

Unser Sonnensystem

**Kurzer Überblick über die Körper
unseres Sonnensystems und deren
Erkundung mit Raumsonden**

zusammengestellt von
Susanne Pieth und Ulrich Köhler

3., erweiterte Auflage



UNSER SONNENSYSTEM

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

zusammengestellt von
Susanne Pieth und Ulrich Köhler

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

2013, 3., erweiterte Auflage

INHALT

3	Geleitwort
5	Exploration des Sonnensystems mit Raumsonden
10	Sonnensystem und vergleichende Planetologie
14	Sonne
17	Merkur
21	Venus
25	Erde-Mond-System
37	Mars
42	Asteroiden
48	Jupiter
53	Saturn
60	Uranus
64	Neptun
68	Kometen
72	Zwergplaneten
76	Kuipergürtel
79	Planetenentstehung und Leben

Anhang

84	Übersicht über die Missionen im Sonnensystem
97	Wie komme ich an Bilddaten?

Die Texte entstanden unter Mitwirkung von Dr. Manfred Gaida, Prof. Dr. Alan Harris, Ernst Hauber, Dr. Jörn Helbert, Prof. Dr. Harald Hiesinger, Dr. Hauke Hußmann, Prof. Dr. Ralf Jaumann, Dr. Ekkehard Kührt, Dr. René Laufer, Dr. Stefano Mottola, Prof. Dr. Jürgen Oberst, Dr. Frank Sohl, Prof. Dr. Tilman Spohn, Dr. Katrin Stephan, Dr. Daniela Tirsch und Dr. Roland Wagner.

GELEITWORT

Eine Reise durch das Sonnensystem

Im Jahr 2009 wurde das Internationale Jahr der Astronomie begangen. Der Anlass dazu war, 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 die ersten beiden von drei Gesetzen, 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.

1959 gelang es der Menschheit zum ersten Mal, mit einer Raumsonde das Schwerefeld 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 10 Jahre später 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. Nach wie vor ist die Erde der einzige Ort im Universum, von dem wir wissen, dass er Leben beherbergt. Und nicht zuletzt erkannten wir, dass dieser „Blaue Planet“ fragil ist, geschützt werden muss und das beste aller denkbaren Raumschiffe ist.

Tatsächlich werden aber mit jedem gelösten Rätsel neue Fragen aufgeworfen. Wie entstand das Leben auf der Erde? Kommt es von einem anderen Himmelskörper oder 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?

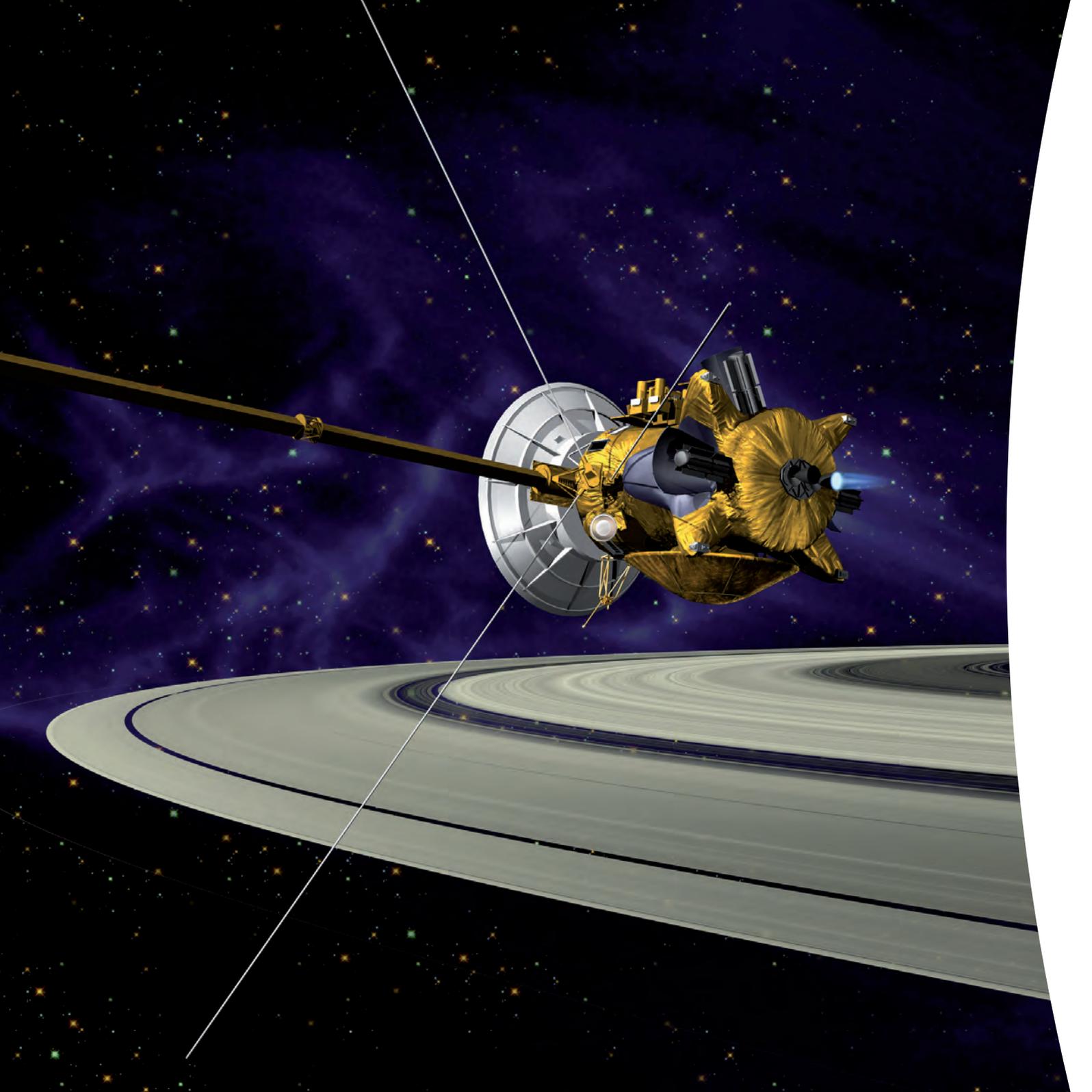
Wie keine andere Wissenschaft werden Astronomie und Planetenforschung erst durch Bilder begreifbar. Die Fotos, die von Raumsonden seit über 50 Jahren zur Erde gefunkt werden, eröffneten uns neue Welten, neue Perspektiven, neue Erkenntnisse. Die Planetologie, eine vergleichsweise junge Wissenschaft, ist 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 gerne 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, ESA und anderer Raumfahrtorganisationen archiviert und der Öffentlichkeit zugänglich macht. Das kleine Werk „Unser Sonnensystem“, nun schon in dritter Auflage, 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!

Eine spannende Lesezeit wünscht Ihnen

Ralf Jaumann

Prof. Dr. Ralf Jaumann lehrt Planetengeologie an der Freien Universität Berlin. Er ist Leiter der Abteilung Planetengeologie des DLR-Instituts für Planetenforschung und Direktor der NASA/DLR Regional Planetary Image Facility am DLR-Institut für Planetenforschung.



EXPLORATION DES SONNENSYSTEMS MIT RAUMSONDEN

Mit dem Start von Sputnik 1 durch die Sowjetunion am 4. Oktober 1957 begann das Raumfahrtzeitalter. Schon kurz darauf gelang es der ehemaligen UdSSR und den USA, Raumsonden zum Mond so wie zur Venus und zum Mars zu schicken, den beiden Nachbarplaneten der Erde. Bereits in den 1970er-Jahren wurden weiter entfernte Planeten angesteuert, später beteiligten sich auch andere Nationen an der Erforschung der Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen des Sonnensystems, der Sonne selbst und an der Untersuchung des interplanetaren Raums und der kosmischen Umgebung. 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 wie 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.

Für die planetare Fernerkundung werden neben Sensoren im sichtbaren Licht, die in verschiedenen Kamerasystemen zum Einsatz kommen, auch Detektoren in vielen weiteren Teilen des elektromagnetischen Frequenzspektrums für Spektrometer 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.

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

Bild: Start von Rosetta an Bord einer Ariane 5-Rakete am 2. März 2004 von Kourou. (© ESA/CNES/ARIANE-SPACE-Service Optique CSG, 2004)

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

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 des 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.

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. Das Apollo-Programm brachte der Raumfahrt einen enormen Schub, war aber auch für die Planetenforschung von großer Bedeutung. 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. Die lange Zeit einzigen Vorbeiflüge an Merkur unter erstmaliger Ausnutzung der Swing-by-Technik fanden mit Mariner 10 von 1973 bis 1975 statt. Daneben wurden weiteren Missionen zur Venus und zum Mars

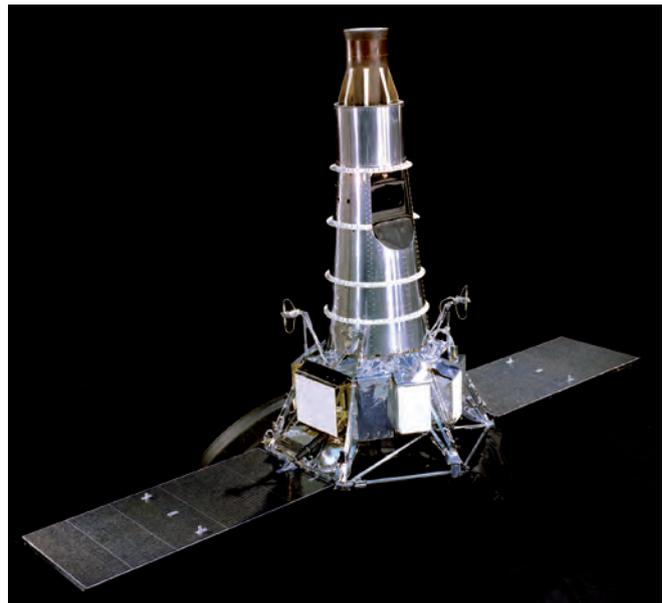


Bild: Ranger 7, gestartet am 28. Juli 1964, war die erste erfolgreiche Mission der Ranger-Serie zum Mond. Bis zum Aufschlag im Mare Nubium wurden über 4000 Bilder zur Erde übertragen. (© NASA)



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 aufnehmen 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.

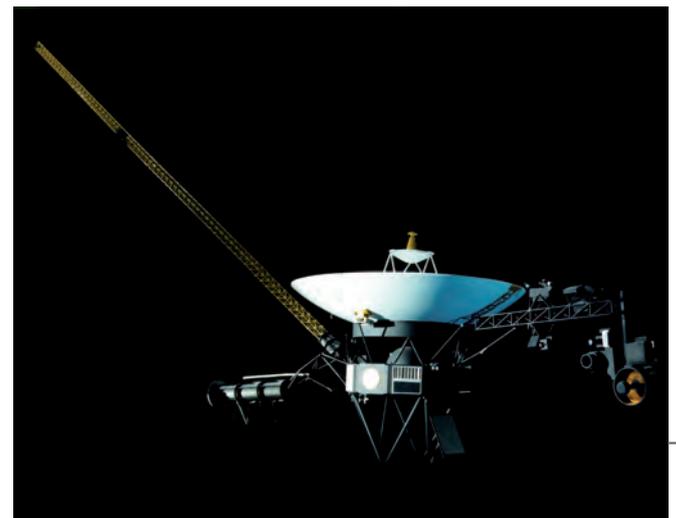
Ähnliche Bedeutung erlangte das Voyager-Programm. Die beiden baugleichen Voyager-Sonden starteten 1977 zu ihrer Erkundungsmission des äußeren Sonnensystems. Zwischen 1979 und 1989 absolvierte Voyager 2 seine berühmte „Grand Tour“ mit Vorbeiflügen an den Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun und ihren jeweiligen Monden. Die beiden Voyager-Sonden befinden sich in etwa 20 Milliarden Kilometer Entfernung an der Grenze zum interstellaren Raum

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

Bild rechts: Sonde Voyager. (© NASA)

und senden noch heute Signale zur Erde. Das gewonnene Bildmaterial 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 ermöglichten; 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.



Aktuelle und zukünftige Missionen

Um die Jahrtausendwende herum sind im Wesentlichen zwei Schwerpunkte sichtbar geworden und markieren damit den Beginn der jüngsten, aktuellen Phase in der internationalen Planetenforschung: die intensive und langfristige Erkundung des Mars und die Erforschung der kleinen Körper des Sonnensystems. Die weitere Erforschung des Mondes, seine zukünftige Nutzung und eine mögliche Rückkehr mit Menschen zum Erdtrabanten wird insbesondere von den aufstrebenden asiatischen Raumfahrtationen verfolgt. Auch Ziele, die bereits einige Zeit oder bisher völlig unerforscht waren, rücken in den Vordergrund. Dazu zählen Merkur, der Zwergplanet Ceres, der große Asteroid 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 dürften alle zwei Jahre Sonden zu unserem äußeren Nachbarplaneten, dem Mars, geschickt werden. Nach dem Scheitern des Mars Surveyor-’98 Programms mit der Landung am Mars-Südpol und einem Orbiter für die Untersuchung der Marsatmosphäre hatte die NASA mit drei weiteren Orbitern großen Erfolg, der mit der Landung der beiden Mars Exploration Rover, Spirit und Opportunity im Jahre 2004, gekrönt wurde. Die aktuelle Explorationsstrategie für die Erforschung des Mars wurde mit dem Schlagwort „follow the water“ überschrieben, womit zum Ausdruck gebracht werden soll, dass der Suche nach den Spuren von Wasser auf dem Mars und damit auch der Frage, ob es auf dem Mars einst lebensfreundliche Umweltbedingungen gab, eine Priorität eingeräumt wird. Fernziel ist dabei – möglicherweise in einer gemeinschaftlich mit Europa durchgeführten Mission – das Sammeln von Proben und deren Transport zur Erde, später ist auch eine bemannte Landung auf dem Roten Planeten nicht ausgeschlossen. Europas Beitrag ist dabei die sehr erfolgreiche Mars Express-Mission, die seit Ende 2003 eine Fülle von Daten und Bildern vom Mars sendet.

Mit der Ankunft des Rovers Curiosity auf der Mars Science Laboratory-Mission am 5. August 2012 erreichte die Marsforschung eine neue Qualität. Das 900 Kilogramm schwere Fahrzeug verfügt gegenüber seinen Vorläufern über eine deutlich gesteigerte Mobilität und führt 95 Kilogramm Nutzlast für zehn Experimente mit sich. Ziel der Mission ist die Suche nach möglichen Habitaten für Organismen auf dem Mars, von Kohlenwasserstoffverbindungen und der für die Entstehung und Entwicklung von Leben notwendigen chemischen Elemente. Mit ihrer nächsten Marssonde MAVEN wird die NASA ab 2014 die obere Marsatmosphäre untersuchen. Zwei Jahre später folgt mit der Mission InSight wieder eine Landung auf dem Mars, die sich insbesondere der Messung physikalischer Parameter widmen soll und dazu mit einem in Deutschland entwickelten Bohrer ausgerüstet ist. Die Europäische Weltraumorganisation ESA plant mit dem Projekt ExoMars gegen Ende des Jahrzehnt zunächst einen Orbiter und dann ein Landegerät zum Mars zu bringen.

Die europäische Technologie-Testsonde SMART-1, die zwischen November 2004 und Mitte 2006 den Mond umrundete und ihre Mission mit einem gezielten Einschlag auf der Mondoberfläche beendet hat, stellte gewissermaßen nur der Auftakt zu einer intensiven Erforschung unseres Erdtrabanten dar. Innerhalb kurzer Zeit folgten Mondmissionen aus Japan, Indien und China. Die USA verbesserten die Datengrundlage für die Kartierung des Mondes mit dem Lunar Reconnaissance-Orbiter deutlich. Der Mond wird bei einigen der raumfahrenden Nationen und Agenturen auch weiterhin einen hohen Stellenwert haben, da er ein leicht zu erreichender Himmelskörper ist und auch wissenschaftlich nach wie vor ein lohnendes Ziel darstellt. Für die Planetenforschung ist hier vor allem eine bessere Kenntnis der Mondrückseite von Interesse, so wie das Sammeln von Gesteinsproben an bisher nicht erforschten Stellen. Fortschrittliche Roboter könnten bei Missionen mit automatisierter Probennahme zum Einsatz kommen. Aber auch eine Rückkehr des Menschen zum Mond erscheint in den nächsten Jahrzehnten denkbar.

Innerhalb der Erdbahn umkreist die europäische Sonde Venus Express seit April 2006 unseren Nachbarplaneten. Seit 2011 befindet sich MESSENGER, eine 2004 gestartete Mission des Discovery-Programms der NASA, in einer Umlaufbahn um dem Merkur und ermöglichte erstmals eine globale Charakterisierung und Bildaufnahme des innersten Planeten. Im August 2015 wird ihr die europäische-japanische Mission BepiColombo folgen, die mindestens ein Jahr lang den Merkur erforschen wird.

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. Auch die japanische Sonde Hayabusa kehrte 2010 trotz zahlreicher technischer Probleme mit Probenmaterial vom Asteroiden Itokawa zur Erde zurück. Ende des Jahres 2014 wird Japan mit der Nachfolgemission Hayabusa-2 versuchen, den Asteroiden 1999 JU₃ zu erreichen, auf dem 2019 Proben entnommen und 2020 zur Erde gebracht werden sollen. Immer stärker in den Vordergrund rückt die Erforschung erdbahnkreuzender Asteroiden und ihrer mögliche Ablenkung im Falle eines Kollisionskurses mit der Erde. Die Europäische Union und die ESA fördern hier umfangreiche Untersuchungen, die möglicherweise im kommenden Jahrzehnt in einer ersten Testmission zur Ablenkung eines Asteroiden von seiner Bahn münden werden.

Ein großer Erfolg war bislang der Verlauf der 2007 gestarteten NASA-Mission Dawn. Sie erreichte 2011 den Asteroiden Vesta und erforschte ihn aus drei unterschiedlichen Umlaufbahnen, ehe sie im August 2012 zum Zwergplaneten Ceres weiterflog. Es ist die erste Mission, die jenseits der Erde an zwei unterschiedlichen Körpern des Sonnensystems in eine Umlaufbahn gelenkt wird.

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. Auch die OSIRIS-REx-Mission der NASA soll noch vor Ende des Jahrzehnts den Asteroiden 1999 RQ₃₆ (Bennu) erreichen, um ihn zunächst aus einer Umlaufbahn zu charakterisieren und anschließend auf seiner Oberfläche eine Probe zu entnehmen und diese zur Erde zu bringen.

Im äußeren Sonnensystem ist die Mission Cassini-Huygens als eines der letzten großen Projekte zur Erkundung des Saturnsystems seit ihrer Ankunft im Sommer 2004 ein weiterer Brennpunkt in der Planetenforschung. Sie liefert 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.

Die Erforschung des Jupiter bildet im kommenden Jahrzehnt einen Schwerpunkt der europäischen Raumfahrt, wenn 2022 die große Mission JUICE – Jupiter Icy Moon Explorer – gestartet werden wird. Sie soll 2030 an ihrem Ziel ankommen und Jupiter und seine Eismonde untersuchen. Mit Spannung erwartet wird 2015 der Vorbeiflug der im Januar 2006 gestartete Mission New Horizons am Pluto.

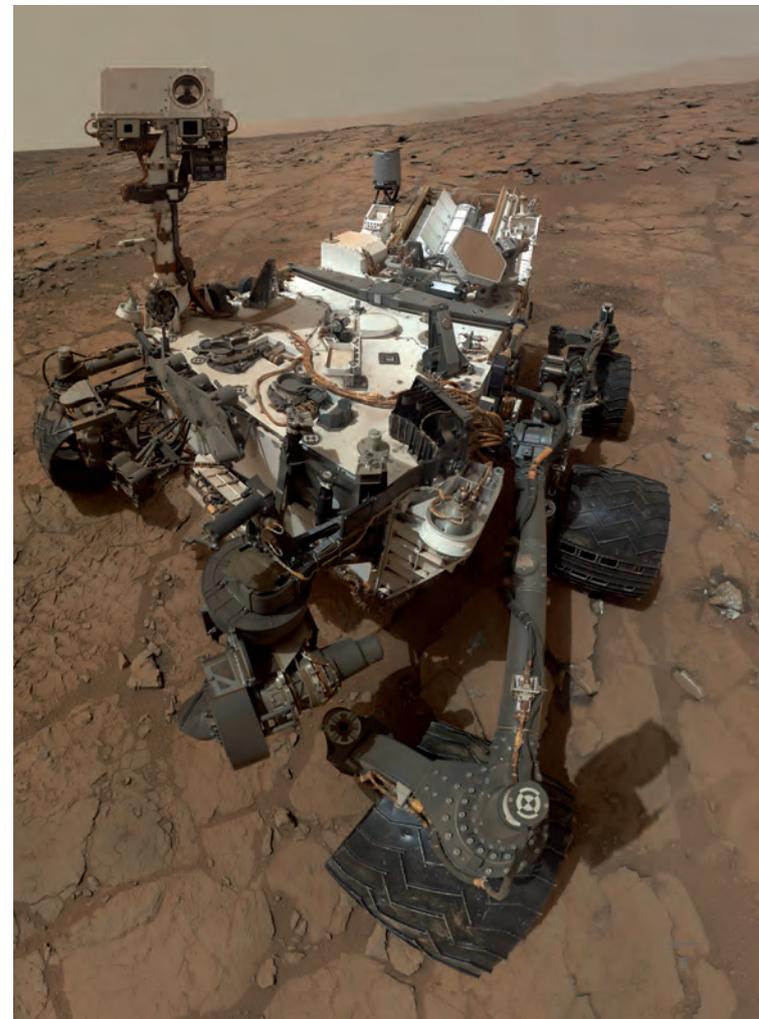


Bild: Selbstporträt des Marsrovers Curiosity im Krater Gale. (© NASA/JPL-Caltech/MSSS)

SONNENSYSTEM UND VERGLEICHENDE PLANETOLOGIE

Das Sonnensystem, in dem wir leben, ist nur eines von vielen im Weltall. Bis heute sind bald tausend Planeten um andere Sterne bekannt. Wir dürfen davon ausgehen, dass in den kommenden Jahren noch weitere, andere Planetensysteme entdeckt werden. Von den acht Planeten, die um die Sonne kreisen, wissen wir nur von der Erde mit Sicherheit, dass dort Leben entstanden ist. Die Untersuchung von Mikroorganismen, die unter extremen Bedingungen auf der Erde leben, lässt allerdings vermuten, dass Leben auch auf anderen Planeten und Monden des Sonnensystems möglich wäre. Erst seit dem Zeitalter des Kambrium, das vor etwa 570 Millionen Jahren begann, hat sich auf der Erde das Leben in ungeheurer Vielfalt entwickelt. Seit gut 50 Jahren wagt sich der Mensch ins All vor, anfangs mit robotischen Raumsonden, um Planeten und deren Monde vor Ort zu erkunden – später auch mit bemannten Raumschiffen in den erdnahen Orbit und zum Mond. Die Perspektive auf die Erde von außen ermöglichte zum einen völlig neue Forschungsaspekte und öffnete dem Menschen auch die Perspektive auf seinen Heimatplaneten aus einer gewissen Distanz.

Bereits in der Antike beobachteten die Astronomen Lichtpunkte, die sich vor dem Hintergrund des „fixen“, unveränderlichen Sternenhimmels bewegten. Sie nannten diese Objekte Planeten, was soviel wie „Wanderer“ bedeutet. Später gaben sie den einzelnen, mit dem bloßen Auge sichtbaren Wandelsternen die noch heute gebräuchlichen Namen römischer Gottheiten: Jupiter – der Göttervater, Mars – der Kriegsgott, Merkur – der göttliche Bote, Venus – die Göttin der Liebe und Schönheit sowie Saturn – der Jupiters Vater und zugleich Gott der Landwirtschaft und der Zeit.

Zu unserem Sonnensystem gehören viele unterschiedliche Körper, die von Ansammlungen aus Staub und gefrorenem Wasser über die erdähnlichen Planeten mit fester Oberfläche 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 nahezu kreisförmigen Umlaufbahnen liegen fast in der gleichen Ebene, der Ekliptik. Die Ekliptik ist die Bahnebene, in der die Erde die Sonne umläuft, zugleich fällt sie mit der Äquatorebene der Sonne zusammen. Die Rotationsachsen der Planeten weichen meist nur spitzwinklig vom Lot auf diese Ebene ab. Ausnahmen bilden Uranus und Pluto. Der Zwergplanet Pluto ist so weit von der Sonne entfernt, dass eine Umrundung der Sonne 248 Jahre dauert. Merkur, der innerste Planet, benötigt dafür nur 88 Tage. Die kleineren, unregelmäßig geformten Körper des Sonnensystems haben häufig ellipti-

sche Bahnen. Viele Kometen bewegen sich beispielsweise auf elliptischen bis hyperbolischen Bahnen, die sie bis an den Rand des Sonnensystems führen oder gar darüber hinaus. So nähert sich der Komet Halley etwa alle 76 Jahre auf einer langgestreckten, elliptischen Bahn dem inneren Sonnensystem. Wenn die Erde auf ihrer jährlichen Reise um die Sonne in Bereiche gelangt, in denen ein Komet aus seinem Schweif winzige Staub- und Gesteinspartikel hinterlassen hat, treten in der Erdatmosphäre periodische Meteorschauer auf, die mitunter sehr spektakulär sind.

In Abhängigkeit von der Entfernung zur Sonne zeigt sich ein deutlicher Trend in der jeweiligen Masse und Zusammensetzung der einzelnen Planeten. Die erdähnlichen oder ‚terrestrischen‘ Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mond* und Mars) im inneren Sonnensystem haben eine vergleichsweise geringe Masse, aber eine hohe Dichte und bestehen vor allem aus silikatischen Gesteinen und Eisen. Die großen Planeten des äußeren Sonnensystems – die Gasriesen Jupiter und Saturn, sowie die Eisriesen Uranus und Neptun – haben im Gegensatz dazu bei kleinerer Dichte eine viel größere Masse und bestehen vorwiegend aus Gasen (hauptsächlich Wasserstoff und Helium); sie haben Monde, die zumeist zu großen Teilen aus Eis bestehen. Diese Substanzen – Wasser, Methan, Ammoniak und Stickstoff – kondensieren bei niedrigen Temperaturen, Wasserstoff und Helium dagegen bleiben unter fast allen natürlichen Bedingungen gasförmig. In ihrem tiefen Inneren haben jedoch auch die Gasplaneten einen Kern aus dichterem Material, vermutlich aus Silikaten und Metallen.

Die Planeten unseres Sonnensystems haben zusammen über 170 bekannte Monde. Sie weisen dabei sehr unterschiedliche Größen auf, von kleinen Gesteins- und Eisbrocken bis hin zu Monden, die größer sind als der Erdmond. Viele Monde wurden erst mit Hilfe von Raumsonden entdeckt. Nur einer von ihnen, der Saturnmond Titan, besitzt eine dichte Atmosphäre, und nur die Jupitermonde Europa, Ganymed und Callisto haben Magnetfelder, wobei die Felder von Europa und Callisto durch das Magnetfeld des Jupiter induziert werden, während Ganymeds Feld wie das der Erde tief im Inneren

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

Bild rechte Seite: Künstlerische Darstellung unseres Sonnensystems; Größen und Abstände sind nicht maßstabsgerecht abgebildet. (© NASA/JPL)

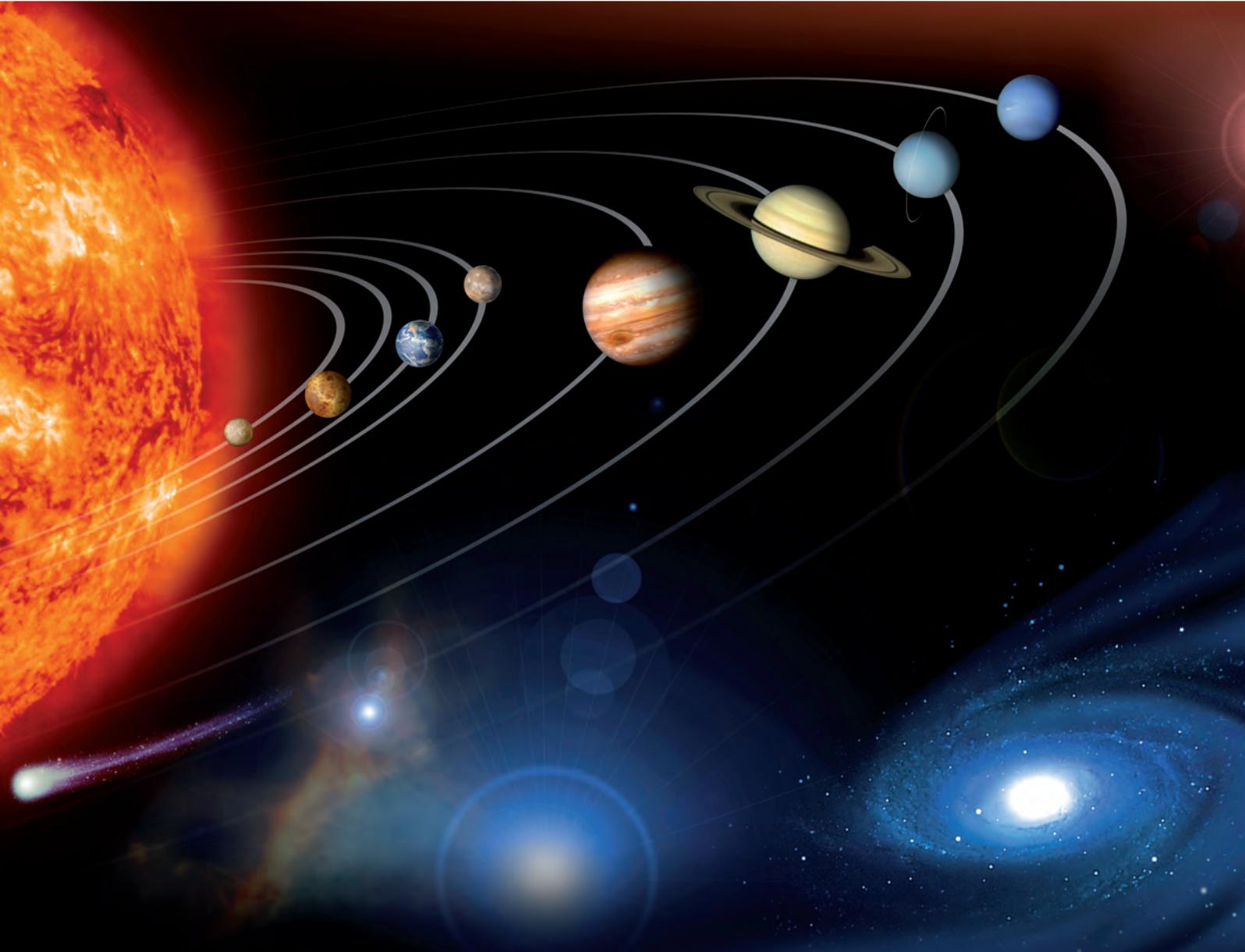
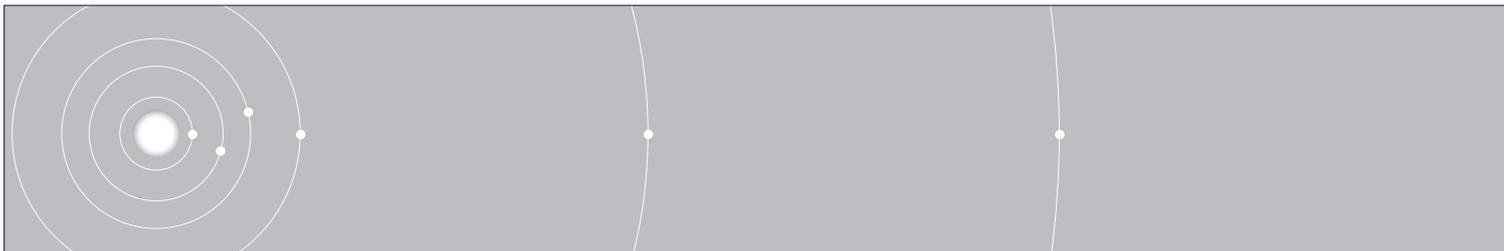




Bild oben: Monde in unserem Sonnensystem.
(© NASA)

Bild unten: Maßstäbliche Entfernungen im Sonnensystem unabhängig von der Planetengröße. (© DLR)



dieser Körper erzeugt wird. Der Jupitermond Io ist der geologisch aktivste Körper im ganzen Sonnensystem, was sich in einem extremen, schwefelreichen Vulkanismus äußert. Unter den gefrorenen Krusten der Jupitermonde Europa, Ganymed und Callisto vermutet man Ozeane, und Bilder von Ganymed, vor allem aber von Europa zeugen von Bewegungen der Eiskruste, die durch diese vermuteten, unter dem Eis verborgenen Ozeane verursacht worden sein könnten. Bei anderen Monden wie den beiden Marsmonden Phobos und Deimos handelt es sich vielleicht um Asteroiden, die von der Anziehungskraft des Planeten eingefangen wurden, oder wie im Falle des Saturnmondes Phoebe um einen Körper aus den fernen Zonen des äußeren Sonnensystems, der durch die Schwerkraft des Saturn auf eine Bahn um den Planeten gelenkt wurde.

Aktuelle Theorien zur Entstehung unseres Sonnensystems basieren alle auf der allgemein akzeptierten und erstmals von Immanuel Kant und Pierre Laplace im 18. Jahrhundert formulierten Vorstellung, dass die Sonne und die Planeten vor 4,6 Milliarden Jahren innerhalb von wenigen zehn Millionen Jahren aus einem protostellaren Nebel entstanden. Dieser Nebel entwickelte sich durch den Kollaps einer interstellaren Staubwolke. Dabei bildeten sich

vermutlich erst die Riesenplaneten Jupiter und Saturn, die danach – so eine jüngere Vermutung – zunächst nach innen und dann wieder nach außen wanderten. Diese Wanderbewegung ist auf die Wech-

selwirkung der beiden Riesenplaneten mit dem Restnebel zurückzuführen. Dabei verlangt die Auswärtsbewegung eine feste Konstellation zwischen beiden. Durch die Auswärtsbewegung wurde das innere Sonnensystem ‚freigeräumt‘, so dass sich dort dann die kleinen erdähnlichen Planeten bilden konnten. In den meisten bisher entdeckten anderen Planetensystemen sind die Riesenplaneten (noch?) nicht wieder nach außen gewandert. Welche Auswirkungen dies auf die Chance für eine ‚zweite‘ Erde in solchen Sternensystemen hat, muss noch untersucht werden.

Das Zusammenballen, die Akkretion eines Planeten verläuft wie eine Kaskade. Nach der Kondensation fester Teilchen bilden sich Klumpen, die dann aufeinanderstoßen und sich miteinander verbinden können. Das restliche Gas der protoplanetaren Scheibe wird von den größten der so entstandenen Kerne angezogen und bildete die Gasplaneten. Die inneren vier terrestrischen Planeten entstanden durch den Prozess der Akkretion in einer Region, in der aufgrund der höheren Temperatur Eispartikel nicht lange vorkamen.

Aktuelle Theorien sagen aber auch, dass die Entstehung von Planetensystemen an sich nicht einzigartig oder besonders bemerkenswert ist. Ähnliche Bedingungen finden wir ebenso auch bei Sternen, die gerade ihren Entstehungsprozess durchlaufen. Aufbau und Struktur der jeweiligen Planetensysteme können aber sehr verschieden sein und von den lokalen Bedingungen am Ort des jeweiligen Sterns in seiner Galaxie abhängen.

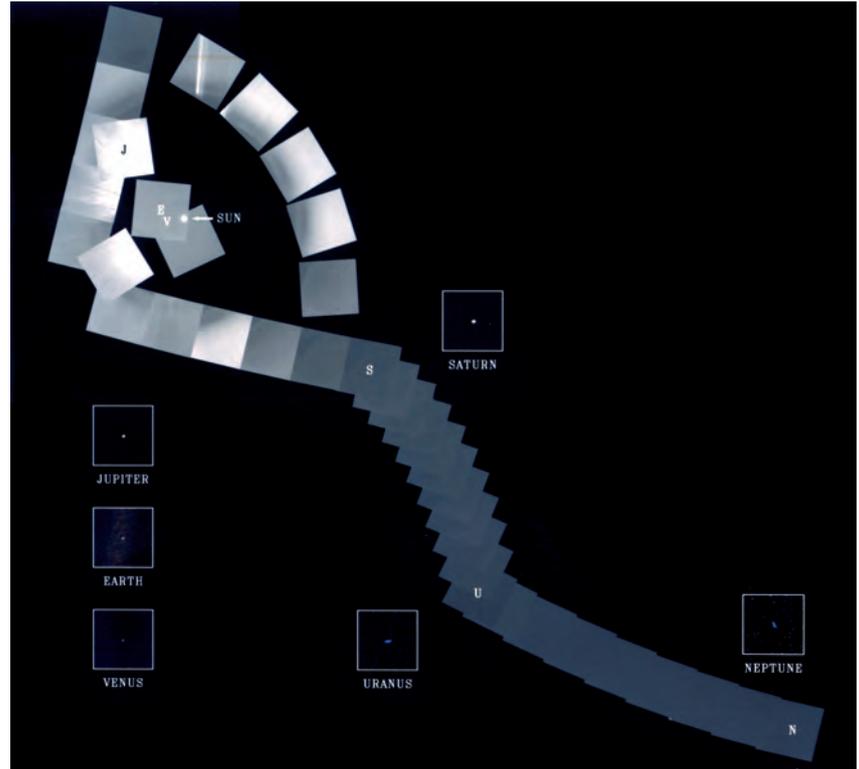


Bild: Blick der Voyagersonden zurück auf unser Sonnensystem. (© NASA/JPL)

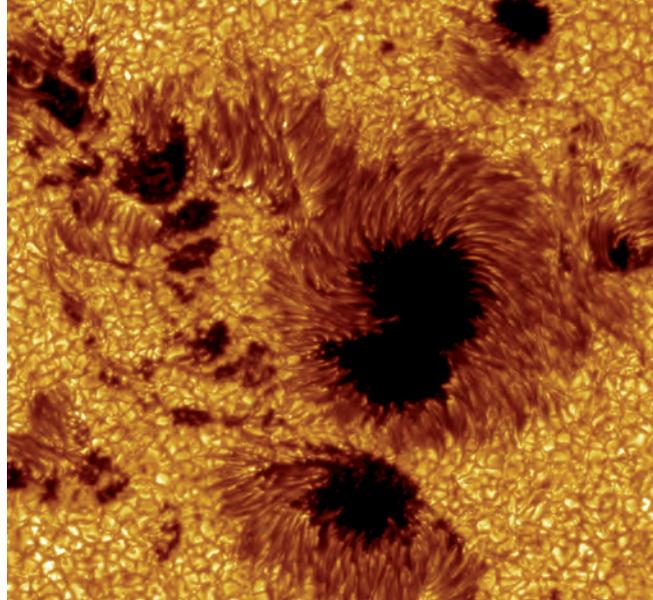
DIE SONNE – QUELLE DER ENERGIE

Seit Urzeiten hat der Mensch die Sonne als Gottheit, als Lebensquell, als Quelle des Lichtes und der Kraft verehrt. Alle Kulturen haben ihr in zahlreichen Mythen, Gemälden, Gedichten und Gesängen einen besonderen Platz eingeräumt. Nüchtern betrachtet ist die Sonne unser nächster Fixstern in einer Entfernung von rund 150 Millionen Kilometern¹ und der einzige Stern, dessen Oberfläche wir intensiv detailliert studieren können. Anders als bei fernen Sternen können wir die Wirkung der Sonne auf uns und die uns umgebende Natur unmittelbar erfahren. Die Sonne war und ist letztendlich die Energiequelle für die meisten physikalischen, chemischen und nahezu alle biologischen Prozesse im Sonnensystem.

