langgezogene Form. Haumea bewegt sich auf einer sehr elliptischen Bahn außerhalb der Neptunbahn und wird von zwei Monden begleitet: Hi'iaka und Namaka.

Kuipergürtel

Noch viele Jahrzehnte nach seiner Entdeckung im Jahr 1930 galt Pluto mit einer mittleren Entfernung zur Sonne von 39,4 Astronomischen Einheiten (etwa sechs Milliarden Kilometer) als der äußerste Planet des Sonnensystems. Heute aber wissen wir, dass es neben Pluto viele „Planeten“ mit Umlaufbahnen außerhalb der Neptunbahn gibt. Anscheinend ist Pluto nur das zuerst entdeckte Mitglied einer neuen Klasse von eisigen Objekten die sich in den extrem kalten äußeren Regionen des Sonnensystems befinden. Die Existenz eines solchen Gürtels von Kleinplaneten wurde zuerst 1930 von Frederick C. Leonard und 1943 von Kenneth E. Edgeworth vorhergesagt. Erst später, als Folge einer 1951 veröffentlichten Arbeit, wurde der Name des aus den Niederlanden stammenden Wissenschaftlers Gerard P. Kuiper in Zusammenhang mit dem Gürtel gebracht. Nach der Entdeckung des ersten Objekts dieser Klasse, 1992 QB₁, wurde der Gürtel „Kuiper Edgeworth Belt“ getauft, in verkürzter Form meist nur „Kuipergürtel“ genannt.

Die Objekte des Kuipergürtels heißen auf Englisch „Kuiper-Belt Objects“ oder KBOs. Der Name ist aber umstritten, weshalb viele Wissenschaftler die Bezeichnung „Trans-Neptunian Objects“ (TNOs) bevorzugen. Die KBOs sind wahrscheinlich übriggebliebene Kleinplaneten oder Bruch-

stücke aus der Zeit der Planetenentstehung. Nach der heutigen Theorie gehören sie zu den ersten Objekten, die vor 4,5 Mrd. Jahren aus der Gas- und Staubscheibe um die neu entstandene Sonne kondensiert sind. Kollisionen zwischen solchen primitiven Kleinkörpern haben zum Aufbau der Planeten geführt. Deswegen kann man die KBOs als heute noch in unveränderter Zusammensetzung existierendes, ursprüngliches Baumaterial der Planeten betrachten, was ihre große Bedeutung für die Planetenforschung erklärt.

Ein weiterer Grund für das große wissenschaftliche Interesse an den KBOs ist die Vermutung, dass die kurzperiodischen Kometen aus dem Kuipergürtel stammen. Die Umlaufbahnen von KBOs können sich unter dem Einfluss von Neptun und anderen äußeren Planeten ändern. Auf diese Weise findet gelegentlich ein KBO den Weg in das innere Sonnensystem. Durch seine



Bild: Künstlerische Darstellung des Kuipergürtel-Objekts Quaoar. © NASA and G. Bacon (STScI)

Annäherung an die Sonne und die darauffolgende Erwärmung des Objekts verdampft ein Teil des eisigen Materials und erzeugt so eine Koma und eventuell einen Schweif. So wird aus einem KBO ein Komet geboren.

Der Kuipergürtel ist nicht mit der Oortschen Wolke zu verwechseln, einem riesigen Kometenreservoir, das das Sonnensystem wie eine Kugel umhüllt und Billionen von eisigen Körpern enthalten soll. Die langperiodischen Kometen sollen ihren Ursprung in dieser Oortschen Wolke haben. Die Oortsche Wolke liegt weit außerhalb des Kuipergürtels und reicht bis zu einer Entfernung von ein oder zwei Lichtjahren von der Sonne. Im Gegensatz zum Kuipergürtel ist allerdings die Existenz der Oortschen Wolke noch nicht durch direkte Beobachtungen bewiesen.

Pluto selbst gehört, so die heutige Einschätzung, zu den KBOs. Wenn Pluto in die Nähe der Sonne geraten könnte, würde er wahrscheinlich als ein riesiger Komet erscheinen. Da die Umlaufperiode von Pluto aber in einer 3:2-Resonanz zu einem Sonnenumlauf von Neptun steht ist die Pluto-Bahn sehr stabil. Ähnliche dynamische Verhältnisse gelten für hunderte von anderen KBOs mit Durchmessern größer als 100 Kilometer, die „Plutinos“ getauft wurden. Entdeckungen der letzten Jahre belegen, dass es Objekte gibt, die sich in Entfernungen von hunderten von Astronomischen Einheiten (1 AE = 150 Millionen Kilometer) um die Sonne bewegen. Das bis jetzt größte Beispiel ist Sedna, ein Kleinplanet, der 2003 entdeckt wurde. Mit einem geschätzten Durchmesser von

1.500 bis 1.800 Kilometern ist Sedna nicht viel kleiner als Pluto (Durchmesser: 2.390 Kilometer). Der Ursprung von Sedna ist rätselhaft. Aller Wahrscheinlichkeit nach entstand das Objekt im Gebiet der großen Planeten und ist durch deren starke Schwerkraft aus dieser Zone hinaus geworfen worden.

Da die Empfindlichkeit der Teleskope und Instrumente, die den Astronomen zur Verfügung stehen, ständig zunimmt, ist es sicher, dass in den kommenden Jahren viel mehr solcher rätselhafter „Randbewohner“ des Sonnensystems entdeckt werden. Es ist wahrscheinlich nur eine Frage der Zeit, bis Pluto seinen Status als größter (Zwerg-)„Planet“ jenseits von Neptun verliert: Bereits vom KBO Eris nimmt man an, dass er mit mindestens 2.400 Kilometern Durchmesser größer als Pluto ist.

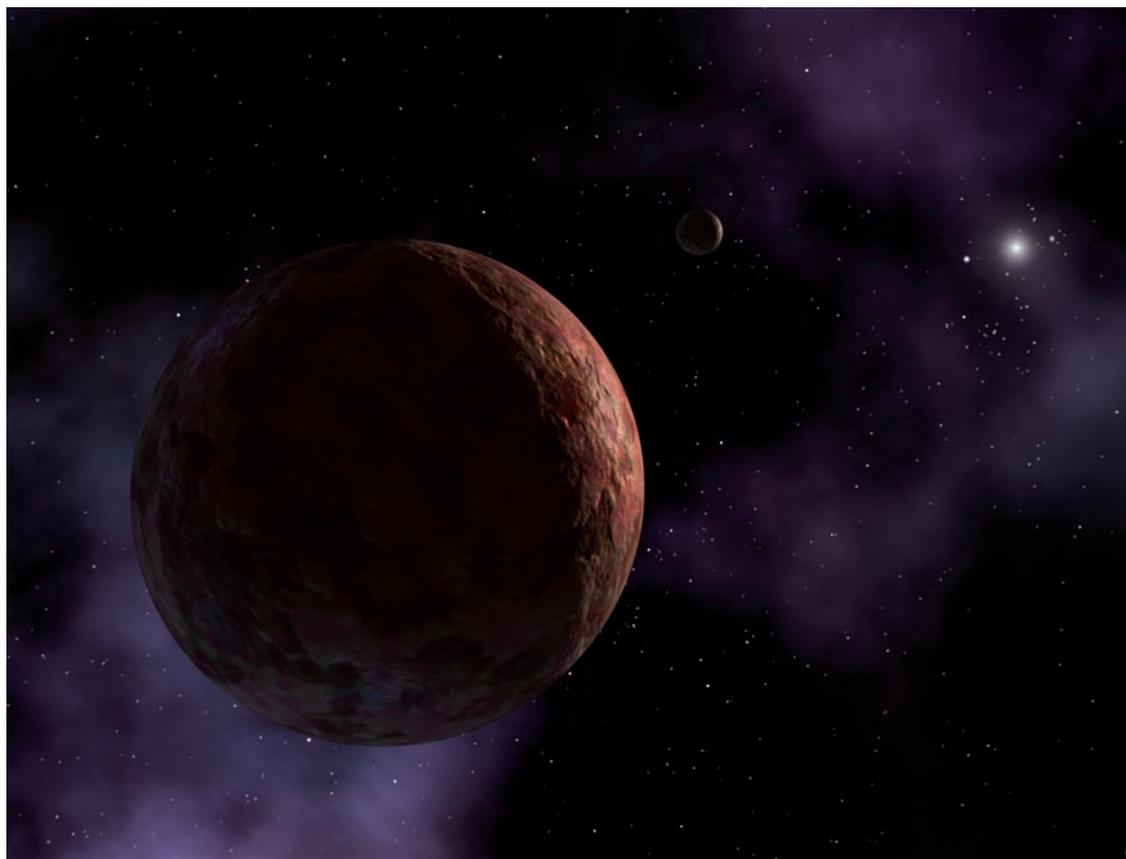


Bild: Kuipergürtel-Objekt Sedna in einer künstlerischen Darstellung, die Sonne ist hier als heller Stern dargestellt. (© NASA/JPL-Caltech)

