

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
Direktorin: Prof. Dr. Heike Rauer
Datenmanager: Susanne Pieth

2024, 5., aktualisierte und erweiterte Auflage

INHALT

3	Geleitwort
5	Exploration des Sonnensystems mit Raumsonden
11	Sonnensystem und vergleichende Planetologie
17	Sonne
21	Merkur
25	Venus
29	Erde-Mond-System
39	Mars
47	Asteroiden
57	Jupiter
63	Saturn
71	Uranus
75	Neptun
79	Kuipergürtel und Zwergplaneten
87	Kometen
95	Planetenentstehung und Leben
99	Extrasolare Planeten

Anhang

104	Übersicht über die Missionen im Sonnensystem
121	Wie komme ich an Bilddaten?

Impressum

Herausgeber:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Planetenforschung
Regional Planetary Image Facility

Anschrift:
Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
Telefon + 49 (030) 67055-333
E-Mail rpif@dlr.de
DLR.de/rpif/

Titelbild: DLR (CC-BY 3.0)

Die Texte entstanden unter Mitwirkung von Tobias Bohnhardt, Tilmann Denk, Dr. Philipp Eigmüller, Dr. Manfred Gaida, Dr. Christian Gritzner, Ernst Hauber, Prof. Dr. Alan Harris, Dr. Jörn Helbert, Prof. Dr. Harald Hiesinger, Dr. Hauke Hußmann, Prof. Dr. Ralf Jauermann, Dr. Ekkehard Kührt, Dr. Martin Knapmeyer, Dr. René Laufer, Dr. Stefano Mottola, Dr. Nadine Nettelmann, Prof. Dr. Jürgen Oberst, Dr. Katharina Otto, Dr. Ana-Catalina Plesa, Dr. Frank Sohl, Prof. Dr. Tilman Spohn, Dr. Alexander Stark, Dr. Katrin Stephan, Dr. Barbara Stracke, Dr. Daniela Tirsch, Dr. Ruth Titz-Weider und Dr. Roland Wagner.

GELEITWORT

„Was ist da draußen? Gibt es anderswo auch Leben, vielleicht sogar hochentwickeltes Leben wie hier auf der Erde?“ Diese Fragen hat sich wohl jeder schon einmal gestellt. In Momenten der Ruhe, zum Beispiel im Urlaub, bei klarer Sicht und in einer wirklich dunklen Nacht, erleben wir die Faszination des Nachthimmels. Dann kommen Fragen nach dem „da draußen“ und unserem Platz im Universum leicht. Es ist diese Faszination, die Forschenden schon immer Antrieb war, unsere Möglichkeiten, den Weltraum zu erkunden, stetig zu verbessern.

Es ist interessant sich zu vergegenwärtigen, dass die Erkundung unseres Sonnensystems auch heute bei weitem noch nicht abgeschlossen ist. Obwohl die sukzessive astronomische Entdeckung der Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen schon vor Jahrtausenden begann, so wurde der äußerste Planet, Neptun, doch erst Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckt. Erst das 20. Jahrhundert erlaubte die Entdeckung von Objekten außerhalb des Neptunorbits. Auf die Entdeckung des zunächst als Planet klassifizierten Pluto folgte dann Anfang der 1990er Jahre die Entdeckung einer Vielzahl von Objekten im sogenannten Kuiper-Edgeworth-Gürtel. Dieser bis dahin nur theoretisch postulierte „Gürtel“ aus kleinen Körpern umringt das äußere Sonnensystem. Damit wurde klar, dass Pluto nicht ein Planet ist, sondern als Übergangsobjekt zum Kuipergürtel zu klassifizieren ist. Die das Sonnensystem bei noch viel größeren Abständen gänzlich umhüllende sogenannte Oortsche Wolke wurde theoretisch aus den Orbits langperiodischer Kometen postuliert, eine direkte Beobachtung dieser Objekte steht allerdings auch heute noch aus.

Seit einigen Jahrzehnten sind wir dabei, unsere nahe Umgebung nicht nur mit Teleskopen, sondern auch durch Raumsonden direkt zu erkunden. Die frühen Raumsonden beeindruckten mit Vorbeiflügen an den Planeten sowohl des inneren Sonnensystems, als auch, mit den *Voyager*-Sonden, der Erkundung inzwischen über die Grenze des Sonnensystems hinaus. Erstmals wurden Bilder hoher Auflösung der Körper des Sonnensystems, inklusive der Kometen und Asteroiden, möglich. Und nicht nur das, auch die detaillierte geophysikalische Untersuchung konnte beginnen. Seit dem Jahre 1966 gab es auch in situ Untersuchungen mit zunächst robotischen Landern (Mond, Venus, Mars), auf dem Mond dann von Astronauten durchgeführte, umfangreiche Experimente und dreimal sogar lange Exkursionen mit einem Mondfahrzeug.

Die robotische in-situ-Erkundung der Himmelskörper im inneren Sonnensystem ist in den letzten Jahren in eine neue Phase getreten. Robotische Lander, mobile Rover, und auf dem Mars nun auch Helikopter, erlauben eine detailliertere Erforschung der Körper, als es mit reinen Fernerkundungsmethoden möglich ist. Noch aufwendigere Analysemethoden

kann man anwenden, wenn es gelingt Proben von Material auf die Erde in unsere Labore zu bringen. Dies ist bereits für erste Proben von Kometen und Asteroiden gelungen. Die Rückführung von Proben vom Mars ist bereits in der Vorbereitung.

Einigen Körpern im Sonnensystem kommt in Bezug auf unsere anfangs gestellten Fragen besondere Bedeutung zu. Der Mars zeigt uns noch heute deutlich, dass es in früheren Zeiten Phasen mit flüssigem Oberflächenwasser, das heißt „habitable“ Bedingungen gegeben haben muss. Dies führt zu der Frage, ob es dort jemals auch Leben gegeben hat. Als weitere potentielle Habitate im Sonnensystem kommen auch die Eismonde der äußeren Planeten in Frage, seitdem unter ihren mächtigen Eiskrusten „Ozeane“, d.h. Schichten mit flüssigem Wasser, vermutet werden. Hier stehen wir mit unserer Forschung heute noch sehr am Anfang.

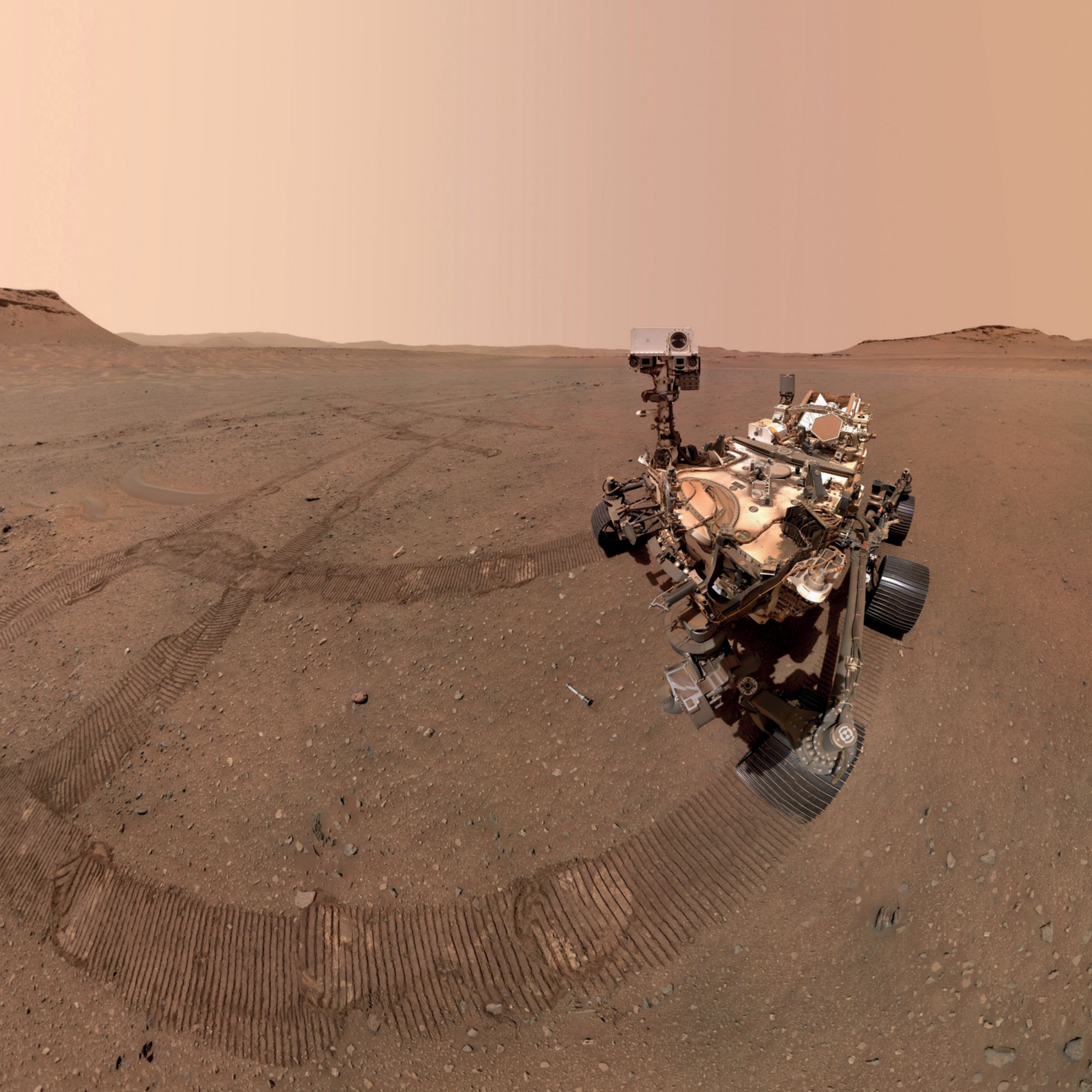
Seit der Entdeckung von Planeten um andere Sterne, sogenannten extrasolaren Planeten, wissen wir, dass unser Sonnensystem nicht einmalig ist, sondern eines von vielen. Die bisher entdeckten Systeme unterscheiden sich erheblich von unserem. Darunter Planeten, die bei uns so nicht vorkommen. Beispiele sind heiße Planeten mit nur wenigen Stunden Umlaufperiode, oder Planeten mit Massen zwischen Erde und Neptun, das heißt, ein Planetentyp, den es bei uns nicht gibt. Der Blick hinaus zeigt wieder einmal, dass die Natur mehr bereithält, als wir uns vorstellen konnten. Noch wissen wir nicht, ob es darunter auch Planeten gibt, die unserer Erde ähneln. Dies wird sich mit verbesserten Messmethoden in den nächsten Jahrzehnten zeigen.

Wie auch immer die Antwort ausfällt, ob es Leben auch anderswo gab und vielleicht heute noch gibt, oder ob dies nicht der Fall zu sein scheint, die Antwort wird uns etwas über unseren Platz im Universum sagen. Davon unberührt bleibt die Einzigartigkeit der Erde als einziger Planet, auf dem Leben für uns selbst möglich ist. Dies sei gesagt, auch wenn wir uns nun auf den Weg begeben, den Mond und vielleicht sogar den Mars für eine begrenzte menschliche Besiedlung in künstlichen Habitaten möglich zu machen.

Diese Broschüre gibt einen Überblick über den heutigen Stand unseres Wissens zu den Planeten, ihren Monden, den Asteroiden und Kometen im Sonnensystem und darüber hinaus. Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Blättern und eine informative Lektüre.

Heike Rauer

Prof. Dr. Heike Rauer lehrt Planetenphysik an der Freien Universität Berlin. Sie leitet das DLR-Institut für Planetenforschung und ist Direktorin der NASA/DLR Regional Planetary Image Facility am DLR-Institut für Planetenforschung.



EXPLORATION DES SONNENSYSTEMS MIT RAUMSONDEN

Mit dem Start des allerersten erdumkreisenden Satelliten *Sputnik 1* durch die Sowjetunion am 4. Oktober 1957 begann das Raumfahrtzeitalter. Schon kurz darauf gelang es der damaligen UdSSR und den USA, Raumsonden zum Mond sowie zur Venus und zum Mars zu schicken, den beiden Nachbarplaneten der Erde. Ab den 1970er-Jahren wurden dann weiter entfernte Ziele im Sonnensystem angesteuert. Bei diesen Missionen beteiligten sich auch andere Nationen an der Erforschung der Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen sowie der Sonne selbst und an der Untersuchung des interplanetaren Raums und der kosmischen Umgebung des Sonnensystems. Trotz einiger Fehlschläge verliefen die meisten Missionen zu den Körpern unseres Sonnensystems erfolgreich und brachten eine Fülle an neuartigen, oft sogar verblüffenden Erkenntnissen über unsere nähere Umgebung im Weltall mit sich. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die detaillierte Erfassung der Oberflächen der verschiedenartigen fluid-, gesteins- und

metallhaltigen Körper und, im Falle der großen Gasplaneten, der äußersten Schichten ihrer Atmosphären. Dies geschieht auf Raumsonden, Landern und Rovern mit zunächst konventioneller, später digitaler und schließlich multispektraler Fotografie sowie mithilfe der abbildenden Spektroskopie, die auch kürzere und längere Wellenlängen erfasst. Gestatten dichte Atmosphären keine direkte Sicht auf die Oberfläche, wie bei dem Planeten Venus oder dem Saturnmond Titan, können Radarexperimente zur Erfassung und Charakterisierung der Oberflächen angewendet werden.

Für die planetare Fernerkundung werden außer Sensoren für den sichtbaren Spektralbereich, die in verschiedenen Kamerasystemen zum Einsatz kommen, auch Detektoren für kurz- oder langwelligere Frequenzbereiche des elektromagnetischen Spektrums in Spektrometern eingesetzt. Bei diesen Detektoren ist die Auflösung teils geringer, sodass deshalb viele Fragen zunächst ungeklärt bleiben und erst durch weiterentwickelte zukünftige Raumfahrtmissionen beantwortet werden können.

Vorgehensweise bei der Erforschung

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

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

Bild: Start der Sonde *JUICE* an Bord einer Ariane-5-Rakete am 14. April 2023 von Kourou. (© ESA - S. Corvaja)

Bild linke Seite: Rover *Perseverance* auf der Marsoberfläche, im Vordergrund ein abgelegtes Probenröhrchen. (© NASA/JPL-Caltech/MSSS)



Dieser Ablauf wird nicht immer in der hier aufgeführten Reihenfolge eingehalten. Oftmals werden Schritte zusammengefasst oder übersprungen, wie die Erfahrung aus fast fünf Jahrzehnten Planetenerkundung zeigt. Dafür gibt es sowohl technisch-wissenschaftliche, als auch finanzielle bzw. politisch-gesellschaftliche Gründe.

Die ersten vier Jahrzehnte

Am 2. Januar 1959 überwand nach etlichen Fehlschlägen die sowjetische Raumsonde *Luna 1* die Fluchtgeschwindigkeit von 11,2 Kilometern pro Sekunde, um aus dem Schwerfeld der Erde zu gelangen, und läutete mit dem ersten Vorbeiflug am Mond das Zeitalter der Planetenerkundung ein. Die nachfolgend einsetzende Erkundung des Sonnensystems lässt sich zeitlich in vier Phasen einteilen.

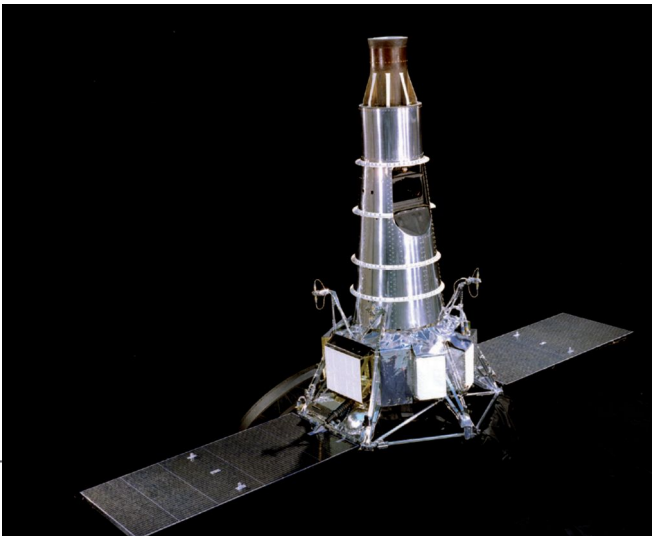
Die erste Phase von 1959 bis 1967 ist zunächst geprägt durch die Erkundung des Mondes, doch schon wenig später wurden auch die beiden Nachbarplaneten der Erde, Venus und Mars, mit unbemannten Raumsonden angesteuert. Die Erforschung des Mondes diente vor allem der Vorbereitung bemannter Missionen und war intensiv vom Wettlauf zweier konkurrierender politischer bzw. gesellschaftlicher Systeme um den technologischen Führungsanspruch gekennzeichnet. Der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn dieser Zeit war dabei immens. Zu erwähnen sind hier die sowjetischen Missionen *Luna 1* (Mondvorbeiflug), *Luna 2* (harte Mondlandung) und *Luna 3*, welche erste, wenn auch qualitativ minderwertige Bilder von der stets erdabgewandten Mondrückseite lieferte. Alle drei Sonden wurden 1959 gestartet, gefolgt von weiteren

Missionen der USA. Die US-Programme *Ranger*, *Surveyor* und *Lunar Orbiter* zur Erkundung des Mondes suchten bereits nach möglichen Landeplätzen für bemannte Missionen. Erste Aufnahmen von der Oberfläche beim direkten Landeanflug oder aus der Mondumlaufbahn lieferten ab 1966 die Sonden *Luna 9*, *Surveyor 1* sowie *Lunar Orbiter 1* und 2. Die Erkundung der Venus und des Mars bestand vor allem aus Vorbeiflügen, von denen zunächst nur wenige erfolgreich waren wie die von *Mariner 2* (Venus, 1964), *Mariner 4* (Mars, 1964/65) und 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 Realisierung der ersten bemannten Mondmissionen gekennzeichnet. Außer den sechs erfolgreichen US-amerikanischen Mondlandungen fanden vor allem sowjetische unbemannte Missionen zu Mond, Mars und Venus statt. Das *Apollo*-Programm gab der Raumfahrt einen enormen Schub und war darüber hinaus 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*). Erst in den 1990er Jahren wurde bekannt, dass auch die UdSSR versucht hatte, Menschen auf den Mond zu bringen. Doch die dafür entwickelte Trägerrakete N1-Herkules versagte immer wieder, sodass das Programm nach der ersten Mondlandung von *Apollo 11* im Juli 1969 stillschweigend eingestellt wurde. Neben weiteren erfolgreichen Vorbeiflügen an Venus und Mars landete 1970 *Venera 7* als erste Sonde auf der Venus und *Mariner 9* schwenkte in eine Umlaufbahn um den Mars ein. Damit wurde die Sonde zum ersten künstlichen Satelliten eines anderen Planeten (1971/72). Mit *Pioneer 10* und *11* starteten 1972 und 1973 die ersten Sonden in das äußere Sonnensystem. Nach Vorbeiflügen an den Gasriesen Jupiter und Saturn befinden sie sich nun am Rande des Sonnensystems, mehr als hundertmal so weit entfernt wie die Erde von der Sonne.

Die dritte Phase von 1973 bis 1988 ist zum einen von der intensiveren Erforschung der Nachbarplaneten Mars und Venus, zum anderen von der Erkundung des äußeren Sonnensystems geprägt. Die für lange Zeit einzigen Vorbeiflüge an Merkur fanden mit *Mariner 10* von 1973 bis 1975 statt. Daneben wurden weitere Missionen zur Venus und zum Mars durch die UdSSR durchgeführt. 1974 und 1976 machten sich die beiden Sonden *Helios 1* und *2* auf den Weg Richtung Sonne. Die in

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)





Deutschland entwickelten Raumsonden wurden von den USA in Cape Canaveral gestartet und waren sechs bzw. elf Jahre erfolgreich in Betrieb. Besondere Bedeutung erlangten in diesen Jahren vor allem zwei Programme: *Viking* und *Voyager*.

Im Rahmen des amerikanischen *Viking*-Programms schickte die NASA 1975 zwei Sonden, jeweils bestehend aus Orbiter und Lander, zum Mars, die dort ein Jahr später ihre Arbeit aufnahmen und teilweise bis in die achtziger Jahre hinein Daten zur Erde sandten. Die Ergebnisse, vor allem die Fotokartierung der Marsoberfläche, sind noch heute unverzichtbares Grundlagenwissen über den Roten Planeten und dienen mit zur Vorbereitung zukünftiger Missionen.

Ähnliche Bedeutung erlangte das *Voyager*-Programm. Die beiden baugleichen *Voyager*-Sonden starteten 1977 zur Erkundung 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 haben 2024 etwa 20,5 und 24,5 Milliarden Kilometer Entfernung zur Sonne die Grenze zum interstellaren Raum erreicht. Trotz dieser enormen Distanz können wir noch immer ihre Signale empfangen. Das während des langen Fluges gewonnene Bildmaterial und die Messdaten stellen in Bezug auf das äußere Sonnensystem und dessen Grenze bis heute eine bedeutende und hinsichtlich Uranus und Neptun sogar eine einzigartige Wissensgrundlage dar. Die UdSSR setzte in dieser Phase ihr umfangreiches Venus-Programm mit Landungen, Oberflächenaufnahmen, Ballonsonden und Radarkartierungen fort. Venus wurde aber auch im Rahmen des US-amerikanischen *Pioneer*-Programms

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)

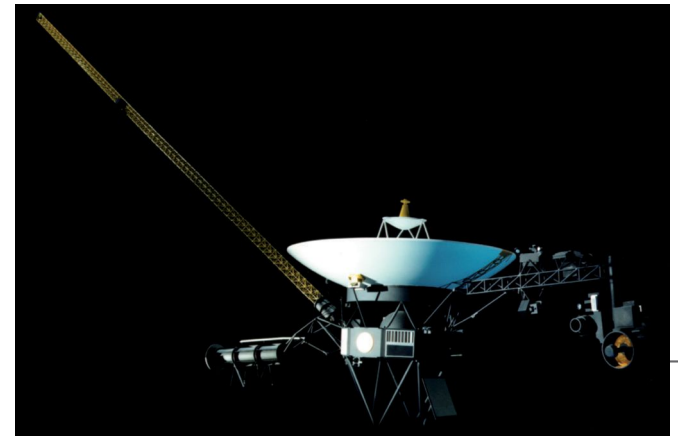
Bild rechts: Sonde *Voyager*. (© NASA)

erkundet, ebenso wie später der Halleysche Komet, der bei seinem letzten Erscheinen im inneren Sonnensystem 1986 auch von mehreren Raumsonden aus Europa (*Giotto*), der UdSSR und Japan Besuch bekam. In diesen Jahren wurden neue oder modifizierte Sondentypen entwickelt, die jeweils eine höhere Nutzlastmasse zuließen; 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, hochspezialisierter Missionen. Dabei bezieht sich die Größeneinschätzung sowohl auf die Masse der Raumfahrzeuge als auch auf die Kosten, Entwicklungs- und Betriebszeiten der Mission. Herausragend dabei waren *Galileo* als aufwändige Langzeitmission zur Erkundung des Jupitersystems (Start 1989, Missionsende 2003) und Mars Pathfinder mit dem Rover *Sojourner* als spezialisierte Mission, um ein weiches Aufsetzen mit Airbags anstelle von Bremsstrahlwerken zu demonstrieren (geschehen am 4. Juli 1997 auf dem Mars). Die Bilder beider Missionen stießen auf ein überwältigendes öffentliches Interesse und trugen wesentlich zur allgemeinen Beliebtheit der planetaren Raumfahrt und ihrer Ergebnisse bei. Bis heute folgten drei weitere Rover-Missionen mit insgesamt vier Marsfahrzeugen.

Aktuelle und zukünftige Missionen

Um die Jahrtausendwende sind im Wesentlichen drei Schwerpunkte sichtbar geworden und markieren damit den Beginn der jüngsten aktuellen Phase der internationalen Planetenforschung: 1. die intensive und langfristige Erkundung des Mars, 2. die Erforschung der kleinen Körper des Sonnensystems und 3. die Erkundung der Eismonde im äußeren Sonnensystem sowie Pluto. Die weitere Erforschung des Erdmondes,



seine zukünftige Nutzung und eine mögliche Rückkehr mit Menschen zum Erdrabanten wird derzeit von den allen Raumfahrtationen der Welt verfolgt. Ebenso rücken Ziele in den Vordergrund, die bisher nur wenig erforscht wurden. Dazu zählen der Planet Merkur, die Zwergplaneten und etliche kleinere und größere Asteroiden. Pluto, der bekannteste Zwergplanet, galt lange Zeit als letzter „weißer Fleck“ unter den großen Körpern des Sonnensystems, ehe die NASA-Sonde *New Horizons* im Juli 2015 an ihm und seinen Monden nah vorbeiflog und verblüffende Daten zur Erde sandte. Wie auch später beim Vorbeiflug am Kuipergürtel-Objekt Arrokoth war nicht damit gerechnet worden, dass sich in dieser kalten Region des Sonnensystems derart komplexe Oberflächenstrukturen herausgebildet haben.

Insgesamt nahm im neuen Jahrtausend die Zahl der Planetenmissionen wieder zu. Die Miniaturisierung von Kameras und Messinstrumenten sowie die Möglichkeiten zur Verarbeitung großer Datenmengen bereits an Bord der Sonden führte zu enormen Fortschritten.

In den kommenden Jahrzehnten könnten gemäß der synodischen Umlaufzeit von Erde und Mars gut alle zwei Jahre Sonden zu unserem äußeren Nachbarplaneten, dem Mars, geschickt werden. Nach dem Scheitern des *Mars-Surveyor-98*-Programms mit der missglückten Landung am Marssüdpol und dem Fehlschlag mit einem Orbiter zur Untersuchung der Marsatmosphäre konnte die NASA bei drei weiteren Orbitern einen großen Erfolg verzeichnen, der mit der Landung der beiden *Mars Exploration Rover, Spirit* und *Opportunity*, im Jahre 2004 einen vorläufigen Höhepunkt erreichte. Die aktuelle Explorationsstrategie zur 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 Bedingungen gab, höchste Priorität eingeräumt wird. Europas Beitrag sind dabei die erfolgreiche *Mars Express*-Mission, die seit Ende 2003 eine Fülle von Daten und Bildern mit hoher Auflösung vom Mars sendet. Zur Explorationsstrategie gehört es auch – möglicherweise in einer gemeinsam mit der Europäischen Weltraumagentur ESA durchgeführten *Mars Sample Return* Mission – im Zuge der *Mars 2020*-Mission eingesammelte und in Behältern deponierte Marsgesteinsproben zur Erde zurückzuholen; zu einem späteren, noch unbekannten Zeitpunkt könnte dies auch im Rahmen einer astronautischen Landung auf dem Mars erfolgen.

Mit der Ankunft des Rovers *Curiosity* der Mission *Mars Science Laboratory* am 5. August 2012 erreichte die Marsforschung eine neue Qualität. Das 900 Kilogramm schwere Fahrzeug *Curiosity* verfügt gegenüber seinen Vorläufern über eine deutlich gesteigerte Mobilität und führt 95 Kilogramm wissenschaftliche Nutzlast verteilt auf zehn Experimente



mit sich. Ziel der Mission ist die Suche nach möglichen Habitaten für Organismen auf dem Mars, nach Kohlenwasserstoffverbindungen und der chemischen Elemente, die für die Entstehung und Entwicklung von Leben nötig sind. Mit der Marssonde *MAVEN* untersucht die NASA seit 2014 die obere Marsatmosphäre. Die Landemission *InSight* startete 2018 und widmete sich insbesondere der Messung geophysikalischer Parameter des Marsinneren. Dazu war sie u.a. mit einem am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelten Bohrer für ein Wärmeflussexperiment ausgerüstet. Die ESA schickte 2016 mit *ExoMars* einen Orbiter und ein Landedemonstrator zum Mars, wobei die Landung missglückte. Frühestens 2028 soll dann der *ExoMars Rover Rosalind Franklin* folgen.

Die europäische Technologie-Testsonde *SMART-1*, die zwischen November 2004 und Mitte 2006 den Mond umrundete und deren Mission mit einem gezielten Einschlag auf der Mondoberfläche endete, bildete den Auftakt zu einer intensiven Erforschung unseres Erdrabanten. Innerhalb kurzer Zeit folgten Mondmissionen aus Japan, Indien und China. Die USA verbesserten die Datengrundlage für die Kartierung des Mondes seit 2009 mit dem *Lunar Reconnaissance Orbiter* deutlich. Der Mond wird für einige der raumfahrenden Nationen und Agenturen auch weiterhin einen hohen Stellenwert haben, da er leicht erreichbar ist und wissenschaftlich nach wie vor ein lohnendes Ziel darstellt. Für die Planetenforschung sind hierbei vor allem eine bessere Kenntnis der Mondrückseite von Interesse sowie Gesteinsproben von bisher nicht erforschten Stellen. Spezielle Roboterfahrzeuge mit automatisierter Probenentnahme könnten bei Mondmissionen zum Einsatz kommen. Eine Rückkehr des Menschen zum Mond soll noch in diesem Jahrzehnt im Rahmen des *Artemis*-Programms der NASA erfolgen.

Innerhalb der Erdbahn umkreiste die europäische Sonde *Venus Express* von 2006 bis 2014 unseren Nachbarplaneten. Von 2011 bis 2015 befand sich *MESSENGER*, eine 2004 gestartete Mission des Discovery-Programms der NASA, in einer Umlaufbahn um den Merkur und ermöglichte erstmals eine globale Charakterisierung und Bildaufnahme des innersten Planeten. Im Oktober 2018 folgte ihr die europäisch-japanische

Bild: Mars Helikopter *Ingenuity* mit Rover *Perseverance* im Hintergrund, künstlerische Darstellung. (© NASA/JPL-Caltech)

Mission *BepiColombo*, die ab Dezember 2025 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 aus dem Schweif des Kometen 81P/Wild 2 zur Erde zurückgebracht. Auch die japanische Sonde *Hayabusa* kehrte 2010 trotz zahlreicher technischer Probleme mit Probenmaterial vom Asteroiden Itokawa zur Erde zurück. Ende des Jahres 2014 flog die Nachfolge-mission *Hayabusa2* zum Asteroiden Ryugu, um Proben zu entnehmen, die sie 2019 zur Erde zurückbrachte. Mit an Bord befand sich der am DLR entwickelte Lander *MASCOT*, der Messungen und Bildaufnahmen auf der Oberfläche vornehmen konnte. Das Mutterschiff soll 2031 einen weiteren Asteroiden besuchen. Immer stärker in den Fokus rückt auch die Erforschung erdbahnkreuzender Asteroiden und deren mögliche Ablenkung im Falle eines Kollisionskurses mit der Erde. So wurden dafür bei ESA und NASA sogenannte Planetary Defense Offices gegründet. Die Europäische Union und die ESA fördern hierzu umfangreiche Untersuchungen, die möglicherweise im kommenden Jahrzehnt in einer ersten Testmission zur gezielten Bahnablenkung eines Asteroiden münden werden. Mit der NASA-Mission *DART* wurde 2022 bereits ein Abwehrmanöver erprobt, indem die Sonde auf den Mond Dimorphos des Asteroiden Didymos einschlug und dadurch die Umlaufzeit des Mondes um rund eine halbe Stunde verringerte. Die europäische Raumsonde *Hera* soll im Oktober 2024 starten und ab Ende 2026 die Folgen des Einschlags ein halbes Jahr lang vor Ort genau analysieren.

Ein sehr großer Erfolg war der 2007 gestarteten NASA-Mission *Dawn* beschieden. Sie erreichte 2011 den Asteroiden Vesta und erforschte ihn aus drei unterschiedlich hohen Umlaufbahnen, ehe sie im August 2012 zum Zwergplaneten Ceres weiterflog. Es ist die erste Raumsonde, die jenseits der Erde an zwei verschiedenen Körpern des Sonnensystems in eine Umlaufbahn gelenkt wurde. Die Mission endete 2018.

Ein Highlight der Planetenforschung war die 2004 gestartete europäische *Rosetta*-Mission zum Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko, den sie Mitte 2014 und aus einer Umlaufbahn beobachtete. Im November 2014 setzte sie den Lander *Philae* auf dem Kometenkern ab. *Rosetta* lieferte bis September 2016 eine Flut an verblüffenden Bildern und neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen. Die *OSIRIS-REx*-Mission der NASA wurde 2016 zum Asteroiden 1999 RQ₃₆ (Bennu) gestartet, um ihn ab

Sommer 2018 zunächst aus einer Umlaufbahn zu charakterisieren und anschließend von seiner Oberfläche eine Probe zu entnehmen. Nachdem die Rückkehrkapsel am 24. September 2023 in hunderttausend Kilometer Erddistanz für den Rücksturz zur Erde freigelassen wurde, fliegt das Mutterschiff unter dem neuen Namen *OSIRIS-APEX* zum Asteroiden Apophis weiter, den sie im April 2029 nach dessen Nahbegegnung mit der Erde erreichen und für anderthalb Jahre studieren soll.

Im äußeren Sonnensystem war die *Cassini/Huygens*-Mission, zur Erkundung des Saturnsystems mit 18 Experimenten bestückt, seit ihrer Ankunft am Ringplaneten im Sommer 2004 ein ganz besonderes Projekt der Planetenforschung. Die Raumsonde lieferte mehr als 13 Jahre lang große Datenmengen aus der Welt des Saturn, 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 hochinteressant war der Abstieg der Landesonde *Huygens* durch die Atmosphäre des Saturnmondes Titan im Januar 2005 mit der anschließenden weichen Landung auf seiner eisigen Oberfläche. Die *Cassini*-Mission endete im September 2017 mit dem Eintritt in die Saturnatmosphäre und dem Verglühen der Raumsonde.

Die Erforschung des Jupiters bildet im kommenden Jahrzehnt einen weiteren Schwerpunkt der europäischen Raumfahrt, nachdem am 14. April 2023 die Mission *JUICE*, der *Jupiter Icy Moons Explorer*, mit zehn Instrumenten an Bord gestartet wurde. Er soll 2031 am Jupiter ankommen und ihn sowie seine Eismonde Europa, Callisto und Ganymed bis 2035 eingehend untersuchen. Deutsche Forschungseinrichtungen sind an sieben Instrumenten teils federführend beteiligt. Seit Juli 2016 befindet sich am Jupiter die amerikanische Raumsonde *JUNO* und liefert wichtige Daten, speziell über die Jupiteratmosphäre. Sie soll dort vorerst noch bis September 2025 aktiv bleiben.

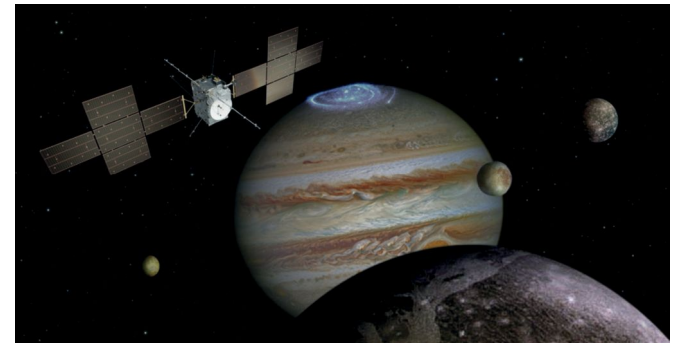
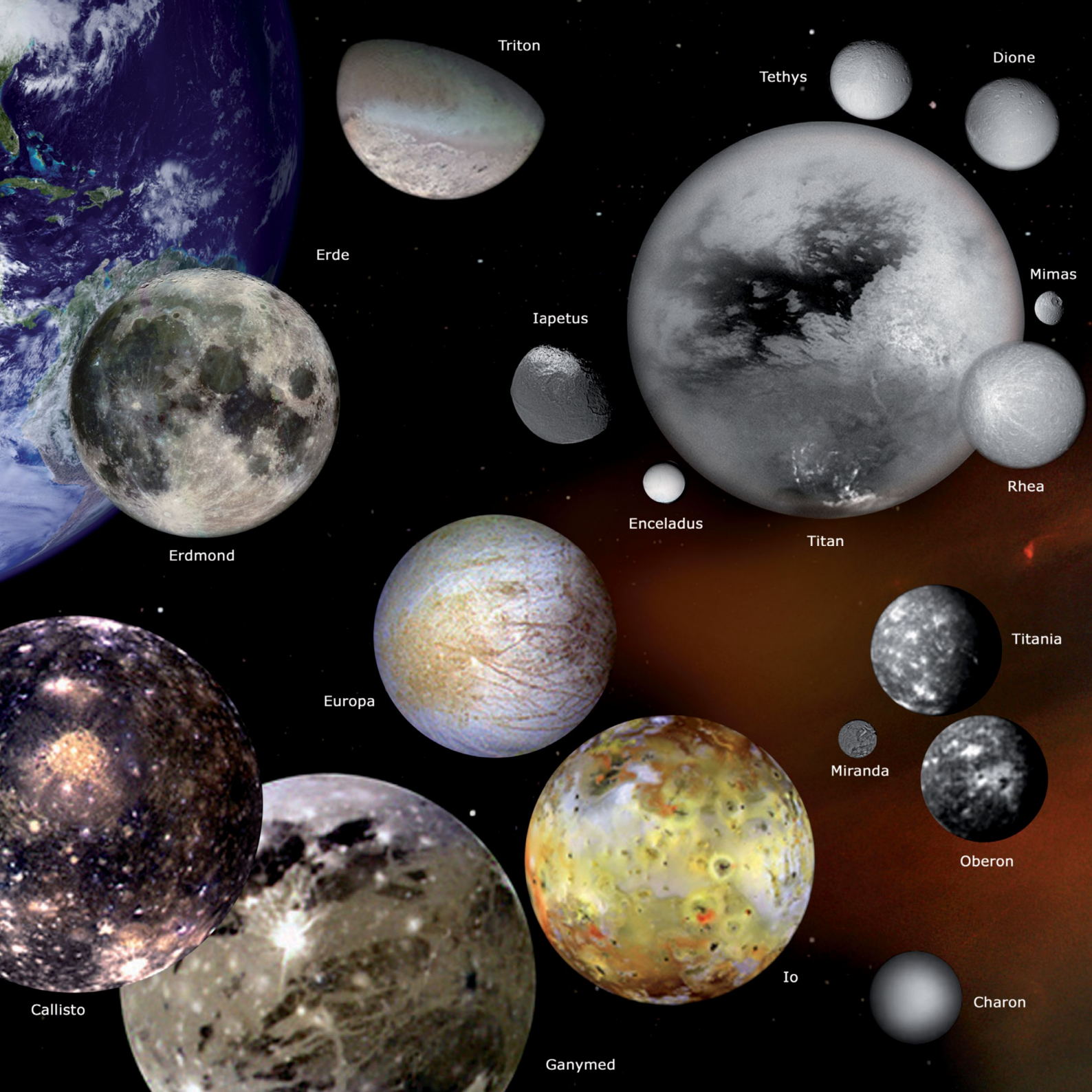


Bild: Sonde JUICE im Jupitersystem, künstlerische Darstellung.

(© spacecraft: ESA/ATG medialab; Jupiter: NASA/ESA/J. Nichols (University of Leicester); Ganymede: NASA/JPL; Io: NASA/JPL/University of Arizona; Callisto and Europa: NASA/JPL/DLR)



Triton

Tethys

Dione

Erde

Iapetus

Mimas

Erdmond

Enceladus

Titan

Rhea

Europa

Titania

Miranda

Oberon

Callisto

Io

Charon

Ganymed

SONNENSYSTEM UND VERGLEICHENDE PLANETOLOGIE

Das Sonnensystem, unsere nähere kosmische Heimat, ist nur eines von vielen Planetensystemen im Weltall. Bis heute (Mai 2024) sind mehr als 5500 Planeten um andere Sterne bekannt. Wir dürfen davon ausgehen, dass in den kommenden Jahren noch sehr viele Planeten und Planetensysteme entdeckt werden. Dabei zeigen sich durchaus bedeutsame Unterschiede: So finden wir in extrasolaren Planetensystemen oft Riesenplaneten wie Jupiter und Saturn auf sternnahen Bahnen, auf denen sich im Sonnensystem die relativ kleinen erdähnlichen Planeten befinden.

Von den acht Planeten, die um die Sonne kreisen, wissen wir nur von der Erde, dass dort Leben entstanden ist. Die Untersuchung von Mikroorganismen, die unter extremen Bedingungen auf der Erde leben, lässt allerdings vermuten, dass mikrobielles Leben auch auf anderen Planeten und Monden des Sonnensystems möglich wäre. Das Leben auf der Erde entstand vor drei bis dreieinhalb Milliarden Jahren, aber erst seit dem Zeitalter des Kambriums, das vor etwa 570 Millionen Jahren begann, haben sich höhere Lebensformen entwickelt.

Bereits in der Antike beobachteten Astronomen „Sterne“, die sich vor dem Hintergrund des scheinbar „fixen“, unveränderlichen Sternenhimmels bewegten. Sie nannten diese Objekte Planeten, was soviel wie „Wanderer“ bedeutet. Später gaben sie den einzelnen, mit dem bloßen Auge sichtbaren Wandersternen 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 – Jupiters Vater und zugleich Gott der Landwirtschaft und der Zeit. Seit mehr als einem halben Jahrhundert 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. Der Blick auf die Erde von außen, aus einer gewissen Distanz, eröffnete völlig neue Forschungsaspekte und hat große kulturelle und philosophische Bedeutung.

Zu unserem Sonnensystem gehören viele unterschiedliche Körper, die von lockeren, hochporösen Körpern aus Staub und Eis (wie der Kern des Kometen Churyumov-Gerasimenko), über Asteroiden aus Gestein, Metall und Eis, erdähnliche Gesteinsplaneten mit fester Oberfläche bis hin zu großen 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. Dies ist die Bahnebene, in der die Erde die Sonne umläuft, zugleich fällt sie mit der Äquatorebene der Sonne zusammen. Die Richtungen der Rotationsachsen der Planeten weichen weniger als 30° vom Lot auf diese

Ebene ab. Eine Ausnahme bildet Uranus, dessen Rotationsachse annähernd in der Bahnebene liegt, und dessen Pole auf die Sonne zeigen. Neptun ist so weit von der Sonne entfernt, dass eine Umrundung der Sonne 165 Jahre dauert. Merkur, der innerste Planet, benötigt dafür nur 88 Tage.

Weiter außen im Sonnensystem befinden sich die Zwergplaneten Pluto, Haumea, Makemake und Eris mit Umlaufperioden von 248 (Pluto) bis 560 Jahren (Eris). Diese gehören zum Kuipergürtel, dem inneren Bereich der Objekte jenseits von Neptun (Transneptune). Der fünfte von der International Astronomical Union anerkannte Zwergplanet Ceres umkreist die Sonne im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Die kleineren, unregelmäßig geformten Körper des Sonnensystems haben häufig stärker elliptische Bahnen. Viele Kometen bewegen sich auf elliptischen bis hyperbolischen Bahnen, die sie bis an den Rand des Sonnensystems führen oder sogar 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, wie beispielsweise die Perseiden, Mitte August mitunter sehr spektakulär sein können.

In Abhängigkeit von der Entfernung zur Sonne zeigt sich ein deutlicher Trend in der jeweiligen Masse und Zusammensetzung der Planeten. Die erdähnlichen oder „terrestrischen“ Planeten (Merkur, Venus, Erde, Mond* und Mars) im inneren Sonnensystem haben eine vergleichsweise geringe Masse bei einer hohen Dichte und bestehen vor allem aus Gestein 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. Jupiter und Saturn vereinen auf sich mehr als 90% der Gesamtmasse aller planetaren Körper des Sonnensystems und bestehen vorwiegend aus gasförmigem, aber wegen des enormen Drucks im Inneren, superkritischem bis sogar metallischen Wasserstoff und aus Helium, worin die Unterschiede zwischen gasförmigem und flüssigem Zustand verschwimmen. Uranus und Neptun dagegen bestehen hauptsächlich aus überkritischem Methan, Wasser und Ammoniak sowie aus molekularem Wasserstoff und Helium. Die Riesenplaneten haben Monde, die zumeist zu großen Teilen aus Eis und Gestein

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

Bild linke Seite: Monde in unserem Sonnensystem. (© NASA)

bestehen. Diese Substanzen – Wasser, Methan, Ammoniak und Stickstoff – nehmen bei niedrigen Temperaturen und Drücken den festen Aggregatzustand ein, Wasserstoff und Helium dagegen bleiben unter fast allen natürlichen Bedingungen gasförmig. In ihrem tiefen Inneren haben jedoch auch die Riesenplaneten wahrscheinlich feste Kerne aus dichterem Material. Die Zwergplaneten haben ähnliche Zusammensetzungen wie die Eismonde der Riesenplaneten.

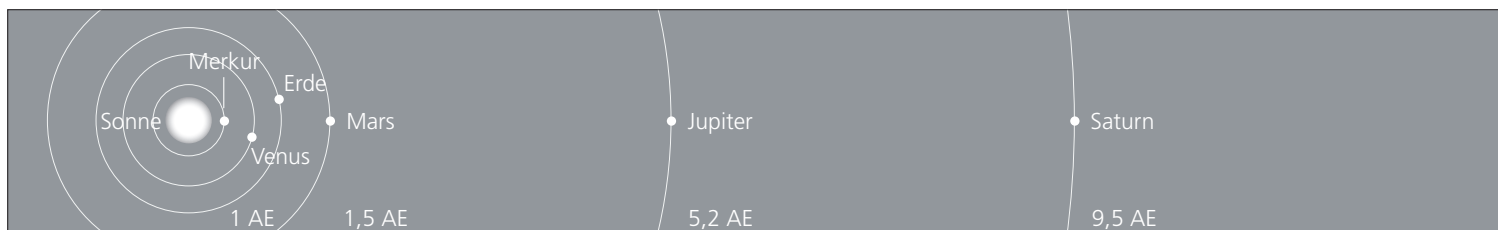
Die Planeten und Zwergplaneten unseres Sonnensystems haben zusammen 293 heute (Februar 2024) bekannte Monde oder Trabanten. Diese weisen sehr unterschiedliche Größen auf, von kleinen Gesteins- und Eisbrocken bis hin zu planetaren Körpern wie Ganymed, Callisto, Io und Titan, die größer als der Erdmond sind. Mindestens 19 dieser Monde haben Kugelgestalt. Viele Trabanten 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 bekannte Magnetfelder, wobei die Felder durch die variable Magnetfeldstärke des rasch rotierenden Jupiters induziert werden. Ganymed weist zusätzlich ein Magnetfeld auf, das wie das der Erde tief im Inneren des Körpers erzeugt wird. Unter den gefrorenen Eisdecken der Jupitermonde Europa, Ganymed und Callisto vermutet man Ozeane. Insbesondere die vorstehend erwähnten induzierten Magnetfelder weisen auf die Existenz von satellitenweiten Ozeanen hin. Man benötigt zur Erklärung der induzierten Felder eine oberflächennahe, elektrisch leitende Schicht, die am besten durch mit Elektrolyten angereichertes Wasser erklärt werden kann. Bilder der Oberflächen von Europa und Ganymed zeigen tektonische Bewegungen in den Eiskrusten, die in (indirektem) Zusammenhang mit den Ozeanen stehen könnten. Eine entscheidende Rolle für die Aufrechterhaltung verborgener Ozeane und oberflächennaher vulkanischer Aktivität kommt der Erwärmung des Satelliteninneren durch Gezeiten zusätzlich zur radioaktiven Zerfallswärme der Gesteinskomponente zu. Der in etwa erdmondgroße Jupitermond Io ist beispielsweise aufgrund seiner Nähe zu dem massereichen Gasriesen Jupiter und der gravitativen Wechselwirkung mit den benachbarten Monden Europa und Ganymed enormen Gezeitenkräften unterworfen, so dass

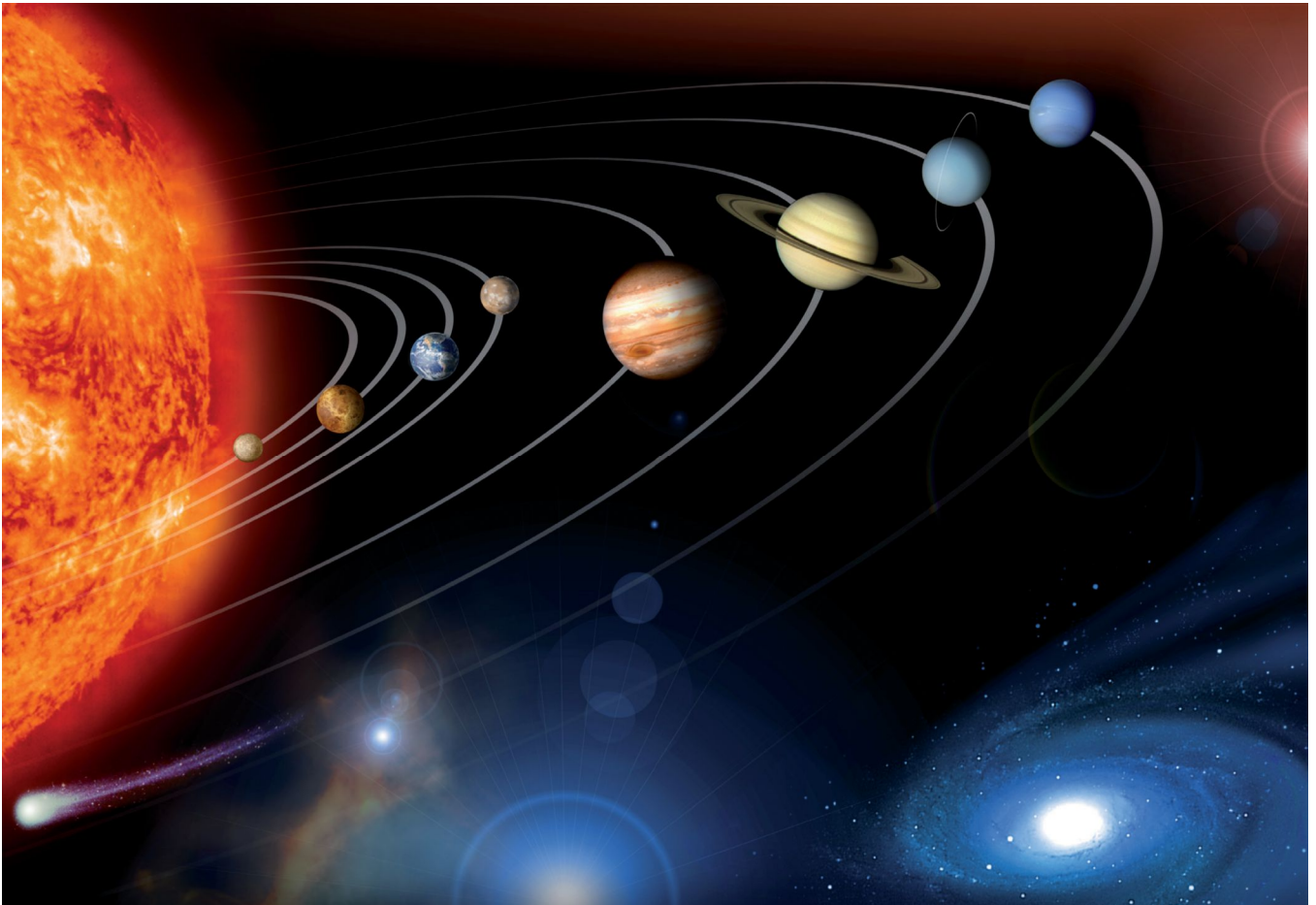
er gegenwärtig annähernd das Zwanzigfache der Wärme der wesentlich größeren Erde abgibt und deshalb auch der vulkanisch aktivste Körper im Sonnensystem ist. Während die Monde der Riesenplaneten wahrscheinlich wie ein kleines Planetensystem um den zentralen Körper entstanden sind, handelt es sich bei anderen Monden um möglicherweise eingefangene Trabanten. So könnte es sich bei den beiden Marsmonden Phobos und Deimos um Trümmerreste aus einem Asteroideneinschlag auf der Marsoberfläche handeln, oder um Asteroiden, die von der Anziehungskraft des Planeten eingefangen wurden. Der Saturnmond Phoebe und der Neptunmond Triton sind wahrscheinlich Körper aus den fernerer Zonen des Sonnensystems, die durch die Schwerkraft auf Bahnen um die Planeten gelenkt wurden.

Aktuelle Theorien zur Entstehung unseres Sonnensystems basieren auf der allgemein akzeptierten und erstmals von Immanuel Kant und Pierre Laplace im 18. Jahrhundert formulierten Vorstellung, dass die Sonne und die Planeten vor rund 4,56 Milliarden Jahren gleichzeitig oder kurz nacheinander durch den Kollaps eines rotierenden Urnebels aus Gas und Staub entstanden sind. Diese Theorien werden durch die Massenverteilung sowie die chemischen und dynamischen Eigenschaften des Sonnensystems gestützt. Demnach bildeten sich vermutlich innerhalb von wenigen Millionen Jahren durch Agglomeration und Akkretion zunächst die Riesenplaneten Jupiter und Saturn, die danach – so ein aktuelleres Modell – zunächst nach innen und dann wieder nach außen wanderten. Diese Wanderbewegung ist auf die gravitative Wechselwirkung der beiden Riesenplaneten untereinander und mit dem Restnebel zurückzuführen. Durch die Einwärtsbewegung wurde das Material in der inneren Zone des Nebels zusammengeschoben, woraus sich dann die kleinen erdähnlichen Planeten bilden konnten. In den meisten bisher entdeckten anderen Planetensystemen sind die Riesenplaneten nicht wieder nach außen gewandert. Welche

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

Bild unten: Maßstäbliche Entfernungen im Sonnensystem unabhängig von der Planetengröße.



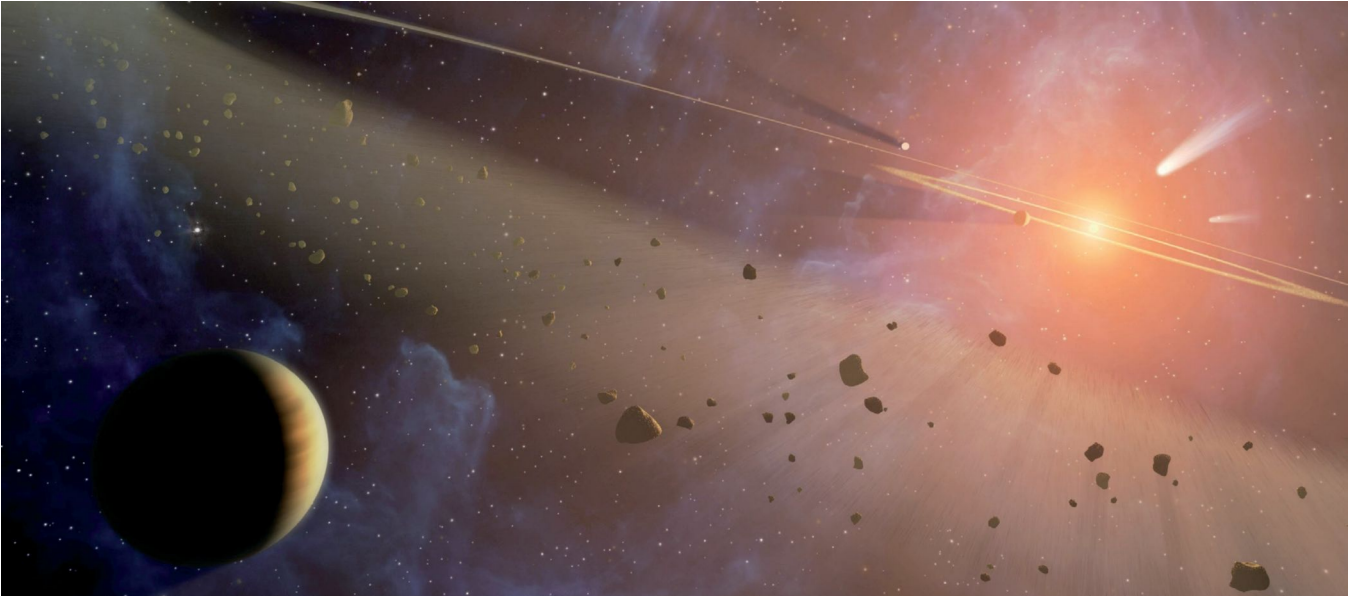


• Uranus

19 AE

• Neptun

30 AE



Auswirkungen dies auf die Chance für eine „zweite“ Erde in solchen Sternsystemen hat, muss noch untersucht werden.