Dabei ist die Sonne für die Astronomen ein ganz normaler Stern vom Spektraltyp G2 V, der vor nicht ganz fünf Milliarden Jahren inmitten einer dichten interstellaren Wolke aus Gas und Staub „ins Leben“ trat und zu leuchten begann. Die Sonne hat einen Durchmesser von knapp 1,4 Millionen Kilometern und eine Masse von fast 2×10^{33} Gramm, ihre mittlere Dichte liegt entsprechend bei $1,41 \text{ g/cm}^3$. Über 330.000 Erdkugeln bräuchten wir, um sie aufzuwiegen. Das Schwerfeld, das von dieser gewaltigen Zentralmasse ausgeht, prägt allen Planeten, Asteroiden und Kometen ihre individuell geformten Umlaufbahnen und deren Neigung gegenüber dem Sonnenäquator auf. Bei totalen Sonnenfinsternissen können wir sogar anhand von Sternpositionen die Krümmung des Raumes beobachten, die die Sonne in ihrer Umgebung hervorruft und die von Albert Einstein (1879-1955) bereits 1916 im Rahmen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt wurde.

Genauso wichtig wie die Masse ist aber auch die chemische Zusammensetzung der Sonne, die zu 73% aus Wasserstoff, zu 25% aus Helium

1. Die Astronomen nennen diese Distanz eine Astronomische Einheit, kurz AE.
2. Joseph von Fraunhofer (1787-1826) beobachtete 1814 als erster schwarze Linien im Spektrum des Sonnenlichtes, die sich ein paar Jahrzehnte später durch die Arbeiten von Gustav Robert Kirchhoff (1824-87) und Robert Wilhelm Bunsen (1811-99) als die Fingerabdrücke der chemischen Elemente herausstellten. Kurioserweise wurde in diesen Geburtsjahren der modernen Astrophysik das Element Helium, das nach der Sonne, gr. *helios*, benannt wurde, im Sonnenspektrum früher entdeckt als auf der Erde – und das gewissermaßen rein zufällig von Sir Joseph Norman Lockyer (1836-1920), dem Gründer und langjährigen Herausgeber der bekannten Zeitschrift *Nature*.
3. Die Sonne darf niemals mit einem Fernrohr ohne entsprechende Sonnenfilter direkt beobachtet werden – dies kann zu einer schweren Schädigung der Augen bis zur Blindheit führen.



und zu 2% aus schwereren Elementen besteht, was man spektroskopisch nachweisen kann.² Gesamtmasse und chemische Zusammensetzung sind – wie auch bei jedem anderen Stern – die beiden entscheidenden Parameter, die den Lebenslauf der Sonne festlegen.

Seit der Erfindung des Fernrohrs hat man die Sonnenoberfläche näher untersucht.³ Schon im Jahre 1610 fielen dem Jesuiten und Mathematiker Christoph Scheiner (1579-1650) und dem ostfriesischen Magister Johannes Fabricius (1587-1616) unabhängig voneinander dunkle Flecken auf, die im Laufe von 14 Tagen von einem Sonnenrand zum anderen wanderten. Daraus schloss man schon recht bald, dass die Sonne mit einer Periode von rund einem Monat rotieren muss. Heute wissen wir, dass unser Zentralgestirn mit seiner gasförmigen Oberfläche nicht gleichmäßig rotiert. Mit wachsender heliographischer Breite nimmt die Rotationsdauer von 25 Tagen am Sonnenäquator bis auf 33 Tage an den Sonnenpolen zu. Verglichen mit anderen Sternen rotiert die Sonne mit 2 Kilometern pro Sekunde aber eher langsam.

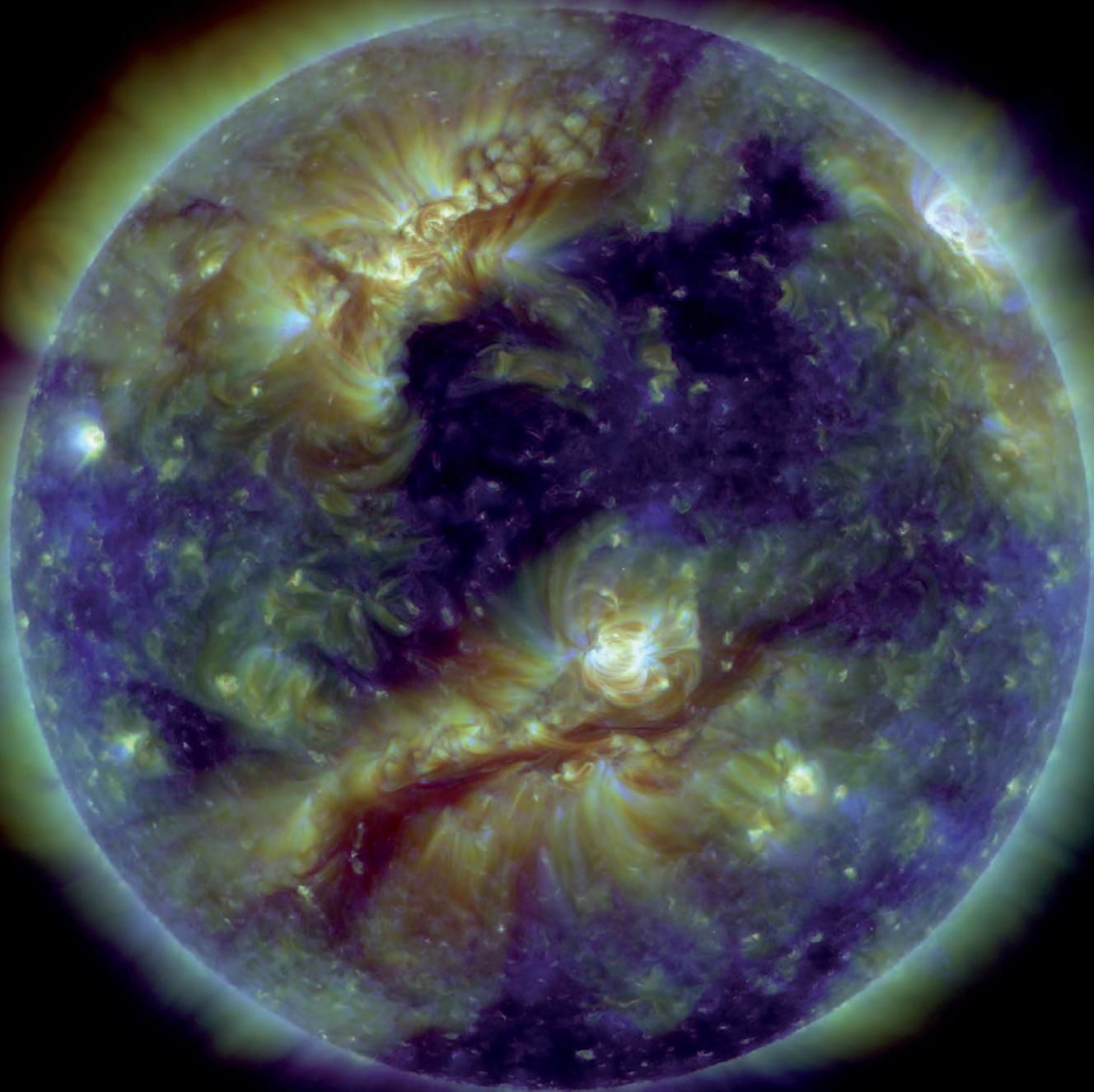
Die Sonnenflecken selber erscheinen dunkel, weil es sich um bis zu 1500 Grad Celsius kältere Regionen in der rund 5500 Grad Celsius heißen Photosphäre handelt. Sie heben sich schwarz in dem heißeren Umfeld ab. Im Jahre 1843 gelang es dem Apotheker und Amateurastronomen Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) nachzuweisen, dass die Zahl der

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

Bild oben: Sonnenflecken in einer aktiven Region. (© Royal Swedish Academy of Sciences)

Bild rechte Seite: Längliches dunkles Filament, das sich über ein Drittel der Sonne erstreckt. Kombination aus drei verschiedenen Wellenlängenbereichen des extremen ultravioletten Lichts. (© NASA/SDO)



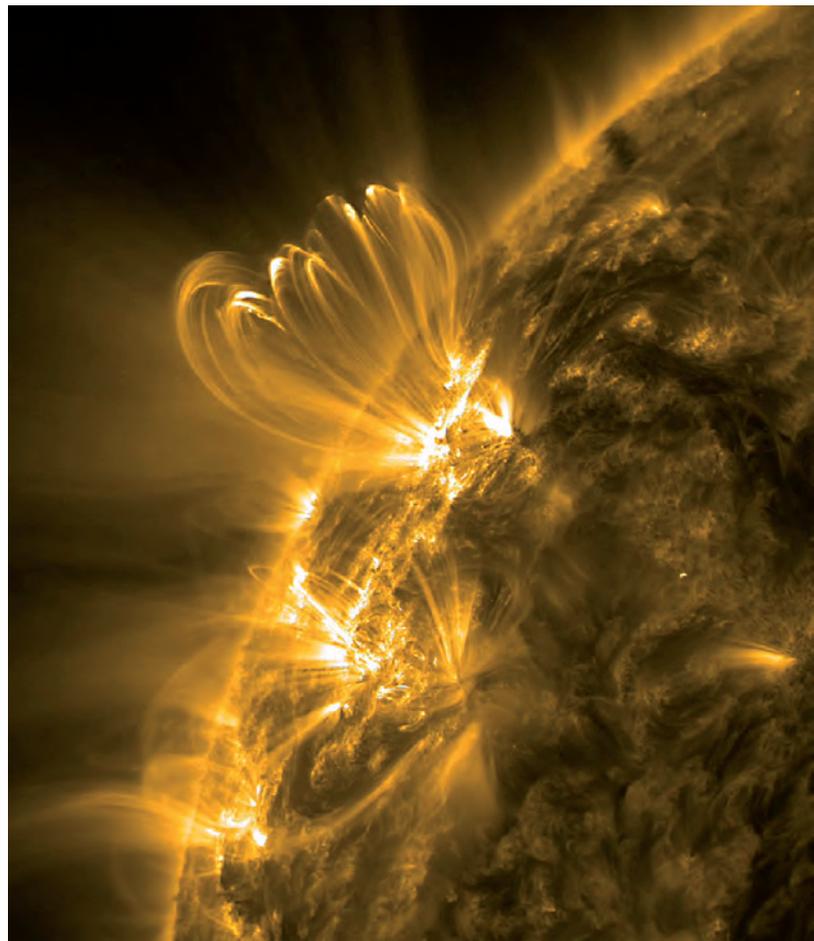
Sonnenflecken mit einer elfjährigen Periode schwankt. Dem elfjährigen Sonnenfleckenzyklus sind vermutlich noch längere Perioden überlagert, die mitunter mit Klimaveränderungen – wie in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts – in Verbindung gebracht werden. Die größten Flecken auf der Sonne sind bis 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 mit den elektrisch geladenen Teilchen des heißen Sonnengases auf komplizierte Weise wechselwirken. Die „gestörten Zonen“, die dabei lokal entstehen, werden praktisch als dunkle, kältere Stellen sichtbar. Hierzu haben auch Forschungssatelliten wertvolle Beiträge geliefert.

Die Sonnenkugel wird physikalisch in drei Zonen unterteilt. In der Zone der innersten 20 Prozent des Sonnenradius wird die Energie durch Kernfusion erzeugt: je vier Wasserstoffkerne verschmelzen zu einem Heliumkern. Dabei wird Bindungsenergie frei, d.h. Energie, die aufgewendet werden müsste, um einen Kern in seine einzelnen Protonen und Neutronen zu zerlegen. Dem Einsteinschen Energie-Masse-Äquivalent entsprechend verliert die Sonne etwa vier Millionen Tonnen Masse pro Sekunde! Damit überhaupt eine Kernfusion stattfinden kann, müssen im Zentrum der Sonne eine Temperatur von ca. 15 Millionen Kelvin und ein Druck von 22.000 Billionen Pascal herrschen. Zwischen 20 und 75 Prozent des Sonnenradius liegt über der Zone der Energieerzeugung die Strahlungszone, in der die im Inneren erzeugten Energiequanten unzähligen Streuungen und Reflexionen unterworfen sind und im Mittel erst nach 170.000 Jahren (!) an den oberen Rand der Strahlungszone gelangen. Dort angekommen, werden sie binnen weniger Tage durch Konvektion an die Sonnenoberfläche transportiert, von wo aus sich Licht und Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit radial im Raum ausbreiten. Der zweimilliardste Teil davon trifft die Erdoberfläche und entfaltet hier seine Wirkung.

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 wie auch jeder andere „normale“ Stern dieses Gleichgewicht aufrechtzuerhalten und passt sich mit ihrer äußeren Gestalt den sich wandelnden Fusionsprozessen im Innern an. So wird sie in etwa sechs Milliarden Jahren anfangen, das Stadium eines ‚Roten Riesen‘ zu durchlaufen und sich dabei nach und nach vermutlich bis zur heutigen Marsbahn aufblähen. Infolge eines zunehmenden Massenverlustes werden die Bahnen der inneren Planeten dabei merklich „angehoben“: Unsere Erde würde dann in der Nähe der heutigen Marsbahn die rote Riesensonne umlaufen. Ob

sie letztendlich als unwirtlicher Wüstenplanet „überleben“ oder wie Merkur und Venus von der Sonne „einverleibt“ wird, ist offen und hängt entscheidend davon ab, wieviel Masse die Sonne tatsächlich als Roter Riese verliert. Am Ende ihres gut zwölf Milliarden währenden Gesamtlebens wird die Sonne zu einem Weißen Zwergstern von Erdgröße zusammenschrumpfen. Dessen Materie ist dermaßen komprimiert, dass ein zuckerwürfelgroßes Stück soviel wie ein kleines Auto wiegt. Im Lauf weiterer Milliarden Jahre kühlt die weiße Zwergsonne langsam aus, bis sie endgültig als „Schwarzer Zwerg“ erlischt.

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

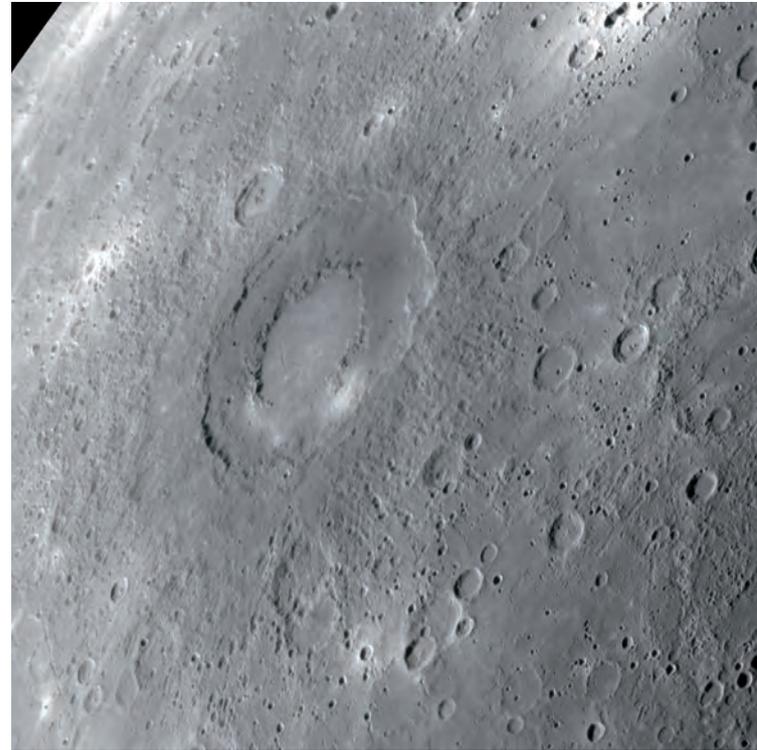


MERKUR

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 20mal 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. Das führt dazu, 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.

Unter den erdähnlichen Planeten ist Merkur in mehrfacher Hinsicht einzigartig. Mit einem Durchmesser von 4880 Kilometern ist er nicht nur der kleinste Planet im Sonnensystem, sondern auch kleiner als der Jupitermond Ganymed oder der Saturnmond Titan. Die Schwerebeschleunigung an der Oberfläche ist nur etwa ein Drittel so groß wie auf der Erde, ist aber genauso groß wie die des wesentlich größeren Planet Mars. Trotz der damit einher gehenden geringen Eigenkompression entspricht die mittlere Dichte des Merkur in etwa derjenigen der Erde. Das gibt Grund zu der Annahme, dass das Merkurinnere einen hohen Metallanteil aufweist. Neuere Strukturmodelle gehen von einem ausgedehnten eisenreichen Kern von etwa 4000 Kilometer Durchmesser aus, der von einem nur 400 bis 500 Kilometer mächtigen Gesteinsmantel überlagert wird. Die hohe mittlere Dichte des Planeten und



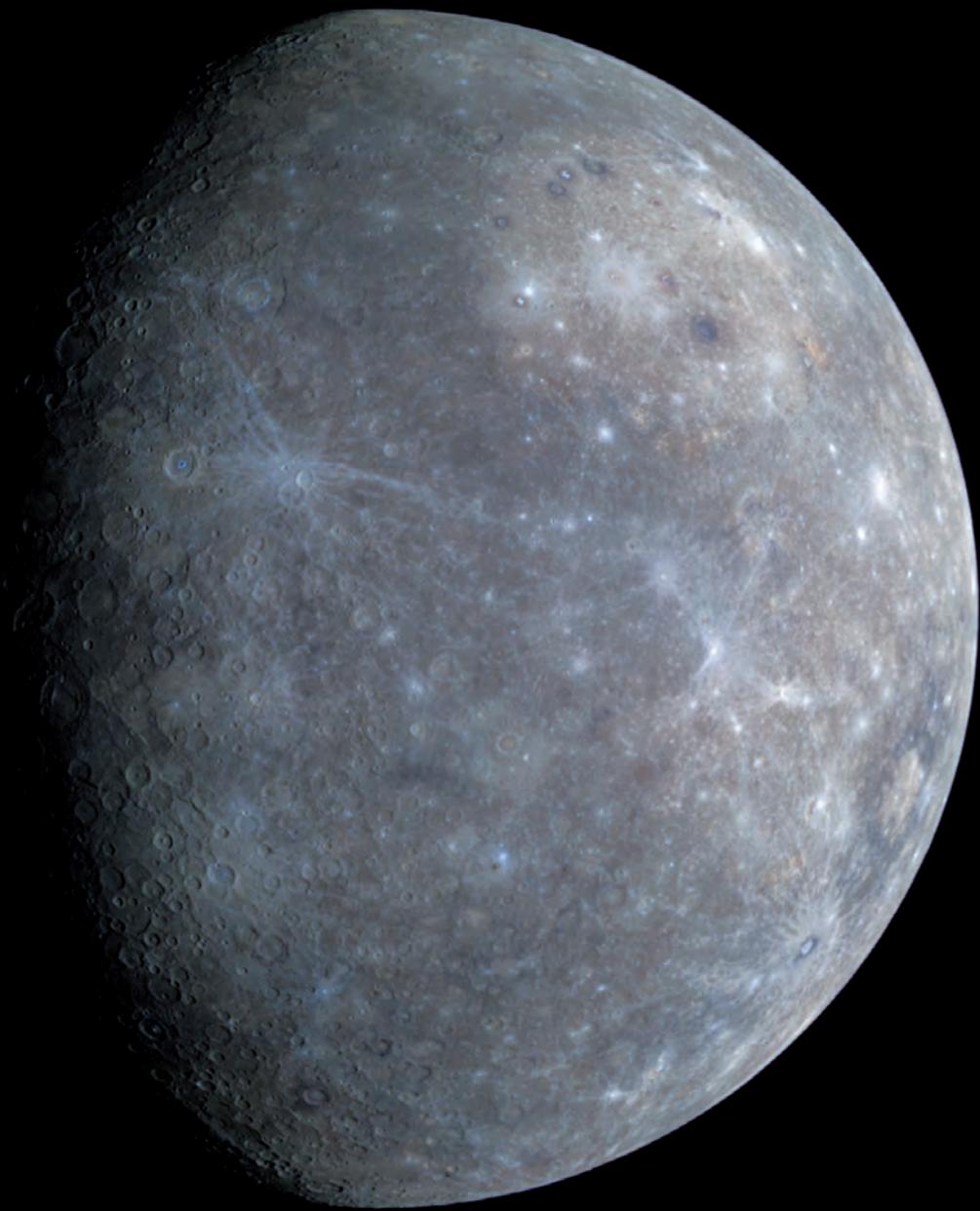
dessen Nähe zur Sonne liefern somit wichtige Anhaltspunkte zur Entstehung und Entwicklung der Körper des inneren Sonnensystems.

Das Merkurinnere unterliegt aufgrund der stark elliptischen Umlaufbahn und gekoppelten Rotation des Planeten starken Gezeitenverformungen. Diese gehen mit periodischen Verschiebungen der Oberfläche und Schwankungen des Gravitationsfeldes einher und können verstärkt seismische Beben auslösen. Die Gezeitenverformung des Merkur soll im Rahmen des Laseraltimetrie-

Fakten

Masse	$3,302 \times 10^{23}$ kg
Radius	2439,7 km
Dichte	5,427 g/cm ³
Rotationsperiode	58,65 Tage
Orbitalperiode	88 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$57,91 \times 10^6$ km

Bild: Blick auf den Merkur. Auffällig ist das relativ frische Doppelringbecken Rachmaninoff mit 290 Kilometern Durchmesser (© NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington)



Experimentes BELA an Bord der europäischen BepiColombo Mission ab 2022 näher untersucht werden, um zusätzliche Anhaltspunkte zur Beschaffenheit des Merkurinneren zu erhalten.

Aufgrund seiner Nähe zur Sonne kann Merkur nur mit technisch hohem Aufwand auf komplizierten Bahnen von Raumsonden angesteuert werden. Bei Annäherungen an den Merkur muss sowohl die große Anziehungskraft des Zentralgestirns als auch die enorm hohe Strahlungsintensität berücksichtigt werden. Erste Einblicke in die Besonderheiten des Planeten erlaubten die frühen Vorbeiflüge der Mariner 10-Raumsonde, die Mitte der 70er Jahre ein im Merkurinneren selbsterzeugtes Magnetfeld von etwa einem Hundertstel der Stärke des Erdmagnetfelds entdeckte. Nachdem die Raumsonde MESSENGER dreimal nahe am Merkur vorbeigeführt worden war, schwenkte sie im Frühjahr 2011 – fast drei Jahrzehnte nach den ersten Beobachtungen durch Mariner 10 – in eine stark elliptische, polare Umlaufbahn ein zur detaillierten Erkundung des Planeten und seiner dynamischen Magnetfeld- und Plasmaumgebung. Eine Nord-Süd-Asymmetrie des magnetischen Äquators bewirkt, dass die am

Südpol des Planeten offenen magnetischen Feldlinien eine größere Fläche für das Bombardement durch kosmische Strahlung und den Sonnenwind entstehen lassen und es dadurch zu einer stärkeren Wechselwirkung zwischen der kosmischen Umgebung und der Merkur-Oberfläche kommt, als am Nordpol. Intensive Verwitterungsprozesse sind die Folge. Das könnte auch die Existenz von Helium-, Wasserstoff- und Sauerstoffatomen erklären, die in der Umgebung des Planeten gemessen wurden und dort eine hauchdünne „Exosphäre“ bilden, in der inzwischen auch Natrium, Kalium, Stickstoff und Argon nachgewiesen wurden. Die gesamte Masse dieser flüch-

Bild: Krater Spitteler und Holberg mit Durchmessern von etwa 65 Kilometern mit Zentralbergen und terrasierten Kraterändern. (© 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)



tigen Elemente beträgt jedoch nur ungefähr tausend Kilogramm. Möglicherweise stammt ein Teil dieser Elemente auch direkt von der Sonne.

Inzwischen gilt auch als gesichert, dass in einigen tiefen, nie von der Sonne beschienenen und deshalb permanent kalten Kratern an den Polen des Planeten Eis und weitere flüchtige Verbindungen vorhanden sind: Hinweise darauf lieferten zunächst Radarbeobachtungen von der Erde, Reflexionen der von MESSENGER ins Innere dieser tiefen Krater abgegebenen Laserpulse bestätigten nun diesen Befund. Erdgebundene Radarbeobachtungen der Merkuroberfläche zeigen, dass die Rotationsachse nur geringfügig gegenüber der Bahnnormalen geneigt ist, und der Planet während seines Umlaufs um die Sonne zudem relativ großen librationbedingten Rotationsschwankungen unterliegt. In Kombination mit Beobachtungen des großräumigen Merkurschwerefeldes lässt dies den Schluss zu, dass der äußere feste Gesteinsmantel des Planeten durch eine (zumindest teilweise) geschmolzene, äußere Kernregion mechanisch vom festen,

inneren Eisenkern entkoppelt wird. Durch die Existenz eines flüssigen äußeren Kerns wird die bereits seit längerem gehegte Vermutung gestützt, dass das schwache Merkurmagnetfeld durch einen aktiven Kerndynamo aufrecht erhalten wird.

Merkurs Oberfläche ist voller Einschlagskrater in allen Größen, wie man sie vom Mond her kennt. Die imposanteste Oberflächenstruktur ist das Caloris-Becken mit einem Durchmesser von 1300 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.

Ein Phänomen der Merkuroberfläche sind über viele hunderte von Kilometern lange Geländekanten, so genannte „scarps“, die vermutlich ein Ergebnis einer globalen Kontraktion des Planeten um mehrere Kilometer infolge der Schrumpfung des Planetenkerns während der Abkühlphase sind. Auch die Vermutung, dass es auf dem Merkur vor Milliarden von Jahren einen intensiven Vulkanismus gab, wurde inzwischen bestätigt. Aus langen Rissen quoll dünnflüssige basaltische Lava über die Oberfläche und füllte Senken und Kraterbecken auf. Mindestens fünf Prozent des Merkur sind von Lavaströmen bedeckt, ausgedehnte Lavadecken am Nordpol haben eine Mächtigkeit von bis zu zwei Kilometern. In Anbetracht des verhältnismäßig gering mächtigen Silikatmantels überrascht dieser voluminöse Vulkanismus. Das Röntgenstrahlenspektrometer auf MESSENGER stellte erhebliche Mengen an Schwefel auf dem Merkur fest. Auch deuten die Konzentrationen von Magnesium oder Aluminium und ihr Verhältnis zur Menge an Silizium darauf hin, dass die Kruste des Merkur in ihrer Zusammensetzung relativ schwer ist. Damit ähnelt sie mehr dem oberen Erdmantel oder unseren Ozeanböden als der leichten aluminiumreichen Primärkruste des Mondes.



Bild: Eine der höchsten und längsten Böschungen auf Merkur, Beagle Rupes, deformiert den elliptischen Krater Sveinsdóttir (unten links). (© NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington)

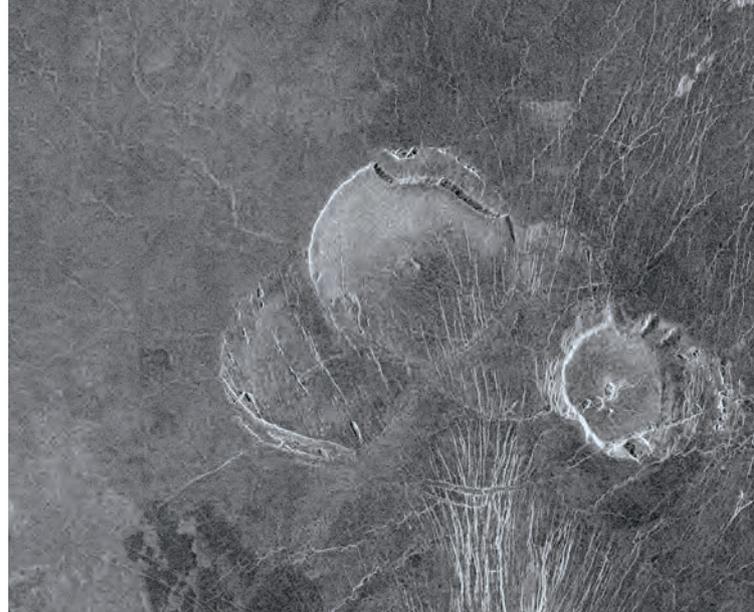
VENUS

Von der Sonne aus gesehen ist die Venus der zweite Planet und gleichzeitig der nächste Planet zur Erde. Der mittlere Bahnabstand der beiden Planeten beträgt nur rund 41 Millionen Kilometer. Nach Sonne und Mond ist die Venus 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 Sonnenaufgang 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. Berühmt ist die Schilderung des Venusdurchgangs vom 3. Juni 1769 durch den englischen Kapitän James Cook von der Südseeinsel Tahiti, die er eigens für die Beobachtung ansteuerte. Im 20. Jahrhundert gab es keinen einzigen Venustransit. Die letzten beiden Venusdurchgänge fanden am 8. Juni 2004 und am 6. Juni 2012 statt. Erst im Jahre 2117 wird dann der nächste Venustransit von der Erde aus zu beobachten sein.

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, dauert ein Venustag (von einem Sonnenaufgang bis zum nächsten) 117 Erdentage. 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 ausgedehnten, zwei Kilometer über der Referenzhöhe liegenden Ebenen, den Regiones. Zwanzig Prozent der Oberfläche werden



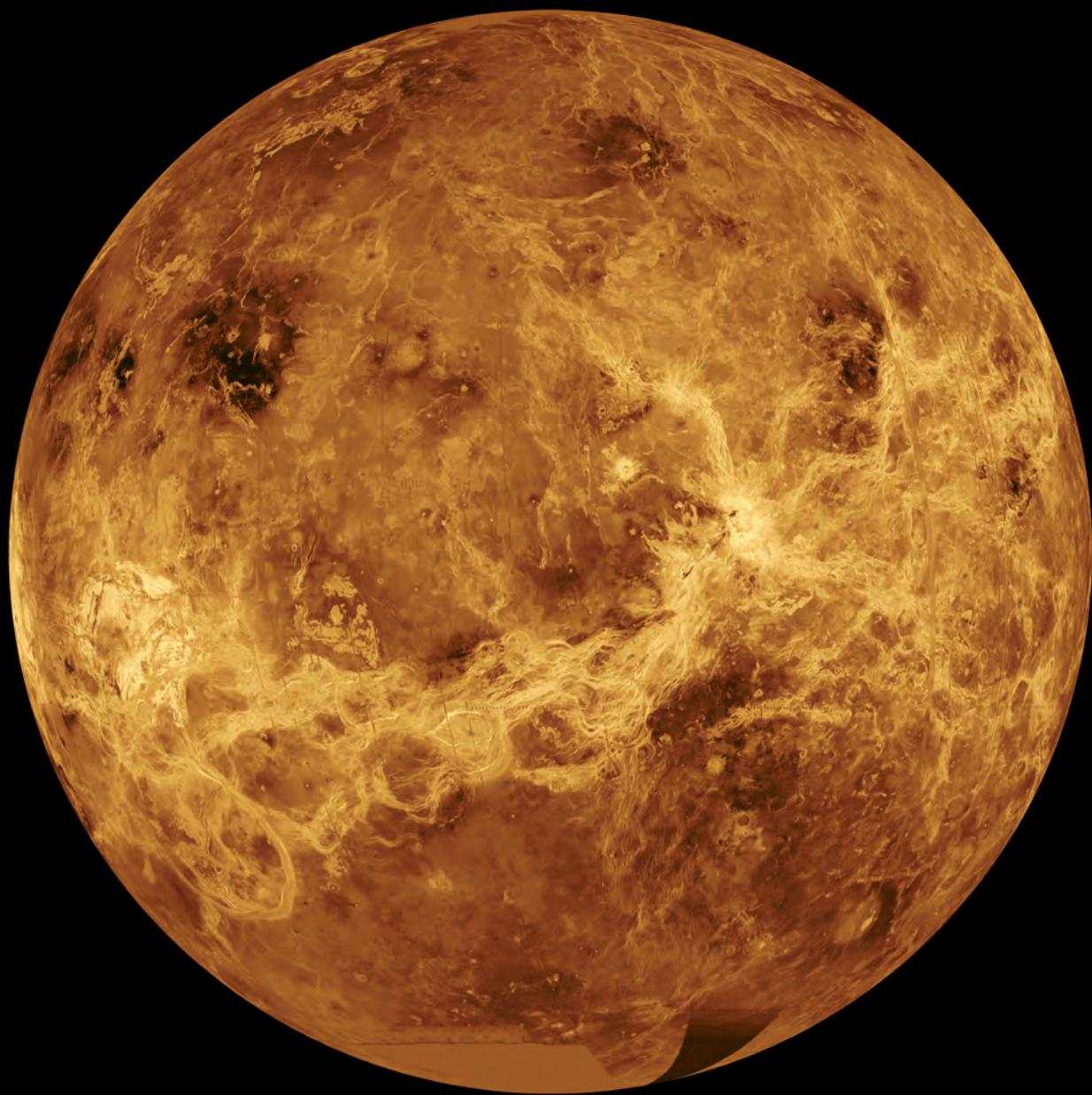
als tiefe Senken bezeichnet, die bis zu zwei Kilometer tief sind. Die restlichen zehn Prozent stellen das Venus-Hochland dar, die Terrae, die sich auf zwei Hauptgebiete konzentrieren: Ishtar Terra im Norden mit den elf Kilometer hohen Maxwell Montes am östlichen Rand dieses Gebiets, und Aphrodite Terra 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 Venusruste aufgerissen. Ein großes vulkanisches Gebiet ist die bis zu vier Kilometer hohe Beta Regio.

Von mehr als drei Vierteln der Venusoberfläche weiß man, dass sie vulkanischen Ursprungs ist. Insgesamt hat man auf der Venus über tausend Vulkane und viele bizarr anmutende Formationen vulkano-tektonischen Ursprungs gefunden, wie zum Beispiel die nur auf der Venus beobachteten Coronae („Kronen“), ringartige Strukturen von bis zu 300 Kilometern Durchmesser, die aber nur wenige hundert Meter über die Oberfläche ragen. 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 1000 bis 500 Millionen Jahren wurde in einer globalen Katastrophe die Landschaft der Venus

Fakten

Masse	4,869 x 10 ²⁴ kg
Radius	6051,9 km
Dichte	5,24 g/cm ³
Rotationsperiode	243 Tage
Orbitalperiode	224,7 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	108,2 x 10 ⁶ km

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



völlig neu gestaltet. Die Ursachen für diesen „Erneuerungsprozess“ sind noch nicht genau bekannt. Über den gesamten Planeten verteilte Vulkanausbrüche könnten die Oberfläche der Venus fast vollständig mit Lava bedeckt und die alten Krater ausgefüllt haben. Ausgenommen davon sind lediglich die tektonisch beanspruchten Hochländer, die ein deutlich höheres Alter als die vulkanischen Tiefländer der Venus aufweisen.

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 teilweise die 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 Venera 14 ergaben eine Gesteinszusammensetzung, die grob den irdischen Ozeanböden ähnelt: Die Venuskruste besteht zu großen Anteilen aus Basalten, einem dunklen, vulkanischen Silikatgestein. Beide Landesonden sind auf den Flanken von Vulkanen gelandet. Messungen der ESA-Mission Venus Express zeigen, dass die Hochländer der Venus eine etwas andere Zusammensetzung haben als die vulkanischen Tiefländer. Venus Express konnte außerdem erkennen, dass die Venus bis in die jüngste geologische Vergangenheit vulkanisch aktiv war und vielleicht noch heute aktiv ist.

Die Atmosphäre der Venus ist rund 90mal massereicher als die der Erde. Am Boden herrscht bei einer mittleren Oberflächentemperatur von (bei Tag und Nacht) 477 Grad Celsius ein Druck von 93 Bar, der in unseren Ozeanen in einem Kilometer Wassertiefe vorherrscht. Die

Troposphäre des Planeten, also die Region, in der sich das Wetter abspielt, reicht bis in eine Höhe von 100 Kilometern (Erde: 10 Kilometer). Vom Venusboden aus nimmt die Temperatur bis in eine Höhe von 60 Kilometern kontinuierlich ab und bleibt bis zur Obergrenze 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 Tagesseite verdient. Auf der Nachtseite fallen die Temperaturen bis auf -173 Grad Celsius ab, so dass man hier von der Kryosphäre spricht.