ANHANG

Übersicht über die Missionen im Sonnensystem

Missionen zur Sonne

Pioneer 5	11. März 1960	Sonnenbeobachtungs-sonde, Sonnenorbit, Missionsende: 26.06.1960
Pioneer 6	16. Dez. 1965	Sonnensonde, Erdorbit, Missionsende: Dez. 2004, weiterhin Telemetrie-Kontakt
Pioneer 7	17. Aug. 1966	Sonnensonde, Erdorbit, Missionsende: Jan. 2004, weiterhin Telemetrie-Kontakt
Pioneer 8	13. Dez. 1967	Sonnensonde, Erdorbit, Missionsende: Juni 2002, weiterhin Telemetrie-Kontakt
Pioneer 9	08. Nov. 1968	Sonnenorbit, versagte am 3. März 1987
Skylab	26. Mai 1973	Erste bemannte amerikanische Raumstation (171 Tage), 150.000 Aufnahmen der Sonne mit dem Apollo Telescope Mount (ATM)
Explorer 49	10. Juni 1973	Sonnenphysiksonde, wurde in einem lunaren Orbit platziert
Helios 1	10. Dez. 1974	Amerikanisch-deutsche Mission, Sonnenorbit, größte Annäherung: 47 Millionen km
Helios 2	16. Jan. 1976	Amerikanisch-deutsche Sonnensonde, größte Annäherung: 43 Millionen km
Solar Maximum Mission (SMM)	14. Febr. 1980	Koordinierte Beobachtung von Sonnenaktivität, insbes. Sonneneruptionen während einer Periode maximaler Sonnenaktivität, Wiedereintritt: 2. Dez. 1989
Hinotori	21. Febr. 1981	Japanische Mission zur Untersuchung der Sonneneruptionen während einer Periode maximaler Sonnenaktivität
Ulysses	06. Okt. 1990	Amerikanisch-europäische Mission, Studium der Pole, seit 2008 nicht mehr manövrierbar, Betrieb eingestellt

Yohkoh	31. Aug. 1991	Japanisch-amerikanisch-englische Mission, Studium der Hochenergiestrahlung von Sonneneruptionen
SAMPEX	03. Juli 1992	Amerikanische Mission, Beobachtung hochenergetischer Partikel der Sonne
Koronas-I	02. März 1994	Russische Mission, Untersuchung der Sonne im UV- und Röntgenbereich
SOHO	12. Dez. 1995	„Solar and Heliospheric Observatory“, europäische Sonnensonde, Studium der inneren Struktur und der physikalischen Prozesse, die die Sonnenkorona formen
ACE	25. Aug. 1997	Amerikanische Mission, Messung des Sonnenwindes zwischen Sonne und Erde, ermöglicht „Sturmwarnung“ mit 1 Stunde Vorwarnzeit
TRACE	02. April 1998	„Transition Region and Coronal Explorer“, amerikanische Mission, Untersuchung der Sonneneruptionen und der Photosphäre
Genesis	08. Aug. 2001	Sammlung von Sonnenwindpartikeln und Rückführung zur Erde nach zwei Jahren
RHESSI	05. Febr. 2002	„Reuven-Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager“, Untersuchung der Teilchenbeschleunigung und Energiefreisetzung während Sonneneruptionen
STEREO	18. Sept. 2006	Bestehend aus zwei Sonden zur Untersuchung der Struktur und Entwicklung von Sonnenstürmen auf ihrem Weg ins Weltall
Hinode (Solar-B)	23. Sept. 2006	Japanische Mission, Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Magnetfeld und Korona

Missionen zum Merkur

Mariner 10	03. Nov. 1973	Erste Mission zu zwei Planeten, Venusvorbeiflug und drei Merkurvorbeiflüge, über 10.000 Aufnahmen, 57% des Planeten fotografisch abgedeckt; größte Annäherung: 694 km
------------	---------------	---

ÜBERSICHT ÜBER DIE MISSIONEN IM SONNENSYSTEM

MESSENGER	03. Aug. 2004	„Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging“ Untersuchung des Planeten aus dem Orbit: chemische Zusammensetzung der Oberfläche, Geologie, Magnetfeld, Kern, Pole, Exosphäre und Magnetosphäre, Eintritt in den Orbit am 18. März 2011 nach mehreren Flybys
-----------	---------------	---

Missionen zur Venus

Venera 1	12. Febr. 1961	Größte Annäherung: 99.800 km; Abbruch des Funkkontaktes in 7 Millionen km Entfernung
Mariner 2	26. Aug. 1962	Größte Annäherung: 34.750 km; verschiedene Untersuchungen zur Planetenphysik
Zond 1	22. April 1964	Abbruch des Funkkontaktes, Venusvorbeiflug in 100.000 km Entfernung, solarer Orbit
Venera 2	12. Nov. 1965	Größte Annäherung: 23.950 km; wegen Funkstörung keine Übertragung der Messwerte zur Erde möglich
Venera 3	16. Nov. 1965	Atmosphäreneintritt; in 32 km Höhe Kontakt abgebrochen
Venera 4	12. Juni 1967	Atmosphäreneintritt; Landung auf Nachtseite, 96 min Übertragung der Messwerte der Venusoberfläche und -atmosphäre
Mariner 5	14. Juni 1967	Größte Annäherung: 3.990 km; keine Kamera; Messung des Magnetfeldes und der Temperaturen
Venera 5	05. Jan. 1969	Atmosphäreneintritt
Venera 6	10. Jan. 1969	Atmosphäreneintritt
Venera 7	17. Aug. 1970	Landung; sendete 23 Minuten Temperaturdaten
Venera 8	27. März 1972	Landung; 50 Minuten Datenübertragung von der Oberfläche aus
Mariner 10	03. Nov. 1973	Größte Annäherung: 5.310 km während des Vorbeifluges auf dem Weg zum Merkur; erstmalig Aufnahmen von der Venus

Venera 9	08. Juni 1975	Landung und Orbiter; erstmalig Aufnahmen von der Oberfläche der Venus
Venera 10	14. Juni 1975	Landung und Orbiter; Aufnahmen von der Venusoberfläche
Pioneer Venus 1	20. Mai 1978	Orbiter; Aufnahmen der Atmosphäre und Radarkartierung der Oberfläche
Pioneer Venus 2	08. Aug. 1978	Multiprobe Spacecraft (fünf Atmosphäreneintauchkörper); einer sendete für 67 Minuten Daten von der Oberfläche
Venera 11	08. Sept. 1978	Landung; lieferten 95 min bzw.
Venera 12	14. Sept. 1978	110 min Messdaten von der Oberfläche
Venera 13	29. Okt. 1981	Landung; lieferten Panoramaaufnahmen durch verschiedene Filter; Untersuchung von Bodenproben
Venera 14	01. Nov. 1981	
Venera 15	09. Juli 1983	Zwei Orbiter; Kartierung der Venus mit Seitensicht radar;
Venera 16	11. Juni 1983	Venera 15: Radaraufnahmen der Rückseite; Venera 16: Streifen von 9.000 x 150 km am Nordpol; Auflösung: 1-2 km
Vega 1	15. Dez. 1984	Vorbeiflug auf dem Weg zum
Vega 2	21. Dez. 1984	Kometen Halley, Aussetzen eines Landers und eines Ballons zur Untersuchung der mittleren Wolkendecke
Magellan	04. Mai 1989	Orbiter; Radarabtastung der Venusoberfläche mit Synthetic Aperture Radar zu ca. 95%; maximale Auflösung: 75 m pro Bildpunkt
Galileo	18. Okt. 1989	Aufnahmen von der Venus während des Vorbeifluges auf dem Weg zum Jupiter
Cassini	15. Okt. 1997	Vorbeiflug an der Venus auf dem Weg in das Saturnsystem
MESSENGER	03. Aug. 2004	Vorbeiflug an der Venus auf dem Weg zum Merkur
Venus Express	09. Nov. 2005	Eintritt in den Venusorbit am 11. April 2006, Untersuchung der komplexen Dynamik und Chemie des Planeten und der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberfläche

Missionen zur Erde

NIMBUS: Serie amerikanischer Wettersatelliten, wurden zu einem wichtigen Erderkundungsprogramm durch ständige Weiterentwicklung der Sensoren; **NIMBUS 7: TOMS** (Total Ozone Mapping Spectrometer)

NIMBUS 1	28. Aug. 1964	NIMBUS 4	08. April 1970
NIMBUS 2	15. Mai 1966	NIMBUS 5	11. Dez. 1972
NIMBUS B	18. Mai 1968	NIMBUS 6	12. Juni 1975
NIMBUS 3	14. April 1969	NIMBUS 7	24. Okt. 1978

METEOR: russische polarumlaufende Wettersatelliten, drei Generationen, täglicher Bericht für mehr als zwei Drittel der Erde über Wolken, Eisbedeckung, atmosphärische Strahlung; **Visible and IR Scanning Radiometer**, Meteor 1: Serie von 31 Satelliten, beginnend am 26. März 1969 bis 10. Juni 1981, 3 bis 4 Starts jährlich, Meteor 2: Serie von 21 Satelliten, erster Start: 11. Juli 1975, letzter Start: 1993, Meteor 3: Serie von 6 Satelliten, Meteor 3-05 zusätzlich TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), Meteor 3-06 zusätzlich Scarab und PRARE

Landsat: Serie amerikanischer Erderkundungssatelliten; **Landsat 1-3:** verbesserte und größere Versionen von NIMBUS, RBV (Return Beam Vidicon), MSS (Multi-Spectral Scanner), **Landsat 4-6:** TM (Thematic Mapper), MSS; **Landsat 6:** Misserfolg

Landsat 1	23. Juli 1972	Landsat 5	01. März 1984
Landsat 2	22. Jan. 1975	Landsat 6	05. Okt. 1993
Landsat 3	05. März 1978	Landsat 7	15. April 1999
Landsat 4	16. Juli 1982		

SMS: „Synchronous Meteorological Satellites“, amerikanische Wettersatelliten, Vorläufer von GOES, **VISSR** (Visible Infrared Spin-Scan Radiometer)

SMS 1	17. Mai 1974	SMS 2	06. Febr. 1975
-------	--------------	-------	----------------

GOES: „Geostationary Operational Environmental System“, Serie amerikanischer Wettersatelliten, **VAS** (Visible Infrared Spin-Scan Radiometric Atmospheric Sounder)

GOES 1	16. Okt. 1975	GOES 7	26. Febr. 1987
GOES 2	16. Juni 1977	GOES 8	13. April 1994
GOES 3	16. Juni 1978	GOES 9	23. Mai 1995
GOES 4	09. Okt. 1980	GOES 10	25. April 1997
GOES 5	22. Mai 1981	GOES 11	03. Mai 2000
GOES 6	28. April 1983	GOES 12	03. Juli 2001