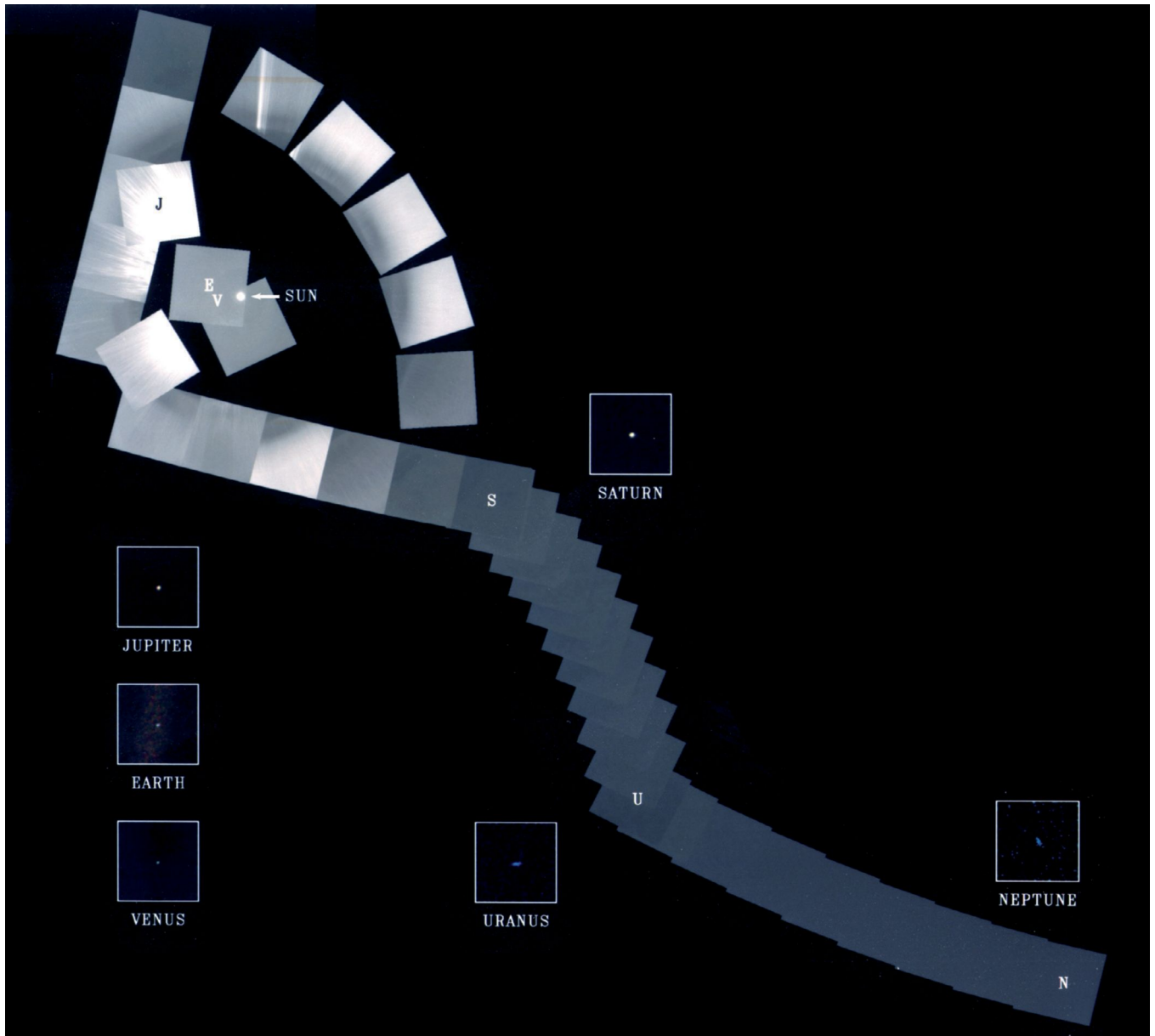
Die Akkretion eines Planeten verläuft wie eine Kaskade. Nach der Kondensation fester Teilchen bilden sich Klumpen, die dann aufeinanderstoßen und sich zerstören, oder miteinander zu größeren Gebilden verbinden können. Das restliche Gas der protoplanetaren Scheibe kollabiert auf die größten, am schnellsten gewachsenen Protoplaneten und bildet Gasplaneten. In unserem Sonnensystem formte sich zunächst Jupiter und danach Saturn, sowie Uranus und Neptun. Dabei kam es möglicherweise zu Instabilitäten der Umlaufbahnen, die u.a. den Neptun von diesseits des Uranus auf eine Bahn jenseits beförderten. Die mit der Instabilität verbundene Verwirbelung der Region der Riesenplaneten hat zur Bildung des Kuipergürtels jenseits von Neptun geführt, in dem wir heute Pluto und andere Zwergplaneten finden. Die inneren vier terrestrischen Planeten entstanden durch den Prozess der Akkretion in einer Region, in der aufgrund der höheren Temperatur flüssiges Wasser und insbesondere Eispartikel nicht lange stabil waren. Allerdings kann Wasser in Silikaten chemisch gebunden gewesen sein. Eine wichtige aktuelle Debatte der Wissenschaft betrifft die Herkunft des Wassers auf der Erde und auch auf den anderen Gesteinsplaneten. Eine Hypothese lässt in der Spätphase der Entstehung wasserhaltige Kleinkörper aus dem äußeren Sonnensystem auf die terrestrischen Planeten gelangen. Dieser Schauer könnte durch die oben genannten Bahninstabilitäten ausgelöst worden sein. Eine andere Hypothese baut das Wasser schon in die Protoplaneten ein, da Wasser und andere

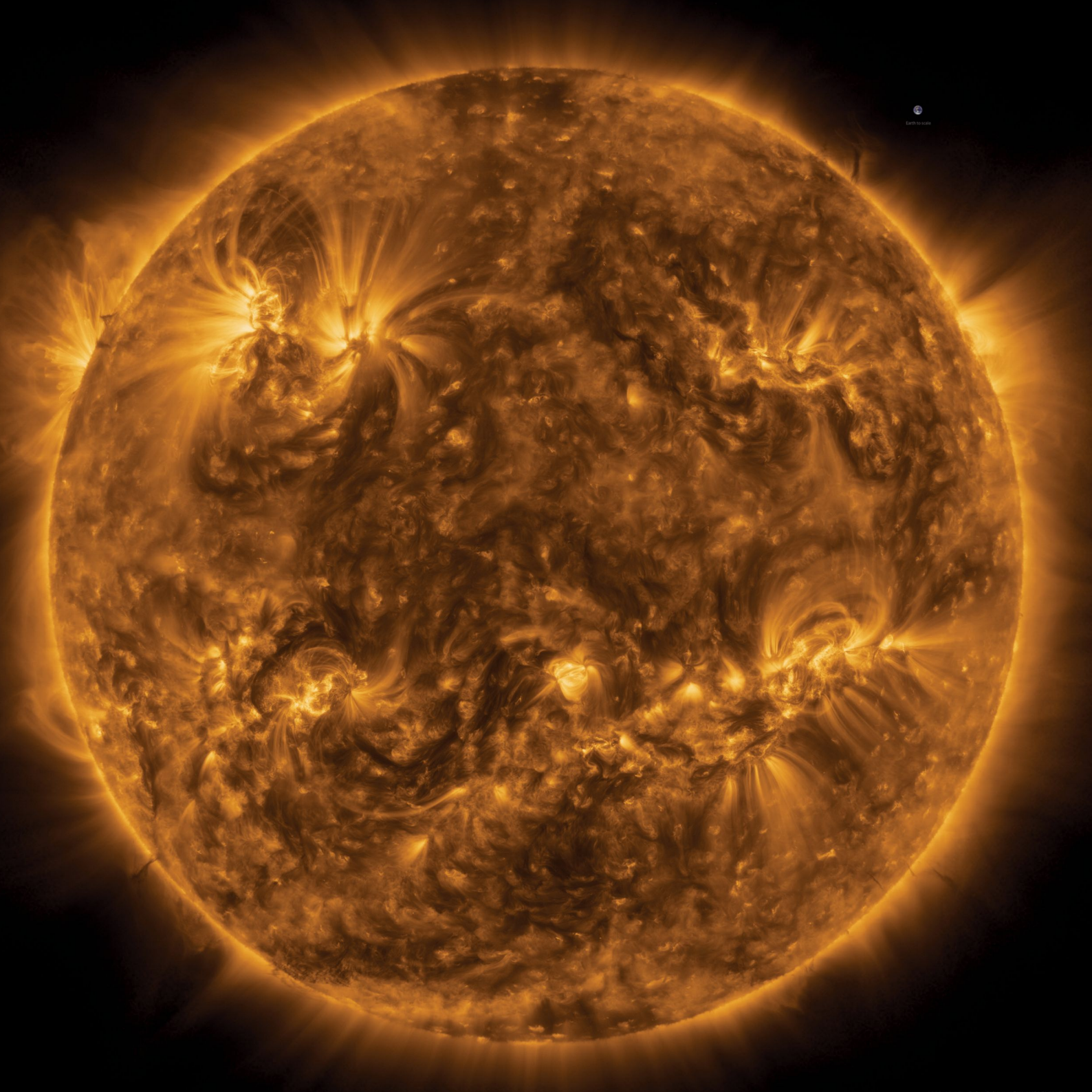
flüchtige Stoffe selbst in heißem Gestein chemisch oder mineralisch gebunden sein kann. Demnach wäre das Wasser auf der Erde aus dem Planeteninneren durch Vulkanismus an die Oberfläche gelangt. Ohne Zweifel finden sich im Inneren der Erde erhebliche Mengen an Wasser (zumindest eine weitere „Ozeanmasse“). Wasser durch Vulkanismus auszugasen, kann dabei mit Modellrechnungen einfacher erklärt werden, als Wasser von außen in einen jungen, heißen, trockenen Planeten hineinzubringen.

Aufgrund astronomischer Beobachtungen können wir heute protoplanetare Scheiben z.B. um den Stern HR4796A und entstehende Planetensysteme z.B. um Beta Pictoris beobachten. Darüber hinaus kennen wir inzwischen fast 1000 extrasolare Planetensysteme wie z.B. das kürzlich entdeckte System um den Stern Trappist-1 oder das von Wissenschaftlern des DLR-Instituts für Planetenforschung entdeckte System um Gliese 876. Das bedeutet, dass wir Theorien der Entstehung und Entwicklung des Sonnensystems verallgemeinern und die Vielfalt der möglichen Systeme und Entwicklungen bestaunen können. Unser Sonnensystem ist nicht einzigartig, aber auch keine Blaupause für alle anderen Planetensysteme.

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

Bild rechte Seite: Blick der Sonde Voyager 1 aus 600 Milliarden Kilometern zurück auf unser Sonnensystem. (© NASA/JPL)



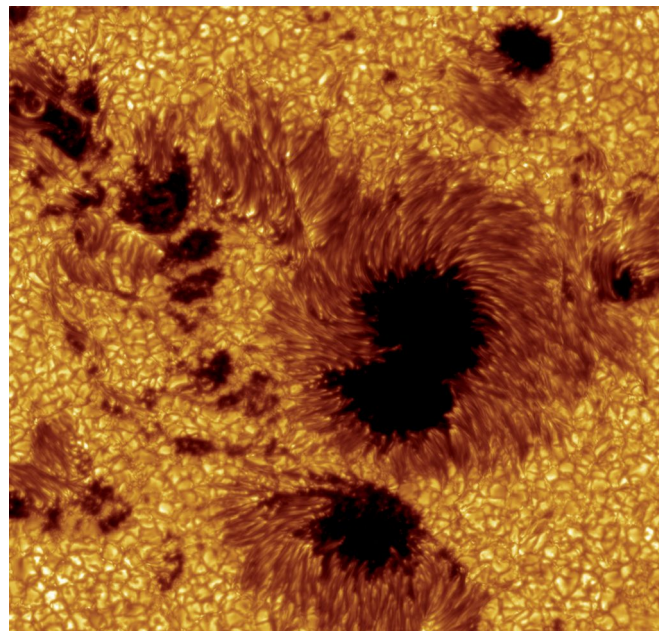


DIE SONNE

Seit Urzeiten hat der Mensch die Sonne als Gottheit, Lebensquell, Quelle des Lichts und der Kraft verehrt. Alle Kulturen haben ihr in zahllosen Mythen, Gemälden, Gedichten und Gesängen einen besonderen Platz eingeräumt. Nüchtern betrachtet ist die Sonne unser nächster Fixstern in einer Entfernung von rund 150 Millionen Kilometern, die als Astronomische Einheit (AE) bezeichnet wird und als Maßstab für Entfernungsangaben im Sonnensystem dient. Zudem ist sie der einzige Stern, dessen Oberfläche wir intensiv im Detail studieren können. Anders als bei fernen Sternen können wir ihre Wirkung auf uns selbst und die uns umgebende Natur unmittelbar erfahren. Die Sonne ist letztendlich die primäre Energiequelle für die meisten physikalischen und chemischen Vorgänge sowie nahezu alle biologischen Prozesse im Sonnensystem.

Dabei ist die Sonne astronomisch betrachtet ein ganz gewöhnlicher Stern vom Spektraltyp G2 V – einer von zwei- bis dreihundert Milliarden Sternen in der Milchstraße, einer Balkenspiralgalaxie, von der es unzählige im Kosmos gibt. Vor etwa 4,56 Milliarden Jahren entstand die Sonne in einem äußeren Spiralarm, höchstwahrscheinlich in einem sogenannten *leaky cluster* zusammen mit anderen Sternen, aus dem die Materie für das Sonnensystem entwich. Gravitative Kontraktion und Verdichtung einer rotierenden präsolaren Scheibe aus Gas und Staub formten sie zum zentralen Körper des Sonnensystems. Wegen ihrer Nähe ist sie heute der besterforschtete Fixstern. Die Sonne hat einen Radius von 109 Erdradien, vereint mit einer Masse von etwa 2×10^{30} Kilogramm über 99,8 Prozent der gesamten Masse des Sonnensystems auf sich und wird von acht bekannten Planeten sowie zahlreichen kleineren Körpern umlaufen. Mehr als 330.000 Erdkugeln bräuchten wir, um die Sonne aufzuwiegen. Das Schwerefeld, das von dieser gewaltigen Zentralmasse ausgeht, prägt jedem Planeten, Asteroiden und Kometen seine individuelle kegelschnittförmige Umlaufbahn und deren Neigung gegenüber dem Sonnenäquator auf. Es ist so stark, dass wir bei totalen Sonnenfinsternissen anhand von Sternpositionen nahe des Sonnenrands die Krümmung des Raumes verifizieren können, welche das solare Gravitationsfeld hervorruft und die von Albert Einstein (1879–1955) bereits 1915 im Rahmen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie quantifiziert wurde. Diese messbare relativistische Lichtablenkung ist doppelt so groß wie die Ablenkung nach Isaac Newtons klassischer Gravitationstheorie.

Genauso bedeutend wie die Masse ist auch die chemische Zusammensetzung der Sonne, die zu 73 Prozent aus Wasserstoff, zu 25



Prozent aus Helium und zu zwei Prozent aus schwereren Elementen besteht. Joseph von Fraunhofer (1787–1826) beobachtete im Jahr 1814 als erster schwarze Linien im Spektrum des Sonnenlichtes, die sich ein paar Jahrzehnte später durch die Arbeiten von Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887) und Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899) gleichsam als die Fingerabdrücke der chemischen Elemente herausstellten. Kurioserweise entdeckte Sir Joseph Norman Lockyer (1836–1920), zugleich Begründer der renommierten Zeitschrift *Nature*, zuerst im Sonnenspektrum das Element Helium, das folglich nach der Sonne, gr. *helios*, benannt wurde.

In Zahlen

Masse	$1,98847 \times 10^{30}$ kg
Radius	696.000 km
Dichte	1408 kg/m^3
Rotationsperiode	24,5 – 35 Tage
Zentraldruck	$2,477 \times 10^{16}$ Pa
Zentraltemperatur	$1,571 \times 10^7$ K
Zentraldichte	$1,622 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$

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

Bild linke Seite: Die Sonne im extremen Ultraviolett, aufgenommen von der ESA/NASA-Sonde *Solar Orbiter* aus rund 75 Millionen Kilometern Entfernung. Die Strukturen der heißen Korona treten deutlich zutage. Das Bild besteht aus 25 Einzelaufnahmen; rechts oben ein Bild der Erde zum Größenvergleich. (© ESA & NASA/Solar Orbiter/EUI team; Data processing: E. Kraaikamp (ROB))

Seit der Erfindung des Fernrohrs hat man die Erscheinungen auf der Sonnenoberfläche intensiv beobachtet* und studiert. Heutzutage wird die wechselnde Aktivität der Sonne laufend mit Hilfe spezieller Sonnentelkope und permanent auf die Sonne ausgerichteter Satelliten überwacht. Schon im Jahr 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 rotiert. Heute wissen wir, dass unser Zentralgestirn als gasige Kugel nicht starr rotiert, sondern differentiell. Das heißt, mit zunehmender heliographischer Breite nimmt die Rotationsdauer von 25 Tagen am Sonnenäquator bis auf 35 Tage an den Sonnenpolen zu. Verglichen mit anderen Sternen rotiert die Oberfläche der Sonne mit einer Geschwindigkeit von zwei Kilometern pro Sekunde am Äquator aber eher langsam. Der Zentralbereich der Sonne, ihr Kern, rotiert hingegen fast viermal schneller und benötigt nur eine Woche für eine komplette Drehung um die Sonnenachse. Dies ergab eine Neuauswertung langjähriger Aufzeichnungen der Sonnenoszillationen, die mithilfe des Satelliten *SOHO* gewonnen wurden. Es zeigte sich, dass Schwerewellen, die die tiefe Sonneninnere durchqueren, auch die kleinräumigen Schwingungen an der Sonnenoberfläche geringfügig beeinflussen. Die ungewöhnlich rasche Rotation des Kerns stammt aus der Frühphase des Sonnensystems und hängt vermutlich mit der Entstehung der Sonne aus einer rotierenden Gas- und Staubwolke zusammen.

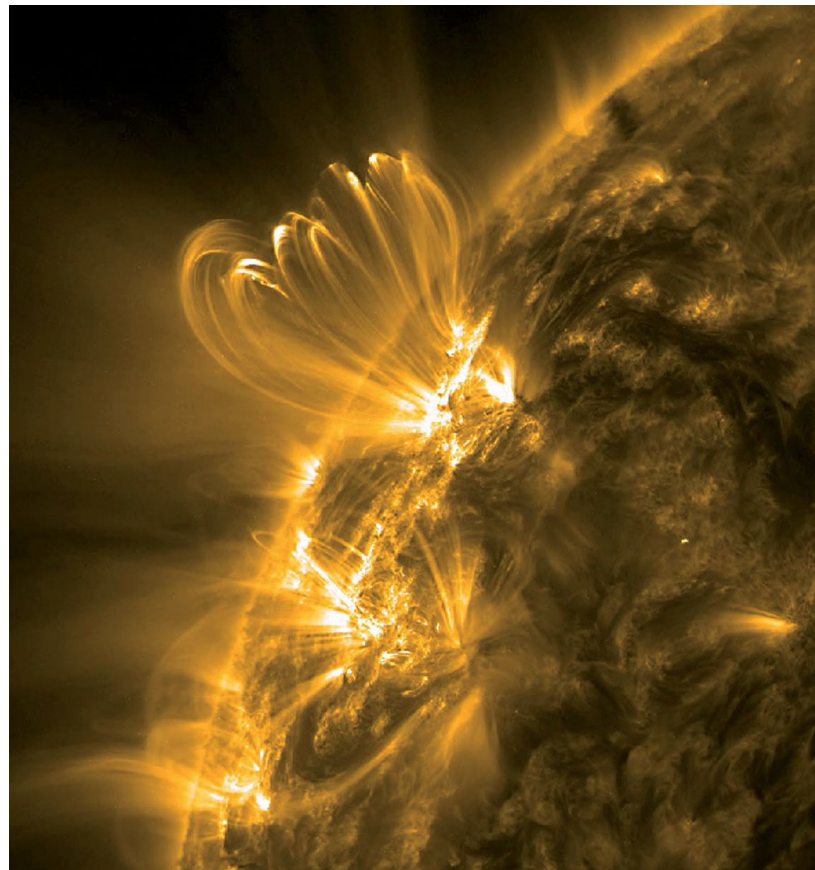
Die Sonnenflecken selber erscheinen dunkel, weil es sich um bis zu 1500 Grad Celsius kältere Regionen in der rund 5500 Grad Celsius heißen Photosphäre handelt. Sie heben sich grau- bis pechschwarz in dem heißeren Umfeld ab. Im Jahre 1843 gelang es dem Apotheker und Amateurastronomen Samuel Heinrich Schwabe (1789–1875) nachzuweisen, dass die Zahl der Sonnenflecken mit einer elfjährigen Periode schwankt. Dem elfjährigen Sonnenfleckenzyklus sind möglicherweise noch längere Perioden überlagert, die auf der Erde zusammen mit vulkanischer Aktivität, der Bewaldungsdichte und der Stärke von Meeresströmungen mit globalen Temperaturschwankungen geringen Ausmaßes** in Verbindung gebracht werden. Die größten

* Die Sonne darf niemals mit einem Fernrohr ohne entsprechende zertifizierte Sonnenfilter direkt beobachtet werden – sonst droht eine schwere Schädigung der Augen.

** Natürliche Schwankungen der Sonneneinstrahlung und stratosphärische Vulkanaerosole beeinflussten im vergangenen Jahrhundert nur geringfügig den Treibhauseffekt, mit Ausnahme kurzer Perioden nach großen Vulkanausbrüchen wie z.B. Santa Maria (1902) und Pinatubo (1991).

Flecken auf der Sonne sind bis zu 20 Erdradien ausgedehnt und können mehrere Monate lang stabil bleiben. Als Ursache der Fleckenbildung nimmt man an, dass sich die solaren Magnetfeldlinien im differentiell rotierenden Geschwindigkeitsfeld der Sonne aufspulen und mit den elektrisch geladenen Teilchen des heißen Sonnengases auf komplexe Weise wechselwirken. Die „gestörten Zonen“, die dabei lokal entstehen, werden als dunkle, kühlere Stellen sichtbar. Etliche Forschungssatelliten haben dazu aufschlussreiche Erkenntnisse geliefert und liefern sie noch immer wie zum Beispiel der *Solar Dynamics Orbiter* der NASA. Die Photosphäre wird von der etwa 10.000 Kilometer dicken und kühleren Chromosphäre überlagert, die bei Verfinsterungen der Sonne durch den Erdmond kurzzeitig als rötlicher Farbsaum zu erkennen ist. Das Sonnenlicht wird durch die extrem

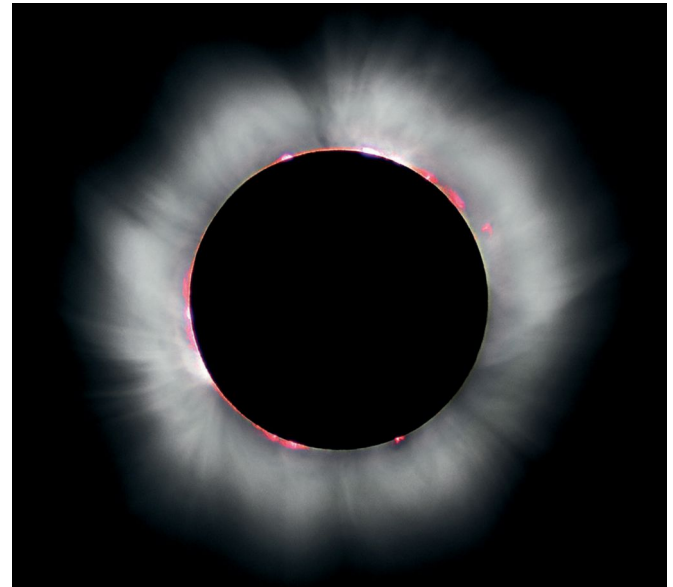
Bild: Protuberanzen, heiße Gase entlang der Magnetfeldlinien, steigen aus der Korona auf, aufgenommen im extremen ultravioletten Licht. (© NASA/SDO)



stark verdünnte Sonnenatmosphäre gestreut, was sich auffallend und schön als strahlenkranzförmige Sonnenkorona während der Totalitätsphase einer Sonnenfinsternis zeigt. Die Sonnenkorona umgibt die Sonne bis in eine Entfernung von ein bis zwei Sonnenradien, reicht also etwa anderthalb Millionen Kilometer in den Weltraum hinein. Von ihr geht der Sonnenwind aus, ein ständig vorhandener Teilchenstrom, der aus freien Elektronen und Atomkernen besteht (86 Prozent Wasserstoffkerne, 13 Prozent Heliumkerne, ein Prozent schwerere Atomkerne). Die hohen Teilchengeschwindigkeiten des Plasmas entsprechen in der Korona kinetischen Temperaturen von einigen Millionen Grad Kelvin.

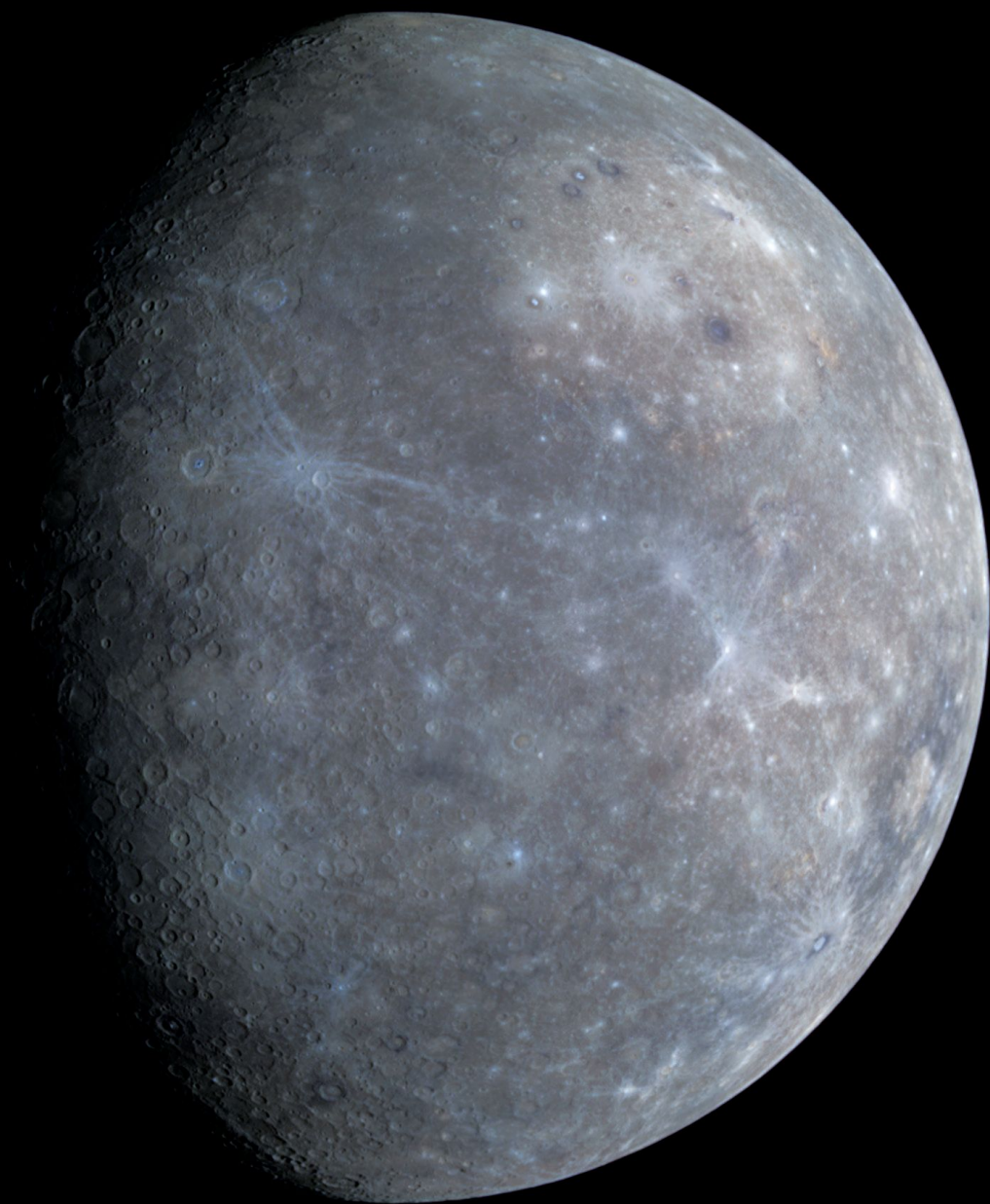
Das Innere der Sonne wird physikalisch in drei Zonen unterteilt. In der Zone der innersten 20 Prozent des Sonnenradius wird die Energie durch Kernfusion erzeugt: je vier Wasserstoffkerne verschmelzen zu einem Heliumkern. Dabei wird Bindungsenergie frei, d.h. diejenige Energie, die man aufwenden müsste, um einen Kern in seine einzelnen Protonen und Neutronen zu zerlegen. Dem Einsteinschen Energie-Masse-Äquivalent entsprechend verliert die Sonne bei der Umsetzung von 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu Helium etwa vier Millionen Tonnen Masse pro Sekunde! Damit die Umwandlung von Wasserstoff zu Helium stattfinden kann, müssen im Zentrum der Sonne extreme Druck- und Temperaturbedingungen vorherrschen, entscheidend begleitet vom quantenmechanischen Tunneleffekt. 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. Nur der zweimilliardste Teil davon trifft die Erdoberfläche und entfaltet hier seine Wirkung.

Gesamtmasse und chemische Zusammensetzung sind die beiden entscheidenden Parameter, die den Lebenslauf der Sonne als Stern festlegen. Energetisch herrscht in der Sonne ein Gleichgewicht zwischen dem nach außen gerichteten Gasdruck (und in geringerem Maße auch dem Strahlungsdruck) und der nach innen wirkenden Gravitationskraft. Während ihrer gesamten Lebenszeit versucht die Sonne wie jeder andere Stern, der Energie durch Kernfusion gewinnt, diese physikalische Balance aufrechtzuerhalten und passt sich mit ihrer äußeren Gestalt den sich wandelnden Fusionsprozessen im Innern an. So wird sie in sechs Milliarden Jahren in das Stadium eines roten Riesensterns eintreten und sich dabei je nach Phase bis über die heutige Erdbahn hinaus aufblähen. Infolge eines zunehmenden Massenverlusts bei der



Ausdehnung und der damit verbundenen abnehmenden Anziehungskraft werden gleichzeitig die Bahnen der inneren Planeten „angehoben“, so dass zum Beispiel unsere Erde die rote Riesen Sonne nahe der heutigen Marsbahn umlaufen wird. Ob die Erde am Ende als dann wasserfreier und unwirtlicher Wüstenplanet „überleben“ oder wie Merkur und Venus von der Sonne „eingerleibt“ wird, hängt vor allem davon ab, wie viel Masse die Sonne als roter Riesenstern tatsächlich verlieren und wie stark sie die Erde durch Gezeitenreibung entlang ihrer Bahn abbremst wird. Am Ende ihres gut zwölf Milliarden Jahre währenden Gesamtlebens wird die Sonne zu einem kohlenstoff- und sauerstoffreichen Weißen Zwergstern von Erdgröße zusammenschrumpfen. Dabei wird durch den wiedererstarkenden Sonnenwind die äußere Hülle der Sonne abgeblasen, so dass ein hypothetischer Betrachter aus der Ferne einen prächtig anzuschauenden planetarischen Nebel am Firmament erkennen würde. Abgeschnitten vom Nachschub an Energie durch kernphysikalische Prozesse im Inneren oder die schrumpfungsbedingte Freisetzung von Gravitationsenergie kühlt der Weiße Zwergstern im weiteren Verlauf seiner Entwicklung vollständig aus und wird somit zum Bestandteil der gewöhnlichen, baryonischen dunklen Materie im Universum.

Bild: Totale Sonnenfinsternis mit Korona vom 11. August 1999, aufgenommen in Frankreich. (© Luc Viatour / <https://lucnix.be> / CC BY-SA 3.0)



MERKUR

Merkur ist der innerste Planet in unserem Sonnensystem. Aufgrund seiner Sonnennähe ist er von der Erde aus bestenfalls etwa zwei Stunden vor Sonnenaufgang bzw. nach Sonnenuntergang zu sehen. In jeweils 217 Jahren zieht Merkur von der Erde aus gesehen 20-mal im November und neunmal im Mai als schwarzer Fleck über die helle Sonnenscheibe, das letzte Mal geschah dies am 11. November 2019.

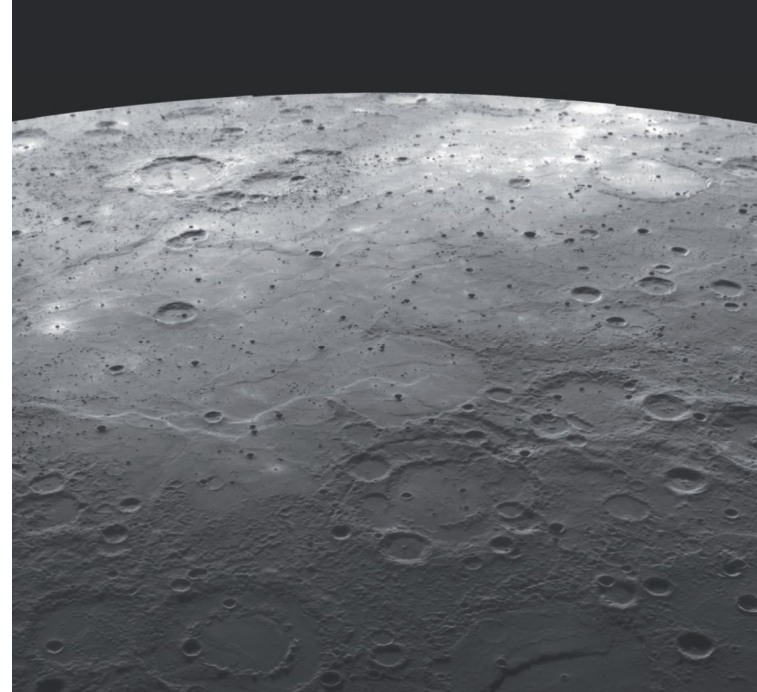
Merkurs Bahn ist stark elliptisch und infolgedessen gibt es einen großen Unterschied zwischen der Aphel- und Periheldistanz. Im Perihel, dem sonnennächsten Punkt seiner Bahn, nähert sich der Planet der Sonne bis auf 46 Millionen Kilometer an (bezogen auf den Sonnenmittelpunkt), im Aphel, dem sonnenfernsten Punkt seiner Bahn, ist er 70 Millionen Kilometer von ihr entfernt. Die Bahn des Merkurs vollführt eine langsame Rechtsdrehung in ihrer Ebene um den gemeinsamen Schwerpunkt von Sonne und Merkur. Diese sogenannte „Periheldrehung“ führt dazu, dass der Merkur im Laufe der Zeit eine Art Rosettenbahn um die Sonne beschreibt. Die Drehung wird hauptsächlich durch die Störungen der anderen Planeten und die höheren Momente im Gravitationsfeld der Sonne verursacht. Ein geringer aber merklicher Anteil dieser Drehung kann allerdings nur mit Hilfe der allgemeinen Relativitätstheorie erklärt werden und ist einer der klassischen Beweise für Einsteins Theorie der gekrümmten Raumzeit.

Zwischen der Rotations- und der Orbitalperiode Merkurs besteht eine im Sonnensystem einzigartige Kopplung: während drei Rotationen um die eigene Achse umrundet Merkur zweimal die Sonne. Dies führt dazu, dass zwischen zwei Sonnenaufgängen auf dem Planeten 176 irdische Tage vergehen, obwohl die Rotationsdauer nur 59 irdische Tage beträgt. Aufgrund des langen Tag-Nacht-Zyklus heizt sich die Oberfläche auf der Tagseite durch die Sonneneinstrahlung enorm auf und strahlt ihre Wärme auf der Nachtseite direkt in den Weltraum ab. Im Gegensatz zu den anderen inneren Planeten Venus, Erde und Mars werden auftretende Temperaturunterschiede beim Merkur nicht durch Wärmetransport in einer Atmosphäre ausgeglichen. Die Oberflächentemperatur schwankt daher zwischen Extremwerten von -180 bis +430 Grad Celsius, das sind die höchsten Temperaturunterschiede im Sonnensystem.

Unter den erdähnlichen Planeten ist Merkur in mehrfacher Hinsicht außergewöhnlich. 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

In Zahlen

Masse	$3,301 \times 10^{23} \text{ kg}$
Radius	2439,7 km
Dichte	5427 kg/m^3
Rotationsperiode	58,67 Tage
Orbitalperiode	87,97 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$57,9 \times 10^6 \text{ km}$



Oberfläche ist nur etwa ein Drittel so groß wie auf der Erde, ist aber genauso groß wie die des wesentlich größeren Planeten Mars. Trotz der damit einhergehenden geringen Eigenkompression entspricht die mittlere Dichte des Merkur in etwa derjenigen der Erde. Das gibt Grund zu der Annahme, dass das Merkurinnere einen hohen Eisenanteil aufweist. Neuere Strukturmodelle gehen von einem ausgedehnten eisenreichen Kern von etwa 4000 Kilometer Durchmesser aus, der von einem nur 330 bis 430 Kilometer mächtigen Gesteinsmantel überlagert wird, auf dem sich die 20 bis 50 Kilometer dicke Kruste ausbreitet. Die hohe mittlere Dichte des Planeten und dessen Nähe zur Sonne liefern somit wichtige Anhaltspunkte zum Verständnis der Entstehung und Entwicklung der Körper des inneren Sonnensystems.

Merkur unterliegt aufgrund der stark elliptischen Umlaufbahn und der gekoppelten Rotation, vor allem aber durch die starke Gravitationskraft der Sonne großen Gezeitenverformungen. Diese gehen mit periodischen Verschiebungen der Oberfläche und Schwankungen des

Bild: Vulkanismus war auch auf Merkur weit verbreitet. Das Bild zeigt ausgedehnte Ebenen erstarrender Lavaströme, Fließfronten, und von Lava geflutete Krater nahe dem Nordpol. (© 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)

Gravitationsfeldes einher. Die Gezeitenverformung des Merkur soll im Rahmen des Laseraltimetrie-Experiments BELA an Bord der europäischen Mission *BepiColombo* ab 2026 näher untersucht werden, um zusätzliche Anhaltspunkte zur Beschaffenheit des Inneren 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 Planeten muss sowohl die große Anziehungskraft des Zentralgestirns als auch die enorm hohe Strahlungsintensität der Sonne berücksichtigt werden. Erste Einblicke

in die Besonderheiten des Planeten erlaubten die Vorbeiflüge der Raumsonde *Mariner 10* Mitte der 70er Jahre. Die Sonde entdeckte unter anderem ein im Merkurinneren erzeugtes Magnetfeld von etwa einem hundertstel der Stärke des Erdmagnetfelds. Fast drei Jahrzehnte nach den ersten Beobachtungen durch *Mariner 10* schwenkte die NASA-Raumsonde *MESSENGER* im Frühjahr 2011 in eine stark elliptische, polare Umlaufbahn um den Merkur ein. Nach vier Jahren im Merkurorbit wurde die Raumsonde Ende April 2015 kontrolliert zum Absturz gebracht. Während ihrer letzten Umläufe lieferte die Raumsonde noch einzigartige Beobachtungen des Magnet- und Gravitationsfeldes aus geringer Höhe.

Zu den erstaunlichsten Beobachtungen von *MESSENGER* gehört die ausgeprägte Nord-Süd-Asymmetrie des Magnetfelds. Diese bewirkt, dass die am Südpol des Planeten offenen magnetischen Feldlinien eine größere Fläche für das Bombardement durch kosmische Strahlung und den Sonnenwind entstehen lassen. Es kommt dadurch am Südpol zu einer stärkeren Wechselwirkung zwischen der kosmischen Umgebung und der Merkur Oberfläche 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. Diese bilden eine hauchdünne „Exosphäre“ in der auch die Elemente Natrium, Kalium, Stickstoff und Argon nachgewiesen wurden. Die gesamte Masse dieser flüchtigen Elemente beträgt jedoch nur ungefähr tausend Kilogramm. Möglicherweise stammt ein Teil dieser Elemente auch direkt von der Sonne. Inzwischen gilt als gesichert, dass an den Polen des Planeten in einigen nie von der Sonne beschienenen und deshalb permanent kalten Kratern Eis und weitere gefrorene flüchtige Verbindungen vorhanden sind. Hinweise darauf lieferten zunächst Radarbeobachtungen von der Erde. Die Reflexionen der von

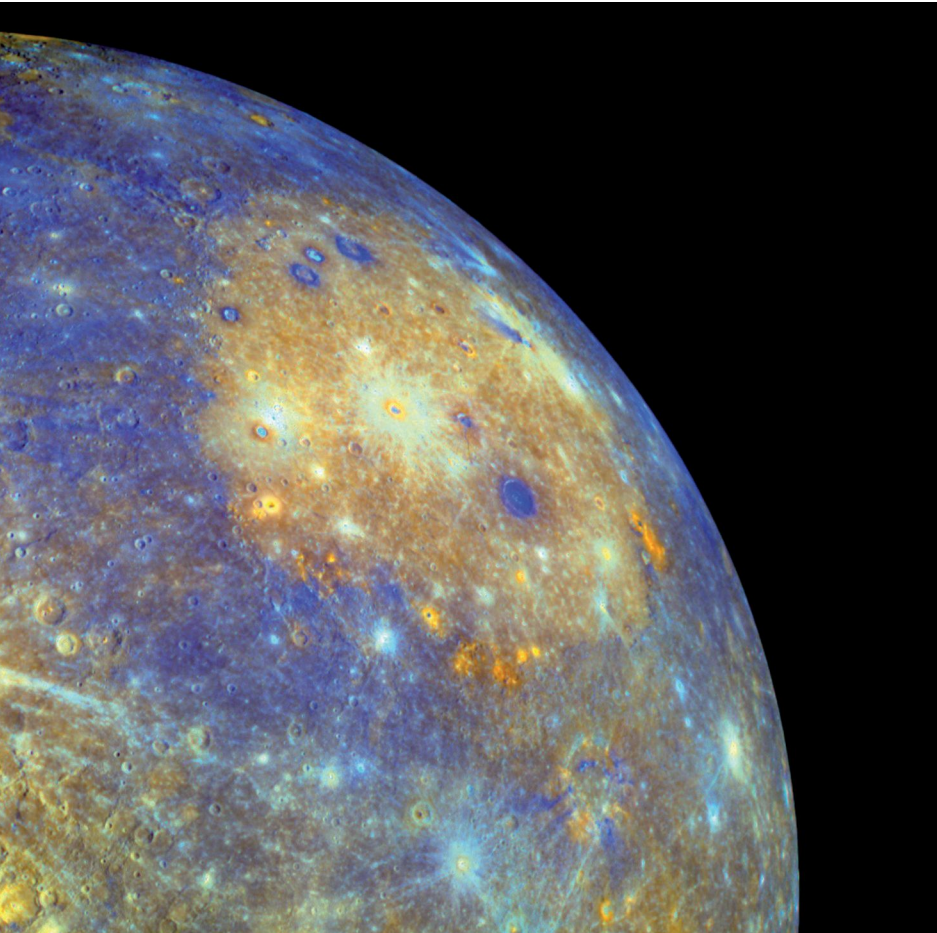


Bild: Caloris Planitia, das größte Einschlagsbecken auf dem Merkur in Falschfarben. Die Mineralogie der Gesteine im Innern des Beckens unterscheidet sich stark von der Umgebung. (© NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington)

MESSENGER ins Innere dieser tiefen Krater abgegebenen Laserpulse bestätigten diesen Befund.

Weiterhin stellte das Röntgenstrahlenspektrometer auf *MESSENGER* erhebliche Mengen an Schwefel auf der Oberfläche Merkurs fest. Auch deuten die Konzentrationen von Magnesium oder Aluminium und ihr Verhältnis zur Menge an Silizium darauf hin, dass die Kruste des Merkurs in ihrer Zusammensetzung relativ dicht ist. Damit ähnelt sie mehr dem oberen Erdmantel oder unseren Ozeanböden als der leichten aluminium- und kalziumreichen Primärkruste des Mondes, der sie äußerlich sehr ähnlich ist.

Merkurs Oberfläche ist voller Einschlagskrater in allen Größen, wie man sie auch vom Mond her kennt. Die markanteste Oberflächenstruktur ist das Caloris-Becken mit einem Durchmesser von 1550 Kilometern. Der für diesen Einschlag verantwortliche Körper scheint mit einer enormen Wucht aufgeprallt zu sein, sodass man noch auf der gegenüber liegenden Hemisphäre die Auswirkungen der im Planeten fokussierten Schockwellen glaubt erkennen zu können.

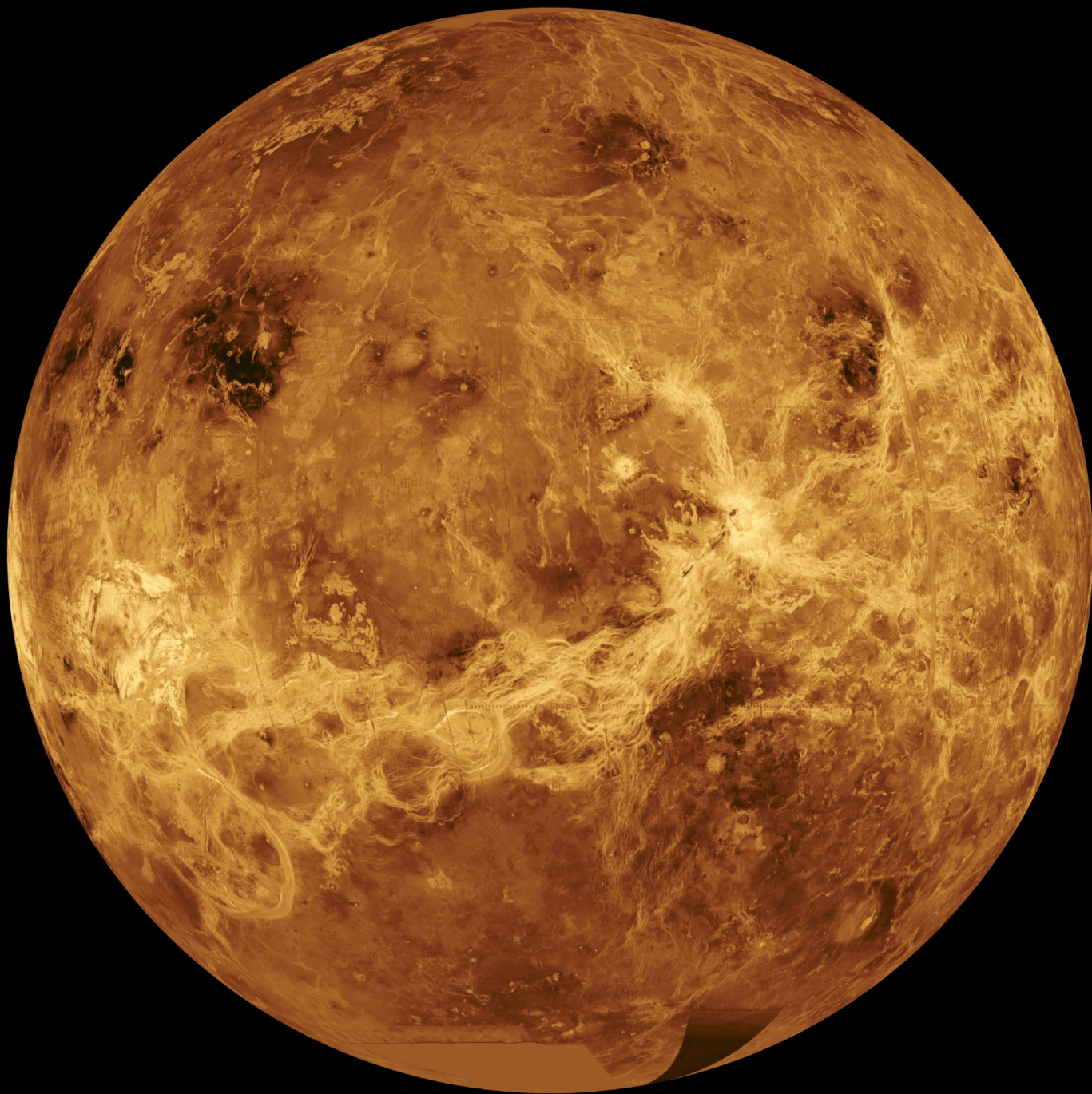


Ein Phänomen der Merkur Oberfläche sind viele hunderte Kilometer lange Geländekanten, sogenannte „scarps“. Sie sind vermutlich ein Ergebnis einer Verringerung des Radius’ des Planeten um mehrere Kilometer infolge der Schrumpfung Merkurs während der Abkühlphase. Auf dem Merkur gab es vor Milliarden von Jahren intensiven Vulkanismus. Aus langen Rissen quoll, ähnlich wie auf dem Mond, dünnflüssige basaltische Lava und füllte Senken und Kraterbecken auf. Mindestens fünf Prozent des Merkurs sind von erstarrten Lavaströmen bedeckt, die Lavadecken am Nordpol haben eine Mächtigkeit von bis zu zwei Kilometern. Der stellenweise starke Vulkanismus auf Merkur überrascht, denn der Gesteinsmantel, in dem die Magmen hierfür erzeugt werden, hat bei einer Mächtigkeit von von maximal 430 Kilometern verhältnismäßig wenig Volumen. Eine ebenfalls von der *MESSENGER*-Mission entdeckte, im Sonnensystem einmalige Geländeform sind nach oben offene, randlose Hohlräume (engl. hollows) mit flachem Boden und hellem Halo, deren Ursprung mit dem Verdampfen flüchtiger Stoffe in der Kruste erklärt werden könnte.

Schon vor *MESSENGER* zeigten Radarbeobachtungen von der Erde aus, dass die Rotationsachse des Merkurs nur geringfügig gegenüber der Bahnnormalen geneigt ist, und dass die Rotation des Planeten während seines Umlaufs um die Sonne zudem relativ große periodische Schwankungen (sogenannte „Librationen“) aufweist. Durch sorgfältige Positionierung von Höhenprofilen des *MESSENGER*-Laseraltimeters gelang es, diese Beobachtung zu bestätigen. Erstaunlicherweise wurde weiterhin festgestellt, dass Merkur etwa neun Sekunden schneller rotiert als man ausgehend von der Kopplung der Rotations- und Orbitdauer berechnet hatte. Die Daten zur Rotation und die Beobachtungen des großräumigen Merkurschwerefeldes lassen den Schluss zu, dass der äußere feste Gesteinsmantel des Planeten durch eine geschmolzene, äußere Kernregion mechanisch vom festen, inneren Eisenkern entkoppelt ist. Der flüssige äußere Kern wäre die Schicht im Inneren Merkurs, in der das Magnetfeld durch einen aktiven Kerndynamo erzeugt wird.

Merkur ist das Ziel der europäischen-japanischen Raumsonde *Bepi-Colombo*, die den Planeten mit zwei Suborbitern ab Dezember 2025 untersuchen wird. Die Mission wird den Ursprung und die Entwicklung eines Planeten nahe an seinem Muttergestirn erforschen, vor allem planetare Eigenschaften wie Form, Inneres, Krater, Struktur und Geologie, aber auch Zusammensetzung und Dynamik der Exosphäre sowie das Magnetfeld Merkurs.

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

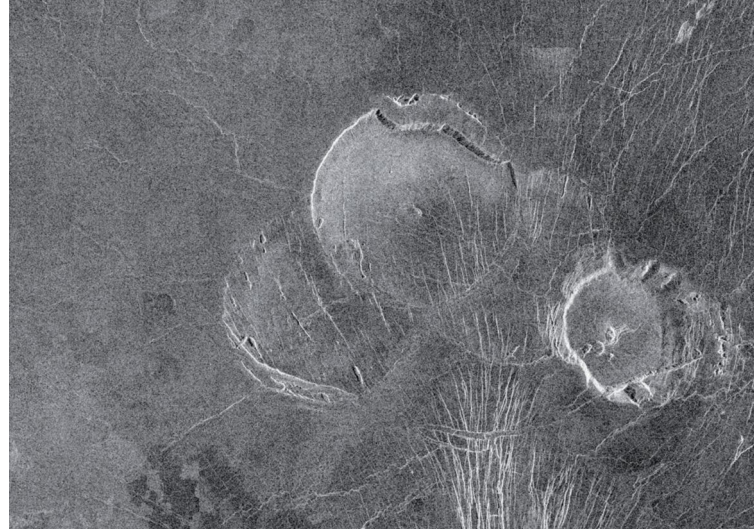
Von der Sonne aus gesehen ist die Venus der zweite Planet und der nächste Planet zur Erde. Der mittlere Bahnabstand der beiden Planeten beträgt nur rund 41 Millionen Kilometer. Nach Sonne und Mond ist die Venus der hellste Himmelskörper, denn aufgrund ihrer Sonnennähe und der stets geschlossenen Wolkendecke ist der Anteil an reflektiertem Sonnenlicht besonders hoch. Bis zu vier Stunden vor Sonnenauf- bzw. nach Sonnenuntergang kann man den Planeten oft schon in der Dämmerung sehr gut beobachten. Deshalb wird die Venus auch gern als Morgen- bzw. Abendstern bezeichnet. Mit einem Durchmesser von 12.100 Kilometern ist der Planet fast genauso groß wie die Erde, tatsächlich hat er sogar die größte Landoberfläche aller Planeten und Monde. Seine Masse beträgt 87 Prozent der Erdmasse.

Venus umrundet die Sonne in knapp 225 Tagen in einem durchschnittlichen Abstand von 108 Millionen Kilometern in einem nahezu perfekten Kreis. Aufgrund einer im Vergleich zur Erde extrem langsamen Eigenrotation – die zudem bei der Venus im Gegensatz zu allen anderen Planeten gegenläufig ist, weil der Planet um 177 Grad gekippt ist, also per Definition fast einen „Kopfstand“ macht – dauert ein Venustag (von einem Sonnenaufgang bis zum nächsten) 117 Erden-tage; es ist die langsamste Eigenrotation aller Planeten. Da die Achse des Planeten fast senkrecht auf der Bahnebene steht, gibt es keine Jahreszeiten. Wie der Mond und der Merkur zeigt die Venus von der Erde aus gesehen Phasen.

Nur selten ist die Venus genau vor der Sonnenscheibe sichtbar. Da die Planeten die Sonne nicht exakt in einer Ebene umrunden, zieht die Venus (wie 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. Zwar stehen sich Erde und Venus alle 584 Tage in einer Opposition gegenüber, doch das seltene Ereignis eines Transits vor der Sonne findet von der Erde aus gesehen nur zweimal in Abständen von acht Jahren, dann nach 121,5 Jahren, und dann wieder in acht Jahren und wieder in 105,5 Jahren statt: Als kleines schwarzes Pünktchen ist die Venus dann mit einem durch eine spezielle Schutzfolie präparierten Teleskop vor der Sonne sichtbar. Die letzten beiden Venusdurchgänge fanden am 8. Juni 2004 und 6. Juni 2012 statt. Erst im Jahr 2117 wird dann der nächste Venustransit von der Erde aus zu beobachten sein.

In Zahlen

Masse	$4,868 \times 10^{24}$ kg
Radius	6051,8 km
Dichte	5243 kg/m^3
Rotationsperiode	243,02 Tage
Orbitalperiode	224,7 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$108,2 \times 10^6$ km



Venus hat eine sehr komplexe Landschaft. Siebzig Prozent der Oberfläche bestehen aus ausgedehnten Tiefebene, den *Regiones*. Ein weiteres Fünftel der Oberfläche bilden bis zu zwei Kilometer tiefe Senken. Die restlichen zehn Prozent werden von zwei kontinentartigen Hochländern, sogenannte *Terrae*, gebildet: zum einen *Ishtar Terra* im Norden mit den elf Kilometer hohen *Maxwell Montes*, sowie *Aphrodite Terra* in der Äquatorgegend. In *Aphrodite Terra* liegt auch ein riesiges Tal, *Diana Chasma*, mit einer Tiefe von zwei Kilometern, einer Breite von 100 Kilometern und mehreren hundert Kilometern Länge. Dieses Tal ist wahrscheinlich tektonischen Ursprungs, wurde also durch Spannungen in der Kruste 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 größere und zehntausende kleine Vulkane so wie viele bizarr anmutende Formationen vulkanotektonischen 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.

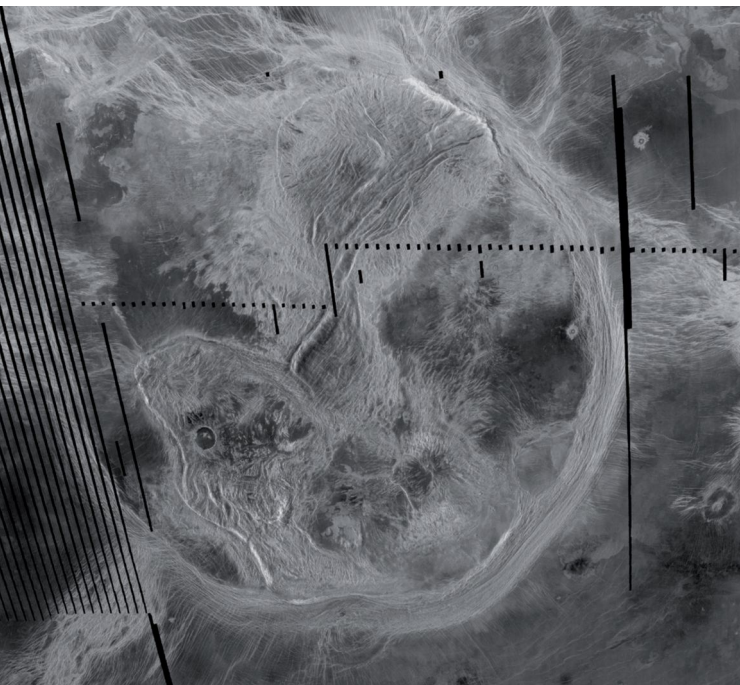
Einschlagskrater wurden weit weniger entdeckt als beispielsweise auf dem Mars. Das zeigt, dass die Oberfläche der Venus nicht sehr alt ist. Vor etwa 500 bis vielleicht 700 Millionen Jahren wurde die Landschaft der Venus in einer globalen Katastrophe durch

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

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

Vulkanismus völlig neu gestaltet. Ausgenommen davon sind lediglich die tektonisch beanspruchten Hochländer, die ein deutlich höheres Alter als die vulkanischen Tiefländer der Venus aufweisen. Die Ursachen für diesen Erneuerungsprozess sind noch nicht klar. Weil die Venus im Gegensatz zur Erde, zumindest gegenwärtig, keine Platten-tektonik hat, dürfte es in periodisch wiederkehrenden Abständen im Innern der Venus wie in einem Dampfkochtopf ohne Ventil zu einem Hitzestau kommen, der sich in einer Phase globalen Vulkanismus' Bahn bricht.

Erst die globale Radarkartierung der Raumsonde *Magellan* (1990 bis 1994) zeigte, dass die Kruste der Venus nicht wie auf der Erde in großräumige Kontinentalplatten geteilt ist. Vielleicht, so wird vermutet, spiegelt die geologische Aktivität der Venus teilweise die Frühzeit der Erdgeschichte wider, denn man weiß nicht genau, ob die Kontinentalplatten auch während der ersten zwei oder drei Milliarden Jahre über den plastischen Erdmantel drifteten. Vor Ort untersuchte Bodenproben der russischen Sonden *Venera 13* und *Venera 14* ergaben eine Gesteinszusammensetzung, die grob den irdischen Ozeanböden ähnelt: Die Venuskruste besteht zu großen Teilen aus Basalt, einem dunklen, eisen- und magnesiumreichen vulkanischen Silikatgestein. *Venus Express* zeigte außerdem, dass die Venus bis in die jüngste geologische Vergangenheit vulkanisch aktiv war und vielleicht noch heute aktiv ist.



Die Atmosphäre der Venus ist rund 90-mal dichter als die der Erde. Die mittlere Oberflächentemperatur beträgt bei Tag und Nacht etwa 470 Grad Celsius. Der Atmosphärendruck am Boden beträgt 93 bar, entsprechend dem Druck, der in irdischen Ozeanen in ca. 900 Meter Wassertiefe herrscht. Die Troposphäre des Planeten, also die Region, in der sich das Wetter abspielt, reicht bis in eine Höhe von 100 Kilometern (Erde: 15 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 in dieser Höhe bis auf -173 Grad Celsius ab.

In Höhen zwischen ca. 45 und 70 Kilometern liegen drei dicke Wolken-schichten, die den Planeten völlig einhüllen. Diese Wolken, und nicht die massereiche, dichte Atmosphäre, sind der Grund dafür, dass mit Teleskopen und Kameras kein Blick auf die Oberfläche möglich ist. Die Atmosphäre ist extrem dynamisch: Die Wolkenoberseite zeigt eine äquatoriale, die Eigendrehung des Planeten überlagernde, viertägige „Superrotation“ von Ost nach West mit Windgeschwindigkeiten von 300 bis 400 Kilometern pro Stunde. Die oberste Atmosphärenschicht rotiert also schneller als tiefer liegende Schichten und viel schneller als die Venus selbst. Darüber hinaus gibt es noch andere Zonen zirkularer Strömungen vom Äquator hin zu den Polen, die allerdings mit geringen Geschwindigkeiten ablaufen und vermutlich Wärme in Richtung der Pole transportieren. Dies führt dazu, dass die Temperaturen an der Oberfläche der Venus und in ihrer Atmosphäre homogen verteilt und überall fast gleich hoch sind.

Ein Hauptgrund für die große Dynamik in der Atmosphäre dürfte im Zusammenspiel mehrerer Faktoren zu finden sein. Die sehr langsame Eigenrotation führt in Kombination mit der Sonnennähe und damit verbunden der Erwärmung des Planeten – die Venus empfängt doppelt so viel Strahlung von der Sonne wie die Erde – zu Zellen von Konvektionsströmungen, also großräumigen Umwälzungen in der Atmosphäre. An der Oberfläche herrscht 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 wider. Sie enthält über 96 Prozent Kohlendioxid (CO_2) und nur 3,5 Prozent Stickstoff (N_2). Weiterhin findet man höhenabhängig u.a. Schwefeldioxid (SO_2),

Bild: Artemis Chasma, die größte Corona auf der Venus mit einem Durchmesser von 2100 Kilometern. (© NASA/JPL)

etwas Wasser (H_2O) und damit auch Schwefelsäure (H_2SO_4). Kohlen- und Schwefeldioxid sowie auch winzige Mengen an Wasserdampf in 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 so stark aufzuheizen. Ein ähnlich effektiver Treibhauseffekt hätte für die Biomasse auf der Erde langfristig verheerende Folgen.

Trotz fast identischer Größe entwickelten sich beide Planeten extrem unterschiedlich. Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich in dem größeren Abstand der Erde zur Sonne, ist aber noch nicht gänzlich verstanden. Beide Körper hatten zu Beginn des Sonnensystems etwa gleichgroße Anteile an flüchtigen Elementen wie beispielsweise Wasserstoff und Kohlenstoff. Auf beiden Planeten wurde Wasser durch vulkanische Prozesse an die Oberfläche transportiert. Ein geringerer Anteil an Wasser stammt von Kometen und Asteroiden, die in der ersten Milliarde Jahren in sehr viel größerer Zahl als heute auf beide Planeten stürzten. Auf der Erde bildete dieses Wasser zusammen mit dem von Vulkanen aus dem Erdmantel an die Oberfläche transportierten Wasser die Ozeane; auf der wärmeren Venus gab es zunächst sicher auch Wasser, wie das Verhältnis des schweren Wasserstoffisotops Deuterium zu Wasserstoff in der Atmosphäre verrät. Doch es 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 der Wasserstoff zu großen Teilen ins Weltall verloren gegangen. Die Untersuchung dieser Frage ist eine der wesentlichen Aufgaben der geplanten nächsten Generation von Raumsonden zur Erforschung der Venus.