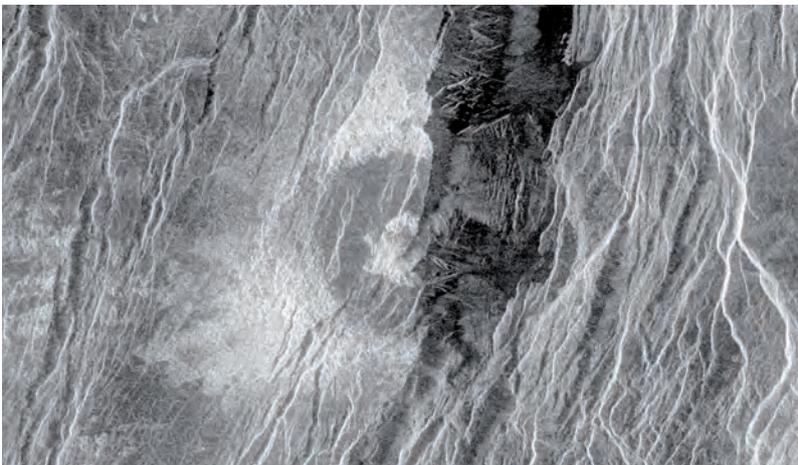
In Höhen zwischen ca. 45 und 70 Kilometern liegen drei dicke Wolkenschichten, die den Planeten völlig einhüllen und verschiedene Windströmungen aufweisen. So zeigt die Wolkenoberseite eine äquatoriale, ebenfalls retrograde, viertägige Ost-West-„Superrotation“ mit Geschwindigkeiten von 360 Stundenkilometern, d.h. die oberste Atmosphärensicht 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. Dies führt dazu dass die Temperaturen auf der Oberfläche der Venus überall fast gleich hoch sind.

Ein Hauptgrund für die große 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 Konvektionsströmungen, also zu großräumigen Umwälzungen in der Atmosphäre. An der Venusoberfläche herrscht erstaunlicherweise jedoch beinahe Windstille.

Die Zusammensetzung der Venusatmosphäre hat sich über viereinhalb Milliarden Jahre hinweg 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

Bild: Von zahlreichen Brüchen durchzogener „halbierter Krater“ zwischen Rhea und Theia Mons in der Beta Regio.
(© NASA/JPL)

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



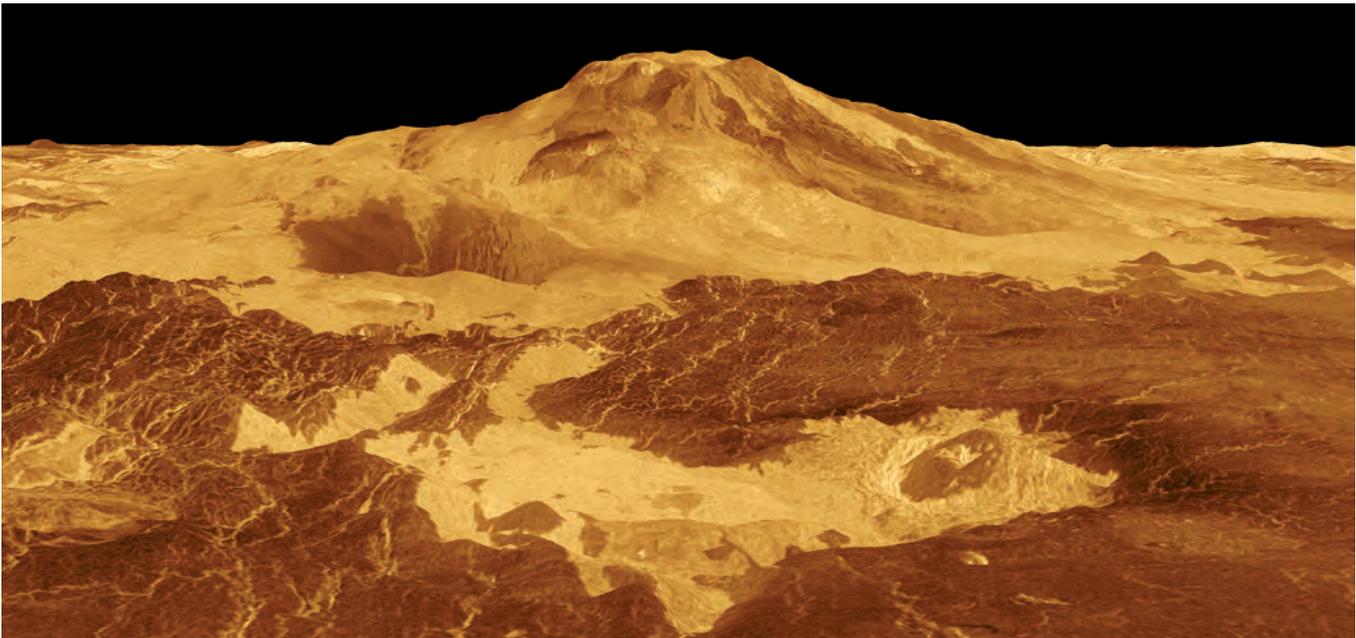
der hohen Atmosphäre sind für den massiven Treibhauseffekt auf der Venus verantwortlich; obgleich 80 Prozent des einfallenden Sonnenlichtes von den Wolken reflektiert werden, reichen die verbleibenden 20 Prozent aus, um den Planeten aufgrund des intensiven Treibhauseffektes aufzuheizen. Ein ähnlich effektiver Treibhauseffekt hätte 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 beide Planeten 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. Möglicherweise wurde auch das Kohlendioxid, das in dem im Wasser gebildeten Sedimenten gebunden war, aus dem Gestein heraus wieder in die Venusatmosphäre entlassen. Insgesamt enthält die Erde heute genau so viel Kohlendioxid wie die Venus, nur ist die überwiegende Menge des Moleküls in Kalk- und Karbonatgesteinen der Erdkruste gebunden bzw. im Wasser der Ozeane gelöst.

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



ERDE-MOND-SYSTEM

Erde

Die Erde ist der größte und schwerste der vier inneren Planeten des Sonnensystems, die man aufgrund einiger Ähnlichkeiten mit unserem Heimatplaneten auch die „terrestrischen“, die erdähnlichen Planeten nennt. Neben der Erde sind dies Planeten Merkur, Venus und Mars, aber auch der Mond wird dazugezählt. 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 viereinhalb 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 physikalischen und chemischen Voraussetzungen für eine längerfristig angelegte Existenz vielfältiger, entwicklungsfähiger und hochorganisierter Lebensformen bietet. Sie befindet sich in der ‚habitablen Zone‘, die dadurch definiert ist, dass auf ihr Wasser (H_2O) im flüssigen Aggregatzustand stabil ist.

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 einer minimalen Taumelbewegung, 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 6000 Kilometer großen, innen festen und außen flüssigen Eisen-Nickel-Kern hat. Die beweglichen, leitenden Metallmassen im flüssigen Teil des Kerns sind Ursache für das permanente, aber einem ständigen Wandel unterworfenen Erdmagnetfeld. Im Erdzentrum herrschen eine Temperatur von über 6000 Grad Celsius und ein Druck von mehreren Millionen Bar. Der Kern ist von einem Mantel von gut 3000 Kilometern Mächtigkeit umgeben. Über dem Erd-



mantel befindet sich die weniger als 100 Kilometer dicke Erdkruste (Lithosphäre), die in sechs große und mehrere kleinere Platten zerbrochen ist, auf denen gemäß dem Archimedischen Prinzip die Kontinente ‚isostatisch‘ über den Erdmantel driften, gleichsam wie Eisberge im Wasser.

Der deutsche Meteorologe und Geophysiker Alfred Wegener (1880-1930) erkannte anhand kontinentaler Küstenverläufe,

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)

Fakten

Masse	$5,976 \times 10^{24}$ kg
Mittlerer Radius	6378,1 km
Dichte	$5,534 \text{ g/cm}^3$
Rotationsperiode	23,93 h
Orbitalperiode	365,24 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$1,496 \times 10^6$ km



kristalliner Sedimente und seltener Fossilien, dass sich die Kontinente mit einer Geschwindigkeit von einigen Zentimetern pro Jahr gegeneinander in unterschiedliche Richtungen bewegen. Auf seinen Beobachtungen basieren die heutigen Modelle der Plattentektonik. Da die Erdkruste eine geringere Dichte besitzt als der Erdmantel, ‚schwimmen‘ die Lithosphärenplatten auf dem Mantel, angetrieben durch Strömungen in Konvektionszellen des oberen Erdmantels. Wo die Krustenplatten auseinander driften, bilden sich – meist submarine – Gräben, aus denen Magma emporsteigt, wie z.B. entlang des Mittelatlantischen Rückens. Dort, wo sie kollidieren, sinken die Gesteine der Erdkruste an den sogenannten Subduktionszonen ins Erdinnere ab, wie beispielsweise an der Westküste Südamerikas. Bei solchen frontalen Kollisionen zweier Kontinente kommt es unter anderem zur Bildung hoher Gebirge wie der Anden oder der Alpen). Entlang lateraler Verschiebungen der Platten – ein bekanntes Beispiel ist die San Andreas-Störung in Kalifornien – wie auch an den beiden schon genannten Plattengrenzen, treten häufig Erdbeben und verstärkte vulkanische Aktivität auf. Die Erdkruste wird also permanent verändert und erneuert, was sich auch darin widerspiegelt, dass der überwiegende Teil der heutigen Erdoberfläche jünger als 200 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

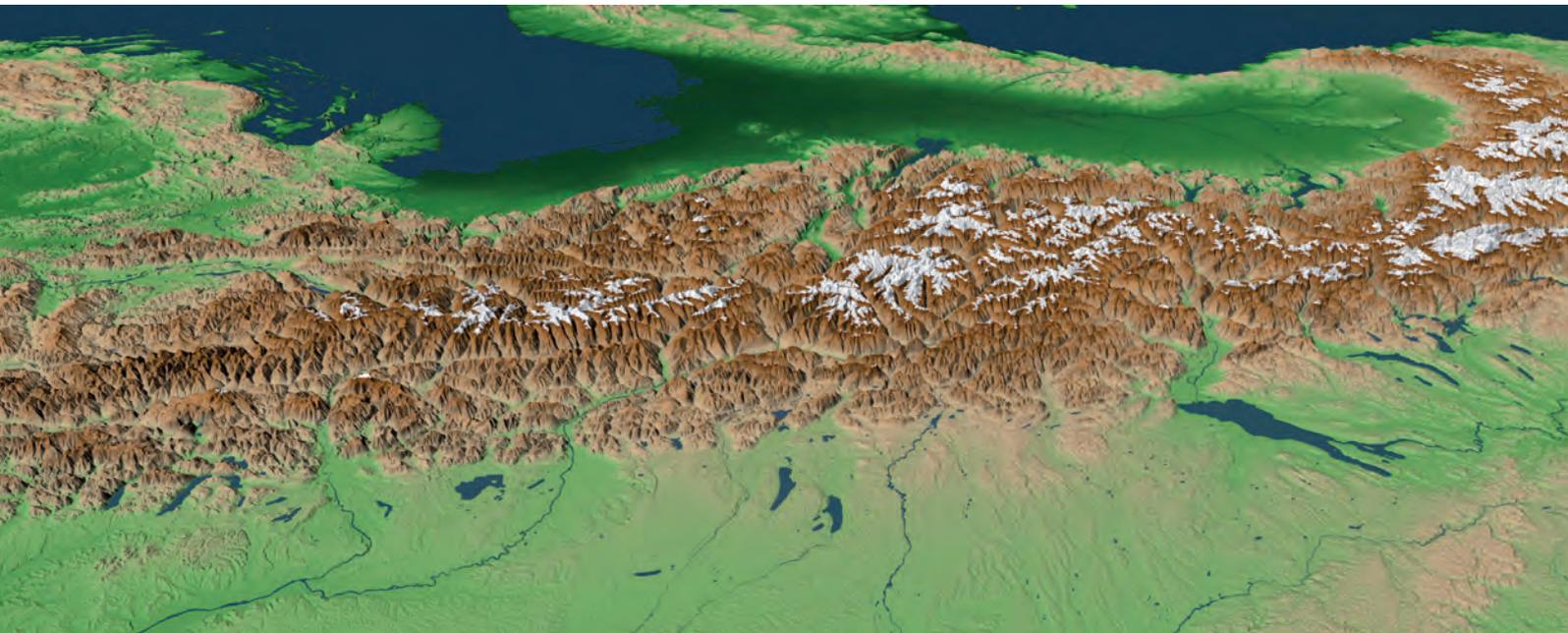


Erdkruste nicht mehr erneuern und der einseitigen Erosion durch Wind und Wasser völlig ausgeliefert sein.

Bild oben: Manicouagan-See im nördlichen Quebec, Kanada, Überreste eines Einschlagskraters. (© NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team)

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

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





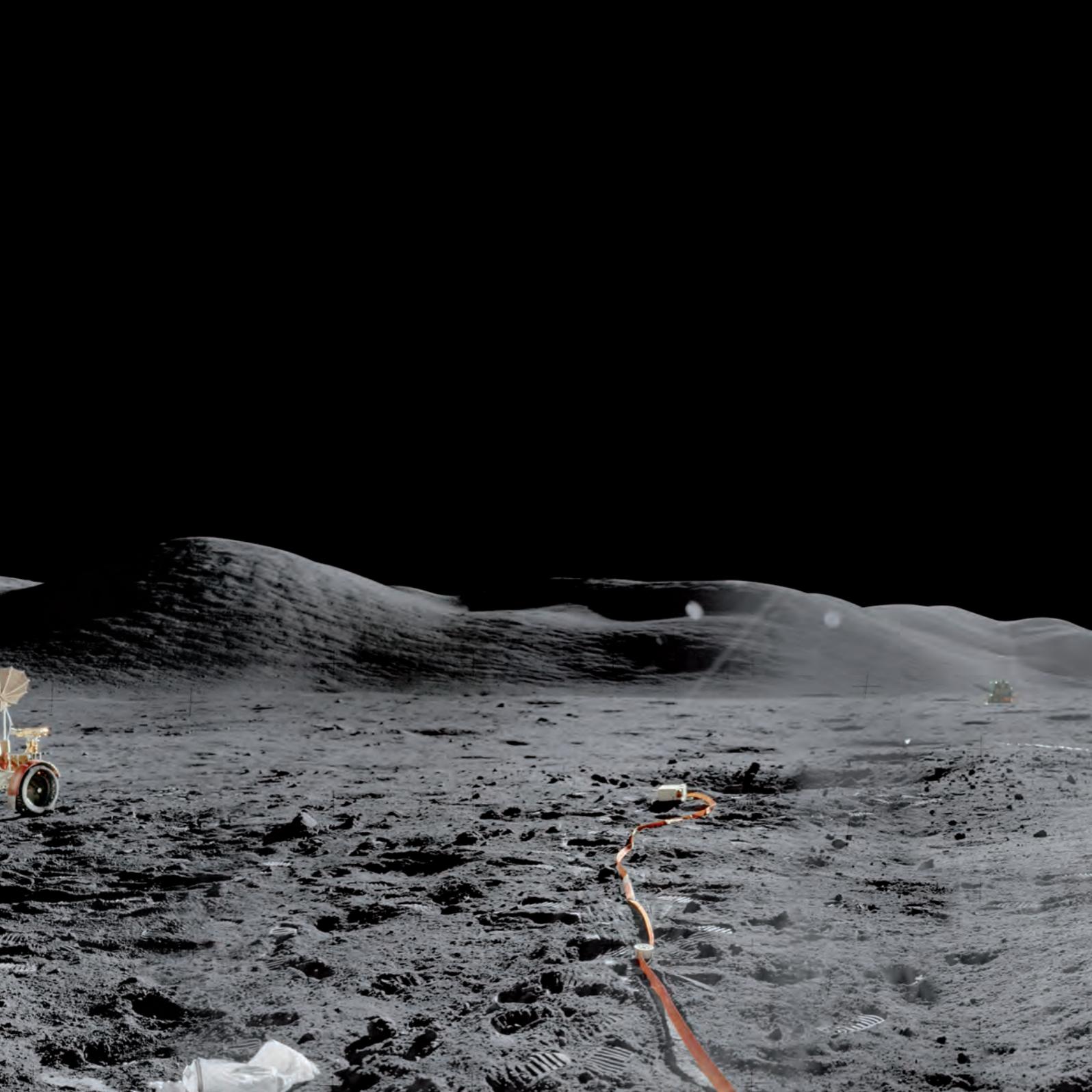
Knapp 71 Prozent der Erdoberfläche sind von Meeren bedeckt. Diese ozeanischen Wassermassen sind in der Lage, große Mengen (Wärme-) Energie zu speichern und zeitlich verzögert wieder an die Lufthülle und die Landmassen abzugeben: mit fundamentalen Auswirkungen für das Klima. Ein zunehmender Treibhauseffekt mit einer Zunahme des Wasserdampf- und CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre hätte heutzutage die Kraft, irdische Landschaften schneller umzuformen, als sich Fauna und Flora anpassen können. Hier kann die Fernerkundung vom Weltraum aus wertvolle Daten für Klimatrends und Langzeitprognosen liefern. Neben den atmosphärischen Einflüssen wie z.B. Wind trägt vor allem das Wasser erheblich zur Erosion der Erdoberfläche bei. Diskutiert wird seit einiger Zeit, ob nicht ein Großteil der ozeanischen Wassermassen von Kometen

stammt, die auf die junge Erde gestürzt sind. Speziell in der Frühzeit der Erdgeschichte hat das damals um mehrere Größenordnungen heftigere Meteoritenbombardement das Antlitz der Erde geprägt. Es ist also plausibel anzunehmen, dass zumindest einige dieser Impakte von wasserreichen Kometen stammen.

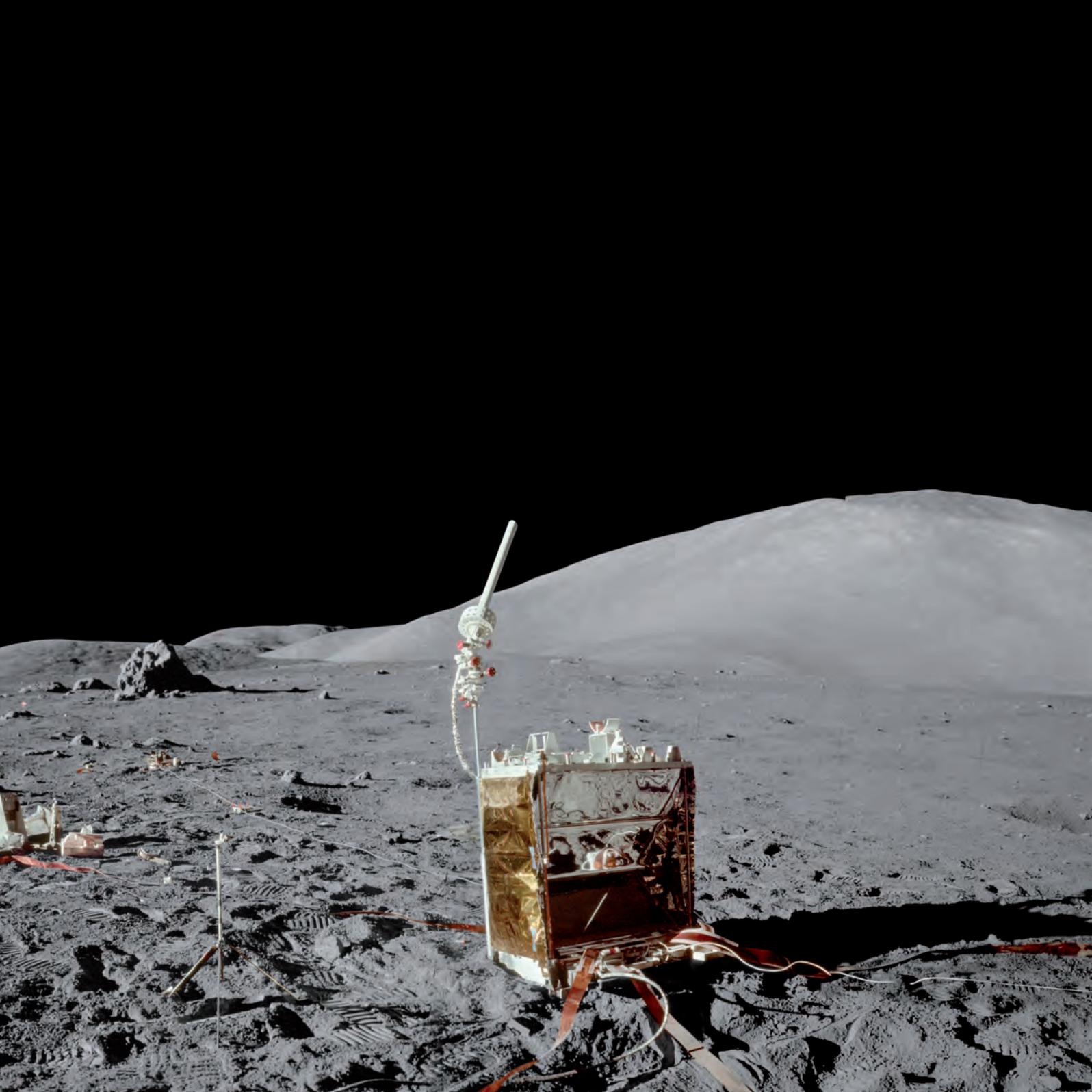
Die Masse der Erde übt eine Anziehungskraft aus, die groß genug ist, dauerhaft eine Atmosphäre an den Planeten zu binden. Gegenwärtig enthält die ‚untere‘ Erdatmosphäre, die Troposphäre, 78 Pro-

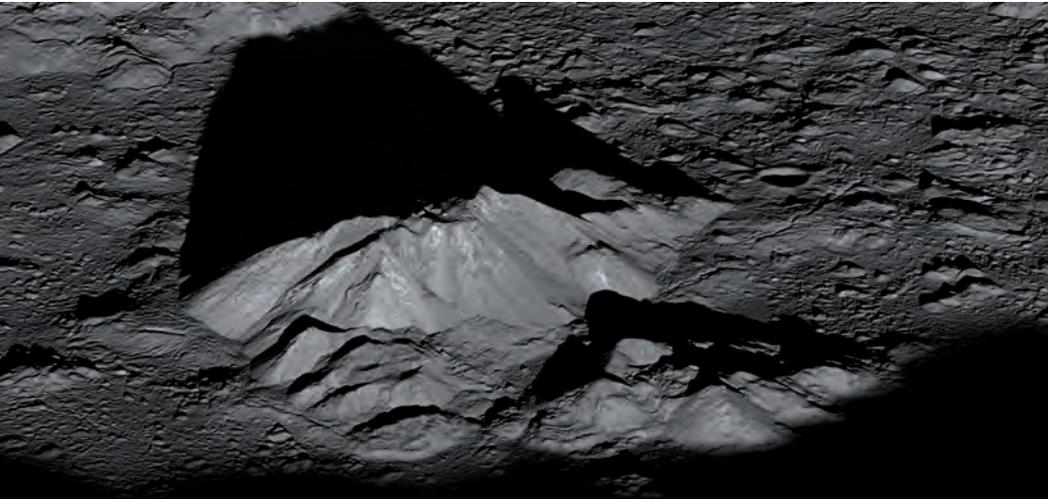
Bild: Wolken und Wettergeschehen in der Erdatmosphäre über dem Pazifischen Ozean, aufgenommen von der ISS. (© NASA)











zent Stickstoff (N_2), 21 Prozent Sauerstoff (O_2) und ein Prozent des Edelgases 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 zehn Kilometern; in ihr spielt sich das Wettergeschehen ab. An die Troposphäre schließen sich die Stratosphäre (bis 50 Kilometer Höhe), 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, vom Menschen verursachte Einflüsse insbesondere über den kalten Polgebieten schwindet.

Bild: Zentralberg des Kraters Tycho bei niedrigem Sonnenstand in sehr hoher Auflösung.
(© NASA/GSFC/Arizona State University)

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

Mond

Nach der Sonne ist der Mond der auffallendste und nicht zuletzt für die Kulturgeschichte des Menschen auch der wichtigste Himmelskörper. Die Mondphasen mit dem „monatlich“ wiederkehrenden Vollmond dienten seit Menschengedenken als Maß der Zeit und bildeten die Grundlage für geplantes landwirtschaftliches Handeln und der Beobachtung von Gesetzmäßigkeiten in der Natur. In vielen Kulturen und Sprachen ist der Mond weiblicher Natur, weil mit ihm Eigenschaften wie Fruchtbarkeit in Verbindung gebracht werden. Unregelmäßig auftretende, durch den

Umlauf des Mondes um die Erde bedingte Sonnen- und Mondfinsternisse übten eine starke mythologische Wirkung auf unsere Vorfahren aus.

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 amerikanischen Apollo-Missionen den Mond und brachten zirka 382 Kilogramm Proben unterschiedlicher Gesteine zur Erde zurück. Die Mondproben mit ihrem meist hohen Alter (über drei, zum Teil sogar über vier Milliarden Jahre) und ihrer sehr genau untersuchten chemischen und mineralogischen Zusammensetzung ermöglichen uns einen Rückblick in die Frühzeit des Sonnensystems und auf die Entwicklungsgeschichte des Erd-Mond-Systems. Sie sind für ein besseres Verständnis der Evolution

des Sonnensystems, vor allem der vier erdähnlichen Planeten und der großen Asteroiden von Bedeutung. Gleichzeitig werden durch die Mondforschung 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.

Fakten

Masse	$7,3483 \times 10^{22}$ kg
Mittlerer Radius	1737,4 km
Dichte	$3,341 \text{ g/cm}^3$
Rotationsperiode	27,32 Tage
Orbitalperiode	27,32 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Erde	384.000 km

Der Mond umkreist die Erde in Bezug zum Sternenhimmel in 27 Tagen, 7 Stunden und 43,7 Minuten im gleichen Drehsinn, wie sich die Erde um die Sonne bewegt. Fast genau so lang benötigt der Mond für eine Drehung um seine eigene Achse. Dies wird als gebundene Rotation bezeichnet und ist eine Folge der Gezeitenwirkung der Erde auf den Mond. Die gebundene Rotation führt dazu, dass der Mond immer die gleiche Seite der Erde zuwendet, die aus diesem Grund auch die Mondvorderseite genannt wird. Die Mondrückseite bekommen wir auf der Erde nie zu sehen. Sie wurde erstmals 1959 von der sowjetischen Raumsonde Lunik 3 fotografiert. Als Folge von Librationen, kleinen Taumelbewegungen des Mondes auf seiner leicht elliptischen Bahn um die Erde, können jedoch 59 Prozent der Mondoberfläche beobachtet werden.

Der Erdmond ist der kleinste der erdähnlichen, der „terrestrischen“ Körper des inneren Sonnensystems. Bei einem Durchmesser von etwa 3475 Kilometern hat er eine Oberfläche von knapp 3,8 Millionen Quadratkilometern, das ist nur ein Vierzigstel der Fläche aller Kontinente auf der Erde. Aufgrund seiner geringen Größe besitzt der Mond zu wenig Masse, um eine Atmosphäre an sich zu binden; nur einige Atome und Ionen von leichtflüchtigen Elementen umgeben den Erdtrabanten in einer hauchdünnen Exosphäre, deren Gesamtmasse auf nur zehn Tonnen geschätzt wird und deshalb einem Vakuum sehr nahe kommt. In dieser Exosphäre finden sich Natrium- und Kaliumatome, die vom Sonnenwind aus dem Regolith, dem Mondstaub auf der Oberfläche, geschlagen wurden, so wie Helium (^4He) als Bestandteil des Sonnenwindes. Ferner wurden Argon (^{40}Ar), Radon (^{222}Ra) und Polonium (^{210}Po) nachgewiesen – letztere entstehen beim radioaktiven Zerfall in der Mondkruste und dem Mondmantel und wurden von dort gasförmig an die Exosphäre abgegeben.

Bei Betrachtung der Oberfläche des Mondes fallen zwei deutlich unterschiedliche Gebiete auf: Zum einen das helle Hochland, das über 80 Prozent einnimmt, und zum anderen die Maregebiete, die knapp 20 Prozent ausmachen. 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. Aufgrund spektraler Daten kann die Oberfläche in mindestens drei Großgebiete, sog. „Terranes“ untergliedert werden, die sich alle durch eine spezifische mineralogisch bzw. geochemische Zusammensetzung voneinander unterscheiden. Der Mond ist viel komplexer aufgebaut als man noch vor ein paar Jahren angenommen hat.

Die Maregebiete sind vulkanischen Ursprungs und finden sich hauptsächlich auf der erdzugewandten Seite. Sie sind jünger als die Hochländer und füllen vor allem die riesigen kreisrunden Becken, die durch die Einschläge von Asteroiden entstanden sind. Der Umstand, dass sich auf der Mondvorderseite eine größere Zahl der großen Impaktbecken mit basaltischer Lava füllen konnte als auf der Rückseite des Mondes, ist darauf zurückzuführen, dass die Mondkruste auf der erdabgewandten Seite wesentlich dicker ist und so den Austritt von Magma aus dem Mondmantel erschwerte.

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

Vermutlich entstand der Erdbe-
gleiter, als vor 4,4 bis 4,5 Milli-
arden Jahren ein planetarer
Körper etwa von der Größe des
Mars mit der noch jungen, aber
schon in Kruste, Mantel und
Kern differenzierten Erde kollo-
dierte. Dabei verdampften
große Mengen des jungen Erd-
mantels, wurden ins All
geschleudert und kondensier-
ten in einem Ring, der den
Äquator der Erde umkreiste.
Durch Akkretion der Teilchen
in dieser die Erde umgebenden
Scheibe aus Staub und Gestein-
spartikeln entstand der Mond .

Im Wesentlichen war die geolo-
gische Entwicklung des Mondes
schon relativ früh abgeschlos-
sen. Durch das kontinuierliche
Bombardement des jungen
Mondes durch Asteroiden und
Kometen, sowie dem Zerfall von
Wärme produzierenden radioak-
tiven Elementen in seinem Inne-
ren kam es in der Frühphase des
Mondes zur Ausbildung eines
mehrere hundert Kilometer
mächtigen globalen Magmaoze-
ans. Das Abkühlen dieses Mag-
maozeans nach der Abnahme
des Bombardements und des
radioaktiven Zerfalls führte zur

Kristallisation einer Sequenz von
gesteinsbildenden Mineralen. Zu-
nächst sank metallisches Eisen in die Tiefe und bildete einen kleinen,
nur wenige hundert Kilometer großen Kern. Dann kristallisierten
schwere magnesium- und eisenreiche Minerale, die ebenfalls nach
unten sanken und einen Mantel bildeten. Es folgte die Kristallisation
von zunehmend eisenreicheren Mineralen und schließlich die Bildung
einer ersten Kruste aus leichten, aluminiumreichen Silikaten. Aufgrund
ihrer geringen Dichte trieben diese sog. anorthositischen Feldspäte in

diesem mittlerweile fast vollständig erstarrten Magmaozean zur Ober-
fläche auf und erstarrten zu einer primären Kruste – den lunaren
Hochländern.

Elemente wie z.B. Kalium, die Seltenen Erden und Phosphor, die

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



nur schwer in die Kristallgitter der gesteinsbildenden Minerale eingebaut werden können, sammelten sich an der Basis der anorthositischen Kruste. Ein teilweises Wiederaufschmelzen des Mantels führte letztlich zum Aufdringen eisen- und magnesiumreicher silikatischer Magmen, die heute als Basaltgestein die Maregebiete bedecken. Insgesamt ist der Mond ein vollständig differenzierter, also ein nur wenig primitiverer Körper als die Planeten des inneren Sonnensystems, der einen Kern, einen Mantel und eine Kruste besitzt. Noch nicht geklärt ist, warum die Mondkruste auf der Rückseite fast doppelt so dick ist wie auf der Mondvorderseite.

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 Laven begünstigt wurde und diese an der Oberfläche austreten konnten. Die riesigen Einschlagbecken füllten sich in mehreren hundert Millionen Jahren mit den gegenüber den Hochlandgesteinen dunkleren Basalten. Beobachter auf der Erde vermuteten in den dunklen Flächen mit Wasser gefüllte Meere, und so erklärt es sich, dass die Basaltfüllungen der Einschlagbecken noch heute als „Meere“ (lat. Mare) bezeichnet werden, wie das Mare Imbrium, das Mare Serenitatis oder der Oceanus Procellarum.

Die vulkanische Entwicklung war vor etwa drei Milliarden Jahren so gut wie abgeschlossen, nur noch vereinzelt erreichten Magmen bis vor ca. 1-1,5 Mrd. Jahren 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 eine nicht unbedeutende Menge Wassereis befindet. Die detaillierte Untersuchung dieser möglichen Wassereisvorkommen war auch das Ziel mehrerer internationaler Mondmissionen der letzten Jahre. Mit einem amerikanischen Spektrometer an Bord der indischen Mission Chandrayaan-1

konnten nicht nur die Eisvorkommen in tiefen polaren Kratern bestätigt werden, sondern Wasser, das in Mineralen und dem Regolith über den ganzen Mond verteilt ist – allerdings in nur sehr geringer Konzentration.

Der Mond ist in jüngerer Zeit wieder zu einem der wichtigsten Ziele der Planetenerkundung geworden. Nach einer langen Pause in der Mondforschung sind in den vergangenen 15 Jahren mehrere Orbitermissionen durchgeführt worden. Neben den USA beteiligen sich auch die aufstrebenden asiatischen Raumfahrnationen an der Erforschung des Mondes. Wissenschaftlich ergiebig waren vor allem die japanische Missionen Kaguya-SELENE (2007 bis 2009), das amerikanische Impaktexperiment LCROSS (2009), der indische Orbiter Chandrayaan-1 (2008 bis 2009), die Doppelsatelliten der NASA-Mission GRAIL zur Vermessung des Schwerefeldes (2011 bis 2012) und vor allem der amerikanische Lunar Reconnaissance Orbiter, der sich seit Juni 2009 in einer niedrigen polaren Umlaufbahn befindet und den Mond in hoher Auflösung fotografiert und topographisch vermisst.