GMS: „Geostationary Meteorological Satellite“, japanischer Wettersatellit, geostationärer Orbit, **VISSR** (Single Imaging Visible and IR Spin Scan Radiometer), Auflösung: 1,25 km sichtbar, 5 km im Infrarot

GMS-1	14. Juli 1977	GMS-4	06. Sept. 1989
GMS-2	10. Aug. 1981	GMS-5	18. März 1995
GMS-3	03. Aug. 1984		

Meteosat: Serie europäischer Wettersatelliten, geostationärer Orbit, **Imaging Radiometer** im sichtbaren und Infrarotbereich

Meteosat 1	23. Nov. 1977	MOP 2/Meteosat 5	02. März 1991
Meteosat 2	19. Juni 1981		
Meteosat 3/P2	15. Juni 1988	MOP 3/Meteosat 6	20. Nov. 1993
MOP 1/Meteosat 4	06. März 1989	Meteosat 7	02. Sept. 1997

Resurs-F: russische Serie kurzer Missionen mit Filmkamerasystemen; drei Kate-200, zwei KFA-1000 (F1) und MK-4 (F2) Filmkameras, insgesamt 16 Starts, 5 Starts pro Jahr, erster Start 1979

INSAT: „Indian National Satellite System“, geostationäre Plattform für Kommunikationszwecke und für Erdbeobachtung, **VHRR** (two-channel Very High-Resolution Radiometer); **INSAT 1A** wurde aufgegeben, **INSAT 1C** Fehler in der Stromversorgung, **INSAT 2** zusätzlich **Data Relay Transponder for Data Collection Platforms**

INSAT 1A	10. April 1982	INSAT 3A	10. April 2003
INSAT 1B	30. Aug. 1983	INSAT 3B	22. März 2000
INSAT 1C	21. Juni 1988	INSAT 3C	24. Jan. 2001
INSAT 1D	12. Juni 1990	INSAT 3E	28. Sept. 2003
INSAT 2A	09. Juli 1992	INSAT 4A	22. Dez. 2005
INSAT 2B	22. Juli 1993	INSAT 4B	12. März 2007
INSAT 2C	07. Dez. 1997	INSAT 4C	10. Juli 2006
INSAT 2D	04. Juni 1997	INSAT 4CR	02. Sept. 2007
INSAT 2E	03. April 1999		

NOAA: Reihe amerikanischer Wettersatelliten, außerdem Beobachtung der Temperatur der Atmosphäre und Luftfeuchtigkeit, Meeresoberflächentemperatur, Schnee/Eisbedeckung, Ozongehalt; nahezu polar umlaufender sonnensynchroner Orbit, **AVHRR** (Advanced Very High-Resolution Radiometer), **TOVS** (Tiros Operational Vertical Sounder), **SEM** (Space Environment Monitor)

NOAA-8	28. März 1983	NOAA-14	30. Dez. 1994
NOAA-9	12. Dez. 1984	NOAA-15	13. Mai 1998
NOAA-10	17. Sept. 1986	NOAA-16	21. Sept. 2000
NOAA-11	22. Sept. 1988	NOAA 17	24. Juni 2002
NOAA-12	14. Mai 1991	NOAA 18	20. Mai 2005
NOAA-13	09. Aug. 1993		

SPOT: „Systeme Probatoire d’Observation de la Terre“, Serie französischer polarumlaufender Erdbeobachtungssatelliten; je zwei HRV (High-Resolution Visible Imagers), Auflösung: 20 m multispektral, 10 m panchromatisch; **SPOT 2** zusätzlich: **DORIS** (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), **SPOT 3** zusätzlich **POAM** (Polar Ozone and Aerosol Measurement Instrument)

SPOT 1	22. Febr. 1986	SPOT 4	24. März 1998
SPOT 2	22. Jan. 1990	SPOT 5	04. Mai 2002
SPOT 3	26. Sept. 1993		

MOS: „Marine Observation Satellite“, japanischer Satellit zur Beobachtung von atmosphärischen Wasserdampf, Ozeanbewegungen, Meeresoberflächentemperaturen, Eisbewegung und Verteilung, Chlorophyllgehalt; sonnensynchroner Orbit, **MESSR** (Multi-Spectrum Electronic and Self-Scanning Radiometer), Auflösung: 50 m; **VTIR** (Visible and Thermal Infrared Radiometer), Auflösung: 0,9 km IR, 2,7 km thermal; **MSR** (Microwave Scanning Radiometer), Auflösung: 23 km (31 GHz), 32 km (23,8 GHz)

MOS 1A	18. Febr. 1987
--------	----------------

ÜBERSICHT ÜBER DIE MISSIONEN IM SONNENSYSTEM

IRS: „Indian Remote Sensing Satellite“, sonnensynchroner Orbit, drei LISS (Linear Imaging Self-Scanning) pushbroom CCD units, Auflösung: 72,5 m LISS 1; 36,25 m LISS 2; 23 m LISS 3; 5 m LISS 4

IRS 1A	17. März 1988	IRS P3	21. März 1996
IRS 1B	29. Aug. 1991	IRS1 D	29. Sept. 1997
IRS 1E (IRS P1, Misserfolg)	20. Sept. 1993	IRS P4 (Ocean-sat 1)	26. Mai 1999
IRS P2	15. Okt. 1994	IRS P5 (Cartosat 1)	17. Okt. 2003
IRS 1C	28. Dez. 1995	IRS P6 (Resource-sat)	05. Mai 2005

Resurs-0: russische Serie, multispektrales digitales Äquivalent zu Landsat, Multiple Multispectral Package vom sichtbaren Bereich bis zum nahem Infrarot: MSU-SK conical scanner, MSU-E Pushbroom CCD imager, Auflösungen: 45 m sichtbar, 170 m IR, 600 m thermisches Infrarot

Resurs-01 3-14 20. April 1988

Prognoz: russische Serie von Erderkundungssatelliten, Beobachtung der Meere, natürlichen Ressourcen und atmosphärischen Prozessen, Prognoz 1: fehlgeschlagen am 14. Sept. 1988

Prognoz 1	26. April 1988	Prognoz 3	10. Sept. 1992
Prognoz 2	14. Febr. 1991	Prognoz 4	17. Dez. 1992

OKEAN-O: russisches Satellitensystem zur Beobachtung von Eis und Meeren mittels Radar, RLS-BO Seitensicht radar, MSU-S (visible/near-IR scanning radiometer), MSU-M (multispectral visible/near-IR scanning radiometer), RM-08 (8 mm-wavelength scanning radiometer)

OKEAN 1	05. Juli 1988	OKEAN 3	04. Juni 1991
OKEAN 2	28. Febr. 1990	OKEAN 4	11. Okt. 1994

Feng Yun: „Wind und Wolken“, Serie chinesischer polarumlaufender meteorologischer Satelliten, VHRSR (Very High Resolution Scanning Radiometer)

FY-1A	06. Sept. 1988	FY-1B	03. Sept. 1990
-------	----------------	-------	----------------

Galileo: Mission zum Jupitersystem, Aufnahmen der Erde während zweier Flybys auf dem Weg zum Jupiter

Galileo 18. Okt. 1989

Almaz: „Diamond“, neue Klasse russischer Erderkundungssatelliten, 3,1 GHz Synthetic Aperture Radar, Auflösung: 15-30 m

Almaz 1 31. März 1991

ERS: „European Remote Sensing Satellite“, globale Abdeckung von Ozeanen, Küstengebieten, Polkappen, Beobachtung von Wellenhöhen und -längen, Windgeschwindigkeit und -richtung, Eisparameter, Temperatur der Wolkendecke, Wolkenbedeckung, Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, AMI (Active Microwave Instrument), ATSR-M (Along-Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder), RA (Radar Altimeter), PRARE (Precise Range and Range Rate Experiment); ERS-2: GOME (Global Ozone Monitoring Exp.)

ERS-1	17. Juli 1991	ERS-2	21. April 1995
-------	---------------	-------	----------------

JERS: „Japan Earth Resources Satellite“, Erderkundungssatellit, sonnensynchroner Orbit, SAR (Synthetic Aperture Radar, L-Band), Auflösung: 18 m; OPS (Optischer Sensor im sichtbaren und nahen Infrarotbereich), Auflösung: 18 m

JERS 1 01. Febr. 1992

TOPEX/POSEIDON (Jason 1): Kombinierte amerikanisch-französische Mission: Topex (NASA/JPL): The Ocean Topography Experiment und Poseidon (CNES): Langzeitbeobachtung der globalen Ozeanzirkulation und Oberflächentopographie; Radar Altimeter, Microwave Radiometer

Topex/Poseidon 16. Aug. 1992 Jason-1 07. Dez. 2001

SIR-C/X-SAR: „Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar“, Teil der Mission zum Planeten Erde, Auflösung: 10-12 m, Einsatz bei Shuttle-Flügen

OrbView: Serie von kommerziellen Satelliten zur Wetterbeobachtung (Orbview 1), multispektrale Erdbeobachtung (Orbview 2), hochauflösende Aufnahmen (Orbview 3)

OrbView 1	03. April 1995	OrbView 4	21. Sept. 2001
OrbView 2	01. Aug. 1997	(Misserfolg)	
OrbView 3	26. Juni 2003		

Radarsat: Kanadischer Radarsatellit, C-Band Synthetic Aperture Radar, Auflösung: bis 8 m, verschiedene SAR-Modi

Radarsat 1 04. Nov. 1995

Kidsat: Einsatz von Kameras und anderen Instrumenten auf dem Space Shuttle oder Satelliten, Steuerung erfolgt von Studenten und Schülern als Teil des Unterrichts

STS-76	23. März 1996	STS-86	26. Sept. 1997
STS-81	12. Jan. 1997		

IKONOS: Erster kommerzieller Satellit, der hochauflösende Bilddaten liefert. Panchromatischer Sensor mit 1 m Auflösung und multispektraler Sensor mit 4 m Auflösung, die miteinander kombiniert werden können.