Das meiste Kohlendioxid der irdischen Uratmosphäre wurde über die Meeressedimente in Gestein oder durch Photosynthese über organische Prozesse in Sauerstoff und Kohlenwasserstoffverbindungen 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 vielleicht in den im Wasser gebildeten Sedimenten gebunden war, aus dem Gestein heraus wieder in die Venusatmosphäre entlassen. Insgesamt hat die Erde genau so viel Kohlendioxid wie die Venus, nur ist die überwiegende Menge des Moleküls in Karbonatgesteinen (Kalk und Dolomit) der Erdkruste sowie der irdischen Biomasse gebunden bzw. im Wasser der Ozeane gelöst.

Das Fehlen von Wasser könnte die Ursache dafür sein, dass es auf der Venus keine Plattentektonik gibt. Auf der Erde macht Wasser das Krustengestein brüchig, sodass die ozeanische Kruste in den Mantel abtauchen kann, und wirkt dabei zusammen mit Sedimenten als effizientes „Schmiermittel“. Auf der Erde wird Wasser über den Vulkanismus an den Platten Grenzen wieder in die Atmosphäre zurückgebracht. Obwohl in ihrem inneren Aufbau ähnlich strukturiert wie die Erde, führt das Fehlen von Plattentektonik auf der Venus dazu, dass der Metallkern nicht effektiv genug gekühlt wird, um Umwälzbewegungen (Konvektion) im Kern zu erzwingen. Deshalb finden auch im Kern vermutlich keine großräumigen Massenbewegungen statt, was wiederum verhindert, dass ein Magnetfeld entsteht.

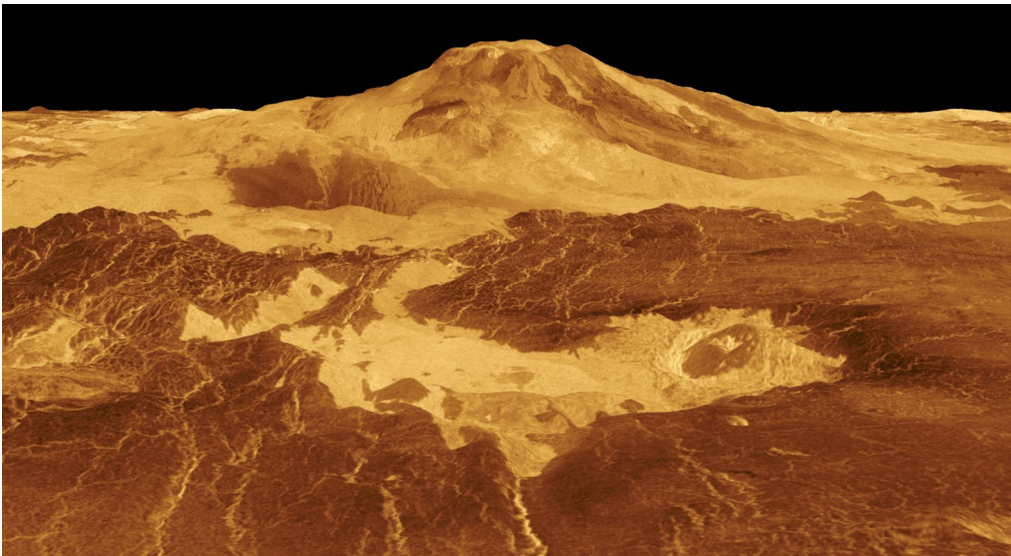
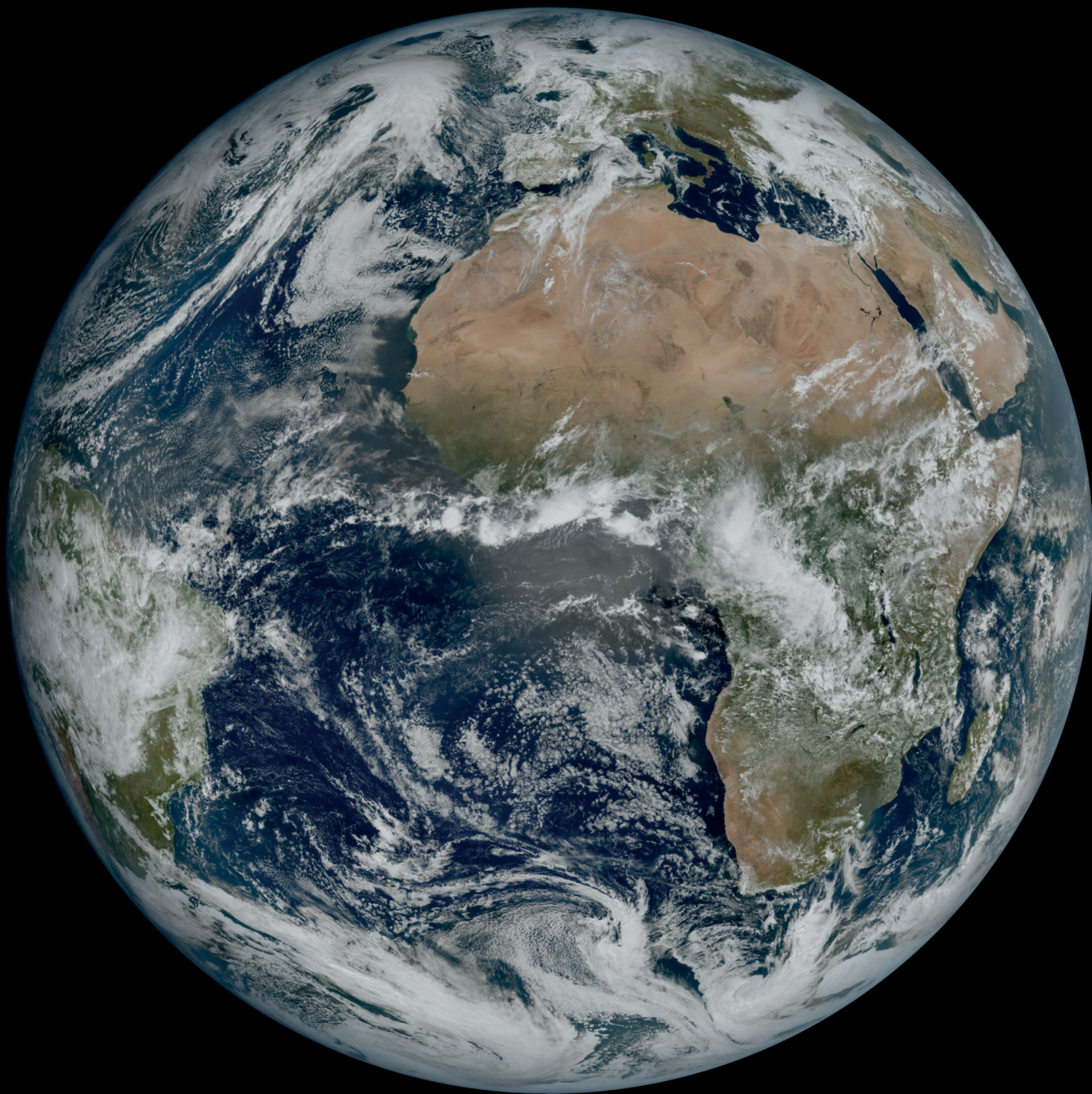


Bild: Perspektivische Radaran-
sicht des acht Kilometer hohen
Vulkans Maat Mons. (© NASA/JPL)



ERDE-MOND-SYSTEM

Erde

Die Erde ist der größte und massereichste 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 die Planeten Merkur, Venus und Mars, aber auch der Mond wird dazugezählt. Über 50 Prozent der Gesamtmasse dieser fünf Körper 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 sie mehr Mineral- und Gesteinsvariationen hervor als alle anderen Planetennachbarn. Sie ist insbesondere 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 dem Abstand zur Sonne, der „habitable Zone“ genannt wird und dadurch definiert ist, dass Wasser im flüssigen Aggregatzustand auf der Oberfläche eines planetaren Körpers stabil sein kann.

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 die Ursache für die Jahreszeiten, weil dadurch die Sonneneinstrahlung im Laufe eines Jahres unterschiedlich lang auf Nord- bzw. Südhalbkugel einwirkt. Die Eigenrotation der Erde bewirkt den allseits bekannten Wechsel von Tag und Nacht, deren Länge jahreszeiten- und breitengradabhängig 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 7000 Kilometer großen, innen festen und außen flüssigen Eisen-Nickel-Kern hat. Die infolge der Temperaturdifferenz zwischen innerem Kern und Mantel sich ständig bewegenden, 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 3,64 Millionen bar. Der Kern ist



von einem Mantel mit knapp 3000 Kilometern Mächtigkeit umgeben. Der oberste Abschnitt des Mantels bildet zusammen mit der sieben bis 65 Kilometer mächtigen Erdkruste die im Mittel 100 Kilometer dicke, starre Lithosphäre, je nachdem ob es sich

In Zahlen

Masse	$5,976 \times 10^{24} \text{ kg}$
Mittlerer Radius	6378,1 km
Mittlere Dichte	5534 kg/m^3
Rotationsperiode	23,93 h
Orbitalperiode	365,24 Tage
Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$1,496 \times 10^8 \text{ km}$

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

Bild linke Seite: Die Erde ist der größte der vier inneren, erdähnlichen Planeten. Sie ist der einzige Himmelskörper im Sonnensystem mit Wasser an der Oberfläche und damit auch mit Leben. Die Aufnahme wurde im März 2023 von einem *Meteosat*-Satelliten aus der geostationären Umlaufbahn in 36.000 Kilometer Höhe gemacht. (© EUMETSAT/ESA)

um kontinentale oder ozeanische Kruste handelt. Sie ist in sieben große und mehrere kleinere Platten zerbrochen, auf denen gemäß dem Archimedischen Prinzip die Kontinente „isostatisch“ über den Erdmantel driften, gleichsam wie Eisberge im Wasser.

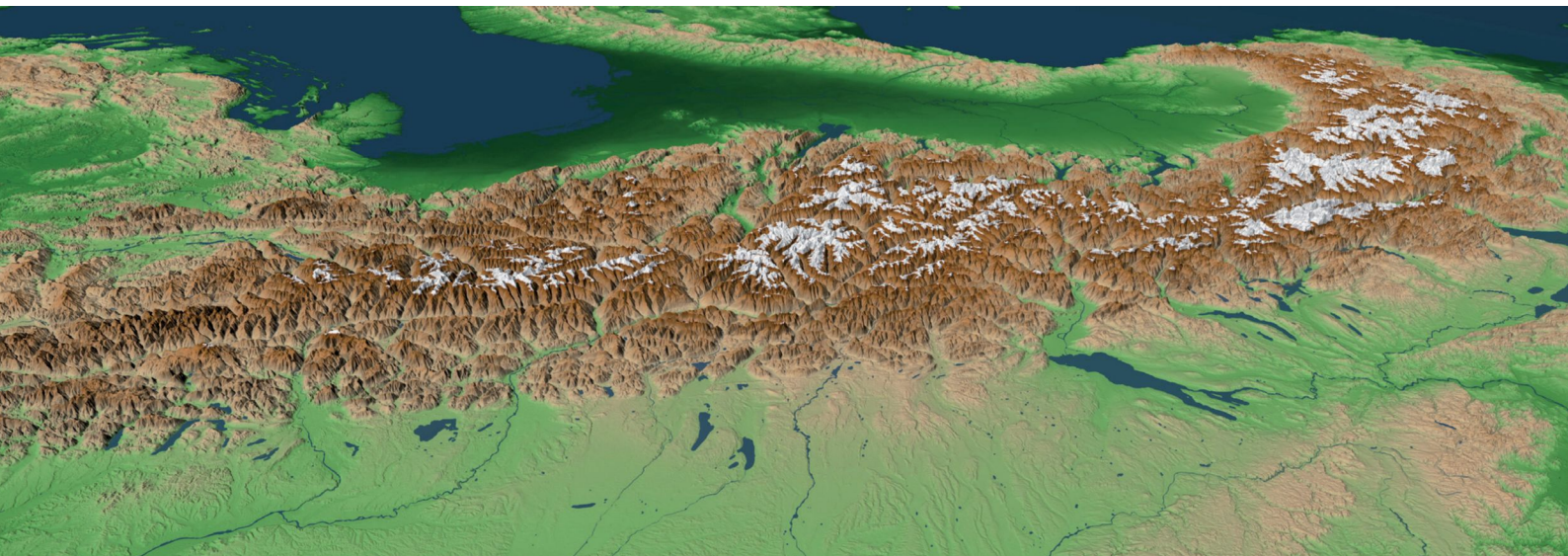
Der deutsche Meteorologe und Geophysiker Alfred Wegener (1880–1930) erkannte anhand kontinentaler Küstenverläufe, kristalliner Sedimente und seltener Fossilien, dass sich die Kontinente mit einer Geschwindigkeit von einigen Zentimetern pro Jahr gegeneinander in unterschiedliche Richtungen bewegen. Auf seinen Beobachtungen basieren die heutigen Modelle der Plattentektonik. Da die Erdkruste eine geringere Dichte besitzt als der Erdmantel, „schwimmen“ die kalten Lithosphärenplatten auf dem Mantel, angetrieben durch die Konvektion des Erdmantels. Wo die Lithosphärenplatten auseinanderdriften, bilden sich – meist submarine – Spalten, aus denen Magma emporsteigt, wie entlang des Mittelatlantischen Rückens. Dort, wo Platten aufeinander treffen, an den durch Tiefseegräben gekennzeichneten sogenannten Subduktionszonen, werden Lithosphärenplatten übereinander geschoben, wobei eine der beiden ins Erdinnere sinkt, wie beispielsweise an der Westküste Südamerikas. Bei frontalen Kollisionen zweier Kontinente kommt es zur Bildung hoher Faltengebirge wie des Himalaya oder der Alpen. Entlang lateraler Verschiebungen der Platten, ein bekanntes Beispiel ist die San-Andreas-Störung in Kalifornien, wie auch an den 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



ozeanischen Kruste jünger als 200 Millionen Jahre alt ist. Erst wenn der Zerfall radioaktiver Elemente im Erdinneren nachlässt und die dabei freiwerdende Energie zur Bildung von Gesteinsschmelzen nicht mehr ausreicht, wird sich die Erdkruste nicht mehr erneuern und der einblendenden Erosion durch Wind und Wasser völlig ausgeliefert sein.

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

Bild unten: Perspektivische Darstellung der durch den afrikanischen Kontinent aufgefalteten Alpen und des Voralpenlandes auf der Grundlage von Radardaten. (© DLR)





Knapp 71 Prozent der Erdoberfläche sind von Meeren bedeckt. Diese ozeanischen Wassermassen sind in der Lage, große Mengen Wärmeenergie 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 Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre hätte heutzutage die Kraft, irdische Landschaften schneller umzuformen, als sich Fauna und Flora anpassen könnten. Hier kann die Fernerkundung vom Weltraum aus wertvolle Daten für Klimatrends und Langzeitprognosen liefern. Neben den atmosphärischen Einflüssen wie z. B. dem 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 und Asteroiden 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 und Asteroiden stammen. Neueste Erkenntnisse

aus der Erforschung des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko haben allerdings gezeigt, dass zumindest eine große Gruppe von Kometen (die sogenannten Kometen der Jupiter-Familie) keine nennenswerten Mengen an Wasser auf die Erde gebracht haben. Die Raumsonde *Rosetta* untersuchte die genaue Zusammensetzung des Wasserdampfs im Kometenschweif. Dabei wurde durch Messung der Wasserstoff-Isotopenverhältnisse festgestellt, dass sich das Wasser dieses Kometen deutlich von dem auf der Erde unterscheidet. Somit bleiben noch andere Arten von Kometen oder aber auch wasserreiche Asteroiden (Protoplaneten), die als mögliche Wasserlieferanten für die Erde denkbar sein könnten.

Die Masse der Erde übt eine Anziehungskraft aus, die groß genug ist, dauerhaft und unter dem Schutz eines starken Magnetfeldes eine Atmosphäre an den Planeten zu binden. Gegenwärtig enthält die

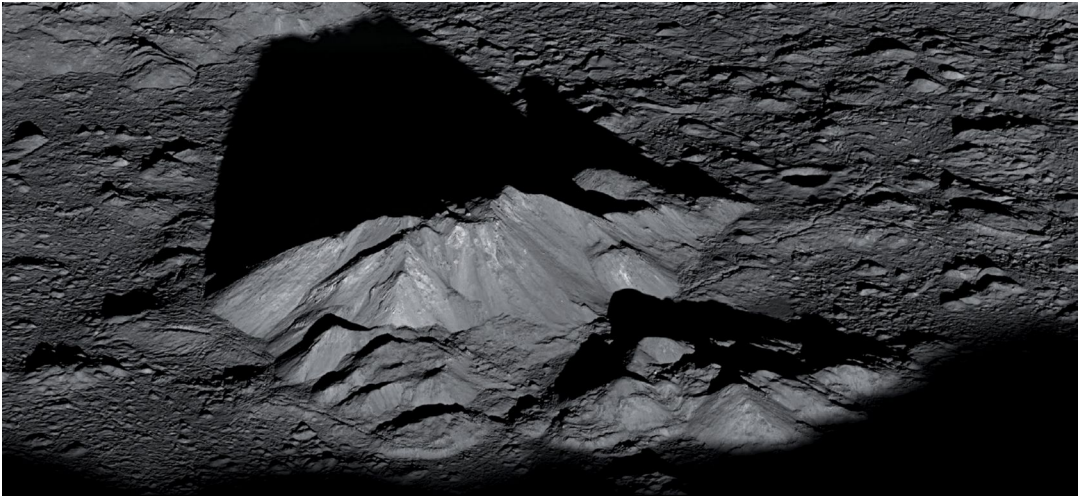
Bild: Wolken und Wettergeschehen in der Erdatmosphäre über dem Pazifischen Ozean, aufgenommen von der ISS. (© NASA)

untere Erdatmosphäre, die Troposphäre, 78 Prozent Stickstoff (N₂), 21 Prozent Sauerstoff (O₂) und ein Prozent des Edelgases Argon. Weitere 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, wie es vor Beginn des Lebens gegeben war. Die Troposphäre reicht bis in eine Höhe von 15 Kilometern; in ihr spielt sich das Wettergeschehen ab.

An die Troposphäre schließen sich die Stratosphäre (bis 50 Kilometer Höhe), die Mesosphäre (bis 80 Kilometer, hier verglühen Sternschnuppen), die Thermosphäre (bis 500 Kilometer Höhe) und die ultradünne Exosphäre (bis 10.000 Kilometer Höhe) an. Die beiden obersten Schichten werden auch zur Ionosphäre zusammengefasst, in der die Polarlichter entstehen. In der irdischen Stratosphäre wird das Ozon (O₃) produziert, das vor allem die Landbewohner vor der lebensfeindlichen UV-Strahlung der Sonne schützt.

Mond

Der Mond und seine deutlich sichtbaren Phasen dienen mindestens seit der Herstellung der Himmelsscheibe von Nebra vor etwa 3800 Jahren als Maß für den Fortgang der Jahreszeiten und beispielsweise den richtigen Zeitpunkt zur Aussaat. Noch heute spielen die Mondphasen sowohl im jüdischen, christlichen als auch im islamischen Kalender eine wesentliche Rolle. Das Auftreten von Sonnen- und Mondfinsternissen folgt einem komplizierten „Ballett“ von Erde, Sonne und Mond, war aber eines der ersten präzise vorhersagbaren Naturereignisse. Der „drakonitische Monat“, von dessen Dauer (27 Tage, 5 Stunden, 5 Minuten)



diese wesentlich abhängen, hat seinen Namen nach einer Legende, wonach ein Drache die Sonne frisst.

Bis heute ist der Mond neben der Erde der einzige Himmelskörper, der neben einer Vielzahl von Sonden auch von Menschen besucht und direkt untersucht wurde. In den Jahren 1969 bis 1972 landeten zwölf Astronauten im Rahmen der amerikanischen *Apollo*-Missionen auf seiner Oberfläche, fotografierten die Landschaften und stellten dort eine Reihe von Messinstrumenten wie Seismometer, Magnetometer, Gravimeter und Wärmeflusssonden auf. Vor allem brachten sie knapp 382 Kilogramm Proben unterschiedlicher Gesteine zur Erde zurück. Die Mondproben mit ihrem meist hohen Alter von drei bis über vier Milliarden Jahren und ihrer sehr genau untersuchten chemischen und mineralogischen Zusammensetzung ermöglichen uns einen Rückblick in die Frühzeit des Sonnensystems und auf die Entwicklungsgeschichte des Erde-Mond-Systems. Sie sind für tiefere Einsichten in die Entwick-

lung des Sonnensystems, vor allem der vier erdähnlichen Planeten, von großer 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 Lage der Erdachse im Raum sorgt. Außerdem sorgen die vom Mond verursachten Gezeiten dafür, dass die Meere an den Küsten durch die

In Zahlen

Masse	7,3483 x 10 ²² kg
Mittlerer Radius	1737,5 km
Mittlere Dichte	3341 kg/m ³
Mittlere Rotationsperiode	27 T 7h 43min 11s
von Vollmond zu Vollmond	29 T 12h 44min 2s
Orbitalperiode	27 T 7h 43min 11s
Mittlere Entfernung von der Erde	384.400 km

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

Dynamik der Wasserbewegungen ständig lebenswichtige Minerale aus den Gesteinen herauslösen.

Der Mond umkreist die Erde in Bezug zum Sternenhimmel im Mittel 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 der Erde immer die gleiche Seite 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 *Luna 3* fotografiert. Als Folge von Librationen (kleinen Taumelbewegungen des Mondes auf seiner leicht elliptischen Bahn um die Erde) können jedoch 59 Prozent der Mondoberfläche von der Erde aus beobachtet werden.

Erde und Mond laufen gemeinsam mit einer Geschwindigkeit von etwa 30 km/s um die Sonne. Dabei überholt der Mond die Erde bei Vollmond auf der Außenbahn, um bei Neumond auf der Innenbahn wiederum hinter die Erde zurückzufallen. Deshalb schwankt die Geschwindigkeit, mit der der Mond um die Sonne kreist, zwischen knapp 29 km/s bei Neumond und etwa 31 km/s bei Vollmond. Anders als bei jedem anderen natürlichen Satelliten im Sonnensystem ist die Bahn des Mondes deshalb an jeder Stelle auch um die Sonne herum gekrümmt (konvex), d.h. die Bewegung des Mondes könnte auch als eine Umlaufbahn um die Sonne beschrieben werden, die aufgrund der Nähe der Erde lediglich ein wenig „eiert“. Die Ursache hierfür ist, dass die Anziehungskraft der Sonne die der Erde übersteigt. Zwar ist die Sonne 400 mal weiter entfernt als die Erde, hat aber die 333.000-fache Masse von dieser. Der Mond könnte aufgrund seiner Bahn daher auch als ein Zwillingplanet der Erde betrachtet werden. In Relation zu seinem Planeten ist der Erdmond der größte Trabant im Sonnensystem.

Der Mond ist der kleinste der erdähnlichen, der „terrestrischen“ Körper des Sonnensystems. Bei einem Durchmesser von etwa 3475 Kilometern hat er eine Oberfläche von knapp 38 Millionen Quadratkilometern, das ist etwa so groß wie die Flächen Afrikas und Australiens zusammen. 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 Staub auf der Mondoberfläche, geschlagen wurden, sowie Helium (^4He) als Bestandteil des Sonnenwindes. Ferner wurden Isotope von Argon (^{40}Ar), Radon (^{222}Ra) und Polonium (^{210}Po) nachgewiesen – letztere entstehen beim radioaktiven Zerfall von Uran und Radium in der Mondkruste und dem Mondmantel und werden von dort gasförmig an die Exosphäre abgegeben.

Bei Betrachtung des Mondes fallen zwei deutlich unterschiedliche Gebiete auf: Zum einen das helle Hochland, das global über 83 Prozent einnimmt, und zum anderen die dunkleren und tiefer gelegenen Maregebiete, die knapp 17 Prozent ausmachen. Das Hochland besteht aus kalzium- und aluminiumreichen Feldspäten, einer auch auf der Erde weit verbreiteten Mineralgruppe. Die Mare hingegen bestehen aus dunklen vulkanischen Gesteinen. Das Hochland ist auch mit wesentlich mehr Einschlagskratern übersät, woraus sich ein höheres Alter dieser Oberflächeneinheiten ableiten lässt. Mithilfe spektraler

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)



Mondmantel erschwerte. Allerdings ist noch unklar, wie es zu den unterschiedlichen Krustendicken kam.

Vermutlich entstand der Mond, als vor 4,5 Milliarden Jahren ein planetarer Körper etwa von der Größe des Mars mit der noch jungen, aber schon in Kruste, Mantel und Kern differenzierten Erde kollidierte. Dabei schmolzen und verdampften große Mengen des Erdmantels und wurden ins All geschleudert. Dieses Material rekondensierte und sammelte sich in einem Ring um den Äquator der Erde. Durch Akkretion (also gravitationsbedingtes Aufsammeln von Materie) der Teilchen in dieser Scheibe aus Staub und Gesteinspartikeln entstand und wuchs der Mond in wenigen Millionen Jahren zu seiner heutigen Größe. Er umkreiste die Erde damals in viel geringerem Abstand.

Im Wesentlichen war die geologische Entwicklung des Mondes schon relativ früh abgeschlossen. Durch das kontinuierliche Bombardement des jungen

Messungen aus dem Mondorbit und mit Teleskopen konnte die mineralogische bzw. geochemische Zusammensetzung der gesamten Mondkruste bestimmt werden.

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

Mondes durch Asteroiden und Kometen, sowie dem Zerfall von Wärme produzierenden radioaktiven Elementen in seinem Inneren kam es in der Frühphase des Mondes zur Ausbildung eines mehrere hundert Kilometer mächtigen globalen Magmaozeans. Das Abkühlen dieses Magmaozeans nach der Abnahme des Bombardements und des radioaktiven Zerfalls führte zur Kristallisation einer Reihe von gesteinsbildenden Mineralen. Zunächst sank metallisches Eisen in die Tiefe und bildete einen kleinen, nur wenige hundert Kilometer großen Kern. Dann kristallisierten schwere magnesium- und eisenreiche

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

Minerale, die ebenfalls nach unten sanken und einen Mantel bildeten. Gleichzeitig kam es zur Bildung einer ersten Kruste aus leichten, kalzium- und aluminiumreichen Silikaten. Aufgrund ihrer geringen Dichte trieben diese sogenannten anorthositischen Feldspäte in diesem mittlerweile fast vollständig erstarrten Magmazoan zur Oberfläche auf und bildeten die primäre Kruste der lunaren Hochländer.

Elemente wie Kalium, Uran, Thorium, Phosphor und einige Seltene Erden, die nur schwer in die Kristallgitter der gesteinsbildenden Minerale eingebaut werden können, sammelten sich an der Basis der feldspatreichen Kruste. Ein teilweises Wiederaufschmelzen des Mantels führte letztlich zum Aufsteigen 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.

Durch die Nähe der im Vergleich sehr großen und massereicheren Erde (das Verhältnis beträgt etwa 81:1) erfährt der Mond im Laufe eines Umlaufs (d. h. eines Monats) ständig wechselnde Zentrifugal- und Gravitationskräfte, durch welche er kontinuierlich leicht verformt wird. Dies führt zu regelmäßig auftretenden Beben von überwiegend geringer Stärke. Die meisten dieser Beben treten in Tiefen von ca. 700 bis 1100 Kilometer unter der Oberfläche auf. Die von den Beben ausgehenden Wellen können von Seismologen dazu benutzt werden, die Eigenschaften des Gesteins, aber auch den inneren Aufbau des Mondes zu untersuchen.

Der Mond besteht demnach aus einer Kruste mit einer mittleren Mächtigkeit von 60 Kilometern auf der Mondvorderseite. Auf der erdabgewandten Seite ist sie 100 Kilometer und mehr dick. Darunter befindet sich ein Mantel, der bis in eine Tiefe von circa 1250 Kilometern aus festem Gestein besteht. An seiner Unterseite scheint sich eine relativ dünne Schicht von teilweise geschmolzenem Gestein zu befinden, die sich durch eine starke Dämpfung bestimmter Mondbebenwellen bemerkbar macht. Schließlich hat der Mond einen flüssigen Eisenkern von ca. 660 Kilometern Durchmesser, in dessen Zentrum sich, wie bei der Erde, ein kleiner fester Eisenkern befindet. Diese beiden Schichten des Kerns konnten durch Echos in den von den *Apollo*-Seismometern aufgezeichneten Mondbebenwellen nachgewiesen werden, die Größe des inneren Kerns ist allerdings nicht genau bekannt.

Im Zeitraum von vor etwa 4,3 bis 3,8 Milliarden Jahren formten häufige und sehr heftige Einschläge von Meteoriten und Asteroiden das Antlitz des Mondes. Die größten Einschläge drangen so tief in die Kruste ein, dass vor allem auf der Mondvorderseite der Aufstieg basaltischer Laven erleichtert wurde und diese an der Oberfläche austraten. Die riesigen Einschlagbecken füllten sich im Zeitraum von 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, Plural Maria) bezeichnet werden, wie das Mare Imbrium oder der Oceanus Procellarum.

Die vulkanische Entwicklung war vor etwa drei Milliarden Jahren so gut wie abgeschlossen, nur noch vereinzelt erreichten Magmen bis vor circa einer Milliarde Jahre die Mondoberfläche. Seither ist der Mond zumindest an der Oberfläche 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 deuten Daten der in den Jahren 1997 bis 1999 den Mond umkreisenden Sonde *Lunar Prospector* darauf hin, dass sich in den tiefen, permanent abgeschatteten Kratern an Nord- und Südpol im Mondboden eine nicht unbeträchtliche Menge Wassereis befindet. Die detaillierte Untersuchung dieser möglichen

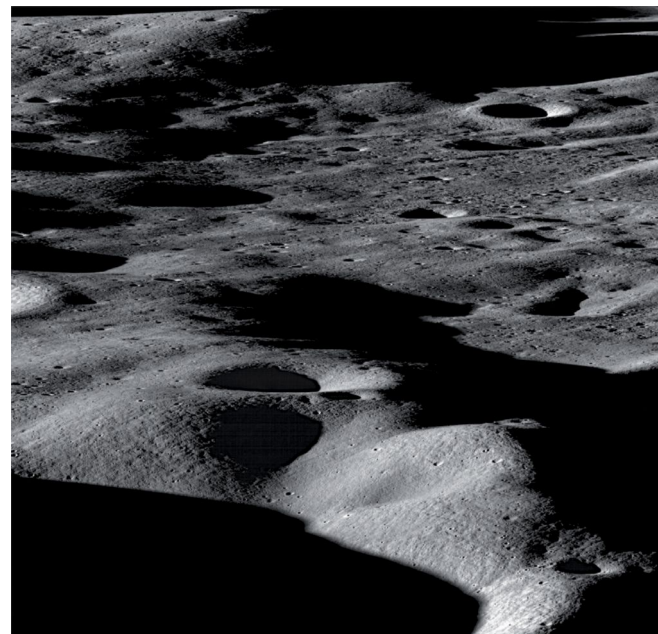


Bild: Blick zum nördlichen Rand des Kraters Cabeus, aufgenommen vom *Lunar Reconnaissance Orbiter*. Die Sonde *LCROSS* wurde dort 2009 gezielt zum Absturz gebracht. In permanent beschatteten Kratern an den Polen des Mondes wird Wassereis vermutet. (© NASA/GSFC/Arizona State University)

Wassereisvorkommen war und ist das Ziel mehrerer internationaler Mondmissionen der letzten Jahre. Mit Spektrometern an Bord der indischen Mission *Chandrayaan-1*, dem *Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)* und dem *Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS)* der NASA konnten nicht nur die Eisvorkommen in tiefen polaren Kratern bestätigt werden, sondern es wurde auch Wasser gefunden, das in Mineralen und dem Regolith über den ganzen Mond verteilt ist – allerdings in nur sehr geringer Konzentration. Die Suche nach Wassereis wird mit zahlreichen Missionen in diesen Jahren intensiviert.



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 25 Jahren mehrere Orbiter- und Landemissionen durchgeführt worden. Neben den USA beteiligen sich vor allem auch asiatische Raumfahrtnationen an der Erforschung des Mondes. Aus der Umlaufbahn wissenschaftlich ergiebig waren die japanische Mission *Kaguya-SELENE*, die NASA-Sonde *LADEE*, das amerikanische Impaktexperiment *LCROSS*, der Orbiter *SMART-1* der ESA, die chinesischen Orbiter *Chang'e-1* und *Chang'e-2*, die indischen Orbiter *Chandrayaan-1* und *Chandrayaan-3*, die Doppelsatelliten der

NASA-Mission *GRAIL* zur Vermessung des Schwerefeldes 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.

Im Zuge der Mission *Chandrayaan-3* setzte die Raumsonde im August 2023 das Landemodul *Pragyan* ab, das bei 69 Grad südlicher Breite auf der Mondvorderseite landete. Erfolgreich verliefen auch (Stand Mai 2024) drei Landemissionen Chinas. *Chang'e-3* landete im Dezember 2013 im Mare Imbrium bei 44,1 Grad Nord und 340,5 Grad Ost. Mit dem *Chang'e-4* Lander und dem Rover *Yutu-2* gelang im Januar 2019 erstmals eine weiche Landung auf der Mondrückseite im Krater Von Kármán (187 km Durchmesser) innerhalb des South Pole Aitken Beckens bei 45,4 Grad Süd und 177,6 Grad Ost. Zur Kommunikation mit dem Lander wurde der Orbiter *Queqiao* im Lagrangeunkt

Der junge Vulkankomplex Mons Rümker war das Ziel der chinesischen Mission *Chang'e 5*, die dort Proben nahm und zur Erde brachte. Aufnahme aus der Kommandokapsel von *Apollo 15* (1971). (© NASA)

L_2 des Mondorbits um die Erde platziert. Ein weiteres Novum war bei der Mission *Chang'e-5* der Transport von etwa 1,7 Kilogramm Material von der Oberfläche und aus bis zu ein Meter Tiefe zur Erde. China ist damit nach den USA und der früheren Sowjetunion die dritte Nation, der dies gelang. *Chang'e-5* landete am 1. Dezember 2020 im Oceanus Procellarum nahe dem Vulkankomplex des Mons Rümker bei 43,1 Grad Nord und 300,1 Grad Ost. Der Rückstart des Aufstiegsmoduls von der Mondoberfläche erfolgte am 3. Dezember 2020. Die Mondproben wurden in die im Mondorbit befindlichen Rückkehrsonde umgeladen, die am 16. Dezember 2020 in der inneren Mongolei landete.

Am 19. Januar 2024 gelang auch Japan mit der Mission *SLIM* eine unbemannte Landung. Das Zielgebiet lag auf der Mondvorderseite in der Nähe des Nectaris-Einschlagbeckens nahe des Kraters Theophilus (ca. 100 Kilometer Durchmesser) am Rande des nur 270 Meter großen hellen Strahlenkrater Shioli. Der angepeilte Landepunkt bei 13 Grad Nord und 25 Grad Ost wurde mit einer Genauigkeit von 55 Meter getroffen. Wegen technischer Probleme beim Anflug stand der Lander jedoch auf dem Kopf. Dadurch konnte die Energieversorgung mittels Solarzellen nur bei einem bestimmten Sonnenstand erfolgen. Untersuchungen mit einer Multispektralkamera und der Betrieb zweier Rover verliefen jedoch über mehrere Mond-Tage erfolgreich.

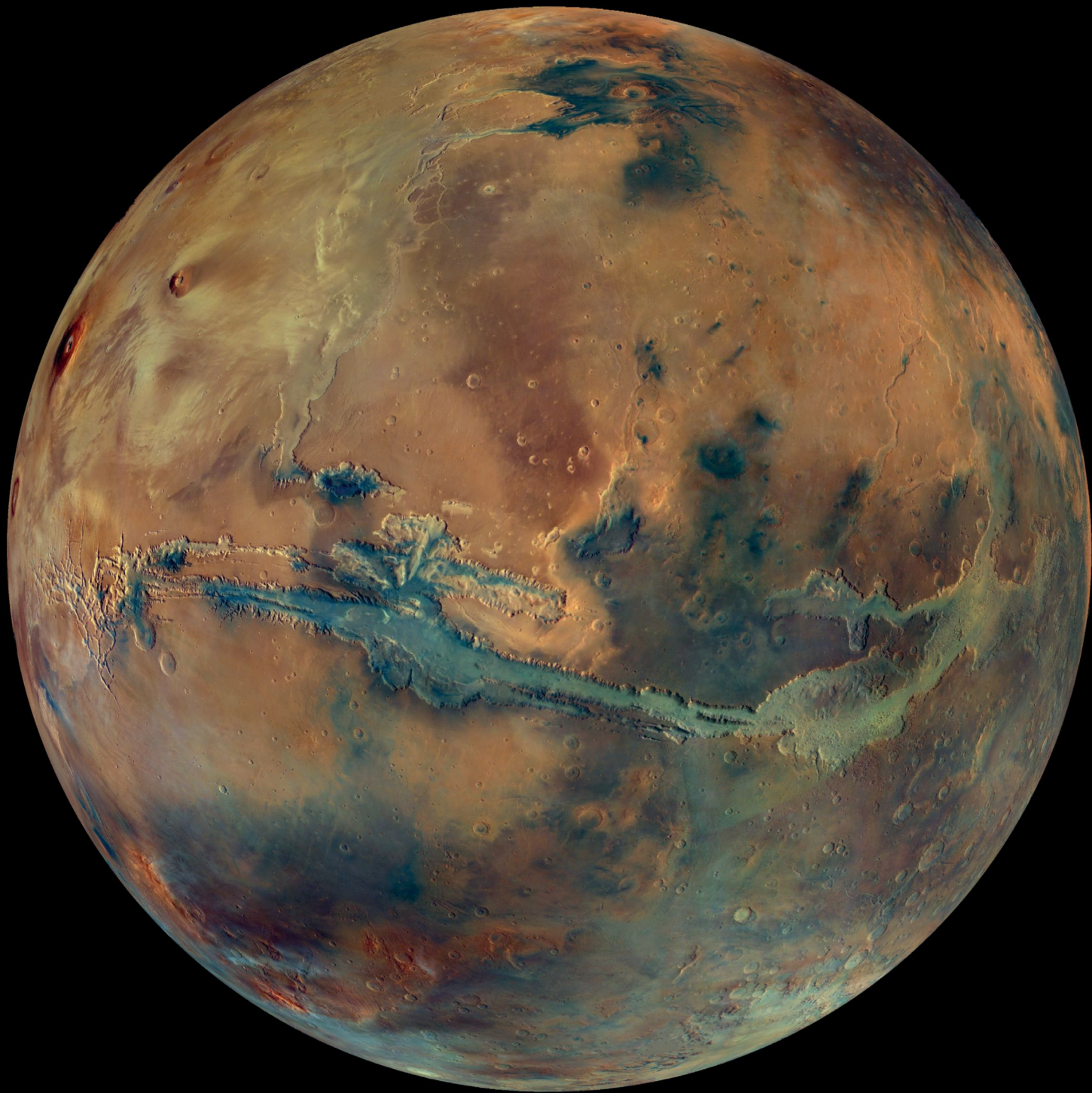
Neben zahlreichen geglückten Missionen kam es in den letzten Jahren jedoch auch zu Misserfolgen. Eine private israelische Mission namens *Beresheet* stürzte im April 2019 auf die Mondoberfläche ab. Ebenso verlor Japan bei der privaten Mission *Hakuto-R* mit dem von den Vereinigten Arabischen Emiraten bereitgestellten Rover *Rashid* einen Lander im April 2023. Roskosmos (Russische Föderation) misslang ferner im August 2023 die Landung von *Luna-25*, der Lander schlug auf der Mondoberfläche auf. Mit *Peregrine Mission One* der Firma Astrobotic (USA) schlug im Januar 2024 ein weiterer Versuch fehl, als erstes privates Unternehmen auf dem Mond zu landen. Wenige Wochen später jedoch, am 15. Februar 2024, gelang dies dem Unternehmen Intuitive Machines aus dem amerikanischen Texas mit der Mission *IM-1* im Zuge des CLPS-Programms (Commercial Lunar Payload Services), bei dem die NASA mit amerikanischen Unternehmen zusammenarbeitet, um wissenschaftliche Experimente und technische Geräte auf dem Mond zum Einsatz zu bringen: Die *IM-1*-Raumsonde *Odysseus* mit dem Instrumentenmodul *Nova-C* landete am 15. Februar 2023 bei 80 Grad südlicher Breite rund 300 Kilometer vom Südpol des Mondes entfernt zwischen den Kratern Malapert B und C. Weitere von privaten Unternehmen durchgeführte Mondlandungen sind geplant.

Die NASA bereitet noch in den 2020er-Jahren die erste astronautische Landung auf dem Mond seit dem Ende des *Apollo*-Programms 1972



vor. Dieses neue Mondprogramm wurde *Artemis* genannt, nach der Göttin des Mondes und der Zwillingsschwester des Gottes des Lichts und des Frühlings, Apollo, in der griechischen Mythologie. Ein erster erfolgreicher, noch unbemannter Flug mit einer Umkreisung des Mondes fand mit *Artemis-1* und dem *Orion*-Raumschiff für die künftigen Besatzungen im November 2022 statt. Stand 2024 soll im September 2025 mit *Artemis-2* eine erste bemannte, mehrfache Mondumrundung durchgeführt werden. Bei der Mission *Artemis-3*, geplant für September 2026, sollen insgesamt vier Astronauten zum Mond aufbrechen, zwei von ihnen werden aus der Umlaufbahn mit einem abgetrennten Landemodul in der Südpolgegend aufsetzen.

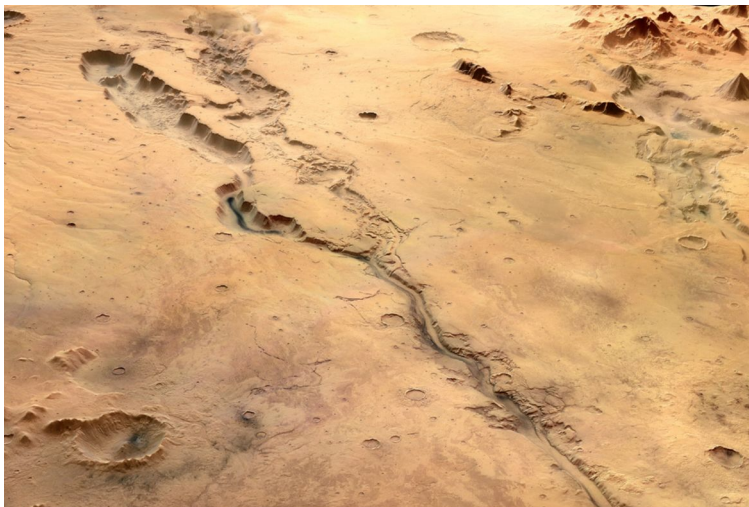
Etwas mehr als 382 Kilogramm Proben von den sechs Landestellen der *Apollo*-Missionen sind der Schlüssel zum Verständnis der Frühzeit des Sonnensystems und der Entwicklung der erdähnlichen Planeten und des Erdmondes. Die von den Astronauten der Mission *Apollo 16* eingesammelte, 20 Zentimeter große Probe 60025 aus dem Mondhochland ist mit einem Alter von 4,36 Milliarden Jahren eine der drei ältesten Mondproben. (© NASA)



MARS

Von der Sonne aus gesehen ist der Mars der vierte Planet. Er ist der Erde in vielem ähnlich – vor allem in den geologischen Prozessen, die seine Oberfläche formten. Sein Durchmesser ist nur etwa halb so groß wie derjenige der Erde, seine Oberfläche entspricht aber ungefähr der Landoberfläche der Erde. Er besitzt einen Schalen Aufbau bestehend aus einem flüssigen Eisenkern, einem festen Gesteinsmantel und einer Kruste. Auch die Neigung seiner Rotationsachse ist mit 25,2 Grad der Erde sehr ähnlich, wodurch es auf dem Mars ebenfalls Jahreszeiten gibt. Infolge seines längeren Bahn umlaufs um die Sonne (ein Marsjahr dauert etwa zwei Erdjahre) dauern diese aber jeweils ungefähr ein halbes Erdjahr. Bei durchschnittlich –60 Grad Celsius und einem Luftdruck von weniger als einem Prozent der Erdatmosphäre gibt es heute kein flüssiges Wasser auf der Mars oberfläche. Die Temperaturen können tagsüber im Sommer in Äquatornähe bis +27 Grad Celsius ansteigen, in winterlicher Marsnacht an den Polen dagegen bis auf –133 Grad Celsius abfallen.

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. Ferner benutzte man in den vergangenen Jahrhunderten bei Marsoppositionen gerne den trigonometrisch gemessenen Erde-Mars-Abstand zur Bestimmung der astronomischen Einheit (dem Abstand zwischen Erde und Sonne). Anfang des 17. Jahrhunderts erkannte Johannes Kepler anhand der Messungen des dänischen Astronomen Tycho Brahe, dass sich der Mars auf einer elliptischen Bahn um die Sonne bewegen muss – anstatt auf einer Kreisbahn um die Erde. 1877 erlag Schiaparelli einer optischen Täuschung, als er graben- und rillenartige Strukturen auf dem Mars zu sehen wähnte, die er „canali“



In Zahlen

Mars	Masse	$6,417 \times 10^{23} \text{ kg}$
	Radius	3396 km
	Dichte	3934 kg/m^3
	Rotationsperiode	24,62 h
	Orbitalperiode	686 Tage 23 h 31 min
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	$227,9 \times 10^6 \text{ km}$
Phobos	Masse	$1,06 \times 10^{16} \text{ kg}$
	Radien	$13 \times 11,4 \times 9,1 \text{ km}$
	Dichte	1862 kg/m^3
	Orbitalperiode	0,3189 Tage
	Durchschnittliche Entfernung zum Marsmittelpunkt	9378 km
Deimos	Masse	$1,1 \times 10^{15} \text{ kg}$
	Radien	$7,8 \times 6,0 \times 5,1 \text{ km}$
	Dichte	1471 kg/m^3
	Orbitalperiode	1,262 Tage
	Durchschnittliche Entfernung zum Marsmittelpunkt	23.459 km

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.

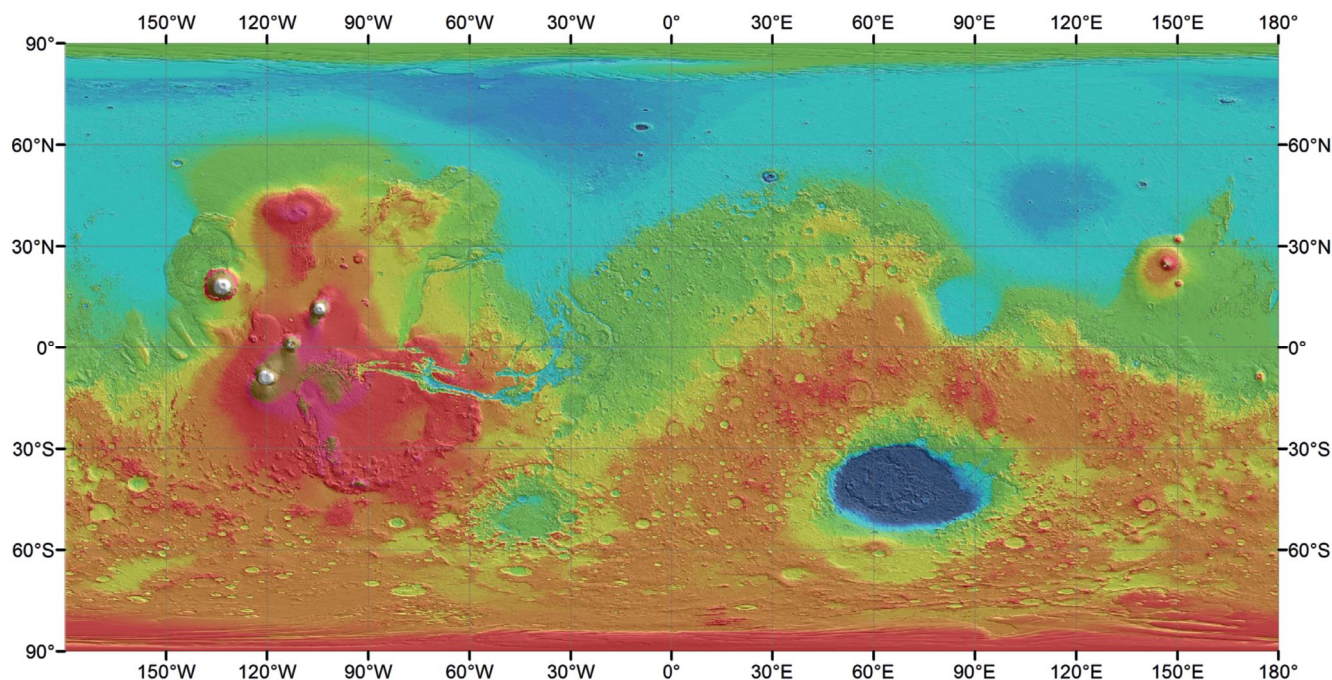
Wie bei der Venus besteht die Marsatmosphäre überwiegend (zu 95 %) aus Kohlendioxid (CO_2); der Druck an der Oberfläche beträgt jedoch im Mittel nur sechs Millibar (auf der Erde 1013 Millibar). In der Marsatmosphäre können sich Wolken aus Wassereis und

Bild: Dao und Niger Valles, aufgenommen von Mars Express.

(© ESA/DLR/FU Berlin, CC BY-SA 3.0 IGO)

Bild linke Seite: Kontrastverstärktes Farbmosaik des Mars aus HRSC-Aufnahmen, das die Vielfältigkeit der Zusammensetzung seiner Oberflächenformen veranschaulicht.

(© ESA/DLR/FU Berlin, CC BY-SA 3.0 IGO)



Kohlendioxid 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 führt. Wegen des geringen Luftdrucks haben diese Stürme heutzutage jedoch nur die Kraft eines lauen Lüftchens auf der Erde. Früher, als die Atmosphäre viel dichter war, hatten die Winde auch eine viel stärkere abtragende Wirkung. 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 (CH_2O), was Spekulationen Nahrung gab, dass Wärme im Innern der Magmenkammern noch vorhanden und die Ursache für die Freisetzung dieser Gase sein könnte. Da auch an anderen Stellen Methan (CH_4) in der Marsatmosphäre detektiert wurde, gab es sogar Spekulationen darüber, dass biologische Prozesse – so wie auch auf der Erde – für die Methanproduktion verantwortlich sein könnten. Allerdings gibt es auch eine Reihe abiotischer Prozesse, zum Beispiel einen Mineralumwandlungsprozess namens Serpentinisierung, mit denen die Bildung von Methan erklärt werden könnte. Die 2016 gestartete ESA-Mission *ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)*, die feinste

Spurengase in der Marsatmosphäre detektieren kann, hat bis heute allerdings so gut wie kein Methan nachgewiesen.

Dank der zahlreichen Marsmissionen wie beispielsweise *Mariner 9*, *Viking 1* und *2*, *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey*, *Mars Express* und *Mars Reconnaissance Orbiter*, die mit verschiedensten Instrumenten den Planeten aus dem Orbit kartiert, vermessen und charakterisiert haben, kennen wir die Oberflächenbeschaffenheit und -formationen recht gut. Grob kann man die Oberfläche in zwei große Regionen unterteilen: ein ebenes nördliches Tiefland und ein südliches Hochland mit zahlreichen Einschlagskratern sowie einigen riesigen Vulkanen. Dadurch ergibt sich eine markante Oberflächenstruktur auf dem Mars, die sogenannte Dichotomie („Zweiteilung“): Der größte Teil der Nordhalbkugel liegt mehrere Kilometer tiefer als die Oberfläche der Südhalbkugel, mit einer relativ scharfen Grenze die ungefähr dem Äquator folgt. Die Kruste der Südhalbkugel muss, wie die geophysikalische Landemission *InSight* zeigen konnte, außerdem

Bild: Topographische Karte des Mars aus Laseraltimeterdaten. Die Höhenunterschiede reichen von blau (–8 bis –4 km unter die Bezugsfläche) über grün (–4 bis 0 km), beige (0 bis +3 km) und rot (+1 bis +5 km) bis hellgrau (+8 km über dieses Niveau). (© MOLA Science Team/MGS/NASA/DLR)

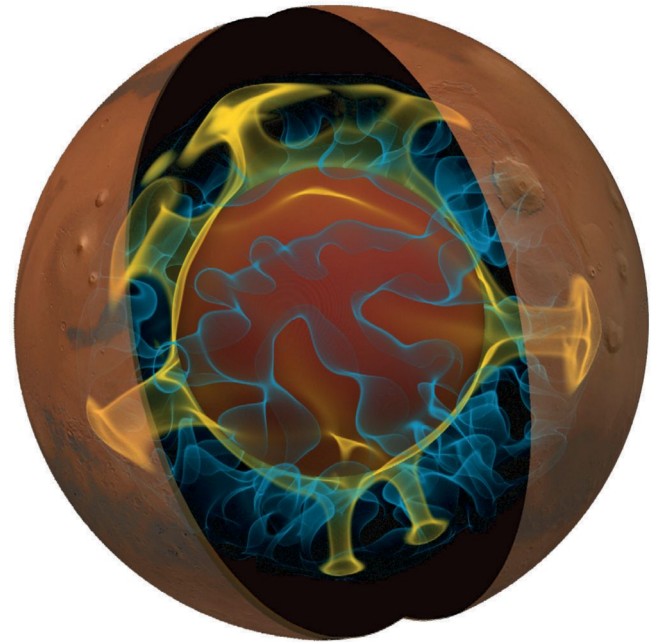
dicker sein, als die der nördlichen Tiefebene. Die Ursache für dieses Phänomen ist noch nicht geklärt.

Besonders auffallend sind in Äquaturnähe der 22 Kilometer aus seiner Umgebung aufragende und 600 Kilometer durchmessende 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 Grabenbruchsystem Valles Marineris (benannt nach der Sonde *Mariner 9*), das mehr als 4000 Kilometer lang ist und sich von Nord nach Süd über 700 Kilometer erstreckt. An den tiefsten Stellen sind die Grabenbrüche bis zu zehn Kilometer tief. In der südlichen Hemisphäre befinden sich mit den Einschlagsbecken Hellas Planitia und Argyre Planitia die größten heute noch sichtbaren Impaktstrukturen auf dem Mars.

Vulkanismus prägte den Planeten während eines großen Teils seiner Entwicklung. An vielen Stellen wurden auf der Oberfläche Minerale identifiziert, die typisch für basaltische Zusammensetzungen sind. Basalte sind die bei weitem häufigsten vulkanischen Gesteine auf den erdähnlichen Körpern des Sonnensystems. 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 vulkanischen Gestein. Basalte entstehen, wenn relativ ursprüngliches Material des Planetenmantels teilweise zu Magma aufgeschmolzen wird, in der Kruste 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, chemische Verwitterung (Alteration) und Abtragung mineralogisch verändert und vielerorts nicht mehr in seinem ursprünglichen Kontext vorhanden ist.

Vulkane sind an einigen Stellen gehäuft zu finden. Die größte vulkanische Provinz ist Tharsis in der westlichen Hemisphäre, in der etwa ein Dutzend große und hunderte kleiner Vulkane entdeckt wurden, deren Aktivität bis in die jüngste Vergangenheit reichte. Eine andere vulkanische Region ist Elysium, wo einige Lavaströme wahrscheinlich erst vor wenigen Millionen Jahren entstanden sind. Die jüngste Aktivität liegt wahrscheinlich weniger als 200.000 Jahre zurück, was in geologischem Maßstab praktisch gegenwärtig ist und die Frage aufwirft, ob Vulkanismus auf dem Mars möglicherweise nur „schlafend“ ist und an einigen Stellen in Zukunft wieder aktiv werden könnte.

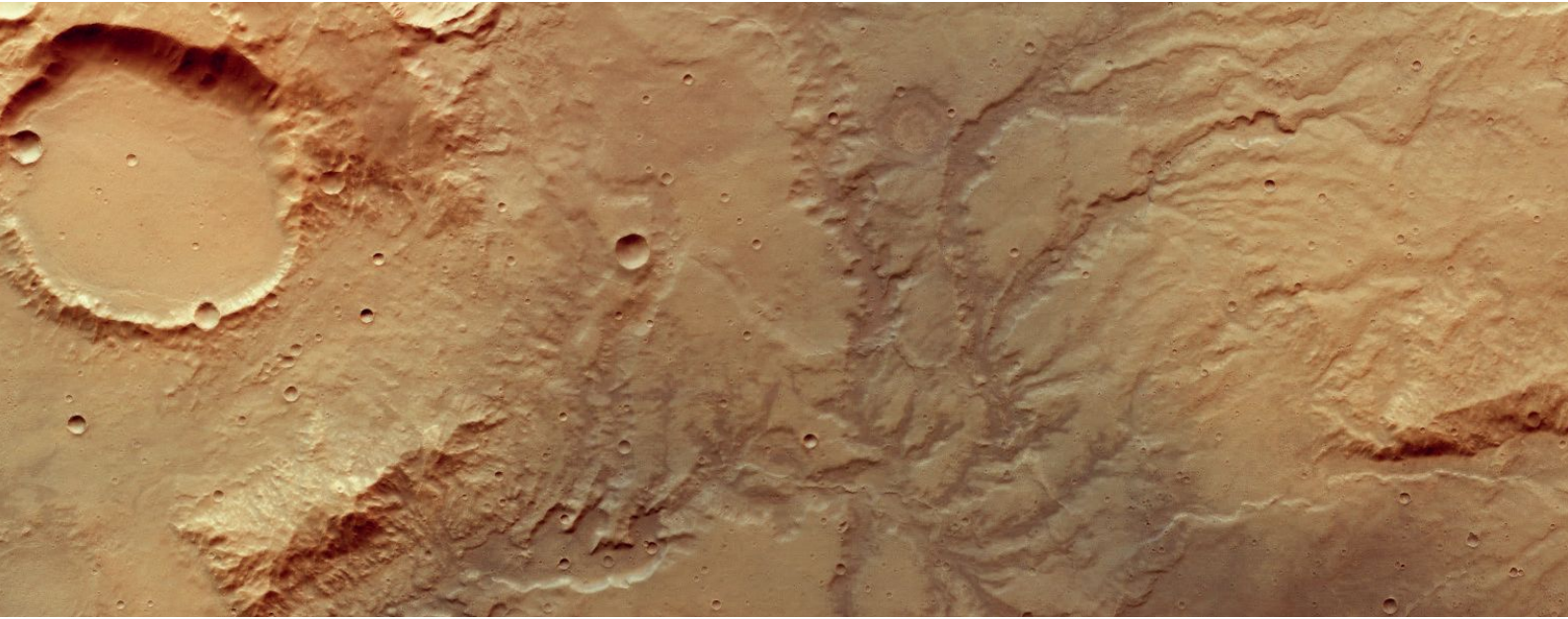
Außer durch Vulkanismus wurde die Marsoberfläche auch von tektonischen Prozessen geformt. Auf den Satellitenbildern sind zahlreiche Störungen (bruchhafte Verformungen der Lithosphäre, also der spröden äußeren Planetenhülle) zu erkennen. Schwärme von Störungen



können oft mehrere hundert oder sogar tausend Kilometer lang werden. Auf dem Mars gibt es sowohl Dehnungs- als auch Einengungsstörungen, aber nur wenige seitliche Verschiebungen. Das ist ein Indiz dafür, dass der Mars ein „Ein-Platten-Planet“ ist, dessen Lithosphäre, anders als bei der Erde, nicht aus mehreren Platten besteht, die sich seitlich gegeneinander verschieben.