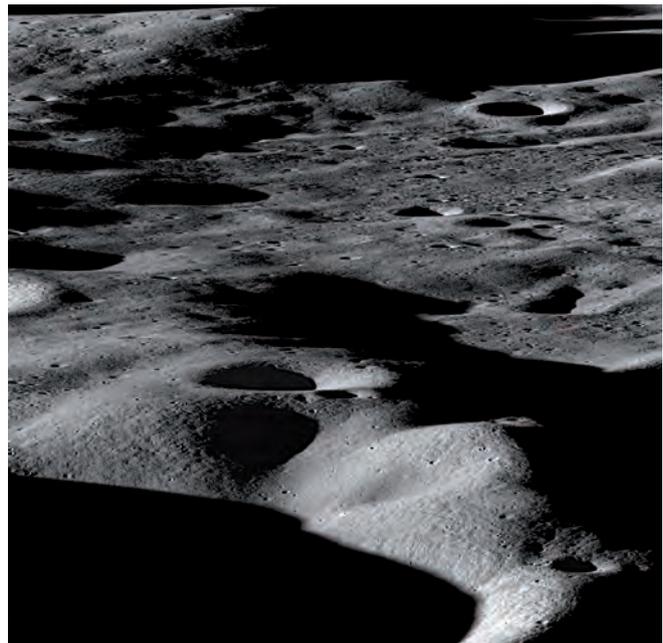
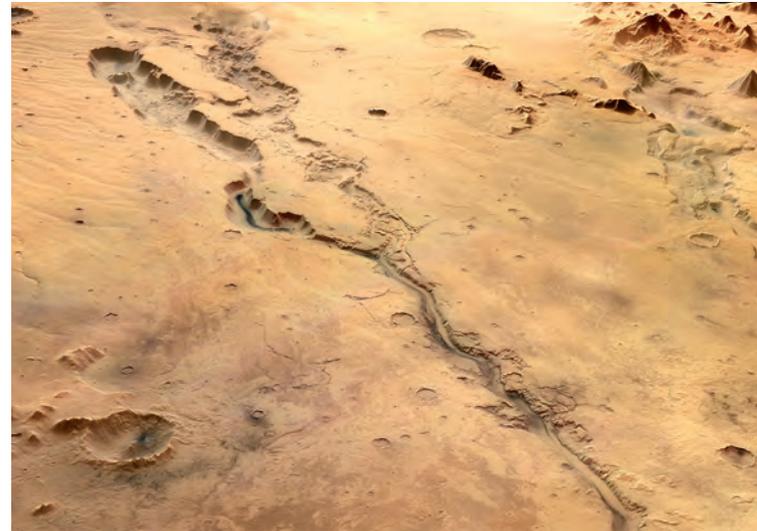


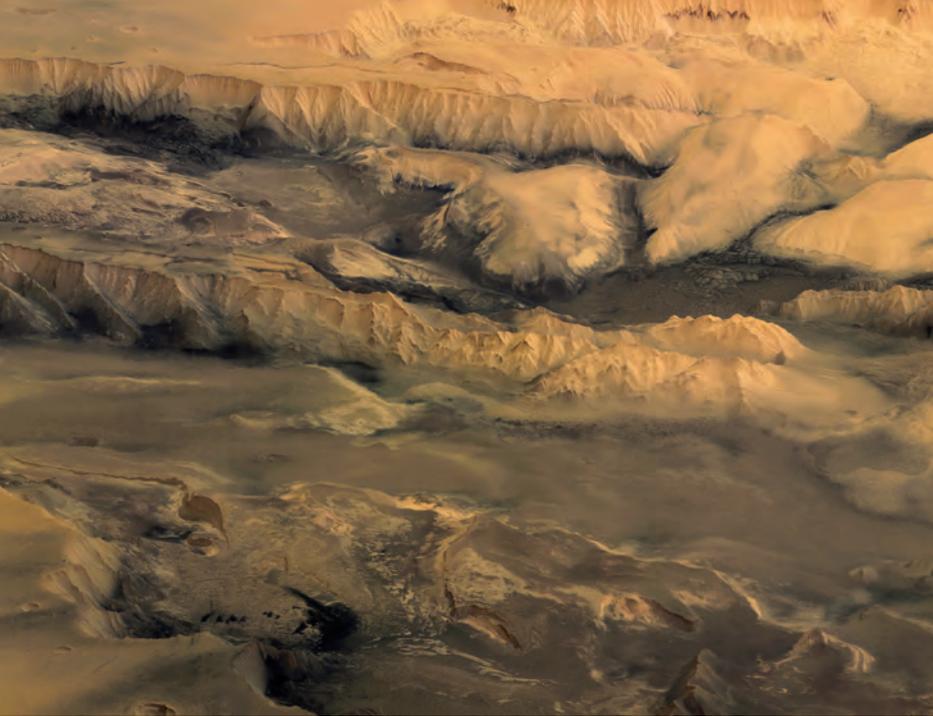
Bild: Blick zum nördlichen Rand des Kraters Cabeus, aufgenommen vom Lunar Reconnaissance Orbiter, Ziel der Sonde LCROSS, die dort 2009 eingeschlagen ist.
(© NASA/GSFC/Arizona State University)



Fakten

Mars	Masse	$6,4185 \times 10^{23}$ kg
	Radius	3397 km
	Dichte	$3,934 \text{ g/cm}^3$
	Rotationsperiode	26,62 h
	Orbitalperiode	687 Tage
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$227,9 \times 10^6$ km
Phobos	Masse	$1,063 \times 10^{16}$ kg
	Größe	$26,8 \times 22,4 \times 18,4$ km
	Dichte	$2,0 \text{ g/cm}^3$
	Orbitalperiode	0,3189 Tage
	Durchschnittliche Entfernung zum Marsmittelpunkt	9378 km
Deimos	Masse	$2,38 \times 10^{15}$ kg
	Größe	$15 \times 12,2 \times 10,4$ km
	Dichte	$1,7 \text{ g/cm}^3$
	Orbitalperiode	1,262 Tage
	Durchschnittliche Entfernung zum Marsmittelpunkt	23.459 km

Bild: Dao und Niger Valles, aufgenommen von Mars Express.
 (© ESA/DLR/FU Berlin, G. Neukum)



MARS

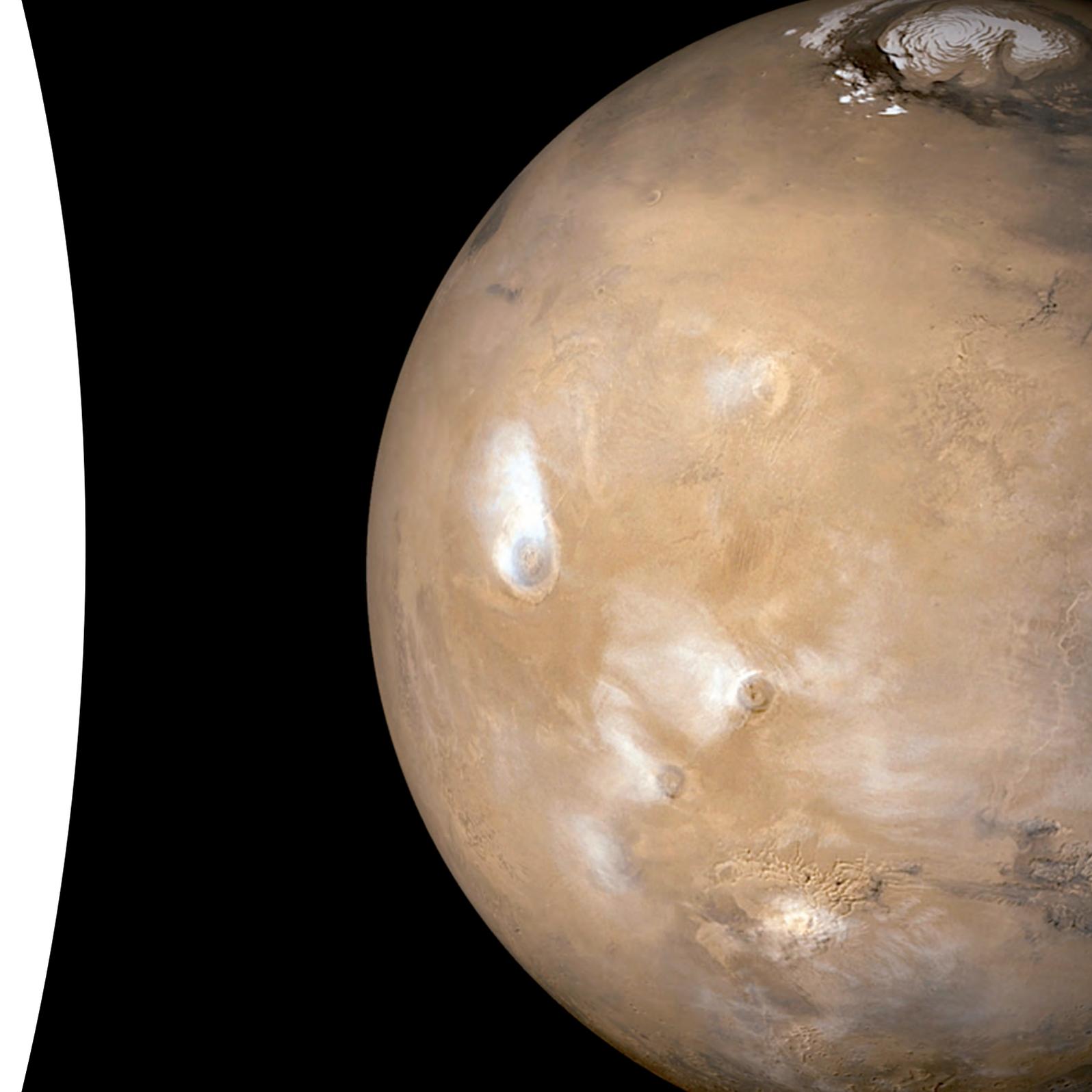
Von der Sonne aus gesehen ist der Mars der vierte Planet. Er ist der Erde in vielem ähnlich. Zwar ist er nur halb so groß wie die Erdkugel und besitzt einen kleineren eisenhaltigen Kern, doch weist der Mars beispielsweise ebenfalls Jahreszeiten auf, die infolge eines längeren Bahnumlaufs um die Sonne jeweils etwa ein halbes Erdenjahr dauern. Auch gibt es auf dem Planeten eisbedeckte Polkappen und eine dünne Atmosphäre. Der Mars hat einen kleinen Eisenkern, über den sich ein Mantel aus eisenreichem silikatischen Gestein wölbt. Es gibt Indizien dafür, dass der Mars in seiner Frühzeit ein – vermutlich aber nur schwaches – Magnetfeld hatte.

Marsbeobachtungen lassen sich bis in die Zeit der frühen Hochkulturen zurückverfolgen. Wegen seiner rötlichen, entfernt an Blut erinnernden Farbe wurde der Planet schon in Ägypten als „Horus der Rote“ und dann im antiken Griechenland nach Ares, dem Gott des Krieges, benannt. Seinen heutigen Namen verdankt der Mars schließlich dem römischen Kriegsgott. 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. Ferner benutzte man den vergangenen Jahrhunderten 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 der Irrtum längst erkannt war, zum Anlass genommen, an eine intelligente Zivilisation auf unserem Nachbarplaneten zu glauben.

Wenngleich man heute mit den Untersuchungen von inzwischen sechs auf dem Planeten gelandeten Sonden keine Lebensformen, ja

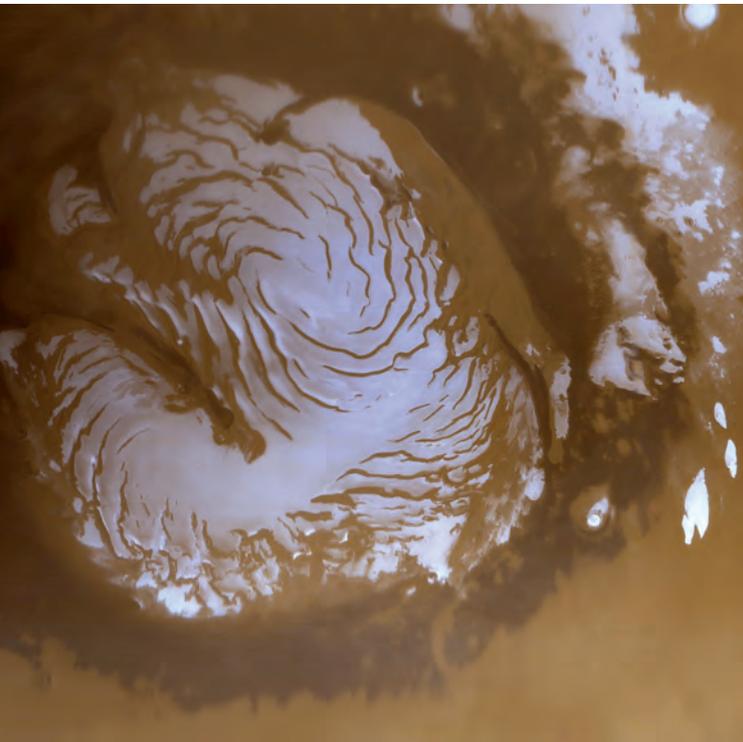
Bild oben: Mars-Express-Mosaik des Zentralteils der Valles Marineris. (© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum))

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)



nicht einmal organische Substanzen auf dem Mars finden konnte, so ist der Rote 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. Die Mission Mars Science Laboratory mit dem Rover Curiosity ist am 6. August 2012 im Krater Gale gelandet und wird in einer mächtigen Sedimentschicht nach Spuren längst vergangener möglicher Lebensräume (Habitate) suchen. Curiosity kann Kohlenstoffverbindungen, aber keine Lebensspuren identifizieren. Das soll dann einige Jahre später eine Mission der ESA mit einem weiteren Rover ermöglichen, der erstmals auch bis zu fünf Meter in die Tiefe bohren kann.

Dank der zahlreichen Marsmissionen wie beispielsweise Mariner 9, Viking 1 und 2, Mars Global Surveyor, Mars Odyssey, Mars Express, oder Mars Reconnaissance Orbiter kennen wir die Oberflächenbeschaffenheit und -formationen recht gut. Grob kann man die



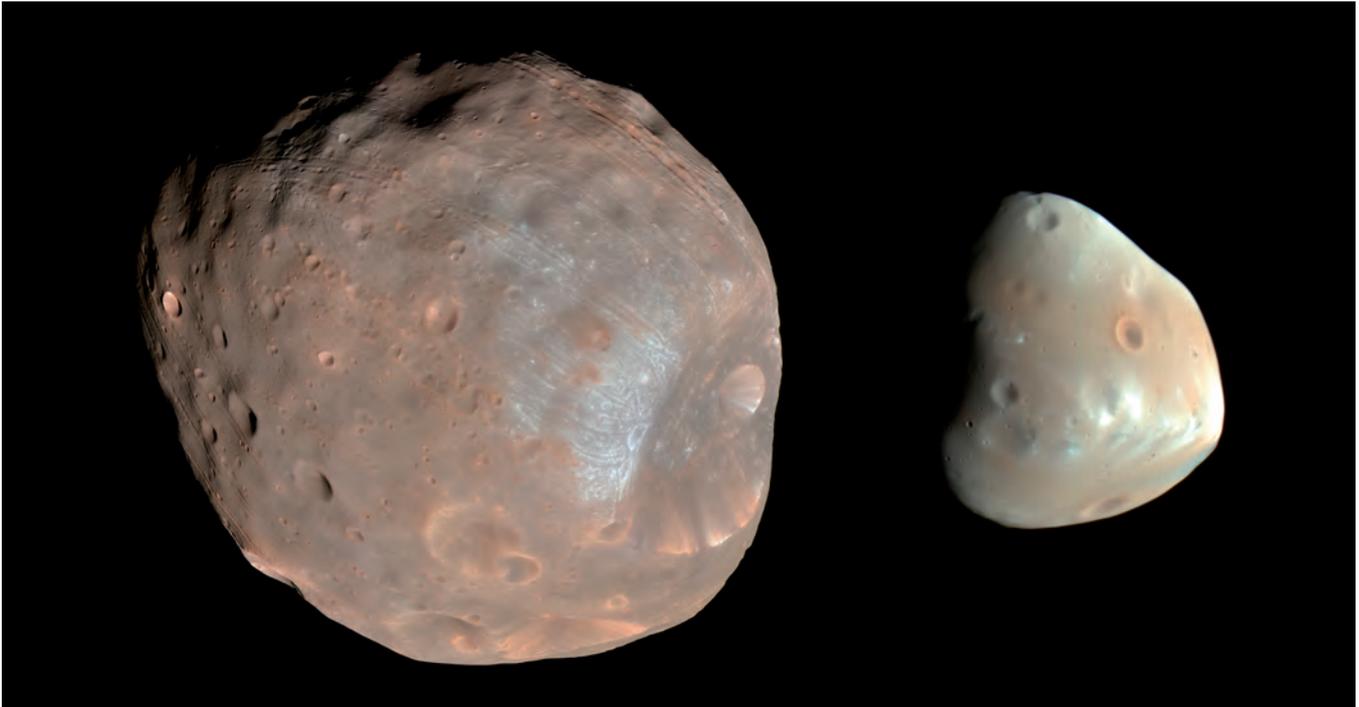
Oberfläche in zwei große Regionen unterteilen: ein nördliches Gebiet mit Tiefebene und ein südliches Hochland mit zahlreichen Einschlagskratern. Besonders auffallend sind in Äquatornähe der 24 Kilometer aus seiner Umgebung herausragende und im Durchmesser 600 Kilometer große Schildvulkan Olympus Mons sowie seine drei nur wenig kleineren Nachbarn Arsia Mons, Ascraeus Mons und Pavonis Mons, die der sechs Kilometer hohen Tharsis-Region aufsitzen.

Markant ist auch das gewaltige Bruchsystem der Valles Marineris (benannt nach der Sonde Mariner 9), das fast 4000 Kilometer lang und bis zu 200 Kilometer breit ist. An den tiefsten Stellen sind die Grabenbrüche fast elf Kilometer tief. In der südlichen Hemisphäre befinden sich mit dem Hellas- und dem Argyre-Einschlagsbecken die größten heute noch sichtbaren Impaktstrukturen auf dem Mars. Die Polkappen sind je nach Jahreszeit mit einer dicken Schicht aus Wasser- und/oder Kohlendioxidis bedeckt. Die Temperaturen können tagsüber im Sommer in Äquatornähe bis nahe +27 Grad Celsius ansteigen, in winterlicher Marsnacht an den Polen dagegen bis auf -133 Grad Celsius abfallen. Die Tagesdurchschnittstemperaturen am Äquator liegen unterhalb des Gefrierpunkts.

Vulkanismus prägte den Planeten während eines großen Teils seiner Entwicklung. An vielen Stellen wurden auf der Oberfläche Mineralien identifiziert, die typisch für basaltischen Vulkanismus sind. Dies ist auf den erdähnlichen Körpern des Sonnensystems die häufigste Art von Vulkanismus: Auf der Erde sind einige der größten Vulkane, wie etwa die Inselgruppe von Hawaii, basaltischer Natur, vor allem aber bestehen die Ozeanböden aus diesem eisen- und magnesiumreichen Gestein. Basalte entstehen, wenn relativ ursprüngliches Material des Planetenmantels teilweise zu Magma aufgeschmolzen wird, in großen Blasen aufsteigt und an der Oberfläche als Lava austritt. Man geht davon aus, dass die Marskruste im wesentlichen aus Basalt besteht, der allerdings durch Prozesse wie Meteoriteneinschläge, Verwitterung und Abtragung verändert und vielerorts nicht mehr in seinem ursprünglichen Kontext vorhanden ist.

Die heute erloschenen Vulkane selbst sind nur noch an einigen Stellen gehäuft zu finden. Die größte vulkanische Provinz ist Tharsis, in der etwa ein Dutzend große und Hunderte kleiner Vulkane entdeckt wur-

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



den, deren Aktivität bis in die jüngste Marsvergangenheit reichte. Eine andere vulkanische Region ist Elysium, wo einige Lavaströme wahrscheinlich erst vor wenigen Millionen Jahren erkaltet sind, was in geologischem Maßstab praktisch gegenwärtig ist und die Frage aufwirft, ob Mars vulkanisch möglicherweise stellenweise noch aktiv ist.

Außer durch Vulkanismus wurde die Marsoberfläche auch von tektonischen Prozessen geformt. Zahlreiche Störungen, wie bruchhafte Verformungen der Lithosphäre (der spröden äußeren Planetenhülle) sind auf den Satellitenbildern zu beobachten. Schwärme von Störungen können oft mehrere hundert oder sogar tausend Kilometer lang werden. Sowohl Dehnungs- als auch Einengungsstörungen sind bekannt, aber nur wenige Seitenverschiebungen. Das ist nicht überraschend, da diese auf der Erde vor allem durch die Plattentektonik verursacht werden. Mars dagegen ist ein „Einplatten-Planet“, dessen Lithosphäre nicht wie die der Erde aus vielen einzelnen Platten besteht, die sich gegeneinander verschieben.

Die Oberfläche des Mars wurde durch fluviatile (durch Wasser), glaziale (durch Eis und Gletscher) und aeolische (durch Wind) Prozesse unterschiedlicher Intensität und Dauer geformt und überprägt. Verzweigte Talsysteme erstrecken sich über weite Gebiete und zeugen von der ehemaligen Aktivität des Wassers auf dem Mars. Eines der bekanntesten Talsysteme ist Ma'adim Vallis, das in den Einschlagskrater Gusev entwässerte, in dem der Marsrover Spirit nach Spuren von Wasser suchte. Neben fließenden Gewässern gab es aber auch Kraterseen, die mit Wasser gefüllt waren. Sie werden heute Paläoseen genannt und gehen oft mit Deltas, charakteristischen Mineralablagerungen und Ein- bzw. Ausflussrinnen einher. Eine kurzzeitige Mobilisierung von Wasser in jüngerer Vergangenheit in Verbindung mit Schlamm- oder Schuttströmen könnte die charakteristischen Erosionsrinnen verursacht haben, die an vielen Kraterhängen zu finden sind.

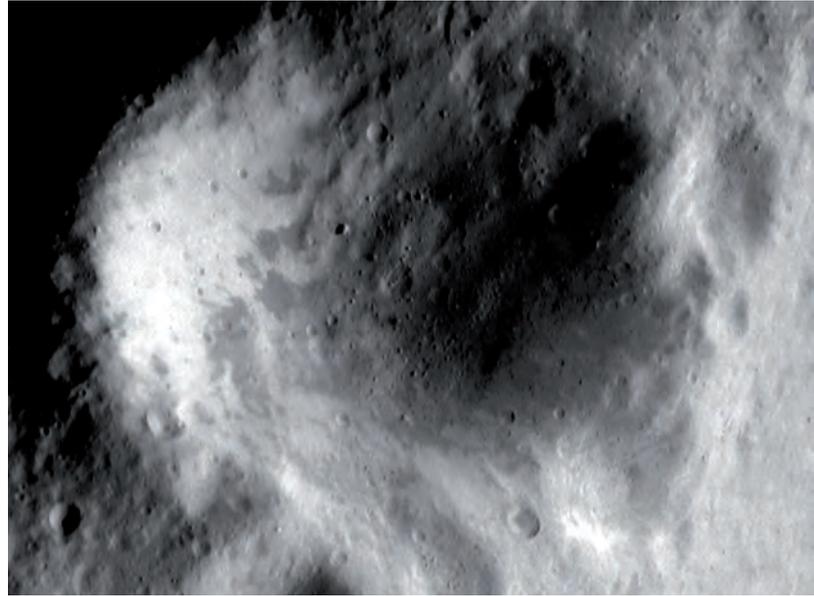
Bild: Marsmonde Phobos (links) und Deimos (rechts).
(© NASA/JPL-Caltech/University of Arizona)

Spuren von glazialen Prozessen, die bis in die jüngste Vergangenheit des Mars reichen, sind in an vielen Stellen der Marsoberfläche zu beobachten. Zum Beispiel findet man an den nordwestlichen Hängen der großen Tharsis-Vulkane Fließstrukturen, die an schuttbedeckte Blockgletscher erinnern, wie sie in Gebirgen und polaren Regionen der Erde beobachtet werden. Sie werden als Überreste von Gletschern auf dem Mars interpretiert. Viele Oberflächenphänomene vor allem in den mittleren und höheren geographischen Breiten ähneln periglazialen Strukturen in Permafrostgebieten auf der Erde. Tatsächlich wurde an einigen Stellen Eis in geringer Tiefe nachgewiesen.

Weitverbreitete dunkle Dünen zeugen von der Aktivität des Windes auf dem Mars, die früher einmal, als die Atmosphäre noch dichter war, von viel intensiverer Wirkung war als heute. Vergleichsweise riesige Dünenfelder kann man vor allem im Inneren von Einschlagskratern finden. Anders als auf der Erde bestehen diese Dünen aus Quarzsand, sondern aus vulkanischer Asche, die vor etwa drei bis vier Milliarden Jahren abgelagert worden war. Heute zeigt sich die Windaktivität vor allem eindrucksvoll in Form von Staubstürmen und Windhosen, so genannten „Staubteufeln“, die sich mit hoher Geschwindigkeit über die Marsoberfläche bewegen. Wie bei der Venus besteht die Marsatmosphäre überwiegend (zu 95 Prozent) aus Kohlendioxid (CO₂); der Druck an der Oberfläche beträgt jedoch im Mittel nur sechs Millibar (auf der Erde 1013 Millibar). In der Marsatmosphäre können sich Wolken aus Wassereis und CO₂-Eis sowie jahreszeitlich bedingt gewaltige Stürme entwickeln, die Sand und Staub bis in eine Höhe von 50 Kilometern aufwirbeln und über den ganzen Planeten verteilen, was zu einer gelbbraunlichen Trübung des Himmels und ausgedehnten Dünenfeldern führt. Viele Staubstürme sind regional begrenzt, doch alle fünf bis zehn Jahre können sie globale Ausmaße annehmen. Spektrometer an Bord der Raumsonde Mars Express entdeckten in der Atmosphäre über einigen der großen Vulkanprovinzen Spuren der Gase Methan und Formaldehyd, was Spekulationen Nahrung gab, dass Wärme im Innern dieser Vulkane noch vorhanden ist die Ursache für die Freisetzung dieser Gase ist.

Marsmonde

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 Gullivers Reisen von zwei Marsmonden sprach. Weder die Titius-Bodesche Regel noch die Regel zur Anzahl von Monden an den einzelnen Planeten ist universell gültig.

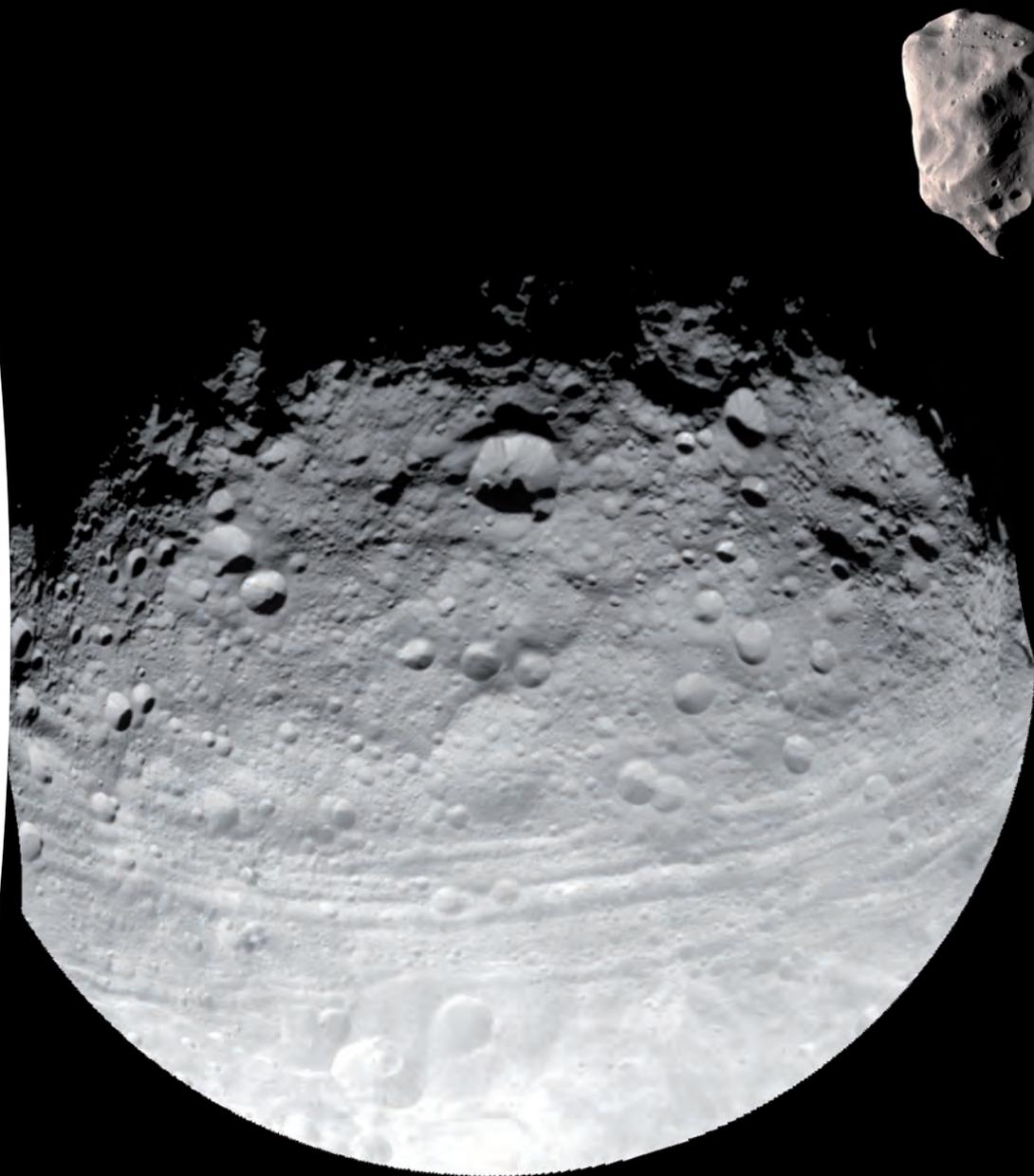


Die beiden Marsmonde Phobos und Deimos, 1877 von Asaph Hall entdeckt, zeigen einige Ähnlichkeiten. Beide besitzen eine sehr unregelmäßige Form und haben eine sehr dunkle Oberfläche, die nur etwa fünf Prozent des Sonnenlichts reflektiert. Phobos weist einige Einschlagkrater auf, von denen Stickney mit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

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

Bild rechte Seite: Asteroid Vesta (links) im Größenvergleich mit Lutetia, Mathilde, Ida, Eros, Gaspra, Šteins und Anfrank (von oben nach unten). (© NASA/JPL-Caltech/JAXA/ESA)





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, die den Mond eingehend untersuchen sollte, scheiterte bei ihrem Start Ende 2011.

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

ASTEROIDEN

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 neue „Wandelstern“ entpuppte sich als kleiner Planet, und Piazzi nannte ihn nach der Göttin der Vegetation und Schutzheiligen Siziliens, Ceres.

Die Vorgeschichte der Entdeckung der ersten Asteroiden ist – gerade aus deutscher Sicht – insofern interessant, da sie die Erkundung des Sonnensystems und die Entdeckung und Erforschung der Asteroiden nachhaltig beeinflusste. Im Jahre 1781 entdeckte William Herschel einen neuen Planeten, den Uranus. Dies löste die Frage nach weiteren Mitgliedern in der Planetenfamilie aus. Die beiden deutschen Forscher Johann Daniel Titius und Johann Elert Bode stellten eine einfache mathematische Formel auf, mit der sie die Abstände der Planetenbahnen von der Sonne beschreiben. Der neuentdeckte Uranus passte recht gut in diese so genannte Titius-Bode-Reihe und wurde als „Beweis“ für die Richtigkeit der Formel angesehen. Aber nicht nur das: Es wurde auch ein weiterer Planet zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter vorhergesagt, den es nun zu finden galt.

Daher organisierte Franz Xaver von Zach von der neuen Sternwarte bei Gotha aus die sogenannte „Himmelspolizey“: Der Himmel wurde in 24 Zonen eingeteilt, die von verschiedenen europäischen Sternwarten systematisch abgesucht werden sollten, um den vermeintlich fehlenden Planeten aufzuspüren. Als sich herausstellte, dass die Bahn des ‚Planetens‘, den Piazzi entdeckt hatte, auch noch den vorherberechneten Abstand von der Sonne aufwies, war die Freude riesengroß. Doch diese hielt nicht lange an: im Frühjahr 1802 entdeckte Heinrich Wilhelm Olbers in Bremen einen weiteren Planeten auf einer ähnlichen Bahn um die Sonne. Zwei Jahre später fand Karl Ludwig Harding in Lilienthal noch einen und schließlich entdeckte 1807 wieder Olbers einen weiteren; sie wurden Pallas, Juno und Vesta getauft. Und es gab noch ein weiteres Problem: Alle vier waren viel zu klein! Sie konnten mit dem bloßen Auge gar nicht beobachtet werden, wa-ren also nur im Fernrohr sichtbar.

Doch man hatte recht bald eine erste Erklärung für diese Vielzahl von kleinen ‚Planetens‘. Es handele sich um Bruchstücke eines größeren Körpers, der irgendwie zerstört worden sei. Heute wissen wir, dass sich nie ein größerer Planet zwischen Mars und Jupiter gebildet hat. Neueste Theorien der Entstehung und frühen Entwicklung des



Planetensystems deuten eher darauf hin, dass sich die Planeten nicht dort gebildet haben wo wir sie heute finden, sondern nach ihrer Entstehung „gewandert“ sind. Der Grund: die Wechselwirkung der rasch wachsenden Planeten mit dem zunächst noch vorhandenen Rest an Gas der zirkumsolaren Akkretionsscheibe sowie die gegenseitige Schwerkraftwirkung, vor allem der großen Objekte Jupiter und Saturn. Die Titius-Bodesche-Reihe hat also keinerlei physikalische Bedeutung. Ihre damals postulierte und scheinbar bewiesene Richtigkeit führte aber zur intensiven Suche nach Planeten, was die Entdeckung der Asteroiden zur Folge hatte.

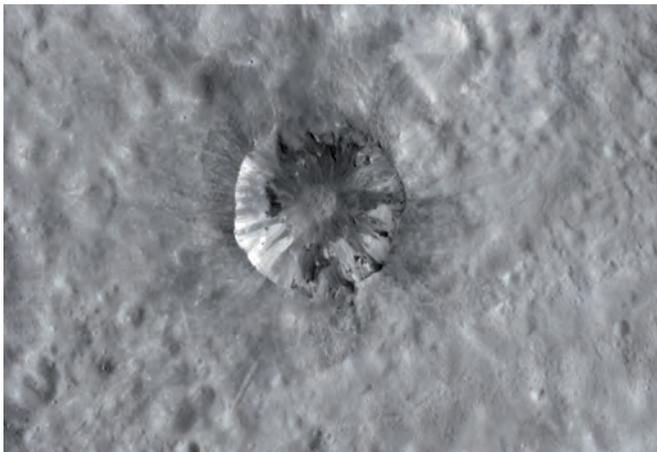
Es dauerte fast 40 Jahre, bis weitere Asteroiden entdeckt wurden, dann aber kamen schnell weitere dazu. Ende des 19. Jahrhunderts waren schon mehrere bekannt. Im Jahre 2013 kennen wir etwa 615.000 Asteroiden, die meisten davon befinden sich zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter im sogenannten Asteroidengürtel.

Bild: Asteroid Vesta mit einem großen Abhang in der Südpolregion, aufgenommen von der Sonde Dawn.
(© NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

tel. Nach unseren heutigen Kenntnissen liegt die Herkunft der meisten Asteroiden in Kollisionen zwischen den ursprünglichen „Bausteinen“ der Planeten. Vor 4,6 Milliarden Jahren war die Sonne noch in der Entstehungsphase und von einer rotierenden Scheibe aus Gas, Eis und Staub umgeben. Sanfte Stöße zwischen den Staubteilchen führten zur Bildung von Staubflocken. Die Ansammlung von Staubflocken ergab immer größere Körper. Nach weiteren Millionen Jahren haben sich kilometergroße Objekte gebildet, die sogenannten Planetesimale, die ursprünglichen Bausteine der Planeten. Kollisionen zwischen Planetesimalen und das weitere Aufsaugen des Restmaterials der Gas- und Staubscheibe führten nach ungefähr 10 bis 100 Millionen Jahren zur Bildung von Planeten. Die Asteroiden und Kometen des heutigen Sonnensystems sind die Überreste des Baumaterials der Planeten.

Wie die Asteroiden im Asteroidengürtel 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 dazu gehörten, dem Planeten Mars irgendwann zu nahe kamen und von ihm eingefangen wurden.

Der Durchmesser der meisten bekannten Asteroiden liegt zwischen 20 und 100 Kilometern. Ceres ist mit einem Durchmesser von etwa 1000 Kilometern das größte Objekt im Asteroidengürtel und wurde



mittlerweile als Zwergplanet eingestuft. Als Ergebnis der häufigen Kollisionen zwischen Asteroiden wird die Population im Asteroidengürtel allmählich zu immer mehr Bruchstücken zerkleinert. Es gibt keine untere Grenze in der Größenverteilung: Abermillionen kieselsteingroße Gesteinsbrocken und Staubteilchen kreisen mit den großen Asteroiden um die Sonne.

Einige Asteroiden haben stark exzentrische Bahnen und kreuzen die Mars-, Erd- oder sogar die Merkurbahn. Insbesondere die erdnahen Asteroiden oder „Near-Earth Asteroids“ (NEAs) werden in jüngster Zeit intensiver studiert, um langfristig ihre Kollisionswahrscheinlichkeiten mit der Erde und deren mögliche Auswirkungen zu bestimmen. Der größte NEA hat einen Durchmesser von etwa 40 Kilometern. Die Anzahl von NEAs mit Durchmessern größer als einem Kilometer beträgt ungefähr 1000. Der Einschlag auf der Erde eines Objekts in dieser Größenklasse würde globalen Auswirkungen haben.

Suchprogramme für Asteroiden

Seit etwa 1980 wurden gezielte Suchprogramme, vor allem am Observatorium auf dem Mt. Palomar in den USA durchgeführt. Ein entscheidender Faktor für die Entdeckung von NEAs war die Erfindung von Digitalkameras (mit CCD-Detektoren) und deren Einsatz in der Astronomie. Mit Hilfe dieser neuen Technik konnten nicht nur viel lichtschwächere und damit auch kleinere Objekte gefunden werden (von denen es viel mehr gibt als von den großen). Auch die Bearbeitung der Bilder konnte jetzt direkt nach der Aufnahme im Computer erfolgen. Durch einen Vergleich der gemessenen Position auf mehreren Aufnahmen, die zu unterschiedlichen Zeiten gemacht wurden, können Asteroiden als Objekte identifiziert werden, die sich vor dem Sternenhimmel bewegen.

Diese neuen Beobachtungsmethoden, verbunden mit der enorm gesteigerten Rechenkapazität der Computer, ermöglichten die Durchführung einer ganzen Reihe von NEA-Suchprogrammen – vor allem in den USA. Die Zahl der bekannten Asteroiden nahm dramatisch zu: im Jahre 2000 waren bereits über 100.000 Objekte bekannt und im November 2011 waren es schon über 570.000. Der treibende Anlass – die Suche nach NEAs – spiegelt sich ebenfalls in Zahlen wider: zur Jahrtausendwende waren 1000 entdeckt,

Bild: Krater Cornelia auf Vesta mit auffälligem hellen und dunklen Material im Inneren.
(© NASA/JPL-Caltech/UCLA/IMP/DLR/IDA)

heute sind es fast 8500. Auch das Institut für Planetenforschung am DLR in Berlin hat an den Suchprogrammen regen Anteil genommen und konnte in Zusammenarbeit mit Sternwarten in Frankreich, Schweden und Italien zwischen 1996 und 2002 fast 4000 neue Asteroiden, vor allem im Hauptgürtel, und sechs neue NEAs entdecken.

Weltweite Beobachtungskampagnen lieferten Messdaten, die zur Bestimmung der Rotationseigenschaften und der Form der beobachteten Körper führten. Messungen in verschiedenen Wellenlängen erlauben es, die Farbe der Oberfläche zu bestimmen und darüber hinaus auch Aussagen über die Oberflächenbeschaffenheit und die mineralogische Zusammensetzung der Körper zu machen. Von besonderer Bedeutung für die Bestimmung der Größe eines Asteroiden sind Messungen der abgegebenen Wärmestrahlung. Man kann daraus nicht nur den Durchmesser errechnen, sondern auch, zusammen mit der gemessenen Helligkeit im sichtbaren Licht, die sogenannte Albedo (das Reflexionsvermögen des Oberflächenmaterials) bestimmen.

Raumsonden an Asteroiden

Die detailliertesten und spektakulärsten Untersuchungen von Asteroiden stammen allerdings von Raumfahrtmissionen. 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 (951) Gaspra und (243) Ida vorbei, warf unter verschiedenen Winkeln Blicke auf deren Oberfläche und entdeckte dabei 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 der etwa 50 Kilometer große Asteroid (253) Mathilde von der amerikanischen Raumsonde NEAR (Near-Earth Asteroid Rendezvous) auf ihrem Weg zum erdnahen Asteroiden Eros besucht, den sie dann ab Februar 2000 ein Jahr lang umrundet hat. Obwohl der Asteroid Mathilde dreimal größer ist als Eros, haben die NEAR-Messungen gezeigt, dass seine Dichte nur halb so groß ist wie die von Eros. Die rätselhafte geringe Dichte von Mathilde, nur 30 Prozent größer als die von Wasser, deutet auf eine merkwürdige poröse Struktur. Möglicherweise ist Mathilde eine lose Ansammlung



von Gesteinsbrocken, einem „Schutthaufen“ ähnlich, dessen Bestandteile bei einer Kollision zweier Asteroiden freigesetzt wurden und nur durch ihre schwache gemeinsame Schwerkraft zusammengehalten werden. Inzwischen gibt es weitere Indizien dafür, dass viele Asteroiden so beschaffen sind.