IKONOS 24. Sept. 1999

Terra: Teil des Earth Observing System (EOS) zur Beobachtung von Klima und Umweltveränderungen, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) hochauflösende Aufnahmen in 14 Wellenlängen, CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy System) Untersuchung des Strahlungshaushalts der Erde und der Wolken, MISR (Multi-Angle Imaging Spectro-Radiometer) Beobachtung unter neun Winkeln und vier Wellenlängen, MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) Beobachtung in 36 Spektralbereichen, MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) Untersuchung von Verteilung, Transport, Quellen und Abfluss von Kohlenmonoxid und Methan in der Atmosphäre

Terra (EOS AM-1) 18. Dez. 1999

SRTM: „Shuttle Radar Topography Mission“, Kombination des SIR-C/X-SAR-Instruments mit zusätzlichem C-Band-Radar an einem 60 m langen Ausleger zur Gewinnung von Stereodaten

SRTM (STS-99) 11. Febr. 2000

Cluster: Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Erde und Sonne, besteht aus vier identischen Sonden im Erdorbit

Cluster 26. Juli 2000

CHAMP: Challenging Mini-Satellite Payload, deutsche Mission, Untersuchung der Struktur und Dynamik vom festen Kern über den Mantel bis zur Kruste und Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre, hochgenaues Monitoring der ozeanischen Kreisläufe und der globalen Meereshöhe, Änderungen im globalen Wasserhalt, Wechselwirkungen zu Wetter und Klima, globale Sondierung vertikaler Schichten der Neutral- und Ionengasschicht der Erde und Untersuchung der Zusammenhänge zum Wetter der Erde sowie „space weather“.

CHAMP 15. Juli 2000

Earth Observing-1: Technologiesonde für Test- und Validierungszwecke neuer Instrumente

EO-1 21. Nov. 2000

Quickbird: Kommerzieller Satellit zur Erdbeobachtung, Auflösung: 0,6 m pro Bildpunkt im Nadirkanal, Fabkanäle: 2,44 m

Quickbird 18. Okt. 2001

BIRD: Bispectral InfraRed Detection – DLR-Kleinsatellit zur Feuerfernerkundung, ermöglicht die Bestimmung der Ausdehnung und Temperatur von Feuern und der Beobachtung und Überwachung von Vulkanen aus dem Weltraum.

BIRD 22. Okt. 2001

TES: „Technology Experiment Satellite“, Mission zum Test neuer Technologien in Aufbau, Kontrolle und Steuerung von Satelliten, panchromatische Kamera

TES 22. Okt. 2001

ENVISAT: Nachfolger von ERS-1 und ERS-2, Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR), Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS), Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS), Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY), Advanced Along-Track Scanning Radiometer (AATSR), Radar Altimeter 2 (RA-2), Microwave Radiometer (MWR), Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) und Laser Retro-Reflector (LRR)

ENVISAT 01. März 2002

GRACE: Doppelsatellitensystem. Ziel: global hochaufgelöstes Modell des Gravitationsfeldes über fünf Jahre, Schlüsse auf umwälzendes Magma im Erdinnern, schmelzende Gletscher oder sich verlagernde Meeresströmungen; Bereitstellung von global verteilten Profilen nach GPS limb-sounding Verfahren, Schlüsse auf sogenannten TEC in der Ionosphäre sowie Temperaturverteilung und Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre.

GRACE 17. März 2002

Aqua: Untersuchung des komplexen Wasserzyklusses der Erde

Aqua 04. Mai 2002

Aura: Untersuchung der Zusammensetzung, Chemie und Dynamik der Erdatmosphäre, Untersuchung des Ozons, der Luftqualität und des Klimas

Aura 15. Juli 2004

Cartosat: Satellit hauptsächlich für kartographische Anwendungen, zwei panchromatische Kameras für Stereoaufnahmen, Auflösung 2,5 m

Cartosat 1 05. Mai 2005 Cartosat 2A 28. April 2008
Cartosat 2 10. Jan. 2007

COSMIC/FORMOSAT-3: Taiwanesisch-amerikanische Mission, Untersuchung von Atmosphäre, Ionosphäre, Klima und Wetter

COSMIC 24. April 2006

Cloudsat: Experimenteller Satellit zur Untersuchung von Wolken und Niederschlägen mittels Radar

Cloudsat 28. April 2006

CALIPSO: Untersuchung der Rolle der Wolken und atmosphärischer Aerosole bei Regulierung des Wetters, Klimas und Luftqualität

CALIPSO 28. April 2006

AIM: „Aeronomy of Ice in the Mesosphere“, Untersuchung polarer mesosphärischer Wolken, deren Entstehung und Unterschiede, sowie deren thermische, chemische und dynamische Umgebung

AIM 25. April 2007

Terra SAR-X: erster Erdbeobachtungssatellit, der kontinuierlich globale SAR-Daten im X-Band liefert, drei verschiedene Modi mit Auflösungen von 1-16 m, hochfrequenter X-Band-Sensor

Terra SAR-X 15. Juni 2007

IMS: „Indian Mini-Satellite“, multispektrale und hyperspektrale Kameras

IMS 1 28. April 2008

OSTM/Jason-2: Langzeitbeobachtung der globalen Ozeanzirkulation und Oberflächentopographie der nächsten Generation, europäisch-amerikanische Mission, Poseidon-3 Radar Altimeter, Advanced Microwave Radiometer.

Jason-2 20. Juni 2008

GOCE: „Gravity and Steady-State Ocean Circulation Explorer“, europäische Mission zur Vermessung des Erdschwerefeldes und der Schwankungen des Meeresspiegels

GOCE 17. März 2009

Diese Auflistung der Missionen zur Erde stellt nur eine Auswahl dar.

Missionen zum Mond

<i>Pioneer 0</i>	17. Aug. 1958	Misserfolg, erste Stufe explodierte
<i>Pioneer 1</i>	11. Okt. 1958	Misserfolg, hat Fluchtgeschwindigkeit nicht erreicht
<i>Pioneer 3</i>	06. Dez. 1958	Misserfolg, hat Fluchtgeschwindigkeit nicht erreicht
<i>Luna 1</i>	02. Jan. 1959	Größte Annäherung: 5.000 bis 6.000 km; danach Umlaufbahn um die Sonne
<i>Pioneer 4</i>	03. März 1959	Entfernter Mondvorbeiflug
<i>Luna 2</i>	12. Sept. 1959	Aufschlag; erste Sonde, die auf dem Mond aufschlug
<i>Luna 3</i>	04. Okt. 1959	Erstmals 400 Aufnahmen der Mondrückseite
<i>Ranger 3</i>	04. Okt. 1959	Misserfolg, Mondorbit verfehlt
<i>Ranger 4</i>	23. April 1962	Aufschlag, Abbruch des Funkkontaktes noch am Starttag
<i>Ranger 5</i>	18. Okt. 1962	Fehlfunktion während des Einschusses in die Mondbahn, verfehlte den Mond um 725 km
<i>Luna 4</i>	02. April 1963	Geplant als Lander, verfehlte den Mond
<i>Ranger 6</i>	30. Jan. 1964 bis 02. Febr. 1964	Aufschlag am Rand des Mare Tranquillitatis, die Kameras übertrugen keine Bilder
<i>Ranger 7</i>	28. Juli 1964 bis 31. Juli 1964	Aufschlag im Mare Nubium; 4.316 Aufnahmen während des Anfluges
<i>Ranger 8</i>	17. Febr. 1965 bis 20. Febr. 1965	Aufschlag im Mare Tranquillitatis; über 7.000 Aufnahmen während des Anfluges
<i>Ranger 9</i>	21. März 1965 bis 24. März 1965	Aufschlag im Krater Alphonsus; über 5.800 Aufnahmen besserer Schärfe durch zusätzliche Stabilisierung der Kamera in Flugachse
<i>Luna 5</i>	09. Mai 1965	Größte Annäherung: 8.500 km; durch Störeinflüsse geriet die Sonde von der Erd- in eine Sonnenumlaufbahn
<i>Luna 6</i>	08. Juni 1965	Lander, verfehlte den Mond, Sonnenorbit
<i>Luna 7</i>	04. Okt. 1965 bis 07. Okt. 1965	Erprobung der Systeme für eine Landung; Aufschlag im Bereich des Oceanus Procellarum