Mit „Störung“ werden in der Geologie Brüche im Gestein bezeichnet, und der Bruchprozess selbst ist ein Erd- bzw. Marsbeben. Mit ihrem hochempfindlichen Seismometer konnte die von November 2018 bis Dezember 2022 betriebene Landesonde *InSight* weit über tausend Marsbeben registrieren und damit bestätigen, dass es auch heute noch tektonische Bewegungen in der Kruste des Mars gibt. Die von den Marsbeben ausgehenden seismischen Wellen durchlaufen das Innere des Planeten und werden beispielsweise von der Grenze zwischen flüssigem Kern und festem Mantel reflektiert. *InSight* konnte so erstmals die Dicke der Kruste des Mars sowie die Größe seines Kerns direkt messen. Die Wellen von einem weit entfernten Marsbeben und

Bild: Das Innere des Mars, wie es Computermodelle voraussagen. Neben dem Kern sind die säulenförmigen Mantelplumes zu sehen, in denen heißes Gesteinsmaterial aus dem Marsinneren nach oben transportiert und an der Unterseite der Kruste seitlich abgelenkt wird. (© DLR/IA.-C. Plesa)



einem in großer Entfernung eingeschlagenen Meteoriten sind sogar durch den Kern hindurch gelaufen und liefern damit Informationen über dessen Struktur in mehr als 1500 Kilometern Tiefe. Durch die geringere Masse des Mars ist auch der Druck in seinem Inneren viel niedriger als in der Erde. Daher treten die Minerale, die auf der Erde typisch für Tiefen zwischen 440 und 660 Kilometern sind, im Mars erst unterhalb von 800 bis 1000 Kilometern Tiefe auf. Die in der Erde unterhalb von 660 Kilometern typischen Minerale gibt es im Innern des Mars wegen des geringeren Drucks dagegen gar nicht. Gleichzeitig ermöglichen es die Druckverhältnisse im Marsinneren, dass es an der Unterseite seines Mantels eine Schicht aus geschmolzenem Gestein gibt, welche direkt auf dem Kern aus ebenfalls geschmolzenem Eisen aufliegt. Aufgrund der geringeren Dichte des Gesteins vermischen sich die beiden Schichten aber nicht. Es gibt derzeit keine Hinweise darauf, dass es im Zentrum des Mars einen festen inneren Eisenkern geben könnte – anders als der Erdkern ist der Marskern wahrscheinlich komplett flüssig.

Das Innere des Mars, wie das aller Körper im Sonnensystem, ist im Grunde genommen eine Wärmekraftmaschine. Der Zerfall von radioaktiven Isotopen, z. B. von Uran, Thorium oder Kalium, aber auch die Energie, die während der Planetenbildung erzeugt wurde, sind die wichtigsten Quellen für die Wärmeproduktion im Inneren. Diese Wärme wird über die Planetenoberfläche abgegeben und führt zur Abkühlung des Inneren über lange geologische Zeiträume. Der

effizienteste Wärmetransportmechanismus ist die Konvektion. Die langsame Bewegung (das Kriechen und Umwälzen) des Mantelgesteins aufgrund der Temperatur- und Druckunterschiede im Inneren des Planeten sorgt für die Umverteilung der Wärme und wird in Oberflächenstrukturen wie beispielsweise Vulkanen oder tektonischen Verformungen sichtbar. Die großen Vulkanregionen Tharsis und Elysium, die noch vor geologisch gesehen kurzer Zeit aktiv waren, zeigen, dass thermische Konvektion heute noch im Inneren des Mars stattfindet. Thermische Anomalien im Mantel werden durch Dichteunterschiede zwischen heißem Material aus tieferen Regionen im Inneren des Mars und kälteren Regionen nahe der Oberfläche erzeugt. Diese sogenannten Mantelplumes, die das heiße Gestein aufgrund seiner geringeren Dichte in Richtung der Oberfläche aufsteigen lassen, wo es unter dem geringeren Druck aufschmilzt, sind vermutlich die Ursache für die jüngste vulkanische Aktivität des Planeten. Einige der von *InSight* registrierten Marsbeben konnten dem Gebiet der Cerberus Fossae zugeschrieben werden, wo die jüngste vulkanische Aktivität weniger als 200.000 Jahre zurück liegt. Diese Beben deuten auf Abkühlungs- und Schrumpfungsprozesse heißer vulkanischer Gesteinskörper (sog. Ganggesteine oder Dikes) hin.

**Bild: Baumartig verzweigtes ausgetrocknetes Flusssystem auf dem Mars, aufgenommen mit HRSC an Bord von *Mars Express*.
(© ESA/DLR/FU Berlin, CC BY-SA 3.0 IGO)**

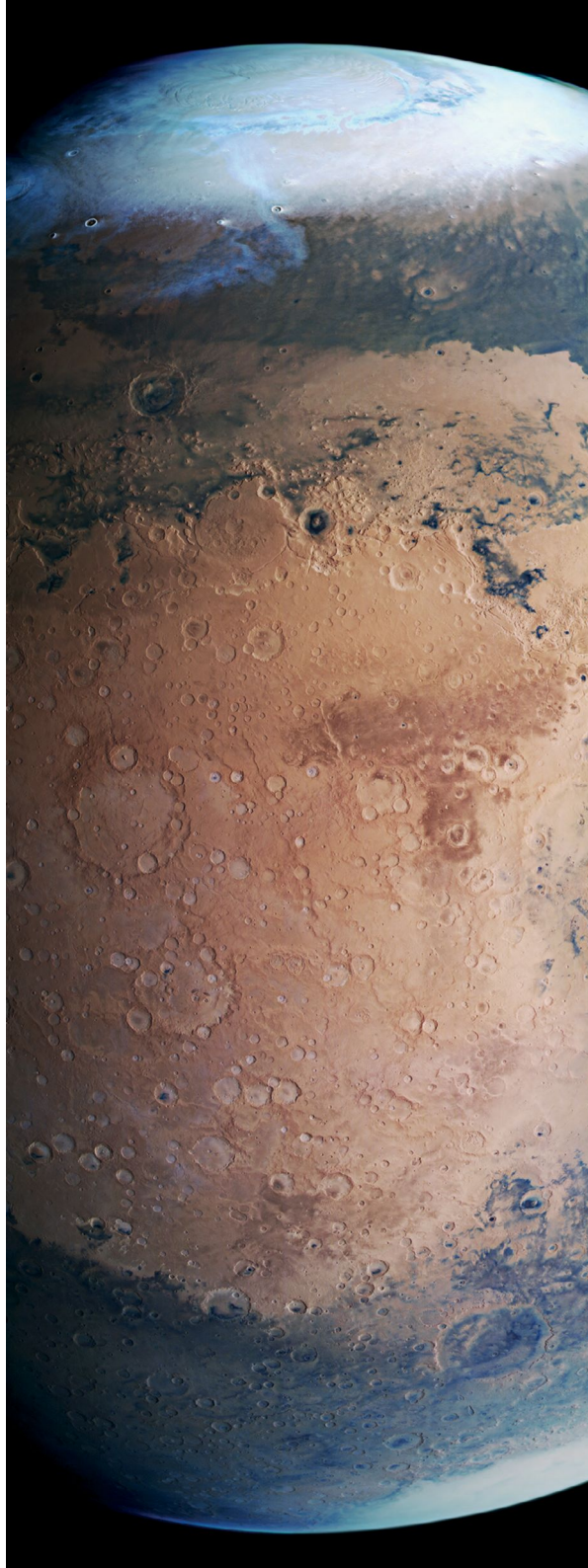
Während der frühen Planetenentwicklung hat die Konvektion im flüssigen Eisenkern des Mars einen Dynamo angetrieben, der ein Magnetfeld erzeugte. Heute besitzt Mars kein planetares Magnetfeld mehr, allerdings sind die Spuren eines einst aktiven Dynamos in alten Krustengesteinen an der Oberfläche des Planeten aufgezeichnet: Ältere Oberflächengesteine sind magnetisiert, während jüngere Regionen keine Magnetisierung aufweisen. Das deutet darauf hin, dass das Magnetfeld des Mars vermutlich nur während der ersten 500 Millionen Jahre der Marsgeschichte aktiv war. Eine genaue Vermessung der Rotation des Mars, durch Kombination von Daten der Missionen *Viking*, *Mars Pathfinder* und *InSight*, sowie vom Kern reflektierte und mit *InSight* aufgenommene Scherwellen, zeigen aber, dass der Kern des Mars auch heute noch geschmolzen und flüssig ist.

Die Oberfläche des Mars wurde nicht nur durch tektonische und vulkanische Prozesse, sondern auch durch fluviale (durch Wasser verursachte), glaziale (durch Eis und Gletscher) und aeolische (durch atmosphärische) Prozesse unterschiedlicher Intensität und Dauer geformt und überprägt. Verzweigte Talsysteme erstrecken sich über weite Gebiete und zeugen von der ehemaligen Aktivität flüssigen Wassers auf dem Mars. Eines der bekanntesten (wenn auch nicht verzweigten) Talsysteme ist Mawrth Vallis, an dessen Hängen die mächtigsten Ablagerungen wasserhaltiger Tonminerale auf dem Mars gefunden wurden. Neben fließenden Gewässern gab es aber auch Meteoritenkrater, die mit Wasser

gefüllt waren. Sie werden heute Paläoseen genannt und gehen oft mit Flussdeltas, wasserhaltigen Mineralablagerungen sowie Ein- bzw. Ausflussrinnen einher. Es wird sogar vermutet, dass es einst einen oder mehrere zeitlich getrennte Ozeane in der Nordhemisphäre des Mars gegeben haben könnte. Ihre Existenz oder Nichtexistenz ist jedoch bis heute Gegenstand wissenschaftlicher Debatten.

Heute sind alle Täler und Seen längst trockengefallen. Es muss also einen Wandel des Klimas von einer wärmeren und feuchteren Vergangenheit zu den heutigen, sehr kalten und trockenen Umweltbedingungen gegeben haben. Man geht davon aus, dass dieser Wandel vor etwa dreieinhalb Milliarden Jahren stattfand, allerdings ist der genaue Zeitpunkt, die Dauer und die Art dieses Klimawandels bis heute unbekannt und insofern eines der wichtigsten Themen der Marsforschung. In letzter Zeit fand man zunehmend Hinweise darauf, dass Wasser episodisch auch in jüngerer Vergangenheit zumindest kurzfristig noch an der Oberfläche vorhanden war. So könnte beispielsweise eine zeitweise Mobilisierung von Wasser durch Schnee- oder Eisschmelze die charakteristischen Erosionsrinnen („gullies“) verursacht haben, die an vielen Kraterhängen zu

Bild: Der Mars mit seinen beiden Eis-Polkappen zu Beginn des Frühlings auf der Nordhalbkugel bei gleichzeitigem Herbstbeginn im Süden. Das Eis am Nordpol wird sich bald bis auf 80 Grad nördliche Breite zurückziehen. Aufnahme der DLR-Stereokamera HRSC auf der ESA-Raumsonde *Mars Express* vom Juni 2019.
(© ESA/DLR/FU Berlin, CC BY-SA 3.0 IGO)



finden sind. Spuren von glazialen Prozessen, die bis in die allerjüngste Vergangenheit des Mars reichen, sind 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 mittleren und höheren geographischen Breiten, ähneln periglazialen Strukturen in Permafrostgebieten auf der Erde. Tatsächlich wurde an einigen Stellen Eis in geringer Tiefe nachgewiesen. Auch Radarmessungen haben ergeben, dass der Mars über ein beträchtliches Vorkommen an Eis im Untergrund verfügt. Die wohl eindrucksvollsten Eisformationen auf dem Mars sind die beiden Polkappen, die je nach Jahreszeit aus einer Mischung aus Wasser- und/oder Kohlendioxydeis bestehen.

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 hellem Quarzsand, sondern aus dunkler vulkanischer Asche und zerkleinerten vulkanischen Ablagerungen. Sie wurden nicht nur als Dünenfelder, sondern auch als weit ausgedehnte dunkle Sandschichten vom Wind abgelagert. Als Zeugen der Winderosion hingegen, gibt es ganze Regionen, die von stromlinienförmigen Rücken, sogenannten *Jardangs*, durchzogen sind, die ähnlich einem Sandstrahlgebläse aus der Landschaft geschmiegelt wurden. Heute zeigt sich die Windaktivität vor allem eindrucksvoll in Form von großen Staubstürmen und kleineren Windhosen, so genannten „Staubteufeln“, die sich mit hoher Geschwindigkeit über die Marsoberfläche bewegen. Bei genauerer Betrachtung der Dünen mit hochauflösenden Kameradaten lässt sich die Aktivität des Windes überdies auch an der Verlagerung der kleinen Windrippeln auf ihren Oberflächen erkennen. Nach Sturmereignissen werden manchmal auch ganze Dünenkörper verlagert, entstehen neu oder verschwinden gänzlich.

Wenngleich man heute mit den Untersuchungen von inzwischen zehn erfolgreich auf dem Planeten gelandeten Sonden keine Lebensformen 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 2012 im Krater Gale, dem Grund eines ehemaligen Sees, gelandet und sucht in einer mächtigen Sedimentschicht nach Spuren längst vergangener möglicher

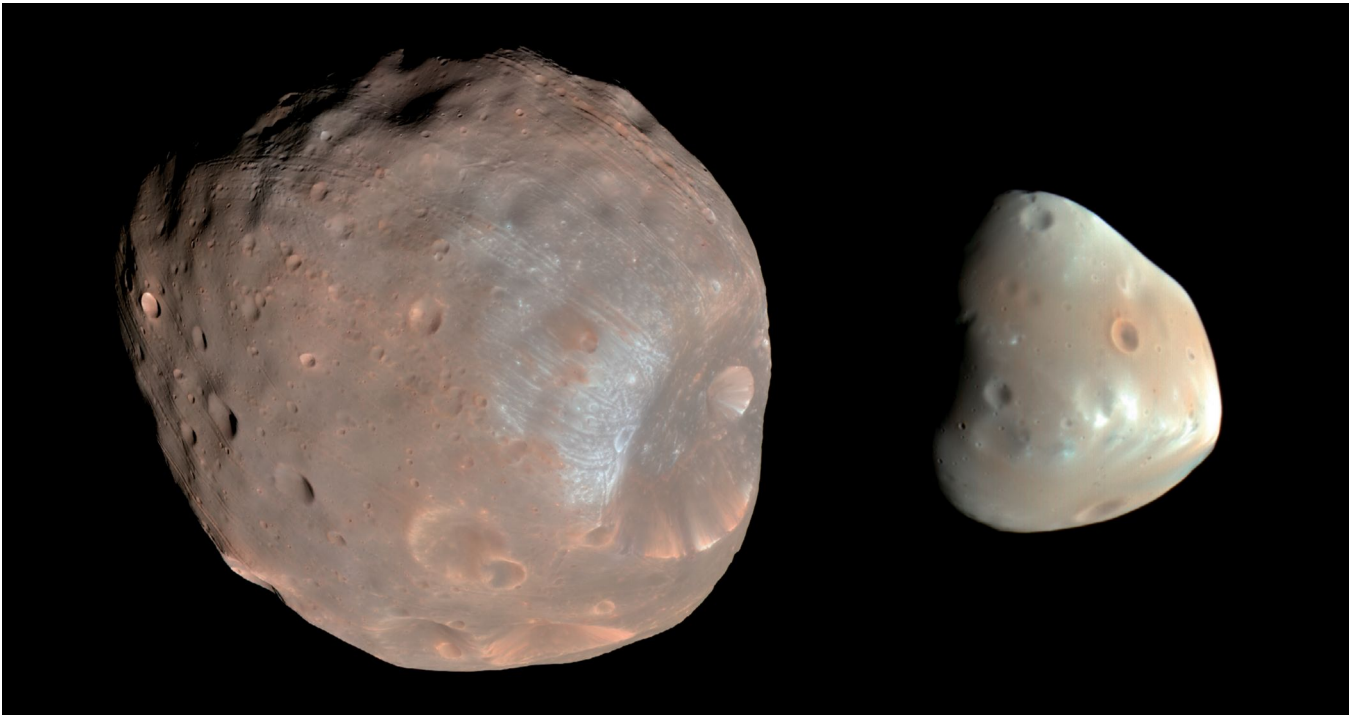
Lebensräume. *Curiosity* konnte erstmals organische Kohlenstoffverbindungen auf dem Mars nachweisen, diese könnten allerdings auch durch nicht-biologische Prozesse gebildet worden sein. Dennoch haben *Curiosity* und der 2021 gelandete Rover *Perseverance* die wichtige Rolle von Wasser in der geologischen Geschichte des Planeten bestätigt. Auch ein 2021 gelandeter chinesischer Rover hat Hinweise auf wasserreiche Sedimente gefunden. Obwohl dieser Zeitraum rund 3,5 Milliarden Jahre in der Vergangenheit liegt, war Mars einst habitabel, wenn auch möglicherweise nur lokal und episodisch. Ob tatsächlich Leben entstanden ist, soll mit Nachfolgemissionen geklärt werden.

Den nächsten Schritt soll die ESA-Mission *ExoMars* machen. Ein Rover wird erstmals in der Lage sein, bis zu zwei Meter tief in den Marsboden zu bohren. Falls es jemals Leben auf dem Planeten gegeben hat, so ist es viel wahrscheinlicher, Spuren davon unterhalb der Oberfläche zu finden, wo sie vor der Zersetzung durch schädliche UV-Strahlung geschützt gewesen wären. Noch weiter geht der ambitionierte Plan von NASA und ESA, gezielt Proben auf dem Mars zu sammeln und sie zur Erde zu bringen, wo sie in mehreren Laboratorien der Welt nach Lebensspuren untersucht werden sollen. Die Proben werden seit 2021 von *Perseverance* gesammelt und versiegelt und sollen später von weiteren Missionen aufgenommen werden, dann zunächst in eine Umlaufbahn um den Mars gebracht werden, wo sie eingesammelt und zur Erde transferiert werden. Man rechnet im Moment (2024) damit, dass die Proben in etwa 10 bis 15 Jahren auf der Erde eintreffen könnten. Auch China plant eine Mission, um Marsproben zur Erde zu bringen.

Marsmonde

Die beiden Marsmonde Phobos und Deimos wurden 1877 von Asaph Hall entdeckt. Beide besitzen eine sehr unregelmäßige Form und haben eine sehr dunkle Oberfläche, die nur etwa fünf Prozent des Sonnenlichts reflektiert. Phobos, mit bis zu 27 Kilometern Durchmesser der größere der beiden Marsmonde, weist eine Vielzahl von Einschlagskratern auf, von denen Stickney mit zwölf Kilometern und Hall mit fünf Kilometern Durchmesser die größten sind. Der kleinere Deimos in größerer Entfernung zum Mars ist nur etwa 15 Kilometer groß und besitzt deutlich weniger sichtbare Krater. Bilddaten verschiedener Marsmissionen zeigen, dass seine Oberfläche stärker von einer Staubschicht, (Regolith), bedeckt ist als die von Phobos.

Der Ursprung der beiden Marsmonde ist noch nicht eindeutig geklärt und mehrere Entstehungsmodelle werden diskutiert: Eine Theorie hält eine Entstehung von Mars und seiner beiden Monden in einem



gemeinsamen Prozess für wahrscheinlich. Ein weiteres Modell besagt, dass es sich bei beiden Monden um Kleinkörper handle, die im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter entstanden sind und von der Schwerkraft des Mars eingefangen wurden. Ein weiteres viel beachtetes Modell besagt jedoch, dass die beiden Monde nach einem sehr großen Asteroideneinschlag in der Frühzeit des Mars entstanden sein könnten. Demnach bildeten die ausgeschleuderten Trümmer des Einschlags eine Ringscheibe um den Mars. Durch Zusammenklumpen der Materialien in der Ringscheibe bildete sich eine Population kleiner Körper, die zum Teil wieder auf den Mars stürzten, aber deren Reste letztendlich die beiden verbleibenden kleinen Monde bildeten.

Phobos scheint – in geologischen Zeiträumen gedacht – in nicht zu ferner Zeit seinem Ende entgegenzusehen einem unerfreulichen Schicksal entgegenzusehen, da er wegen des geringen Abstands zum Mutterplaneten starken Gezeitenkräften ausgesetzt ist. Die Auswertung von *Mars-Express*-Messungen der Umlaufbahn von Phobos bestätigt, dass er sich dem Mars auf einer spiralförmigen Bahn nähert

und in ca. 40 bis 70 Millionen Jahren auseinanderbrechen und auf den Planeten stürzen wird.

Die russische Sonde *Phobos Grunt*, die den Mond eingehend untersuchen sollte, scheiterte bei ihrem Start Ende 2011. Eine nächste Phobos-Mission steht allerdings schon in den Startlöchern: *MMX*, kurz für *Martian Moons eXploration*, ist eine japanische Mission mit deutscher und französischer Beteiligung, deren Start für 2026 geplant ist. Sie wird nicht nur einen Orbiter zu den beiden Marsmonden schicken, sondern auch einen Rover namens *Idex* auf Phobos landen lassen, der erstmals in der Geschichte der Marsforschung einen Marsmond vor Ort erkunden und nach geeigneten Stellen für eine Probenentnahme Ausschau halten soll. Der Orbiter wird dann die Proben aufnehmen und sie in einem Rückkehrmodul deponieren, welches die Probekapsel 2031 zur Erde bringen wird.

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



21 Lutetia - $132 \times 101 \times 76$ km
Rosetta, 2010



243 Ida - $58.8 \times 25.4 \times 18.6$ km
Galileo, 1993

162173 Ryugu
 1.0×0.9 km
Hayabusa2, 2018

101955 Bennu
0.5 km
OSIRIS-REx, 2018

25143 Itokawa
 $0.5 \times 0.3 \times 0.2$ km
Hayabusa, 2005

9969 Braille
 $2.1 \times 1 \times 1$ km
Deep Space 1, 1999

2867 Steins
 5.9×4.0 km
Rosetta, 2008

4179 Toutatis
 $4.6 \times 2.3 \times 1.9$ km
Change-2, 2012

5535 Annefrank
 $6.6 \times 5.0 \times 3.4$ km
Stardust, 2002



951 Gaspra
 $18.2 \times 10.5 \times 8.9$ km
Galileo, 1991



433 Eros - 33×13 km
NEAR, 2000



253 Mathilde - $66 \times 48 \times 44$ km
NEAR, 1997

Dactyl
[[243] Ida I]
 1.6×1.2 km
Galileo, 1993

ASTEROIDEN

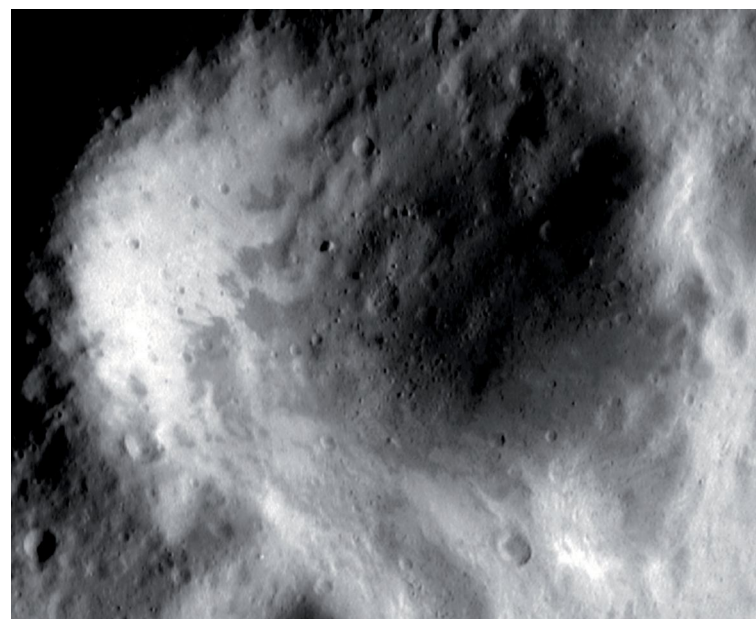
In der Neujahrsnacht 1801 entdeckte Giuseppe Piazzi (1746–1826), der damalige Direktor der Sternwarte Palermo, den ersten Asteroiden: Ein Objekt änderte zwischen zwei Beobachtungen seine Position. Der veränderliche Körper entpuppte sich als kleiner „Planet“, und Piazzi nannte ihn Ceres, nach der Göttin der Vegetation und der Schutzheiligen Siziliens.

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, Uranus. Es gab also noch weitere Mitglieder in der Planetenfamilie. Die Forscher Johann Daniel Titius und Johann Elert Bode entwickelten eine einfache mathematische Formel, mit der sie die Abstände der Planetenbahnen von der Sonne beschrieben. Uranus passte dabei recht gut in diese so genannte Titius-Bodesche Reihe, was anscheinend die Richtigkeit der Formel belegte. Nach dieser Regel wurde auch ein weiterer Planet zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter vorhergesagt, und den galt es zu finden.

Franz Xaver von Zach organisierte von der neuen Sternwarte bei Gotha aus im Jahre 1800 die sogenannte „Himmelspolizey“: 24 Himmelszonen wurden von verschiedenen europäischen Sternwarten systematisch abgesucht, um den vermeintlich fehlenden Planeten aufzuspüren. Die von Piazzi entdeckte Ceres hatte den vorher berechneten Abstand von der Sonne. War der fehlende Planet also gefunden? Nein, denn 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 schon den vierten; sie wurden Pallas, Juno und Vesta getauft. Alle vier waren viel zu klein um dem bloßen Auge beobachtbar zu sein. Also doch kein Planet?

Aber woher kamen diese kleinen Objekte? Schnell schien klar, dass es Bruchstücke eines größeren Körpers sein müssen, der irgendwie zerstört wurde. Heute wissen wir, dass sich nie ein größerer Planet zwischen Mars und Jupiter gebildet hat. Die Theorie der Entstehung und frühen Entwicklung des Sonnensystems besagt, dass sich die Planeten nicht dort gebildet

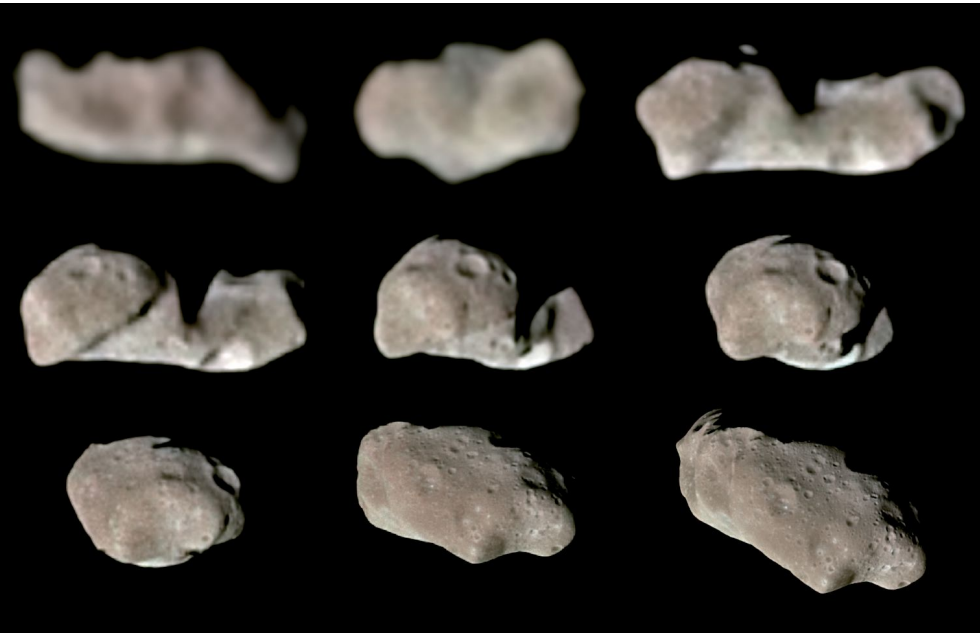
Die Titius-Bodesche Reihe ist eine simple mathematische Reihe, aus der sich recht genau die Abstände der Planeten zur Sonne ergeben – und aus der sich für die Region zwischen Mars und Jupiter ein „fehlender“ Planet postulieren ließ. Sie wurde von Johann Daniel Titius (1729–1796) und Johann Elert Bode (1747–1826) gegen Ende des 18. Jahrhunderts aufgestellt. Eine ähnlich einfache Reihe (Venus: kein Mond, Erde: ein Mond, Mars: zwei Monde, Jupiter: damals 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. Allerdings sind weder die Titius-Bodesche Reihe noch die Reihe zur Anzahl von Monden an den einzelnen Planeten universell gültig.



haben, wo wir sie heute finden, sondern dass sie nach ihrer Entstehung „gewandert“ sind. Der Grund hierfür waren die Wechselwirkungen der rasch wachsenden Planeten mit dem Rest an Gas der Akkretionsscheibe um die Sonne und gegenseitige Schwerkraftwirkung, besonders der großen Objekte Jupiter und Saturn. Die Titius-Bodesche Reihe hat demnach keine erkennbare physikalische

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

Bild linke Seite: Eine Montage von Asteroiden, die bisher aus der Nähe fotografiert wurden. Das Bild zeigt die Körper nicht mit ihrer korrekten relativen Albedo oder Helligkeit. Vesta und Ceres, beide um ein Vielfaches größer als Lutetia, sind nicht enthalten. (© Montage by Emily Lakdawalla for The Planetary Society. Data from NASA/JPL/JHUAPL/SwRI/UMD/JAXA/ESA/OSIRIS team. Processed by Emily Lakdawalla, Daniel Machacek, Ted Stryk, Gordan Ugarkovic / Thomas Appéré)



Bedeutung. Dennoch hat diese Zahlenreihe zur intensiven Suche nach Planeten geführt, was die ein wenig zufällige Entdeckung der Asteroiden zur Folge hatte.

Es dauerte fast 40 Jahre, bis noch mehr Asteroiden entdeckt wurden, dann aber kamen schnell weitere dazu. Ende des 19. Jahrhunderts waren schon mehr als 300 bekannt. Im Jahre 2024 kennen wir etwa 990.000 Asteroiden zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter im sogenannten Asteroiden-Hauptgürtel. Nach unseren heutigen Kenntnissen liegt die Herkunft der meisten Asteroiden in Kollisionen zwischen den ursprünglichen „Bausteinen“ der Planeten. Vor 4,56 Milliarden Jahren war die Sonne noch von einer rotierenden Scheibe aus Gas, Eis und Staub umgeben. Staubteilchen klumpten zu Staubflocken zusammen, die sich wieder zu größeren Teilchen vereinigten. Nach wenigen Millionen Jahren haben sich kilometergroße Objekte gebildet, die sogenannten Planetesimale, die Bausteine der Planeten. Kollisionen zwischen Planetesimalen und dem Restmaterial

Bild: Neun verschiedene Aufnahmen des Asteroiden Ida in Echtfarbe, aufgenommen 1993 während der Annäherung der Sonde *Galileo* an den Asteroiden. (© NASA/JPL)

der Gas- und Staubscheibe führten nach ungefähr 10 bis 100 Millionen Jahren zur Bildung von Planeten. Die Asteroiden und Kometen sind die Überreste dieses Prozesses.

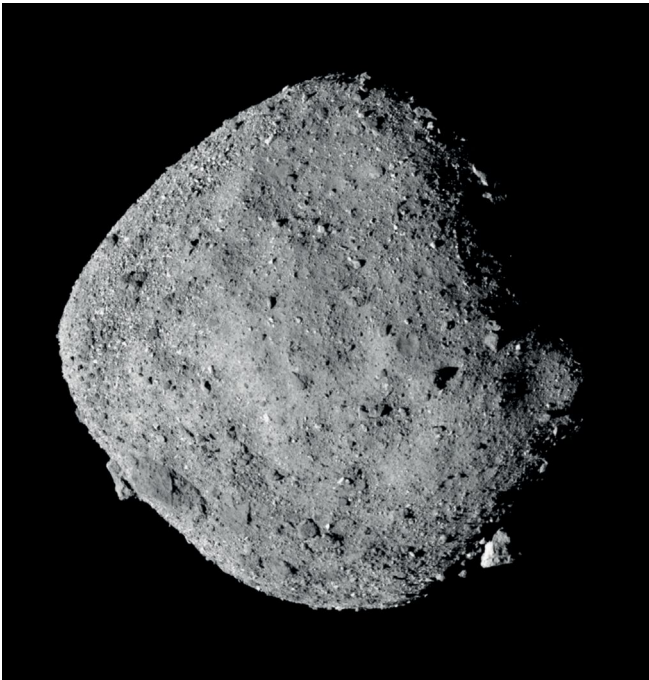
Demnach haben die Kleinkörper auch unterschiedliche chemische Zusammensetzungen. Je nachdem wo im Sonnensystem sie sich gebildet haben, können sie kohlenstoff-, silikat- oder auch wasserreich sein. Hinzu kommt, dass Asteroiden als Bruchstücke größerer Planetesimale auch das Innere eines vormals größeren Planetesimals sein können und zum Beispiel reich an Metallen sind, wie sie im Innersten eines differenzierten Körper zu finden sind. Man unterscheidet daher grob drei Klassen: metallische, steinige, und kohlenstoffreiche Asteroiden.

Die häufigen Zusammenstöße sind auch in der Struktur einiger Asteroiden erkennbar. Nicht nur zeigen Asteroiden eine Vielzahl an Einschlagskratern, sondern einige sind auch sogenannte „Schutthaufen-Asteroiden“ (engl.: rubble pile). Diese entstanden aus

Asteroiden, die durch eine Kollision komplett zerstört wurden und dessen Bruchstücke sich danach wieder gravitativ lose zusammengefunden haben.

Die Verteilung der Asteroiden im Asteroidengürtel wird vor allem vom Gravitationseinfluss des Riesenplaneten Jupiter bestimmt. In einigen Bereichen des Hauptgürtels findet man so gut wie keine Asteroiden, in anderen Zonen dagegen treten sie in großer Zahl auf. Die Abstände untereinander betragen aber fast immer mindestens eine Million Kilometer, so dass die Passage mit einer Raumsonde durch den Asteroidengürtel kein großes Problem darstellt. Denkbar ist, dass auch die beiden kleinen Marsmonde Phobos und Deimos einst zu den Asteroiden gehörten, dem Planeten Mars irgendwann zu nahe kamen und von ihm eingefangen wurden.

Einen kleinen Körper bezeichnet man ab etwa einen Meter Größe als Asteroiden. Noch kleinere Körper bezeichnet man als Meteoroiden oder kosmischen Staub. Ceres ist mit einem Durchmesser von etwa 950 Kilometern das größte Objekt im Asteroidengürtel und wurde mittlerweile als Zwergplanet (siehe Kapitel „Kuipergürtel und Zwergplaneten“) eingestuft.



Einige Asteroiden haben stark exzentrische Bahnen und kreuzen die Bahnen von Mars, Erde oder sogar des Merkur. 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 Asteroid (1036) Ganymed ist mit einem Durchmesser von 31 Kilometern der größte bekannte NEA. Der Einschlag eines solchen Objekts könnte je nach seiner Größe auf der Erde katastrophale und globale Auswirkungen haben. Modellrechnungen gehen davon aus, dass ein kilometergroßer NEA ein- bis zweimal in einer Million Jahren auf die Erde stürzt.

Bild: Der „Rubble-Pile“-Asteroid Bennu besteht aus Bruchstücken, die sich nach einer Kollision gravitativ zusammengefunden haben. Neben der Vielzahl an Gesteinsbrocken, sind auch jüngere Einschlagskrater zu erkennen. Die diamanten-ähnliche Form Bennus ist charakteristisch für derartige Schutthaufen-Asteroiden und deutet darauf hin, dass die Rotation des Körpers bei der Entstehung der Form mitgewirkt hat. (© NASA/Goddard/University of Arizona)

Suchprogramme für Asteroiden

Seit etwa 1980 wurden gezielte Suchprogramme vor allem an Sternwarten in den USA durchgeführt. Die Erfindung von Digitalkameras mit CCD-Detektoren und deren Verwendung in der Astronomie haben entscheidend zur Entdeckung einer großen Zahl von Asteroiden beigetragen. Nicht nur viele kleine lichtschwache Objekte konnten gefunden werden, sondern auch die Bearbeitung der Bilder konnte jetzt direkt nach der Aufnahme im Computer erfolgen. Ein Vergleich der gemessenen Positionen auf mehreren, zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommenen Bildern erlaubt es, Asteroiden als bewegte Objekte vor dem Fixsternhimmel zu identifizieren.

Im Jahr 2000 waren über 100.000 Asteroiden bekannt, im Jahr 2017, waren es schon über 700.000 und heute, 2024, kennen wir bereits fast eine Million Asteroiden. Dies führte zwangsläufig auch zur Entdeckung einer großen Zahl von erdnahen Asteroiden: zur Jahrtausendwende waren 1000 NEAs identifiziert, heute sind es bereits über 34.000. Auch das DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin beteiligt sich an den Suchprogrammen und arbeitet eng mit Sternwarten in Frankreich, Schweden und Italien zusammen.

Neben der Entdeckung liefern weltweite Beoberkungskampagnen Messdaten, die eine Bestimmung der Rotationseigenschaften und der Form der Körper erlauben. Messungen in verschiedenen Wellenlängen ermöglichen die Farbe der Oberfläche zu bestimmen und darüber hinaus auch Aussagen über die Oberflächenbeschaffenheit und die mineralogische Zusammensetzung zu treffen.

Raumsonden an Asteroiden

Die detailliertesten Untersuchungen von Asteroiden stammen allerdings von Raumfahrtmissionen. In den letzten Jahren konnten mehrere Asteroiden mit Raumsonden vor Ort inspiziert werden. Die Raumsonde *Galileo* flog auf ihrer Reise zum Jupiter 1991 und 1993 nahe an den beiden Asteroiden (951) Gaspra und (243) Ida vorbei und entdeckte dabei an dem 60 Kilometer langen Asteroiden Ida den über einen Kilometer großen Mond, Dactyl.

Was man schon von photometrischen Lichtkurven her wusste, wurde mit diesen ersten Nahaufnahmen bestätigt: Asteroiden sind unregelmäßig geformte, rotierende Felsbrocken, die von Kratern übersät sind und sogar kleine Monde haben können.

Im Juni 1997 besuchte die amerikanische Raumsonde *NEAR* (*Near-Earth Asteroid Rendezvous*, später in *NEAR-Shoemaker* umbenannt) auf ihrem Weg zum erdnahen Asteroiden Eros, den sie ab Februar 2000 ein Jahr lang umrundete, den etwa 50 Kilometer großen Asteroiden (253) Mathilde. 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. Mathildas Dichte ist nur 30 Prozent größer als die von Wasser, was auf eine unerwartet poröse Struktur hindeutet. Wahrscheinlich ist Mathilde eine lose Ansammlung von Schutt, dessen Bestandteile bei einer Kollision zweier Asteroiden freigesetzt wurden und nur durch ihre schwache Gravitationskräfte zusammengehalten werden. Heute nimmt man an, 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 war. Nach der Ankunft im Jahre 2005 lieferte *Hayabusa* detaillierte Bilder und wissenschaftliche Daten von Itokawa. Das etwa 350 Meter große Objekt hat die Form einer länglichen Kartoffel und sieht genau so aus, wie Asteroidenforscher sich einen „Schutthaufen“ vorgestellt hatten: eine Ansammlung von Kollisionsfragmenten aus einem früheren Zusammenstoß zwischen zwei Asteroiden. *Hayabusa* hat sogar die Oberfläche von Itokawa berührt und Staubpartikel gesammelt. Nach einer Reise von über sieben Jahren ist *Hayabusa* am 13. Juni 2010 zur Erde zurückgekehrt. Eine kleine Rückkehrkapsel, in der die Staubpartikel von der Oberfläche zur Erde gebracht wurden, konnte in Australien geborgen werden. Es ist die erste Rückkehr einer Sonde, die im Missionsverlauf Bodenkontakt mit einem Asteroiden hatte. Aus der Analyse der Staubpartikel konnten wichtige Informationen über die Mineralogie und Geschichte des Asteroiden abgeleitet werden.

Mit der *Hayabusa*-Mission wurde ein neues Kapitel der Asteroidenforschung eröffnet: die Sample-Return-Missionen. Dabei fliegt ein Raumschiff zu einem erdnahen und damit vergleichsweise einfach zu erreichenden Asteroiden, beobachtet ihn und sammelt dann Material von der Oberfläche ein, um es zur Erde zu bringen. So sendete die japanische Weltraumagentur JAXA am 3. Dezember 2014 die Mission *Hayabusa2* zum Asteroiden Ryugu, die am 5. Dezember 2020 insgesamt 5,4 Gramm Asteroidenmaterial zur Erde brachte. Die *OSIRIS-REX*-Mission der NASA, gestartet am 8. September 2016, lieferte kurz darauf am 24. Dezember 2023 über 121 Gramm Material des Asteroiden Bennu auf der Erde ab. Die Proben beider Missionen werden zurzeit

intensiv in speziell dafür eingerichteten Laboren untersucht, während die Raumschiffe nach der Probenlieferung zu weiteren Asteroidenbesuchen aufgebrochen sind.

Die Mission Dawn

Das Studium von Asteroiden ist auch deshalb von Bedeutung, weil sie in vielen Fällen die früheste Entwicklungsgeschichte unseres Sonnensystems widerspiegeln. Aus der Analyse ihrer Oberflächenmorphologie und Zusammensetzung lassen sich Erkenntnisse über die Anfangszeit des Sonnensystems gewinnen. Deshalb wurde die amerikanische Raumsonde *Dawn* (engl. für Morgendämmerung) 2007 auf eine Reise in den Asteroidengürtel geschickt, um zunächst den Asteroiden Vesta zu erforschen, mit etwa 500 Kilometern Durchmesser der drittgrößte und zweitschwerste Asteroid im Hauptgürtel. *Dawn* untersuchte Vesta in den Jahren 2011 und 2012 für 14 Monate und sendete aus drei verschiedenen Umlaufbahnen 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, der mit einer inneren Aufschmelzung einhergegangen sein könnte, konnten zwar nicht eindeutig identifiziert werden, aber



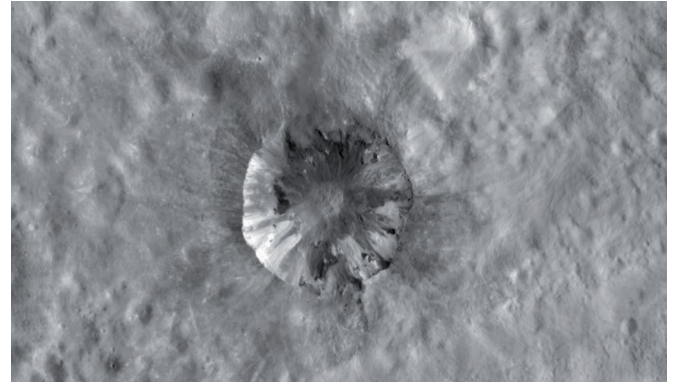
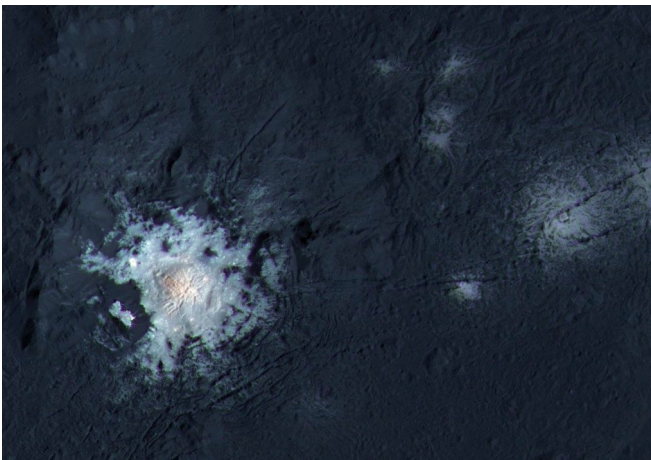
Bild: Furchenförmige Bruchstrukturen entlang des Äquators von Vesta, die mit dem Rheasilvia-Einschlag am Südpol entstanden sind.
(© NASA/JPL-Caltech/UCLA/IMP/DLR/IDA)

mehrere Aufwölbungen unter der Oberfläche lassen dies dennoch vermuten.

Die auffälligsten Landschaftsmerkmale auf Vesta sind die vielen Einschlagskrater, die sich seit der Entstehung des Asteroiden angesammelt haben. Aufgrund der fehlenden Atmosphäre verwittern diese kaum und werden nur durch weitere Einschläge erodiert. Einige dieser Krater zeigen an ihren Rändern und auf den Kraterböden dunkles und helles Material, das durch den Einschlagsprozess freigelegt wurde. Dieses Material scheint in Linsen unter der Oberfläche Vestas verteilt zu sein oder aber es wurde von dem Einschlagskörper mitgebracht. An einigen Stellen wird vermutet, dass das es sogar Wassereis in solchen Linsen unter der Oberfläche geben könnte.

Die größte, noch heute identifizierbare Kollision fand vor über einer Milliarde Jahren am Südpol Vestas statt. Dort schlug ein etwa 40 Kilometer großer Körper mit einer gewaltigen Wucht ein, sodass ein 500 Kilometer großes Einschlagsbecken entstand, das Rheasilvia genannt wird. Die Wucht dieses Einschlags erschütterte den gesamten Körper durch und durch und erzeugte neben einer riesigen Kratervertiefung auch Bruchstrukturen entlang des Äquators. Der Rheasilvia-Einschlag hätte Vesta beinahe zerstört.

Der Einschlag beförderte auch eine riesige Menge Material von der Oberfläche ins All. Diese Bruchstücke waren nun ebenfalls zu Asteroiden geworden und befinden sich auf einer ähnlichen Umlaufbahn wie Vesta selbst: Sie werden Vestoide oder die Vesta-Familie genannt.



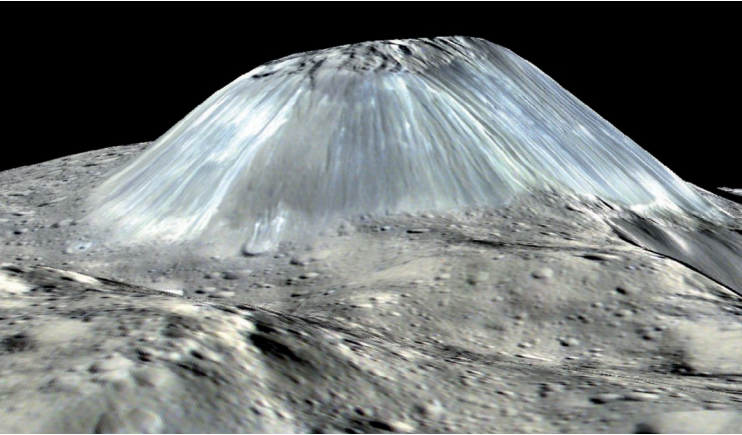
Durch gravitative Ablenkung von Planeten kann es passieren, dass sie zu NEAs werden und auf Bahnen gelangen, die die Erdumlaufbahn kreuzen, und als Meteoriten auf die Erde gelangen. Messungen mit Spektrometern bestätigten, dass eine bestimmte Gruppe von Meteoriten auf der Erde von Vesta und ihrer Familie stammen. Nach Abschluss der Experimente flog die Raumsonde *Dawn* zum Zwergplaneten Ceres weiter, den sie im April 2015 erreichte.

Der Zwergplanet Ceres, das größte Objekt im Asteroidengürtel, enthält etwa 25 Prozent der Masse des gesamten Asteroidengürtels und hat eine kugelförmige Gestalt. Trotzdem hat Ceres eine relativ geringe Dichte, was darauf hindeutet, dass der Körper zu größeren Teilen aus leichten Materialien wie Wassereis besteht.

Eine wichtige Entdeckung der Raumsonde *Dawn* sind mehr als 130 weißen Flecken, die sich in den meisten Fällen in oder in der Nähe von Einschlagskratern befinden und im starken Kontrast zur allgemeinen dunklen Oberfläche des Zwergplaneten stehen. Ein besonders auffälliger heller Fleck wurde im Krater Occator entdeckt. Hier scheint der Kraterboden kollabiert zu sein und dabei helles Material freigelegt zu haben. Eine mögliche Erklärung für die weißen Flecken könnte eine Schicht im Untergrund sein, die aus einer Mischung von Salzen und Wassereis besteht. Einschläge von Asteroiden und Kometen könnten die dunkle Oberfläche durchbrochen und Materialien aus der eisigen Schicht freigesetzt haben. Die Sublimation des nun gegenüber dem All exponierten Wassereises könnte zeitweise eine dünne Atmosphäre

Bild oben: Der Krater Cornelia auf Vesta mit auffällig hellem und dunklem Material am Kraterrand und im -inneren. Cornelia hat einen Durchmesser von 15 Kilometern. (© NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

Bild links: Die hellen Flecken im Krater Occator auf Ceres. Occator hat einen Durchmesser von etwa 92 Kilometern. (© NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)



erzeugen, deren Existenz tatsächlich anhand von Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop *Herschel* abgeleitet wurde.

Ceres zeigt damit im Vergleich zu Vesta eine relativ aktive Oberfläche. Dies wird an einem besonderen Beispiel deutlich: der 18 Kilometer breite Berg Ahuna Mons, der in der Nähe des Äquators sechs Kilometer aus seiner Umgebung herausragt, zeigt auf beeindruckende Weise, dass es Prozesse auf Ceres gibt, die auch heute noch Material aus dem Inneren des Körpers zur Oberfläche transportieren und vulkanähnlich ablagern. Zwar kann der Entstehungsprozess von Ahuna Mons, ähnlich wie bei der Entstehung von Bergen auf der Erde, nicht direkt beobachtet werden, aber die glatten und einschlagsfreien, steilen Flanken sind ein Zeichen für sein junges Alter und bisher einmalig im Asteroidengürtel.

Erdnahe Asteroiden – Fluch oder Segen?

Zunehmend gewinnen die „Near Earth Asteroids“ (NEAs) an Aufmerksamkeit, und dies nicht nur wegen der Einschlagsgefahr, sondern auch, weil bestimmte NEAs interessante Ziele für astronautische Raumfahrtmissionen darstellen. Die NASA betrachtet den Planeten Mars als ein mögliches langfristiges Ziel. Um notwendige technische Erfahrung mit lang andauernden und anspruchsvollen astronautischen Raumfahrtmissionen zu gewinnen, erachtet die NASA die erdnahen Asteroiden als geeignete Sprungbretter auf dem Weg zum Mars.

Bild oben: Der Berg Ahuna Mons auf Ceres ist eine relativ junge Struktur, was man an den glatten, kraterlosen Flanken erkennen kann.

(© NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

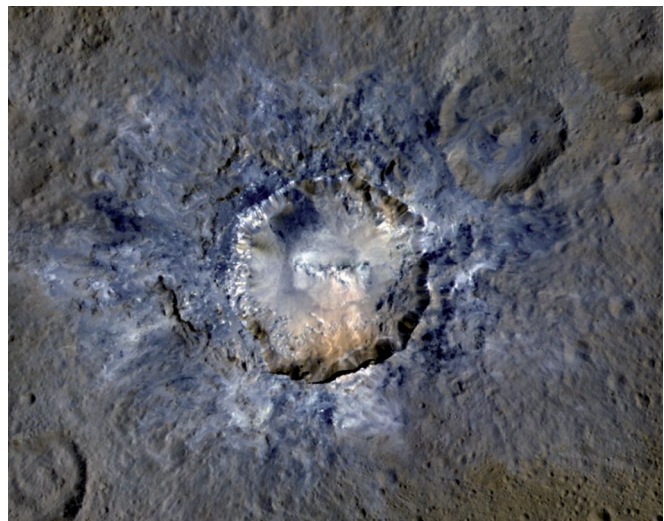
Bild rechts: Der Krater Haulani auf Ceres mit Zentralberg und abgerutschtem Material am Kraterrand, farbverstärkte Ansicht.

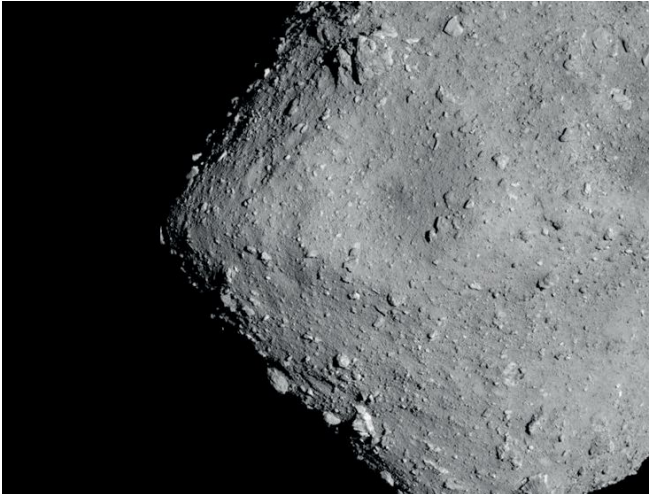
(© NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

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 gut landen und nach dem Besuch leicht wieder ins All starten, ohne große Vorräte an Treibstoff mitnehmen zu müssen. Solche Missionen könnten nicht nur zum Sammeln raumfahrtbezogener technischer Erfahrung dienen, sondern auch wertvolle wissenschaftliche Daten über die physikalischen 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. Einschläge von Asteroiden und Kometen haben die Biosphäre der Erde und den Verlauf der Evolution nachhaltig beeinflusst. Heute ist die Einschlagsrate viel geringer als vor vier Milliarden Jahren, als unser Planet noch in seiner Entwicklungsphase war. Allerdings ist der nächste große Impakt auf der Erde nur eine Frage der Zeit. Es ist daher ratsam zu untersuchen, welche Konsequenzen Einschläge von Asteroiden und Kometen für unsere Erde und andere Planeten haben können.

Es gibt immer wieder spekulative Meldungen über Asteroiden, die scheinbar Kurs auf die Erde genommen haben. So fliegt der 350 Meter große Asteroid Apophis am Freitag, dem 13. April 2029 mit einem Abstand von nur 31.750 Kilometer Höhe, also innerhalb der





geostationären Umlaufbahn, in der sich die meisten Telekommunikations- und Wettersatelliten befinden, an der Erde vorbei. Daher gibt es auch ernsthafte Überlegungen wie man einen bedrohlichen erdnahen Asteroiden mit Hilfe einer Weltraummission ablenken könnte. Die Methoden klingen abenteuerlich, zum Beispiel „kinetischer Impaktor“, „Gravitationsstraktor“ oder „Explosionsablenkung“. Sie werden von Weltraumagenturen wie der NASA, der ESA, und dem DLR untersucht und in Machbarkeitsstudien analysiert. So schlug am 26. September 2022 die NASA-Mission *Double Asteroid Redirection Test (DART)* auf dem Mond Dimorphos des erdnahen Asteroiden Didymos ein. Durch den Einschlag wurde die Umlaufbahn des Mondes um Didymos um 32 Minuten verkürzt und die Mission zeigte so das Potenzial von Einschlägen als Asteroidenabwehr. Im Oktober 2024 wird die ESA eine Folgemission, *Hera*, zum Didymos-System schicken, um die Einschlagsstelle und deren Auswirkungen auf der Oberfläche von Dimorphos zu untersuchen.

Eine sehr wichtige Voraussetzung für den Erfolg einer Abwehrmission sind Kenntnisse der physikalischen Eigenschaften von NEAs, wie Zusammensetzung, Dichte und innere Struktur. Informationen über NEAs können mittels Teleskopbeobachtungen von der Erde aus oder mit Hilfe von Weltraumsonden gewonnen werden.

In der Zukunft könnten erdnahe Asteroiden aus einem anderen Grund an Wichtigkeit gewinnen. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass Wasser und Metalle signifikante Bestandteile von Asteroiden sind. Durch eine Spaltung des Wassermoleküls können Wasserstoff und Sauerstoff gewonnen werden, Elemente die als Raketentreibstoff dienen können. Wasser und Sauerstoff sind natürlich auch für

astronautische Aktivitäten im Weltall unerlässlich. Asteroiden enthalten Eisen und Nickel, die für den zukünftigen Bau von Strukturen wie Weltraumstationen, benutzt werden könnten. Da ein verhältnismäßig kleiner erdnahe Asteroid im Vergleich zur Erde kaum Schwerkraft hat, könnte es für zukünftige Generationen rentabler werden, gewisse Materialien für Weltraumaktivitäten von NEAs zu gewinnen, anstatt sie von der Erde aus mit teuren Raketenstarts ins All zu befördern. Auch viel wertvollere Metalle, wie beispielsweise Platin, die für unsere moderne Industrie immer wichtiger werden, sind auf erdnahen Asteroiden vorhanden. Im Gegensatz zu Vorkommen auf der Erde, die nur in wenigen, teilweise tiefen, Gruben abgebaut und schwer zu verarbeiten sind, könnten wichtige Metalle aus Mineralen gewonnen werden, die einfach auf der Oberfläche eines erdnahen Asteroiden liegen. Für diese Überlegungen wurde der englische Begriff „in Situ Resource Utilization“ (ISRU) geschaffen, etwa „Nutzung von Ressourcen vor-Ort“.

Bilder: Seitenansicht des etwa 950 m großen Asteroiden Ryugu (links) und das Oberflächengestein, auch Regolith genannt, in höherer Auflösung (rechts). Der äquatornahe Urashima-Krater im linken Bild ist etwa 290 m im Durchmesser und ist der größte Krater auf Ryugu. Der vorne mittig liegende Stein im rechten Bild ist etwa sieben Meter groß, wobei durch die Perspektive die Auflösung nach hinten hin abnimmt. Es sind kaum glatte Stellen zu erkennen, was die Forscher zunächst überraschte, da sie auf das Fehlen von Staub hindeuten. Man vermutet nun, dass der Staub entweder durch Vibrationen von Einschlägen ins Innere des Asteroiden gelangt ist oder von der Oberfläche durch verschiedene Prozesse wie Einschläge oder elektrostatische Aufladung entfernt wird. (links: © JAXA, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Chiba Institute of Technology, Meiji University, University of Aizu and AIST University of Aizu, Kobe University, Auburn University, JAXA; rechts: © DLR/CNES/MASCOT)

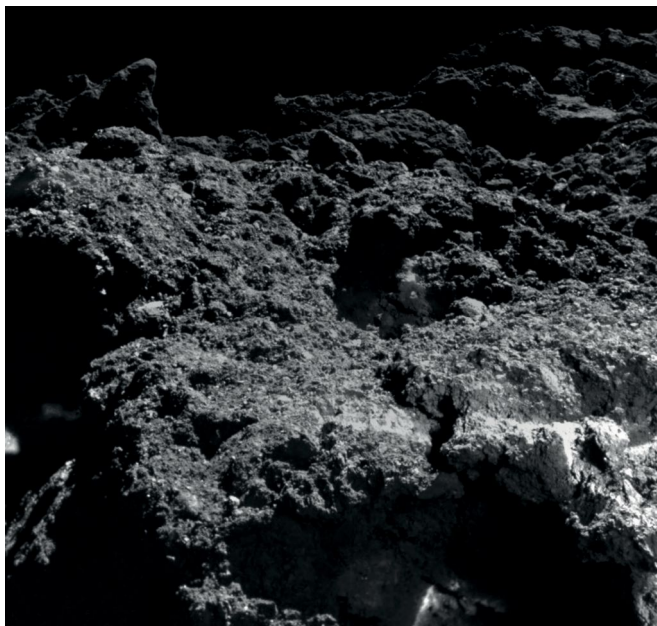
Die Hayabusa2-Mission

Nach ihrer Vorgängermission *Hayabusa* (japanisch für „Falke“) zum Asteroiden Itokawa sollte auch *Hayabusa2* Proben von der Oberfläche eines Asteroiden einsammeln und zur Erde bringen. Als Ziel diente der erdnahe Asteroid Ryugu, ein „Rubble Pile“-Asteroid von etwa 950 m Größe. Ryugu, benannt nach dem Unterwasserpalast des Drachenkönigs Watatsumi basierend auf einer japanischen Legende, ist ein Asteroid, dessen Material einst mit flüssigem Wasser in Berührung kam. Auch wenn die Oberfläche heute trocken erscheint, bestätigt die Mineralogie des Körpers die frühere Existenz von Wasser. Das macht Ryugu besonders interessant, da auch durch Körper wie ihn, einst Wasser zur Erde geliefert worden sein könnte.