Ein weiterer kleiner NEA wurde von der japanischen Raumsonde Hayabusa untersucht, die im Mai 2003 zu (25143) Itokawa gestartet wurde. Nach der Ankunft im Jahre 2005 hat Hayabusa detaillierte Bilder und wissenschaftliche Daten von Itokawa geliefert. Das etwa 350 Meter große Objekt hat eine Form wie eine längliche Kartoffel und sieht genauso aus wie Asteroidenforscher sich einen „Schutthaufen“ vorgestellt hatten: wie eine Ansammlung von Kollisionsfragmenten aus einem früheren Zusammenstoß zwischen zwei Asteroiden. Hayabusa hat sogar die Oberfläche von Itokawa berührt und Staubpartikeln gesammelt. Nach einer Reise von über sieben Jahren ist Hayabusa am 13. Juni 2010 zur Erde zurückgekehrt. Eine kleine Rückkehrkapsel, die die Staubpartikel von der Oberfläche zur Erde gebracht wurden, ist in Australien geborgen worden. Es ist die erste

Rückkehr einer Sonde, die zuvor auf einem Asteroiden gelandet war. Von der Analyse der Staubpartikeln konnten wichtige Infor-

mationen über die Mineralogie und Geschichte des Asteroiden abgeleitet werden.

Die Bahn der europäischen Kometensonde Rosetta wurde so gelegt, dass sie am 5. September 2008 am Asteroiden (2867) Šteins und am 10. Juli 2010 am Asteroiden (21) Lutetia vorbeifliegen konnte. Beide Male wurden Nahaufnahmen gewonnen und vor allem vom 100 Kilometer großen Asteroiden Lutetia konnte die Oberfläche in großem Detail kartiert werden. Dieser Asteroid wurde auch von der Erde aus intensiv beobachtet und vermessen.

Die Mission Dawn

Das Studium dieser Körper ist auch 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 amerikanische Raumsonde Dawn (engl. für Morgendämmerung) entwickelt. Sie wurde 2007 auf eine Reise in den Asteroidengürtel geschickt, um zunächst den Asteroiden Vesta zu erforschen, mit etwa 500 Kilometer Durchmesser der drittgrößte und zweit-schwerste Planetoid. Dawn untersuchte Vesta 14 Monate lang aus drei verschiedenen Umlaufbahnen und sendete Bilder der Oberfläche des Körpers sowie Daten zur Beschaffenheit und Struktur des Asteroiden zur Erde.

Dabei stellte sich heraus, dass Vesta eine Art Protoplanet ist, gewissermaßen ein Planet, der in seiner Entwicklung stehen geblieben ist, noch bevor er ein erdähnlicher Planet werden konnte.

Ähnlich dem Mars oder dem Mond ist Vesta differenziert und hat einen kleinen metallreichen Kern, einen Gesteinsmantel und eine Kruste. Spuren von Vulkanismus konnten noch nicht identifiziert werden, obwohl es Hinweise dafür gibt, für die es aber auch andere Erklärungen gibt. Die Oberfläche Vestas ist von den Spuren zahlreicher Kollisionen mit anderen Körpern aus dem Asteroidengürtel geprägt. Ein 500 Kilometer großes Einschlagsbecken am Südpol hätte den Himmelskörper beinahe zerstört. Messungen mit Spektrometern bestätigten, dass eine bestimmte Gruppe von Meteoriten auf der Erde von Vesta oder von Bruchstücken davon stammt. Nach Abschluss der Experimente flog die Sonde zum Zwergplaneten Ceres weiter, den sie 2015 erreichen wird.

Erdbahnkreuzende Asteroiden

Zunehmend genießen die „Near Earth Asteroids“ (NEAs) an Aufmerksamkeit, nicht nur wegen der Einschlagsgefahr, sondern auch, weil bestimmte NEAs interessante Ziele für bemannte Raumfahrtmissionen bieten. Vor allem die NASA betrachtet den Planeten Mars als ein mögliches langfristiges Ziel. Um notwendige technische Erfahrung mit lang andauernden und anspruchsvollen bemannten Raumfahrtmissionen zu gewinnen, sieht die NASA die NEAs als geeignete Sprungbretter auf dem Weg zu diesen Zielen. Manche kleine NEAs sind wegen ihrer erdähnlichen Umlaufbahnen relativ leicht zu erreichen. Darüber hinaus kann man wegen der schwachen Gravitation auf der Oberfläche eines NEA landen und nach dem Besuch wieder ins All starten, ohne große Vorräte an Treibstoff mitnehmen zu müssen.

Fakten

Jupiter	Masse	1,8987 x 10 ²⁷ kg
	Radius (äquatorial)	71.492 km
	Radius (polar)	66.854 km
	Dichte	1,33 g/cm ³
	Rotationsperiode	9,925 h
	Orbitalperiode	11,86 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	778,4 x 10 ⁶ km
Io	Masse	8,93 x 10 ²² kg
	Mittlerer Radius	1821 km
	Dichte	3,55 g/cm ³
	Orbitalperiode	1,769 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	422.000 km
Europa	Masse	4,79 x 10 ²² kg
	Radius	1562 km
	Dichte	3,01 g/cm ³
	Orbitalperiode	3,551 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	671.000 km

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





Evolution nachhaltig beeinflusst haben. Heute ist die Einschlagsrate viel geringer als vor vier Milliarden Jahren, als unser Planet noch in seiner Entwicklungsphase war. Dennoch ist der nächste große Impakt auf der Erde nur eine Frage der Zeit. Deshalb wird untersucht, welche Konsequenzen Einschläge von Asteroiden und Kometen für unsere Erde und andere Planeten haben können. Insbesondere wird dabei auch die Rolle von Impakten für die Entwicklung von Leben studiert.

Heutzutage gibt es immer wieder spekulative Meldungen über Asteroiden, die anscheinend Kurs auf die Erde genommen haben. In Wirklichkeit gibt es kein bis jetzt bekanntes Objekt, das eine unmittelbare Bedrohung für die Erde darstellt. Allerdings haben Astronomen mittels Suchprogrammen bis heute nur einen Bruchteil der gesamten Population der NEAs entdeckt. Zurzeit wird von der NASA die Mission OSIRIS-REx entwickelt, bei der 2016 eine Sonde zum erdnahen Asteroiden 1999 RQ₃₆ (Bennu) starten soll. Neben Untersuchungen mit Kameras und Spektrometern vor Ort soll die Sonde auch landen und etwa 60 Gramm Material vom Asteroiden zur Erde bringen. Japan plant – mit umfangreicher deutscher Beteiligung – eine Wiederholung der Hayabusa-Mission, die 2019 Proben auf dem Asteroiden 1999 JU₃ nehmen und zur Erde bringen soll.

Solche Missionen könnten nicht nur zum Sammeln von raumfahrtbezogener technischer Erfahrung dienen, sondern auch wertvolle wissenschaftliche Daten über die physikalische Eigenschaften von NEAs liefern.

Einschläge von Asteroiden und Kometen auf Planeten sind ein kontinuierliches natürliches Phänomen, das ihre Oberflächen seit der Entstehung der Planeten geprägt hat. Die Umlaufbahn der Erde wird ständig von Asteroiden gekreuzt. Während der Geschichte der Erde ist es immer wieder zu Zusammenstößen gekommen, die die Biosphäre und den Verlauf der

Fakten

Ganymed	Masse	1,48 x 10 ²³ kg
	Radius	2632 km
	Dichte	1,94 g/cm ³
	Orbitalperiode	7,155 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	1.070.000 km
Callisto	Masse	1,08 x 10 ²³ kg
	Radius	2404 km
	Dichte	1,86 g/cm ³
	Orbitalperiode	16,69 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	1.883.000 km

Bild: Galileische Monde und Jupiters Großer Roter Fleck im Größenvergleich. (© NASA/JPL/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 bei etwas mehr Masse 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 1664 bekannten und seither beobachteten Großen Roten Fleck sowie das Bewegungsspiel der vier nach ihrem Entdecker benannten Galileischen Monde sehen.

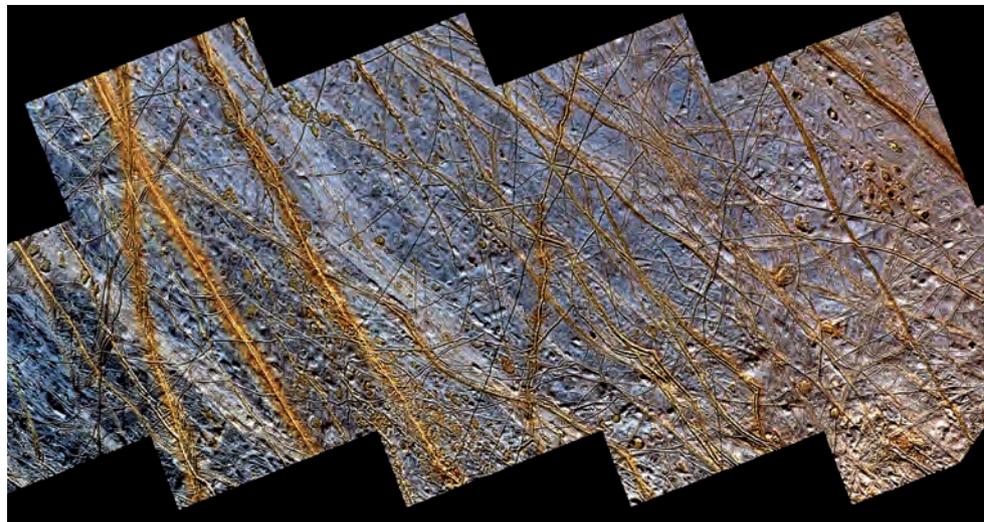
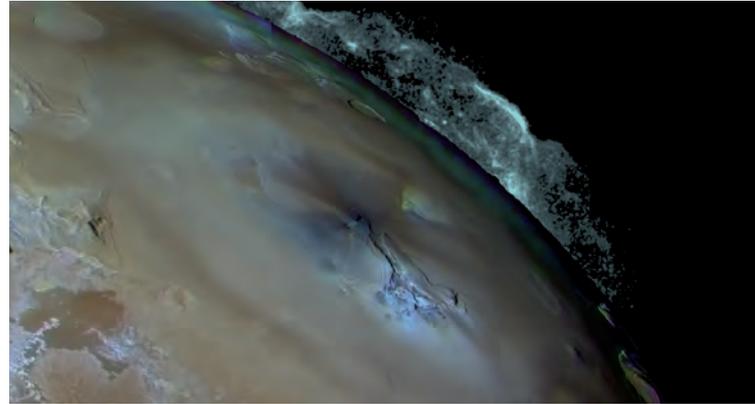


Bild oben: Ausbruch des Vulkans Pele auf Io. Der Auswurf erreicht bis 300 Kilometer Höhe.
(© NASA/JPL/USGS)

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

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 genauen Bahnberechnungen stets berücksichtigt werden muss. Auch nutzt man sein starkes Gravitationsfeld, um Raumsonden auf dem Weg ins äußere Sonnensystem zu beschleunigen und deren Kurs merklich zu ändern (Voyager, Ulysses, Cassini-Huygens, New Horizons). Jupiters äquatorialer Radius (R_J) beträgt 71.500 Kilometer, seine Rotationsdauer liegt bei knapp zehn Stunden. Die hohe Rotationsrate führt zu einer starken Abplattung des Riesenplaneten, die bereits in einem kleinen Fernrohr deutlich sichtbar wird. Der polare Radius Jupiters beträgt 66.850 Kilometer und ist damit etwa 6% kleiner als der Radius am Äquator. Die geringe mittlere Dichte Jupiters von $1,33 \text{ g/cm}^3$ ist auf die hohen Anteile von Wasserstoff und Helium in seinem Innern zurückzuführen.

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. Im Gegensatz zu kleineren Wirbelsystemen ist der GRF seit seiner ersten Dokumentation vor mehr als 300 Jahren stabil. Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Atmosphäre konnten durch spektroskopische Messungen sowohl von der Erde aus, als auch an Bord von Raumsonden gewonnen werden. Zusätzlichen Aufschluss über die obersten Wolkenschichten Jupiters 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. Die obersten Schichten der dichten Atmosphäre enthalten vorwiegend Wasserstoff (H_2), Helium (He), Ammoniak-Eiskristalle (NH_3), Ammoniumhydrogensulfid (NH_4HS) sowie Wassereis und -tröpfchen (H_2O). Modellen zufolge besteht der Planet zwischen $1,0$ bis $0,75 R_J$ aus einem molekularen Wasserstoff-Helium-Gemisch. Aufgrund des hohen Druckes zwischen $0,75$ und $0,2 R_J$ geht der Wasserstoff in einen metallischen Zustand über. Der elektrisch sehr gut leitende und um den Jupiterkern rotierende metallische Wasserstoff wird als Quelle des enormen Magnetfeld Jupiters angesehen. Nur im Innersten des Planeten ($0-0,2 R_J$) rechnet man mit einem kleinen kompakten Planetenkern von etwa zehnfacher Erdgröße. Weitere Daten über die Atmosphäre, die innere Struktur und das

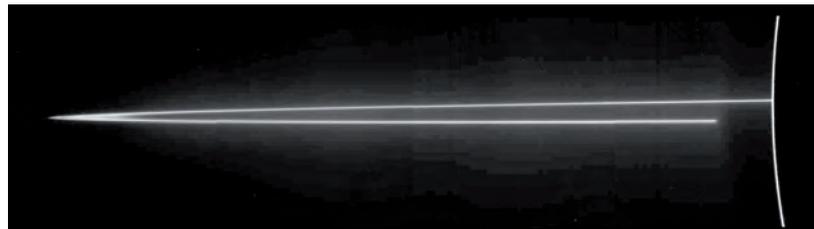
Magnetfeld Jupiters wird die Raumsonde Juno (NASA) liefern, die sich seit August 2011 auf dem Weg zum Jupiter befindet und diesen voraussichtlich 2016 erreichen wird.

Die Jupitermonde

Derzeit sind im Jupitersystem 67 Monde bekannt. Die Monde Io, Europa, Ganymed und Callisto wurden 1610 von Galileo Galilei entdeckt und nach ihrem Entdecker ‚Galileische‘ Monde genannt. 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 sie als einer von mehreren Planeten umrundet.

Io ist der innerste der Galileischen Monde. Sein Volumen und seine Dichte sind dem Erdmond ähnlich. Io umläuft Jupiter in einem Abstand von weniger als sechs Jupiterradien. Infolge der enormen Anziehungskraft des Jupiter und der leichten Elliptizität der Io-Bahn entsteht durch Gezeitenwirkung, die um ein Vielfaches stärker ist als die Wirkung des Mondes auf die Erde, Reibungswärme im Inneren von Io. Aufgrund der gravitativen Wechselwirkung mit den Monden Europa und Ganymed, der sogenannten Laplace-Resonanz, wird Io auf eine leicht elliptische Bahn gezwungen, die die Gezeitenwirkung verstärkt und darüber hinaus über geologische Zeiträume aufrecht erhält. 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 17 Kilometer hohen Berge sowie vulkanisch geschichtete Strukturen bis zu Höhen von 1,7 Kilometern. Io ist ein Körper, dessen Oberfläche durch die vulkanische Aktivität ständig erneuert 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 Jupiters werden starke elektrische

Bild: Jupiters Hauptring im sichtbaren Licht. (© NASA/JPL)



Ströme induziert und dadurch große Mengen der vulkanischen Auswurfprodukte ionisiert, dir unwiderruflich an den interplanetaren Raum abgegeben werden.

Europa ist der zweite der Galileischen Monde und etwas kleiner als der Erdmond. Seine Oberfläche besteht aus Eis und weist kaum Einschlagskrater auf. Die obersten Schichten bestehen vor allem aus Wassereis, das Gesteins- und Mineralfragmente und möglicherweise auch Salze enthält. Die Höhenunterschiede auf Europa sind zwar nicht besonders extrem, dennoch ist die Eiskruste stark strukturiert und zeigt bemerkenswerte Phänomene. Am markantesten sind langgezogenen Bergrücker, die sich über ausgedehnte Ebenen erstrecken und in fast allen mittel- und hochaufgelösten Aufnahmen zu sehen sind. Die häufigsten auf Europa vorkommenden Bergrücken sind die so genannten Doppelrycken (double ridges), die aus zwei parallelen Graten bestehen, zwischen denen ein zentrales Tal verläuft. Außerdem sind Gebiete verbreitet, in denen sich wenige Kilometer bis Zehnerkilometer große Bruchstücke der Ebenen mit Bergrücken auf vermutlich mobilem (plastischem oder sogar teilweise flüssigem) Untergrund durch tektonische Kräfte gegeneinander verschoben haben und in einer Matrix rauen, hügeligen Materials eingebettet sind. Diese Gebiete werden als chaotisches Gebiet (chaotic terrain) bezeichnet, sie erinnern an irdische Eisberge, die im Meer driften und festgefroren sind. Die wenigen Einschlagskrater auf Europa sind, verglichen mit Kratern auf dem Erdmond, verhältnismäßig flach und kommen nur bis zu einem Durchmesser von 45 Kilometern

vor.

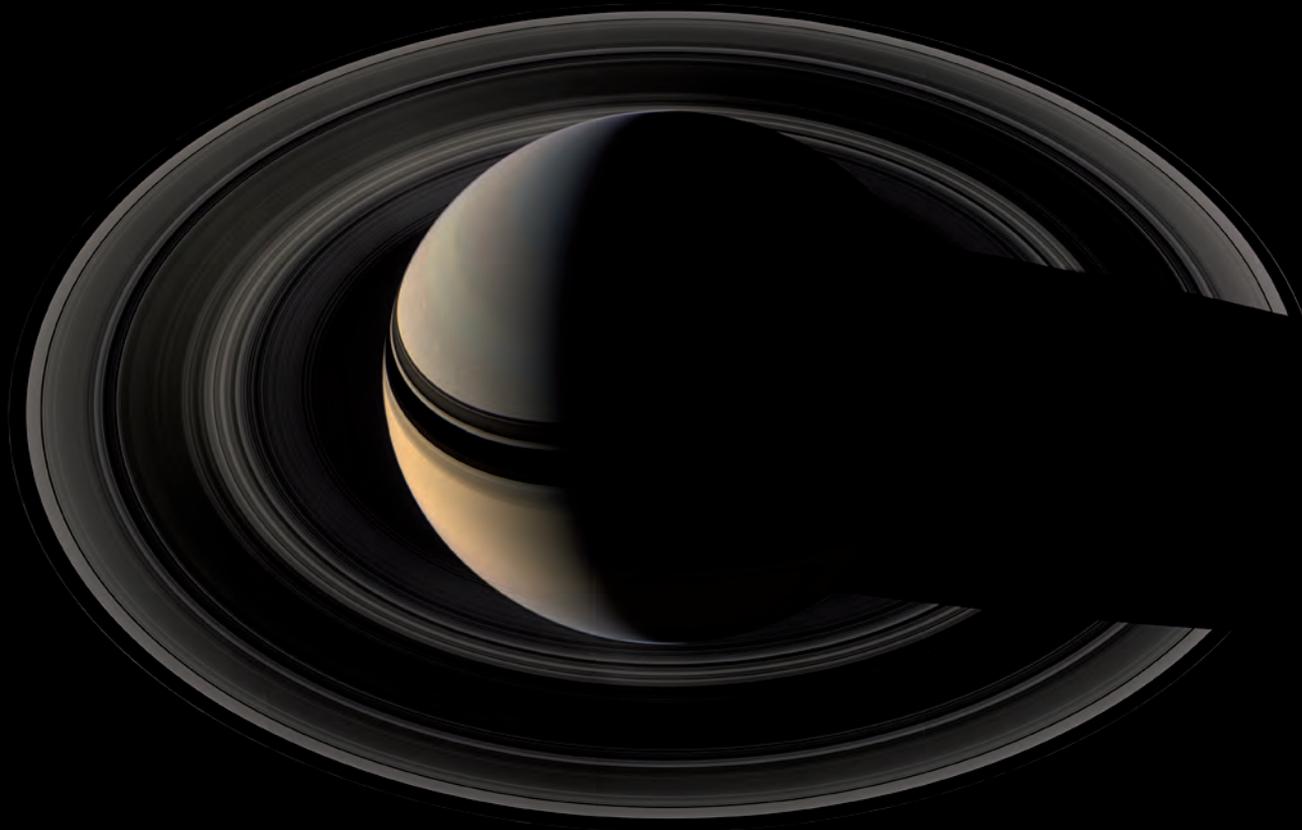
Unter der Eiskruste existiert mit großer Wahrscheinlichkeit ein Wasserozean, der bis zu 200 Kilometer mächtig sein könnte. Die Frage nach der Existenz dieses hypothetischen Ozeans hatte eine so hohe Priorität für die Wissenschaftler, dass die Verlängerung der Galileo-Mission speziell dem Mond Europa gewidmet war. Tatsächlich fand man mit Galileo aufgrund der Wechselwirkung von im Ozean gelösten, elektrisch leitenden Salzen mit dem äußeren Magnetfeld Jupiters indirekt Hinweise auf einen heute existierenden Ozean. Nicht zuletzt aufgrund des Ozeans, der die Wassermenge der irdischen Meere deutlich übertrifft, ist Europa ein bevorzugtes Ziel bei der Suche nach potentiellen Lebensräumen von Organismen außerhalb der Erde.

Ganymed ist der größte und von Jupiter aus gesehen der dritte der Galileischen Monde – mit einem Durchmesser von 5265 Kilometern ist er außerdem der größte Mond im Sonnensystem. Ganymed hat eine niedrige Dichte ($1,942 \text{ g/cm}^3$), was darauf hinweist, dass er einen großen Anteil Wassereis enthält, das mehr als die Hälfte seines Volumens ausmacht. Nahe Vorbeiflüge der Galileo-Sonde an Ganymed bestätigten einen stark differenzierten Aufbau, bestehend aus einem Kern aus Eisen oder Eisensulfid, einem Gesteinsmantel und einer äußeren Eisschicht. Zusätzlich konnte ein Magnetfeld nachgewiesen werden, das durch einen Dynamo im Kern von Ganymed selbst erzeugt wird. Damit ist Ganymed der einzige Mond im Sonnensystem mit einem eigenen Magnetfeld.

Auf der Oberfläche befinden sich

Fakten

Saturn	Masse	$5,688 \times 10^{26} \text{ kg}$
	Radius (äquatorial)	60.268 km
	Radius (polar)	54.364 km
	Dichte	$0,70 \text{ g/cm}^3$
	Rotationsperiode	10,233 h
	Orbitalperiode	29,4 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$1,429 \times 10^9 \text{ km}$
Mimas	Masse	$3,8 \times 10^{19} \text{ kg}$
	Mittlerer Radius	196 km
	Dichte	$1,17 \text{ g/cm}^3$
	Orbitalperiode	0,942 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	185.520 km
Enceladus	Masse	$8,4 \times 10^{19} \text{ kg}$
	Mittlerer Radius	247 km
	Dichte	$1,24 \text{ g/cm}^3$
	Orbitalperiode	1,370 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	238.020 km
Tethys	Masse	$7,55 \times 10^{20} \text{ kg}$
	Mittlerer Radius	523 km
	Dichte	$1,21 \text{ g/cm}^3$
	Orbitalperiode	1,888 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	294.660 km



alte, dunkle, kraterreiche Gebiete, die etwa ein Drittel der Oberfläche einnehmen. Parallele, gebogene Furchen mit einer Breite von einigen Kilometern stellen die Überreste alter, stark abgetragener großer Ringbecken dar, die in der Frühzeit vor mehreren Milliarden Jahren durch Einschläge großer Kometen oder Asteroiden entstanden sind. Zwischen den dunklen Gebieten befinden sich helle, gefurchte Gebiete, das so genannte grooved terrain, die etwa zwei Drittel der Oberfläche bedecken. Diese hellen Gebiete entstanden durch das Wirken tektonischer Kräfte, die von dem dunklen Gebiet ausgingen. Die Oberfläche der hellen Gebiete besteht überwiegend aus relativ reinem Wassereis. Die im Vergleich mit den dunklen Gebieten geringere Kraterdichte in den hellen Gebieten deutet auf ihr jüngeres Alter hin. Die Kraterformen auf Ganymed unterscheiden sich wesentlich von Kratern auf der Mondoberfläche. Krater mit zentralen Mulden sind am häufigsten, während Zentralberge seltener auftreten. Insgesamt sind die Krater auf Ganymed wesentlich flacher als Mondkrater. Eine Sonderform sind helle, pfannkuchenähnliche, fast kreisrunde und sehr flache Gebilde. In Anlehnung an antike, mehrfach beschriebene Manuskripte auf

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

Fakten

Dione	Masse	1,05 x 10 ²¹ kg
	Radius	560 km
	Dichte	1,43 g/cm ³
	Orbitalperiode	2,737 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	377.400 km
Rhea	Masse	2,49 x 10 ²¹ kg
	Radius	765 km
	Dichte	1,33 g/cm ³
	Orbitalperiode	4,518 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	527.040 km
Titan	Masse	1,35 x 10 ²³ kg
	Radius	2575 km
	Dichte	1,88 g/cm ³
	Orbitalperiode	15,9454 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	1.221.850 km
Hyperion	Masse	1,77 x 10 ¹⁹ kg
	Größe	205 x 130 x 112,5 km
	Dichte	1,4 g/cm ³
	Orbitalperiode	21,277 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	1.481.100 km
Iapetus	Masse	1,88 x 10 ²¹ kg
	Radius	730 km
	Dichte	1,21 g/cm ³
	Orbitalperiode	79,33 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	3.561.300 km

Papyrus werden diese eingeebneten Einschlagsstrukturen Palimpseste genannt.

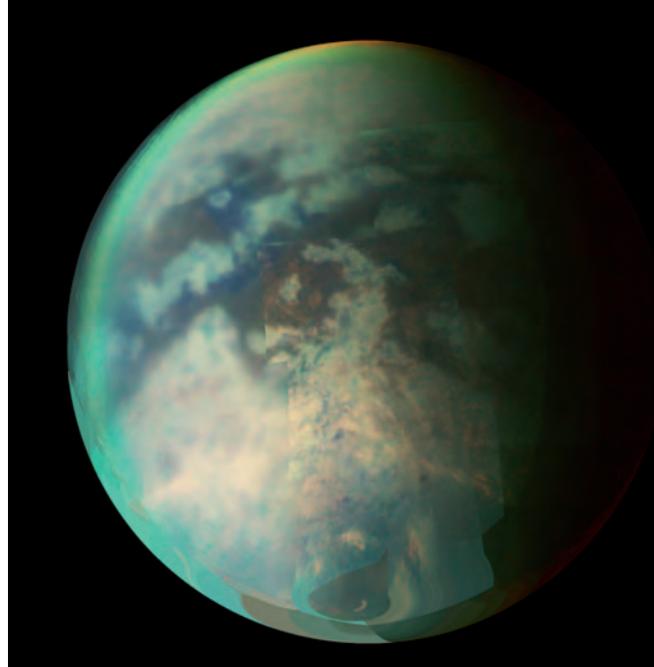
Callisto ist der äußerste der Galileischen Monde und besitzt einen Durchmesser von 4818,6 Kilometern, ist damit nur wenig kleiner als der innerste Planet Merkur. Er hat mit 1,834 g/cm³ die niedrigste mittlere Dichte der vier großen Jupitermonde. Zusammen mit seinem großen Durchmesser deutet das darauf hin, dass auch Callisto große Mengen an Wassereis enthält. Die Oberfläche von Callisto ist mit Kratern übersät, ähnlich den dunklen Gebieten auf Ganymed, und geologisch wenig entwickelt. Daher blieben eine Reihe alter, großer Einschlagsbecken erhalten, die von einer Serie konzentrischer Ringe, überwiegend Furchen, umgeben sind. Das größte derartige Becken ist Valhalla mit einem Gesamtdurchmesser aller Ringe bis zu 4500 Kilometern. In Bildern mit hoher Auflösung erkennt man überall auf der Oberfläche Callistos eine dunkle, pulverartige Deckschicht. Sie entstand mit hoher Wahrscheinlichkeit durch einen Abtragungsprozess, wobei leichtflüchtigere Bestandteile der Eiskruste Callistos, z.B. gefrorenes CO₂, durch die Sonneneinstrahlung sublimierten, so dass sich ein dunklerer Rückstand aus anderen Bestandteilen wie Kohlenstoffverbindungen oder Silikate, auf der Oberfläche anreichern konnte. Bei Callisto handelt es sich heute um einen geologisch inaktiven Körper. Magnetfeldmessungen der Raumsonde Galileo lassen jedoch die Interpretation zu, dass

auch unter der Eiskruste der großen Eismonde Ganymed und Callisto Ozeane existieren. Im Vergleich zu Europas Ozean lägen diese jedoch deutlich tiefer unterhalb einer Eisschicht von etwa 100 Kilometern Tiefe.

Zum Jupitersystem gehören außerdem die Monde Metis, Adrastea, Amalthea, Thebe, Leda, Himalia, Lysithea, Elara, Ananke, Carme, Pasiphae und Sinope und 48 weitere kleine Monde, die zum Teil erst in den letzten Jahren entdeckt wurden. Mit Ausnahme der inneren Monde Metis, Adrastea, Amalthea und Thebe, die den Riesenplaneten innerhalb der Bahn von Io umrunden, befinden sich alle diese Monde weit jenseits der Bahn Callistos auf hoch elliptischen und stark gegen die Äquatorebene Jupiters geneigten Bahnen. Die meisten dieser Monde haben einen Durchmesser von nur wenigen Kilometern und sind daher schwierig aufzufinden.

Ringsystem

Jupiter besitzt außerdem ein äquatoriales Ringsystem, das aus drei einzelnen Ringen besteht. Das Ringsystem ist extrem dunkel und wurde erst beim Vorbeiflug von Voyager 1 im März 1979 in den Bilddaten entdeckt, konnten aber nachträglich in älteren Messdaten der Sonde Pioneer 11 von ihrem Jupiter-Vorbeiflug 1974 ebenfalls identifiziert werden. Der Jupiterringsystem besteht aus drei Teilen: (1) einem Hauptring mit einer radialen Breite von ca. 6000 Kilometern und einer Dicke von weniger als 30 bis 100 Kilometern, innerhalb dem die beiden kleineren Monde Metis und Adrastea kreisen. Klei-



ne, Mikrometer-große Staubteilchen silikatischer und/oder kohligler Zusammensetzung sind die Hauptbestandteile dieses Rings. (2) Dieser Hauptring ist ober- und unterhalb der Ringebene von einem Halo umgeben, der die Form eines 20.000 bis 40.000 Kilometer Dicke messenden Torus besitzt. (3) Den dunkelsten Teil des Jupiter-Ringsystems bilden die beiden so genannten Gossamer-Ringe außerhalb des Hauptrings, deren innerer sich etwa bis zur Bahn des Mondes Amalthea und deren äußerer sich bis zur Thebe-Bahn erstreckt. Die Gossamer-Ringe sind etwa um einen Faktor 30 lichtschwächer als der Hauptring. Als Quelle der Ringpartikel werden neben dem Auswurfmaterial von Io vor allem die kleinen inneren Monde angesehen. Material, welches durch das Bombardement von Mikrometeoriten aufgewirbelt wird, kann nicht gravitativ von diesen massearmen Monden gebunden werden und gelangt so als Ringmaterial in eine Umlaufbahn um Jupiter.

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

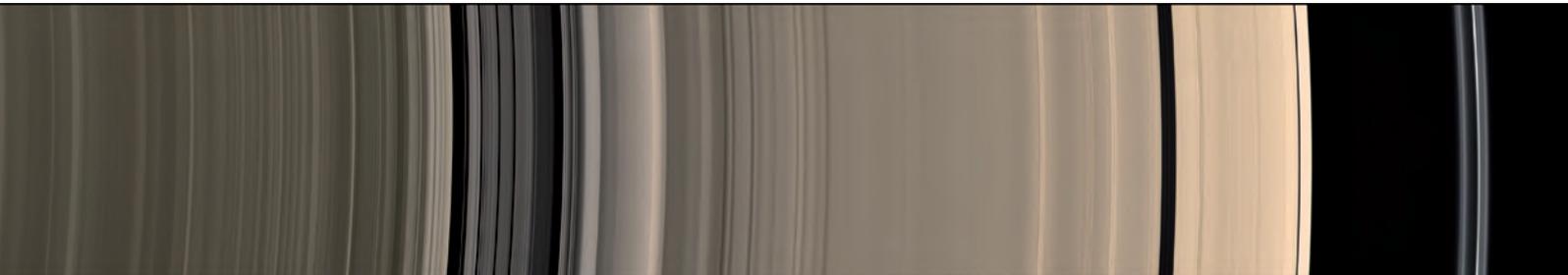
Bild unten: Draufsicht auf das Ringsystem des Saturns. (© NASA/JPL/Space Science Institute)

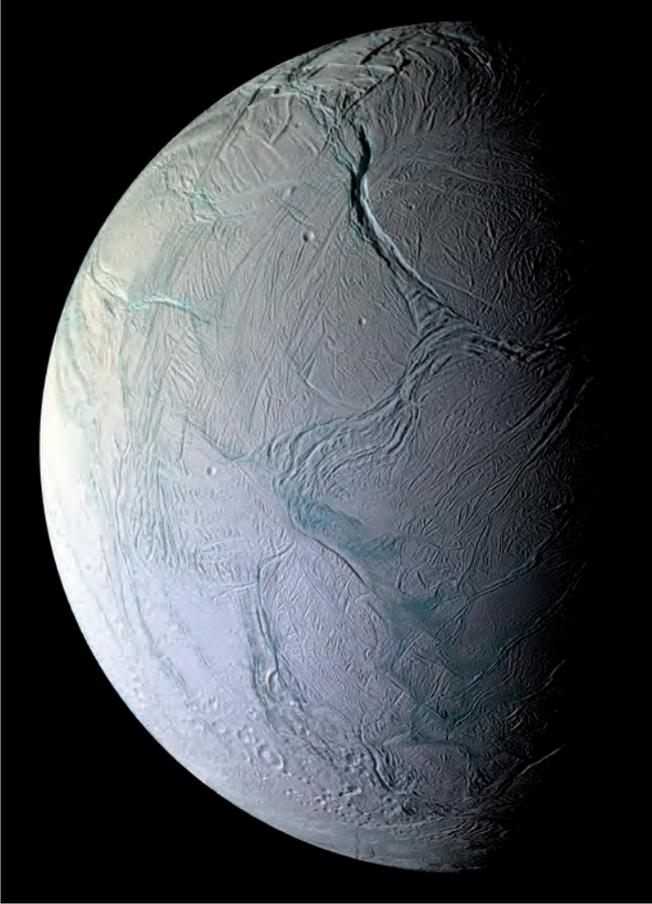
SATURN

Saturn ist mit einem Radius von etwa 60.000 Kilometern der zweitgrößte Planet in unserem Sonnensystem. Es ist der am weitesten entfernte noch mit dem bloßen Auge sichtbare Planet und galt bis zur Entdeckung des Uranus im Jahr 1781 als äußerster Planet. 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 dient auch als eine von mehreren Erklärungen für den berühmten ‚Stern‘ von Bethlehem.

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 viel tiefer, wofür auch die geringe Dichte Saturns von nur $0,70 \text{ g/cm}^3$ spricht, was bedeutet, dass der Saturn sogar leichter als Wasser ist und in einem hypothetischen Riesen-Wasserbecken wie ein Eisberg schwimmen würde. An der Wolkenobergrenze ist die Schwerkraft nur wenig geringer als auf der Erde. Da Saturn sehr rasch rotiert – eine Umdrehung dauert nur rund zehn Stunden – 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.

Die Windgeschwindigkeiten in der Äquatorzone können 500 Meter pro Sekunde erreichen (1800 km/h). Seit 1876 beobachten Astronomen gut alle 30 Jahre in der nördlichen Saturnhemisphäre das Auftreten eines Wirbelsturms, der als Großer Weißer Fleck in die Literatur eingegangen ist und ein jahreszeitlich bedingtes Phänomen ist. Wie Jupiter strahlt der Planetenkörper mehr Wärme ab, als er





von der Sonne empfängt.

Ringsystem

Saturns Ringsystem besteht nach klassischer Einteilung aus sieben Ringgruppen. Sie werden mit zunehmendem Abstand zum Planeten mit den Buchstaben D, C, B, A, F, und G bezeichnet. Ein weiterer Ring, der außerhalb des G-Rings gelegene E-Ring, weist einen von den sechs inneren Ringen abweichenden Entstehungsprozess auf, der in Zusammenhang mit der geologischen Aktivität des Saturnmondes Enceladus steht. Die Buchstaben A bis G (einschließlich E) gehen auf die Reihenfolge der Entdeckung der einzelnen Ringsegmente zurück.

Seit dem Vorbeiflug der Voyager-Sonden 1980/81 ist bekannt, dass Saturn in seiner Äquatorebene, die um knapp 27° gegen seine Bahn-

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

ebene geneigt ist, in Wirklichkeit von über tausend Einzelringen umgeben ist, deren Form, Dynamik und Entstehung seit 2004 von den Instrumenten, insbesondere den beiden Kameras und den Spektrometern auf der Cassini-Sonde näher untersucht werden. Die beiden hellsten und auffälligsten Ringe sind der seit dem 17. Jahrhundert bekannte A- und der B-Ring. Sie sind 14.800 bzw. 25.500 Kilometer breit. Zwischen beiden befindet sich die Cassinische Teilung mit einer Breite von etwa 4500 Kilometern, die weitere, jedoch wesentlich dunklere Ringe enthält. Innerhalb des B-Rings wurde 1850 der 17.500 Kilometer breite C-Ring (auch „crepe“- oder Kreppring genannt) entdeckt. Bei den Vorbeifügen von Voyager 1 und 2 konnte der bereits 1967 vermutete innerste D-Ring mit einer Breite von 8000 Kilometern nachgewiesen werden. Pioneer 11 entdeckte 1979 noch vor den Voyager-Vorbeifügen an Saturn die beiden äußersten Ringe F und G. Der F-Ring ist nur etwa 50 Kilometer breit, während sich der diffuse G-Ring über eine Breite von ca. 7000 Kilometern erstreckt.