<i>Luna 8</i>	03. Dez. 1965 bis 06. Dez. 1965	Erprobung der Systeme für eine Landung; Aufschlag im Bereich des Oceanus Procellarum
<i>Luna 9</i>	31. Jan. 1965	Erste weiche Landung eines Messgerätebehälters auf der Mondoberfläche am 03. Febr. 1965; Panoramaaufnahmen der Oberfläche
<i>Luna 10</i>	31. März 1966	Erster künstlicher Satellit des Mondes
<i>Surveyor 1</i>	30. März 1966	Landung nach direkter Injektion in die Übergangsbahn; 10.338 Aufnahmen, jeweils 1.000 unter Verwendung eines Rot-Grün-Blau-Filters am ersten Mondtag; 812 Bilder am zweiten Mondtag
<i>Lunar Orbiter 1</i>	10. Aug. 1966	Mondumlaufbahn; etwa 5,18 Millionen km ² fotografisch abgedeckt, 229 Aufnahmen wurden übertragen
<i>Luna 11</i>	24. Aug. 1966	Mondumlaufbahn, Batterie versagte am 1. Okt. 1966
<i>Surveyor 2</i>	20. Sept. 1966	Nach Bahnkorrektur außer Kontrolle; Aufschlag südlich des Kraters Copernicus
<i>Luna 12</i>	22. Okt. 1966	Mondumlaufbahn, Datenübertragung endete am 19. Jan. 1968
<i>Lunar Orbiter 2</i>	06. Nov. 1966	Mondumlaufbahn; 817 Aufnahmen mit Tele-Weitwinkeloptik wurden übermittelt
<i>Luna 13</i>	21. Dez. 1966	Landung in der Nähe des Kraters Seleucus; Nahaufnahmen der Mondoberfläche
<i>Lunar Orbiter 3</i>	05. Febr. 1967	Mondumlaufbahn; durch Störung im Bildtransportsystem konnten nur 626 Aufnahmen übertragen werden
<i>Surveyor 3</i>	17. April 1967	Landung im östlichen Teil des Oceanus Procellarum; 6.315 Aufnahmen
<i>Lunar Orbiter 4</i>	04. Mai 1967	Mondumlaufbahn; 546 Aufnahmen; Abdeckung: 99% der Vorderseite und 75% der Rückseite des Mondes
<i>Surveyor 4</i>	14. Juli 1967 bis 17. Juli 1967	Misserfolg, Sonde versagte und schlug auf dem Mond auf
<i>Explorer 35</i>	19. Juli 1967	Mondumlaufbahn
<i>Lunar Orbiter 5</i>	01. Aug. 1967	Mondumlaufbahn; 844 Aufnahmen, insbesondere von 36 ausgewählten Gebieten (Apollo-Landeplätze)
<i>Surveyor 5</i>	08. Sept. 1967	Landung im Mare Tranquillitatis; 18.006 Aufnahmen und Bodenanalysen

Surveyor 6	07. Nov. 1967	Landung im Sinus Medii; 14.500 Aufnahmen und ca. 55 Bodenanalysen; 15.000 Bilder aus neuer Position (stereoskopische Erfassung)	Luna 16	12. Sept. 1970	Erstmalig Rückführung von Bodenproben mit Hilfe eines unbemannten fernsteuerbaren halbautomatischen Lande-Rückkehr-Gerätes
Surveyor 7	07. Jan. 1968	Landung ca. 25 km nördlich des Kraterrandes von Tycho; 5.000 Aufnahmen, erstmals Aufnahmen mit Polarisationsfilter; Bodenanalysen	Zond 8	20. Okt. 1970	Größte Annäherung: 1.120 km; Erdanflug erstmalig über Nordhalbkugel; neben farbigen und schwarz-weißen Mondaufnahmen auch Erdaufnahmen
Luna 14	07. April 1968	Mondumlaufbahn, sammelte unter anderem Daten zur Wechselwirkung zwischen Erde und Mond und zum Gravitationsfeld des Mondes	Luna 17	10. Nov. 1970	Landung im Mare Imbrium; fernsteuerbares halbautomatisches Mondfahrzeug; über 200 Panoramaaufnahmen; 20.000 weitere Aufnahmen; Bodenanalysen
Zond 5	14. Sept. 1968	Erprobung der Rückführung eines Raumflugkörpers nach Mondflug; Mondhinterfliegung und Rückkehr zur Erde; größte Annäherung: 1.950 km	Apollo 14	31. Jan. 1971 bis 09. Febr. 1971	Dritte bemannte Mondlandung nahe des Kraters Fra Mauro im östlichen Oceanus Procellarum
Zond 6	10. Nov. 1968	Erstmals aerodynamische Rückführung; größte Annäherung: 2.420 km; zwei Aufnahmeserien der Mondrückseite aus 10.000 km Entfernung; Auflösung ca. 200 m pro Bildpunkt	Apollo 15	26. Juli 1971 bis 07. Aug. 1971	Vierte bemannte Mondlandung im Gebiet Hadley-Rille; erstmals bemanntes Mondfahrzeug
Apollo 8	21. Dez. 1968 bis 27. Dez. 1968	Erster bemannter Mondflug; fotografische Erkundung des vorgesehenen Apollo-Landeplatzes sowie anderer Gebiete	Luna 18	02. Sept. 1971	Landung im Gebiet Mare Foecunditatis nach 54 Umläufen
Apollo 10	18. Mai 1969 bis 28. Mai 1969	Abstiegssimulation im Mondumlauf; größte Annäherung: 15.185 m	Luna 19	28. Sept. 1971	Mondumlaufbahn; hochauflösende Aufnahmen der Mondoberfläche
Luna 15	13. Juli 1969	Automatische Sonde; Erprobung der wesentlichen Voraussetzungen für Landungen aus einer Mondumlaufbahn	Luna 20	14. Febr. 1972	Landung am Nordostrand des Mare Foecunditatis; Rückführung von Bodenproben
Apollo 11	16. Juli 1969 bis 24. Juli 1969	Erstmals bemannte Mondlandung; Landung im Mare Tranquillitatis; Rückführung von Bodenproben	Apollo 16	16. April 1972 bis 27. April 1972	Fünfte bemannte Mondlandung im Cayley-Hochplateau nahe des Kraters Descartes
Zond 7	07. Aug. 1969 bis 14. Aug. 1969	Größte Annäherung: 2.000 km; drei Aufnahmeserien aus verschiedenen Entfernungen; aerodynamische Rückführung	Apollo 17	07. Dez. 1972 bis 19. Dez. 1972	Sechste und letzte bemannte Mondlandung in der Taurus-Littrow-Region; Rückführung von 113 kg Mondgestein
Apollo 12	14. Nov. 1969 bis 24. Nov. 1969	Zweite bemannte Mondlandung im Oceanus Procellarum	Explorer 49	10. Juni 1973	Radioastronomische Erkundung der Mondrückseite
Apollo 13	11. April 1970 bis 17. April 1970	Versuchte Mondlandung; Abbruch nach Explosion eines Sauerstofftanks im Servicemodul; erfolgreiche Rückkehr	Luna 21	08. Jan. 1974	Landung im Kraters Le Monnier; fernsteuerbares halbautomatisches Mondfahrzeug
			Luna 22	02. Juni 1974	Mondumlaufbahn in 212 km Höhe, Langzeituntersuchungen der physikalischen Erscheinungen des Mondes
			Luna 23	28. Sept. 1974	Nach Mondumlaufbahn missglückte Landung im Mare Crisium
			Luna 24	12. Juni 1976	Landung am südöstlichen Rand des Mare Crisium; Rückstart, Rückführung von 170 g Mondgestein

ÜBERSICHT ÜBER DIE MISSIONEN IM SONNENSYSTEM

<i>Galileo</i>	18. Okt. 1989	Multispektralaufnahmen während zweier Vorbeiflüge auf dem Weg zum Jupiter (Dez. 1990 und Dez. 1992)
<i>Hiten</i>	24. Jan. 1990	Japanische Mondmission, bestehend aus zwei kleinen Orbitern, keine Datenübertragung aus dem Mondorbit möglich
<i>Clementine</i>	25. Jan. 1994	Mondorbit, Kartierung des gesamten Mondes im Multispektralbereich, Auflösung: 125-250 m pro Bildpunkt
<i>Lunar Prospector</i>	06. Jan. 1998	Polarer Mondorbit, unter anderem Gamma Ray Spectrometer, Alpha Particle Spectrometer
<i>SMART-1</i>	27. Sept. 2003	Europäischer Orbiter, solargetriebenes Ionentriebwerk, Untersuchung der Geologie, Morphologie, Topographie, Mineralogie, Geochemie und exosphärische Umgebung
<i>Kaguya (SELENE)</i>	14. Sept. 2007	Japanischer Mondorbiter, globale Untersuchung des Mondes hinsichtlich Mineralogie, Topographie, Geographie und Gravitation
<i>Chang'e 1</i>	24. Okt. 2007	Erster chinesischer Mondorbiter, Test des Satelliten, dreidimensionale Aufnahmen, Untersuchung der Verteilung und Vorkommen von Elementen
<i>Chandrayaan 1</i>	22. Okt. 2008	Indischer Mondorbiter, Technologieemission, Erstellung einer hochgelösten globalen Karte, mineralogische Kartierung, Untersuchung der Topographie mit Laser

Missionen zum Mars

<i>Marsnik 1 (Mars 1960A)</i>	10. Okt. 1960	Erste sowjetische planetare Raumsonde, Versagen der dritten Raketenstufe, Parkorbit wurde nicht realisiert, erreichte Höhe: 120 km, danach Wiedereintritt
<i>Marsnik 2 (Mars 1960B)</i>	14. Okt. 1960	Zweite sowjetische planetare Raumsonde, Versagen der dritten Raketenstufe, erreichte Höhe: 120 km, danach Wiedereintritt