Ryugu hat eine diamantähnliche Struktur, die darauf hindeutet, dass der Asteroid aus Geröll aufgebaut ist, der gravitativ zusammengehalten wird und dessen Rotation Fliehkräfte erzeugt, die einen äquatorialen Gürtel formen. Einige Krater sind auf der Oberfläche zu erkennen, doch sehen diese weniger eindeutig aus als auf größeren und gefestigten Körpern, wie zum Beispiel dem Mond. Das überwiegende Erscheinungsbild der Oberfläche von Ryugu ist eine Ansammlung von

größeren und kleineren Steinen, wobei sich diese in glatte und raue Steine unterteilen lassen. Es ist möglich, dass diese unterschiedlichen Strukturen von zwei unterschiedlichen Ausgangskörpern oder aus unterschiedlichen Schichten des Mutterkörpers stammen, bevor dieser durch einen Einschlag komplett zerstört wurde und sich aus den Bruchstücken anschließend Ryugu bildete. Entgegen vorheriger Annahmen ist die Oberfläche allerdings kaum mit Staub bedeckt. Dieser ist vermutlich in das Innere des Asteroiden transportiert worden oder von der Oberfläche durch elektrostatische Kräfte oder Einschläge entfernt worden. Auch die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht auf Ryugus Oberfläche sind extrem und schwanken ungefähr zwischen -70 Grad Celsius in der Nacht und $+40$ Grad Celsius am Tag. Dies lässt das Material mit der Zeit ermüden und ist vermutlich ein Hauptgrund für die Verwitterung der Gesteine auf Ryugu.

Bilder unten: Beide Bilder zeigen die *MASCOT*-Landestelle auf der Oberfläche von Ryugu, aufgenommen mit der Landerkamera. Beide Bilder decken etwa einen 15 cm großen Ausschnitt ab. Das linke Bild zeigt die Szene bei Tageslicht, im rechten Bild ist die gleiche Szene bei Nacht mit künstlicher Beleuchtung durch den Lander zu sehen. Im linken Bild ist die Reflexion des Landers als heller Streifen zu erkennen, ebenso wie helle Einschlüsse im Material, wie man sie auch von einigen Meteoriten auf der Erde kennt. Die Oberfläche ist sehr rau und staubfrei. (© DLR/CNES/MASCOT/MasCam)





Die *Hayabusa2*-Mission brach nicht nur auf, um Ryugu zu untersuchen und Proben zur Erde zu bringen, sondern war auch mit zahlreichen Instrumenten und Experimenten ausgestattet. Neben den „klassischen“ Orbiter-Fernerkundungsinstrumenten wie Kameras, Spektrometern und einem Laseraltimeter, besaß *Hayabusa2* auch ein Einschlagsexperiment und insgesamt drei Lander, die die Oberfläche aus direkter Nähe beobachteten. Einer dieser Lander, der etwa schuhkartongroße deutsch-französische *MASCOT*, war wiederum mit vier Instrumenten bestückt: einer Kamera, die auch verschiedene Farben aufnehmen kann, ein Radiometer, um das thermische Umfeld auf der Oberfläche zu erkunden, ein Spektrometer für die Analyse der Mineralogie und ein Magnetometer. *MASCOT* wurde am 3. Oktober 2018 erfolgreich auf der Oberfläche von Ryugu abgesetzt und untersuchte die Oberfläche an drei aufeinanderfolgenden Ryugu-Tagen (insgesamt fast 17 Stunden, da ein Tag auf Ryugu nur etwa sieben Stunden 36 Minuten dauert) bevor die Batterie aufgebraucht war. Wegen der geringen gravitativen Anziehungskraft Ryugus benötigte der Lander fast sieben Minuten um von seiner Abwurfhöhe von 41 Metern auf der Oberfläche anzukommen.

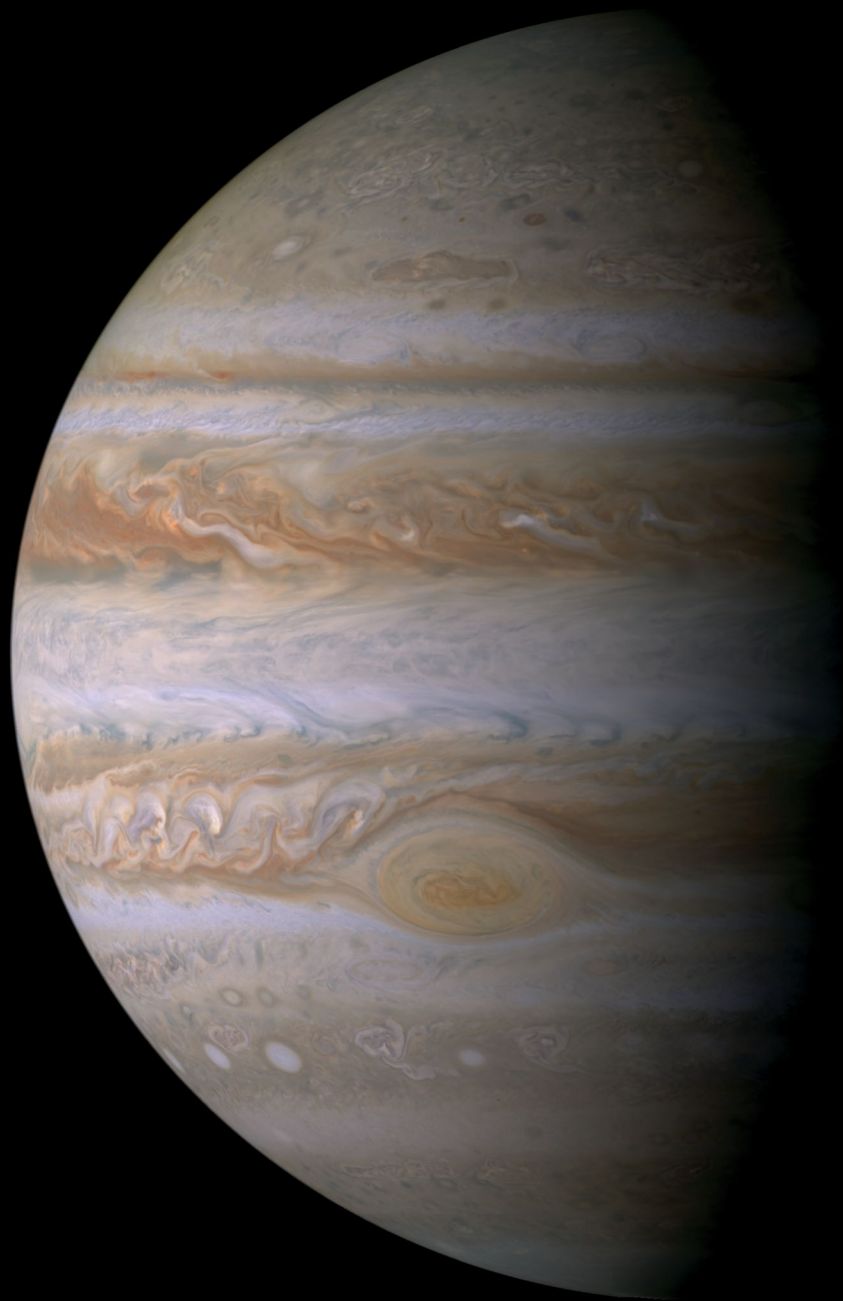
Vor Ort war interessantes Gestein in *MASCOTs* Blickfeld: Innerhalb des sehr dunkel erscheinenden Materials gab es helle Einschlüsse und raue Oberflächen. Diese Textur war zwar bereits von Meteoroidenfunden bekannt, allerdings erwies sich Ryugus Material als sehr viel weicher als das aller bekannten Meteoroiden. Ein Gestein solch fragiler Natur würde einen Eintritt in die Erdatmosphäre nicht überstehen und so gibt es zwar Meteoriten, die dem Gestein Ryugus chemisch und



mineralogisch ähnlich sind, aber mechanisch sind diese Meteoriten in der Regel stabiler. Daher war es umso wichtiger, Proben von der Oberfläche einzusammeln und sie zur Erde zu bringen. Dies tat *Hayabusa2* an zwei Stellen. Zunächst sammelte die Mission am 22. Februar 2019 Material an einer äquatornahen Stelle. Am 5. April 2019 schoss sie dann ein zwei Kilogramm schweres Projektil mit 7200 Kilometern pro Stunde auf Ryugu und erzeugte so einen etwa zehn Meter großen Krater. Am 11. Juli 2019 entnahm *Hayabusa2* dann an genau dieser Stelle eine zweite Probe, die aufgrund des Einschlages frisches, vormals unter der Oberfläche liegendes Material enthalten sollte. Nach der erfolgreichen Beobachtungskampagnen, Landerlieferungen und Probennahmen brach *Hayabusa2* am 13. November 2019 zurück zur Erde auf, wo sie am 5. Dezember 2020 die insgesamt 5,4 Gramm Material, die sie auf Ryugu gesammelt hatte, über der Woomera-Wüste in Australien abwarf.

In speziell dafür eingerichteten Laboren wurden seitdem die Proben untersucht. Sie zeigen, dass Ryugu ein außergewöhnlich primitiver Körper ist, dessen Zusammensetzung den ursprünglichsten chemischen Bestandteilen in unserem Sonnensystem entspricht. Seine Zusammensetzung beinhaltet aber bereits wichtige Bestandteile, wie organische Materialien und Wasser, für die Entwicklung von Leben unabdingbar sind.

Bilder: Die Proben, die von *Hayabusa2* zur Erde gebracht worden. Links: Einer der Probenbehälter mit Gestein von Ryugu. Der Behälter hat einen Durchmesser von zwei Zentimetern. Rechts: A0008, eines der größten gesammelten Körner von Ryugu. (© *Hayabusa2*, Ryugu Sample Curatorial Data-set, <https://doi.org/10.17597/IISAS.DARTS/CUR-Ryugu-description>)



JUPITER

Jupiter ist der größte Planet unseres Sonnensystems. Mit einer Masse von einem Tausendstel der Sonne und einer sonnenähnlichen Zusammensetzung wäre dieser Planet bei noch größerer Masse – Berechnungen gehen vom 75fachen der gegenwärtigen Masse aus – 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.

Knapp zwölf Jahre benötigt Jupiter für einen Umlauf um die Sonne. Pro Sekunde legt er dabei durchschnittlich 13 Kilometer auf seiner Bahn zurück. Im Jupiter ist 318mal so viel Masse wie in der Erde vereint. Damit beeinflusst der Riesenplanet die Bahnen aller anderen Körper im Sonnensystem – dieser Effekt muss bei genauen Bahnrechnungen von planetaren Körpern und Raumsonden immer berücksichtigt werden. Auch lässt der Gravitationseinfluss zum Beispiel Lücken im Asteroidengürtel entstehen. Er bringt Kometen von ihrer ursprünglichen Bahn ab und zieht manche von ihnen so stark an, dass sie als extrem kurzperiodische Kometen die „Jupiterfamilie“ bilden oder mit hoher Geschwindigkeit in die Gashölle des Planeten stürzen. Auch nutzen Raumsonden sein starkes Gravitationsfeld, um auf dem Weg ins äußere Sonnensystem zu beschleunigen und ihren Kurs merklich zu ändern (Beispiele sind *Pioneer*, *Voyager*, *Ulysses*, *Cassini-Huygens* und *New Horizons*). Jupiters äquatorialer Radius beträgt 71.492 Kilometer, eine Rotation dauert 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 66.854 Kilometer und ist damit etwa sechs Prozent kleiner als der Radius am Äquator. Die

Hauptbestandteile des Planeten sind, wie in der Sonne, Wasserstoff und Helium, was seine vergleichsweise geringe mittlere Dichte von 1330 kg/m³ erklärt.

Am Äquator treten Windgeschwindigkeiten von 540 Kilometern pro Stunde auf. Der markante Große Rote Fleck ist ein isoliertes, gigantisches Wirbelsturmgebiet mit einem Durchmesser von über 16.000 Kilometern, das relativ zur Bewegung anderer Atmosphärenstrukturen in der Umgebung zurückbleibt. Im Gegensatz zu kleineren Wirbeln ist der Große Rote Fleck seit seiner ersten Erwähnung vor 350 Jahren stabil, ist allerdings dynamisch und schrumpft seit 2012 um 900 Kilometer pro Jahr. 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 Mission *Galileo* gebracht, von deren Orbiter aus im Dezember

1995 ein Eintrittskörper mit sechs wissenschaftlichen Experimenten an Bord in die kalte Atmosphäre des Planeten eingetaucht ist. Die obersten Schichten der dichten Atmosphäre enthalten vorwiegend Wasserstoff (H₂), Helium (He), Ammoniak-Eiskristalle (NH₃), Ammoniumhydrogensulfid (NH₄HS) sowie Wassereis und -tröpfchen (H₂O). Der Planet besteht zu einem großen Teil aus einem molekularen Wasserstoff-Helium-Gemisch. Aufgrund des hohen Drucks geht der Wasserstoff ab einer Tiefe von etwa 20.000 Kilometern in einen sogenannten Art metallischen Zustand über. Dabei lösen sich die Elektronen von ihrem Atomkern und werden frei beweglich. Dieser elektrisch sehr gut leitende und um den Jupiterkern rotierende metallische Wasserstoff dürfte die Ursache für das enorm starke Magnetfeld Jupiters sein. Im Zentrum

In Zahlen

Jupiter	Masse	1,8987 x 10 ²⁷ kg
	Radius (äquatorial)	71.492 km
	Radius (polar)	66.854 km
	Dichte	1330 kg/m ³
	Rotationsperiode	9,925 h
	Orbitalperiode	11,86 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	778,4 x 10 ⁶ km (5,2 AE)
Io	Masse	8,94 x 10 ²² kg
	Mittlerer Radius	1822,7 km
	Dichte	3528 kg/m ³
	Orbitalperiode	1,77 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	421.800 km
Europa	Masse	4,88 x 10 ²² kg
	Radius	1560,8 km
	Dichte	3013 kg/m ³
	Orbitalperiode	3,55 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	670.900 km

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



des Planeten befindet sich vermutlich ein Gesteinskern, der 12 bis 45 Erdmassen in sich vereint. Dort erreichen die Temperaturen 36.000 Grad Celsius und es herrschen Drücke von mehr als 30 Millionen bar.

Nach der NASA-Raumsonde *Galileo*, die sich von Dezember 1995 bis September 2003 in einer Umlaufbahn um Jupiter aufhielt, erreichte die NASA-Mission *Juno* am 4. Juli 2016 als zweiter Orbiter um den Riesenplaneten ihr Ziel. Sie umkreiste Jupiter auf einer langgestreckten polaren Bahn, die im jupiternächsten Punkt mit ihren Messinstrumenten bis auf 3500

Kilometer an die Wolkengrenze herankommt. *Juno* führte anhand von 35 nahen Vorbeiflügen eine detaillierte Untersuchung des inneren Aufbaus des Riesenplaneten und seiner polaren Magnetosphäre durch. Entgegen vorheriger Modellannahmen zeigen die Ergebnisse, dass Jupiter einen sehr großen, nicht klar von den darüber liegenden Schichten abgegrenzten Kern besitzt. Das Magnetfeld Jupiters erweist sich als stärker und weitaus komplexer als aus den bisher vorliegenden Daten angenommen. Zudem zeigt die Jupiteratmosphäre in Bezug auf Temperatur und Zusammensetzung starke Zonierungen, die neue Modelle der Dynamik der Jupiteratmosphäre erfordern. Durch Messungen des polaren Magnetfelds und Daten der Partikeldetektoren wurde deutlich, dass die Erzeugung des Polarlichts auf Jupiter deutliche Unterschiede zu den entsprechenden Prozessen auf der Erde aufweist.

Die Jupitermonde

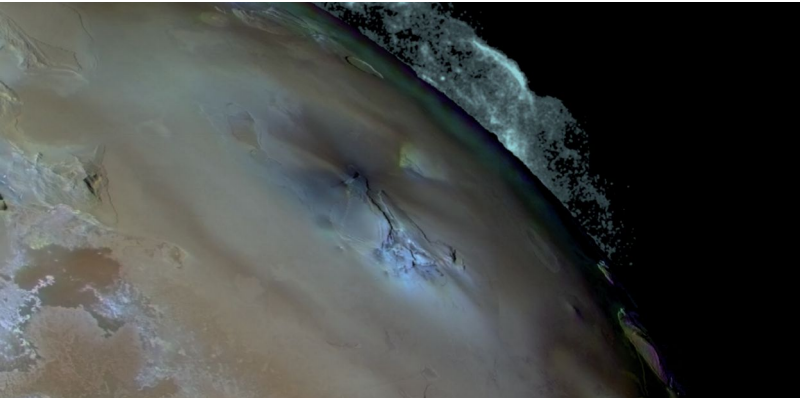
Derzeit sind 95 Monde bekannt, die Jupiter umrunden. Die vier größten Monde Io, Europa, Ganymed und Callisto wurden im Januar 1610 von Galileo Galilei in Padua entdeckt. Sie werden ihm zu Ehren „Galileische“ Monde genannt. Galileis Erkenntnis, dass es Trabanten gibt, die um einen größeren Körper kreisen, bestärkte ihn in der Ansicht, dass die 67 Jahre zuvor von Nikolaus Kopernikus veröffentlichte Behauptung, dass nicht die Erde im Zentrum des Universums oder mindestens des damals bekannten Sonnensystems stehen könne, sondern die Sonne den Mittelpunkt des Planetensystems bildet, korrekt ist – und die Erde sie als einer von damals sechs bekannten Planeten umkreist.

Io ist der Jupiter am nächsten gelegene der Galileischen Monde. Volumen, Größe und Dichte sind dem Erdmond ähnlich. *Io* umläuft Jupiter in einem Abstand von weniger als sechs Jupiterradien. Infolge Jupiters enormer Anziehungskraft entsteht durch Gezeitenwirkung Reibungswärme im Inneren von *Io*. Sie ist um ein Vielfaches stärker als

In Zahlen

Ganymed	Masse	14,82 x 10 ²² kg
	Radius	2631,2 km
	Dichte	1942 kg/m ³
	Orbitalperiode	7,16 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Jupiter	1.070.660 km
Callisto	Masse	10,76 x 10 ²² kg
	Radius	2410,3 km
	Dichte	1834 kg/m 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)



die Wirkung der Erde auf das Innere des Mondes (oder des Mondes auf die Wassermassen der Erde). Aufgrund der gravitativen Wechselwirkung einerseits mit Jupiter und andererseits mit den Monden Europa und Ganymed (in einer sogenannten Laplace-Resonanz) wird Io auf eine leicht elliptische Bahn gezwungen, welche die Gezeitenwirkung noch verstärkt und diese darüber hinaus über lange astronomische Zeiträume aufrecht erhält. Dies hat eine sehr intensive vulkanische Aktivität zur Folge und führt auch dazu, dass Io im Gegensatz zu seinen drei äußeren Nachbarn keine Eiskruste hat. Während der *Voyager*-Vorbeiflüge und der Beobachtungen durch *Galileo* und *Cassini* wurden auf Io 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 bis zu 1300 Grad Celsius heiße Lava mehrere hundert Kilometer hoch, die dann großflächig auf die Oberfläche niedergeht. Infolge der Bewegung des Mondes durch das starke Magnetfeld Jupiters werden elektrische Ströme induziert und dadurch große Mengen der vulkanischen Auswurfprodukte ionisiert. Diese elektrisch geladenen Eruptionsprodukte werden zum Teil ins Weltall abgegeben, aber auch von der Magnetosphäre Jupiters aufgenommen

Bild oben: Ausbruch des Vulkans Pele auf Io. Der Auswurf reicht bis in eine Höhe von 300 Kilometern. (© NASA/JPL/USGS)

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



und auf der entgegen der Bewegungsrichtung gelegenen „Heckseite“ des Nachbarmondes Europa abgelagert, die auffallend dunkler ist als die „Bugseite“.

Europa ist der zweite der Galileischen Monde und etwas kleiner als der Erdmond. Seine Oberfläche weist kaum Einschlagskrater auf und ist wie bei Io vergleichsweise geologisch jung. Die obersten Schichten bestehen vor allem aus Wassereis, das Gesteins- und Mineralfragmente und möglicherweise auch Salze enthält. Die Höhenunterschiede auf Europa sind gering. Dennoch zeigt die Eiskruste bemerkenswerte Strukturen. Am markantesten sind langgezogene Bergrücken, 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 sogenannten Doppelrücken (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 beweglichem (plastischem oder sogar teilweise flüssigem) Untergrund durch tektonische Kräfte gegeneinander verschoben haben und in eine raue, hügelige Umgebung eingebettet sind. Diese Gebiete werden als chaotische Gebiete (chaotic terrain) bezeichnet. Sie erinnern an irdische Eisberge, die zerbrochen, im Meer drifteten und dann festgefroren sind. Die wenigen Einschlagskrater auf Europa sind, verglichen mit Kratern auf dem Erdmond, verhältnismäßig flach und haben alle einen Durchmesser von weniger als 50 Kilometern.

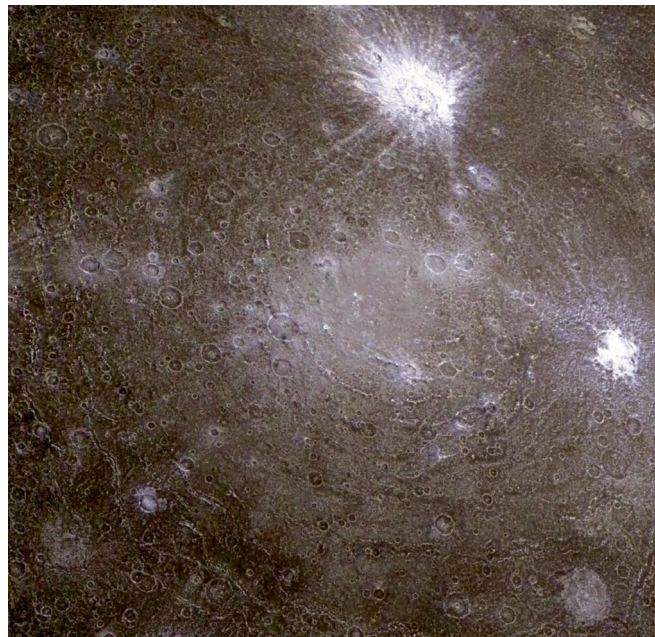
Unter der Eiskruste existiert ein Wasserozean, der bis zu 170 Kilometer mächtig sein könnte. Die Wechselwirkung von im Ozean gelösten,

elektrisch leitenden Salzen mit dem äußeren Magnetfeld Jupiters sind ein deutlicher Hinweis auf diesen Ozean. Aufgrund des Ozeans, dessen Wassermenge die der irdischen Meere deutlich übertreffen dürfte, ist Europa ein bevorzugtes Ziel bei der Suche nach potentiellen Lebensräumen von Organismen außerhalb der Erde.

Ganymed, der dritte der Galileischen Monde, ist mit einem Durchmesser von 5265 Kilometern der größte Mond des Sonnensystems. Er hat eine niedrigere Dichte (1942 kg/m^3) als Europa und Io, was darauf hinweist, dass er zu einem großen Teil aus Wassereis besteht, welches mehr als die Hälfte seines Volumens ausmacht. Nahe Vorbeiflüge der *Galileo*-Sonde an Ganymed bestätigten einen stark differenzierten Schalenbau mit einem Kern aus Eisen oder Eisensulfid, einem Gesteinsmantel und darüber einer Eiskruste. Zusätzlich konnte ein Magnetfeld nachgewiesen werden, das im Kern von Ganymed selbst erzeugt wird. Damit ist Ganymed der einzige Mond im Sonnensystem mit einem eigenen Magnetfeld.

Auf der Oberfläche befinden sich alte, dunkle, kraterreiche Gebiete, die etwa ein Drittel der Oberfläche einnehmen. Dort gibt es zahlreiche gewundene, parallel und konzentrisch verlaufende Furchen, die einige Kilometer breit sein können. Sie stellen die Überreste alter, stark abgetragener großer Ringbecken dar, die in der Frühzeit des Mondes durch Einschläge großer Kometen oder Asteroiden entstanden sind. Zwischen den dunklen Gebieten befinden sich helle, gefurchte Gebiete, das sogenannte grooved terrain, die etwa zwei Drittel der Oberfläche bedecken. Diese hellen Gebiete entstanden durch das Wirken gezeitenbedingter tektonischer Kräfte.

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 ein jüngerer Alter hin.



Die Kraterformen auf Ganymed unterscheiden sich wesentlich von Kratern auf der Mondoberfläche. Schüsselförmige Krater sind am häufigsten, während Zentralberge seltener auftreten. Insgesamt sind die Krater auf Ganymed wesentlich flacher als die Mondkrater. Eine Sonderform sind helle, pfannkuchenähnliche, fast kreisrunde und sehr flache Gebilde: In Anlehnung an antike, mehrfach beschriebene Manuskripte auf Papyrus werden diese eingeebneten Einschlagsstrukturen Palimpseste genannt. Die flachere Ausbildung der Krater auf Ganymed ist auf die höhere Mobilität des Eises im Vergleich zu spröderem Gestein zurückzuführen – über längere Zeiträume ebnet sich das Profil der Krater allmählich ein.

Callisto, der äußerste der vier Galileischen Monde, hat einen Durchmesser von 4819 Kilometern und ist damit nur wenig kleiner als der Planet Merkur. Er hat mit 1834 kg/m^3 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. Auf der geologisch nur wenig entwickelten Oberfläche gibt es mehr Krater als auf den anderen drei Galileischen Monden. So blieben einige große, sehr alte Einschlagsbecken erhalten. Häufig sind diese von mehreren konzentrischen und furchenförmigen Ringwällen

Bild links: Ganymed mit Galileo Regio, dem dunklen Gebiet rechts oben und dem angrenzenden, hellen, jüngeren Gebiet Uruk Sulcus. (© NASA/JPL)

Bild oben: Das alte Multiringbecken Asgard auf Callisto. (© NASA/JPL)

umgeben. Valhalla ist mit einem Gesamtdurchmesser aller „Ringe“ von 4500 Kilometern das größte dieser Becken. In Bildern mit hoher Auflösung erkennt man überall auf der Oberfläche Callistos eine dunkle, pulverartige Deckschicht. Sie entstand möglicherweise durch einen Abtragungsprozess, wobei leichtflüchtigere Bestandteile der Eiskruste Callistos, z.B. gefrorenes Kohlendioxid, durch die Sonneneinstrahlung verdampften, so dass sich ein dunklerer Rückstand aus anderen Bestandteilen wie Kohlenstoffverbindungen oder Silikaten auf der Oberfläche anreichern konnte. Eine alternative Hypothese nimmt an, dass Material einer ehemals viel größeren Population von äußeren (so genannten irregulären) Monden auf Callisto herabgeregnet ist und eine Deckschicht von dutzenden Metern Mächtigkeit erzeugt hat. 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 von Callisto wie bei den beiden anderen großen Eismonden Ozeane existieren könnten. Im Vergleich zu Europas Ozean lägen diese jedoch deutlich tiefer unterhalb einer Eisschicht von etwa 100 Kilometern.

Die NASA Raumsonde *Juno* führte innerhalb ihrer verlängerten Missionsphase zwischen Juni 2021 und Februar 2024 einen Ganymed-Vorbeiflug in 1038 km Höhe durch, einen Europa-Vorbeiflug in 352 km Höhe, sowie vier Io-Vorbeiflüge, zwei davon in einer Höhe von 1500 km. *Juno* wird voraussichtlich bis zum September 2025 Daten im Jupitersystem sammeln. Dabei steht vor allem die Magnetosphäre Jupiters im Vordergrund. Weitere nahe Vorbeiflüge an den Monden wird es nicht geben.

Zum Jupitersystem gehören außerdem die Monde Metis, Adrastea, Amalthea und Thebe, die innerhalb der Io-Bahn um Jupiter kreisen. Mit Durchmessern zwischen 16 und 170 Kilometern sind diese Objekte vergleichsweise klein, außerdem sind sie nicht kugelförmig, sondern unregelmäßig geformt. Die Bahnen von Metis und Adrastea liegen nur etwa 1000 Kilometer voneinander entfernt, ihre enormen Bahngeschwindigkeiten von 31,5 Kilometer pro Sekunde übertreffen sogar die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne. Weit außerhalb der Galileischen Monde wird Jupiter von den zahlreichen sogenannten „irregulären“ Monden umkreist, von denen zurzeit 87 bekannt sind und die fast alle nur einen Kilometer bis wenige Kilometer groß sind. Sie werden als „irreguläre Monde“ bezeichnet, weil ihre Vorläufer-Objekte nicht mit Jupiter gemeinsam entstanden sind, sondern eingefangen wurden, also „irreguläre“ Mitglieder des Jupitersystem wurden. Die Bahnen sind hoch elliptisch und stark gegen die Äquatorebene Jupiters geneigt;

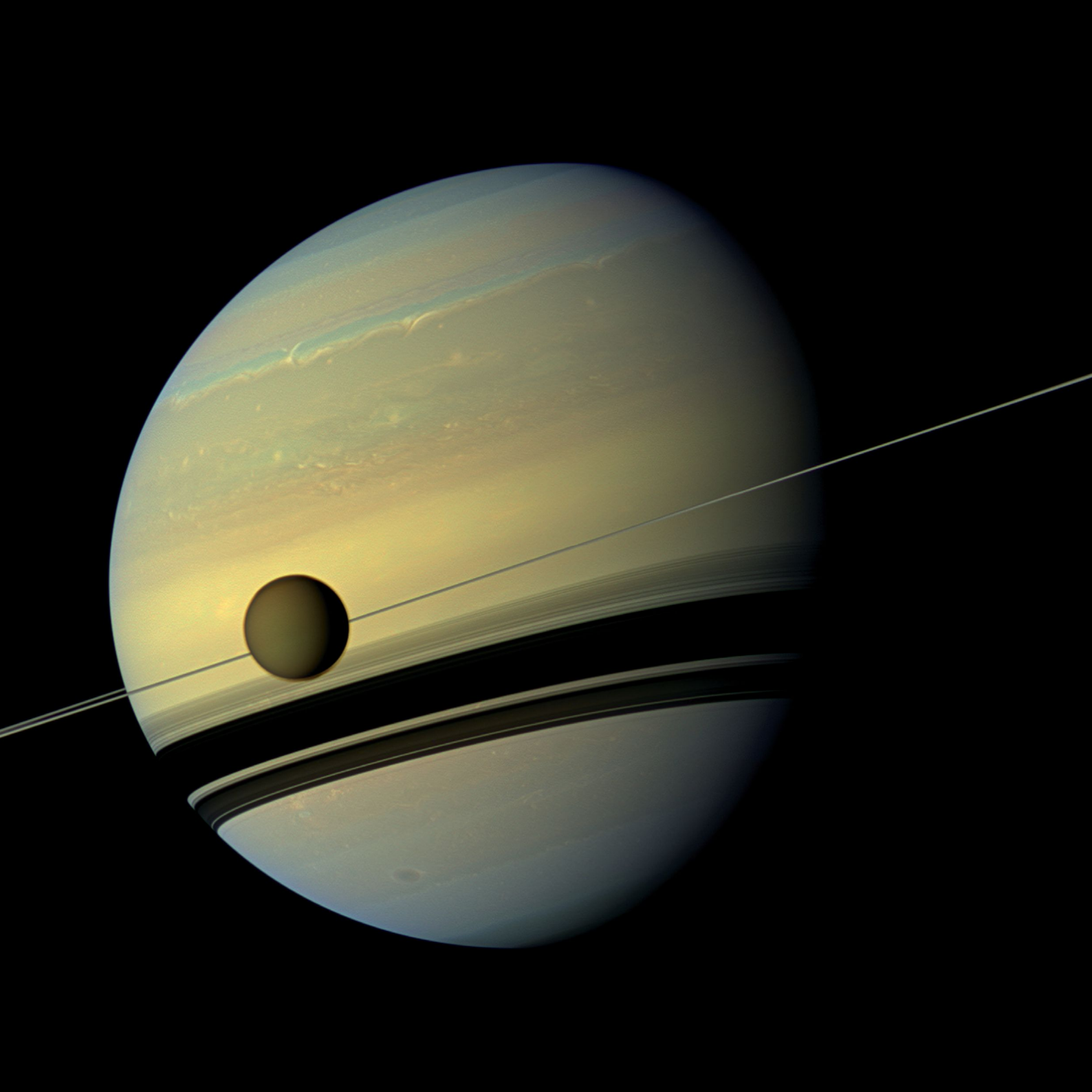
mehr als fünf Sechstel der bekannten Objekte umkreisen Jupiter sogar „retrograd“, also in entgegengesetzter Richtung zur üblichen Bewegungsrichtung der „regulären“ Monde und der Planeten. Die Trabanten mit Durchmessern über 10 Kilometer heißen Himalia, Elara, Pasiphae, Sinope, Lysithea, Carme, Ananke, Leda, Callirrhoe und Themisto.

Ringsystem

Jupiter besitzt außerdem in seiner Äquatorebene ein Ringsystem. Es ist extrem dunkel und wurde erst beim Vorbeiflug von *Voyager 1* im März 1979 entdeckt, konnte aber nachträglich in älteren Messdaten der Sonde *Pioneer 11* von ihrem Jupitervorbeiflug 1974 ebenfalls identifiziert werden. Das Ringsystem besteht aus drei Teilen: einem Hauptring mit einer Ausdehnung von ca. 6000 Kilometern und einer Dicke von weniger als 30 bis 100 Kilometern, in dem die beiden kleineren Monde Metis und Adrastea kreisen. Der Ring besteht aus kleinen, nur mikrometergroßen Staubteilchen aus Silikaten und Kohlenstoffverbindungen. Der Hauptring ist ober- und unterhalb der Ringebene von einem Halo umgeben, der die Form eines Torus von 20.000 bis 40.000 Kilometer Dicke besitzt. Den dunkelsten Teil des Jupiter-Ringsystems bilden die beiden so genannten Gossamerings außerhalb des Hauptrings, deren innerer sich etwa bis zur Bahn des Mondes Amalthea und deren äußerer sich bis zur Bahn des Mondes Thebe erstreckt. Die Gossamerings sind etwa um den Faktor 30 lichtschwächer als der Hauptring. Als Quelle der Ringpartikel werden zum einen das vulkanische Auswurfmaterial von Io vermutet, vor allem aber die kleinen inneren Monde. Material, das durch das Bombardement von Mikrometeoriten aufgewirbelt und dabei zum Teil so stark beschleunigt wird, dass es diese massearmen Monde nicht an sich binden können, gelangt so als Ringmaterial in eine Umlaufbahn um Jupiter.



Bild: Jupiters Hauptring im sichtbaren Licht. Zum Zeitpunkt der Aufnahme befand sich die Sonne direkt hinter Jupiter. (© NASA/JPL)



SATURN

Saturn ist mit einem Radius von etwa 60.000 Kilometern der zweitgrößte Planet in unserem Sonnensystem. Er ist der am weitesten entfernte, noch mit dem bloßen Auge sichtbare Planet und galt bis zur Entdeckung seines nächsten Nachbarn Uranus im Jahr 1781 als äußerster Planet. Seit der Erfindung des Fernrohrs beobachtet man um Saturn ein auffallendes Ringsystem, weswegen Saturn auch „Ringplanet“ genannt wird. Saturn ist etwa doppelt so weit wie Jupiter von der Sonne entfernt und benötigt für einen Umlauf knapp 30 Jahre. Alle 20 Jahre stehen Jupiter und Saturn, von der Erde aus betrachtet, recht nahe beieinander und bilden dann eine besonders markante Konstellation am Nachthimmel – eine solche Begegnung der beiden Planeten dient auch als eine mögliche Erklärung 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, in ähnlicher Weise wie die Kometen der Jupiterfamilie. Sein innerer Aufbau ähnelt dem Jupiters. Vermutlich reicht die äußere, relativ leichte Wasserstoff-Helium-Hülle aber sehr viel tiefer, wofür auch die geringe Dichte von weniger als 700 kg/m³ spricht, was bedeutet, dass Saturn sogar leichter ist als Wasser, und in einem hypothetischen riesigen Wasserbecken wie ein „Eisberg“ schwimmen würde. An der Wolkenobergrenze ist die Schwerkraft nur geringfügig größer als auf der Erde. Da Saturn sehr rasch rotiert – eine Umdrehung dauert nur rund

Bild linke Seite: Globale Ansicht des Saturns mit seinem größten Mond Titan in Echtfarben. Blick auf die beleuchtete Seite des Saturns in Höhe der Ringebene mit einem Schatten der Ringe auf der südlichen Saturnhemisphäre. (© NASA/JPL/Space Science Institute)

In Zahlen		
Saturn	Masse	5,688 x 10 ²⁶ kg
	Radius (äquatorial)	60.268 km
	Radius (polar)	54.364 km
	Dichte	687 kg/m ³
	Rotationsperiode	10,55 h
	Orbitalperiode	29,4 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	1,429 x 10 ⁹ km
Mimas	Masse	0,38 x 10 ²⁰ kg
	Mittlerer Radius	198,2 km
	Dichte	1152 kg/m ³
	Orbitalperiode	0,942 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	185.520 km
Enceladus	Masse	1,1 x 10 ²⁰ kg
	Mittlerer Radius	252,1 km
	Dichte	1606 kg/m ³
	Orbitalperiode	1,370 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	238.020 km
Tethys	Masse	6,2 x 10 ²⁰ kg
	Mittlerer Radius	533 km
	Dichte	956 kg/m ³
	Orbitalperiode	1,888 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	294.660 km

zehneinhalb Stunden – und von allen Planeten die niedrigste mittlere Dichte aufweist, ist bei ihm die Abplattung mit etwa zehn Prozent besonders 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 beobachteten 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, was bei beiden Planeten nicht vollständig verstanden ist.

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 Mondes Enceladus steht. Die Buchstaben A bis G gehen auf die Reihenfolge der Entdeckung der einzelnen Ringsegmente zurück.

Seit den Vorbeiflügen der Voyager-Sonden 1980/1981 ist bekannt, dass Saturn in seiner Äquatorebene, die ähnlich jener der Erde um knapp 27° gegen die Bahnebene geneigt ist, in Wirklichkeit von über tausend Einzelringen umgeben ist. Ihre Form, Dynamik und

Entstehung wurden zwischen 2004 und 2017 von den Instrumenten auf der Sonde *Cassini*, insbesondere von den Kameras und Spektrometern, näher untersucht. Die beiden hellsten und auffälligsten Ringe sind der seit dem 17. Jahrhundert bekannte A-Ring sowie 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 Krepp-Ring genannt) entdeckt. Bei den Vorbeiflügen von *Voyager 1* und 2 konnte der bereits 1967 vermutete innerste Saturnring, der D-Ring mit einer Breite von 8000 Kilometern bestätigt werden. *Pioneer 11* entdeckte 1979 noch vor den *Voyager*-Vorbeiflügen 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 circa 7000 Kilometern erstreckt.

Die Ringe reichen vier Planetenradien oder 240.000 Kilometer 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, alle 15 Jahre auch direkt auf die Kante. Die Dicke des Ringsystems beträgt höchstens einen Kilometer, und in „Kantenstellung“ scheint der Ring selbst beim Blick durch die größten irdischen Teleskope für kurze Zeit zu „verschwinden“. Das letzte Mal konnte der Planet „ohne Ring“ im August 2009 beobachtet werden, als die Erde die Ringebene des Saturns von Süd nach Nord kreuzte und

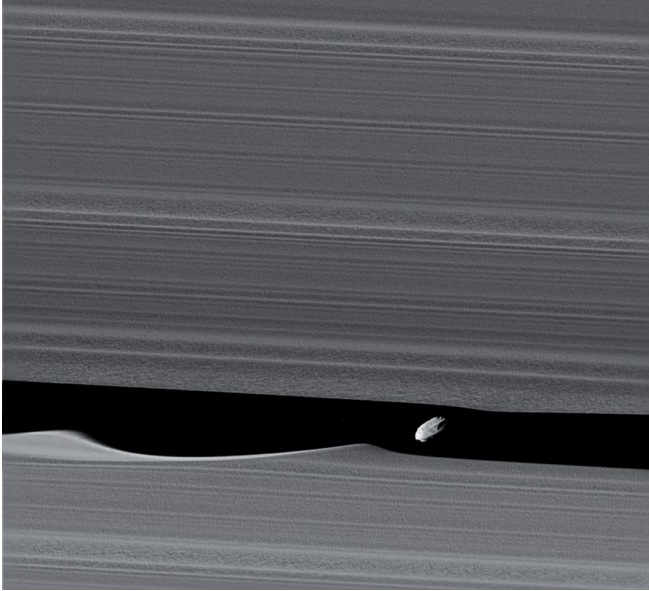
In Zahlen		
Dione	Masse	11 x 10 ²⁰ kg
	Radius	561,7 km
	Dichte	1469 kg/m ³
	Orbitalperiode	2,737 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	377.400 km
Rhea	Masse	23,1 x 10 ²⁰ kg
	Radius	764,3 km
	Dichte	1233 kg/m ³
	Orbitalperiode	4,518 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	527.040 km
Titan	Masse	1345,5 x 10 ²⁰ kg
	Radius	2575 km
	Dichte	1880 kg/m ³
	Orbitalperiode	15,9454 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	1.221.850 km
Hyperion	Masse	0,056 x 10 ²⁰ kg
	Radius	180 x 133 x 102 km
	Dichte	569 kg/m ³
	Orbitalperiode	21,277 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	1.481.100 km
Iapetus	Masse	18,1 x 10 ²⁰ kg
	Radius	735,6 km
	Dichte	1088 kg/m ³
	Orbitalperiode	79,33 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Saturn	3.561.300 km

gleichzeitig *Cassini* diese ungewöhnliche Beleuchtungssituation zu wichtigen Messungen in der Ringebene nutzen konnte. Die nächste Ringkantenstellung erfolgt im März 2025.

Die Größe der Ringteilchen variiert je nach Ring und liegt überwiegend zwischen Staubkorngröße (wenige Mikrometer) und wenigen Zentimetern, in anderen Ringbereichen zwischen etwa Sandkorn- und Hausgröße. Zu über 90 Prozent ist der spektral nachgewiesene Hauptbestandteil der Ringe Wassereis, zumindest an den Oberflächen der Ringpartikel. Die verbleibenden zehn Prozent bestehen aus Staub aus Silizium- und Kohlenstoffverbindungen. Die Ringe stehen in intensiver Gravitationswechselwirkung mit den ihnen am nächsten gelegenen Monden. Viele Ringpartikel werden zudem durch die Schwerkraftwirkung von kleinen, sogenannten Schäfermonden, auf ihrer Bahn gehalten.

Die Fragen nach Entstehung und Alter der Ringe sind noch nicht abschließend beantwortet. Ihre gesamte Masse entspricht ungefähr nur 40 Prozent der des 400 Kilometer großen Mondes Mimas und ist somit deutlich geringer als früher vermutet. Auswertungen der Daten der *Cassini*-Sonde deuten darauf hin, dass die Ringe ein eher junges Phänomen sind, also vielleicht erst vor hundert bis einigen hundert Millionen Jahren entstanden sind. Dafür spricht zum Bei-

spiel die von der *Cassini*-Sonde gemessene Einfallsrate von silikatischem Staub, welcher die Saturnringe mit der Zeit immer dunkler macht. Wären die Ringe alt, könnten sie nicht mehr so hell erscheinen



wie es beobachtet wird. Außerdem verlieren sie kontinuierlich Material in Richtung Saturn, auch dieser Prozess hätte alte Ringe längst aufgelöst. Eine besonders spannende Hypothese lautet, dass vor etwa 150 Millionen Jahren ein Mond, der zuvor zwischen Titan und Iapetus den Saturn umkreist hat, in eine 1:3-Resonanz mit Titan geraten ist und dadurch nach und nach auf eine hochelliptische Bahn gezwungen wurde. Vor vielleicht 100 Millionen Jahren kam er dann Saturn so nah, dass er von dessen Gezeitenkräften zerrissen wurde und jetzt die Ringe bildet.

Andererseits könnten die Ringe ein Überbleibsel des Materials sein, aus dem sich Saturn mit seinen Monden vor über 4,5 Milliarden Jahren gebildet hat. Eine weitere Erklärung wäre, dass sich an der Stelle der Ringe ein Mond befand, der von einem massiven Kometen oder Asteroiden getroffen wurde und dabei zerbrach. Weitere Einschläge oder gegenseitige Zusammenstöße zerkleinerten die Reste dieses Mondes nach und nach. Eine dritte Entstehungsmöglichkeit ist, dass ein massives Objekt aus dem Kuipergürtel so nahe an Saturn vorbeiflog, dass es durch Gezeitenkräfte auseinanderbrach. Diese beiden letzteren Ereignisse sind statistisch jedoch extrem selten und müssten sich in der Frühzeit vor mindestens 3,8 bis 4 Milliarden Jahren abgespielt haben, in einer Periode, in der große Einschläge von Kometen oder Asteroiden erheblich häufiger stattfanden. Die Fragen nach Entstehung und Alter der Ringe – entweder verhältnismäßig junge Ringe oder grundsätzlich alte Ringe, die aufgrund der von der *Cassini*-Sonde beobachteten aktiven Prozesse jung erscheinen – werden weiterhin kontrovers diskutiert und sind bis auf Weiteres ungelöst.

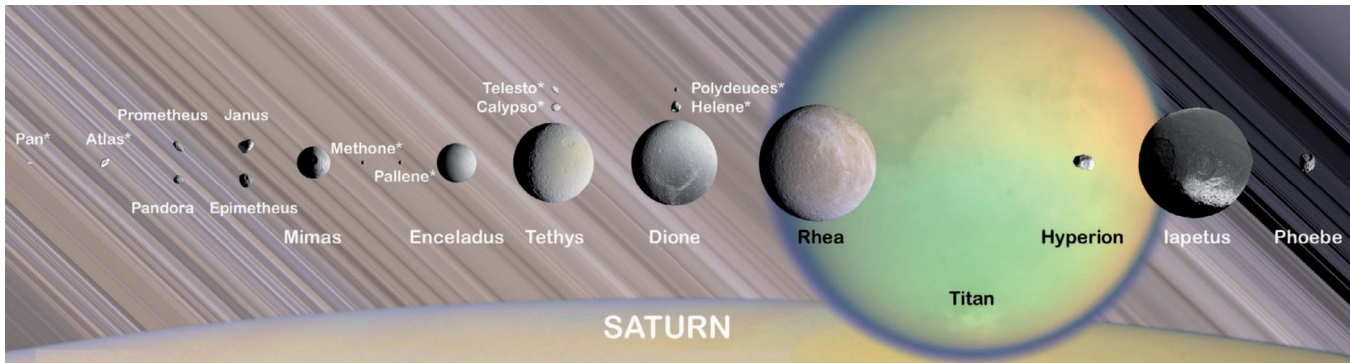
Bild: „Schäfermond“ Daphnis auf seiner Bahn um Saturn im äußeren Bereich der Saturnringe in der Keeler-Lücke. Daphnis' äquatorialer Bergrücken resultiert aus der Anziehung und Ablagerung feiner Ringpartikel.
(© NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute)

Saturnmonde

Zurzeit sind 146 Saturnmonde bekannt. Neun davon sind relativ groß; von innen nach außen heißen sie Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea, Titan, Hyperion, Iapetus und Phoebe. Sie waren alle schon bekannt, bevor *Pioneer 11* als erste Raumsonde im Jahr 1979 an Saturn vorbeiflog. Zuvor, im Jahre 1966, wurde von dem französischen Astronomen Audouin Dollfus außerhalb des A-Rings und innerhalb der Mimasbahn vermeintlich ein weiterer Mond entdeckt. Er erhielt den Namen Janus. Erst 1978 wurde deutlich, dass es sich dabei um zwei Monde auf nahezu ein- und derselben Umlaufbahn handelte, um so genannte koorbitale Monde. Der zweite Mond erhielt den Namen Epimetheus und hat einen mittleren Durchmesser von 113 Kilometern (Janus: ca. 180 Kilometer). Die beiden koorbitalen Monde „teilen“ sich gewissermaßen einen Orbit und tauschen ihre Umlaufbahnen alle vier Jahre. 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 bereits mit Teleskopen die beiden kleinen Monde Telesto und Calypso, die als so genannte Lagrangesche Monde oder „Trojaner“ auf derselben Bahn wie Tethys kreisen, jedoch um einen Winkel von 60° (bezogen auf Saturn im Kreiszentrum) Tethys vor- 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. Die Oberfläche des Lagrangeschen Mondes Helene ist geprägt von großen alten Einschlagskratern, bedeckt von einer staubartigen Substanz, die die Kraterränder teilweise überdeckt. Der genaue Prozess der Entstehung des Materials ist noch nicht vollständig verstanden.

In den letzten Monaten vor dem Abschluss der *Cassini*-Mission, die am 15. September 2017 mit einem kontrollierten Absturz in die Saturnatmosphäre endete, kam die *Cassini*-Sonde nicht nur den Ringen sondern auch einigen der Schäfermonde sehr nahe. Dabei gelangen spektakuläre Aufnahmen dieser Monde und Beobachtungen ihrer gravitativen Wirkung auf die Ringteilchen. So wird vermutet, dass sich Ringteilchen im Bereich des Äquators dieser Monde, wie z.B. Atlas und Pan, anreichern und somit deren teilweise sehr ungewöhnliche Untertassenform erklären könnten.

Die weitaus meisten der kleineren Saturnmonde wurden seit 1980 sowohl von *Cassini* als auch mit Hilfe erdgestützter Teleskope entdeckt. Bislang sind noch nicht alle benannt. Der überwiegende Teil dieser neu entdeckten Objekte gehört zu den so genannten irregulären Monden, die Saturn auf gegenüber der Ekliptik stark geneigten, hoch exzentrischen und häufig retrograden Bahnen umkreisen. Zudem scheinen sich innerhalb der Ringe weitere, noch unbekannte und auf Bildern



nicht auflösbare Monde zu befinden, die sich lediglich in ihrer Wirkung auf die Ringteilchen bemerkbar machen. Derartige Strukturen wurden als „Propeller“ bezeichnet und nach Piloten aus den Anfängen der Luftfahrt benannt.

Titan ist mit einem Durchmesser von 5150 Kilometern der größte Saturnmond und nach dem Jupitermond Ganymed der zweitgrößte Mond im Sonnensystem. Entdeckt wurde er im Jahre 1655 von Christiaan Huygens. Seine Dichte ist mit 1880 kg/m^3 die höchste aller Saturnmonde, neben Eis muss Titan deshalb in seinem Inneren auch einen erhöhten Anteil schwerer Stoffe, zum Beispiel silikatische Gesteine, aufweisen. Er ist der einzige Trabant eines Planeten mit einer dichten, hoch reichenden Atmosphäre. Titans Gashölle zeigt eine rötlichorange Färbung und besteht hauptsächlich aus Stickstoff, dazu kommen Spuren von Methan, Ethan, Acetylen, Propan, Diacetylen, Methylacetylen, Wasserstoff, Cyanid, Cyanoacetylen, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid. Durch den hohen Stickstoff-Anteil ist die Gashölle von Titan derjenigen unserer Erde in gewisser Weise ähnlich. Wegen der tiefen Temperaturen laufen chemische Reaktionen in der Titanatmosphäre allerdings sehr viel langsamer ab als auf der Erde. Die Atmosphäre ist im sichtbaren Licht undurchsichtig und verhüllt daher

die Oberfläche. Sensoren, die Signale in infraroten Wellenlängen aufzeichnen können, wie das auf *Cassini* eingesetzte abbildende Spektrometer VIMS, oder aktive Sensoren wie Radar können die Oberfläche grob aufgelöst abbilden. Titan war auch 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 landete.

Die Oberflächenformen von Titan ähneln in mancher Hinsicht denen der Erde. Allerdings besteht die Titanoberfläche überwiegend aus Eis. Die wenigen entdeckten Einschlagskrater deuten auf eine geologisch junge Oberfläche hin. Manche Gebiete scheinen durch intensive Erosion verändert zu sein, ähnlich den Karstlandschaften auf der Erde. Langgezogene Dünen aus dunklem Material, vermutlich kohlenstoffhaltige Partikel, zeugen von der intensiven Wirkung des Windes. Langgestreckte Bergrücken, Calderen und annähernd kreisrunde, schildförmige Gebilde, ähnlich den Vulkanen auf Hawaii, deuten auf tektonische und vulkanische Aktivität hin. *Cassini-Huygens* hat auf Titan sogar Flusstäler entdeckt, die in Seebecken münden. Anders als auf der Erde fließt auf der rund -180 Grad Celsius kalten Titanoberfläche darin

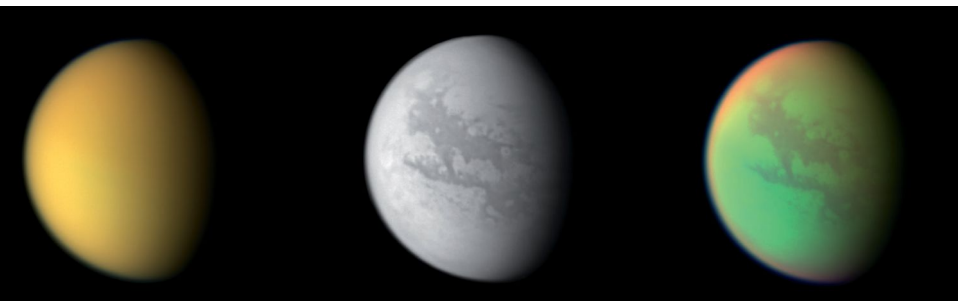


Bild oben: Die 21 größten Monde, maßstabsgetreu in Relation zu Saturn (beiges Kreissegment unten). Im Hintergrund ist (nicht maßstäblich) ein Ausschnitt der Ringe zu sehen. (© NASA/JPL/David Seal)

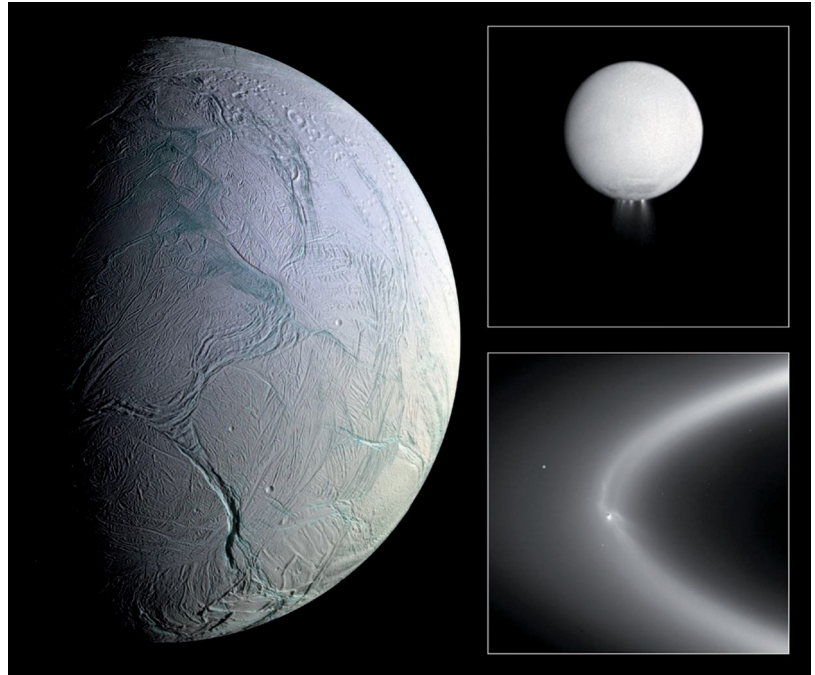
Bild unten: Drei Ansichten von Titan. Links: in Echtfarben, hier ist nur die orange gefärbte dichte Atmosphäre sichtbar. Mitte: im nahen Infrarot (938 nm), das macht Titans Oberfläche teilweise sichtbar. Rechts: Falschfarbenbild, das Einzelbilder kombiniert, die im nahen Infrarot (bei 938 und 889 nm) und im sichtbaren Licht (428 nm) aufgenommen wurden. (© NASA/JPL/Space Science Institute)

jedoch kein Wasser, sondern ein Gemisch aus flüssigem Methan (CH_4) und Ethan (C_2H_6). Huygens landete in einem ausgetrockneten Seebett, in das mehrere solcher Flusstäler münden. Durch *Cassini*-Beobachtungen von spiegelnden Oberflächen konnte gezeigt werden, dass einige der „Seen“ mit flüssigen Kohlenwasserstoffen gefüllt sind, vor allem in der Nähe des Nordpols. Einer dieser Methan-Seen wurde nach dem Berliner Muggelsee *Müggel Lacus* getauft.

Mimas hat einen Durchmesser von 396 Kilometern und ist der innerste der neun großen Saturnmonde. Entdeckt wurde Mimas 1789 von William Herschel. Zu einem großen Teil besteht Mimas aus Eis. Seine mittlere Dichte liegt mit 1150 kg/m^3 etwas über der von Wassereis. Die Oberfläche ist voller Einschlagskrater. Größere Krater mit Durchmessern über 20 Kilometer haben Zentralberge; der markanteste ist der Krater Herschel mit einem Durchmesser von etwa 130 Kilometern. In der Mitte dieses zehn Kilometer tiefen Kraters ragt ein 6000 Meter hoher Zentralberg empor. Im Innern von Mimas könnte sich ein Wasserozean befinden, der vielleicht sogar die Hälfte des Volumens ausfüllt, von einer etwa 20-30 Kilometer mächtigen Eiskruste bedeckt ist und erst vor wenigen Millionen Jahren entstanden ist.

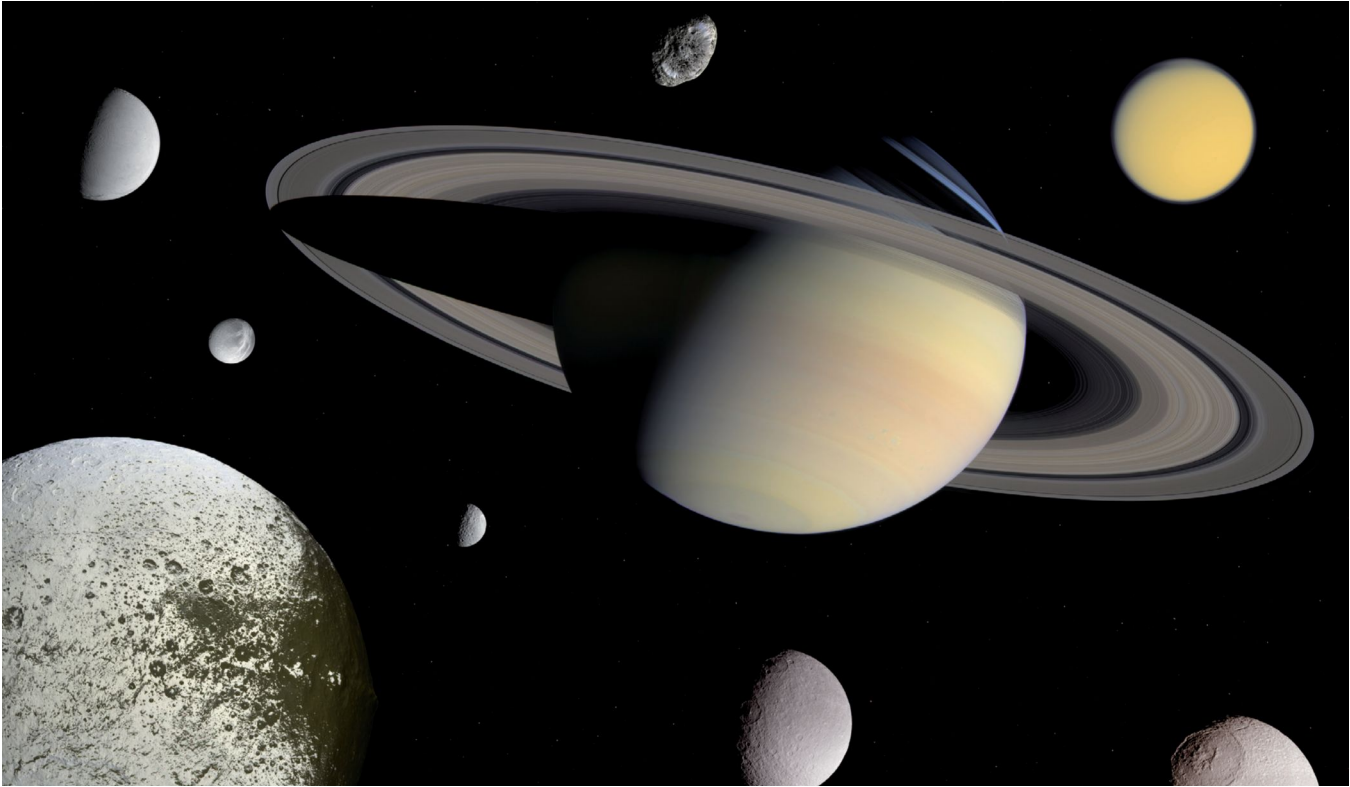
Enceladus (504 Kilometer Durchmesser) ist der zweitinnerste der großen Saturnmonde und wurde wie Mimas von William Herschel 1789 entdeckt. Seine Oberfläche weist stark unterschiedliche Gebiete auf: altes Kratergelände, teilweise mit abgetragenen oder tektonisch verformten Kratern, glatte Ebenen mit wenigen 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 und ins All bläst, welches sich entlang der Umlaufbahn des Mondes verteilt und das nur zum Teil auf Enceladus zurückfällt. Nach derzeitigem Wissensstand

Bild: Die zerfurchte Oberfläche des Mondes Enceladus mit seinem nahe dem Südpol gelegenen, etwa einen Kilometer tiefen Labtayt Sulcus (links), einer der Spalten an denen eisreiches Material geysirartig austritt (oben rechts) und Saturns äußerster Ring (E-Ring) bildet (unten rechts).
(© NASA/JPL/Space Science Institute)



sind Gezeitenkräfte für die kryovulkanische Tätigkeit verantwortlich. Nach der Erde, dem Jupitermond Io und dem Neptunmond Triton ist Enceladus damit erst der vierte Körper im Sonnensystem, auf dem ein aktiver, anhaltender Vulkanismus nachgewiesen werden konnte (auch auf der Venus und dem Jupitermond Europa könnte es aktiven Vulkanismus geben). Der vom Kryovulkanismus auf Enceladus gespeiste E-Ring erstreckt sich radial und vertikal am weitesten von allen Saturnringen und reicht nach innen bis zur Mimas- und nach außen bis zur Titanbahn. Wie Titan und Phoebe enthält Enceladus neben Eis einen verhältnismäßig hohen Anteil schwerer Stoffe, wie sich an der für einen Eismond recht hohen Dichte von 1610 kg/m^3 ablesen lässt. Zwischen dem inneren, möglicherweise „schlammigen“ Kern und der äußeren Eiskruste befindet sich ein Wasserozean, der die Voraussetzungen für die Entstehung von außerirdischem Leben haben könnte. Das macht Enceladus zu einem der interessantesten Objekte im Sonnensystem.