Die Größe der Ringteilchen variiert je nach Ring und liegt überwiegend zwischen Staubkorngröße (wenige Mikrometer) und wenigen Zentimetern. Zu über 90% ist der spektral nachgewiesene Hauptbestandteil der Ringe Wasser, zumindest an den Oberflächen der Ringpartikel.

Die Ringe stehen in intensiver Gravitations-Wechselwirkung mit den ihnen nächsten Monden. Die Ringpartikel werden zudem von sogenannten Schäfermonden auf ihrer Bahn gehalten.

Die Fragen nach Entstehung und Alter der Ringe sind nicht zufriedenstellend gelöst. Ihre gesamte Masse entspricht etwa der des 400 Kilometer großen Mondes Mimas. Zum einen könnten die Ringe ein Überbleibsel des Materials sein, aus dem sich Saturn mit seinen Monden vor 4,5 Milliarden Jahren gebildet hat. Eine weitere Erklärung wäre, dass sich an Stelle der Ringe früher ein Mond befand, der von einem Asteroiden oder Kometen getroffen wurde und dabei zerbrach. Weitere Einschläge von Kometen oder Asteroiden und gegenseitige Zusammenstöße zerkleinerten die Eisbrocken nach und nach. Eine dritte Möglichkeit wäre, dass ein Objekt aus dem Kuiper-Edgeworth-Gürtel mit einem Durchmesser von ca. 300 Kilometern so nahe an Saturn vorbeiflog, dass es durch Gezeitenkräfte auseinanderbrach. Die beiden letzteren Ereignisse sind jedoch extrem selten und könnten sich nur in der Frühzeit vor mindestens 4,0 bis 3,8 Milliarden Jahren abgespielt haben, in einer Periode, in der große Einschläge von Kometen und Asteroiden auf den Planeten und ihren Monden erheblich häufiger stattfanden. Im Gegensatz zum angenommenen hohen Alter stehen die dynamischen Prozesse in den



Ringen, die eher auf ein Alter hindeuten, das nur wenige zehn bis hundert Millionen Jahre beträgt.

Die Ringe reichen vier Planetenradien weit in den Raum hinein. Da ihre Bahnebene gegen die Ekliptik geneigt ist, blickt man von der Erde aus meist schräg von oben oder unten auf die Ringebene, sehr selten auch direkt auf die Kante. Die Dicke des Ringsystems beträgt höchstens einen Kilometer, denn in Kantenstellung verschwindet der Ring selbst beim Blick durch die größten irdischen Teleskope. Das letzte Mal konnte der Planet „ohne Ring“ im August 2009 beobachtet werden, als die Erde die Ringebene des Saturn von Süd nach Nord kreuzte und gleichzeitig Cassini diese ungewöhnliche Beleuchtungssituation zu wichtigen Messungen in der Ringebene nutzen konnte.

Saturnmonde

Saturn wird von neun verhältnismäßig großen Monden umkreist, von innen nach außen Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion, Iapetus und Phoebe, die alle schon bekannt waren, bevor Pioneer 11 als erste Raumsonde im Jahr 1979 an Saturn vorbeiflog. Etwa ein Jahr zuvor konnten sowohl der zehnte als auch der elfte kleinere Mond, die bereits 1966 entdeckt worden waren, zwei fast auf derselben Umlaufbahn befindlichen Monden zugewiesen werden, die als so genannte ko-orbitale Monde die Namen Janus und Epimetheus erhielten und innerhalb der Mimas-Bahn um Saturn kreisen. Pan, Atlas, Prometheus und Pandora sind einige der so genannten Ring-Schäfermonde, die bei den Vorbeiflügen von Voyager 1 und 2 entdeckt wurden. Vor dem Vorbeiflug von Voyager 1 entdeckte man auch mit Teleskopen die beiden kleinen Monde Telesto und Calypso,

die als so genannte Lagrangesche Monde oder ‚Trojaner‘ auf der selben Bahn wie Tethys kreisen, jedoch um einen Winkel von 60°

(bezogen auf Saturn im Kreiszentrum) Tethys voran bzw. nachlaufen. Im selben Jahr fand man ebenfalls auch einen Trojaner des Mondes Dione, der Helene benannt wurde und 60° vor Dione um Saturn kreist. Weitere 42 kleine Monde wurden seit 1980 entdeckt, zum einen von Cassini aber auch mit Hilfe erdgestützter Teleskope.

Titan ist mit einem Durchmesser von 5150 Kilometern der größte Saturnmond und nach dem Jupitermond Ganymed der zweitgrößte Mond im Sonnensystem. Er wurde im Jahre 1655 von Christiaan Huygens entdeckt. Seine Dichte ist mit 1,88 g/cm³ die höchste aller Saturnmonde, neben Eis weist Titan in seinem Inneren einen hohen Anteil schwerer Stoffe z.B. in Form von Silikaten auf. Er ist der einzige Satellit im Sonnensystem mit einer dichten, ausgedehnten Atmosphäre, die eine rötlich-orange Färbung besitzt. Titans Gashülle besteht hauptsächlich aus Stickstoff, mit Spuren von Methan, Ethan, Acetylen, Propan, Diacetylen, Methylacetylen, Wasserstoff, Cyanid, Cyanoacetylen, Kohlendioxid und -monoxid. Titan und Erde sind die einzigen Körper im Sonnensystem, deren Atmosphäre hauptsächlich aus Stickstoff besteht. Die Atmosphäre ist im sichtbaren Licht undurchsichtig und verhüllt daher die Oberfläche. Lediglich Sensoren, die im infraroten Spektralbereich lichtempfindlich sind, wie das auf Cassini eingesetzte abbildende Spektrometer VIMS, und Radar, können die Oberfläche abbilden und im Detail kartieren. Titan war das Ziel der europäischen Landesonde Huygens, die am 25. Dezember 2004 von der Muttersonde Cassini abgetrennt wurde, am 14. Januar 2005 mehrere Stunden am Fallschirm

durch die Titanatmosphäre schwebte und schließlich auf der Oberfläche des rätselhaften Saturnmondes landete.

Die Oberflächenformen von Titan ähneln in manchen Hinsicht denen der Erde. Allerdings besteht die Titanoberfläche überwiegend aus Eis. Die wenigen Einschlagskrater deuten auf eine besonders junge Oberfläche hin. Manche Gebiete scheinen durch intensive Erosion verändert zu sein, ähnlich den

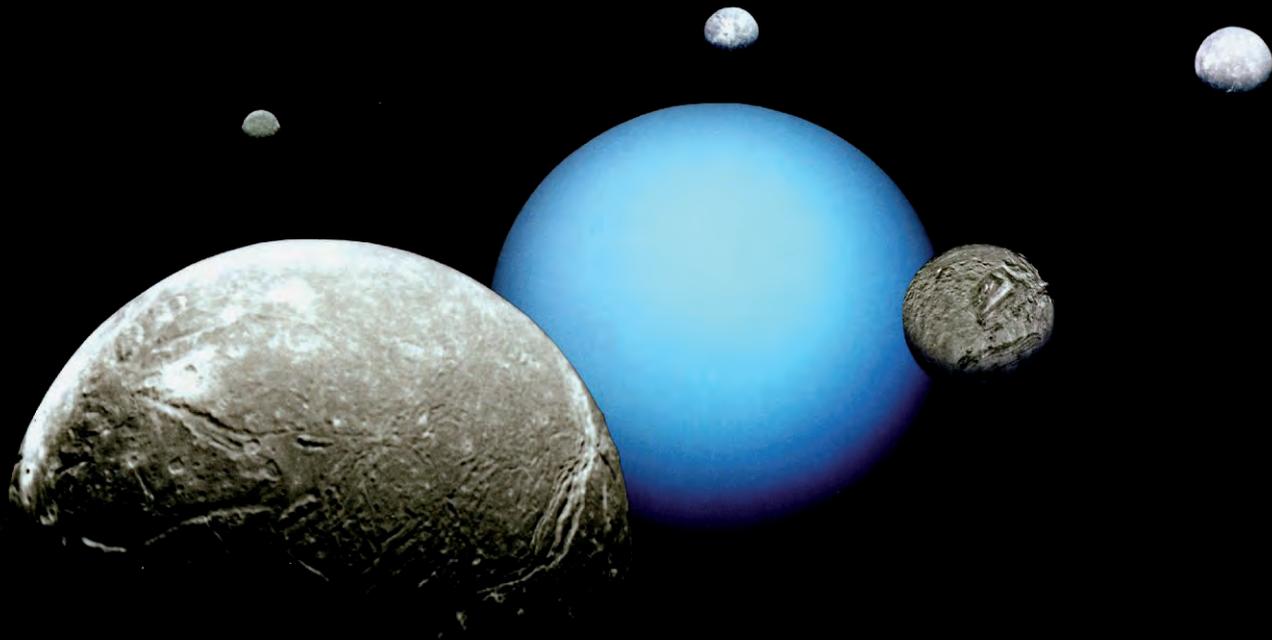
Langgestreckte Bergrücken, Calderen und annähernd kreisrunde, schildförmige Gebilde, ähnlich den Vulkanen auf Hawaii, deuten auf tektonische und vulkanische Aktivitäten hin. Cassini-Huygens konnte Flusstäler auf Titan nachweisen, die in Seebecken münden. Anders als auf der Erde fließt auf der rund -160° C kalten Titanoberfläche darin jedoch kein Wasser, sondern ein Gemisch aus flüssigem Methan und Ethan. Huygens landete in einem ausgetrockneten Seebecken, in das mehrere solcher Flusstäler münden. Durch Cassini-Beobachtungen von spiegelnden Oberflächen konnte gezeigt werden, dass einige der ‚Seen‘ mit flüssigen Kohlenwasserstoffen gefüllt sind.

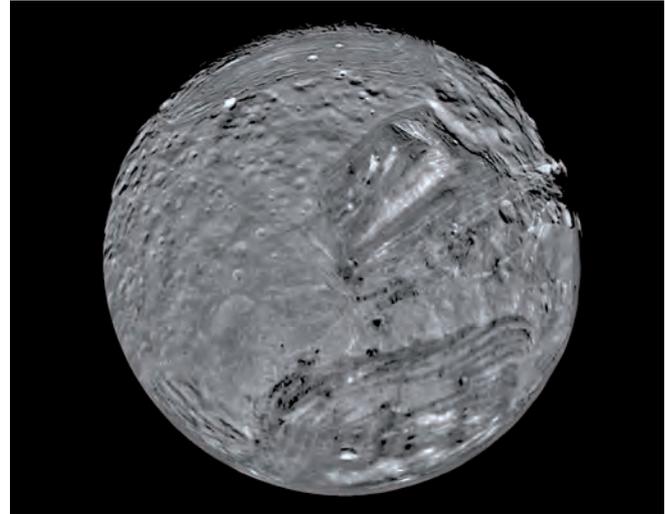
Mimas hat einen Durchmesser von 396 Kilometern und ist der innerste der neun großen Saturnmonde.

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

Fakten

Uranus	Masse	8,684 x 10 ²⁵ 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 x 10 ⁹ km
Miranda	Masse	6,6 x 10 ¹⁹ kg
	Dichte	1,15 g/cm ³
	Radius	240,4 x 234,2 x 232,9 km
	Orbitalperiode	1,413 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	129.872 km
Ariel	Masse	1,35 x 10 ²¹ kg
	Dichte	1,56 g/cm ³
	Radius	581,1 x 577,9 x 577,7 km
	Orbitalperiode	2,52 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	190.945 km
Umbriel	Masse	1,17 x 10 ²¹ kg
	Dichte	1,52 g/cm ³
	Radius	584,7 km
	Orbitalperiode	4,144 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	265.998 km





Zu einem großen Teil besteht er aus Eis. Entdeckt wurde Mimas 1789 von William Herschel. Seine mittlere Dichte liegt mit $1,15 \text{ g/cm}^3$ nahe der von Wassereis. Die Oberfläche ist dicht mit Einschlagskratern übersät. Größere Krater (über 20 Kilometer Durchmesser) haben Zentralberge; der markanteste ist der Krater Herschel mit einem Durchmesser von etwa 130 Kilometern. Dieser Krater ist zehn Kilometer tief und hat einen 6000 Meter hohen Zentralberg.

Enceladus (504 Kilometer Durchmesser) ist der zweitinnerste der großen Saturnmonde und wurde wie Mimas von William Herschel 1789 entdeckt. Seine Oberfläche weist stark unterschiedliche Gebiete auf: altes Kratergelände, teilweise mit abgetragenen oder

tektonisch verformten Kratern, glatte Ebenen mit wenig Kratern und gefurchte Ebenen mit parallelen Spalten bis zu einer Tiefe von einem Kilometer. Schon vor der Cassini-Mission vermutete man, dass Enceladus für die Entstehung des diffusen E-Rings verantwortlich ist, da dieser entlang der Umlaufbahn des Mondes seine größte Partikeldichte hat. In den Cassini-Kameradaten konnte schließlich zweifelsfrei

nachgewiesen werden, dass am Südpol von Enceladus so genannter Kryovulkanismus auftritt, der eishaltiges Material aus Spalten fördert, welches sich entlang der Umlaufbahn des Mondes verteilt. Vermutlich sind Gezeitenkräfte für die vulkanischen Aktivität verantwortlich. Nach der Erde, dem Jupitermond Io und dem Neptunmond Triton ist Enceladus damit der vierte Körper im Sonnensystem, auf dem ein aktiver, anhaltender Vulkanismus nachgewiesen werden konnte. Der vom Enceladus-Vulkanismus erzeugte E-Ring erstreckt

Fakten

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

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

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

sich radial und vertikal am weitesten von allen Saturnringen und reicht nach innen bis zur Mimas- und nach außen bis zur Titan-Bahn. Wie Titan und Phoebe enthält Enceladus neben Eis einen verhältnismäßig hohen Anteil schwerer Stoffe am Gesamtaufbau, wie die für einen Eismond recht hohe Dichte von $1,61 \text{ g/cm}^3$ zeigt.

Tethys, im Jahr 1684 von Giovanni Cassini entdeckt, hat einen Durchmesser von 1066 Kilometern. Der Körper weist eine mittlere Dichte von $0,97 \text{ g/cm}^3$ auf und ist somit leichter als Wassereis. In mancherlei Hinsicht ähnelt der Mond Mimas: die Oberfläche ist ebenfalls sehr dicht mit Einschlagskratern bedeckt, darunter das mehrere hundert Kilometer großes Einschlagsbecken Odysseus, ähnlich dem Herschel-Becken auf Mimas. Ein großes Grabenbruchsystem namens Ithaca Chasma mit einem Ausmaß von etwa Dreivierteln des Mondumfangs ist in der Frühzeit durch tektonische Kräfte entstanden, entweder durch eine Dehnung der Kruste, oder durch eine Deformation in Zusammenhang mit dem großen Einschlag, der das Odysseus-Becken formte.

Dione, ebenfalls 1684 von Giovanni Cassini entdeckt, ist mit 1124 Kilometern Durchmesser der viertgrößte der neun großen Monde. Mit seiner mittleren Dichte von $1,47 \text{ g/cm}^3$ gehört Dione mit Titan, Phoebe und Enceladus zu den schwereren Eismonden des Saturn. Diones Oberfläche ist geologisch nach der von Enceladus und Titan am weitesten entwickelt: Ebenen mit einer hohen Kraterdichte, teilweise durchzogen von langen, linearen Bergrücken oder Bruchstrukturen, wechseln sich ab mit glatteren, von weniger Kratern übersäten Ebenen und tektonisch stärker deformierten Gebieten. In der Südpolregion befindet sich das mehrere hundert Kilometer große Evander-Becken. Die der Umlaufbewegung abgewandte Hemisphäre zeigt ein markantes Netz tektonischer Brüche unterschiedlicher Orientierung, die zu jeweils verschiedenen Zeiten entstanden sind. An den hellen Steilhängen dieser parallelen Brüche ist frisches Wassereis aufgeschlossen, was auf den räumlich niedriger aufgelösten Voyager-Bildern nicht erkannt werden konnte und deshalb zunächst den Eindruck eines dichten Netzes feiner und sehr heller Filamente ganz unbekannter Herkunft entstehen ließ.

Rhea, wie Dione von Giovanni Cassini 1684 entdeckt, ist mit 1528 Kilometern Durchmesser der zweitgrößte Mond des Saturn und der innere Nachbarmond von Titan. Aufgrund seiner niedrigen Dichte von $1,23 \text{ g/cm}^3$ besteht er vermutlich hauptsächlich aus Wassereis. Die Oberfläche von Rhea ist der von Dione ähnlich, allerdings ist Rhea geologisch geringer entwickelt als sein innerer Nachbarmond. Die in Bewegungsrichtung um den Saturn vorausgehende Hemisphäre ist dicht mit Kratern bedeckt, darunter einer Reihe sehr großer, mehrere hundert Kilometer messender Einschlagsbecken. In dieser Hemisphäre liegt auch der auffällige, sehr helle Strahlenkrater Inktomi. Die der Bahnbewegung abgewandte Hemisphäre ist, ähnlich wie bei Dione, von langgestreckten Brüchen durchzogen, die im Wesentlichen in Nordsüdrichtung orientiert sind. Im Vergleich zu Dione erlebte Rhea eine deutlich weniger wechselvolle tektonische Geschichte und die Aktivität dieses Mondes dürfte früher zum Erliegen gekommen sein.

Hyperion ist ein unregelmäßig geformter triaxialer Körper mit einer Größe von 410 mal 260 mal 220 Kilometern, dies entspricht einem mittleren Durchmesser von 268 Kilometern. Hyperion wurde im Jahr 1848 unabhängig voneinander von den Astronomen William Lassell, William C. Bond und George P. Bond entdeckt. Hyperion rotiert chaotisch, d.h. die Richtung des Nordpols ändert sich ständig im Verlauf einiger Tage. Seine mittlere Dichte ist mit $0,57 \text{ g/cm}^3$ die niedrigste der neun großen Saturnmonde. Hyperion ist dicht mit Kratern bedeckt, die sich bei Einschlägen in diesem porösen Körper gebildet haben und

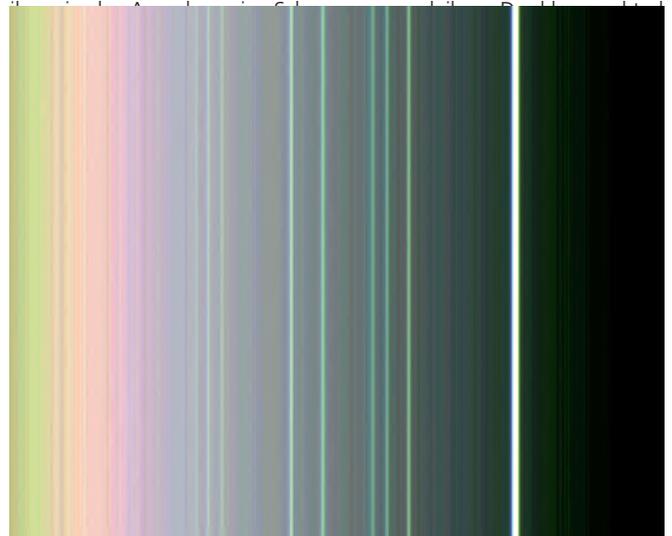
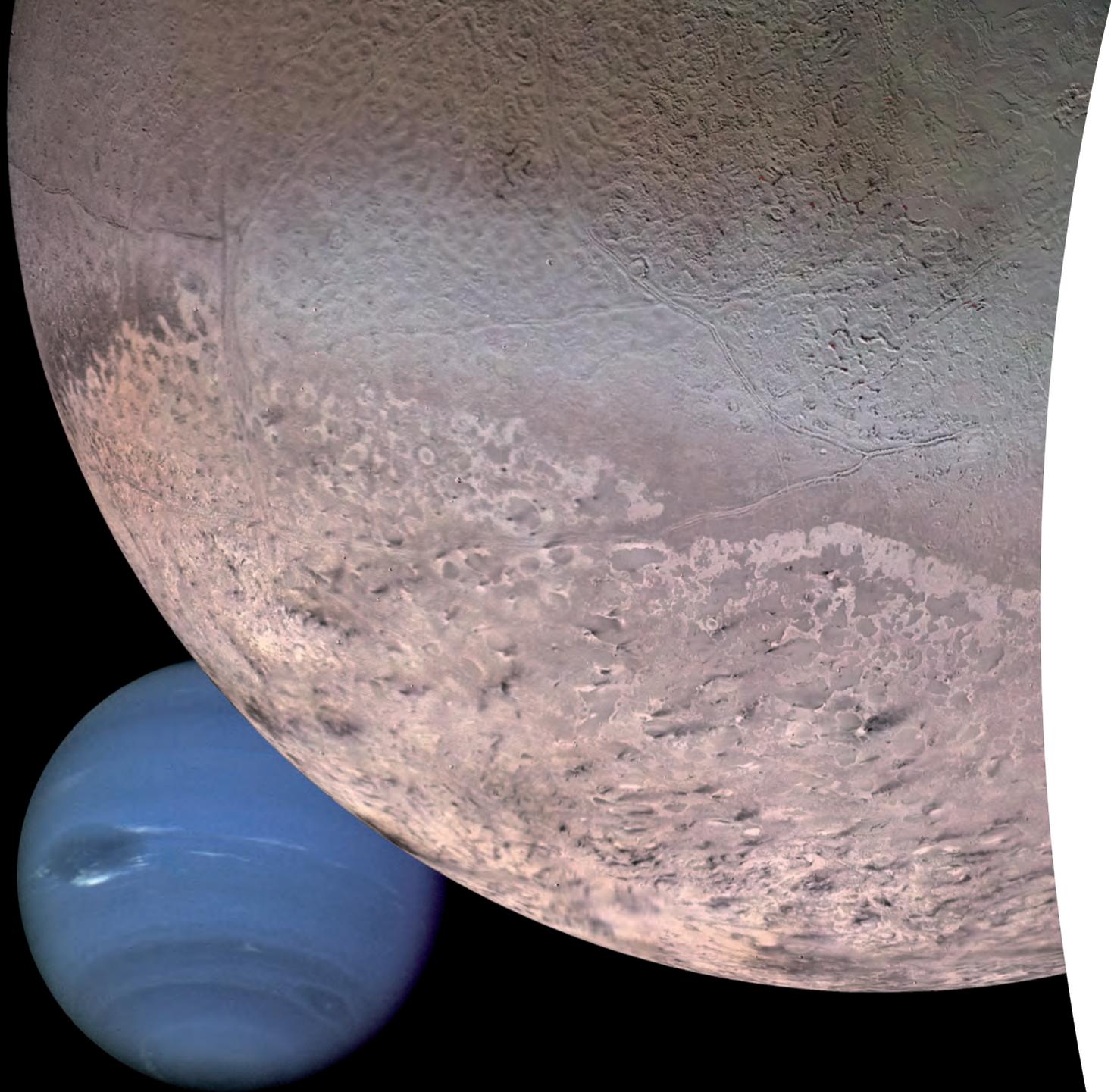


Bild: Ringsystem des Uranus in Falschfarben.
(© NASA/JPL)



Deformationen sind die wahrscheinlichste Ursache für die Entstehung dieser Struktur, der genaue Mechanismus ist noch ungeklärt.

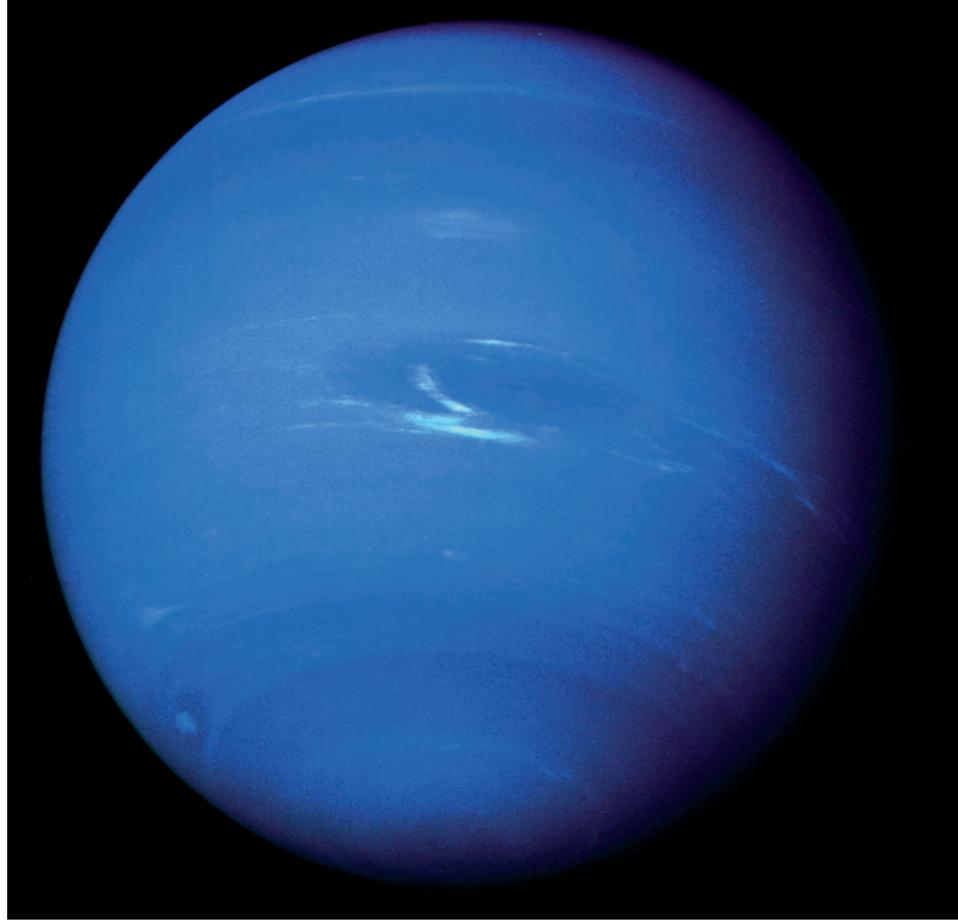
Phoebe umkreist den Saturn in fast 13 Millionen Kilometern Entfernung und ist der am weitesten entfernte der neun größeren Monde. Phoebe dreht sich in umgekehrter Richtung wie die anderen Monde, d.h. im Uhrzeigersinn um Saturn. Diese Tatsache, die gemessen an der geringen Größe dieses Mondes vergleichsweise hohe Dichte von $1,6 \text{ g/cm}^3$ und seine Oberflächeneigenschaften 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 retrograde (gegenläufige) Umlaufbahn um den Planeten gezwungen wurde.

Fakten

Neptun	Masse	$1,024 \times 10^{26} \text{ kg}$
	Radius (äquatorial)	24.746 km
	Radius (polar)	24.341 km
	Dichte	$1,76 \text{ g/cm}^3$
	Rotationsperiode	16,11 h
	Orbitalperiode	164,79 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$4,498 \times 10^9 \text{ km}$
Triton	Masse	$2,14 \times 10^{22} \text{ kg}$
	Dichte	$2,07 \text{ g/cm}^3$
	Radius	1352 km
	Orbitalperiode	5,877 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Neptun	354.800 km
Nereide	Masse	$2 \times 10^{19} \text{ kg}$
	Dichte	nicht bekannt
	Radius	170 km
	Orbitalperiode	360,14 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Neptun	5.513.400 km

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

URANUS

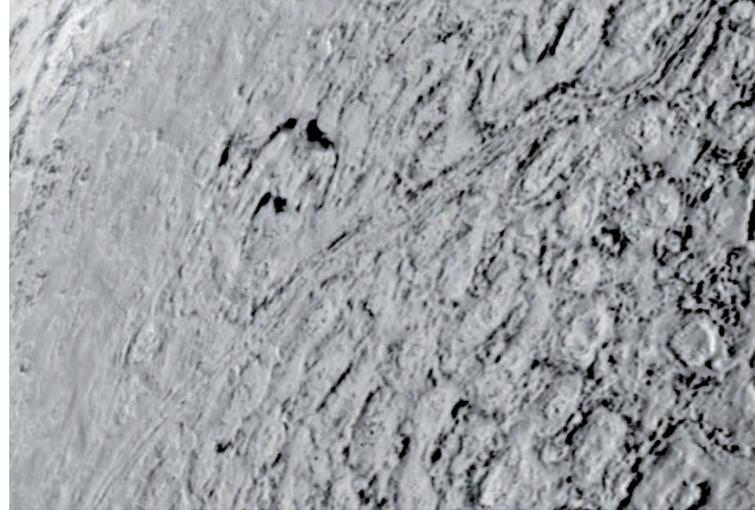


Im Jahre 1781 entdeckte William Herschel den siebten Planeten in unserem Sonnensystem, der bald darauf den Namen Uranus erhielt. Vermutlich ist der Planet aber schon früher gesehen worden, da seine Helligkeit gerade an der Sichtbarkeitsgrenze des bloßen Auges liegt. Die fünf größten Uranusmonde (Miranda, Ariel, Umbriel, Oberon, Titania) laufen in der Äquatorialebene um den Planeten und sind bereits seit geraumer Zeit bekannt. Mit Hilfe eines Flugzeugteleskops wurde anlässlich einer Sternbedeckung im Jahr 1977 ein Ringsystem bestehend aus fünf Einzelringen entdeckt, deren Zahl inzwischen auf 13 angewachsen ist. Seit dem Vorbeiflug der Voyager 2-Sonde im Januar 1986 kennt man Uranus als blau-grünlich leuchtende Kugel, die im Unterschied zu Jupiter und Saturn keine ausgeprägten Wolkenbänder und atmosphärische Strukturen aufweist.

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

Uranus benötigt ungefähr ein Menschenleben, 84 Jahre, um einmal die Sonne zu umrunden, von der er etwa 20 mal weiter als die Erde entfernt ist, also gut doppelt so weit wie Saturn und viermal weiter als Jupiter. Uranus rotiert in 17,3 Stunden um seine Achse und besitzt ein relativ starkes, asymmetrisches Magnetfeld, das mit der Rotationsachse einen Winkel von 60° einschließt. Da die Rotationsachse des Planeten mit einer Neigung von 98° fast parallel zur Bahnebene liegt, „rollt“ der Planet gewissermaßen auf seiner Bahn um die Sonne und ist somit – verglichen mit den übrigen Planeten – recht ungewöhnlichen jahreszeitlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Die auffallend starke Neigung seiner Rotationsachse gegenüber der Bahnebene hat Uranus vermutlich einem katastrophalen Kollisionsereignis mit einem massereichen kompakten Körper in der Frühzeit des Sonnensystems zu verdanken.

Die Masse des Uranus beträgt 14,54 Erdmassen. Der Planet selbst hat einen Durchmesser von 51.118 Kilometern am Äquator, so dass in seinem Innern 64 Erdkugeln Platz finden würden. Das Innere besteht im Wesentlichen aus einer Mischung von Eis und Gestein unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen. Auf die Kernzone, die vor allem aus Wasser (H_2O), Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3) besteht, kann bis zu 85% der Gesamtmasse des Planeten entfallen. Aufgrund des extrem hohen Umgebungsdrucks ähneln die Materialeigenschaften der eisreichen Kernregion eher denen von Flüssigkeiten. In größeren Tiefen könnte es infolge von Phasenumwandlungen sogar zum Absinken von Heliumtropfen und Diamantkristallen kommen. Im Unterschied zu Jupiter und Saturn dürfte das Magnetfeld jedoch innerhalb einer weiter außen befindlichen, flüssigen Schicht erzeugt werden, die aufgrund ihrer relativ hohen Ionenkonzentration elektrisch leitfähig ist und von einem relativ dünnen Wasserozean überlagert wird. Unter diesen Umständen ist zu erwarten, dass das Magnetfeld des Uranus seit dem Vorbeiflug der Voyager 2-Raumsonde merklichen Variationen unterlag. Der Wasserozean wird von einer dichten Atmosphäre umschlossen, die hauptsächlich aus molekularem Wasserstoff, Helium, und Wasser besteht und darüber hinaus einen merklichen Anteil an Methan (CH_4) enthält, das dem Uranus sein blau-grünlisches Aussehen verleiht. Während durch Kondensation von Methan in der Troposphäre des Planeten vereinzelt die Bildung von Wolken stattfindet, haben Kohlenwasserstoffe wie Acetylen (C_2H_2) und Ethan (C_2H_6) maßgeblichen Anteil an der Zusammensetzung von Dunstlagen seiner Stratosphäre.



Uranus empfängt aufgrund seiner größeren Sonnendistanz pro Flächen- und Zeiteinheit viermal weniger Sonnenenergie als Saturn bzw. sechzehnmal weniger Sonnenenergie als Jupiter. Bedingt durch die ungewöhnliche Orientierung seiner Rotationsachse wird jeweils 21 Jahre lang der Nord- bzw. Südpol des Planeten und seiner Monde intensiv von der Sonne beleuchtet; weitere zweimal 21 Jahre lang bekommen die Äquatorzonen und mittleren Breiten des Planeten mehr Sonnenenergie ab. Die verschiedenen lange anhaltenden Phasen der Sonneneinstrahlung sollten zu einer merklichen Dynamik der Uranusatmosphäre in unterschiedlichen Breiten beitragen. Den Voyager-Messungen nach zu urteilen trifft dies jedoch nur für die obersten Atmosphärenschichten des Planeten zu, in denen Wolkenbewegungen mit vorwiegend zonaler Zirkulation nachgewiesen werden konnten. Auch scheint Uranus keine innere Wärmequelle zu besitzen und unterscheidet sich darin wesentlich von allen übrigen Riesenplaneten.

Die 13 schmalen Ringe, die allesamt in der Äquatorebene liegen, sind 39.000 bis 97.000 Kilometer vom Planetenzentrum entfernt. Die staubreichen Ringe reflektieren nur knapp fünf Prozent des auftreffenden Sonnenlichtes und sind somit extrem dunkel und farblos. Möglicherweise enthalten sie einen hohen Anteil an Kohlenstoff.

Uranusmonde

Die fünf größten Monde des Uranus ähneln hinsichtlich ihrer Größe und Anordnung den mittelgroßen Eismonden des Saturn. Hingegen besitzen die Uranustrabanten eine höhere mittlere Dichte von etwa $1,5 \text{ g/cm}^3$, was auf einen größeren Gesteinsanteil und somit höhere radioaktive Wärmeproduktion im Innern schließen lässt. Die von Einschlagskratern übersäten Oberflächen der Monde weisen dementsprechend Spuren tektonisch oder sogar vulkanisch angetriebener Erneuerungsprozesse auf, insbesondere Miranda und Ariel, deren Ursachen mit der thermischen Entwicklungsge-

Bild: Cantaloupe-Terrain auf Triton. (© NASA/JPL)

schichte des jeweiligen Satellitennennern verknüpft sind. Ähnlich wie im Falle der Jupiter- und Saturnmonde dürfte die Entwicklung der Uranusmonde zusätzlich durch Gezeiteneffekte und Wechselwirkung mit dem relativ starken und merklich geneigten Magnetfeld des Uranus erheblich beeinflusst worden sein.

Miranda ist der innerste und kleinste der bisher bekannten Monde. Seine Oberfläche ist erstaunlich vielfältig gegliedert und weist Krater, gefurchtes Gelände, Böschungen, Brüche sowie drei große Ringformationen auf, die durch aufsteigendes leichtes Material aus dem wärmeren Mondinnern entstanden sein könnten.

Ariel ist der zweitgrößte Uranusmond. Die Oberfläche zeigt viele Krater, was auf ein hohes Alter hinweist, und verfügt über ein Netz aus zahlreichen Gräben und Rücken, die auf tektonische Deformationen der Eiskruste durch Volumenänderung des Satelliten schließen lassen. Zugleich ist Arels Oberfläche die hellste unter den Uranusmonden, was darauf hindeutet, dass sie geologisch etwas jünger ist als die der anderen Monde, da sie durch den Einfluss von Mikrometeoriten und geladener Teilchen weniger nachgedunkelt ist. Anhand neuerer Auswertungen der Voyager 2-Bilder einiger Grabenstrukturen haben sich die Anhaltspunkte für Oberflächenerneuerungsprozesse im Zusammenhang mit aktivem Kryovulkanismus verdichtet.

Titania und Umbriel, die beiden größten Uranusmonde mit Durchmesser von über 1500 Kilometern, könnten auch gegenwärtig noch ausgedehnte, flüssige Wasserozeane in ihrem Innern beherbergen, die in der Frühzeit durch Aufschmelzung infolge episodisch erhöhter Gezeitenaufheizung der Trabanten entstanden sind. Umbriel ist zugleich 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 Kilometern lang sein können.