<i>Sputnik 22 (Mars 1962A)</i>	24. Okt. 1962	Misserfolg, entweder zerbrach die Sonde beim Einschuss in den Erdborbit oder die Oberstufe explodierte im Erdborbit
<i>Mars 1</i>	01. Nov. 1962	Untersuchungen im marsnahen Raum; Abbruch der Funkverbindung am 21.03.1963 in 106 Mill. km Entfernung, Marsorbit nicht erreicht
<i>Sputnik 24 (Mars 1962B)</i>	04. Nov. 1962	Misserfolg; konnte Erdborbit nicht verlassen
<i>Mariner 3</i>	05. Nov. 1964	Abtrennung der Hülle missglückte; Funkverbindung abgebrochen
<i>Mariner 4</i>	28. Nov. 1964	Ankunft am Mars am 14. Juli 1965, größte Annäherung: 9.840 km; 22 Aufnahmen der Marsoberfläche
<i>Zond 2</i>	30. Nov. 1964	Vorbeiflug am Mars am 6. August 1965, größte Annäherung: 1.500 km, Versagen des Kommunikationssystems April 1965
<i>Zond 3</i>	18. Juli 1965	Mondaufnahmen, Weiterflug zum Mars
<i>Mariner 6</i> <i>Mariner 7</i>	25. Febr. 1969 27. März 1969	Zwillingsunternehmen; erfolgreiche Kurskorrektur; 200 Fernsehaufnahmen der Marsoberfläche; Untersuchung der Atmosphäre (Struktur und Zusammensetzung)
<i>Mars 1969A</i>	27. März 1969	Misserfolg; Explosion der dritten Raketenstufe
<i>Mars 1969B</i>	02. April 1969	Misserfolg; Versagen der ersten Raketenstufe direkt nach dem Start
<i>Mariner 8</i>	08. Mai 1971	Misserfolg; Fehlfunktion der Centaur-Stufe
<i>Cosmos 419</i>	10. Mai 1971	Erreichen der Parkbahn um die Erde, 4. Stufe des Blocks D versagte aufgrund eines Fehlers in der Timerprogrammierung
<i>Mars 2</i>	19. Mai 1971	Erreichen des Marsorbits am 21.11.1971; erstmaliges Absetzen einer Landekapsel (Bruchlandung); Orbiter machte Fernsehaufnahmen
<i>Mars 3</i>	28. Mai 1971	Erreichen des Marsorbits am 21.12.1971; Absetzen einer Landekapsel (weiche Landung); Instrumente des Landers arbeiteten nur für 20 Sekunden

Mariner 9	30. Mai 1971	Erreichen des Marsorbits am 14.11.1971, erster künstlicher Satellit eines Planeten; 6.876 Aufnahmen der Marsoberfläche; max. Auflösung: 100 m pro Bildpunkt	Mars Observer	25. Sept. 1992	Abbruch der Funkverbindung am 21.08.1993 drei Tage vor planmäßigem Erreichen des Marsorbits; wahrscheinliche Ursache: Explosion des Triebwerks bei Wiederinbetriebnahme (Einschussmanöver); verschiedene Experimente, darunter ein Kamerasystem
Mars 4	21. Juli 1973	Gelangte durch technische Fehler nicht in die Mars-Umlaufbahn, flog in ca. 2.200 km Entfernung am 10.02.1974 vorbei	Mars Global Surveyor	07. Nov. 1996	Ersatz für Mars Observer, Eintritt in den Marsorbit begann am 12.09.1997, Aerobraking zum Orbit für Oberflächenkartierung dauerte ein Jahr länger aufgrund nicht korrekt ausgeklappter Sonnenkollektoren
Mars 5	25. Juli 1973	Erreichen des Marsorbits am 12.02.1974, Orbiter arbeitete nur wenige Tage, lieferte Daten von der Atmosphäre und Aufnahmen eines kleinen Teils der südlichen Hemisphäre	Mars-96	16. Nov. 1996	Russland/internationale Beteiligung; Misserfolg: Fehler in 4. Stufe der Trägerrakete, instabiler Erdorbit, Verlust von Sonde und 4. Stufe am 17.11.1996
Mars 6	05. Aug. 1973	Ankunft am Mars am 12.03.1974, Landung im Gebiet Margaritifer Sinus; Versagen der Datenübertragung	Mars Pathfinder	04. Dez. 1996	Landung am 04.07.1997 im Ares Vallis, Rover Sojourner rollte am 06.07.1997 auf die Marsoberfläche, Lander und Rover arbeiteten bis zum Abbruch der Funkverbindung am 27.09.1997
Mars 7	09. Aug. 1973	Ankunft am Mars am 09.03.1974, gelangte nicht in Marsumlaufbahn; Landekapsel verfehlte ihr Ziel	Nozomi (Planet B)	04. Juli 1998	Japanische Mission zum Mars, Erkundung der Marsatmosphäre, 11 wissenschaftliche Instrumente
Viking 1	20. Aug. 1975	Orbiter und Lander; Erreichen des Marsorbits am 19.07.1976, Landung am 20.07.1976 in Chryse Planitia	Mars Climate Orbiter	11. Dez. 1998	Untersuchung von Wetter und Klima, Wasser- und CO ₂ -Haushalt, Mars Climate Orbiter Color Imager und Pressure Modulated Infrared Radiometer, Verlust der Sonde bei Eintritt in Umlaufbahn
Viking 2	09. Sept. 1975	Orbiter und Lander; Erreichen des Marsorbits am 07.08.1976, Landung am 03.09.1976 in der Ebene Utopia; beide Lander (Viking 1 und 2) lieferten Panoramaaufnahmen und andere Daten; insgesamt über 55.000 Aufnahmen (auch von den Monden); Abdeckung der gesamten Oberfläche mit Auflösungen von 100-200 m pro Bildpunkt; regional bis 30 m, einige Aufnahmen bis zu 8 m pro Bildpunkt	Mars Polar Lander	03. Jan. 1999	Untersuchung von Wetter und Klima, Wasser- und CO ₂ -Haushalt, Landung fehlgeschlagen
Phobos 1	07. Juli 1988	Abbruch der Funkverbindung durch falsches Steuersignal, Rettung der Sonde nicht mehr möglich	Deep Space 2	03. Jan. 1999	Teil des New Millennium Programms, bestand aus 2 Mikropenetratoren, die in den Marsboden nahe des Südpols eindringen sollten, Mitführung auf Mars Polar Lander, Landung fehlgeschlagen
Phobos 2	12. Juli 1988	Marsorbit; Wärmebilder eines ca. 1.500 km breiten Geländestreifens am Äquator; Auflösung etwa 2 km pro Bildpunkt; 9 Aufnahmen von Phobos; Abbruch der Funkverbindung am 27.03.1989	2001 Mars Odyssey	07. April 2001	Detaillierte mineralogische Untersuchung der Oberfläche und Untersuchung der Strahlungsumgebung, auch Kommunikationsrelais für zukünftige Landemissionen

ÜBERSICHT ÜBER DIE MISSIONEN IM SONNENSYSTEM

Mars Express	02. Juni 2003	Europäische Mission mit Orbiter und Lander Beagle 2, Abtrennung des Landers: 19.12.2003, Landung fehlgeschlagen, Eintritt in den Orbit: 25.12.2003, globale hochauflösende Fotogeologie, mineralogische Kartierung, Bestimmung der Atmosphärenzusammensetzung
Spirit (Mars Exploration Rover A)	10. Juni 2003	Rover-Mission, Landung im Krater Gusev am 04.01.2004, Rover mit zahlreichen wissenschaftlichen Instrumenten und einer Reichweite von 100 m pro Tag, Untersuchung des Marsbodens auf Spuren von Leben, Klima, Geologie
Opportunity (Mars Exploration Rover B)	08. Juli 2003	Rover-Mission, Landung in Meridiani Planum am 25.01.2004, Rover mit zahlreichen wissenschaftlichen Instrumenten und einer Reichweite von 100 m pro Tag, Untersuchung des Marsbodens auf Spuren von Leben, Klima, Geologie
Mars Reconnaissance Orbiter	12. Aug. 2005	Eintritt in Orbit: 10. März 2006, Untersuchung des gegenwärtigen Klimas, Untersuchung der Oberfläche mit hochauflösender Kamera und Suche nach Landeplätzen
Phoenix	04. Aug. 2007	Kleiner stationärer Lander, Landung in der Nordpolregion bei 68,15° N und 125,9° W am 25. Mai 2008, Untersuchung der Oberfläche in den hohen Breiten, Bestimmung des polaren Klimas und Wetters, Zusammensetzung der unteren Atmosphäre, Geomorphologie, Rolle des Wassers

Missionen zu den Asteroiden

Galileo	18. Okt. 1989	Vorbeiflug an 951 Gaspra (Okt. 1991) und 243 Ida (Aug. 1993) auf dem Weg zum Jupiter
NEAR	17. Febr. 1996	Vorbeiflug an 253 Mathilde am 27. Juni 1997 auf dem Weg zu 433 Eros, von Februar 2000 bis Februar 2001 im Orbit um Eros, anschließend Landung auf Eros

Cassini	15. Okt. 1997	Vorbeiflug an 2685 Masursky (Jan. 2000) auf dem Weg zum Saturn
Deep Space 1	24. Okt. 1998	Test neuer Technologien (Ionentriebwerk) für den Einsatz im Weltraum, Vorbeiflug am Asteroiden Braille und am Kometen Borrelly
Hayabusa (Muses-C)	09. Mai 2003	Orbiter und Lander zur Probenrückführung von der Oberfläche des Asteroiden 25143 Itokawa
Dawn	27. Sept. 2007	Orbiter zu 4 Vesta (Ankunft 2011) und 1 Ceres (Ankunft 2015)

Missionen zum Jupiter

Pioneer 10	03. März 1972	Vorbeiflug an Jupiter; zahlreiche Aufnahmen der Äquatorregion; erste Sonde, die das Sonnensystem verlassen hat
Pioneer 11	06. April 1973	Vorbeiflug an Jupiter; 22 Farbaufnahmen, vornehmlich der Südregion
Voyager 2	20. April 1977	Vorbeiflug an Jupiter am 09.07.1979; größte Annäherung: 643.000 km; Aufnahmen von Jupiter und seinen Monden
Voyager 1	05. Sept. 1977	Vorbeiflug an Jupiter; größte Annäherung: 286.000 km; zahlreiche Aufnahmen von Jupiter und seinen Monden
Ulysses	06. Okt. 1990	Amerikanisch-europäische Sonnen-sonde, Vorbeiflug an Jupiter auf dem Weg zur Sonne
Galileo	18. Okt. 1989	Erste Sonde mit komplexer Flugbahn unter Ausnutzung der Schwerkraft; Ankunft im Jupitersystem: Dez. 1995; Atmosphäreneintrittskörper; Forschungsschwerpunkte: Jupiteratmosphäre; Galileische Monde; Jupitermagnetosphäre
Cassini	15. Okt. 1997	Vorbeiflug am Jupiter auf dem Weg in das Saturnsystem
New Horizons	19. Jan. 2007	Vorbeiflug an Jupiter auf dem Weg in das Pluto-Charon-System