Tethys, im Jahr 1684 von Giovanni Domenico Cassini entdeckt, hat einen Durchmesser von 1066 Kilometern. Der Körper weist eine mittlere Dichte von 970 kg/m^3 auf und ist somit leichter als Wassereis. In mancherlei Hinsicht ähnelt Tethys dem Mond Mimas: die Oberfläche ist ebenfalls sehr dicht mit Einschlagskratern bedeckt, wie das mehrere hundert Kilometer große Einschlagsbecken Odysseus. Ein großes



Grabenbruchsystem namens Ithaca Chasma mit einem Ausmaß von etwa drei Viertel 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 und **Rhea** wurden ebenfalls vom Astronomen Cassini in den Jahren 1684 und 1672 entdeckt. Die beiden benachbarten Monde sind der viert- und zweitgrößte Mond des Saturn (1124 km bzw. 1528 km Durchmesser). Mit einer mittleren Dichte von 1470 kg/m^3 gehört Dione mit Titan, Phoebe und Enceladus zu den Saturnmonden mit einem etwas höheren Gesteinsanteil. Rhea dagegen besteht mit seiner niedrigeren Dichte von 1230 kg/m^3 hauptsächlich aus Wassereis. Diones Oberfläche ist nach der von Enceladus und Titan geologisch am weitesten entwickelt: Dione ist einerseits charakterisiert durch Regionen mit vielen Kratern, die ein hohes Alter anzeigen, und andererseits durch Gegenden, die deutlich weniger Krater aufweisen. Starke tektonische Kräfte haben die Kruste deformiert und geradlinig verlaufende Bergrücken und Bruchstrukturen hinterlassen. In Südpolnähe

befindet sich das mehrere hundert Kilometer große Impact-Becken Evander. Die der Umlaufbewegung abgewandte Hemisphäre zeigt ein markantes Netz tektonischer Brüche unterschiedlicher Orientierung, die in verschiedenen Epochen entstanden sind. Die Oberfläche von Rhea ist der von Dione ähnlich. Allerdings ist Rhea geologisch weniger entwickelt, die Aktivität dieses Mondes dürfte deshalb früher als die Diones zum Erliegen gekommen sein. Auffallend ist, dass die in Bewegungsrichtung um den Saturn vorausgehende Hemisphäre mit mehr Kratern übersät ist als die gegenüberliegende Halbkugel. Hier gibt es mehrere sehr große, hundert und mehr Kilometer durchmessende Einschlagsbecken. In dieser Hemisphäre liegt auch der auffallende helle, vermutlich junge Strahlenkrater Inktomi. Die der Bahnbewegung abgewandte Hemisphäre ist, ähnlich wie bei Dione, von langgestreckten

Bild: Saturn und seine großen Monde, nicht maßstäblich und auch nicht positionsgetreu. Links unten Iapetus, ganz oben in der Mitte Hyperion, oben rechts der von einer Atmosphäre eingehüllte Titan; diagonal von links oben nach rechts unten: Enceladus, Dione, Mimas, Rhea, Tethys.
(Einzelbilder: © NASA/JPL/Space Science Institute, Montage: DLR)

Brüchen durchzogen, die zumeist in Nord-Süd-Richtung orientiert sind. An den hellen Steilhängen dieser parallelen Brüche ist sowohl auf Dione als auch auf Rhea frisches Wassereis aufgeschlossen, was auf den räumlich niedriger aufgelösten *Voyager*-Bildern nicht erkannt werden konnte und deshalb zunächst auf beiden Satelliten den Eindruck eines dichten Netzes feiner und sehr heller Filamente weitgehend unbekannter Herkunft entstehen ließ.

Hyperion ist ein unregelmäßig geformter triaxialer Körper mit den Ausmaßen $410 \times 260 \times 220$ Kilometern. Er wurde im Jahr 1848 von den Astronomen William Lassell und – unabhängig davon – William C. Bond und seinem Sohn George P. Bond entdeckt. Hyperion rotiert chaotisch; das heißt die Richtung, in die der Nordpol weist, ändert sich ständig in relativ kurzen Zeiträumen und ist nicht vorhersehbar. Seine mittlere Dichte ist mit 570 kg/m^3 die niedrigste der neun großen Saturnmonde. Er ist dicht mit Kratern bedeckt, die sich bei Einschlägen in diesem porösen Körper gebildet haben und ihm das Aussehen eines Schwammes verleihen. Dunkles, spektral rötliches, kohlenstoffhaltiges Material hat sich in Senken und auf Kraterböden abgelagert.

Iapetus ist mit einem Durchmesser von 1471 Kilometern nach Titan und Rhea der drittgrößte Saturnmond. Seit der Entdeckung durch Cassini im Jahr 1671 war bekannt, dass er zwei extrem unterschiedlich helle Hemisphären aufweist: Die in Richtung der Bahnbewegung gelegene ist extrem dunkel, während die der Bahnbewegung abgewandte Hemisphäre und die Polregionen eine mit den anderen Saturnmonden vergleichbare Helligkeit aufweisen. Die *Cassini*-Bildraten zeigen, dass beide Hemisphären sehr dicht mit Kratern besetzt sind, überdies eine vergleichsweise hohe Anzahl sehr großer Einschlagsbecken enthalten. Die Oberfläche dürfte somit älter als die der übrigen Saturnmonde sein. Besonders auffallend ist ein bis zu 20 Kilometer hoher Bergrücken, der den Mond entlang seines Äquators auf der Hälfte seines Umfangs umgibt. An manchen Stellen ist er unterbrochen und besteht aus einzelnen Bergen oder Massiven. Seine Entstehung ist noch ungeklärt. Eine Theorie besagt, dass der Bergrücken das Ergebnis von tektonischen Deformationen ist, eine andere schlägt die Ablagerung von Material eines ehemaligen Rings um Iapetus als Ursache vor.

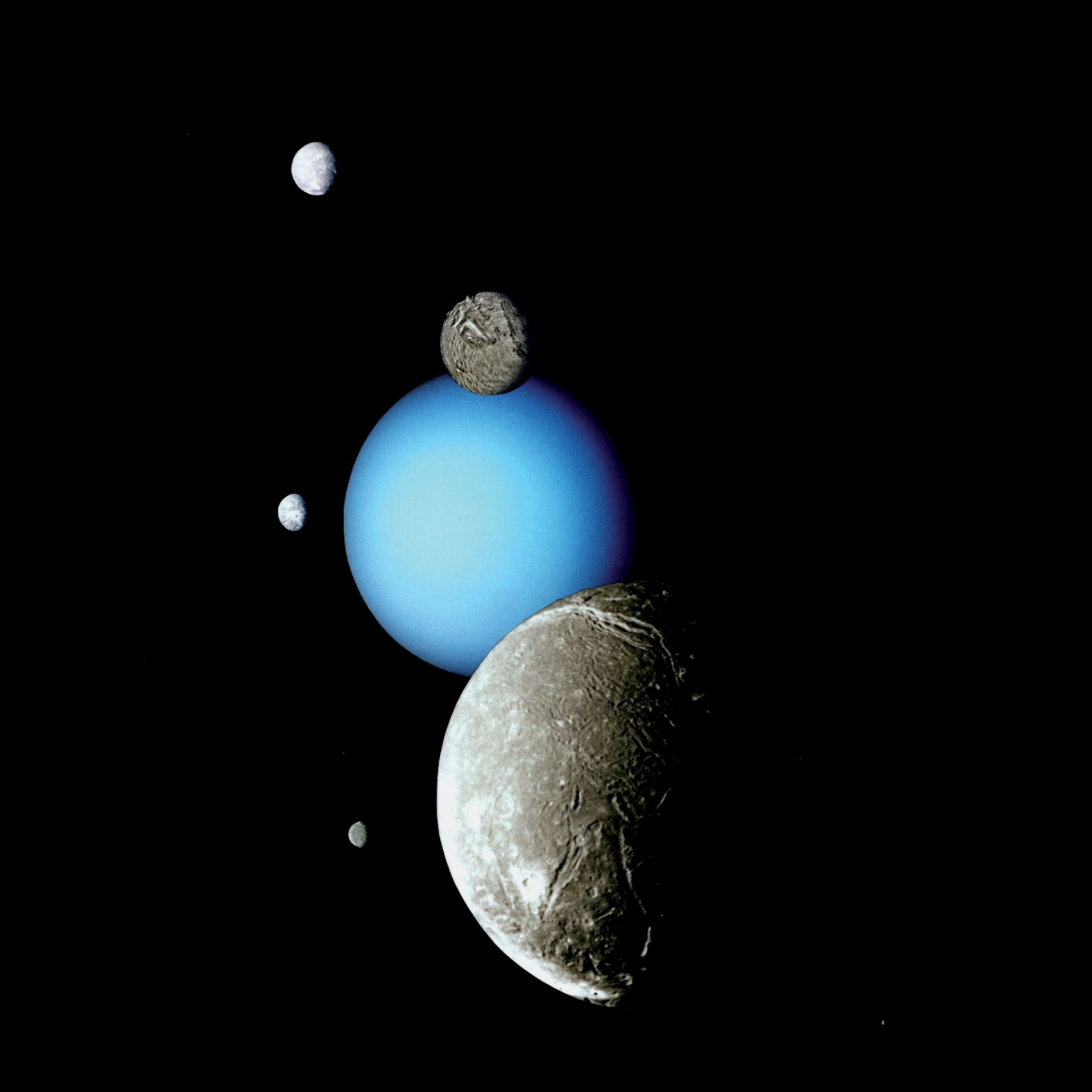
Phoebe (219×204 Kilometer) umkreist Saturn in fast 13 Millionen Kilometern Entfernung und ist der am weitesten entfernte der neun größeren Monde. Er kreist in umgekehrter Richtung wie die anderen Monde, d.h. von Norden gesehen im Uhrzeigersinn, um Saturn. Diese



Tatsache, sowie die gemessen an der geringen Größe dieses Mondes vergleichsweise hohe Dichte von 1630 kg/m^3 und seine Oberflächeneigenschaften lassen vermuten, dass Phoebe nicht wie die anderen Monde gemeinsam mit Saturn entstanden ist, sondern ein Kleinkörper ist, der aus dem Kuipergürtel jenseits des Neptun stammt und von der Schwerkraft des Saturn auf seine retrograde Umlaufbahn um den Planeten gezwungen wurde.

Phoebe ist der größte von insgesamt 122 bekannten äußeren oder „irregulären“ Saturnmonden. Die anderen „Saturnian Irregulars“ sind kleiner als 40 Kilometer, zumeist sogar nur wenige Kilometer groß. 100 davon bewegen sich wie Phoebe auf einer retrograden Bahn. Manche entfernen sich dabei zeitweise mehr als 40 Millionen Kilometer von Saturn, und viele benötigen für eine Saturnumkreisung über tausend Tage. Die größten irregulären Saturnmonde nach Phoebe wurden im Jahr 2000 entdeckt und heißen Siarnaq, Albiorix, Paaliaq, Ymir, Kiviuq, Tarvos und Ijiraq. Zuletzt wurden im Mai 2023 63 Neuentdeckungen mitgeteilt. Die *Cassini*-Raumsonde hat zwischen 2010 und 2017 Rotationsperioden von 25 der damals bekannten 38 irregulären Saturnmonde gemessen.

Bild: Beispiele kleinerer Saturnmonde. Oben links: Pan, „Schäfermond“ in der Enckeschen Teilung des A-Rings. Oben rechts: Pandora, äußerer „Schäfermond“ des F-Rings. Unten links: Helene, „Trojaner“ des Mondes Dione. Unten rechts: Epimetheus, koorbitaler Mond mit Janus. (Einzelbilder ©NASA/JPL/SSI)



URANUS

Da die Helligkeit an der Sichtbarkeitsgrenze des bloßen Auges liegt, ist Uranus als siebter Planet des Sonnensystems vermutlich schon vor seiner Entdeckung durch William Herschel im Jahr 1781 am Nachthimmel gesehen worden. Uranus hat fünf größere Monde, die Miranda, Ariel, Umbriel, Oberon, Titania heißen und die den Planeten in der Äquatorialebene umlaufen. Ein zunächst aus fünf Einzelringen bestehendes Ringsystem wurde bei einer Sternbedeckung im Jahr 1977 mithilfe eines Teleskops am Bord des Kuiper Airborne Observatory entdeckt. Dabei machten sich die extrem dunklen Ringe durch kurzzeitige scheinbare Helligkeitsschwankungen des Hintergrundsterns bemerkbar. Die Raumsonde *Voyager 2* passierte das Uransystem im Januar 1986 und übertrug eindrucksvolle Bilder zur Erde, die Uranus als blau-grünlich leuchtende Kugel ohne ausgeprägte Wolkenbänder und atmosphärische Strukturen zeigten. Neuere erdgebundene Beobachtungen mit den Keck- und Gemini-Teleskopen auf Hawaii zeigen hingegen zahlreiche zonale Bänder und Wolken sowie eine asymmetrische Verteilung zwischen Nord- und Südhalbkugel, welche möglicherweise saisonalen Variationen unterliegt.

Uranus ist etwa 20-mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde, benötigt 84 Jahre für einen Umlauf um die Sonne und rotiert in 17,3 Stunden einmal um seine Achse. Der Planet hat ein relativ starkes, asymmetrisches Magnetfeld, das 60 Grad gegenüber der Rotationsachse geneigt ist. Da die Rotationsachse des Planeten selbst fast parallel zur Bahnebene liegt, „rollt“ der Planet gewissermaßen auf seiner Bahn um die Sonne und ist somit recht ungewöhnlichen jahreszeitlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Vermutlich kam es in der

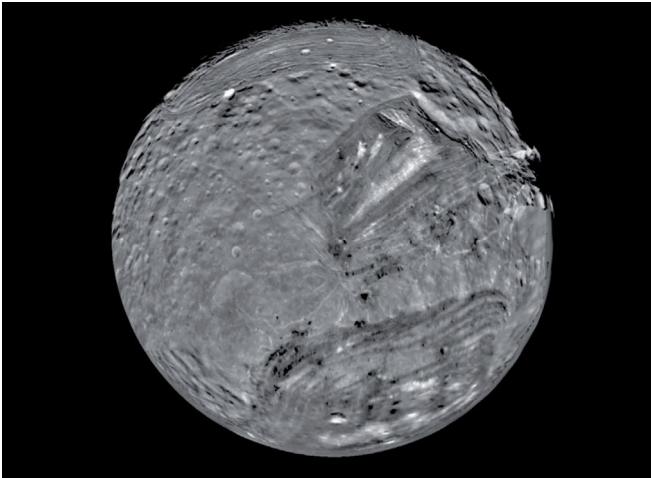
Frühzeit des Sonnensystems zu einer heftigen Kollision zwischen Uranus und einem massereichen Körper, die zur starken Neigung der Rotationsachse gegenüber der Bahnebene des Planeten führte.

Die Masse des Uranus beträgt 14,54 Erdmassen, und der Durchmesser am Äquator umfasst 51.118 Kilometer. Das Innere besteht vornehmlich aus einer Mischung von Eis und Gestein unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen von mehreren 1000 Grad Kelvin.

Während die Gesteinskomponente lediglich vermutet wird, könnte das Innere auch metallischen Wasserstoff mit hohen Beimischungen an den gesteinsbildenden Elementen Magnesium, Eisen, Silizium und Sauerstoff enthalten, über eine „Diamantschicht“ aus elementarem Kohlenstoff und eine Eisgitterstruktur verfügen, oder aber aus einer zähen Mischung aller Komponenten bestehen, deren Materialeigenschaften eher denjenigen von Flüssigkeiten ähneln. Der Anteil an Kohlenstoff und Schwefel ist stark erhöht, wohingegen Wasserstoff und Helium weniger häufig als in der Sonne vorkommen. Im Unterschied zu Jupiter und Saturn wird das Magnetfeld vermutlich in einer weiter außen befindlichen, wasserreichen Schicht mit Spuren von Methan, Ammoniak und Schwefelwasserstoff erzeugt, die aufgrund ihres Ionenreichtums 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 Raumsonde *Voyager 2* deutlichen Schwankungen unterliegt. Der Wasserozean wird von einer dichten

In Zahlen		
Uranus	Masse	8,684 x 10 ²⁵ kg
	Radius (äquatorial)	25.559 km
	Radius (polar)	24.973 km
	Dichte	1300 kg/m ³
	Rotationsperiode	17,24 h
	Orbitalperiode	84,02 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	2,870 x 10 ⁹ km
Miranda	Masse	0,66 x 10 ²⁰ kg
	Dichte	1201 kg/m ³
	Radius	240,4 x 234,2 x 232,9 km
	Orbitalperiode	1,41 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	129.900 km
Ariel	Masse	13,5 x 10 ²⁰ kg
	Dichte	1665 kg/m ³
	Radius	581,1 x 577,9 x 577,7 km
	Orbitalperiode	2,52 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	190.900 km
Umbriel	Masse	11,7 x 10 ²⁰ kg
	Dichte	1400 kg/m ³
	Radius	584,7 km
	Orbitalperiode	4,14 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	266.000 km

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



Atmosphäre umschlossen, die hauptsächlich aus molekularem Wasserstoff, Helium, und erhöhten Anteilen flüchtiger Verbindungen wie Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH₄), Ammoniak (NH₃) und Schwefelwasserstoff (H₂S) besteht. Die zudem relativ trockene Atmosphäre deutet darauf hin, dass Wasser (H₂O) an tiefer liegende Reservoirs, beispielsweise in Form von Wolkenlagen, gebunden ist.

Sein blau-grünliches Aussehen verdankt Uranus dem merklichen Anteil an zusätzlich vorhandenem Methan (CH₄). Durch Kondensation von Methan bilden sich in der Troposphäre des Planeten vereinzelt Wolken, während sich in den Dunstschichten hauptsächlich Kohlenwasserstoffe wie Acetylen (C₂H₂) und Ethan (C₂H₆) sammeln.

Uranus empfängt aufgrund seiner größeren Sonnendistanz pro Flächen- und Zeiteinheit viertel so viel Sonnenenergie als Saturn oder sechzehnmal weniger Sonnenenergie als Jupiter. Die ungewöhnliche Orientierung seiner Rotationsachse bewirkt, dass jeweils 21 Jahre lang der Nord- bzw. Südpol des Planeten und seine Monde intensiv von der Sonne beleuchtet

Bild links: Sichel des Uranus in Echtfarben. (© NASA/JPL)
Bild rechts: Uranusmond Miranda mit auffälligen Strukturen. (© NASA/JPL/USGS)

werden; weitere zweimal 21 Jahre lang sind die Äquatorzonen und mittleren Breiten des Planeten der intensiven Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Es ist noch unklar, warum die unterschiedlich lange anhaltenden Phasen der Sonneneinstrahlung nicht zu einer erheblichen Dynamik der Uranusatmosphäre führen. *Voyager 2* beobachtete jedoch nur in den obersten Atmosphärenschichten des Planeten Zirkulationsbewegungen entlang der Breitengrade.

Im Gegensatz zu den drei anderen Gasplaneten fehlt Uranus anscheinend eine nennenswerte innere Wärmequelle. Die nur geringe Wärmeabstrahlung des Uranus im thermischen Infrarot ist vergleichbar mit dem Wärmeverlust der Erde und kann mit der Wärmeproduktion

im Innern durch den Zerfall radioaktiver Elemente in der Gesteinskomponente erklärt werden. Im Unterschied zu den übrigen Riesenplaneten wird Uranus offenbar nicht effizient durch Konvektion im Inneren abgekühlt. In Betracht kommen neben Änderungen der chemischen Zusammensetzung über Schichtgrenzen hinweg eine im Zuge der Abkühlung zunehmende Auskristallisation des tiefen Planeteninneren. Ferner wird diskutiert, ob die streifende Kollision eines Protoplaneten in der Spätphase der Planetenbildung die Rotationsachse des Uranus um mehr als 90 Grad gekippt hat,

In Zahlen

Titania	Masse	35,3 x 10 ²⁰ kg
	Dichte	1715 kg/m ³
	Radius	788,9 km
	Orbitalperiode	8,71 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	436.300 km
Oberon	Masse	30,1 x 10 ²⁰ kg
	Dichte	1630 kg/m ³
	Radius	761,4 km
	Orbitalperiode	13,46 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Uranus	583.500 km

während das Planeteninnere insgesamt stabil geschichtet blieb und somit im Lauf der Zeit nur wenig Wärme verlor.

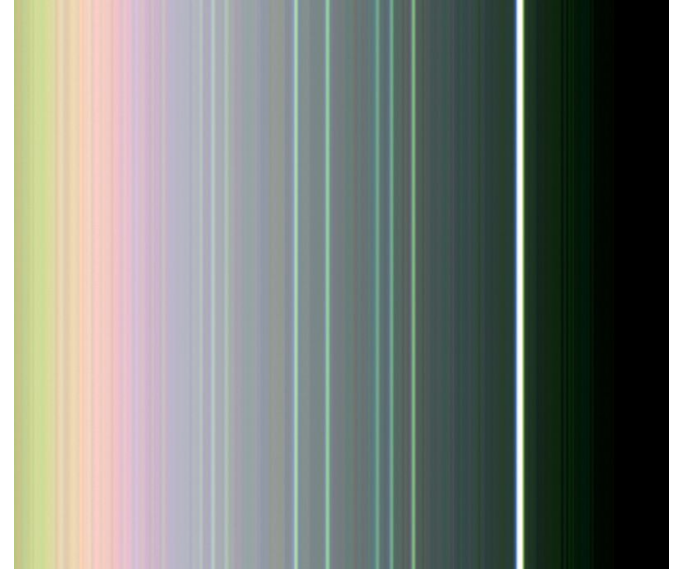
Die 13 schmalen Ringe in der Äquatorebene befinden sich in einer Entfernung von 39.000 bis 97.000 Kilometern vom Planetenzentrum. Die staubreichen Ringe reflektieren nur knapp fünf Prozent des auftreffenden Sonnenlichtes und sind somit extrem dunkel und farblos. Es wechseln sich diffuse Staubzonen mit schmalen Ringen ab, die durch benachbarte „Schäfermonde“ zusammengehalten werden. Über die Zusammensetzung der Ringe ist nur wenig bekannt, möglicherweise enthalten sie einen hohen Anteil an Kohlenstoff.

Uranusmonde

Die fünf größten Trabanten des Uranus ähneln hinsichtlich ihrer Größe und Anordnung den mittelgroßen Eismonden des Saturn. Die Uranusmonde haben aber eine höhere mittlere Dichte von etwa 1500 kg/m^3 , was auf einen größeren Gesteinsanteil und somit eine höhere radioaktive Wärmeproduktion im Inneren hindeutet. 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 Entwicklungsgeschichte des jeweiligen Satelliteninnern 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 markant geneigten Magnetfeld des Uranus 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 vermutlich durch aufsteigendes leichtes Material aus dem wärmeren Mondinnern entstanden sind. Die ovalen bis trapezförmigen Formationen haben Durchmesser von 200 bis 300 Kilometern, werden von umlaufenden Gräben und Rücken umschlossen, und sind zudem wesentlich jünger als die umgebenden, stark verkraterten Ebenen.

Die mittelgroßen Uranusmonde **Ariel** und **Umbriel** schließen sich auf weiter außen liegenden Umlaufbahnen an. Deren stark verkraterte Oberflächen zeigen ein hohes Entstehungsalter an und verfügen über ein Netzwerk aus zahlreichen Gräben und Rücken. Als mögliche Ursache kommen tektonische Deformationen der Eiskruste durch Volumenänderung des jeweiligen Satelliten in Betracht. Ariels Oberfläche wird geologisch etwas jünger eingestuft als die der übrigen



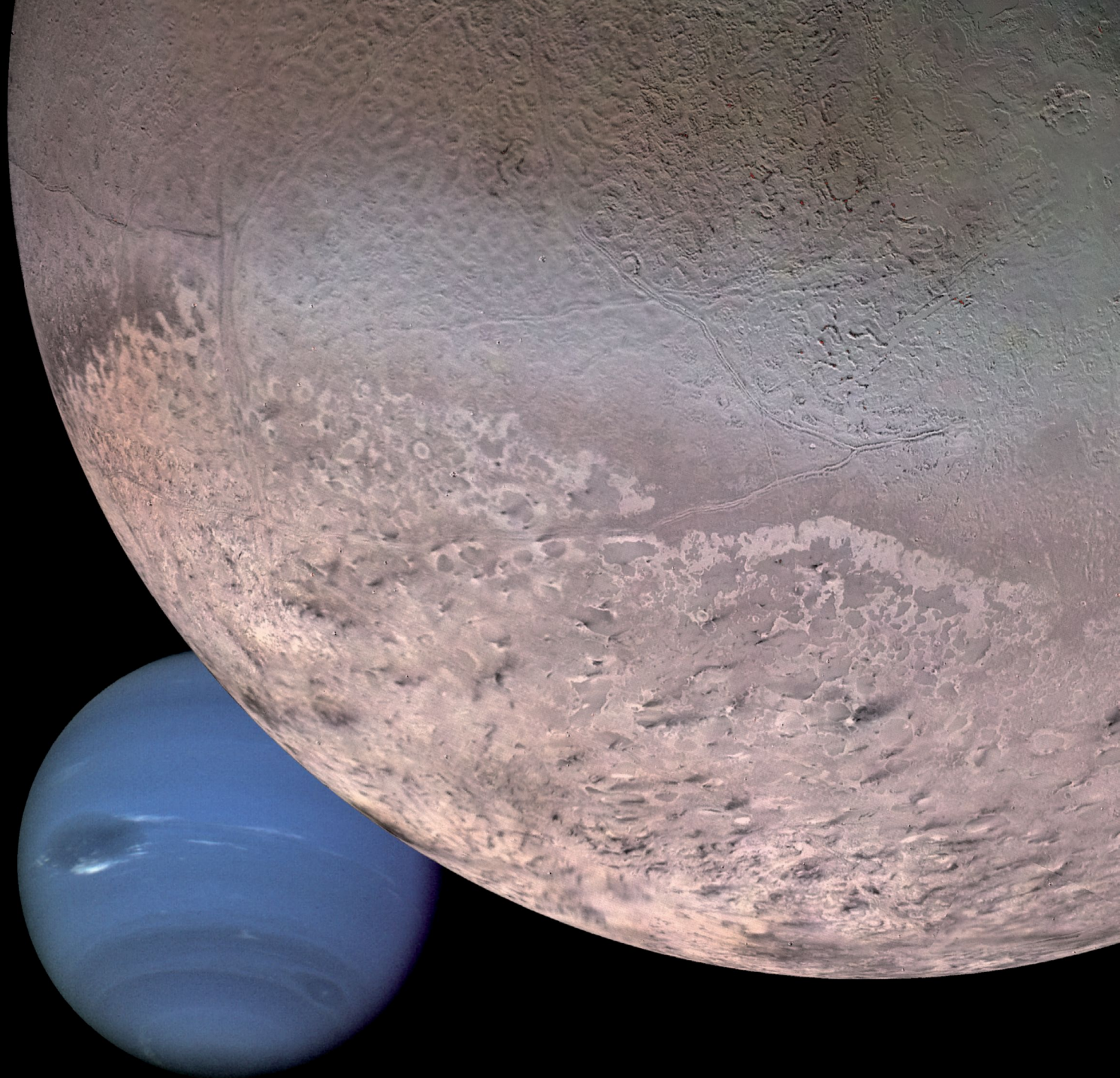
Uranusmonde und ist durch den Einfluss von Sublimation, Mikrometeoriten und geladener Teilchen weniger nachgedunkelt. Anhand neuerer Auswertungen von Bildern der Raumsonde *Voyager 2*, die an Grabenstrukturen gewonnen wurden, haben sich die Anhaltspunkte für Oberflächenenerneuerungsprozesse im Zusammenhang mit aktivem Kryovulkanismus verdichtet. Umbriels Oberfläche ist hingegen relativ dunkel mit nur wenigen lokalen Aufhellungen.

Titania, mit einem Durchmesser von 1578 Kilometern der größte Uranusmond, besitzt eine mit Einschlagskratern bedeckte Oberfläche. Sie zeigt auffällige, gerade Einsenkungen oder Täler, die infolge tektonischer Spannungen in der Eiskruste entstanden sind und hunderte Kilometer lang sein können. Sowohl Titania als auch Ariel und Umbriel könnten gegenwärtig noch ausgedehnte, flüssige Wasserozeane in ihrem Innern beherbergen, welche in der Frühzeit durch Aufschmelzung im Zuge episodisch erhöhter Gezeitenaufheizung der Trabanten entstanden sind.

Oberon, der äußerste und zudem zweitgrößte der Uranusmonde, hat wie Titania eine mit Einschlagskratern bedeckte Oberfläche. Einige Krater weisen in ihrem Inneren dunkles Material unbekannten Ursprungs auf. An seiner Oberfläche befindet sich eine auffällige Erhebung, bei der es sich vermutlich um den Zentralberg eines großen Einschlagskraters handelt.

Von *Voyager 2* wurden zehn weitere, relativ kleine Satelliten (Cordelia, Ophelia, Bianca, Cressida, Desdemona, Juliet, Portia, Rosalind, Belinda und Puck) aufgespürt. 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 28 Monde bekannt.

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



NEPTUN

Der äußerste Planet des Sonnensystems wurde erst am 23. September 1846 von Johann Gottfried Galle und Heinrich Louis d'Arrest an der damaligen Berliner Sternwarte aufgespürt. Aufgrund der unregelmäßigen Bahnbewegung des Uranus hatten John Couch Adams in England und Urbain John Joseph Le Verrier in Frankreich die Position am Himmel unabhängig voneinander richtig vorhergesagt. Es wird vermutet, dass bereits 233 Jahre zuvor Galileo Galilei den Planeten unwissentlich gesehen hatte. Die Bilder der Raumsonde *Voyager 2*, die den Planeten im August 1989 passierte, zeigen Neptun als leuchtend blaue Kugel mit einem großen und kleinen dunklen Fleck sowie auffallend hellen Strukturen und zirkuläre Wolken in der hohen Atmosphäre. Sowohl Neptun als auch Uranus erhalten ihre blaue Farbe durch Absorptionen von Methan. Nach Wasserstoff und Helium stellt Kohlenstoff in Form von Methan das dritthäufigste Element in den Atmosphären beider Planeten dar.

Neptun ist etwa 30-mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde, benötigt fast 165 Jahre für einen Lauf um die Sonne und rotiert in etwas mehr als 16 Stunden einmal um seine Achse. Das Magnetfeld ist gegenüber der Rotationsachse um einen Winkel von 47 Grad geneigt und um 0,4 Planetenradien gegen das Planetenzentrum versetzt. Das Neptunmagnetfeld hat zudem eine irreguläre Form, die von der Gestalt eines Dipolfeldes mit jeweils einem magnetischen Nord- und Südpol erheblich abweicht, was zu komplizierten Wechselwirkungen mit dem anströmenden Sonnenwind führt.

Die Masse des Neptun beträgt 17,15 Erdmassen, und der Durchmesser am Äquator umfasst 49.492 Kilometer, sodass in seinem Innern etwa 60 Erdkugeln untergebracht werden könnten. Da Neptun einen um vier Prozent

kleineren Äquatorradius hat und zudem massereicher als Uranus ist, fällt seine mittlere Dichte um etwa 25 Prozent höher aus. Das Innere Neptuns besteht vermutlich aus einer teilweise oder vollständig getrennten Mischung von Eis und Gestein unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen. Die von Wassereis dominierte Kernregion schließt bis zu 70 Prozent des Planetenradius oder 80 Prozent der Planetenmasse ein. Die irreguläre Form des Neptunmagnetfeldes kann durch die Magnetfelderzeugung in einer verhältnismäßig dünnen flüssigen, elektrisch leitfähigen Schicht nahe der Oberfläche erklärt werden. Dieser „Ionenozean“ wird von einer dichten Atmosphäre umgeben, die sich aus molekularem Wasserstoff mit einem geringen Heliumanteil von 10 bis 15 Prozent zusammensetzt. In großen Höhen bilden sich veränderliche helle Wolken und verbreitet Dunst durch die Kondensation von Methan (CH₄), Ammoniak (NH₃), Schwefelwasserstoff (H₂S) und Wasser (H₂O). *Voyager 2* beobachtete beim Vorbeiflug im Jahr 1989 einen ausgedehnten dunklen atmosphärischen Wirbel. Die Lebensdauer dieses Großen Dunklen Flecks ist Beobachtungen des *Hubble*-Weltraumteleskops zufolge aber wesentlich kürzer als diejenige des langlebigen Großen Roten Flecks in der Jupiteratmosphäre.

Voyager 2 hat während des Vorbeiflugs am Neptun die höchsten Windgeschwindigkeiten im Sonnensystem gemessen. Da kleinräumige Turbulenzen in der Neptunatmosphäre bislang nicht beobachtet wurden, spielen vermutlich Dunstschichten und Wolkendecken in großer Höhe eine wichtige Rolle bei der Umverteilung der eingestrahnten Sonnenenergie. Weiterhin treten im Unterschied zu Jupiter und Saturn in der Neptunatmosphäre so gut wie keine großräumigen Turbulenzen auf, durch die atmosphärische Strömungen hoher Geschwindigkeit deutlich verlangsamt werden könnten.

Im Unterschied zu Uranus verfügt Neptun zudem vermutlich über eine weitere Energiequelle in seinem tiefen Innern, da der Planet nahezu

In Zahlen		
Neptun	Masse	1,024 x 10 ²⁶ kg
	Radius (äquatorial)	25.746 km
	Radius (polar)	24.341 km
	Dichte	1760 kg/m ³
	Rotationsperiode	16,11 h
	Orbitalperiode	164,79 Jahre
	Durchschnittliche Entfernung von der Sonne	4,498 x 10 ⁹ km
Triton	Masse	2,14 x 10 ²² kg
	Dichte	2061 kg/m ³
	Radius	1352,6 km
	Orbitalperiode	5,88 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Neptun	354.800 km
Nereide	Masse	0,3 x 10 ²⁰ kg
	Dichte	1500 kg/m ³
	Radius	170 km
	Orbitalperiode	360,1 Tage
	Durchschnittliche Entfernung vom Neptun	5.513.400 km

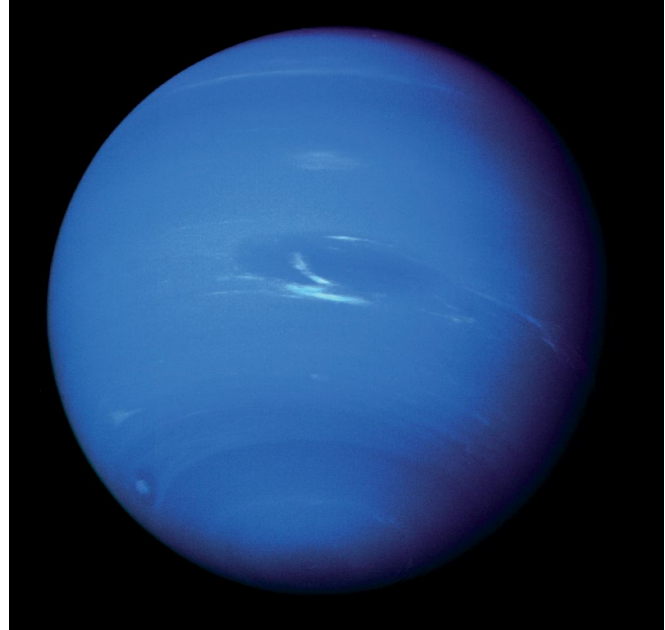
Bild linke Seite: Neptun und sein größter Mond Triton (Vordergrund), Montage. (© NASA/JPL/USGS)

2,6-mal mehr Energie in Form von Wärme abstrahlt, als er von der Sonne erhält. Als mögliche Ursache kommt die frontale Kollision mit einem oder mehreren Protoplaneten in der Frühphase in Betracht, wodurch die Einschlagsenergie tief ins Innere des Planeten eingebracht wurde. Die erwartete intensive Durchmischung des Planeteninneren und das Fehlen einer thermisch isolierenden Grenzschicht zwischen dem fluiden Inneren und der umgebenden Atmosphäre würden helfen den gegenwärtig beobachteten hohen Wärmeverlust des Neptun zu erklären. Dies steht im Einklang mit der Existenz anomal heißer, kompakter Regionen („hot spots“), die in der Nähe des Südpols nachgewiesen wurden und, so wird vermutet, sich auf die Häufigkeit chemischer Reaktionen und die Bildung von Aerosolen in der Neptunatmosphäre auswirken.

Im Jahr 1984 wurden bei Sternbedeckungen erstmals Ringbögen um Neptun entdeckt, ein wichtiger Hinweis auf ein mögliches Ringsystem. Auf den Bildern der Raumsonde *Voyager 2* waren fünf Jahre später 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 erkennen. Darüber hinaus wurden noch zwei bis drei schwächere Ringe entdeckt, die breiter sind und vermutlich aus kleineren, schlecht reflektierenden Teilchen bestehen. Benachbarte Schäfermonde sorgen aufgrund ihrer gegenseitigen Anziehungskraft dafür, dass die relativ staubreichen Verdichtungen der dunklen Ringe nicht innerhalb weniger Wochen vollständig zerfallen. Zudem werden Ringpartikel laufend durch Mikrometeoriteneinschläge auf die Oberflächen der inneren Neptunmonde nachgeliefert.

Neptunmonde

Neptun hat insgesamt 16 Monde, von denen sich Triton und Nereide außerhalb des Ringsystems aufhalten und 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. Die mittlere Dichte von rund 2060 kg/m^3 entspricht einem relativ hohen Gesteinsanteil. Nereide ist der kleinere und äußere der beiden schon lange bekannten Monde und bewegt sich auf einer extrem elliptischen Bahn. *Voyager 2* konnte Nereide nicht aus der Nähe beobachten, aber Lichtkurvenschwankungen zeigen, dass der Trabant entweder eine von der Kugelgestalt abweichende, lang gestreckte Form besitzt, oder über Materialien mit unterschiedlichem Rückstrahlvermögen (Albedo) an der Oberfläche verfügt.



Voyager 2 entdeckte sechs weitere Monde, von denen Proteus mit 420 Kilometern Durchmesser der größte dieser neu entdeckten Monde ist. Die übrigen fünf Monde Naiad, Thalassa, Despina, Galatea, Larissa weisen Durchmesser zwischen 60 und 200 Kilometern auf. In den Jahren 2002 und 2003 wurden mithilfe von Teleskopbeobachtungen fünf weitere, zwischen 40 und 65 Kilometer große Monde aufgefunden (Halimede, Psamanthe, Sao, Laomedeia und Neso). Im Jahre 2013 wurde mit *Hubble* der 14. Mond Hippocamp entdeckt, und schließlich wurden 2021 zwei weitere Trabanten gefunden, die zunächst die Bezeichnungen S/2021 N 1 und S/2002 N 5 erhielten. Alle drei Monde haben Durchmesser zwischen 20 und 35 Kilometer.

Triton ist wahrscheinlich der einzige größere Trabant im Sonnensystem, der nicht gemeinsam mit seinem Zentralplaneten entstanden ist. Denn Triton umläuft Neptun auf einer nahezu kreisförmigen Bahn, die etwa 23 Grad gegenüber dessen Äquatorialebene geneigt ist und entgegen der Rotationsrichtung des Neptun verläuft. Vermutlich gehörte Triton ursprünglich wie Pluto zur Klasse der Zwergplaneten und wurde beim Kreuzen der Neptunbahn aus dem inneren Kuipergürtel „eingefangen“. Starke Gezeiteneffekte sorgten dann dafür, dass die Rotations- und Umlaufdauer von Triton rasch miteinander synchronisiert wurden. Die anfangs elliptische Tritonbahn erreichte somit frühzeitig ihre heutige Kreisform, wobei ähnlich dem Erde-Mond-System eine Tritonhemisphäre stets Neptun zugewandt ist und die andere nach außen zeigt.

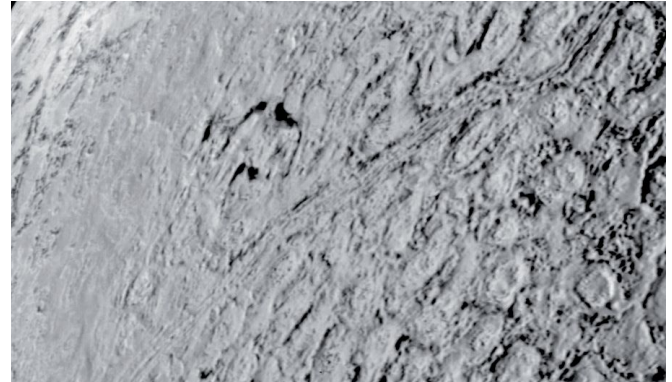
Es spricht einiges dafür, dass dabei während des Einfangs und der anschließenden Synchronisationphase das Innere Tritons durch

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

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 Prozent der Gesamtmasse Tritons auf einen zentralen Gesteinskern und etwa 25 Prozent auf die ihn umgebende Eisschale. Der Gesteinskern befindet sich vermutlich im Kontakt mit einem Untergrundozean, der von einer Eiskruste umgeben wird. Das Innere Tritons ähnelt somit denen des Jupitermondes Europa und des Saturnmondes Enceladus.

Die mittlere Temperatur an der Tritonoberfläche beträgt lediglich -240 Grad Celsius 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 Eis der Stoffe Kohlenmonoxid und -dioxid, Gesteinsanteilen und organischen Bestandteilen (weiteren Kohlenwasserstoffverbindungen). Neben dem Saturnmond Titan ist Triton der einzige Eismond, der über eine Stickstoffatmosphäre verfügt, die an der Oberfläche aber nur einen Druck von etwa 16 Mikobar erzeugt. Aufgrund des Wechselspiels der leichtflüchtigen Substanzen an der Oberfläche mit Tritons dünner Atmosphäre verändert sich deren räumliche Verteilung auf der Oberfläche im Laufe eines Tritonjahres dramatisch. Wegen der langen Umlaufdauer 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 aus dem Jahr 1989 und entstanden beim Vorbeiflug der Raumsonde *Voyager 2*. Sie zeigen eine geologisch komplexe Oberfläche, aber auch rätselhafte Strukturen, wie das in Anlehnung an die Schale bestimmter Honigmelonen sogenannte „Cantaloupe“-Terrain, das bisher nur auf Triton gesehen wurde. Auf den Bildern sind vergleichsweise wenig Einschlagskrater zu sehen, außerdem sind die Krater relativ klein, verglichen mit denen auf den Satelliten von Jupiter oder Saturn. 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. Die geringe Zahl von Kratern auf Triton deutet auf ein relativ junges Oberflächenalter hin. Es ist somit gut möglich, dass unter den Eismonden Triton neben dem Jupitermond Europa und den Saturnmonden Titan und Enceladus 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 um den Südpol die Oberfläche überziehen und durch ihre Orientierung die vorherrschenden Windrichtungen anzeigen. Vermutlich entstand das als Cantaloupe-Terrain bezeichnete Netz aus Vertiefungen und Hügeln durch tägliche Sublimationsprozesse in der Eiskruste Tritons. Gezeitenwirkungen könnten die Ursache für Deformationen der Oberfläche sein, die sich in linearen Bruchstrukturen und Bergrücken zeigt, die vermutlich erst in jüngerer Zeit entstanden sind. Die Bergrücken mit 10 bis 25 Kilometern Breite, bis zu 1000 Kilometern Länge und rund 200 Metern Höhe ähneln vergleichbaren Geländeformen auf dem Jupitermond Europa.

Triton ist neben der Erde, dem Jupitermond Io und dem Saturnmond Enceladus der vierte, im Sonnensystem bekannte Körper, der bei vergleichsweise geringer Intensität auch heute noch vulkanisch aktiv ist. Darauf deuten geysirähnliche Ausbrüche in der Südpolregion hin, in deren Verlauf dunkle Eruptionswolken senkrecht nach oben steigen und sich in einer Höhe von etwa acht 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. Das Phänomen kann aber auch mit eher gemächlichem 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, also vulkanische Förderzentren, gefüllt mit Material, das vermutlich in zähflüssiger Form an die Oberfläche austritt und dort Ebenen bildet, die aber im Unterschied zu irdischer Lava aus einem Gemisch von Wasser und Ammoniak bestehen.

Bild: „Cantaloupe“-Oberfläche auf Triton. (© NASA/JPL)



KUIPERGÜRTEL UND ZWERGPLANETEN

Kuipergürtel

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

Die Objekte des Kuipergürtels heißen auf Englisch „Kuiper-Belt Objects“ (KBOs). Der Name ist aber umstritten, weshalb viele Wissenschaftler die Bezeichnung „Trans-Neptunian Objects“ (TNOs) bevorzugen. Die TNOs sind wahrscheinlich übriggebliebene Kleinplaneten oder Bruchstücke aus der Zeit der Planetenentstehung. Nach der heutigen Theorie gehören sie zu den ersten Objekten, die vor 4,56 Milliarden Jahren aus der Gas- und Staubscheibe um die neu entstandene Sonne kondensiert sind. Kollisionen zwischen solchen primitiven Kleinkörpern, den Planetesimalen, haben nach und nach zum Aufbau der Planeten geführt. Deswegen kann man die TNOs als heute noch in unveränderter Zusammensetzung existierendes, ursprüngliches Baumaterial der Planeten betrachten.

Astronomische Beobachtungen zeigen, dass viele junge Sterne von solchen Gas- und Staubscheiben umgeben sind. Deshalb ist die Vermutung begründet, dass Planeten auch bei anderen Sternen als Folge ähnlicher Prozesse, wie sie zur Planetenentstehung in unserem eigenen Sonnensystem geführt haben, entstehen oder entstanden sind. Weil es sich bei den TNOs um Körper handelt, die nahezu unveränderte Überbleibsel aus der Frühgeschichte unseres Sonnensystems sind,

Bild: Der eisbedeckte Zwergplanet Eris auf seiner Bahn um die zehn Milliarden Kilometer entfernte, als hell leuchtender Stern sichtbare Sonne in einer künstlerischen Darstellung. (© NASA, ESA, and A. Schaller (for STScI))

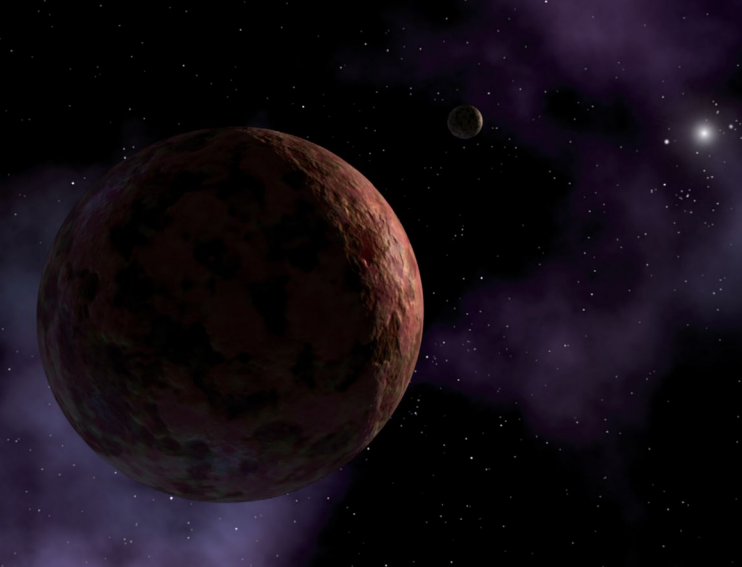
Bild linke Seite: Pluto und Charon, globale farbverstärkte Ansichten aus Aufnahmen der Sonde *New Horizons*. (© NASA/JHUAPL/SWRI)



haben sie eine große Bedeutung für die Planetenforschung. Ihre Untersuchung ermöglicht wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse über das universelle Phänomen der Planetenentstehung.

Ein weiterer Grund für das starke wissenschaftliche Interesse an den TNOs ist die Vermutung, dass auch die kurzperiodischen Kometen aus dem Kuipergürtel stammen. Die Umlaufbahnen von TNOs können sich unter dem Einfluss von Neptun und anderen äußeren Planeten ändern. Auf diese Weise findet gelegentlich ein TNO den Weg ins innere Sonnensystem. Bei seiner Annäherung an die Sonne und der dadurch folgenden Erwärmung des Objekts verdampft ein Teil des eisigen Materials. Dadurch entsteht eine Koma und meist auch ein Schweif. So verwandelt sich ein TNO in einen Kometen.

Der Kuipergürtel ist nicht mit der Oortischen Wolke zu verwechseln, einem riesigen Kometenreservoir, welches das Sonnensystem wie eine Kugel umhüllt und Billionen von eisigen Körpern enthalten soll. Dort dürften die langperiodischen Kometen ihren Ursprung haben. Die Oortische Wolke beginnt weit außerhalb des Kuipergürtels und reicht bis zu einer Entfernung von der Sonne von mehr als einem Lichtjahr oder über 60.000 Astronomischen Einheiten (AE; 1 AE entspricht etwa 150 Millionen Kilometern). Im Gegensatz zum Kuipergürtel ist allerdings die Existenz der Oortischen Wolke noch nicht durch direkte



Beobachtungen bewiesen, wird aber durch die räumliche Verteilung einer Vielzahl von alljährlich neu entdeckten Kometen indirekt belegt.

Pluto selbst gehört, so die heutige Einschätzung, zu den TNOs. Geriete Pluto in die Nähe der Sonne, würde er wahrscheinlich zu einem riesigen Kometen werden. Da die Umlaufperiode von Pluto aber in einer 2:3-Resonanz zum Sonnenumlauf Neptuns steht (zwei Umläufe Plutos entsprechen drei Umläufen von Neptun), ist die Plutobahn sehr stabil. Ähnliche dynamische Verhältnisse gelten für hunderte von anderen TNOs mit Durchmessern größer als 100 Kilometer, die „Plutinos“ getauft wurden. Entdeckungen der letzten Jahre belegen, dass es Objekte gibt, die sich in Entfernungen von hunderten von Astronomischen Einheiten um die Sonne bewegen. Der bislang größte Körper ist Sedna, ein Kleinplanet, der 2003 entdeckt wurde. Infolge seiner großen Distanz zur Sonne von etwa 87 AE sind Beobachtungen des Objekts allerdings sehr schwierig und sein geschätzter Durchmesser von etwa 1500 Kilometern ist mit großer Unsicherheit verbunden. Trotzdem gilt als gesichert, dass Sedna nicht viel kleiner ist als Pluto, der einen Durchmesser von knapp 2400 Kilometern hat.

Sednas Ursprung ist rätselhaft. Vielleicht entstand das Objekt im Gebiet der großen Planeten und ist durch deren starke Schwerkraftwirkung aus dieser Zone hinausgeschleudert worden. Einer anderen Theorie zufolge wurde Sednas Umlaufbahn in der Frühgeschichte des Sonnensystems durch nahe an der Sonne vorbeiziehende Sterne gestört, so dass sich Sedna heute in einer Art „Niemandsländ“ zwischen dem Kuipergürtel und der Oortschen Wolke befindet. Andere Planetenforscher spekulieren sogar, dass Sedna von außerhalb unseres Sonnensystems stammen könnte.

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

Die Entdeckung eines weiteren Objekts namens Eris, die im Jahr 2005 bekannt gegeben wurde, sorgte für besondere Aufmerksamkeit. In einer Entfernung von 97 AE war es gerade noch möglich, eine direkte Messung des Durchmessers von Eris mit dem *Hubble*-Weltraumteleskop durchzuführen. Das damalige Ergebnis, 2400 Kilometer (jüngere Messungen geben für Eris einen Durchmesser von 2272 Kilometern an), bedeutete, dass Eris und Pluto etwa gleich groß sind und führte zu einer kniffligen Frage: Wenn Pluto zu den Planeten gehört, warum sollte Eris dann nicht als zehnter Planet des Sonnensystems bezeichnet werden? Das Problem wurde noch größer durch die zunächst berechnete und heute bestätigte Annahme, dass es noch weitere solche Objekte jenseits der Neptunbahn gibt, die darauf warten, entdeckt zu werden und sogar größer sein könnten als Pluto und Eris.

Die Internationale Astronomische Union sorgte 2006 nach einer intensiven und kontrovers geführten Diskussion für Klarheit mit einer neuen Definition des Begriffs „Planet“ und die Einführung einer neuen Kategorie von Objekten im Sonnensystem, nämlich den „Zwergplaneten“. Pluto und Eris – in der Mythologie die Göttin der Zwietracht und des Streits – und zwei andere kleinere TNOs gehören jetzt zur Familie der Zwergplaneten. In diese Kategorie fällt auch Ceres, das größte Objekt im Asteroiden-Hauptgürtel zwischen Mars und Jupiter. Viele Objekte könnten in den kommenden Jahren die Familie der Zwergplaneten erweitern. Eris ist also die Hauptursache dafür, dass Pluto seinen Status als neunter und äußerster Planet verloren hat. Damit hat unser Sonnensystem seit 2006 nur noch acht „klassische“ Planeten.

Da die Empfindlichkeit der Teleskope und Instrumente, die den Astronomen heute zur Verfügung stehen, ständig zunimmt, gilt es als sicher, dass in den kommenden Jahren noch viel mehr solcher rätselhafter „Randbewohner“ des Sonnensystems entdeckt werden. Um einen solchen dürfte es sich auch bei dem bislang noch hypothetischen „Planet Neun“ handeln, der weit jenseits der Umlaufbahn von Neptun vermutet wird und bisher noch nicht beobachtet werden konnte. Eine Gruppe von Wissenschaftlern hält seine Existenz für wahrscheinlich, da sie in Bahnelementen einiger bekannter TNOs, den „Sednoiden“, Auffälligkeiten entdeckt haben, die darauf hindeuten, dass ein Körper von möglicherweise der zehnfachen Erdmasse auf einer Umlaufbahn von 400 bis zu 1500 AE die Sonne in etwa 10.000 Jahren umkreist.

Nachdem die Raumsonde *New Horizons* am 14. Juli 2015 an Pluto vorbeigeflogen war, konnte sie zu einem zweiten Ziel im Kuipergürtel gelenkt werden. Ausgewählt wurde das ein Jahr zuvor vom *Hubble*-Weltraumteleskop entdeckte Transneptunische Objekt (486958) 2014 MU₆₉ Arrokoth, das noch vor dem Pluto-Vorbeiflug als weiteres Missionsziel angekündigt wurde. Am Neujahrstag 2019 passierte *New*



Horizons Arrokoth in einem Abstand von 3000 Kilometern, der Vorbeiflug erfolgte also wesentlich dichter als bei Pluto. Zu diesem Zeitpunkt war Arrokoth etwa 43 AE von der Sonne entfernt. Alle Instrumente konnten eingesetzt und die Daten zur Erde übertragen werden. Das Objekt besteht aus zwei Einzelkörpern, die sich vermutlich in der Frühzeit des Sonnensystems durch einen sanften Kontakt zusammengefügt haben. Die größte Länge des Binärkörpers beträgt etwa 35 Kilometer. Die Oberfläche besteht aus Methanol, Cyanwasserstoff, Wassereis, Schwefel und komplexen organischen Stoffen, darunter wie auf Pluto Tholine. Stand 2024 ist Arrokoth das erdfernste Objekt, das aus der Nähe untersucht wurde. Der Himmelskörper ist nach dem Wort für „Wolke“ in der Sprache des in Virginia und Maryland beheimateten indigenen Powhatan-Volkes benannt – dort befindet sich auch das Operationszentrum für das *Hubble*-Weltraumteleskop.

Zwergplaneten

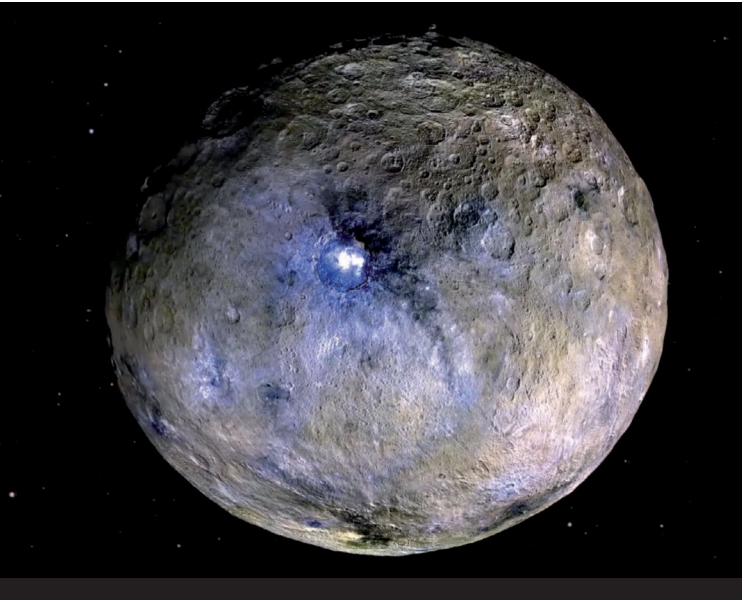
Am 24. August 2006 beschlossen die anwesenden Mitglieder der Internationalen Astronomischen Union (IAU) auf ihrer 25. Vollversammlung in Prag erstmals eine Definition für die Planeten unseres Sonnensystems. Fortwährende Beobachtungen und die Entdeckungen von großen Transneptunischen Objekten jenseits der Bahn Plutos, aber auch neue Erkenntnisse über Planetensysteme machten dies

notwendig. Die IAU fasste deshalb den Beschluss, dass Planeten und andere Körper unseres Sonnensystems mit Ausnahme der Monde sich in eine der drei Kategorien einordnen lassen sollen, die folgendermaßen definiert sind:

1. Ein Planet ist ein Himmelskörper, der selbst kein Stern ist und sich in einer Umlaufbahn um die Sonne befindet, ferner genügend Masse besitzt, um durch die eigene Schwerkraft eine annähernd kugelförmige Gestalt anzunehmen (das heißt, dass er sich im sogenannten „hydrostatischen Gleichgewicht“ befindet) und schließlich die Umgebung seiner Bahn von anderem kosmischen Material frei geräumt hat.
2. Im Gegensatz dazu ist ein Zwergplanet ein Himmelskörper, der sich ebenfalls im Orbit um die Sonne befindet und der, wie auch Planeten, genügend Masse besitzt, um durch die eigene Schwerkraft eine annähernd kugelförmige Gestalt anzunehmen (sich im hydrostatischen Gleichgewicht befindet), aber im Gegensatz zu Planeten die Umgebung seiner Bahn nicht von anderem kosmischen Material frei geräumt hat und außerdem kein Mond ist.
3. Alle anderen Objekte, die um die Sonne kreisen, mit Ausnahme der Monde, sollen gemeinsam als kleine Körper im Sonnensystem bezeichnet werden. Zu dieser Kategorie gehören fast alle Asteroiden, die meisten Objekte des Kuipergürtels und der Oortschen Wolke, sowie andere kleine Körper.