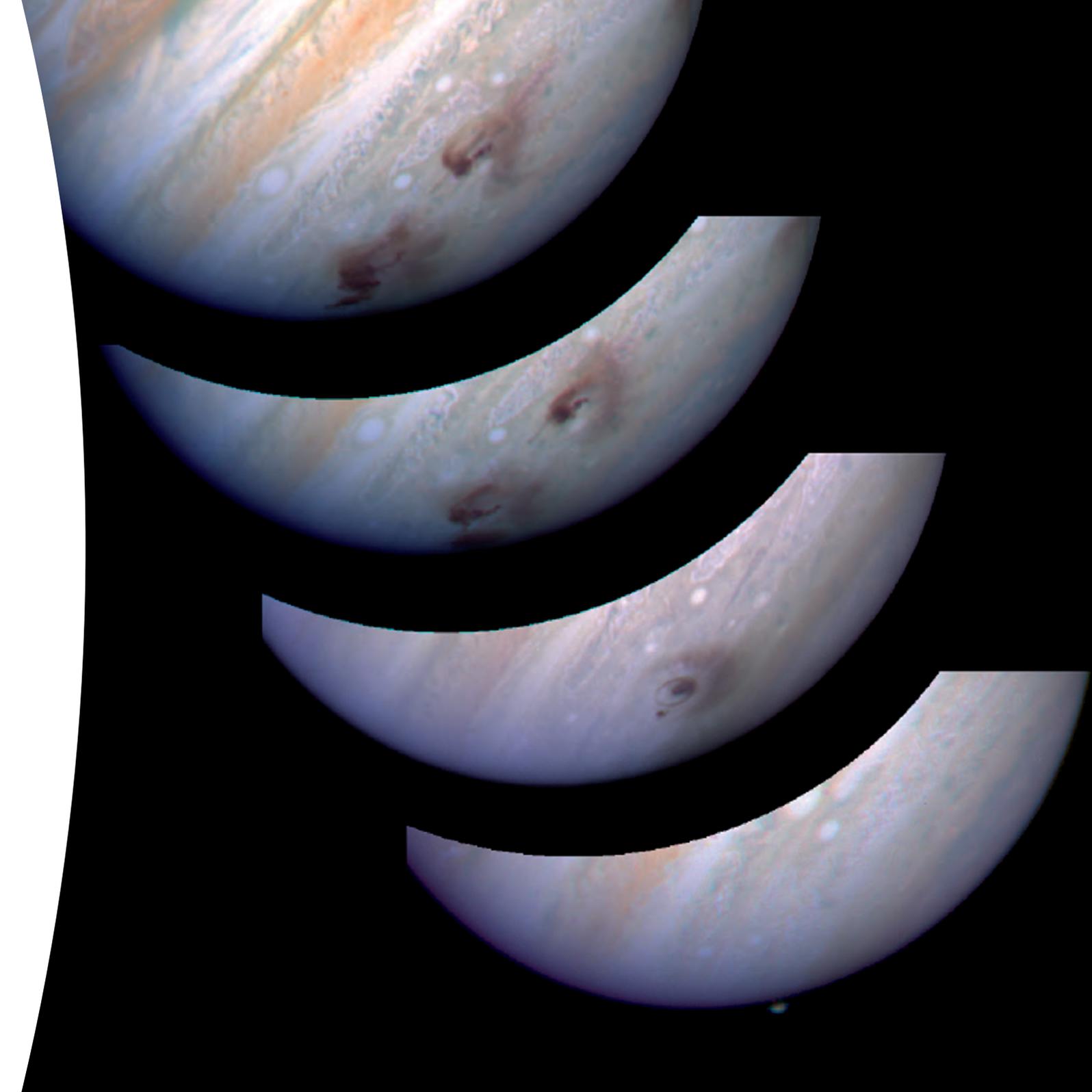
Oberon, der äußerste der Uranusmonde, hat wie Titania eine mit Einschlagskratern bedeckte Oberfläche. Einige Krater weisen in ihrem Inneren dunkles Material unbekanntes Ursprungs auf.

Von Voyager 2 wurden zehn weitere, relativ kleine Satelliten (Cordelia, Ophelia, Bianca, Cressida, Desdemona, Juliet, Portia, Rosalind, Belinda und Puck) entdeckt. In den letzten Jahren kamen noch weitere Monde hinzu (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 oben: Komet Hale-Bopp mit zwei Schweifen, aufgenommen im April 1997. (© Observatory Slovenia)

Bild rechte 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)



NEPTUN



Neptun ist der äußerste der Riesenplaneten. Erst 1846 wurde der Planet aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Bahnbewegung des Uranus von Johann Gottfried Galle und Heinrich Louis d'Arrest in Berlin entdeckt. Vermutlich hat schon Galilei den Planeten 233 Jahre zuvor gesehen, ohne ihn aber als „Wandelstern“ erkannt zu haben. Von den Bildern der Voyager 2-Sonde, die den Planet im August 1989 passierte, 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.

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. Neptun benötigt fast 165 Jahre für einen Lauf um die Sonne, von der er etwa 30mal weiter entfernt ist als die Erde. Neptun rotiert in etwas mehr als 16 Stunden einmal um seine Achse. Magnetfeld- und Rotationsachse schließen einen Winkel von 47° ein; zudem ist das Magnetfeld um 0,4 Planetenradien gegen das Planetenzentrum versetzt, was zu komplizierten Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind führt.

Die Masse des Neptun beträgt 17,15 Erdmassen. Der Planet selbst hat am Äquator einen Durchmesser von 49.492 Kilometern, so dass in seinem Innern etwa 60 Erdkugeln untergebracht werden könnten. Das Innere besteht aus einer teils oder vollständig separierten Mischung von Eis und Gestein unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen. Die von Wasser-eis dominierte Kernregion kann bis zu 70% des Plane-

tenradius einnehmen und wird von einer dünnen flüssigen, elektrisch leitfähigen Schicht überlagert, an welche die Erzeugung des Magnetfelds geknüpft ist. Dieser „Ionenozean“ wird von einer dichten Atmosphäre eingehüllt, die vorwiegend aus molekularem Wasserstoff mit einem geringen Heliumanteil von 10 bis 15% besteht. Durch Kondensation von Methan (CH_4), Ammoniak (NH_3), Schwefelwasserstoff (H_2S) und Wasser (H_2O) entstehen veränderliche helle Wolken und verbreitet Dunst. Bei dem von Voyager 2 beobachteten Großen Dunklen Fleck handelte es sich um einen atmosphärischen Wirbel, dessen Lebensdauer neueren Beobachtungen des Hubble Weltraumteleskops zufolge wesentlich kürzer ist als die seines langlebigen Pendant, des Großen Roten Fleck in der Atmosphäre des Jupiter.

Obwohl nur ein Bruchteil von einem Zwanzigstel der Energie zur Verfügung steht, die pro Flächen- und Zeiteinheit in Jupiterdistanz von der Sonne eingestrahlt wird, sind während des Voyager 2-Vorbeiflugs am Neptun die höchsten im Sonnensystem jemals gemessenen Windgeschwindigkeiten beobachtet worden – 560 Meter pro Sekunde oder 2060 Kilometer pro Stunde. Dies könnte damit zusammen hängen, dass im Unterschied zu Jupiter und Saturn in der Neptunatmosphäre so gut wie keine großräumigen Turbulenzen auftreten, durch die atmosphärische Strömungen hoher Geschwindigkeit behindert und „gebremst“ werden. Neptun dürfte zudem über eine weitere Energiequelle in seinem tiefen Innern verfügen, da der Planet in den Wellenlängen des thermischen Infrarot nahezu 2,6 mal mehr Energie abstrahlt, als er von der Sonne erhält. Die Existenz anomal heißer, kompakter Regionen („hot spots“) wurde in der Nähe des Südpols nachgewiesen. Die lokal erhöhten Temperaturen dürften sich auf die Höhe chemischer Reaktionen und die Bildung von Aerosolen in der Neptunatmosphäre auswirken.

Seit man 1984 bei Sternbedeckungen 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 drei schwächere Ringe entdecken, die breiter sind und vermutlich aus kleineren, schlecht reflektierenden Teilchen bestehen.

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

Neptunmonde

Neptun hat 13 Monde, von denen Triton und Nereide schon vor dem Vorbeiflug von Voyager 2 bekannt waren. Triton ist der größte Mond des Neptun, er besitzt eine dünne Atmosphäre aus Stickstoff und Methan. Mit einem Durchmesser von 2705 Kilometern ist er etwas kleiner als der Erdmond, lässt aber eine überraschende Vielfalt an Oberflächenstrukturen erkennen. Nereide ist der kleinere und äußere der beiden schon lange bekannten Monde und bewegt sich auf einer extrem elliptischen Bahn. Nereide konnte von Voyager 2 nicht aus der Nähe beobachtet werden, aber Lichtkurvenschwankungen zeigen, dass der Trabant entweder eine von der Kugelgestalt abweichende, lang gestreckte Form besitzt, oder über Materialien unterschiedlicher Albedo (Rückstrahlvermögen) an der Oberfläche verfügt.

Die Kameras auf Voyager-2 entdeckten sechs weitere Monde, von denen Proteus mit 420 Kilometern das größte dieser neu entdeckten Objekte darstellt. Die übrigen fünf Monde Naiad, Thalassa, Despina, Galatea, Larissa haben Durchmesser zwischen 60 und 200 Kilometern. Anhand von Teleskopbeobachtungen des Neptunsystems wurden in den Jahren 2002 und 2003 fünf weitere, zwischen 40 und 65 Kilometer große Neptunmonde gefunden (Halimede, Psamathe, Sao, Laomedea und Neso).

Triton ist wahrscheinlich der einzige größere Trabant im Sonnensystem.





tem, der nicht gemeinsam mit seinem Zentralplaneten entstanden ist. Denn Triton läuft auf einer nahezu kreisförmigen Bahn, die

etwa 23° gegenüber dessen Äquatorialebene geneigt ist, entgegen der Rotationsrichtung des Neptun um die Sonne. Dies legt die Vermutung nahe, dass Triton ursprünglich ein Zwergplanet ähnlich Pluto war, der in der Frühzeit die Neptunbahn kreuzte und von Neptun aus dem inneren Kuiper-Edgeworth-Gürtel ‚eingefangen‘ wurde. Ferner kann erwartet werden, dass bedingt durch Gezeiteneffekte die Rotations- und Umlaufdauer von Triton frühzeitig miteinander synchronisiert wurden. So nahm der anfangs stark exzentrische Orbit Tritons rasch seine heutige Kreisform an und seither bleibt immer ein und dieselbe Tritonhemisphäre Neptun zugewandt.

Es spricht einiges dafür, dass dabei das Innere Tritons durch Gezeitenreibung hinreichend stark erwärmt wurde, um die beiden Hauptbestandteile Gestein und Eis aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichten vollständig voneinander zu trennen. Gegenwärtigen Modellvorstellungen zufolge entfallen etwa 75% der Gesamtmasse Tritons auf einen zentralen Gesteinskern und etwa 25% auf die ihn umgebende Eisschale. Ähnlich dem Jupitermond Europa könnte sich unter der Eiskruste ein Wasserozean im Kontakt mit dem Gesteinskern verbergen.

Die mittlere Temperatur an der Tritonoberfläche beträgt lediglich -240° C und ist die niedrigste, die auf allen Planeten und großen Monden mit festen Oberflächen je gemessen wurde. Die Oberfläche besteht aus Wassereis, gefrorenem Stickstoff und Methan, mit Beimengungen von gefrorenem Kohlenmonoxid und -dioxid, Gesteinsanteilen und organischen Bestandteilen (weiteren Kohlenwasserstoffverbindungen). Neben Titan ist Triton der einzige Himmelskörper, der ebenso wie die Erde eine (allerdings viel dünnere) Stickstoffatmosphäre besitzt. Aufgrund des Wechselspiels der leichtflüchtigen Substanzen auf der Oberfläche mit Tritons Atmosphäre verändert sich deren räumliche Verteilung auf der Oberfläche im Laufe eines Tritonjahres drastisch. Wegen der lan-

gen Umlaufsdauer Neptuns um die Sonne und der starken Neigung seiner Rotationsachse liegt jeder Pol für jeweils 82 Jahre in der Sonne und anschließend ebenso lange im Dunkeln. Auf der Sommerhemisphäre verdampfen Stickstoff- und Methaneis, so dass die darunter befindliche dunkle Eiskruste sichtbar wird. Auf der kälteren Winterhemisphäre schlägt sich frisches Eis nieder und lässt diese Regionen aufgrund des größeren Reflexionsvermögens hell erscheinen.

Die einzigen Aufnahmen der Tritonoberfläche stammen von der Raumsonde Voyager 2 aus dem Jahre 1989. Sie zeigen eine geologisch komplexe Oberfläche, aber auch rätselhafte Oberflächenstrukturen, wie das in Anlehnung an die Schale bestimmter Honigmelonen so genannte „Cantaloupe-Terrain“, das bisher nur auf Triton gesehen wurde. Auf den Bildern sind vergleichsweise wenige Einschlagskrater zu sehen, außerdem sind die Tritonkrater, verglichen mit denen auf den Satelliten von z.B. Jupiter oder Saturn, verhältnismäßig klein. Der größte Krater in der von den Voyager-Kameras erfassten Region (ein globales Bild des Mondes gibt es nicht) hat einen Durchmesser von nur 27 Kilometern. Da die Anzahl der Impaktkrater auf einer Oberfläche ein Maß für deren Alter darstellt, deutet die geringe Zahl von Kratern auf Triton auf ein relativ junges Oberflächenalter und auf möglicherweise heute noch aktive geologische Prozesse hin, die zu markanten Veränderungen der Oberfläche führen. Triton ist neben dem Jupitermond Europa und den Saturnmonden Titan und Enceladus der einzige der großen Eismonde, der vermutlich heute noch geologisch aktiv ist.

Die Wirkung von Erosion und Transport von Oberflächenmaterial durch Wind lässt sich unter anderem anhand linearer dunkler Ablagerungen nachweisen, die bevorzugt in der Gegend des Südpols die Oberfläche überziehen und durch ihre Orientierung die vorherrschenden Windrichtungen anzeigen. Vermutlich entstand das Cantaloupe-Terrain, dieses Netz aus Vertiefungen und Hügeln, durch die Sublimation leichtflüchtiger Substanzen in der Eiskruste Tritons, hervorgerufen durch Temperaturunterschiede im Tagesgang. Gezeitenwirkungen könnten

Liste weiterer Kandidaten (Auswahl)

Objekt	Monde	Durchmesser
Orcus	-	1000 ± 200 km
Sedna	-	1500 – 1800 km
2002 TX ₃₀₀	-	< 700 km
2002 AW ₁₉₇	-	800 ± 100 km
Quaoar	-	~ 1200 km
Ixion	-	500 – 1000 km
Varuna	-	700 ± 150 km
Vesta	-	578 x 560 x 458 km
Pallas	-	570 x 525 x 500 km
2007 OR ₁₀	-	875 – 1400 km

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

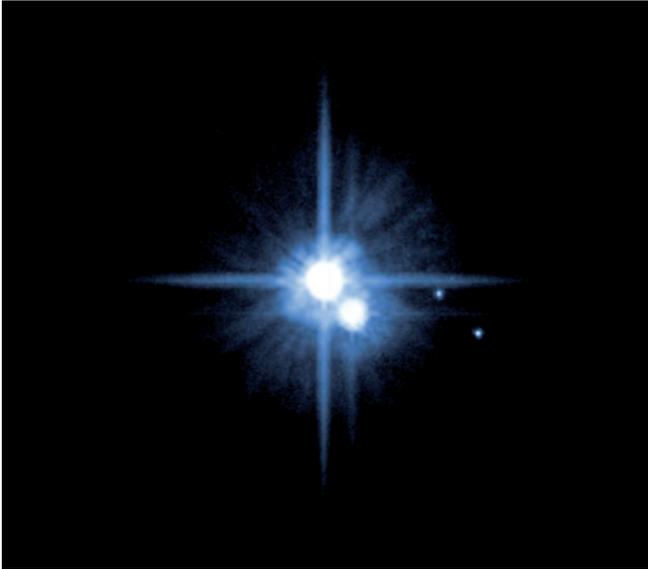
die Ursache für Deformationen der Oberfläche sein, die ihren Ausdruck in linearen Bruchstrukturen und Bergrücken findet, die vermutlich in jüngerer Zeit entstanden sind. Die Bergrücken ähneln in Morphologie und räumlicher Ausdehnung (10-25 Kilometer Breite, bis zu 1000 Kilometer Länge, ~200 Meter Höhe) vergleichbaren Geländeformen auf dem Jupitermond Europa.

Außer der Erde, dem Jupitermond Io und dem Saturnmond Enceladus ist Triton der vierte im Sonnensystem bekannte heute noch vulkanisch aktive Körper. Allerdings ist die Intensität des Vulkanismus auf Triton nicht vergleichbar mit dem der drei anderen Objekte. Aktiver Vulkanismus auf Triton konnte durch geysirähnliche Ausbrüche in der Südpolregion nachgewiesen werden, in der dunkle, mit einem Baumstamm vergleichbare Eruptionswolken senkrecht nach oben steigen und sich in einer Höhe von etwa 8 Kilometern, vermutlich an einer Inversionsschicht in der Atmosphäre, horizontal ausbreiten. Die Eruptionswolken können 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. Andere Gebiete auf Triton zeigen bis zu 200 Kilometer breite ehemalige Calderen (vulkanische Förderzentren), gefüllt mit ebenem Material,

das wahrscheinlich in zähflüssiger Form an die Oberfläche austritt, im Unterschied zu irdischer Lava aber aus einem Gemisch von Wasser und Ammoniak zusammengesetzt ist.

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)	2390
	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)	2400 ± 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)	1600 ± 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)	2200-1100
	Bekannte Monde	2



KOMETEN

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

Seit alters her ziehen Kometen, die plötzlich und unerwartet am Himmel auftauchen, die Menschen in ihren Bann. Um diese faszinierenden leuchtenden Gebilde mit ihrem langen Schweif ranken sich viele Mythen. Als angebliche Unglücksboten erzeugten sie oft Furcht und Schrecken. So wurde schon die Ermordung Julius Caesars vor mehr als 2000 Jahren mit dem Erscheinen eines Kometen in Verbindung gebracht. Das Auftauchen des Kometen Halley wurde im Jahre 1066 für die Niederlage des Heeres von König Harold II. gegen das Aufgebot von Wilhelm, dem Eroberer, beim englischen Ort Hasting verantwortlich gemacht. Der gleiche Komet erzeugte sogar noch bei seiner Wiederkehr im Jahre 1910 in Teilen der Bevölkerung Weltuntergangsstimmung.

Der Ursprung der Kometen war lange Zeit unklar. Aristoteles siedelte diese leuchtenden Gebilde in den höchsten Schichten der irdischen Lufthülle an und hielt sie für eine Art Wetterphänomen. Martin Luther hielt sie wegen ihres überraschenden Erscheinens für eine Verletzung der göttlichen Ordnung. 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 dazu, 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 hundert Metern bis einigen zehn Kilometern Durchmesser handelt. Ihre ursprüngliche Heimat sind die fernen Zonen des Sonnensystems – dort, wo es extrem kalt ist. Im Sonnensystem gibt es zwei bedeutende Kometenreservoirs: Zum einen sind dies die so genannten Transneptunischen Objekte (TNOs), zu denen auch Pluto gezählt wird und die sich in einem Torus außerhalb der Neptunbahn bis zu ungefähr 100 Astronomische Einheiten (AE) aufhalten, sowie die Körper der kugelförmigen Oortischen Wolke. Diese dehnt sich in einem Sonnenabstand von einigen Tausend AE bis fast ein Lichtjahr aus und reicht damit bis an die Grenze des Sonnensystems. Die Oortische Wolke beherbergt vermutlich viele Milliarden Kometenkerne, die sowohl aus der Region der äußeren Planeten stammen als auch aus der Milchstraße eingefangen wurden, ihren Ursprung also außerhalb des Sonnensystems haben.

Aufgrund ihres großen Abstandes zur Sonne, um die sie sich sehr langsam bewegen, bleiben die Kometen sehr kalt und können dadurch auch sehr flüchtige Bestandteile in Form von Eis lange Zeit konservieren. Ge-ringfügige, durch Schwerkraft-Einflüsse verursachte Bahnstörungen können den einen oder anderen Kometen ablen-

ken. Geraten sie dabei in die Nähe der Sonne, tauen die gefrorenen Bestandteile allmählich auf und strömen in das Weltall. Dabei

reißen sie Staubpartikel von der Kometenoberfläche mit. Durch diese so genannte kometare Aktivität entsteht um den kleinen Kern eine neblig-diffuse Kometenatmosphäre von zehn- bis hunderttausend Kilometern Durchmesser – die Koma. Wenn der Komet etwa die Marsbahn erreicht hat, geht von dieser ein auffallend heller Schweif aus. 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 auch vom interstellaren Medium her bekannt sind. Man nimmt daher an, dass Kometen kleine, nicht allzu sehr veränderte Überbleibsel aus der frühesten Zeit des Sonnensystems sind. Ihre Ursprünglichkeit verdanken sie ihrer im Unterschied zu den Planeten geringen Schwerkraft, der geringen Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen und kleinen Stoßgeschwindigkeiten im äußeren Sonnensystem, sowie ihren niedrigen Temperaturen. Daher sind gerade die Ergebnisse der Kometenforschung für Aussagen über die frühe Entwicklung des Planetensystems bedeutend. Selbst Asteroiden waren relativ hohen Temperaturen ausgesetzt und sind daher stärker verändert worden als die Kometen.

Von den Asteroiden unterscheiden sich die Kometen daher vor allem durch ihren höheren Gehalt an flüchtigen Molekülen

wie Wassereis. Jedoch hat die Forschung in der jüngeren Zeit herausgefunden, dass die Unterschiede zwischen beiden Objektklassen nicht so groß sind wie früher gedacht. Sogar im Asteroidengürtel wurden Objekte mit geringer kometenähnlicher Aktivität entdeckt. Es gibt aber auch gealterte Kometen, die ihre eisförmigen Bestandteile an der Oberfläche komplett verdampft haben und daher keine Ausgasung mehr zeigen.

Kurz nach der Bildung des Planetensystems sind Kometen (wie auch Asteroiden) in weitaus größerer Zahl als heute in Richtung Sonne abgelenkt worden und haben daher auch die inneren Planeten und den Mond häufiger getroffen. Wahrscheinlich gelangten durch die



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

Einschläge von Kometen wichtige Bausteine für das Leben wie Wasser und organische Moleküle in der Frühzeit des Sonnensystem auf die Erde und hatten so Einfluss auf die Entwicklung einer Biosphäre.

Kometen haben nur einen geringen inneren Zusammenhalt. Mitunter zerfallen sie in mehrere Teile, 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. Nähert sich diese Trümmerwolke der Erde, dringen die kleinen Partikel als Meteore in die Erdatmosphäre ein und verglühen. Viele bekannte Meteorschauer, oft auch Sternschnuppen genannt, lassen sich auf zerfallene Kometen oder Kometenausströmungen zurückführen.

Ein besonderes Ereignis ereignete sich vor etwa 20 Jahren. 1992 zerbrach der Komet P/Shoemaker-Levy 9 (SL9) unter dem Einfluss der Gezeitenkräfte des Jupiter. Die 21 Fragmente zwischen 50 und 1000 Meter Größe reihten sich auf einer mehrere Millionen Kilometer langen Kette um Jupiter herum auf. Sie wurden im März 1993 von den Astronomen Carolyn und Eugene Shoemaker sowie David Levy am Mount Palomar-Observatorium in Kalifornien entdeckt. Schnell wurde klar, dass sich alle Bruchstücke auf Kollisionskurs mit dem Planeten befanden. Im Juli 1994 fanden dann sukzessive die Zusammenstöße auf dem erdabgewandten Teil der Jupitersüdhälfte mit einer Geschwindigkeit von etwa 60 Kilometer pro Sekunde (216.000 km/h) statt. Die Folgeerscheinungen in der Jupiteratmosphäre waren Forschungsgegenstand einer der größ-

ten, weltweit koordinierten Beobachtungskampagnen in der Astronomie. Die Auswertung ergab, dass bei den Einschlägen das Energieäquivalent von etwa 50 Millionen Hiroshima-Atombomben frei gesetzt wurde. In der Jupiteratmosphäre hinterließen die Einschläge Spuren größer als der Durchmesser der Erde, die noch lange mit Teleskopen zu beobachten waren.

In den letzten Jahrzehnten waren Kometen auch Ziele mehrerer Raumsonden. Die dabei gewonnen Messergebnisse haben unser Verständnis für diese Himmelskörper beträchtlich erweitert. Die ersten Kometenmissionen in der Raumfahrtgeschichte führten 1986 zum nahen Vorbeiflug am berühmten Kometen Halley. Dieser ist wegen seiner

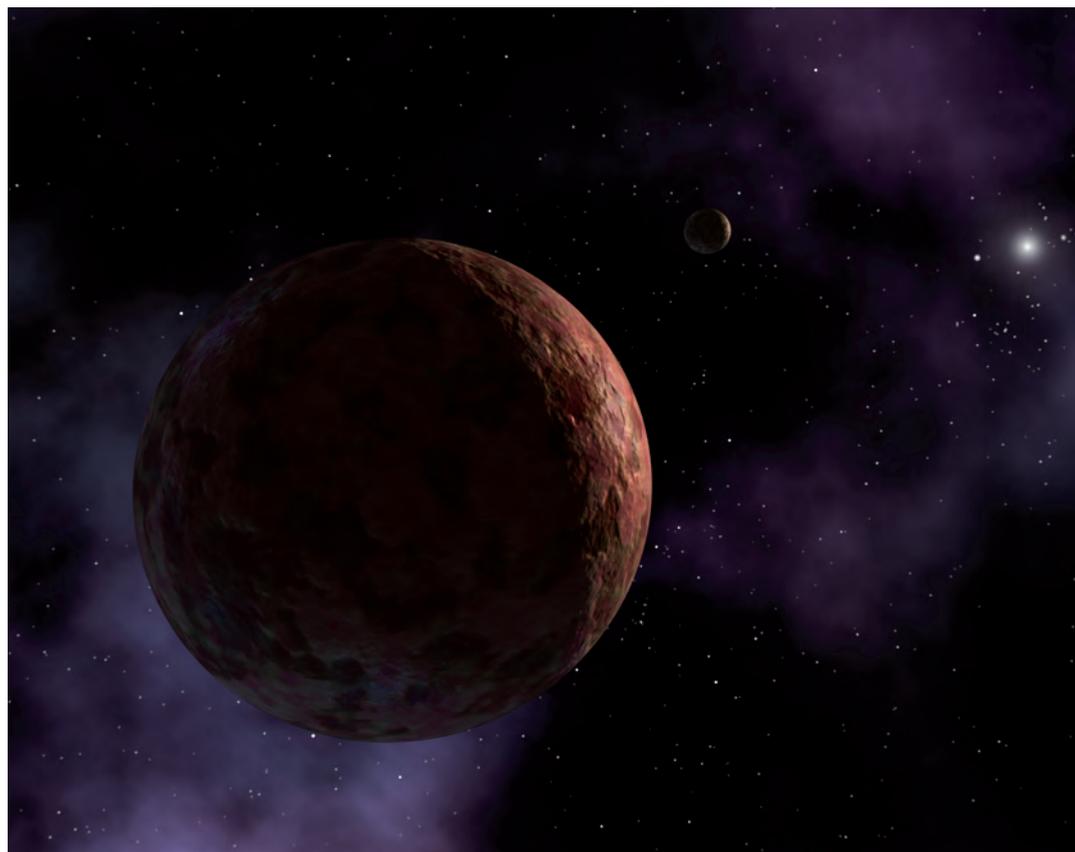


Bild: Kuipergürtel-Objekt Sedna in einer künstlerischen Darstellung, die Sonne ist hier als heller Stern dargestellt. (© NASA/JPL-Caltech)



regelmäßigen Wiederkehr und seines ausgeprägten Schweifs der bekannteste unter den periodischen Kometen. Er wird vermutlich schon seit über dreitausend 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 Merkur-

und Venusbahn – damit gehört er zu den so genannten kurzperiodischen Kometen. Die sowjetischen Sonden Vega 1 und Vega 2 flogen im März 1986 in knapp 9000 bzw. 8000 Kilometern Distanz mit einer Geschwindigkeit von ca. 78 km/s am Kometenkern vorbei und übermittelten zahlreiche Fotos und andere Messdaten. Kurz darauf näherte sich die am 2. Juli 1985 gestartete ESA-Sonde Giotto Halley bis auf 600 Kilometer und lieferte gut aufgelöste Bilder sowie weitere Daten. Die NASA-Mission Deep Space 1 flog 2001 in nur 2200 Kilometern Abstand am Kometen 19P/Borelly vorbei und testete dabei vorwiegend neue Technologien. Zwei echte Wissenschaftsmissionen der NASA folgten einige Jahre später. Die Sonde Deep Impact besuchte 2005 den kurzperiodischen Kometen Tempel 1, der ursprünglich aus dem Kuiper-Edgeworth-Gürtel stammt. Er war am 3. April 1867 von dem sächsischen Astronomen Ernst Wilhelm Leberecht Tempel entdeckt worden. Wesentliches Element des Weltraumexperiments war der Aufschlag eines 372 Kilogramm schweren Projektils aus Kupfer, das den Kometen mit einer Geschwindigkeit von 37.000 Kilometern pro Stunde traf, dabei einen etwa 100 Meter großen Krater schuf und Material in den Weltraum schleuderte. Dieses konnte dann mit den Instrumenten der Sonde und mit Teleskopen auf der Erde untersucht werden. Damit gelang erstmals eine Analyse von Material aus Regionen unterhalb der Kometenoberfläche. Der Krater selbst konnte unter der aufgewirbelten Staubwolke nicht detektiert werden. Nach Abschluss der Primärmission wurde die Sonde in EPOXI umbenannt und flog im November 2010 in nur 700 Kilometer Entfernung am Kometen 103P/Hartley vorbei, um auch dort Messungen durchzuführen.

Die Raumsonde Stardust passierte 2004 nach knapp fünfjährigem Flug den Kometen Wild 2 in einer Entfernung von 240 Kilometern. Dabei machte sie zahlreiche Aufnahmen und sammelte Komamaterial ein. Im Januar 2006 kehrte die Landekapsel mit den Staubproben an einem Fallschirm zur Erde zurück. Die Staubproben wurden in Labors auf der ganzen Welt untersucht und lieferten neue Erkenntnisse zur Zusammensetzung und Entstehung von Kometen. Die Sonde selbst wurde anschließend unter dem Namen Stardust-NExT auf die Weiterreise zum Kometen Tempel 1 geschickt. Im Februar 2011 passierte die Sonde den Kometenkern in 180 Kilometern Abstand und funkte Bilder zur Erde. Einige zeigen das Gebiet um den nun knapp sechs Jahre alten Einschlagskrater von Deep Impact. In der Zwischenzeit hat sich die Oberfläche durch die kometare Aktivität jedoch verändert, so dass es schwierig bleibt, die ursprüngliche Größe des Kraters genau anzugeben.

Dank der großen Anstrengungen in den letzten Jahrzehnten, sowohl durch Beobachtungen von der Erde als auch durch Weltraummissio-

Bild: künstlerische Darstellung eines Kuipergürtel-Objektes. © NASA, ESA, and G. Bacon (STScI)

nen, haben sich unsere Kenntnisse über Kometen deutlich verbessert. Wir wissen heute, dass Kometen poröse Körper geringer Dichte

sind, die sehr unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften haben – das heißt, einen „Standardkometen“ gibt es nicht. Bekannt ist ferner, dass Kometen keine homogene Zusammensetzung aufweisen. Ihre Staub-Eis-Bestandteile beinhalten zahlreiche organische Moleküle. Die Aktivität von Kometen wird durch Wassereis, aber auch durch Kohlendioxideis getrieben, ist stark richtungsabhängig und inhomogen. Trotz der enormen wissenschaftlichen Erkenntnisse der letzten Jahre sind jedoch wichtige Fragen noch nicht oder nicht vollständig geklärt, wie zum Beispiel die nach der Bedeutung von Kometen für die Entstehung des Planetensystems und des Lebens. Unklar ist zudem, warum Kometen so unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, hinsichtlich ihrer Zusammensetzung so heterogen sind und man direkt auf ihrer Oberfläche so wenig Eis findet. Man möchte besser verstehen, wie ihre kometare Aktivität genau abläuft bzw. warum sich die Aktivität manchmal drastisch verändert („outbursts“) und warum Kometen so oft auseinander brechen („splits“).

Umfangreiche Antworten auf diese Fragen wird die ESA-Mission Rosetta bringen. Sie wurde 2004 mit elf Messinstrumenten und einem Landemodul an Bord gestartet und befindet sich auf dem Weg zum knapp fünf Kilometer großen Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko. 2014 wird dann eine Raumsonde erstmals einen Kometen für mehrere Monate in einigen Kilometern Abstand umkreisen und dabei auch das Landegerät Philae absetzen. Philae wird direkt vor Ort zahlreiche Untersuchungen durchführen.

Bild: Akkretionsphase im Planetensystem Epsilon Eridani, künstlerische Darstellung. (© NASA/JPL-Caltech)





Bild oben: Fantasievolle künstlerische Darstellung von möglichen habitablen erdähnlichen Planeten im Universum. (© NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC-Caltech))

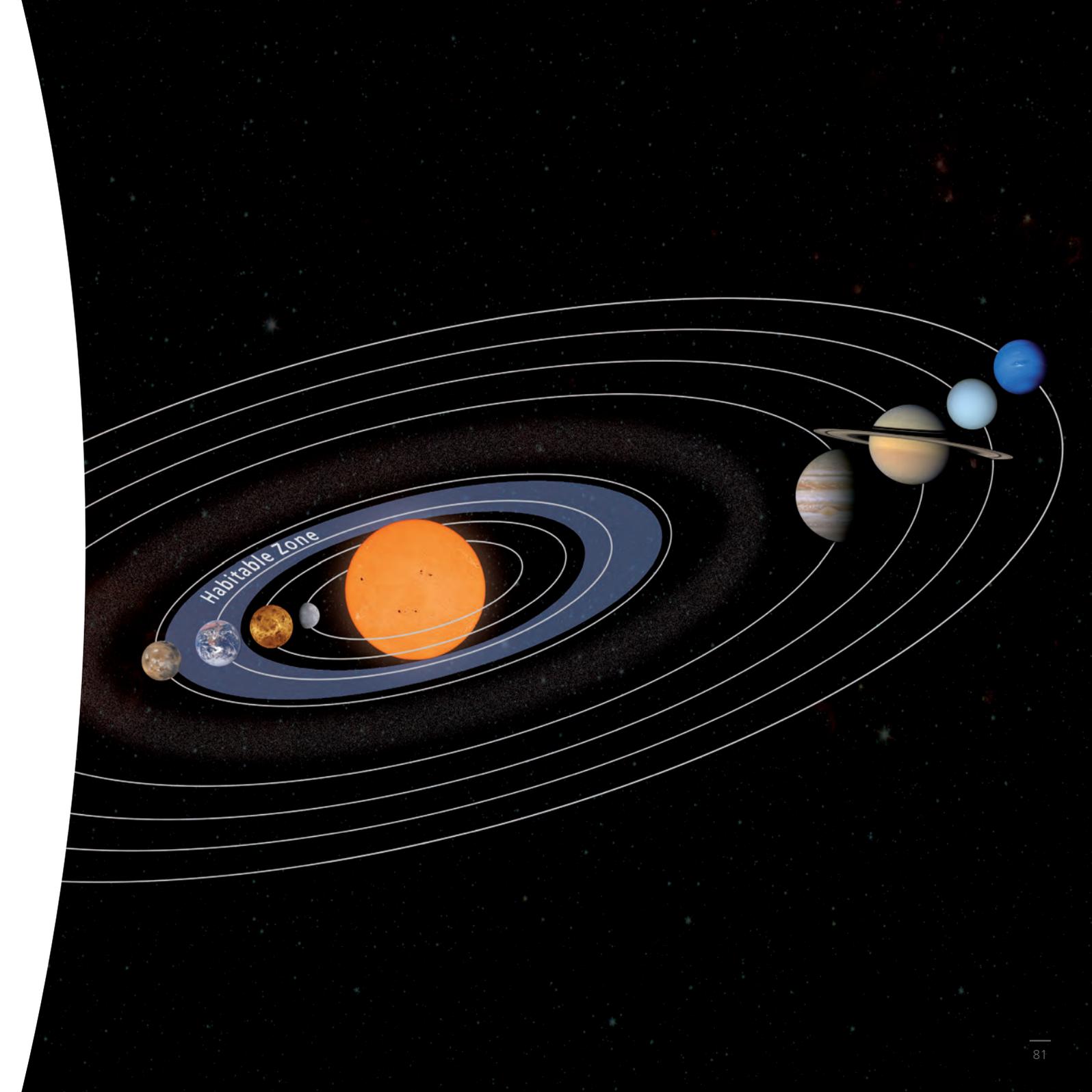
Bild rechte Seite: Darstellung der habitablen Zone in unserem Sonnensystem, nicht maßstäblich. (© DLR)

ZWERGPLANETEN

Am 24. August 2006 beschlossen die anwesenden Mitglieder der Internationalen Astronomischen Union (IAU) auf ihrer 25. Vollversammlung in Prag erstmals die Definition für die Planeten unseres Sonnensystems. Fortwährende Beobachtungen und die Entdeckungen von großen Transneptunischen Objekten, aber auch 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 in einer Umlaufbahn um die Sonne befindet, b) genügend Masse besitzt, um durch die eigene Schwerkraft eine annähernd kugelförmige Gestalt anzunehmen (d.h. sich im so genannten ‚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) und c) die Umgebung seiner Bahn nicht von anderem kosmischen Material frei geräumt hat und schließlich 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 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 auch Makemake (2005



FY₉) und Haumea (2003 EL₆₁) als Zwergplaneten klassifiziert worden.

Ceres

Der nun als Zwergplanet eingestufte Asteroid Ceres wurde am 1. Januar 1801 von Giuseppe Piazzi entdeckt und nach der römischen Göttin des Ackerbaus und der Viehzucht benannt. Mit einem Durchmesser von etwa 975 Kilometern ist Ceres das größte und zugleich massereichste 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 – er ist zum einen sehr viel kleiner als die vier großen Gasplaneten des äußeren Sonnensystems, zudem ist seine Umlaufbahn stark gegenüber der Ekliptik geneigt. 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 Eigenschaft aufzuweisen: Er gehört zu einer Gruppe von möglicherweise bis zu 100.000 Objekten mit Durchmessern von mehr als 100 Kilometern, die die Sonne jenseits der Umlaufbahn des Neptun in einer scheibenförmigen Zone, dem so genannten Kuiper-Edgeworth-Gürtel umkreisen. In dieser Region umlaufen auch Pluto und seine Begleiter die Sonne. Dieses 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 jahrzehntelanger 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, um die Neptunbahn stören zu können – deren minimale Schwankungen haben andere Ursachen.