Missionen zum Saturn

<i>Pioneer 11</i>	06. April 1973	Vorbeiflug an Saturn; größte Annäherung: 20.800 km
<i>Voyager 2</i>	20. Aug. 1977	Vorbeiflug an Saturn; größte Annäherung: 38.000 km; Aufnahmen von Saturn und seinen Monden
<i>Voyager 1</i>	05. Sept. 1977	Vorbeiflug an Saturn; größte Annäherung: 124.000 km; Aufnahmen von Saturn und seinen Monden
<i>Cassini</i>	15. Okt. 1997	Orbiter, Erkundung des Saturnsystems, Absetzen der Landekapsel Huygens zur Untersuchung des Mondes Titan

Missionen zum Uranus

<i>Voyager 2</i>	20. Aug. 1977	Vorbeiflug an Uranus im Jan. 1986; größte Annäherung: 107.000 km; Aufnahmen von Uranus und seinen Monden
------------------	---------------	--

Missionen zum Neptun

<i>Voyager 2</i>	20. Aug. 1977	Vorbeiflug an Neptun im Aug. 1989; Aufnahmen von Neptun und seinen Monden
------------------	---------------	---

Missionen zu den Zwergplaneten

<i>New Horizons</i>	19. Jan. 2006	Ankunft im Pluto-Charon-System 2015, Weiterflug in den Kuipergürtel
<i>Dawn</i>	27. Sept. 2007	Orbiter zu 4 Vesta (Ankunft 2011) und 1 Ceres (Ankunft 2015)

Missionen zu den Kometen

<i>Vega 1</i>	15. Dez. 1984	Vorbeiflug am Kometen Halley am 6. März 1986 nach Venusvorbeiflug
<i>Vega 2</i>	21. Dez. 1984	Vorbeiflug am Kometen Halley am 9. März 1986 nach Venusvorbeiflug
<i>Sakigake</i>	07. Jan. 1985	Japanische Mission, Vorbeiflug am Kometen Halley am 1. März 1986
<i>Giotto</i>	02. Juli 1985	Vorbeiflug am Kometen Halley am 13. März 1986, Aufnahmen vom Kometenkern
<i>Suisei</i>	18. Aug. 1985	Japanische Mission, Vorbeiflug am Kometen Halley am 8. März 1986
<i>Galileo</i>	18. Okt. 1989	Aufnahmen mehrerer Einschläge des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter vom 17.-22. April 1994
<i>Hubble Space Telescope</i>	25. April 1990	Aufnahmen mehrerer Einschlagsspuren des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter
<i>Deep Impact</i>	12. Jan. 2005	Vorbeiflug am Kometen Tempel 1, Abfeuern eines Projektils auf den Kern, Untersuchung des Einschlags

Missionen in den Kuipergürtel

<i>New Horizons</i>	19. Jan. 2006	Ankunft im Pluto-Charon-System 2015, Weiterflug in den Kuipergürtel
---------------------	---------------	---

Wie komme ich an Bilddaten?

Die Regional Planetary Image Facility (RPIF)

Sicherlich haben Sie sich nach der Lektüre dieser kleinen Broschüre gefragt, ob es denn eine Einrichtung in Deutschland gibt, wo man derartiges Material erhalten kann. Heutzutage kann man sehr viel selbst im Internet recherchieren, aber mitunter ist es einfacher, sich jemandes zu bedienen, der sich damit besser auskennt oder einem sogar die Rechercharbeit ganz abnehmen kann, die ja mitunter durch erforderliche Fremdsprachenkenntnisse erschwert wird.

Hier kommt nun die Regional Planetary Image Facility (RPIF) ins Spiel. Die RPIF ist eine Bibliothek für planetare Bilddaten. Ihre Aufgabe ist die Archivierung und Bereitstellung aller bisher durch Raumsonden gewonnenen Daten von planetaren Objekten in unserem Sonnensystem, ausgenommen Fernerkundungsdaten der Erde.*

Nach Gründung der RPIF 1985 auf der Basis eines Abkommens zwischen dem DLR und der NASA wurde die Bibliothek vier Jahre später eröffnet. Zunächst in der Abteilung Planetare Erkundung am Institut für Optoelektronik in Oberpfaffenhofen beheimatet, befindet sich die RPIF seit 1992 am Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof. Die RPIF ist Teil eines internationalen von der NASA koordinierten Netzes von Bildbibliotheken. Weltweit gibt es insgesamt 18 derartige Einrichtungen, von denen sich zehn in den USA, fünf in Europa und je eine in Kanada, Japan und Israel befinden. Die Berliner RPIF soll prinzipiell den gesamten deutschsprachigen Raum bedienen. Die einzelnen Bildbibliotheken stehen über Daten-

netze im engen Kontakt miteinander. Sie sind Teil des Planetary Data Systems (PDS) der NASA und bieten umfangreiche Recherchemöglichkeiten in dessen Datenbanken.

Bestand

Der Bestand umfasst Bilddaten, spektrale Daten sowie die zugehörigen Lage- und Positionsdaten der jeweiligen Sonde. Ergänzt werden diese Daten durch Dokumentationen, Karten und eine kleine Auswahl an Fachzeitschriften und Fachliteratur. Alle Daten stehen in dokumentierter und katalogisierter Form sowohl für wissenschaftliche Forschungszwecke als auch für die Öffentlichkeit zur Verfügung. Die interne Nutzung erfolgt im Rahmen von Forschungsarbeiten, beispielsweise zur Auswertung projektbezogener Daten, zur Vorbereitung von Weltraummissionen oder für Dissertationen und Diplomarbeiten.

Es stehen hauptsächlich Daten amerikanischer, aber auch europäischer und sowjetischer/russischer Missionen zur Verfügung. In der Tabelle ist der gegenwärtige Bestand erfasst. Mit dieser im Hinblick auf die amerikanischen Missionen fast lückenlosen Datenbank, ist die RPIF die „erste Adresse“ für Planetenbilddaten in Deutschland und stellt eine ausgezeichnete Basis für Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet dar.

Die Daten aktueller sowie auch zukünftiger Raumflüge werden der RPIF von NASA-Seite zur Verfügung gestellt. So erhält die RPIF derzeit die Daten der Mission Cassini aus dem Saturnsystem und von den aktuellen Mars-Missionen. Ergänzt werden die Daten zum Mars durch die aktuellen Aufnahmen der europäischen Sonde Mars Express, an der das DLR-Institut für Planetenforschung mit der High Resolution Stereo Camera aktiv beteiligt ist. Weiterhin liegen verschiedene Aufnahmen der Erde aus dem Space-Shuttle-Programm der NASA vor.

Das Originalmaterial wird ergänzt durch einen umfangreichen Bestand an Karten, der mittlerweile auf über 2.400 Stück angewachsen ist, eine umfangreiche Sammlung von digitalen Bilddaten und Dias, sowie durch 16 mm-Filme, Videos und DVDs. Diese Sammlung von digitalen Bilddaten und Dias, die zur Veröffentlichung freigegeben sind, bildet einen Schwerpunkt der Bibliothek. Sie ist besonders interessant für Journalisten, Lehrer aber auch für die interessierte Allgemeinheit.

* Fernerkundungsdaten der Erde werden im Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR in Oberpfaffenhofen archiviert: <http://www.dlr.de/caf>

Öffentlichkeitsarbeit

Um die RPIF mit ihrem umfangreichen Bestand nutzen zu können, steht ein Arbeitsbereich zur direkten Einsicht zur Verfügung – auch für die Öffentlichkeit. Der Zugang zu den Daten wird durch Dokumentationen der NASA, des Jet Propulsion Laboratory (Pasadena/Kalifornien) und des National Space Science Data Center (Greenbelt/Maryland) ermöglicht. Computer-gestützte Kataloge erlauben die Datenauswahl nach beliebigen Suchbegriffen.

Information und Datenrecherche sind kostenlos. Bilder können in kleinen Mengen von der RPIF zum Selbstkostenpreis geliefert werden. Größere Mengen, insbesondere für Forschungszwecke, müssen beim National Space Science Data Center bestellt werden, wobei die RPIF Unterstützung gewährt. Neben der Betreuung von einzelnen Nutzern bietet die RPIF Vorträge zu verschiedenen Themen für Gruppen und Schulklassen oder auch im Rahmen einer Weiterbildung für Lehrer an. Außerdem präsentiert sich die RPIF bei zahlreichen fachbezogenen Tagungen, Ausstellungen und Messen.

Eine Übersicht über den aktuellen Bestand vor allem des freigegebenen Bildmaterials finden Sie auf unserer Internetseite: <http://www.dlr.de/rpif/>. Dort finden Sie neben anderen Materialien wie Poster, Bildserien oder Bastelsets auch den kompletten Katalog im PDF-Format.

Projekte des Instituts

Die RPIF ist verpflichtet, im Rahmen von abgeschlossenen (z.B. Galileo, Mars Pathfinder, Deep Space 1), aktuellen (Mars Express, Venus Express, Cassini, Rosetta, Dawn) und in Vorbereitung befindlicher Welt-raummissionen (ExoMars, BepiColombo), an denen das Institut beteiligt ist, Daten zu archivieren und sie Interessenten und der Öffentlichkeit weltweit zur Verfügung zu stellen.

Das Projekt Galileo war das vielseitigste und zugleich komplizierteste unbemannte Raumfahrtunternehmen zur Erkundung des Jupiter und seiner Galileischen Monde. 1989 gestartet, lieferte der Orbiter – nach einer mehrjährigen Reise durch unser Sonnensystem –

seit Juni 1996 faszinierende Aufnahmen des vulkanisch aktiven Mondes Io und der Eismonde Europa, Ganymed und Callisto. Mit Hilfe einer Atmosphären-Eintauchsonde, bereits Monate vor Eintreffen des Orbiters am Planeten abgekoppelt, wurde die chemische Zusammensetzung der Jupiteratmosphäre untersucht. Die Mission wurde im Juli 2003 beendet.