Als ersten Schritt hatte 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 transneptunische Objekte 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.

Bild oben: Das Kuipergürtelobjekt Arrokoth ist das am weitesten von der Erde entfernte von einer Raumsonde besuchte Objekt im Sonnensystem. Darstellung in annähernd Echtfarben. (© NASA/JHU-APL/SWRI/R. Tkachenko)



Ceres

Der heute als Zwergplanet eingestufte Asteroid Ceres wurde am 1. Januar 1801 von Giuseppe Piazzi entdeckt und nach der römischen Göttin des Ackerbaus und der Patronin der Insel Sizilien benannt, wo Piazzi mit dem Teleskop der Sternwarte von Palermo seine Entdeckung machte. Mit einem Durchmesser von etwa 950 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 äußeren Asteroidengürtel gleicht. Aus diesem Grund ist Ceres ausführlich im Kapitel „Asteroiden“ beschrieben. Ceres war zwischen 2015 und 2018 das zweite Ziel der NASA-Mission *Dawn*.

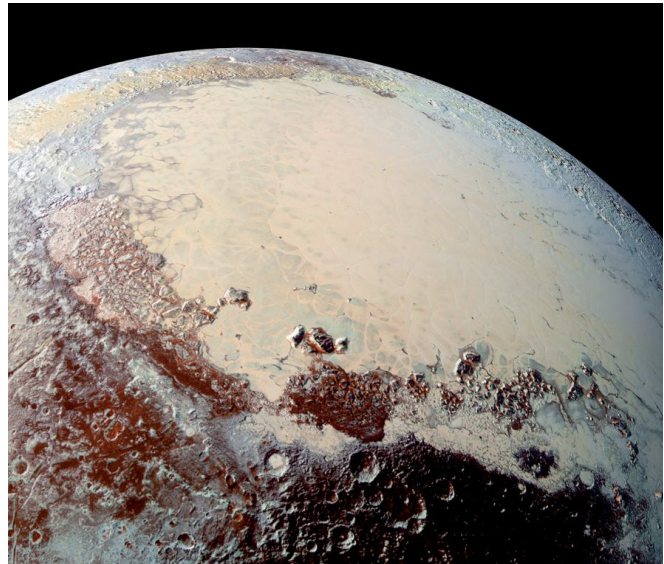
Bild oben: Ceres in kontrastverstärkten Farben. In der Bildmitte der Krater Occator (Durchmesser 90 Kilometer) mit hellen Salzablagerungen. (© NASA/JPL-Caltech/UCLA/IMPS/DLR/IDA)

Bild unten: Die fast kraterlose, geologisch junge Ebene Sputnik Planum auf Pluto, umgeben von der drei bis vier Milliarden Jahre alten Bergregion Viking Terra. (© NASA/JHUAPL/SWRI)

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. Pluto gehört zu einer Gruppe von möglicherweise bis zu 100.000 Objekten mit Durchmessern von mehr als 100 Kilometern, die jenseits der Umlaufbahn des Neptun die Sonne in einer schlauchförmigen Zone, dem Kuipergürtel, 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.

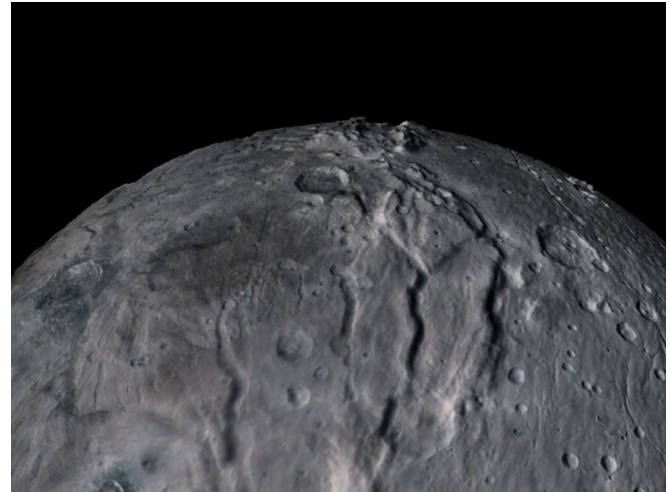
In einem größeren Fernrohr entpuppt sich Pluto als ein schwaches Lichtpünktchen 15. Größenklasse, und man muss schon sehr gut seine Position kennen, um ihn nicht mit einem Stern zu verwechseln. Entdeckt wurde Pluto im Jahre 1930 von Clyde Tombaugh nach jahrzehntelanger Suche, ausgelöst durch das Wissen um Störungen der Uranus- und Neptunbahn, die auf einen weiteren Planeten hindeuteten. Heute weiß man jedoch, dass Pluto zu wenig Masse besitzt, um die Neptunbahn stören können – deren minimale Schwankungen haben andere Ursachen. Seine Entdeckung war also ein wenig dem Zufall geschuldet.



Pluto läuft auf einer stark 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 zum einen um 17 Grad gegen die Ekliptik geneigt ist und zum anderen die Umlaufbahnen beider Körper eine Resonanz von 3:2 haben. Während dreier Neptunumläufe umrundet Pluto die Sonne zweimal. Im Mittel ist Pluto 39 Astronomische Einheiten von der Sonne entfernt, also zehn Astronomische Einheiten weiter als Neptun. Plutos Durchmesser beträgt nach neueren Messungen 2377 Kilometer. Seine Dichte wurde auf 1854 kg/m^3 bestimmt, was bedeutet, dass Pluto zu etwa zwei Dritteln aus Gestein und zu einem Drittel aus Eis bestehen muss. Heute ist der Gesteinskern von Pluto von einem dicken Mantel aus Eis umgeben, der an der Oberfläche zu großen Teilen von gefrorenem Methan, Stickstoff und Kohlenmonoxid bedeckt ist. Die Oberflächentemperatur beträgt etwa -230 Grad Celsius.

1978 entdeckte James Christy am 1,5 m-Reflektor des U.S. Naval Observatoriums in Washington, D.C., eine kleine Ausbuchtung am Plutoscheibchen: Der Mond Charon war entdeckt. Charon hat einen Durchmesser von 1212 Kilometern und umkreist Pluto in einem mittleren Abstand von 19.600 Kilometern einmal in 6,4 Tagen. Beide Körper rotieren „gebunden“, d.h. sie wenden sich gegenseitig stets dieselbe Hemisphäre zu. Das Massenverhältnis Mond zu Planet ist mit 1:10 das größte im Sonnensystem gefundene, so dass man Pluto und Charon auch als „Doppel-Zwergplaneten“ ansehen kann. Der Massenschwerpunkt des Systems liegt 1200 Kilometer über der Oberfläche Plutos. Mit Charons Entdeckung war man in der Lage, die Neigung der Rotationsachse Plutos verlässlicher zu bestimmen. Weil Pluto und Charon sich synchron um ihren gemeinsamen Schwerpunkt drehen, fällt die Bahnebene Charons mit der Äquatorebene beider Körper zusammen. Die Rotationsachse Plutos ist demzufolge um $122,5^\circ$ gegen die Bahnebene geneigt. Nur Venus und Uranus weisen – mit 177° (Kopflage) bzw. 98° (Schräglage) – eine ähnlich ungewöhnliche Orientierung der Polachse auf.

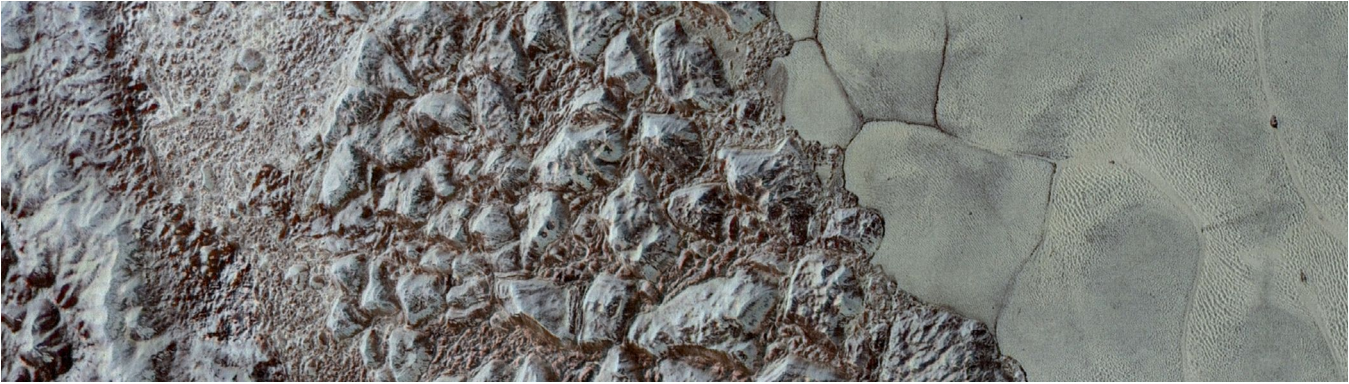
Im Mai 2005 sind zwei weitere kleine Plutomonde – Nix und Hydra – entdeckt worden, die sich in der gleichen Bahnebene wie Charon bewegen. Das deutet darauf hin, dass die Monde nicht „eingefangen“ wurden, sondern zusammen mit Charon entstanden sind, der das Ergebnis einer gigantischen Kollision zweier Objekte in Plutogröße vor vier Milliarden Jahren sein könnte. 2011 und 2012 wurden auf Aufnahmen des *Hubble*-Weltraumteleskops mit Styx und Kerberos der vierte und fünfte Mond entdeckt. Mit geschätzten Größen von 10 bis 17 Kilometern sind sie die kleinsten Plutomonde.



War bis vor kurzem über die Landschaften und die Geologie von Pluto und Charon kaum etwas bekannt, änderte der Vorbeiflug der Raumsonde *New Horizons* am 14. Juli 2015 unser Bild des beliebten Zwergplaneten schlagartig. *New Horizons* wurde gezielt als kleine Raumsonde und deshalb als Vorbeiflugmission geplant, um das ferne Ziel überhaupt erreichen zu können, ehe Pluto sich auf seiner elliptischen Bahn in diesem Jahrhundert noch viel weiter von der Sonne entfernt. So kam es, dass *New Horizons* als die bisher schnellste Raumsonde mit etwa 70.000 Kilometer pro Stunde von der Erde weg neun Jahre lang bis hinter die Neptunbahn flog, um dann mit einer Relativgeschwindigkeit von 52.500 Stundenkilometer durch die Ebene der Mondebahnen hindurchzufliegen. Innerhalb weniger Stunden wurden alle vorgesehenen Experimente durchgeführt und hunderte von brillanten Aufnahmen gemacht, deren Übertragung zur Erde wegen der großen Entfernung allerdings über ein Jahr andauerte.

Die Oberfläche Plutos zeigt sowohl in ihrer Struktur als auch in ihrer Helligkeit starke Kontraste. Es gibt Gebiete mit relativ vielen Einschlagskratern, die auf ein hohes Alter von mehr als drei oder sogar vier Milliarden Jahren hindeuten. Aber auch ausgedehnte Ebenen, auf denen es fast keine Krater gibt, die also in geologisch jüngerer Vergangenheit, vielleicht erst in den letzten hundert Millionen Jahren entstanden sein müssen. In Tombaugh Regio und Sputnik Planum, einem

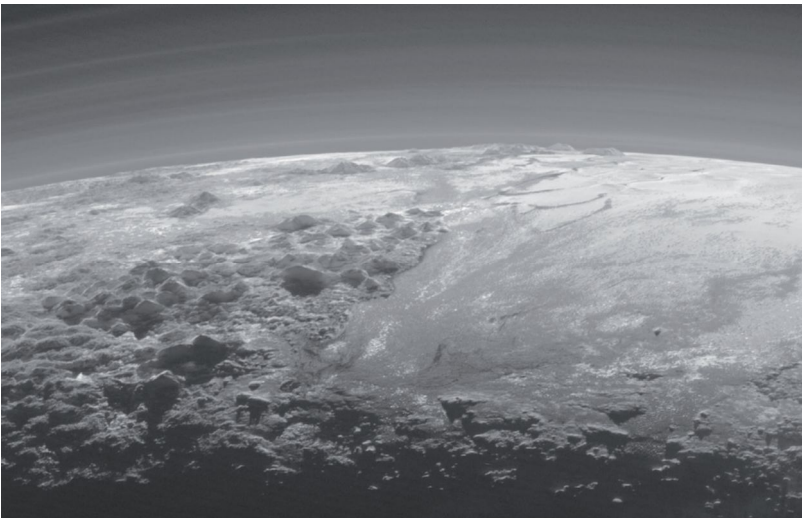
Bild: Die tektonisch verformte Äquatorregion auf Charon mit dem Grabenbruch Serenity Chasma. (© NASA/JHUAPL/SWRI/LPI)



Gebiet von etwa 1000 Kilometer Durchmesser, sind in der eisigen Oberfläche Fließstrukturen und Polygone erkennbar, die möglicherweise auf Konvektionszellen von Stickstoffeis unter der Eiskruste hindeuten. Unklar ist, woher das eigentlich bei diesen tiefen Temperaturen vollkommen spröde Eis durch eine Energiequelle erwärmt werden könnte, plastisch verformbar wird und diese Landschaftsformen entstehen lässt. Möglicherweise handelt es sich um die Restwärme eines Einschlags in der Frühzeit von Pluto, der mit seiner Impaktenergie die eisigen Substanzen zeitweise zum Teil geschmolzen hat und dessen Nachwirkungen das Antlitz des Zwergplaneten noch heute prägen.

In den angrenzenden Gebieten gibt es zahlreiche zwei- bis dreitausend Meter hohe Berge aus Wassereis, die wegen der hohen Auflast an

ihrer Basis eigentlich „zerfließen“ müssten, doch das ist nicht der Fall – ein weiteres noch ungelöstes Rätsel der Geologie auf Pluto. Auffallend ist ein dunkelbraun-rötliches Material, das an vielen Stellen Plutos, und in weiter Verbreitung auch auf Charon zu sehen ist. Dabei handelt es sich um eine komplexe Ansammlung kohlenstoffhaltiger Moleküle, vermischt mit Stickstoff und Wasserstoff, die als Tholine bezeichnet werden. Es wird vermutet, dass sich diese Tholine unter der Einwirkung des Sonnenwindes und von UV-Strahlung aus den Stoffen der Eiskruste bilden. Auf einigen Bildern von *New Horizons* wurden kreisrunde Berge mit einer Art Krateröffnung identifiziert, die als Eis- oder Kryovulkane interpretiert werden können. Der Verlauf von langgestreckten Gebirgsketten lässt den Schluss zu, dass es beim Abkühlen der Eiskruste Plutos zu Schrumpfungsprozessen und in der Folge zu einem Auftürmen dieser Bergücken kam.



Wenn Pluto auf seiner Bahn seinen sonnennächsten Punkt bei etwa 30 AE durchläuft, bildet der Zwergplanet eine dünne, komplex geschichtete Atmosphäre aus, die bis in eine Höhe von 3000 Kilometer reicht. Sie besteht im Wesentlichen aus Stickstoff mit geringen Anteilen an Kohlenmonoxid, Methan und Argon. Nähert sich Pluto seinem sonnenernsten Punkt bei knapp 50 AE, kondensieren diese Gase und rieseln in Form gefrorener Partikel auf die Oberfläche. Der

Bild oben: Übergang von den Bergen der Al Idrisi Montes zur Ebene Tombaugh Regio mit seiner glatten, aus Eispolygonen bestehenden Oberfläche. Die Bildbreite beträgt 80 Kilometer. (© NASA/JHUAPL/SWRI)

Bild unten: Plutos dünne, 300 Kilometer hohe geschichtete Atmosphäre im Gegenlicht. Auf der Oberfläche die bis zu 3500 Meter hohen Berge der Norgay Montes. (© NASA/JHUAPL/SWRI)

Gasdruck auf Pluto ist mit 0,00001 bar allerdings nur ein hunderttausendstel so hoch wie an der Erdoberfläche.

Eris (2003 UB₃₁₃)

Im Juli 2005 gab Michael E. Brown vom California Institute of Technology die Entdeckung eines Objekts aus dem Kuipergürtel bekannt, das mit 2272 Kilometern Durchmesser fast so groß ist wie Pluto. Nach der provisorischen Bezeichnung 2003 UB₃₁₃ erhielt dieses Objekt den Namen Eris nach der griechischen Göttin der Zwietracht und des Streits. Ein ebenfalls entdeckter Mond S/2005 (2003 UB₃₁₃) 1 wurde nach Eris' Tochter und dem Dämonen der Ungesetzlichkeit, Dysnomia, benannt.

Diese neuen Beobachtungen von Eris beruhen auf Messungen der Wärmeabstrahlung, deren Werte ähnlich wie bei Pluto sind. Das ermöglichte die Bestimmung der Größe von Eris. Der Körper ist auch insofern bemerkenswert, weil sich dieser Zwergplanet auf seiner sehr lang gestreckten und um 44 Grad geneigten Bahn zurzeit in einer Entfernung von 96 Astronomischen Einheiten etwa an dem von der Sonne am weitesten entfernten Punkt – dem Aphel – befindet. Im sonnennächsten Punkt der Bahn – dem Perihel – wird der Abstand zur Sonne 38 Astronomische Einheiten betragen und seine Helligkeit etwa der Plutos entsprechen. Erst 2258 wird Eris das Perihel wieder durchlaufen. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Eris insgesamt 557 Jahre.

Makemake (2005 FY₉)

Dieser Zwergplanet und „Plutoid“ wurde 2005 entdeckt und umkreist die Sonne weit außerhalb der Umlaufbahn des Neptun. Er hat mit rund 1600 Kilometern Durchmesser etwa zwei Drittel der Größe von Pluto. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt Makemake ungefähr 310 Jahre, der Abstand zur Sonne beträgt zwischen sechs und acht Milliarden Kilometer (40 bis 53 Astronomische Einheiten). Makemake ist nach einer Schöpfergöttheit der polynesischen Bevölkerung der Osterinseln benannt.

Haumea (2003 EL₆₁)

Seit September 2008 gehört auch Haumea zu den Zwergplaneten. Haumea wurde 2003 entdeckt. Seine äußere Form ähnelt einer dicken ovalen, in der Mitte etwas dickeren Zigarre mit einem Durchmesser, der dem von Pluto entspricht. Haumea rotiert ungewöhnlich schnell in nur vier Stunden um die eigene Achse. Möglicherweise ist das der Grund für seine langgezogene Form. Haumea bewegt sich auf einem stark elliptischen Orbit außerhalb der Neptunbahn und wird von zwei Monden begleitet: Hi'iaka und Namaka. Sie sind wie Haumea nach göttlichen Wesen der hawaiianischen Mythologie benannt.

In Zahlen		
Ceres	Mittlerer Sonnenabstand (AE)	2,77
	Umlaufdauer (Jahre)	4,60
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,08
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	10,59°
	Durchmesser (km)	910–974
Pluto	Bekannte Monde	0
	Mittlerer Sonnenabstand (AE)	39,48
	Umlaufdauer (Jahre)	247,74
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,25
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	17,1418°
Eris	Durchmesser (km)	2377
	Bekannte Monde	5
	Mittlerer Sonnenabstand (AE)	67,781
	Umlaufdauer (Jahre)	558,04
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,44
Makemake	Bahnneigung gegen die Ekliptik	44,0445°
	Durchmesser (km)	2272 ± 12
	Bekannte Monde	1
	Mittlerer Sonnenabstand (AE)	45,715
	Umlaufdauer (Jahre)	309,09
Haumea	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,15586
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	29,00685°
	Durchmesser (km)	1430 ± 15
	Bekannte Monde	1
	Mittlerer Sonnenabstand (AE)	43,218
	Umlaufdauer (Jahre)	284,12
	Bahnexzentrizität (kreisförmig = 0)	0,191
	Bahnneigung gegen die Ekliptik	28,19°
	Durchmesser (km)	2000 × 1500 × 1000
	Bekannte Monde	2



KOMETEN

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

Der Ursprung der Kometen war lange Zeit unklar. Aristoteles siedelte diese leuchtenden Gebilde in den höchsten Schichten der irdischen Lufthülle an und vermutete, dass es sich dabei um Ausdünstungen der Erde handelte. 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. Isaac Newton versuchte sich mit seiner im Jahr 1687 etablierten Gravitationslehre an einer Berechnung der Bahn des Großen Kometen von 1680. Das Ergebnis stimmte genau mit den Aufzeichnungen überein.

Dies veranlasste den Universalgelehrten Edmond Halley, ein Freund Newtons, die neue „Weltformel“ auch auf Bahndaten anderer Kometen anzuwenden. Dabei stützte sich Halley auf Messungen des von ihm selbst observierten Kometen von 1682, ferner Beobachtungen anderer Kometen jener Zeit, aber auch auf antike Aufzeichnungen. Einige dieser Kometen hatten auffallend ähnliche Bahnen. Halley schloss folgerichtig, dass es sich bei dem Kometen, den Johannes Kepler in Linz 1607 sah, und dem, den der bayerische Astronom Peter Apian 1531 beschrieb, um ein- und denselben Kometen handelte – den später nach ihm benannten Kometen 1P/Halley.

Damit war Edmond Halley der Erste, der zeigte, dass manche Kometen periodisch wiederkehren. Sie kommen aus der Tiefe des Planetensystems in die Nähe der vier inneren Planeten, umrunden die Sonne – und verschwinden wieder jenseits der Bahnen von Jupiter und



Saturn. Ihre Wege gleichen meist mehr oder weniger lang gestreckten Ellipsen, obwohl auch offene Parabel- und Hyperbelbahnen möglich sind. Halley war so überzeugt von seinen Berechnungen, dass er vorhersagte, dass der Komet von 1682 nach etwa 76 Jahren wieder zu sehen sein würde. Tatsächlich tauchte der Komet Ende 1758 wieder auf (was Edmond Halley aber nicht mehr erlebte). 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 Kilo-

metern 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 ist dies die Region der so genannten Transneptunischen Objekte (TNOs), zu denen auch Pluto gezählt wird und die sich in einem Torus außerhalb der Neptunbahn wie ein Donut bis zu ungefähr 100 Astronomische Einheiten (AE) aufhalten. Dieser „Schlauch“, der die Neptunbahn umgibt, ist die Quellregion von kurzperiodischen Kometen, die Umlaufzeiten um die Sonne von bis zu 200 Jahren und gegenüber der Ekliptik nur wenig geneigte Bahnen haben. Diese Zone wird auch Kuipergürtel genannt.

Noch viel weiter ins All erstreckt sich das größere kugelförmige Kometenreservoir der Oort'schen Wolke. Diese dehnt sich in einem Sonnenabstand von über tausend AE bis zu mehr als 60.000 AE aus, also etwa einem Lichtjahr oder 9,5 Billionen Kilometer (und vielleicht sogar noch weiter), und bildet so gewissermaßen für Körper eine Grenze des Sonnensystems. Der holländische Astronom Jan Hendrik Oort erkannte, dass die langperiodischen Kometen – solche, die Umlaufzeiten von mehr als 200 Jahren haben oder sogar nur einmal in Sonnennähe

Bild oben: Komet Hale-Bopp mit Staubschweif (weiß) und Plasmaschweif (blau), aufgenommen im April 1997. (© Observatory Slovenia)

Bild linke Seite: Komet Lovejoy über Santiago, Chile. (© Y. Beletsky (LCO/ESO))

auftauchen – aus allen Richtungen ins innere Sonnensystem gelangen und ihr Ursprungsgebiet folglich die Sonne kugelförmig umgeben muss. Die Oortsche Wolke beherbergt vermutlich Billionen von Kometenkernen, die ursprünglich auch aus der Region der äußeren Planeten stammen und dann durch gravitative Wechselwirkungen in die Oortsche Wolke hinaus drifteten. Zum Teil könnten sie aber auch aus der Milchstraße eingefangen worden sein, ihren Ursprung also außerhalb des Sonnensystems haben. Die mit Modellrechnungen abgeschätzte Gesamtmasse all dieser Körper könnte von einer Erdmasse bis vielleicht sogar zur hundertfachen Masse der Erde betragen.

Aufgrund ihres großen Abstandes zur Sonne, um die sie sich sehr langsam bewegen, bleiben die Kometen extrem kalt und können dadurch auch flüchtige Bestandteile in Form von Eis lange Zeit konservieren. Zudem erfahren sie kaum Veränderungen durch die Wirkung der Sonne und chemische Reaktionen. Kometen gelten deshalb als wichtige Zeitzeugen der frühen Entwicklung unseres Sonnensystems. Ihre Herkunft aus den sonnenfernen Regionen des Kuipergürtels und vor allem der Oortschen Wolke lässt vermuten, dass sie sich seit ihrer Entstehung nur wenig verändert haben. Geringfügige, durch Schwerkräfteinflüsse aus der Milchstraße oder durch vorbeiziehende Sterne verursachte Bahnstörungen können den einen oder anderen Kometen ins innere Sonnensystem lenken. Geraten sie dabei in die Nähe der Sonne, tauen die gefrorenen Bestandteile auf und strömen als Gas ins Weltall. Diesen Prozess, das Umwandeln von Eis in Gas, nennt man Sublimation. Dabei reißt das Gas Staubpartikel von der Kometenoberfläche mit, die das Sonnenlicht reflektieren und erst dann den Kometen, oder genauer gesagt seine Atmosphäre, die Koma, und schließlich seinen Schweif sichtbar werden lassen.

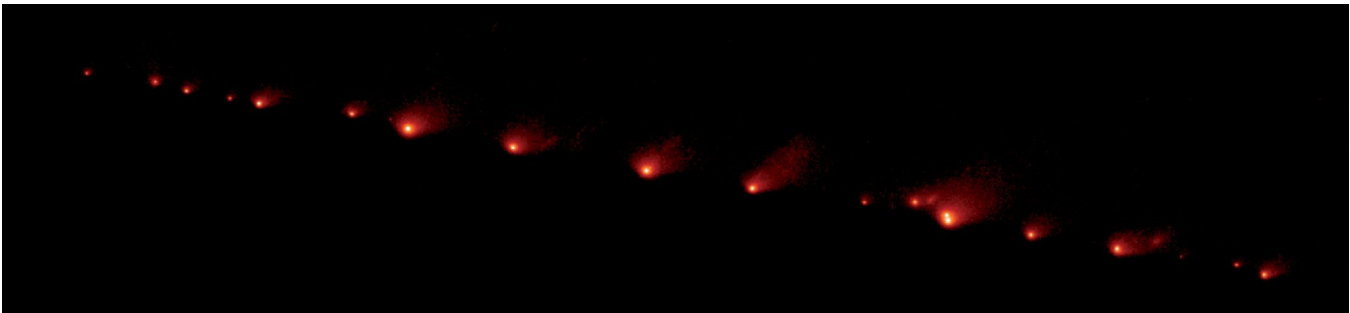
Durch diese sogenannte kometare Aktivität entsteht um den kleinen Kern zunächst eine neblig-diffuse Kometenatmosphäre von zehn- bis hunderttausend Kilometern Durchmesser – die Koma. Die Aktivität

von Kometen wird von sublimierendem Wassereis, aber auch durch Kohlendioxidis getrieben und ist entsprechend der Sonneneinstrahlung stark richtungsabhängig und inhomogen. Wenn der Komet etwa die Marsbahn erreicht hat, werden die Staub- und Gasteilchen vom Druck des Sonnenwindes bzw. dessen auf die ionisierten Gase wirkenden elektromagnetischen Kräfte abgelenkt und bilden einen auffallend hellen, von der Sonne weg gerichteten Schweif aus. Dieser besteht aus zwei Teilen: zum einen dem leicht gekrümmten Staubschweif und zum anderen dem geraden Ionen- oder Plasmaschweif, der eine Länge von mehr als hundert Millionen, manchmal sogar bis zu dreihundert Millionen Kilometern haben kann. Das Phänomen des Kometenschweifs, das manchmal über Wochen und Monate auch von der Erde mit bloßem Auge beobachtet werden kann, macht das Erscheinen dieser Himmelskörper zu ganz besonderen Ereignissen.

Kometen haben nur einen geringen inneren Zusammenhalt. Mitunter zerfallen sie in mehrere Teile, insbesondere wenn sie der Sonne zu nahe kommen, und viele stürzen sogar in sie hinein. Der Zerfall eines Kometen hat zur Folge, dass sich seine Trümmer entlang seiner Bahn verteilen. Nähert sich die Erde dieser Trümmerwolke dringen die kleinen Staubpartikel als Meteore in die Erdatmosphäre ein, verglühen und sind als Sternschnuppen ein bekanntes Phänomen. Viele Meteor-schauer wie die der Perseiden oder Leoniden lassen sich auf zerfallene Kometen oder Kometenausströmungen zurückführen.

Ein besonderes Ereignis war 1992 das Auseinanderbrechen des Kometen P/Shoemaker-Levy 9 (SL9) unter dem Einfluss der Gezeitenkräfte des Jupiters. Es entstanden 21 Fragmente zwischen 50 und 2000

Bild: Nahinfrarotaufnahme des *Hubble Space Telescope* des über eine Strecke von 1,1 Millionen Kilometer ausgedehnten „Zuges“ der 21 Bruchstücke des Kometen Shoemaker-Levy 9 wenige Wochen vor deren Einschlag im Juli 1994 in der Jupiteratmosphäre. Alle Fragmente haben eine Koma ausgebildet. (© H.A. Weaver, T.E. Smith (Space Telescope Science Institute) and NASA)



Meter Größe, die sich auf einer mehrere Millionen Kilometer langen „Perlenkette“ in einer Umlaufbahn um den Jupiter anordneten. Schnell wurde klar, dass sich alle Bruchstücke auf einem spiralförmigen 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 Auswertung ergab, dass bei den Einschlägen das Energieäquivalent von insgesamt etwa 50 Millionen Atombomben freigesetzt wurde. In der Jupiteratmosphäre hinterließen die Einschläge Spuren größer als der Durchmesser der Erde, die noch lange mit Teleskopen zu beobachten waren.

Ihre Ursprünglichkeit verdanken die Kometen ihrer im Unterschied zu den Planeten geringen Schwerkraft, der niedrigen Wahrscheinlichkeit von Zusammenstößen und den niedrigen Stoßgeschwindigkeiten im äußeren Sonnensystem, sowie ihren tiefen Temperaturen. Daher sind gerade die Ergebnisse der Kometenforschung für Aussagen über die frühe Entwicklung des Sonnensystems bedeutend. Selbst Asteroiden waren deutlich höheren Temperaturen ausgesetzt und sind deshalb stärker verändert worden als Kometen. Von den Asteroiden unterscheiden sich die Kometen daher vor allem durch ihren höheren Gehalt an flüchtigen Molekülen wie Eis von Wasser, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan und vielen anderen flüchtigen Stoffen. Jedoch sind die Unterschiede zwischen beiden Objektklassen nicht so groß wie früher gedacht. Sogar im Asteroidengürtel wurden Objekte mit geringer kometenähnlicher Aktivität entdeckt, den sogenannten aktiven Asteroiden. Es gibt aber auch gealterte Kometen, die ihre eisförmigen Bestandteile an der Oberfläche komplett sublimiert haben und daher keine Ausgasung mehr zeigen.

Die Untersuchung von Kometen erfolgte zunächst ausschließlich mit Teleskopen, mit denen optische Beobachtungen und später auch spektroskopische Messungen durchgeführt werden konnten. Einen großen Sprung nach vorne machte die Kometenforschung im Jahre 1986, als der Komet Halley, wie vorausberechnet, wieder im inneren Sonnensystem auftauchte und mehrere Raumsonden gestartet wurden, die bei Vorbeiflügen bzw. Durchflügen des Kometenschweifs neue Erkenntnisse sammelten. Halley ist wegen seiner regelmäßigen Wiederkehr und seines ausgeprägten Schweifs der bekannteste unter den periodischen Kometen. Die größte Entfernung von der Sonne, das Aphel, erreicht er jenseits der Neptunbahn. Das war zuletzt am 9. Dezember 2023 der Fall – nun fällt „der Halleysche“ wieder zurück ins innere Sonnensystem. Sein Perihel, den sonnennächsten Punkt, durchläuft er zwischen der Merkur- und Venusbahn – damit gehört er zu den kurzperiodischen Kometen. Das nächste Mal wird dies im Juli 2061 stattfinden.



Die sowjetischen Sonden *Vega 1* und *Vega 2* flogen im März 1986 in weniger als 10.000 Kilometern Distanz am Kometenkern von wenigen Kilometern Durchmesser vorbei und übermittelten Fotos und Messdaten. Kurz darauf näherte sich die ESA-Sonde *Giotto* Halley bis auf 600 Kilometer und lieferte gut aufgelöste Bilder des unförmigen und fast schwarzen Kerns des Kometen, von dem an mehreren Stellen Aktivität in Form von „Jets“ – Gas- und Staubströmen – ausging. In der Koma und dem Gasschweif des Kometen hat man spektroskopisch viele Moleküle nachgewiesen, die auch vom interstellaren Medium her bekannt sind. Das war eine Bestätigung der Annahme, dass Kometen kleine, nicht allzu sehr veränderte Überbleibsel aus der frühesten Zeit des Sonnensystems sind.

Die NASA-Mission *Deep Space 1* flog 2001 in nur 2200 Kilometern Abstand am Kometen 19P/Borelly vorbei und testete dabei vorwiegend neue Technik und Instrumente. Zwei echte Wissenschaftsmissionen der NASA folgten einige Jahre später: Die Sonde *Deep Impact* besuchte 2005 den kurzperiodischen Kometen 9P/Tempel 1, der ursprünglich aus dem Kuipergürtel stammt. Wesentliches Element der Weltraummission war ein Einschlagsexperiment, das eine 372 Kilogramm schweres Projektil aus Kupfer mit einer Geschwindigkeit von

Bild: Kern des Kometen 9P/Tempel 1, Ziel des Einschlagsexperiments *Deep Impact* im Jahre 2005. (© NASA/JPL/UMD)

37.000 Kilometern pro Stunde auf den Kometen schoss, dabei Material in den Weltraum schleuderte und einen etwa 100 Meter großen Krater schuf. Das Auswurfmaterial wurde mit den Instrumenten der Sonde und mit Teleskopen auf der Erde untersucht. Damit gelang erstmals eine Analyse von Material, das von einer Kometenoberfläche stammte. 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 81P/Wild 2 in einer Entfernung von 240 Kilometern. Dabei sammelte sie Komamaterial mit Hilfe eines Fangarms in Form eines Tennisschlägers. Weiches Material bedeckte den Fangarm, und Staubteilchen des Kometen, die in dieses Material hineinfliegen, wurden im Januar 2006 in einer Kapsel an einem Fallschirm zur Erde gebracht. Die Staubproben lieferten neue Erkenntnisse zur Zusammensetzung und Entstehung von Kometen. So wurden im Staub Hochtemperaturminerale gefunden, die bewiesen, dass der Komet auch Bestandteile aus den ursprünglich heißen inneren Zonen des Sonnensystems enthält. Die Sonde selbst wurde anschließend unter dem



Namen *Stardust-NExT* auf die Weiterreise zum Kometen 9P/Tempel 1 geschickt. Im Februar 2011 passierte sie diesen Kometenkern in 180 Kilometern Abstand und funkte Bilder zur Erde, konnte aber den von *Deep Impact* erzeugten Krater auf Tempel 1 nicht mehr sicher nachweisen.

In den letzten Jahrzehnten wurde das Wissen um Kometen durch die beschriebenen Weltraummissionen, aber auch durch Beobachtungen mit Teleskopen auf der Erde stark erweitert. Es wurde offensichtlich, dass ein von dem amerikanischen Astronomen Fred Whipple 1950 vorgeschlagenes Modell, nach dem Kometen eine Art „schmutzige Schneebälle“ darstellen, also Körper aus gefrorenen flüchtigen Elementen und Molekülen, die mit kohlenstoffhaltigen Verbindungen vermischt sind, der Wirklichkeit vermutlich nahe kommt. Allerdings wurde auch klar, dass nicht Eis, sondern Staub die dominierende Komponente ist. Ferner wusste man zwar, dass Kometen poröse Körper geringer Dichte sind, doch jede Beobachtung zeigte auch, dass Kometen ganz unterschiedliche Zusammensetzungen haben, was bedeutet, dass es einen „Standardkometen“ nicht gibt.

Wichtige Fragen blieben jedoch unbeantwortet, wie zum Beispiel jene nach der Bedeutung von Kometen für die Entstehung des Planetensystems und sogar des Lebens. Wie sind Kometen entstanden – und wo? Sind Kometen tatsächlich Zeugen der Geburt unseres Sonnensystems und was lernen wir von ihnen? Unklar ist zudem, warum Kometen so unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, eine auffallend heterogene Zusammensetzung haben und man direkt auf ihrer Oberfläche so wenig Eis findet. Man wollte besser verstehen, wann und wie die Aktivität von Kometen einsetzt und abläuft bzw. warum sich diese manchmal drastisch erhöht und warum Kometen so oft auseinanderbrechen.

Um diese Fragen beantworten zu können, wurde schon 1985 die Idee einer großen europäischen Kometenmission geboren, die den Namen *Rosetta* erhielt. Wie beim Stein von Rosetta, mit dem die Hieroglyphen des Alten Ägypten entziffert werden konnten, sollte die Mission die Frühgeschichte des Sonnensystems anhand der Untersuchung eines Kometen über einen längeren Zeitraum aus der Nähe „entziffern“. Gestartet 2004, erreichte *Rosetta* im August 2014 nach mehr als sechs Milliarden Kilometern Flugstrecke den Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko in einer Sonnenentfernung von etwa 3,5 Astronomischen Einheiten (AE). Ziel der Mission war es, die Dynamik der in

Bild: Komet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Ziel der Raumsonde *Rosetta*, ist ein kurzperiodischer Komet der sogenannten Jupiterfamilie. (© ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA)

dieser Entfernung einsetzenden Kometenaktivität genau zu beobachten, die physikalischen Eigenschaften und stoffliche Zusammensetzung des Kometen zu erfassen und schließlich als Höhepunkt die Landesonde *Philae* auf dem Kometen abzusetzen, um erstmals vor Ort die Oberfläche eines Kometen untersuchen zu können.

Rosetta begleitete den Kometen auf seinem Weg um die Sonne mehr als zwei Jahre lang. Die Mission endete am 30. September 2016 mit einer ursprünglich nicht vorgesehenen, aber von der Europäischen Welt- raumorganisation ESA präzise durchgeführten „Landung“ auf 67P. Elf Experimente auf dem Orbiter ermöglichten eine umfangreiche Charakterisierung des Kometen, unter anderem wurde seine zu- und abnehmende Aktivität registriert, Staub der Koma eingesammelt und analysiert, der Komet mit Radarwellen „durchleuchtet“, spektroskopische Untersuchungen der Oberfläche durchgeführt und schließlich zehntausende von Aufnahmen des unförmigen, zwischen zwei und etwas mehr als vier Kilometer großen Kometen gemacht.

Am 12. November 2014 wurde die Landesonde *Philae* vom Orbiter abgetrennt und landete zunächst an der vorgesehenen Stelle, konnte sich jedoch nicht verankern, prallte wegen der geringen Schwerkraft ab und hüpfte an einen anderen, nur wenig von der Sonne

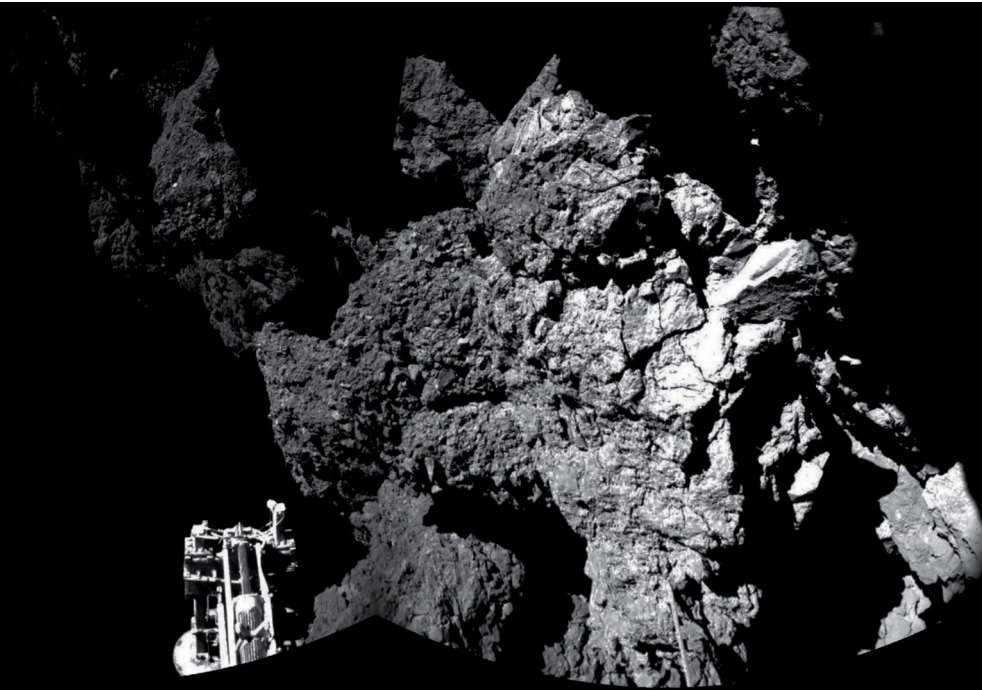


beleuchteten Ort. Dort stand *Philae* hochkant in einer Felskluft, so dass mit Abstrichen alle zehn Experimente wenigstens einmal durchgeführt werden konnten. Weil aber die Solarpanele nicht ausreichend Strom erzeugen konnten war die Mission von *Philae* nach 64 Stunden früher als erhofft zu Ende. Wie *Rosetta* lieferte jedoch auch *Philae* wichtige Erkenntnisse zur Natur von Kometen. *Philae*s Landeort konnte erst am 2. September 2016 gefunden werden.

Rosetta hat einige Ansichten über Kometen bestätigt, aber auch viele neue Ergebnisse gebracht. Der Umfang der Messungen und

Bild oben: Ein Jet aus verdampfendem Eis reißt von der Sonne angestrahlten Staub aus dem Kometen 67P. (© ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPSIUPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA)

Bild unten: Die DLR-Kamera ROLIS fotografierte vor dem Kontakt mit 67P mehrmals den Boden des Kometen; Bildbreite 50 Meter. (© ESA/Rosetta/Philae/ROLIS/DLR)



Aufnahmen ist so groß, sodass die Auswertung der Daten noch Jahre in Anspruch nehmen wird. Demnach besteht der Komet zu einem größeren Anteil aus Staub und nur zu einem geringeren aus Eis verschiedener Verbindungen. Bei 67P beträgt der Staubanteil sogar etwa 75 Gewichtsprozent, nur 25 Prozent der Kometenmasse ist Eis. Bestätigt wurde ferner, dass Kometen eine hohe Porosität besitzen – bei 67P ca. 70 Volumenprozent – und zumindest an ihrer Oberfläche keine homogene Zusammensetzung haben. Ihre Staub-Eis-Bestandteile beinhalten zahlreiche organische Moleküle, aber auch Minerale wie Eisensulfide, die, wie schon mit Stardust an Komet 81P/Wild 2 gemessen, bei höheren Temperaturen und folglich in Sonnennähe entstanden sind. Das deutet darauf hin, dass im protoplanetaren Nebel schon frühzeitig eine gewisse Durchmischung stattgefunden haben muss, wahrscheinlich durch große Wirbel. Vermutlich gab es in der zirkumsolaren Scheibe viel dynamischere Vorgänge, als bislang angenommen.

Die Aktivität des Kometen hängt stark von der Sonneneinstrahlung ab, ist über den ganzen Kern verteilt und entwickelt sich vorwiegend auf der Tagseite (67P rotiert mit einer Periode von 12,4 Stunden um seine

Drehachse). Die auf 67P registrierten Ausbrüche mit erhöhter Gas- und Staubproduktion treten für einige Minuten bis Stunden auf, vorwiegend am frühen Vormittag und in der Mittagszeit. Allerdings wurden auch einige dieser Phänomene auf der Nachtseite beobachtet. Durch die kometare Aktivität entstehen auf dem Kern Löcher, Spalten, Terrassen, Krater und sogar Dünen. Wegen der niedrigen Gravitation können selbst metergroße Brocken ausgeworfen werden.

Aus den Beobachtungen der Mission *Rosetta* geht hervor, dass sich Kometenkerne bei sehr tiefen Temperaturen nur wenig über dem absoluten Nullpunkt, nämlich bei etwa -235 Grad Celsius bildeten. Die chemische Zusammensetzung und die hohe Porosität von 67P – und anderer Kometen – lassen den Schluss zu, dass Zusammenstöße in ihrer Geschichte keine große Rolle spielten. Wegen dieser „ruhigen“ und kalten Umgebung sowie der geringen Gravitation konnten die ursprünglichen Eigenschaften bis heute konserviert werden. Kometen sind also tatsächlich tiefgefrorene Zeugen der Zeit der Planetenentstehung.

Diese Ursprünglichkeit bedeutet aber auch, dass Kometen nicht ganz am Anfang der Planetenentwicklung entstanden sind. Das allgegenwärtige radioaktive ^{26}Al -Isotop mit einer Halbwertszeit von 720.000 Jahren musste schon seinen „Heizeffekt“ verloren haben, sonst wären die Kometenkerne nicht so kalt und ursprünglich geblieben.

Die Dynamik im frühen Sonnensystem, zu der Zeit, als auch die Oortsche Wolke durch nach außen driftende Kometen entstanden ist, dürfte ebenfalls für die entgegengesetzte Richtung gegolten haben: Millionen von Kometen sind damals gewiss auch ins innere Sonnensystem gelenkt worden und stürzten dann in die Sonne oder auf die jungen erdähnlichen Planeten. Allerdings haben Kometen durch Einschläge auf der Erde vermutlich nur wenig Wasser für die Ozeane geliefert. Denn das Wassereis von 67P hat ein viermal höheres Verhältnis von schwerem (Deuterium) zu leichtem Wasserstoff, als das

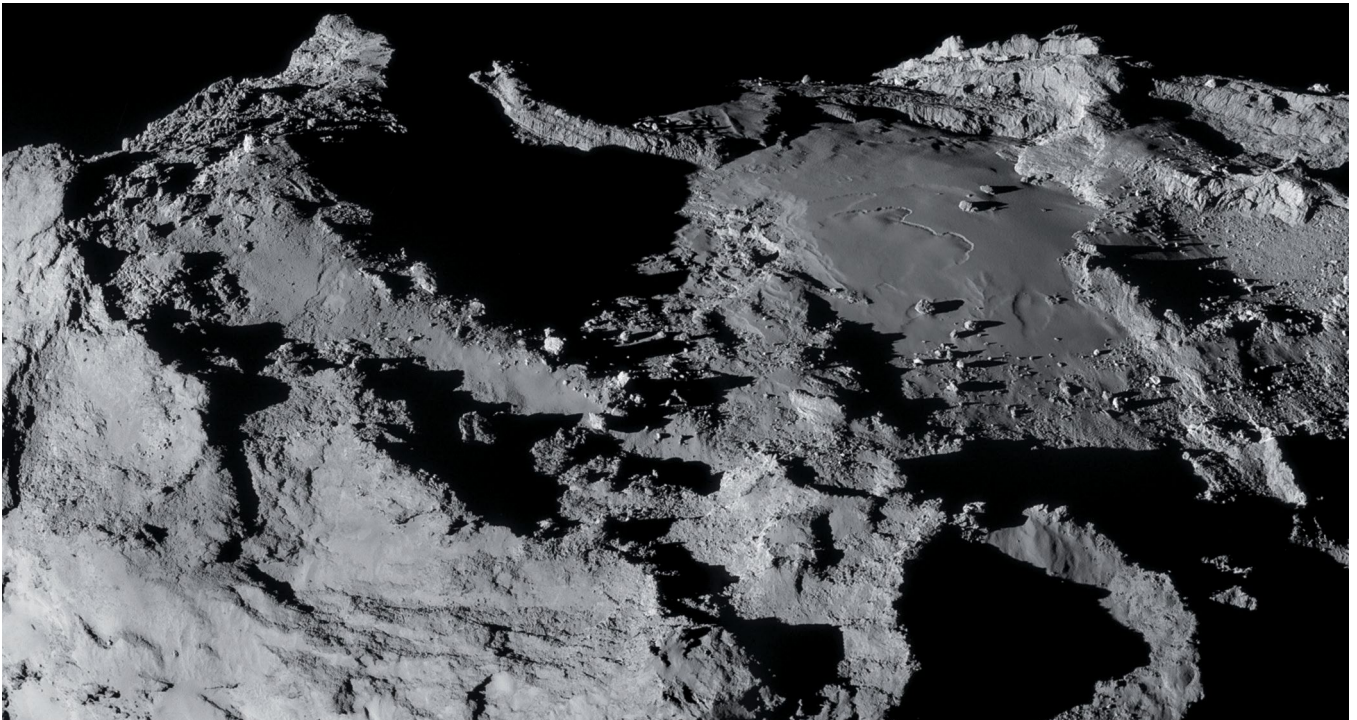
Bild: Das erste Bild der Landesonde *Philae* zeigt eine stark zerklüftete Umgebung. (© ESA/Rosetta/Philae/CIVA)

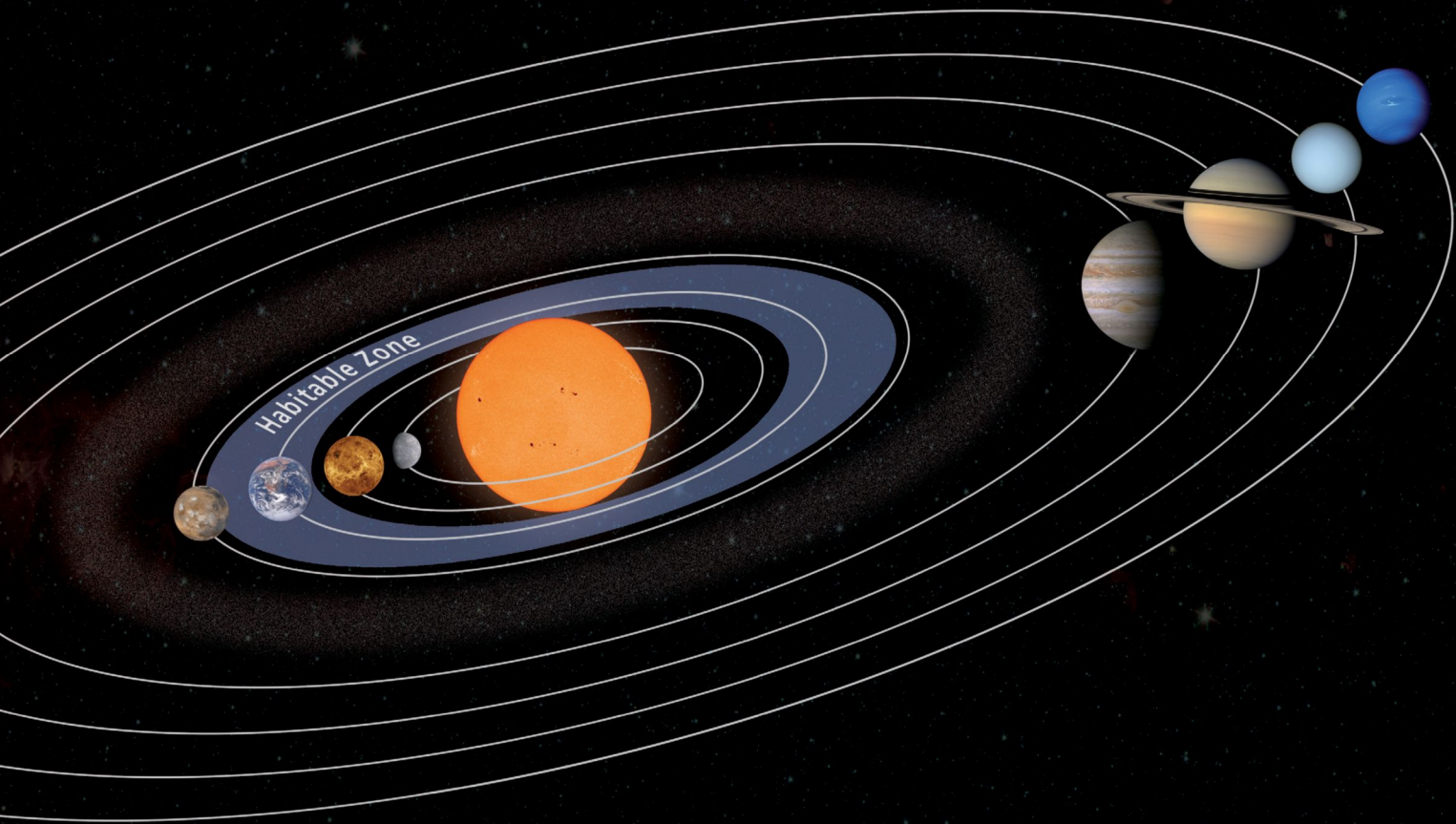
Wasser der Weltmeere. Damit sind die „Fingerabdrücke“ beider Wasserarten nicht identisch. Allerdings scheinen Kometen etwa 20 Prozent des Edelgases Xenon in unserer Erdatmosphäre geliefert zu haben. Aber auch hier muss einschränkend erwähnt werden, dass nicht klar ist, wie repräsentativ 67P für Kometen generell ist: Es ist unklar, ob diese Kometen aus dem Kuipergürtel oder der Oortischen Wolke stammen.

Rosetta hat sich auch mit einer weiteren wichtigen Frage befasst: Haben Kometen Moleküle zur Erde gebracht, die für die Entstehung von Leben von entscheidender Wichtigkeit waren – Kohlenstoff- und Kohlenwasserstoffverbindungen, komplexe Verbindungen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe oder Aminosäuren? Diese Stoffe gelten als Vorstufen für das biologische Leben, das vor etwa dreieinhalb Milliarden Jahren auf der Erde entstanden ist und sich dann nach den Regeln der Darwinschen Evolution entwickelt hat. Bekannt war schon vor *Rosetta*, dass im Eis und Staub der Kometen neben anorganischen Stoffen auch zahlreiche dieser organischen

Moleküle vorhanden sind, die auch die Grundlage des Lebens auf der Erde sind. Auch in interstellaren Gaswolken wurden diese Verbindungen nachgewiesen. In der Koma von 67P wurden neben Staub und Wassermolekülen auch flüchtige und hochkomplexe organische Moleküle gefunden, darunter die Aminosäure Glycin. Mit der Entdeckung der Aminosäure Glyzin in der Koma von 67P sowie Dutzender weiterer organischer Moleküle durch *Rosetta* im Kern von 67P können Kometen zumindest als potentielle Lieferanten dieser Vorstufen des Lebens auf der Erde gelten. Ob dieser Transport allerdings wirklich stattgefunden hat, bleibt jedoch unbewiesen.

Bild: Imhotep, eine auffallend glatte Region inmitten der stark zerklüfteten Landschaft des Kometen 67P, deren Oberfläche teilweise durch zurückfallenden Staub eingeebnet wurde und die sich im Verlauf der Mission *Rosetta* mehrfach veränderte. (© ESA/Rosetta/NAVCAM – CC BY-SA IGO 3.0)





PLANETENENTWICKLUNG UND LEBEN

Zumindest seit der Antike stellen Menschen die Frage, ob es Leben auch jenseits der Erde gibt, auf einem anderen Himmelskörper, in den Weiten des Alls. Angesichts der unvorstellbar großen Zahl von Sternen im Kosmos, von denen nach heutiger Erkenntnis die meisten von Planeten umkreist werden, wäre es mehr als erstaunlich, wenn Leben nur auf der Erde entstanden sein sollte. Allerdings unterscheidet sich unser „Blauer Planet“ deutlich von seinen Nachbarplaneten im Sonnensystem und es stellt sich die berechnete Frage, wie viele Planeten lebensfreundlich sind, oder – andersherum gesagt – wie einzigartig die Erde ist? Der Vergleich mit extrasolaren Planetensystemen zeigt jedenfalls, dass unser Sonnensystem nicht als typisch angesehen werden kann.

Untersucht man die Planeten des Sonnensystems und ihre Monde, so zeigt sich, dass die Erde die besten Voraussetzungen für die Entwicklung von Leben bietet. Dies liegt schon an ihrem Abstand zur Sonne, der flüssiges Wasser auf der Erdoberfläche ermöglicht. Auf den weiter innen liegenden Bahnen des Merkur und der heutigen Venus ist die Sonnenstrahlung so intensiv, dass Wasser sofort verdampfen würde. Und auf dem Mars ist sie schon so schwach, dass die Oberflächentemperatur im Mittel unter dem Gefrierpunkt liegt. Da (flüssiges) Wasser eine Grundvoraussetzung für Leben ist, jedenfalls für Leben, wie wir es von der Erde kennen, müsste eine zweite Erde auch den richtigen Abstand zu ihrem Stern haben. Man nennt die Abstandszone, mit gerade der richtigen Temperatur für flüssiges Wasser auf der Planetenoberfläche, die habitable Zone. Ihre Lage und Ausdehnung hängen wesentlich von der Leuchtkraft des Sterns und von der atmosphärischen Zusammensetzung des jeweiligen Planeten ab. Im Sonnensystem ist heute nur die Erde mitten in der habitablen Zone. Ihre Nachbarplaneten Mars und Venus befinden sich am Rande der Zone, aber eher außerhalb. Die Suche nach extrasolaren Planeten in habitablen Zonen ist daher ein grundlegendes strategisches Element bei der Suche nach außerirdischem Leben.

Dennoch könnte Leben auch auf anderen Planeten und Monden im Sonnensystem entstanden oder in primitiven Formen vielleicht heute noch vorhanden sein. Unter den Kandidaten dafür sind zunächst die Venus, weil vor Milliarden Jahren die Leuchtkraft der Sonne geringer war (sie ist im Laufe der Äonen um rund 30 Prozent angestiegen), der Mars sowie die Eismonde Europa und Enceladus der Riesenplaneten Jupiter und Saturn.

Im Laufe der Jahrmilliarden wäre demnach die habitable Zone über die Venus hinweg nach außen gewandert und etwa entstandenes Leben

auf dem Planeten erloschen. Von den beiden genannten Eismonden wissen wir, dass sie von Ozeanen, die auf Gestein gründen, bedeckt sind. Diese werden von kilometerdicken Eispanzern vor dem Ausfrieren geschützt. Darüber hinaus wird in den Gesteinsschichten dieser Monde Wärme erzeugt, die zum Erhalt der Ozeane beiträgt. So ist auf diesen Eismonden Wasser vorhanden, dagegen fällt die Sonne als Energielieferant aus. Etwaige Lebewesen können daher kaum die Photosynthese als Energiequelle nutzen. Stattdessen müsste Energie z.B. von heißen Quellen oder aus chemischen Reaktionen bezogen werden. Dies war allerdings auch auf der frühen Erde so, bevor Lebewesen die Photosynthese entwickelt hatten.