Pluto läuft auf einer recht exzentrischen Bahn in knapp 248 Jahren einmal um die Sonne. Die relativ hohe Bahnexzentrizität führt dazu, dass Pluto mitunter der Sonne näher kommt 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 2390 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

ANHANG

ÜBERSICHT ÜBER DIE MISSIONEN IM SONNENSYSTEM

Missionen zur Sonne

Pioneer 5	11. März 1960	Sonnenbeobachtungssonde, 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 plaziert
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 Mission, 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
SORCE	25. Jan. 2003	„Solar Radiation & Climate Experiment“, präzise Messungen der Sonnenstrahlung in den verschiedenen Wellenlängenbereichen vom Röntgen bis zum nahen Infrarot aus dem Erdorbit
SDO	11. Febr. 2010	„Solar Dynamics Observatory“, Untersuchung der Sonnenatmosphäre in verschiedenen Wellenlängen, der Sonnenaktivität, des Weltraumwetters, Messungen des Sonneninneren, des Plasmas der Sonnenkorona und der Strahlung

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
MESSENGER	03. Aug. 2004	„Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging“ Untersuchung des Planeten aus dem Orbit: 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	27. 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 von der Venusoberfläche und -atmosphäre
Mariner 5	14. Juni 1967	Größte Annäherung: 3990 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 Atmosphären-eintauchkörper); einer sendete für 67 Minuten Daten von der Oberfläche
Venera 11	08. Sept. 1978	Landung; lieferten 95 min bzw. 110 min Messdaten von der Oberfläche
Venera 12	14. Sept. 1978	
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 Seitensichtadar; Venera 15: Radaraufnahmen der Rückseite; Venera 16: Streifen von 9000 x 150 km am Nordpol; Auflösung: 1-2 km
Venera 16	11. Juni 1983	
Vega 1	15. Dez. 1984	Vorbeiflug auf dem Weg zum Kometen Halley, Aussetzen eines Landers und eines Ballons zur Untersuchung der mittleren Wolkendecke
Vega 2	21. Dez. 1984	
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 Vorbeiflugs 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
Akatsuki (Planet-C)	20. Mai 2010	Japanische Mission zur Untersuchung der Dynamik der Venus-Atmosphäre aus dem Orbit, Eintritt in den Venus-Orbit misslang und die Sonde flog an der Venus vorbei, 2016 besteht erneut die Möglichkeit, in den Orbit um Venus einzutreten

Missionen zur Erde

NIMBUS: Serie amerikanischer Wettersatelliten, wurden zu einem wichtigen Erdkundungsprogramm 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 Erdkundungssatelliten; 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 9	23. Mai 1995
GOES 2	16. Juni 1977	GOES 10	25. April 1997
GOES 3	16. Juni 1978	GOES 11	03. Mai 2000
GOES 4	09. Okt. 1980	GOES 12	03. Juli 2001
GOES 5	22. Mai 1981	GOES 13	26. Mai 2006
GOES 6	28. April 1983	GOES 14	27. Juni 2009
GOES 7	26. Febr. 1987	GOES 15	4. März 2010
GOES 8	13. April 1994		

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, mit Meteosat 8 beginnt Second Generation (MSG): Spinning Enhanced Visible and Infrared Spectrometer (SEVIRI) und Geostationary Earth Radiation Budget (GERB)

Meteosat 1	23. Nov. 1977	MOP 3/Meteosat 6	20. Nov. 1993
Meteosat 2	19. Juni 1981	Meteosat 7	02. Sept. 1997
Meteosat 3/P2	15. Juni 1988	Meteosat 8 (MSG-1)	28. Aug. 2002
MOP 1/Meteosat 4	06. März 1989	Meteosat 9 (MSG-2)	22. Dez. 2005
MOP 2/Meteosat 5	02. März 1991		

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 Erdbeobachtung, VHRR (two-channel Very High-Resolution Radiometer); INSAT 1A wurde aufgegeben, INSAT 1C Fehler in der Stromversorgung, INSAT 2 zusätzlich Data Relay Transponder für 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	NOAA-19	7. Febr. 2009

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	MOS 1B	7. Febr. 1990
--------	----------------	--------	---------------

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 P1: Misserfolg

IRS 1A	17. März 1988	IRS P6 (Resourcesat)	17. Okt. 2003
IRS 1B	29. Aug. 1991	IRS P5 (Cartosat-1)	05. Mai 2005
IRS 1E (IRS P1)	20. Sept. 1993	Cartosat-2	10. Jan. 2007
IRS P2	15. Okt. 1994	IMS-1	24. April 2008
IRS 1C	28. Dez. 1995	Cartosat-2A	28. April 2008
IRS P3	21. März 1996	RISAT-2	20. April 2009
IRS 1 D	29. Sept. 1997	Oceansat-2	23. Sept. 2009
IRS P4 (Oceansat-1)	26. Mai 1999	Cartosat-2B	12. Juni 2010
TES	22. Okt. 2001	Resourcesat-2	20. April 2011

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
----------------	----------------

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 O1-7	11. Okt. 1994
OKEAN 2	28. Febr. 1990	OKEAN-O	17. Juli 1999
OKEAN 3	04. Juni 1991		

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

FY-1A	06. Sept. 1988	FY-2C	19. Okt. 2004
FY-1B	03. Sept. 1990	FY-2D	12. Aug. 2006
FY-2A	10. Juni 1997	FY-3A	27. Mai 2007
FY-1C	10. Juni 1999	FY-2E	23. Dez. 2008
FY-2B	25. Juni 2000	FY-3B	4. Nov. 2010
FY-1D	15. Mai 2002		

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

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		

Cluster: Amerikanisch-europäische Mission zur Erforschung der Magnetosphäre mit vier baugleichen Satelliten, Messung geladener Teilchen, elektrischer und magnetischer Felder sowie Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den solaren Wolken hochenergetischer Partikel, der Erdatmosphäre und dem Magnetfeld, die ersten vier Satelliten gingen beim Erstflug der Ariane 4 verloren

Cluster FM1 – FM4	4. Juni 1996	Cluster FM7, FM8	9. Aug. 2000
Cluster FM5, FM6	16. Juli 2000		

TRMM: „Tropical Rainfall Measuring Mission“, amerikanisch-japanische Mission zur Untersuchung der tropischen Niederschläge mittels Precipitation Radar (PR), TRMM Microwave Imager (TMI), Visible and Infrared Scanner (VIRS), Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) und Lightning Imaging Sencor (LIS)

TRMM	27. Nov. 1997
------	---------------

Formosat: Taiwanesischer Satellit, erste hochauflösende Satellit mit täglicher Abdeckung, Auflösung 2 m panchromatisch, 8 m multispektral

Formosat-1	16. Jan. 1999	Formosat-2	20. Mai 2004
------------	---------------	------------	--------------

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
------------------	---------------

Kompsat: südkoreanische Satelliten, liefern hochauflösende panchromatische und multispektrale Bilddaten

Kompsat-1	21. Dez. 1999	Kompsat-2	28. Juli 2006
-----------	---------------	-----------	---------------

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
---------------	----------------

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 Wasserhaushalt, Wechselwirkungen zu Wetter und Klima, globale Sondierung vertikaler Schichten der Neutral- und Ionengasschicht der Erde und Untersuchung der Zusammenhänge zum Wetter der Erde sowie zum Weltraumwetter.

CHAMP	15. Juli 2000
-------	---------------

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

EO-1	21. Nov. 2000
------	---------------

Odin: schwedischer Satellit, Untersuchung der Veränderung der Ozonschicht und Suche nach Wasser und Sauerstoff im interstellaren Raum

Odin	20. Febr. 2001
------	----------------

Quickbird: Kommerzieller Satellit zur Erdbeobachtung, Auflösung: 0,6 m pro Bildpunkt im Nadirkanal, Farbkanäle: 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
-----	---------------

Proba: „Project for On-Board Autonomy“, Technologiedemonstrator der ESA, Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS) für hyperspektrale Bilder mit Auflösungen bis 17 m in 63 Spektralbändern; High Resolution Camera (HRC) mit Auflösungen bis 5 m in Schwarzweiß

Proba-1	22. Okt. 2001	Proba-2	2. Nov. 2009
---------	---------------	---------	--------------

TIMED: „Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics“, amerikanische Mission zur Untersuchung der Dynamik in der Mesosphäre und der unteren Thermosphäre mittels Global Ultraviolet Imager (GUVI), Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER), Solar Extreme Ultraviolet Experiment (SEE) und TIMED Doppler Interferometer (TIDI)

TIMED	7. Dez. 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 Radio-positioning 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

ICESat: „Ice, Cloud and Elevation Satellite“, amerikanische Mission zur Messung der Mächtigkeit der Eispanzer, der Höhenprofile von Wolken und Aerosolen sowie der Höhe der Vegetation und Meereseisdicke mittels Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)

ICESat 12. Jan. 2003

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

CryoSat: Europäische Mission, Vermessung der Kryosphäre der Erde mit Radarhöhenmesser (SIRAL), Radioempfänger DORIS und Laser-Retroreflektor, CryoSat 1 erreichte Umlaufbahn nicht

CryoSat-1 8. Okt. 2005 CryoSat-2 8. April 2010

ALOS: „Advanced Land Observing Satellit“, japanischer Satellit: Phased Array type-L band Synthetic Aperture Radar (PALSAR), Mikrowellenradar und Panchromatic Remote-sensing of Stereo Mapping (PRISM), Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type-2 (AVNIR-2)

ALOS 24. Jan. 2006

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

THEMIS: „Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms“, amerikanische Mission aus fünf baugleichen Satelliten zur Erforschung der Teilstürme in der Magnetosphäre der Erde, Instrumente: Electric Field Instrument (EFI), Search Coil Magnetometer (SCM), Flux Gate Magnetometer (FGM), Electrostatic Analyzer (ESA) und Solid State Telescope (SST)

THEMIS 1-5 17. Febr. 2007

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

GeoEye: Kommerzieller amerikanischer Satellit, panchromatische und multispektrale Aufnahmen mit Auflösungen bis 0,41 m pro Bildpunkt

GeoEye 1 6. Sept. 2008

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

GOCE 17. März 2009

SMOS: „Soil Moisture and Ocean Salinity“, europäische Mission, Messung des oberflächennahen Salzgehalts der Meere mittels L-Band-Mikrowellenradiometer

SMOS 2. Nov. 2009

TanDEM-X: „TerraSAR-X-Add-on for Digital Elevation Measurements“, deutscher Radarsatellit, stereographische Vermessung der Erde gemeinsam mit dem Satelliten TerraSAR-X mittels SAR im X-Band

TanDEM-X 21. Juni 2010

Aquarius: Amerikanisch-argentinische Mission, Untersuchung des oberflächennahen Salzgehalts der Meere mittels Mikrowellen Radiometer (L-Band), Scatterometer und Kameras

Aquarius 10. Juni 2011

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

Missionen zum Mond

Pioneer 0	17. Aug. 1958	Misserfolg, erste Stufe explodierte
Pioneer 1	11. Okt. 1958	Misserfolg, hat Fluchtgeschwindigkeit nicht erreicht
Pioneer 3	06. Dez. 1958	Misserfolg, hat Fluchtgeschwindigkeit nicht erreicht
Luna 1	02. Jan. 1959	Größte Annäherung: 5000 bis 6000 km; danach Umlaufbahn um die Sonne
Pioneer 4	03. März 1959	Entfernter Mondvorbeiflug
Luna 2	12. Sept. 1959	Aufschlag; erste Sonde, die auf dem Mond aufschlug
Luna 3	04. Okt. 1959	Erstmals 400 Aufnahmen der Mondrückseite
Ranger 3	04. Okt. 1959	Misserfolg, Mondorbit verfehlt
Ranger 4	23. April 1962	Aufschlag, Abbruch des Funkkontaktes noch am Starttag
Ranger 5	18. Okt. 1962	Fehlfunktion während des Einschusses in die Mondbahn, verfehlte den Mond um 725 km
Luna 4	02. April 1963	Geplant als Lander, verfehlte den Mond
Ranger 6	30. Jan. 1964 bis 02. Febr. 1964	Aufschlag am Rand des Mare Tranquillitatis, die Kameras übertrugen keine Bilder
Ranger 7	28. Juli 1964 bis 31. Juli 1964	Aufschlag im Mare Nubium; 4316 Aufnahmen während des Anfluges
Ranger 8	17. Febr. 1965 bis 20. Febr. 1965	Aufschlag im Mare Tranquillitatis; über 7000 Aufnahmen während des Anfluges
Ranger 9	21. März 1965 bis 24. März 1965	Aufschlag im Krater Alphonsus; über 5800 Aufnahmen besserer Schärfe durch zusätzliche Stabilisierung der Kamera in Flugachse

Luna 5	09. Mai 1965	Größte Annäherung: 8500 km; durch Störeinflüsse geriet die Sonde von der Erd- in eine Sonnenumlaufbahn
Luna 6	08. Juni 1965	Lander, verfehlte den Mond, Sonnenorbit
Luna 7	04. Okt. 1965 bis 07. Okt. 1965	Erprobung der Systeme für eine Landung; Aufschlag im Bereich des Oceanus Procellarum
Luna 8	03. Dez. 1965 bis 06. Dez. 1965	Erprobung der Systeme für eine Landung; Aufschlag im Bereich des Oceanus Procellarum
Luna 9	31. Jan. 1965	Erste weiche Landung eines Messgerätebehälters auf der Mondoberfläche am 03. Febr. 1965; Panoramaaufnahmen der Oberfläche
Luna 10	31. März 1966	Erster künstlicher Satellit des Mondes
Surveyor 1	30. Mai 1966	Landung nach direkter Injektion in die Übergangsbahn; 10.338 Aufnahmen, jeweils 1000 unter Verwendung eines Rot-Grün-Blau-Filters am ersten Montag; 812 Bilder am zweiten Montag
Lunar Orbiter 1	10. Aug. 1966	Mondumlaufbahn; etwa 5,18 Millionen km ² fotografisch abgedeckt, 229 Aufnahmen wurden übertragen
Luna 11	24. Aug. 1966	Mondumlaufbahn, Batterie versagte am 1. Okt. 1966
Surveyor 2	20. Sept. 1966	Nach Bahnkorrektur außer Kontrolle; Aufschlag südlich des Kraters Copernicus
Luna 12	22. Okt. 1966	Mondumlaufbahn, Datenübertragung endete am 19. Jan. 1968
Lunar Orbiter 2	06. Nov. 1966	Mondumlaufbahn; 817 Aufnahmen mit Tele-Weitwinkeloptik wurden übermittelt
Luna 13	21. Dez. 1966	Landung in der Nähe des Kraters Seleucus; Nahaufnahmen der Mondoberfläche
Lunar Orbiter 3	05. Febr. 1967	Mondumlaufbahn; durch Störung im Bildtransportsystem konnten nur 626 Aufnahmen übertragen werden
Surveyor 3	17. April 1967	Landung im östlichen Teil des Oceanus Procellarum; 6.315 Aufnahmen
Lunar Orbiter 4	04. Mai 1967	Mondumlaufbahn; 546 Aufnahmen; Abdeckung: 99% der Vorderseite und 75% der Rückseite des Mondes
Surveyor 4	14. Juli 1967 bis 17. Juli 1967	Misserfolg, Sonde versagte und schlug auf dem Mond auf
Explorer 35	19. Juli 1967	Mondumlaufbahn
Lunar Orbiter 5	01. Aug. 1967	Mondumlaufbahn; 844 Aufnahmen, insbesondere von 36 ausgewählten Gebieten (Apollo-Landeplätze)

Surveyor 5	08. Sept. 1967	Landung im Mare Tranquillitatis; 18.006 Aufnahmen und Bodenanalysen	Zond 8	20. Okt. 1970	Größte Annäherung: 1120 km; Erdanflug erstmalig über Nordhalbkugel; neben farbigem und schwarzweißen Mondaufnahmen auch Erdaufnahmen
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 17	10. Nov. 1970	Landung im Mare Imbrium; fernsteuerbares halbautomatisches Mondfahrzeug; über 200 Panoramaaufnahmen; 20.000 weitere Aufnahmen; Bodenanalysen
Surveyor 7	07. Jan. 1968	Landung ca. 25 km nördlich des Kraterandes von Tycho; 5000 Aufnahmen, erstmals Aufnahmen mit Polarisationsfilter; Bodenanalysen	Apollo 14	31. Jan. 1971 bis 09. Febr. 1971	Dritte bemannte Mondlandung nahe des Kraters Fra Mauro im östlichen Oceanus Procellarum
Luna 14	07. April 1968	Mondumlaufbahn, sammelte unter anderem Daten zur Wechselwirkung zwischen Erde und Mond und zum Gravitationsfeld des Mondes	Apollo 15	26. Juli 1971 bis 07. Aug. 1971	Vierte bemannte Mondlandung im Gebiet Hadley-Rille; erstmals bemanntes Mondfahrzeug
Zond 5	14. Sept. 1968	Erprobung der Rückführung einer Raumsonde nach Mondflug; Mondhinterfliegung und Rückkehr zur Erde; größte Annäherung: 1950 km	Luna 18	02. Sept. 1971	Landung im Gebiet Mare Foecunditatis nach 54 Umläufen
Zond 6	10. Nov. 1968	Erstmals aerodynamische Rückführung; größte Annäherung: 2420 km; zwei Aufnahmeserien der Mondrückseite aus 10.000 km Entfernung; Auflösung ca. 200 m pro Bildpunkt	Luna 19	28. Sept. 1971	Mondumlaufbahn; hochauflösende Aufnahmen der Mondoberfläche
Apollo 8	21. Dez. 1968 bis 27. Dez. 1968	Erster bemannter Mondflug; fotografische Erkundung des vorgesehenen Apollo-Landeplatzes sowie anderer Gebiete	Luna 20	14. Febr. 1972	Landung am Nordostrand des Mare Foecunditatis; Rückführung von Bodenproben
Apollo 10	18. Mai 1969 bis 28. Mai 1969	Abstiegssimulation im Mondumlauf; größte Annäherung: 15.185 m	Apollo 16	16. April 1972 bis 27. April 1972	Fünfte bemannte Mondlandung im Cayley-Hochplateau nahe des Kraters Descartes
Luna 15	13. Juli 1969	Automatische Sonde; Erprobung der wesentlichen Voraussetzungen für Landungen aus einer Mondumlaufbahn	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 11	16. Juli 1969 bis 24. Juli 1969	Erstmals bemannte Mondlandung; Landung im Mare Tranquillitatis; Rückführung von Bodenproben	Explorer 49	10. Juni 1973	Radioastronomische Erkundung der Mondrückseite
Zond 7	07. Aug. 1969 bis 14. Aug. 1969	Größte Annäherung: 2000 km; drei Aufnahmeserien aus verschiedenen Entfernungen; aerodynamische Rückführung	Luna 21	08. Jan. 1974	Landung im Krater Le Monnier; fernsteuerbares halbautomatisches Mondfahrzeug
Apollo 12	14. Nov. 1969 bis 24. Nov. 1969	Zweite bemannte Mondlandung im Oceanus Procellarum	Luna 22	02. Juni 1974	Mondumlaufbahn in 212 km Höhe, Langzeituntersuchungen der physikalischen Erscheinungen des Mondes
Apollo 13	11. April 1970 bis 17. April 1970	Versuchte Mondlandung; Abbruch nach Explosion eines Sauerstofftanks im Servicemodul; erfolgreiche Rückkehr	Luna 23	28. Sept. 1974	Nach Mondumlaufbahn missglückte Landung im Mare Crisium
Luna 16	12. Sept. 1970	Erstmalig Rückführung von Bodenproben mit Hilfe eines unbemannten fernsteuerbaren halbautomatischen Lande-Rückkehr-Gerätes	Luna 24	12. Juni 1976	Landung am südöstlichen Rand des Mare Crisium; Rückstart, Rückführung von 170 g Mondgestein
			Galileo	18. Okt. 1989	Multispektrale Aufnahmen während zweier Vorbeiflüge auf dem Weg zum Jupiter (Dez. 1990, Dez. 1992)
			Hiten	24. Jan. 1990	Japanische Mondmission, zwei kleine Orbiter, keine Datenübertragung aus dem Mondorbit möglich
			Clementine	25. Jan. 1994	Mondorbit, globale Kartierung im Multispektralbereich, Auflösung: 125-250 m pro Bildpunkt

Lunar Prospector	06. Jan. 1998	Polarer Mondorbit, unter anderem Gamma Ray Spectrometer, Alpha Particle Spectrometer
SMART-1	27. Sept. 2003	Europäischer Orbiter, solarbetriebenes Ionentriebwerk, Untersuchung der Geologie, Morphologie, Topographie, Mineralogie, Geochemie und exosphärischen Umgebung
Kaguya (SELENE)	14. Sept. 2007	Japanischer Mondorbiter, globale Untersuchung des Mondes hinsichtlich Mineralogie, Topographie, Geographie und Gravitation
Chang'e 1	24. Okt. 2007	Erster chinesischer Mondorbiter, Test des Satelliten, 3D-Aufnahmen, Untersuchung der Verteilung und Vorkommen von Elementen
Chandrayaan 1	22. Okt. 2008	Indischer Orbiter, Technologiemißion, Erzeugung einer hochauflösenden globalen Karte, mineralogische Kartierung, Untersuchung der Topographie mittels Laser
LRO	17. Juni 2009	„Lunar Reconnaissance Orbiter“, Mondorbit, Kartierung der Oberfläche, Charakterisierung zukünftiger Landestellen hinsichtlich Oberflächenrauigkeit, nutzbarer Ressourcen und Strahlungsumgebung
LCROSS	17. Juni 2009	Leitsonde auf Centaur-Oberstufe als Einschlagsprojektil, Start mit LRO, Aufschlag der Centaur am 09. Okt. 2009, Beobachtung durch Leitsonde
Chang'e 2	01. Okt. 2010	Modifizierter Backup-Satellit von Chang'e 1, hochauflösende Aufnahmen der Mondoberfläche, Landstellensuche
GRAIL	10. Sept. 2011	„Gravity Recovery and Interior Laboratory“, bestehend aus zwei gemeinsam gestarteten Sonden, Kartierung der Struktur der Kruste und der Lithosphäre, Verständnis der asymmetrischen thermalen Entwicklung des Mondes, Bestimmung des Aufbaus der Becken im Untergrund und der Mascons, Ende 2011 Eintritt in den Mondorbit, Ende der Mission mit Aufschlag der Sonden auf dem Mond am 17. Dez. 2012

Missionen zum Mars

Marsnik 1 (Mars 1960A)	10. Okt. 1960	Erste sowjetische planetare Raumsonde, Versagen der dritten Raketstufe, erreichte Höhe: 120 km, danach Wiedereintritt
Marsnik 2 (Mars 1960B)	14. Okt. 1960	Zweite sowjetische planetare Raumsonde, Versagen der dritten Raketstufe, erreichte Höhe: 120 km, danach Wiedereintritt
Sputnik 22 (Mars 1962A)	24. Okt. 1962	Misserfolg, entweder zerbrach die Sonde beim Einschuss in den Erdborbit oder die Oberstufe explodierte im Erdborbit
Mars 1	01. Nov. 1962	Untersuchungen im marsnahen Raum; Abbruch der Funkverbindung am 21.03.1963 in 106 Mill. km Entfernung, Marsorbit nicht erreicht
Sputnik 24 (Mars 1962B)	04. Nov. 1962	Misserfolg; konnte Erdborbit nicht verlassen
Mariner 3	05. Nov. 1964	Abtrennung der Hülle missglückte; Funkverbindung abgebrochen
Mariner 4	28. Nov. 1964	Ankunft am Mars am 14.07.1965, größte Annäherung: 9840 km; 22 Aufnahmen der Marsoberfläche
Zond 2	30. Nov. 1964	Vorbeiflug am Mars am 06.08.1965, größte Annäherung; 1500 km, Versagen des Kommunikationssystems April 1965
Zond 3	18. Juli 1965	Mondaufnahmen, Weiterflug zum Mars
Mariner 6 Mariner 7	25. Febr. 1969 27. März 1969	Zwillingsunternehmen; erfolgreiche Kurskorrektur; 200 Fernhaufnahmen der Marsoberfläche; Untersuchung der Atmosphäre (Struktur und Zusammensetzung)
Mars 1969A	27. März 1969	Misserfolg; Explosion der dritten Raketstufe
Mars 1969B	02. April 1969	Misserfolg; Versagen der ersten Raketstufe direkt nach dem Start
Mariner 8	08. Mai 1971	Misserfolg; Fehlfunktion der Centaur-Stufe
Cosmos 419	10. Mai 1971	Erreichen der Parkbahn um die Erde, 4. Stufe des Blocks D versagte aufgrund eines Fehlers in der Timerprogrammierung
Mars 2	19. Mai 1971	Erreichen des Marsorbits am 27.11.1971; erstmaliges Absetzen einer Landekapsel (Bruchlandung); Orbiter machte Fernsehaufnahmen

Mars 3	28. Mai 1971	Erreichen des Marsorbits am 02.12.1971; Absetzen einer Landekapsel (weiche Landung); Instrumente des Landers arbeiteten nur für 20 Sekunden	Mars Global Surveyor	07. Nov. 1996	Ersatz für Mars Observer, Eintritt in den Marsorbit am 12.09.1997, Aerobraking zum Orbit für Oberflächenkartierung dauerte ein Jahr länger aufgrund nicht korrekt ausgeklappter Sonnenkollektoren, Abbruch des Funkkontaktes seit dem 2. Nov. 2006
Mariner 9	30. Mai 1971	Erreichen des Marsorbits am 14.11.1971, erster künstlicher Satellit eines Planeten; 6876 Aufnahmen der Marsoberfläche; max. Auflösung: 100 m pro Bildpunkt	Mars-96	16. Nov. 1996	Russland/internationale Beteiligung; Misserfolg: Fehler in 4. Stufe der Träger Rakete, instabiler Erdorbit, Verlust von Sonde und 4. Stufe am 17.11.1996
Mars 4	21. Juli 1973	Gelangte durch technische Fehler nicht in die Mars-Umlaufbahn, flog in ca. 2200 km Entfernung am 10.02.1974 vorbei	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 5	25. Juli 1973	Erreichen des Marsorbits am 12.02.1974, Orbiter arbeitete nur wenige Tage, Daten von Atmosphäre und Aufnahmen eines kleinen Teils der südlichen Hemisphäre	Nozomi (Planet B)	04. Juli 1998	Japanische Mission zum Mars, Erkundung der Marsatmosphäre, 11 wissenschaftliche Instrumente
Mars 6	05. Aug. 1973	Ankunft am Mars am 12.03.1974, Landung im Margaritifer Sinus; Versagen der Datenübertragung	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
Mars 7	09. Aug. 1973	Ankunft am Mars am 09.03.1974, gelangte nicht in Marsumlaufbahn; Landekapsel verfehlte ihr Ziel	Mars Polar Lander	03. Jan. 1999	Untersuchung von Wetter und Klima, Wasser- und CO ₂ -Haushalt, Landung fehlgeschlagen
Viking 1	20. Aug. 1975	Orbiter und Lander; Erreichen des Marsorbits am 19.06.1976, Landung am 20.07.1976 in Chryse Planitia	Deep Space 2	03. Jan. 1999	Teil des New Millenium Programms, bestand aus 2 Mikropenetratoren, die in den Marsboden nahe des Südpols eindringen sollten, Mitführung auf Mars Polar Lander, Landung fehlgeschlagen
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; über 55.000 Aufnahmen (auch der Monde); globale Abdeckung mit Auflösungen von 100-200 m pro Bildpunkt; regional bis 30 m, einige Aufnahmen bis zu 8 m pro Bildpunkt	2001 Mars Odyssey	07. April 2001	Detaillierte mineralogische Untersuchung der Oberfläche und Untersuchung der Strahlungsumgebung, auch Kommunikationsrelais für zukünftige Landemissionen
Phobos 1	07. Juli 1988	Abbruch der Funkverbindung durch falsches Steuersignal, Rettung der Sonde nicht mehr möglich	Mars Express	02. Juni 2003	Europäische Mission, 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
Phobos 2	12. Juli 1988	Marsorbit; Wärmebilder eines ca. 1500 km breiten Geländestreifens am Äquator; Auflösung etwa 2 km pro Bildpunkt; 9 Aufnahmen von Phobos; Abbruch der Funkverbindung am 27.03.1989			
Mars Observer	25. Sept. 1992	Abbruch der Funkverbindung am 21.08.1993 drei Tage vor Erreichen des Marsorbits; wahrscheinliche Ursache: Explosion des Triebwerks bei Wiederinbetriebnahme (Einschussmanöver); verschiedene Experimente, darunter ein Kamerasystem			

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, Abbruch des Funkkontaktes am 22.03.2010, offizielles Missionsende: 25.05.2011
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, 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
Phobos Grunt	08. Nov. 2011	Russische Mission zum Marsmond Phobos, Erkundung der Landestelle, Probennahme von der Oberfläche und Rückführung zur Erde, durch Fehler in der Antriebseinheit die Flugbahn zum Mars nicht erreicht, Erdorbit, anschließend Verlust der Sonde
Yinghuo-1	08. Nov. 2011	Chinesischer Satellit „Glühwürmchen“, Tandem-Flug mit Phobos-Grunt, Ziel: Eintritt in den Orbit um Mars, Vermessung des Schwerefeldes des Mars über ein Jahr, Verlust der Sonde
Mars Science Laboratory	25. Nov. 2011	Rover-Mission, Landung im Krater Gale, Rover „Curiosity“ mit zahlreichen wissenschaftlichen Instrumenten zur Suche nach Leben, erfolgreiche Landung am 6. August 2012, nominaler Betrieb am Mars: ein Marsjahr (687 Tage)

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 (Ionenantrieb) 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
Rosetta	26. Febr. 2004	Vorbeiflug an 2867 Šteins (2008) und 21 Lutetia (2010) auf dem Weg zum Kometen Churyumov-Gerasimenko
Dawn	27. Sept. 2007	Orbiter zu 4 Vesta (Ankunft Juli 2011, im Orbit um Vesta für ein Jahr) 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; ca. 18.000 Aufnahmen von Jupiter und seinen Monden
Voyager 1	05. Sept. 1977	Vorbeiflug an Jupiter; größte Annäherung: 286.000 km; ca. 18.000 Aufnahmen von Jupiter und seinen Monden
Ulysses	06. Okt. 1990	Amerikanisch-europäische Sonnensonde, 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; Atmosphären-eintrittskörper; Forschungsschwerpunkte: Jupiteratmosphäre; Galileische Monde; Jupitermagnetosphäre
Cassini	15. Okt. 1997	Vorbeiflug an Jupiter auf dem Weg in das Saturnsystem
New Horizons	19. Jan. 2007	Vorbeiflug an Jupiter auf dem Weg in das Pluto-Charon-System
Juno	05. Aug. 2011	Polarer Orbit um Jupiter, Untersuchung der Atmosphäre, des Magnetfeldes, des Schwerefeldes und der Magnetosphäre, nach Erdvorbeiflug 2013 Ankunft am Jupiter am 5. Juli 2016

Missionen zum Saturn

Pioneer 11	06. April 1973	Vorbeiflug an Saturn; größte Annäherung: 20.800 km
Voyager 2	20. Aug. 1977	Vorbeiflug an Saturn; größte Annäherung: 38.000 km; ca. 16.000 Aufnahmen von Saturn und seinen Monden
Voyager 1	05. Sept. 1977	Vorbeiflug an Saturn; größte Annäherung: 124.000 km; ca. 16.000 Aufnahmen von Saturn und seinen Monden
Cassini	15. Okt. 1997	Orbiter, Erkundung des Saturnsystems, Absetzen der Landekapsel Huygens zur Untersuchung des Mondes Titan

Missionen zum Uranus

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

Missionen zum Neptun

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

Missionen zu den Zwergplaneten

New Horizons	19. Jan. 2006	Ankunft im Pluto-Charon-System 2015, Weiterflug in den Kuipergürtel
Dawn	27. Sept. 2007	Erste Mission, die nacheinander in einen Orbit um zwei verschiedene Körper gehen soll: 4 Vesta (Ankunft 2011, im Orbit um Vesta für ein Jahr) und 1 Ceres (Ankunft 2015)

Missionen zu den Kometen

International Sun Earth Explorer 3	12. Aug. 1978	Flug durch Plasmaschweif des Kometen Giacobini-Zinner
Vega 1	15. Dez. 1984	Vorbeiflug am Kometen Halley am 6. März 1986 nach Venusvorbeiflug
Vega 2	21. Dez. 1984	Vorbeiflug am Kometen Halley am 9. März 1986 nach Venusvorbeiflug
Sakigake	07. Jan. 1985	Japanische Mission, Vorbeiflug am Kometen Halley am 1. März 1986
Giotto	02. Juli 1985	Vorbeiflug am Kometen Halley am 13. März 1986, Aufnahmen vom Kometenkern, Vorbeiflug am Kometen Grigg-Skjellerup am 10. Juli 1992
Suisei	18. Aug. 1985	Japanische Mission, Vorbeiflug am Kometen Halley am 8. März 1986
Galileo	18. Okt. 1989	Aufnahmen mehrerer Einschläge des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter vom 17.-22. April 1994
Hubble Space Telescope	25. April 1990	Aufnahmen mehrerer Einschlagsspuren des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter
NEAR	17. Febr. 1996	Vorbeiflug an Komet Hyakutake auf dem Weg zum Asteroiden 433 Eros
Deep Space 1	24. Jan. 1998	Test neuer Technologien (Ionentriebwerk) für Einsatz im Weltraum, Vorbeiflug am Asteroiden Braille und am Kometen Borrelly
Stardust	07. Febr. 1999	Vorbeiflug am Kometen P/Wild 2, Gewinnung von Staubproben und flüchtigen Stoffen aus der Koma, Kartierung des Kometenkerns, Rückführung der Proben zur Erde; Verlängerung der Mission als Stardust/NEXT (New Exploration of Tempel 1)

Übersicht über die Missionen im Sonnensystem

CONTOUR	03. Juli 2002	Nahe Vorbeiflüge an den Kometen Encke und Schwassmann-Wachmann 3 und möglicher Vorbeiflug am Kometen d'Arrest
Rosetta	26. Febr. 2004	Orbiter und Lander, Vermessung und Kartierung des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko, anschließend Landung auf Kometenkern, Ankunft am Kometen 2014
Deep Impact	12. Jan. 2005	Vorbeiflug am Kometen Tempel 1, Abfeuern eines Projektils auf den Kern, Untersuchung des Einschlags; Verlängerung der Mission als EPOXI, Untersuchung des Kometen Hartley 2

Missionen in den Kuipergürtel

New Horizons	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 Recherchearbeit 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 17 derartige Einrichtungen, von denen sich neun 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 Datennetze im engen Kontakt miteinander. Sie sind Teil des Planetary Data Systems (PDS) der NASA und bieten umfangreiche Recherchemöglichkeiten in dessen Datenbanken.

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

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 ver-



schiedene Aufnahmen der Erde aus dem Space-Shuttle-Programm der NASA, Daten des Lunar Reconnaissance Orbiters zum Mond, sowie Daten der Dawn-Mission vom Asteroiden Vesta vor.

Das Originalmaterial wird ergänzt durch einen umfangreichen Bestand an Karten, der mittlerweile auf über 2400 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.

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. Computergestützte 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 Postern, 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 Weltraummissionen (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.

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

Planet	Mission
Merkur	Mariner 10, MESSENGER
Venus	Mariner 10, Pioneer Venus, Venera 15 & 16, Galileo, Magellan, Venus Express, MESSENGER
Erde	Galileo, SIR-C/X-SAR, Topex/Poseidon, Jason-1, Clementine, Kidsat, SRTM, TERRA, Space Shuttle
Mond	Lunar Orbiter 1-5, Apollo, Galileo, Clementine, Lunar Prospector, Cassini, SMART 1, Kaguya, Lunar Reconnaissance Orbiter
Mars	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, Mars Science Laboratory
Asteroiden	Galileo, NEAR, Cassini, Deep Space 1, Rosetta, Dawn
Jupiter	Voyager 1 & 2, Galileo, Cassini, New Horizons
Saturn	Pioneer 11, Voyager 1 & 2, Cassini-Huygens
Uranus	Voyager 2
Neptun	Voyager 2
Komet	Galileo, Hubble Space Telescope, Shoemaker-Levy 9
Komet Hale-Bopp	Daten verschiedener Observatorien
Kometen	Deep Space 1, Stardust, Hubble Space Telescope

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 einem Plasmaspektrometer ausgestattet, mit denen während der nominellen 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 2017 mindestens 289-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 britischen Lan-

demodul, 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 wissenschaftlichen Ziele zu erreichen. So wird das zweite Flugmodell der am Institut ursprünglich für die russische Mars 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 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. Im Juli 2011 ist die Sonde bei

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>

Vesta angekommen und hat über ein gutes Jahr den Asteroiden untersucht. 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 2014 umrunden.

Schließlich soll in Ergänzung zum aktuellen amerikanischen Merkur-orbiter 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 Juli 2015 starten und nach sechs Jahren Flug den Merkur erreichen.

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/>

Die DLR_School_Labs und das Jugendportal DLR_next

Über die Erforschung des Sonnensystems und viele andere spannende Projekte aus Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr informiert das DLR Schülerinnen und Schüler in seinen DLR_School_Labs – siehe www.DLR.de/dlrschoollab

Junge Leute, die unsere faszinierende Welt der Forschung zunächst einmal virtuell kennenlernen wollen, können dies auf www.DLR.de/next tun: Anhand von Texten, Bildern und Videos werden hier viele aktuelle Projekte dargestellt – Spaßfaktor eingeschlossen! Denn DLR_next – das offizielle DLR-Jugendportal – bietet auch Multimedia-Features wie z.B. eine „Virtuelle Reise durchs Sonnensystem“.

Links:

[http:// www.DLR.de/dlrschoollab](http://www.DLR.de/dlrschoollab)
[http:// www.DLR.de/next](http://www.DLR.de/next)

DAS DLR IM ÜBERBLICK

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 16 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Jülich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stade, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 7.400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington D.C.



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

**Institut für Planetenforschung
Regional Planetary Image Facility**

Rutherfordstr. 2
12489 Berlin-Adlershof
Telefon: 030/67055-333
Telefax: 030/67055-372
E-Mail: rpif@dlr.de

www.DLR.de/rpif/