Mit Deep Space 1 startete im Oktober 1998 die erste Mission im Rahmen des „New Millennium“-Programms der NASA. Ziel war die nähere Untersuchung des Kometen Borrelly nach einem Vorbeiflug am Asteroiden Braille. An Bord befanden sich verschiedene raumfahrttechnische Experimente, die in der Praxis getestet wurden, unter anderem ein mit Sonnenenergie gespeister Ionenantrieb. Die Sonde war mit einer Kamera und

Übersicht über die Missionen, von denen Daten im Bestand der RPIF vorhanden sind

<i>Planet</i>	<i>Mission</i>
<i>Merkur</i>	<i>Mariner 10, MESSENGER</i>
<i>Venus</i>	<i>Mariner 10, Pioneer Venus, Venera 15 & 16, Galileo, Magellan, Venus Express, MESSENGER</i>
<i>Erde</i>	<i>Galileo, SIR-C/X-SAR, Topex/Poseidon, Jason-1, Clementine, Kiosat, SRTM, TERRA, Space Shuttle</i>
<i>Mond</i>	<i>Lunar Orbiter 1-5, Apollo, Galileo, Clementine, Lunar Prospector, Cassini, SMART 1</i>
<i>Mars</i>	<i>Mariner 9, Viking Orbiter 1 & 2, Viking Lander 1 & 2, Mars Phobos, Mars Pathfinder, Mars Global Surveyor, 2001 Mars Odyssey, Mars Exploration Rover 1 & 2, Mars Express, Mars Reconnaissance Orbiter, Phoenix</i>
<i>Asteroiden</i>	<i>Galileo, NEAR, Cassini, Deep Space 1</i>
<i>Jupiter</i>	<i>Voyager 1 & 2, Galileo, Cassini</i>
<i>Saturn</i>	<i>Pioneer 11, Voyager 1 & 2, Cassini-Huygens</i>
<i>Uranus</i>	<i>Voyager 2</i>
<i>Neptun</i>	<i>Voyager 2</i>
<i>Komet</i>	<i>Galileo, Hubble Space Telescope, Shoemaker-Levy 9</i>
<i>Komet Hale-Bopp</i>	<i>Daten verschiedener Observatorien</i>
<i>Kometen</i>	<i>Deep Space 1, Stardust, Hubble Space Telescope</i>

einem Plasmaspektrometer ausgestattet, mit denen während der nominalen Mission die Plasmaumgebung der Sonde sowie die Oberfläche des Asteroiden bzw. Kometen untersucht wurden.

Im Rahmen der Mars Pathfinder-Mission war das Institut an der wissenschaftlichen Auswertung der Bilddaten des Rovers beteiligt. So wurden die an der Landestelle des Rovers aufgenommenen stereoskopischen Aufnahmen zu photogrammetrischen Produkten verarbeitet und die Bilddaten multispektral analysiert.

Seit Juli 2004 erkundet die Mission Cassini den Planeten Saturn, sein Ringsystem, seine Magnetosphäre und die Monde. 1997 gestartet, hat die Sonde nach mehreren Swing-by-Manövern sieben Jahre später den Planeten erreicht und wird ihn bis Ende 2012 mindestens 134-mal umkreisen. Mit an Bord war die europäische Atmosphären- und Landesonde Huygens, mit der die Atmosphäre und Oberfläche des Saturnmondes Titan erkundet wurde. Die nahen Vorbeiflüge an den Eismonden haben bereits spektakuläre Ergebnisse gebracht. Das Ringsystem wurde zweimal in einer Lücke durchflogen und der wolkenverhüllte Titan mit sämtlichen Fernerkundungsinstrumenten untersucht. Das DLR ist an mehreren Experimenten der Mission Cassini beteiligt, insbesondere am Spektrometer für das sichtbare Licht und das Infrarot (VIMS). Außerdem bestehen unmittelbare Beteiligungen am Cosmic Dust Analyzer und am Ultraviolett-Spektrometer sowie am Kameraexperiment ISS.

Die am 2. Juni 2003 gestartete europäische Mission Mars Express besteht aus einem Orbiter und einem britischem Landemodul, dessen Aufsetzen auf der Oberfläche des Mars jedoch misslang. Diese Mission wurde nach dem Misserfolg der russischen Mars 96-Mission von der europäischen Weltraumorganisation ESA geplant, um einen Teil der für diese Mission entwickelten Ersatzinstrumente zu nutzen und die gesetzten wissenschaftliche Ziele zu erreichen. So wird das zweite Flugmodell der am Institut ursprünglich für die russische Mars

Weiterführende WWW-Adressen

Planetary Science World Wide Web Sites
<http://www.lpi.usra.edu/library/website.html>

Planetary Photojournal
<http://photojournal.jpl.nasa.gov>

Windows to the Universe
<http://www.windows.ucar.edu/>

Views of the Solar System
<http://www.solarviews.com/germ/homepage.htm>

Nine Planets
<http://www.nineplanets.org/>

Nine Planets (in deutsch)
<http://www.neunplaneten.de/nineplanets/>

Jet Propulsion Laboratory
<http://www.jpl.nasa.gov>

Archiv der Raumfahrtmissionen
<http://www.dlr.de/arm>

96-Mission entwickelten High Resolution Stereo Camera (HRSC) eingesetzt, um damit die bedeutende Aufgabe der vollständigen Kartierung des Mars in hoher Auflösung, in Farbe und in „3D“ fortzuführen. Die einzigartigen Fähigkeiten dieser Kamera werden seit Anfang 2004 erfolgreich unter Beweis gestellt.

Die europäische Mission Rosetta ist nach Verschiebung des für Januar 2003 geplanten Starts seit dem 2. März 2004 zum Kometen 67/P Churyumov-Gerasimenko unterwegs. Ursprünglich sollte die Mission den Kometen Wirtanen erkunden, was jedoch aufgrund der Startverschiebung nicht mehr möglich war. Nun

wird Rosetta im Jahre 2014 in einen Orbit um den Kometen Churyumov-Gerasimenko eintreten und nach mehrmonatiger Erkundung des Kerns den Lander Philae absetzen. Das Institut ist an verschiedenen Experimenten der Mission beteiligt. Die Hauptbeteiligungen sind das Spektrometer VIRTIS auf dem Orbiter sowie die Kamera ROLIS, der Temperatursensor MUPUS und das Sensorenpaket SESAME zur Untersuchung der Bodeneigenschaften auf dem Lander.

Mit Dawn startete am 27. September 2007 eine Mission zu zwei sehr unterschiedlichen Objekten: dem Asteroiden 4 Vesta und dem Zwergplaneten 1 Ceres. Die Kamera an Bord der Sonde wurde auf der Basis der bereits für Mars Express und Rosetta eingesetzten Kameras am Institut zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung entwickelt und liefert Aufnahmen in sieben Farben von Vesta und in drei Farben von Ceres. Mit an Bord ist mit einem italienischen Spektrometer ein weiteres europäisches Instrument. Mitte 2011 soll die Sonde bei Vesta ankommen und neun Monate den Asteroiden untersuchen. Nach weiteren drei Jahren Flug wird der Zwergplanet Ceres für ein knappes Jahr das Untersuchungsziel sein.

Seit 2005 rücken die Planeten, die sich innerhalb der Erdumlaufbahn befinden, wieder verstärkt in den Blickpunkt der Forschung. Nach der 2004 gestarteten NASA-Mission

MESSENGER zum Merkur hat die europäische Weltraumorganisation ESA mit dem Start von Venus Express am 9. November 2005 die Erkundung des inneren Sonnensystems auf den etwa gleichgroßen Schwesterplaneten der Erde ausgedehnt. Die Sonde basiert auf dem Design des Mars Express-Orbiters. Zudem wurden einige Ersatzmodelle von Instrumenten der Missionen Mars Express und Rosetta für dieses Projekt angepasst. Das DLR-Institut für Planetenforschung ist mit einer Kamera zur Erkundung der dichten Atmosphäre beteiligt sowie am Spektrometer-Experiment. Am 11. April 2006 trat Venus Express in den Orbit um den Planeten ein und wird ihn noch bis mindestens Ende 2009 umrunden.

Schließlich soll in Ergänzung zum aktuellen amerikanischen Merkurorbiter MESSENGER mit der europäischen BepiColombo-Mission die Kartierung und Erforschung des Merkur entscheidend vorangebracht werden. Die Mission besteht aus zwei Komponenten, die als einzelne Raumfahrzeuge den Planeten umkreisen werden. Der von der ESA gebaute Mercury Planetary Orbiter (MPO) soll die Oberfläche erkunden, während der von der Japanischen Raumfahrtagentur (JAXA) gebaute Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO) das Magnetfeld und seine Wechselwirkung mit dem Sonnenwind erforschen soll. Das DLR-Institut für Planetenforschung wird federführend an einem Laser-Höhenmesser auf dem MPO beteiligt sein, das die Höhenunterschiede auf dem Planeten in hoher Genauigkeit erfassen soll. Das Raumschiff soll im August 2013 starten und nach sechs Jahren Flug den Merkur im August 2019 erreichen. Für das Jahr 2017 ist eine gemeinsame europäisch-amerikanische Orbitermission ins Jupitersystem geplant, der Jupiter System Observer.

Anfragen sind zu richten an:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Planetenforschung
RPIF
Rutherfordstraße 2
12489 Berlin
Telefon: (030) 67 055 333
Telefax: (030) 67 055 372
E-Mail: rpif@dlr.de
<http://www.dlr.de/RPIF/>