Selbst der Mars könnte in seiner frühen Geschichte belebt gewesen sein! Geologische und mineralogische Hinweise aus den Zeiten vor drei bis vier Milliarden Jahren zeugen von damals stehenden und fließenden Gewässern auf dem Planeten. Zwar ist nicht klar, wie bei einer weniger leuchtkraftigen Sonne fließendes Wasser möglich gewesen sein könnte. Vieles deutet darauf hin, dass der Mars zu dieser Zeit eine massivere Atmosphäre als heute hatte, mit entsprechenden Treibhausgasen. Möglich, vielleicht sogar wahrscheinlicher ist, dass vulkanische Aktivität den auch heute noch vorhandenen Permafrost aufschmolz und lokal Wasser für einige Zeit fließen ließ. Unklar ist den Wissenschaftlern, wie Mars eine massivere Atmosphäre verlieren konnte, sollte sie jemals vorhanden gewesen sein. Der Verlust eines früher vorhandenen Magnetfeldes könnte eine Antwort auf diese Frage sein. Dass die vulkanische Aktivität abnahm, ist dagegen eine natürliche Entwicklung eines Gesteinsplaneten, der im Laufe der Zeit auskühlt und dessen radioaktive Wärmequellen im Mantelgestein an Intensität abnehmen.

Auch der Saturnmond Titan gilt manchen als Kandidat für Leben. Allerdings sind die Temperaturen mit rund –180 Grad Celsius dort so niedrig, dass Wasser immer gefroren wäre. Wir wissen aber von Ozeanen aus Kohlenwasserstoffen auf dem Saturntrabanten. Gibt es dort eventuell eine Biosphäre, die Kohlenwasserstoffe statt Wasser als Lösungsmittel nutzt?

Kein anderer Planet im Sonnensystem außer der Erde weist Ozeane auf. Sie besitzt zudem eine ausgewogene Verteilung von Kontinenten, Ozeanen und Flachmeeren und einen klimatisch stabilisierten Wasserkreislauf (neben anderen Stoffkreisläufen), der weite Gebiete des Planeten mit Wasser versorgt. Die Flachmeere mit lebensfreundlicher Sonneneinstrahlung und Nährstoffen im Boden sind besonders bioaktiv und von diesen aus hat das Leben im Laufe der Evolution die Kontinente erobert. Landmassen, Ozeanbecken und Schelfe dürften jene große Biodiversität erst ermöglicht haben, die wir heute auf der Erde antreffen.

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

Wie entsteht ein solcher planetarer Körper und was sind die Bedingungen für seine lebensfreundliche Entwicklung? Schafft sich das Leben eventuell die Bedingungen selbst, unter denen es sich optimal entwickeln kann? Oder stabilisiert diese zumindest? Dazu muss die Biomasse natürlich so umfangreich sein, dass sie die Entwicklung eines Planeten nachhaltig beeinflussen kann.

Erstaunlicherweise ist vieles auf der Erde „gerade richtig“, gut passend für die Existenz von Leben. Es gibt Landflächen zur Photosynthese und Ozeane als riesige Wasserreservoir, dazu kontinuierlich andauernde vulkanische Aktivität. Ein Magnetfeld schützt die Atmosphäre vor Erosion und die Oberfläche vor allzu energetischen Teilchen aus dem Welt- raum. Der Erdmond stabilisiert durch seine Gravitationswirkung die Rotationsachse und ermöglicht damit stabile Zonen gemäßigten Klimas. Durch Wasser beförderte Erosion insbesondere der Falten- gebirge bindet Kohlendioxid und trägt zu Stoffkreisläufen bei, von denen neben dem Wasserzyklus der langzeitliche Silikat-Kohlenstoffzyklus der wichtigste ist. Wie ein Thermostat regelt dieser den Gehalt der Atmosphäre am Treibhausgas Kohlendioxid so, dass das Klima weitge- hend stabil bleibt. Leider stören wir diesen Zyklus seit etwa hundert Jahren, indem wir in früheren Äonen gebundenen Kohlenstoff massiv freisetzen.

Vereinfacht kann man sich den Silikat-Kohlenstoffkreislauf so vorstel- len: Steigt der Gehalt an Kohlendioxid beispielsweise durch vermehrte vulkanische Aktivität an, so erhöht sich die mittlere Temperatur der Atmosphäre als Folge eines verstärkten Treibhauseffekts. Dadurch ver- dampft mehr Wasser, was zu einer erhöhten Niederschlagsaktivität führt, wodurch Kohlendioxid aus der Atmosphäre ausgewaschen und

über verstärkte Erosion auf Kontinenten in Sedimentgestein gebunden wird. Von dort werden die Sedimente zu den Ozeanen transportiert und in sogenannten Subduktionszonen bei Tiefseegräben mit dem gebun- denen Kohlenstoff wieder ins Erdinnere zurückgeführt, wodurch der Kreislauf geschlossen wird. Darüber hinaus wird Kohlenstoff durch das Wachstum der Pflanzen gebunden. Hätte eine Erde, die fast vollständig von Ozeanen bedeckt wäre, oder eine Erde, die fast vollständig von Landmassen bedeckt wäre, eine ähnliche biologische Entwicklung ge- nommen? Forschungsarbeiten am DLR-Institut für Planetenforschung legen den Schluss nahe, dass beide „Erden“ physikalisch möglich gewe- sen wären, wären die Startbedingungen der Erde nur ein wenig anders gewesen. Die Biomasse wäre allerdings deutlich geringer geworden und hätte sich unter anderen klimatischen Bedingungen anders entwickelt.

Der faszinierende Gedanke, dass das Leben selbst die Erde lebens- freundlich halten könnte, ist schon wiederholt geäußert worden. In vie- len Überlegungen spielt die Plattentektonik dabei eine wesentliche Rolle. Diese Art Tektonik kennen wir interessanterweise bisher nur von der Erde. Die Plattentektonik als Theoriegebäude kann die wesentli- chen Beobachtungen der Geologie unter Einschluss der Entstehung und der Drift der Kontinente weitgehend zwanglos erklären. Demnach besteht die Erdkruste aus sieben größeren Gesteinsplatten, von denen einige Kontinente tragen und andere lediglich aus schwererer ozeani- scher, basaltischer Kruste bestehen. Die Platten verschieben sich gegen- einander; an sogenannten mittelozeanischen Rücken wird neue basal- tische Kruste gebildet und an Subduktionszonen werden die ozeani- schen Platten wieder in das Erdinnere zurückgeführt. Kontinentales Krustengestein entsteht durch Vulkanismus an den Subduktionszonen, wobei basaltisches Krustengestein, Wasser und Sedimentgestein zu fri- scher kontinentaler Kruste verarbeitet wird. Während die ozeanische, basaltische Kruste vollständig an dem Stoffkreislauf der Plattentektonik teilnimmt, schwimmt die leichtere kontinentale, granitische Kruste auf und nimmt an dem Stoffkreislauf nur eingeschränkt teil.

Vulkanismus und Erdbebenaktivität entlang der Plattengrenzen sind die für den Menschen spürbaren Folgen der Plattentektonik. Die Erneue- rung des Krustengesteins sorgt für Nachschub an mineralischen Nähr- stoffen, die für das Leben unerlässlich sind. Darüber hinaus kühlt die Plattentektonik das Erdinnere effektiv und ermöglicht somit die

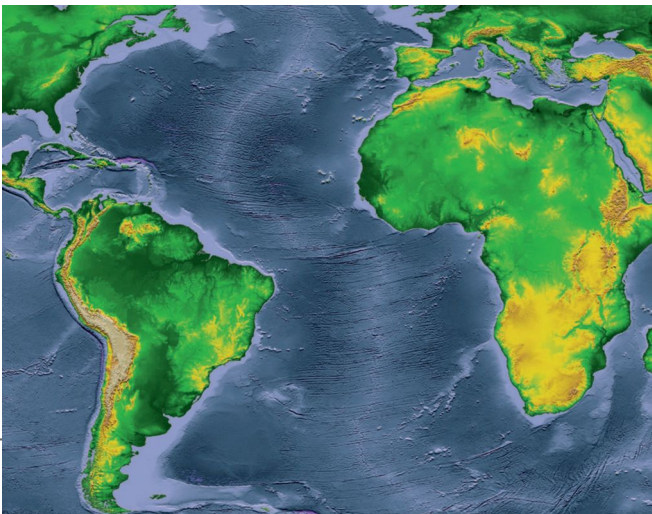


Bild: Die Karte der Erdoberfläche zeigt einige Elemente der Plattentektonik, insbesondere Kontinente und Ozeanböden. Die Gebirgskette mitten im Atlan- tik ist ein mittelozeanischer Rücken, an dem ozeanische Kruste entsteht. Ent- lang des westlichen Kontinentalrandes Südamerikas verläuft ein Tiefsee- graben und eine Subduktionszone, die unter den Kontinent reicht. Die Gebirgs- kette der Anden stellt frische kontinentale Kruste dar. (© NASA/USGS)

langfristige Existenz des Magnetfelds. Auf dem Mars beispielsweise gibt es dieses schützende Magnetfeld heute nicht.

Der beschriebene Stoffaustausch zwischen dem Erdinneren und dem Krustengestein im Rahmen der Plattentektonik umfasst die flüchtigeren Bestandteile wie Wasser und Kohlendioxid, die entweder im Gestein chemisch gebunden sind oder in Sedimenten transportiert werden. Dadurch sind sowohl der weiter oben beschriebene langzeitliche Silikat-Kohlenstoffzyklus als auch der Wasserkreislauf Elemente der Stoffkreisläufe der Plattentektonik. Über die Verwitterung und Sedimentbildung kann die Biosphäre in die Kreisläufe eingreifen, in dem sie einerseits Verwitterung befördert und andererseits hilft, flüchtige Stoffe chemisch zu binden. Auf diese Weise könnte die geologisch beobachtete Konstanz der ausgewogenen Verteilung zwischen Landmassen und Ozeanen erklärt werden, die sich zeitlich eigentlich hin zu abnehmenden Kontinentalflächen entwickeln müsste. Denn während die Verwitterungsrate mit der Kontinentalfläche zunehmen sollte, müsste die Krustenbildungsrate mit der Zeit und dem Abkühlen des Planeten abnehmen. Diese Abnahme kann aber durch vermehrten Wassertransport ins Erdinnere kompensiert werden, da die vulkanische Aktivität und die Stofftransportrate der Plattentektonik sowohl von der Temperatur als auch vom Wassergehalt des Erdinneren abhängen.

Leider müssen wir festhalten, dass uns an dieser Stelle noch ein genügend tiefes Verständnis für zwei wesentliche Dinge fehlt: Einerseits haben wir kein wirklich allgemein akzeptiertes Verständnis dessen, was Leben eigentlich ist, wie es entsteht und wie es mit der Erde in Wechselwirkung tritt. Andererseits verstehen wir nicht in genügender Tiefe, wie Plattentektonik entsteht und wie lange diese auf der Erde schon aktiv war. Positiv betrachtet, sehen wir hier ausgesprochen spannende Forschungsfelder!

Es ist naheliegend, dass bei der Suche nach Leben auf anderen Himmelskörpern zunächst die Nachbarplaneten der Erde ins Visier rücken. Weil es flüssiges Wasser zumindest früher auf dem Mars gegeben haben muss, hat sich die internationale Explorationsinitiative der Raumfahrt betreibenden Nationen und Agenturen die Suche nach außerirdischem Leben auf dem „Roten Planeten“ zur Aufgabe gemacht. Sollte die Suche auf Mars oder andernorts erfolgreich sein, hätte dies enorme Bedeutung über die Planetenforschung, ja über die Naturwissenschaften hinaus! Der Fund würde die Kopernikanischen und Darwin'schen Revolutionen vollenden und unsere irdische Existenz in einen größeren Zusammenhang stellen.

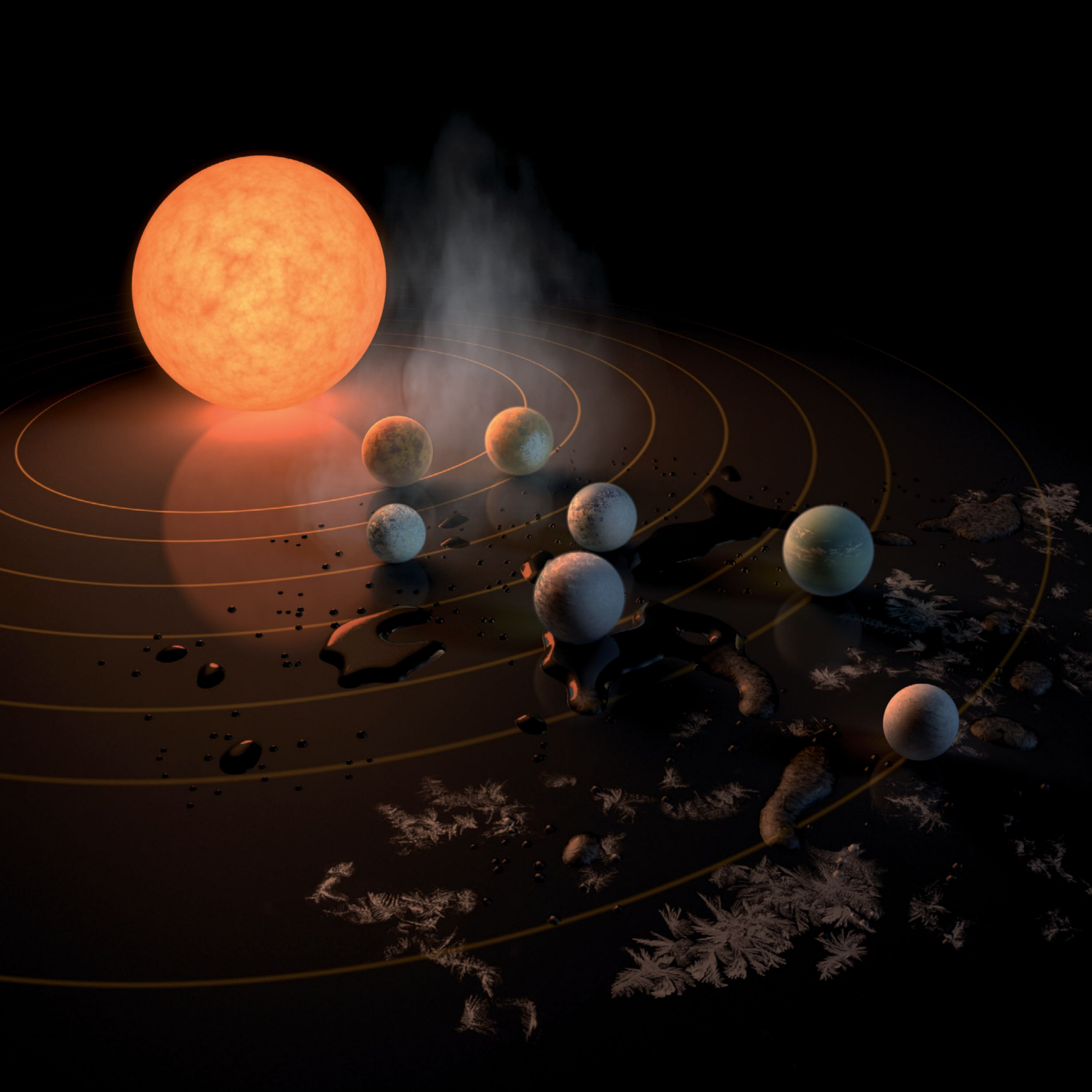
Noch weitreichender als die Suche nach Leben auf dem Mars ist die Suche im äußeren Sonnensystem und die Suche nach einer zweiten



Erde in großer, astronomischer Entfernung von unserem Planetensystem. Denn es ist ja nicht auszuschließen, dass es zwischen den Körpern im Inneren unseres Sonnensystems zu einem Austausch von Lebewesen gekommen sein könnte, indem große Asteroideneinschläge Organismen im Inneren von ausgeworfenem Material auf eine Reise durchs All geschickt haben und sich das Leben auf diese Weise verbreitete. Sollte es Leben im äußeren Sonnensystem, zum Beispiel auf den Saturnmonden Enceladus und Titan, dem Jupitermond Europa oder auf fernen Planeten um andere Sterne geben, könnte man mit größerem Recht von einer zweiten Genesis sprechen. Wie aber würden wir „Leben“ in anderen Planetensystemen entdecken? Was ist der kosmische Fingerabdruck eines belebten Planeten? Gibt es die eindeutige Signatur, den „rauchenden Colt“? Die Suche nach eindeutigen chemischen Biosignaturen ist ein aktuelles Feld gegenwärtiger Forschung. Kandidaten hierfür sind Sauerstoff und Ozon, die auf der Erde wesentlich durch Bioaktivität gebildet werden, Stickstoff und Stickoxide und Methan, die als Produkte primitiver Lebewesen bekannt sind.

Die Frage nach Leben an anderer Stelle im Universum ist zwar so alt wie die Menschheit. Doch fundierte, naturwissenschaftliche Forschung zu diesem Thema ist im Grunde genommen erst möglich, seit wir mit Raumsonden in der Lage sind, von unserem Heimatplaneten wenigstens zu den Körpern unseres Sonnensystems aufzubrechen und zudem mit immer besseren Teleskopen und Spektrometern die Atmosphären von planetaren Körpern innerhalb und außerhalb unseres Sonnensystems charakterisieren können. Dabei entwickelte sich ein völlig neuer Zweig der Weltraumwissenschaften, die Astrobiologie. Die Beantwortung der Frage nach der Existenz von Leben im Universum bleibt eine der wichtigsten und spannendsten der Wissenschaftsgeschichte.

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



EXTRASOLARE PLANETEN

Die Frage, ob es bewohnte Welten außerhalb unserer Erde und unseres Sonnensystems gibt, haben sich wohl Menschen schon immer beim Anblick des nächtlichen Sternenhimmels gestellt. Aber erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat man Methoden und empfindliche Instrumente entwickelt, um die Suche nach extrasolaren Planeten mit Aussicht auf Erfolg zu beginnen. 1995 wurde der erste Planet um einen sonnenähnlichen Stern außerhalb unseres Sonnensystems gefunden, eine Entdeckung, für die 2019 der Nobelpreis vergeben wurde.

Die Zahl der entdeckten Planeten hat sich seither drastisch auf rund 5600 Exoplaneten erhöht (Stand Februar 2024). Erstaunlich ist aber nicht die Anzahl an sich, sondern die Verschiedenartigkeit dieser neu entdeckten Himmelskörper. Die Klassifikation von Gesteinsplaneten und Gasplaneten, die wir aus unserem Sonnensystem kennen, reicht nicht mehr aus: heiße Jupiter, Minigasplaneten, Sub-Neptune und Supererden sind Gruppierungen, die sich im Laufe der letzten Jahrzehnte herausgebildet haben. Die Frage nach einer zweiten Erde, die in den Medien immer wieder gestellt wird, steht in einem größeren Zusammenhang: Wie bilden und entwickeln sich Planeten und Planetensysteme? Sind unser Sonnensystem und unsere Erde einzigartig? Was macht einen Planeten zu einem lebensfreundlichen Ort?

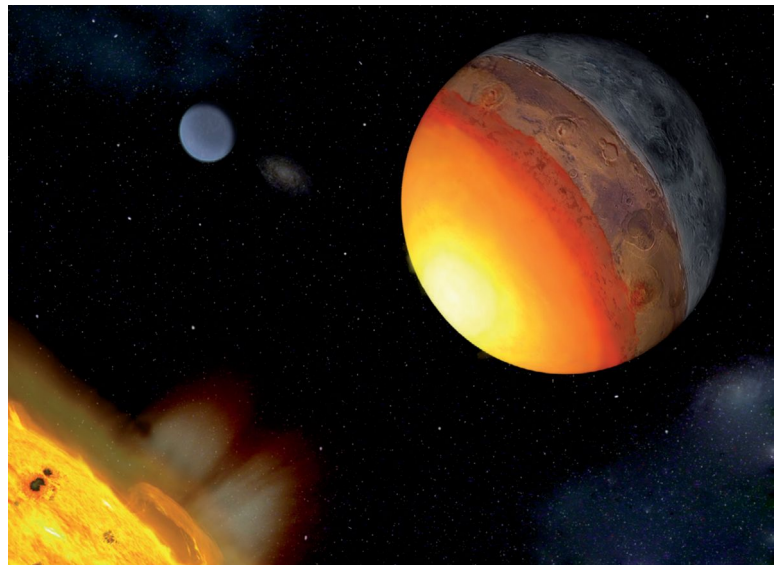
Die Methoden, extrasolare Planeten zu entdecken, sind zu meist indirekter Natur und basieren auf der Analyse des Lichts, das ein Stern aussendet und das durch die Anwesenheit eines Planeten verändert wird. Die Radialgeschwindigkeitsmethode nutzt den Sachverhalt, dass sich Stern und Planeten um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Die regelmäßige Bewegung des Sterns kann aus seinen Spektrallinien abgeleitet werden: Bewegt sich der Stern auf den Beobachter zu, ist das Licht blauverschoben. Bewegt sich der Stern vom Beobachter weg, wird die Wellenlänge vergrößert, das Licht ist rotverschoben. Durch die Beobachtung dieses Doppler-Effekts hat man den ersten

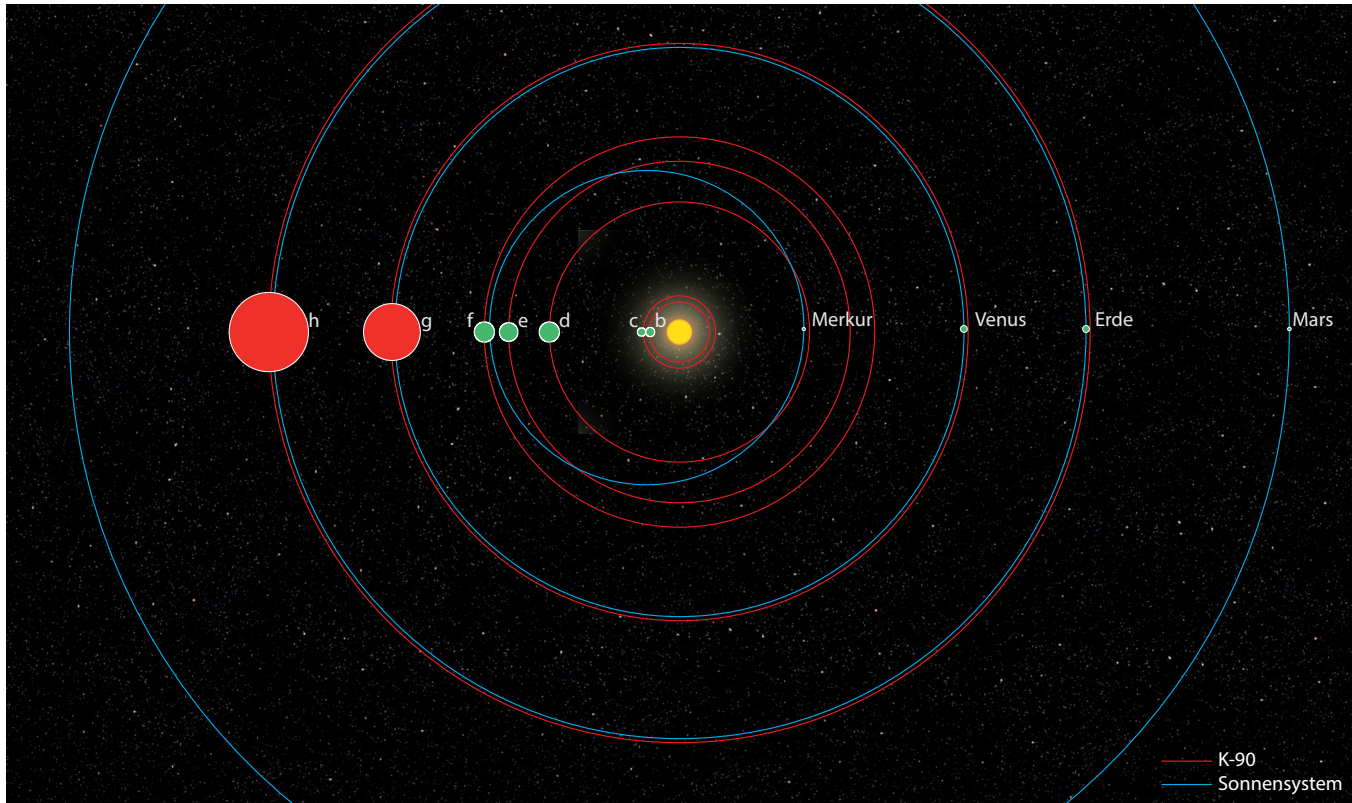
extrasolaren Planeten um einen sonnenähnlichen Stern entdeckt: 51 Pegasi b hat etwa die halbe Jupitermasse und umkreist seinen Stern in nur vier Tagen. Nach den Keplerschen Gesetzen entspricht eine kleine Umlaufzeit aber auch einem kleinen Abstand zum Zentralstern. Wegen des geringen Abstands zum glühend heißen Stern wird der Planet stark erhitzt und aufgebläht. Daher stammt die Bezeichnung „heiße Jupiter“ für solche Gasplaneten auf nahen Umlaufbahnen.

Eine andere Methode, die man zur Suche nach Exoplaneten benutzt, ist die Transitmethode. Schaut der Beobachter von der Seite auf ein Planetensystem, dann verdunkelt ein vorüberziehender Planet den Stern um einen Bruchteil. Die Abnahme der Intensität des Sterns hängt vom Verhältnis des Durchmessers des Planeten zum Durchmesser des Sterns ab. Ein großer Planet erzeugt dabei ein tieferes Transitsignal. Zum Beispiel Jupiter, der größte Planet unseres Sonnensystems, verringert für einen sehr weit entfernten Beobachter das Sonnenlicht um ein Prozent, unsere Erde nur um 0,008 Prozent. Um solche kleinen Veränderungen in der Intensität des Sternenlichts nachzuweisen, bedarf es hochempfindlicher photometrischer Messungen und Analysemethoden, die das kleine Signal des Transits von anderen Variationen im Sternenlicht, z. B. Sternenflecken, unterscheiden können. Um Transitplaneten überhaupt zu finden, muss man ein Bildfeld mit sehr vielen Sternen über lange Zeit kontinuierlich beobachten und das Glück

Bild linke Seite: Künstlerische Darstellung des Planetensystems um den Zwergstern Trappist-1, der von sieben Gesteinsplaneten umkreist wird. Die Radien dieser Planeten entsprechen etwa dem Erdradius. Drei dieser Planeten bewegen sich in der habitablen Zone des Sterns. (© NASA/JPL-Caltech)

Bild: Künstlerische Darstellung des Planeten CoRoT-7b, dem ersten entdeckten Gesteinsplaneten. Seine Umlaufbahn liegt so dicht am Stern, dass seine Oberfläche von Lavaströmen oder einem kochenden Magmaozean bedeckt sein könnte. Ein zweiter Planet, CoRoT-7c, liegt weiter außen und verursacht keinen Transit. (© Fabian Catalano)





haben, das Planetensystem von der Seite zu sehen. Um die Umlaufperiode eines Planeten genau zu bestimmen, sollte man wenigstens drei Transitereignisse nachweisen. Um eine „zweite“ Erde zu entdecken, müsste man also mindestens zwei Jahre lang beobachten.

Jede Messmethode liefert bestimmte Informationen über den Planeten, aber kein vollständiges Bild. Aus den Transitmessungen kann man den Radius, die Umlaufzeit und den Winkel, unter dem wir das Planetensystem beobachten, bestimmen. Aus der Radialgeschwindigkeitsmessung erhält man auch die Umlaufzeit und außerdem die Planetenmasse in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel und dem Bahntypus, Kreis oder Ellipse. Kann man einen Planeten mit beiden Methoden beobachten, kann man seinen Radius und seine Masse und damit die mittlere Dichte bestimmen. Das ist ein Schlüssel, um den inneren Aufbau des Planeten zu erschließen.

Die Suche nach extrasolaren Planeten begann mit erdgebundenen Teleskopen. Der erste extrasolare Planet im Sternbild Pegasus wurde durch

die Beobachtungen mit einem Teleskop in Südfrankreich entdeckt. Aber selbst die besten Teleskope sind in ihrem Einsatz durch den Tag- und Nachtrhythmus, durch Mondphasen und schlechtes Wetter beschränkt. Eine ununterbrochene Beobachtung eines Sternfeldes, wie sie für die Suche nach Transitsignalen ideal wäre, ist damit nicht möglich. Außerdem wird die Genauigkeit, mit der man die Veränderung der Sternintensität messen kann, durch die ständigen Turbulenzen in der Erdatmosphäre begrenzt. Es war naheliegend, die Suche nach extrasolaren Planeten in den Weltraum auszuweiten.

Das wurde zum ersten Mal 2007 mit der französischen Mission *CoRoT* (*Convection, Rotation and Planetary Transits*) verwirklicht, an der auch das DLR beteiligt war. *CoRoT* war überaus erfolgreich. Unter seinen herausragenden Entdeckungen war der erste Gesteinsplanet,

Bild: Darstellung des Planetensystems Kepler-90 mit sieben Planeten im Vergleich zum Sonnensystem: In beiden Systemen liegen die Bahnen der kleinen Planeten innen, die der Gasriesen außen. (© DLR)

CoRoT-7b, ein Planet mit der etwa siebenfachen Erdmasse und dem 1,7-fachen Erdradius. Mit diesen Werten gehört CoRoT-7b zu den sogenannten Super-Erden. Er umkreist seinen Stern in nur 20 Stunden und zeigt ihm immer die gleiche Seite. Der geringe Abstand und die gebundene Rotation führen zu einer starken Erhitzung seiner dem Stern zugewandten Oberfläche. Wie es genau dort aussieht, hängt von vielen Faktoren ab, die man nur sehr ungenau kennt oder abschätzen kann: Wie hat sich der Planet gebildet? Hat oder hatte er eine Atmosphäre? Aus welchem Gestein besteht er?

Die nächste Mission zur Suche nach Exoplaneten war die NASA-Weltraummission *Kepler* von 2009 bis 2013. Fast fünf Jahre lang schaute *Kepler* kontinuierlich auf ein Feld mit rund 150.000 Sternen im Sternbild Schwan und hat so ca. 3000 Planeten gefunden. Zwei Schwungräder zur präzisen Ausrichtung des Teleskops gingen 2013 kaputt. Mit einem neuen Konzept, das den Sonnenwind zur Stabilisierung nutzt, wurde die Mission unter den Namen *K2* bis 2018 fortgesetzt, wenn auch mit geringerer Qualität der Messdaten.

An *Kepler/K2* schloss sich die NASA-Mission *TESS* (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) an. Ein Jahr später, Ende 2019, startete die ESA das Weltraumteleskop *CHEOPS* (*Characterising ExoPlanet Satellite*). Alle diese Weltraumteleskope benutzen die Transitmethode. Aber während *CoRoT*, *Kepler* und *TESS* nach neuen, unbekannten Planeten suchen oder gesucht haben, betrachtet *CHEOPS* bereits bekannte Planetensysteme noch mal genauer. Durch seine äußerst präzisen Helligkeitsmessungen können die Radien bekannter Planeten genauer bestimmt und weitere Planeten in dem System gefunden werden.

Diese Weltraummissionen haben die erdgebundenen Teleskope nicht überflüssig gemacht. Ein Beispiel dafür ist NGTS (Next Generation

Transit Survey), eine Teleskopanlage mit zwölf Kameras in der Atacama-Wüste in Chile, das vom DLR mitfinanziert und betrieben wird. Seine Spezialität ist die Suche nach sogenannten Sub-Neptunen, Planeten, die etwa so groß oder etwas kleiner sind als Neptun. Solche dem Neptun ähnliche Objekte findet man kaum mit kurzen Umlaufzeiten, drei Tagen oder kürzer, obwohl es doch so viele heiße Jupiter mit solchen kurzen Perioden gibt. Salopp gesagt scheint es da eine „Neptunwüste“ im Katalog der extrasolaren Planeten zu geben. Man erklärt sich das damit, dass ein Planet mit der Masse des Jupiters und ähnlicher Zusammensetzung seine Hülle aus Wasserstoff und Helium durch die starke Strahlung des Sterns sehr schnell verliert und nur der Kern übrigbleibt und dabei die Region der Neptunwüste schnell verlässt. Umso interessanter war die Entdeckung des Planeten NGTS-4b, dem ersten „Bewohner“ der Neptunwüste, mit einer Umlaufzeit von 32 Stunden.

Auch an der Entdeckung mehrerer extrasolarer Planeten aus der Analyse der *Kepler*- und *K2*-Daten war das DLR-Institut für Planetenforschung beteiligt. Darunter war das Planetensystem Kepler-90, das erste Planetensystem mit sieben Planeten und einer ähnlichen Architektur

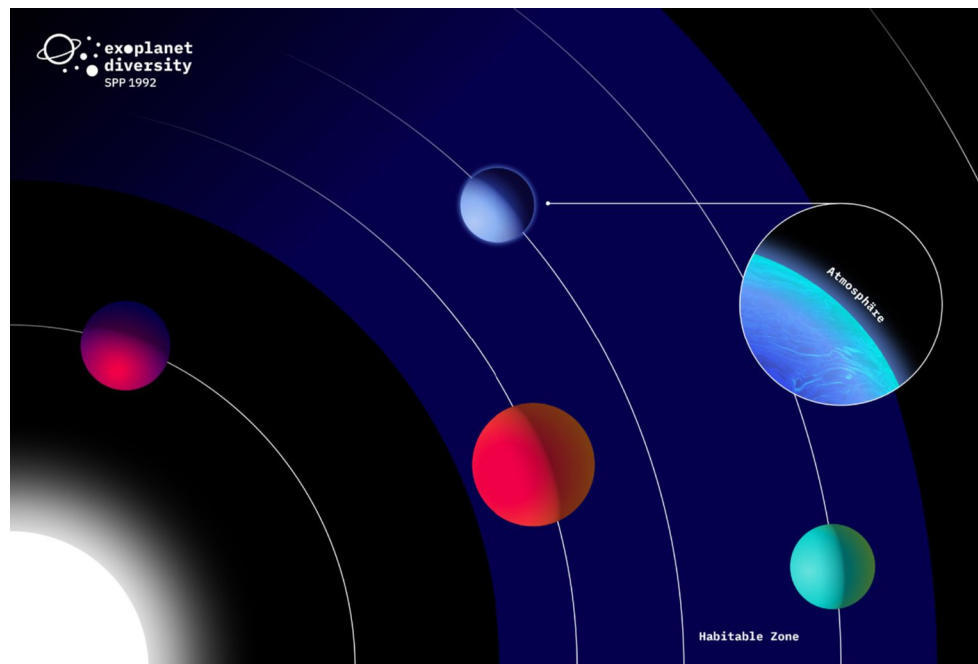


Bild: Lebensfreundlichkeit: Leben, wie wir es kennen, auch wenn es nur Mikroben sind, braucht flüssiges Wasser und eine Energiequelle. Die Strahlung des Sterns liefert diese Energie, enthält aber auch lebensbedrohliche UV-Strahlung, die durch eine Atmosphäre herausgefiltert werden sollte. Sonst könnte sich Leben nur unter der Erde oder im Wasser entwickeln und erhalten.
(©: SPP 1992 (Patricia Klein))



wie die unseres Sonnensystems: die Gasriesen außen, die kleinen Planeten innen. Überraschend ist jedoch, dass alle Planeten sich innerhalb der Erdbahn bewegen, fast als hätte man unser Sonnensystem geschrumpft.

Eine hochinteressante Entdeckung war 2022 der Exoplanet GJ 367b: ein Gesteinsplanet, der in nur acht Stunden seinen Stern umkreist. Mit einer halben Erdmasse ist er ein Fliegengewicht unter den Exoplaneten, aber seine hohe mittlere Dichte deutet auf einen großen Eisenkern hin, eher merkur- als erdähnlich. Da der Stern nur knapp 31 Lichtjahre von der Erde entfernt ist, bietet er sich für weitere Untersuchungen an. Der Fund zeigt, wie man kleinste und sehr massearme Exoplaneten finden

Bild: GJ 367 umkreist seinen Stern in nur acht Stunden – so etwas kennen wir aus unserem Sonnensystem nicht: Bei uns ist Merkur mit 88 Tagen der schnellste Planet. Hier eine künstlerische Darstellung des Planeten, der durch den geringen Abstand zu seinem Stern enorm aufgeheizt wird.

(©: SPP 1992 (Patricia Klein))

und ihre Eigenschaften genauestens bestimmen kann – ein Schlüssel zum Verständnis, wie sich Gesteinsplaneten bilden und entwickeln.

Die Entdeckung von Planeten und ihre Charakterisierung sind das Ergebnis verschiedener Methoden und Instrumente. Manche Entdeckung erinnert an eine Detektivgeschichte, bei der einzelne Ergebnisse erst richtig zusammengeführt werden müssen, um das Gesamtbild zu zeigen. Ein solcher Fall ist die Entdeckung des Planetensystems HD 110067. Zuerst registrierte man mit *TESS* Helligkeitsschwankungen, die auf zwei Planetenkandidaten hinwiesen, und weitere Transit-ähnliche Ereignisse, die nicht gedeutet werden konnten. Nachfolgende Messungen mit *CHEOPS* brachten Licht in die Sache: Es gab noch einen dritten Planeten. Da die Umlaufzeiten dieser drei Planeten in einem harmonischen Verhältnis stehen, versuchte man die verbleibenden ungeklärten Helligkeitsschwankungen mit weiteren Planeten in ähnlicher Harmonie zu erklären. So ergab sich ein System mit sechs Sub-Neptunen, dessen Architektur seit seiner Entstehung vor mehreren Milliarden Jahren ungestört ge-

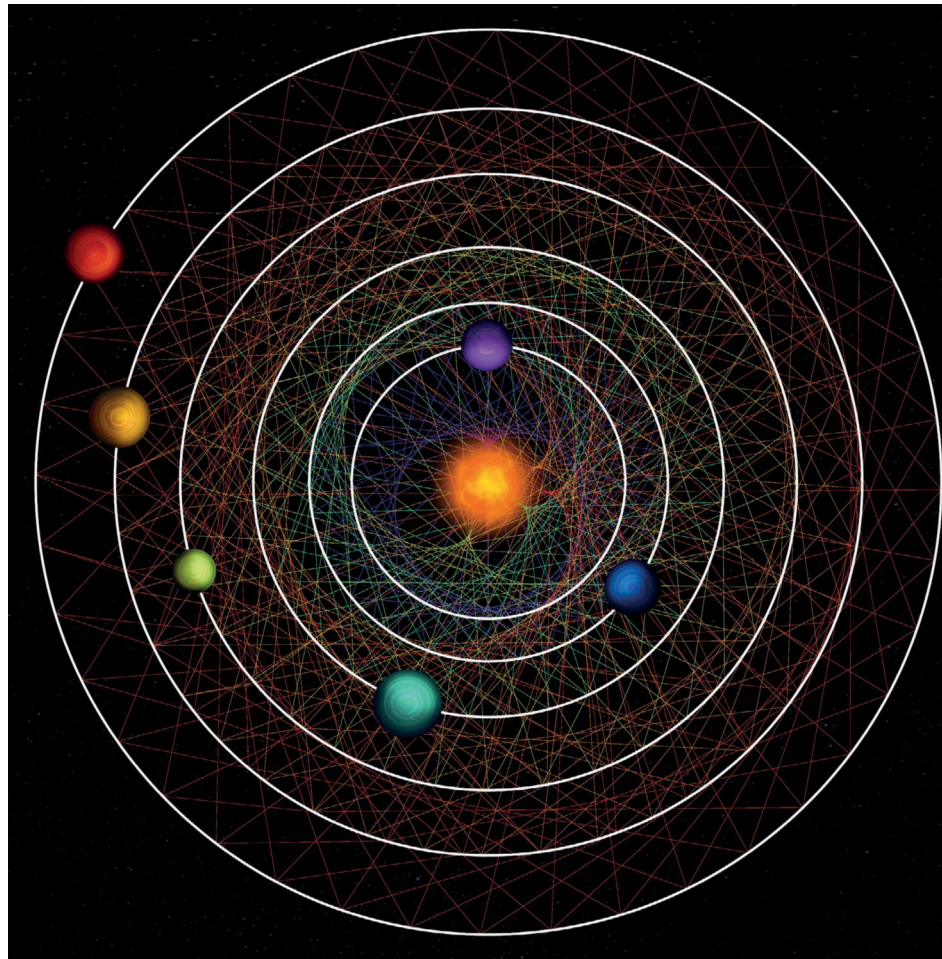
blieben ist, was man aus den harmonischen Verhältnissen der Umlaufzeiten schließen kann.

Ob ein Planet lebensfreundlich oder habitabel ist, hängt eng mit der ihn umgebenden Atmosphäre zusammen. Leben, wie wir es kennen, benötigt eine schützende Lufthülle. Aber wie findet man heraus, ob ein Planet eine Atmosphäre hat und wie sie zusammengesetzt ist? Gibt es Moleküle, Biomarker, die auf Leben hindeuten? Mit dem 2021 gestarteten *James-Webb-Weltraumteleskop (JWST)* hat man bereits einzelne Planeten auf ihre atmosphärischen Bestandteile hin untersucht. Durch Transit-Messungen bei verschiedenen Wellenlängen im mittleren Infrarot kann man auf die Bestandteile der Atmosphäre schließen und hat so u. a. Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Wasser bei einzelnen Planeten gefunden. Da es sehr schwierig und oft nicht eindeutig ist, von solchen Messungen auf das Vorkommen eines Moleküls, vielleicht sogar eines Biomarkers, zu schließen, ist man von einer genauen Beschreibung eines Gesteinsplaneten mit einer Lufthülle noch weit entfernt.

Um geeignete Kandidaten für Atmosphären-Untersuchungen zu bestimmen, muss man ihre grundlegenden Eigenschaften – Radius, Masse und Alter – genau kennen. Aber nicht von allen Planeten hat man den kompletten Satz von Eigenschaften und wenn ja, dann oft nicht mit der notwendigen Genauigkeit. Für viele der *Kepler*-Planeten war und ist es nicht möglich, den kompletten Steckbrief zu füllen, weil die Systeme sehr weit von uns entfernt sind und daher keine Nachfolgebeobachtungen erlauben.

Eine zweite Erde, also ein Planet mit ähnlichen Eigenschaften wie unsere Erde mit einem Abstand zum Stern, der Wasser in flüssiger Form erlauben würde, hat man bisher noch nicht gefunden. Die vergangenen Missionen und Beobachtungen haben aber gezeigt, dass die genaue Bestimmung von Radius, Masse und Alter des Planeten und des Zentralsterns unabdingbar ist, um überhaupt eine Chance zu haben, einen erdähnlichen Gesteinsplaneten näher zu charakterisieren.

Aufgrund dieser Erfahrung wurde die Mission *PLATO* entwickelt. *PLATO* – Akronym für *PLAnetary Transits and Oscillations of stars* – ist eine Mission der ESA, die Ende 2026 starten soll. Die Leitung des wissenschaftlichen Konsortiums liegt beim DLR-Institut für Planetenforschung. Das große Ziel der *PLATO*-Mission ist es, Gesteinsplaneten in der lebensfreundlichen Zone um sonnenähnliche, helle Sterne zu finden und genau zu charakterisieren. Wenigstens vier Jahre lang wird *PLATO* mit seinen 26 Kameras hochpräzise photometrische Beobachtungen durchführen. Das erste Feld für Langzeitbeobachtungen von mindestens zwei Jahren wurde im Sommer 2023 ausgewählt. Wie auch die anderen Weltraummissionen auf der Suche nach extrasolaren Planeten arbeitet *PLATO* mit der Transitmethode. Vielversprechende Planetenkandidaten werden dann durch nachfolgende Untersuchungen weiter charakterisiert. Durch diese Messungen wird man mit großer Genauigkeit Radius, Masse und Alter des Planeten und seines Sterns bestimmen können und so erdgroße Planeten in der habitablen Zone von sonnenähnlichen Sternen finden.



Mit den aktuellen und zukünftigen Missionen wird sich unser Wissen um extrasolare Planeten enorm erweitern. Vielleicht sind wir die erste Menschengeneration, die die Frage nach Leben außerhalb unserer Erde beantworten kann.

Bild: Die sechs Planeten des Systems HD110067 wurden mit den Weltraumteleskopen *TESS* und *CHEOPS* entdeckt. Sie erzeugen durch ihre Resonanzkette gemeinsam ein faszinierendes geometrisches Muster. Wenn man die Verbindung zwischen zwei benachbarten Planeten in regelmäßigen Zeitabständen entlang ihrer Bahnen verfolgt, entsteht ein einzigartiges Muster für jedes Planetenpaar. (©: Thibaut Roger/NCCR PlanetS, CC BY-NC-SA 4.0)

ÜBERSICHT ÜBER DIE MISSIONEN IM SONNENSYSTEM

Missionen zur Sonne

Pioneer 5	11. März 1960	NASA-Mission, Erforschung der Sonne und des interplanetaren Raums, Sonnenorbit zwischen den Bahnen von Venus und Erde, erster erfolgreicher Test digitaler Datenübertragung, Missionsende: 26.06.1960
Pioneer 6	16. Dez. 1965	NASA-Mission, Erforschung des Sonnenwindes, interplanetarer Elektronendichte, solarer und kosmischer Strahlung und interplanetaren Magnetfelds, Sonnenorbit zwischen den Bahnen von Venus und Erde, letzter Kontakt: 08.12.2000
Pioneer 7	17. Aug. 1966	NASA-Mission, Erforschung des Sonnenwindes, interplanetarer Elektronendichte, solarer und kosmischer Strahlung und interplanetaren Magnetfelds, Sonnenorbit bei 1,1 AE, letzter Kontakt: März 1995
Pioneer 8	13. Dez. 1967	NASA-Mission, Erforschung des Sonnenwindes, interplanetarer Elektronendichte, solarer und kosmischer Strahlung und interplanetaren Magnetfelds, kosmischen Staubs und elektrischer Felder, Sonnenorbit bei 1,1 AE, letzter Kontakt: 22.08.1996
Radio Astronomy Explorer A (Explorer 38)	4. Juli 1968	NASA Mission, erster eines Paares von Radioastronomie-Satelliten, Erforschung der niedrig frequenten Radiostrahlung der Planeten, der Sonne und der Galaxie, Erdorbit, Performanz des Bandlaufwerks verschlechterte sich nach zwei Monaten
Pioneer 9	08. Nov. 1968	NASA-Mission, Erforschung des Sonnenwindes, interplanetarer Elektronendichte, solarer und kosmischer Strahlung und interplanetaren Magnetfelds, kosmischen Staubs und elektrischer Felder, Sonnenorbit bei 1,1 AE, Kontakt bis Mai 1983, erneute Kontaktaufnahme im Jahr 1987 nicht möglich
Skylab	26. Mai 1973	Erste bemannte amerikanische Raumstation (171 Tage), 150.000 Aufnahmen der Sonne mit dem Apollo Telescope Mount (ATM)
Radio Astronomy Explorer B (Explorer 49)	10. Juni 1973	NASA-Mission, zweiter eines Paares von Radioastronomiesatelliten, Erforschung der niedrig frequenten Radiostrahlung der Planeten, der Sonne und der Galaxis, Mondorbit, letzter Kontakt: Aug. 1977

Helios-A (Helios 1)	10. Dez. 1974	Deutsch-amerikanische Mission, Erforschung des Sonnenwindes, magnetischer und elektrischer Felder, kosmischer Strahlung und interplanetaren Staubs, elliptischer Sonnenorbit, größte Annäherung an die Sonne: 47 Mio. km, Kontaktabbruch: 16.03.1986
Helios-B (Helios 2)	16. Jan. 1976	Deutsch-amerikanische Mission, Erforschung des Sonnenplasmas, Sonnenwindes, magnetischer und elektrischer Felder, kosmischer Strahlung und interplanetaren Staubs, elliptischer Sonnenorbit, größte Annäherung an die Sonne: 43,5 Mio. km, Missionsende: Dez. 1981
Solar Maximum Mission (SMM)	14. Febr. 1980	NASA-Mission, koordinierte Beobachtung von Sonnenaktivität, insbes. Sonneneruptionen während einer Periode maximaler Sonnenaktivität, erfolgreiche Reparatur während STSC-41C, Datenerfassung bis 24.11.1989, Wiedereintritt: 2.12.1989
Hinotori	21. Febr. 1981	Japanische Mission, Untersuchung der Sonneneruptionen während einer Periode maximaler Sonnenaktivität, Wiedereintritt 11.07.1991
Ulysses	06. Okt. 1990	Europäisch-amerikanische Mission, Studium der Pole, Korona, Plasmawellen und kosmischer Strahlung, Orbit mit hoher Inklination nach Vorbeiflug an Jupiter am 08.02.1992, seit 2008 nicht mehr manövrierbar, Betrieb eingestellt: 29.06.2009
Yohkoh (SOLAR-A)	31. Aug. 1991	Japanisch-amerikanisch-britische Mission, Studium der Hochenergiestrahlung während Sonneneruptionen, Erdorbit, Nachfolger von Hinotori, Missionsende: 14.12.2001, Wiedereintritt: 12.09.2005
SAMPLEX	03. Juli 1992	„Solar Anomalous and Magnetospheric Particle Explorer“, NASA-Mission, Erforschung energiereicher Teilchen, die von der Sonne, aus der Erdmagnetosphäre oder aus der galaktischen Strahlung stammen, Erdorbit, Wiedereintritt: 13.11.2012
Koronas-I	02. März 1994	Russisch-ukrainische Mission, Untersuchung der Sonne im UV- und Röntgenbereich, Erdorbit, Missionsende: 04.03.2001

Wind	01. Nov. 1994	NASA-Mission, Erforschung des ankommenden Sonnenwindes, magnetischer Felder und Teilchen, Halo-Orbit um Lagrange-Punkt L1, noch aktiv	Koronas-Foton	30. Jan. 2009	Russische Mission, Untersuchung der Prozesse während Sonneneruptionen, Beschleunigungsmechanismen, Ausbreitung und Wechselwirkung schneller Teilchen in der Sonnenatmosphäre, Erdorbit, Missionsende: 2010
SOHO	12. Dez. 1995	„Solar and Heliospheric Observatory“, europäisch-amerikanische Mission, Studium der inneren Struktur und physikalischen Prozesse, die die Sonnenkorona formen, Halo-Orbit um Lagrange-Punkt L1, noch aktiv	SDO	11. Febr. 2010	„Solar Dynamics Observatory“, NASA-Mission, Untersuchung der Sonnenatmosphäre in verschiedenen Wellenlängen, Sonnenaktivität, des Weltraumwetters, Messungen des Sonneninneren, des Plasmas der Sonnenkorona und der Strahlung, Erdorbit, aktiv
ACE	25. Aug. 1997	„Advanced Composition Explorer“, NASA-Mission, Messung des Sonnenwindes zwischen Sonne und Erde, ermöglicht „Sturmwarnung“ mit 1 Stunde Vorwarnzeit, Orbit um Lagrange-Punkt L1, noch aktiv	Picard	15. Juni 2010	Französischer Mikrosatellit, Studium der solaren Strahlung, Durchmesser und Form der Sonne, Sonneninneres durch Helioseismologie, Erdorbit, Missionsende: 04.04.2014
TRACE	02. April 1998	„Transition Region and Coronal Explorer“, NASA Mission, Untersuchung der Sonneneruptionen, Photosphäre, Geometrie und Dynamik der oberen Sonnenatmosphäre, sonnensynchroner Erdorbit, Missionsende: 22.06.2010	IRIS	28. Juni 2013	„Interface Region Imaging Spectrograph“, NASA-Mission, Studium der äußeren Sonnenatmosphäre, Erdorbit, aktiv
Koronas-F	31. Juli 2001	Russisch-ukrainisches Sonnenobservatorium, Studium der Sonne im UV- und Röntgenbereich, Erdorbit, Missionsende: 06.12.2006	Parker Solar Probe	12. Aug. 2018	NASA-Mission, Untersuchung der Sonnenaktivität zur Verbesserung der Vorhersage des Weltraumwetters aus bis zu 6,16 Mio. km Entfernung innerhalb des Merkurorbits, geplante Missionsdauer: knapp 7 Jahre
Genesis	08. Aug. 2001	NASA-Mission, Sammlung von Sonnenwindpartikeln am Lagrange-Punkt L1 und Rückführung zur Erde nach zwei Jahren, Fehlfunktion des Fallschirms mit der Rückkehrkapsel während Wiedereintritt am 08.09.2004	Solar Orbiter	2. Okt. 2020	ESA-Mission mit NASA-Beteiligung, Untersuchung der turbulenten Sonnenoberfläche und der Veränderungen im Sonnenwind, operationeller Orbit 3,5 Jahren Flugzeit, größte Annäherung an die Sonne: 43 Mio. km, geplante Missionsdauer: 7 Jahre
RHESSI	05. Febr. 2002	„Reuven-Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager“, NASA-Mission, Untersuchung der Teilchenbeschleunigung und Energiefreisetzung während Sonneneruptionen, Erdorbit, Missionsende: 16.08.2018	Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S oder Kuafu 1)	9. Okt. 2022	Chinesische Mission, erste Mission im Rahmen des Kuafu-Projekts, Erforschung des Weltraumwetters, Verbesserung der Vorhersage von Sonneneruptionen, sonnensynchroner Erdorbit, aktiv
SORCE	25. Jan. 2003	„Solar Radiation & Climate Experiment“, präzise Messungen der Sonnenstrahlung in verschiedenen Wellenlängenbereichen von Röntgen bis nahes Infrarot aus dem Erdorbit, Missionsende: 25.02.2020			
Hinode (SOLAR-B)	23. Sept. 2006	Japanische Mission, Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Magnetfeld und Korona, sonnensynchroner Erdorbit, noch aktiv			
STEREO	18. Sept. 2006	„Solar Terrestrial Relations Observatory“, NASA-Mission, bestehend aus zwei Sonden zur Untersuchung der Struktur und Entwicklung von Sonnenstürmen auf ihrem Weg ins Weltall, STEREO-A noch aktiv	Mariner 10	03. Nov. 1973	NASA-Mission, erste Mission zu zwei Planeten, Venusvorbeiflug und drei Merkurvorbeiflüge, Studium der Umgebung, Atmosphäre, Oberfläche und Eigenschaften von Merkur und Venus, über 10.000 Aufnahmen, 57% von Merkur fotografisch abgedeckt; größte Annäherung: 327 km, Missionsende: 24.03.1975

Missionen zum Merkur

MESSENGER	03. Aug. 2004	„MErcury Surface, Space Environment, GEo-chemistry and Ranging“, NASA-Mission, Untersuchung der Zusammensetzung der Oberfläche, Geologie, Magnetfeld, Kern, Pole, Exosphäre und Magnetosphäre, Merkurorbit, Orbiteintritt am 18. 03.2011 nach mehreren Flybys, Missionsende durch Aufschlag am 30.04.2015
Bepi-Colombo	20. Okt. 2018	ESA-Mission in Kooperation mit JAXA, Erforschung der Oberfläche und der Zusammensetzung des Merkur und seiner Magnetosphäre mit zwei Orbitern, Ankunft am Merkur im Dez. 2025 nach mehreren Vorbeifügen an Venus und Merkur, nominale Missionsdauer: ein Jahr mit Option auf Verlängerung um ein weiteres Jahr

Missionen zur Venus

Venera 1	12. Febr. 1961	Sowjetische Mission, erster Vorbeiflug an der Venus, größte Annäherung: 99.800 km; Abbruch des Funkkontaktes am 04.03.1961 in 7 Millionen km Entfernung
Mariner 2	26. Aug. 1962	NASA-Mission, Vorbeiflug an der Venus, Studium der Atmosphäre, Magnetfeld, geladener Teilchen in der Umgebung und Masse, größte Annäherung: 34.773 km; letzte Datenübertragung: 03.01.1963
Zond 1	22. April 1964	Sowjetische Mission, Abbruch des Funkkontakts kurz nach dem 14.05.1964, Venus-Vorbeiflug in 100.000 km Entfernung, Sonnenorbit
Venera 2	12. Nov. 1965	Sowjetische Mission, TV-System und wissenschaftliche Instrumente, Sonnenorbit nach Venus-Vorbeiflug, Größte Annäherung: 23.950 km; wegen Funkstörung keine Datenübertragung zur Erde möglich
Venera 3	16. Nov. 1965	Sowjetische Mission, Landung auf der Oberfläche, Atmosphäreneintritt, Kontaktabbruch in 32 km Höhe, Aufschlag
Venera 4	12. Juni 1967	Sowjetische Mission, Atmosphäreneintritt, Landung auf Nachtseite, 96 min Übertragung der Messwerte von der Oberfläche und Atmosphäre bis in eine Höhe 24,96 km

Mariner 5	14. Juni 1967	NASA-Mission, Untersuchung der Struktur der Atmosphäre, seiner Strahlung und Magnetfelds, Größte Annäherung: 4094 km, Kontaktabbruch: 04.12.1974
Venera 5	05. Jan. 1969	Sowjetische Mission, Studium der Atmosphäre, Freisetzung einer Kapsel in die Atmosphäre, Datenübertragung für 53 Minuten am 16.05.1969
Venera 6	10. Jan. 1969	Sowjetische Mission, Studium der Atmosphäre, Freisetzung einer Kapsel in die Atmosphäre, Datenübertragung für 51 Minuten am 17.05.1969
Venera 7	17. Aug. 1970	Sowjetische Mission, Studium der Atmosphäre und anderer Phänomene, Freisetzung einer Landekapsel am 15.12.1970, Datenübertragung für 53 Minuten nach der Landung
Venera 8	27. März 1972	Sowjetische Mission, erfolgreiche Landung am 22.07.1972, 50 Minuten Datenübertragung von der Oberfläche aus
Mariner 10	03. Nov. 1973	NASA-Mission, erste Mission zu zwei Planeten, Studium der Umgebung, Atmosphäre, Oberfläche und Eigenschaften von Merkur und Venus, Venusvorbeiflug und drei Merkurvorbeiflüge, größte Annäherung an Venus: 5.768 km; erstmalig Aufnahmen von der Venus: Missionsende: 24.03.1975
Venera 9	08. Juni 1975	Sowjetische Mission, Orbiter und Lander, erfolgreiche Landung am 22.10.1975, arbeitete für 53 Min. nach Landung, erstmalig Aufnahmen von der Venusoberfläche
Venera 10	14. Juni 1975	Sowjetische Mission, Orbiter und Lander, erfolgreiche Landung am 25.10.1975, arbeitete für 65 Min. nach Landung, Aufnahmen von der Venusoberfläche
Pioneer Venus Orbiter (Pioneer Venus 1)	20. Mai 1978	NASA-Mission, Studium der Atmosphäre, Ionosphäre und Oberfläche, Venusorbit, verglühte in der Venusatmosphäre am 08.10.1992
Pioneer Venus Multi-probe (Pioneer Venus 2)	08. Aug. 1978	NASA-Mission, Mehrfachsonde (fünf Atmosphäreneintauchkörper), Freisetzung der Tochtersonden am 16. und 20.11.1978, einer sendete für 67 Minuten Daten von der Oberfläche
Venera 11	08. Sept. 1978	Sowjetische Mission, Studium der chemischen Zusammensetzung, Wolken und Wärmebilanz der Atmosphäre, Abstieg am 25.12.1978, weiche Landung; lieferte 95 min Messdaten von der Oberfläche

Venera 12	14. Sept. 1978	Sowjetische Mission, Studium der chemischen Zusammensetzung, Wolken und Wärmebilanz der Atmosphäre, Abstieg am 21.12.1978, weiche Landung; lieferte 110 min Messdaten von der Oberfläche
Venera 13	29. Okt. 1981	Sowjetische Mission, weiche Landung am 01.03.1982; lieferte Panoramaaufnahmen durch verschiedene Filter, Untersuchung von Bodenproben, arbeitete für 127 min auf der Oberfläche
Venera 14	01. Nov. 1981	Sowjetische Mission, weiche Landung am 01.03.1982; lieferte Panoramaaufnahmen durch verschiedene Filter, Untersuchung von Bodenproben, arbeitete für 57 min auf der Oberfläche
Venera 15	09. Juli 1983	Sowjetische Mission, Kartierung der Venus mit Seitensicht radar aus dem Orbit; Radaraufnahmen der nördlichen Hemisphäre, Auflösung: 1-2 km, Missionsende: 10.07.1984
Venera 16	11. Juni 1983	Sowjetische Mission, Kartierung der Venus mit Seitensicht radar aus dem Orbit; Radaraufnahmen der nördlichen Hemisphäre; Auflösung: 1-2 km, Missionsende: Okt. 1984
Vega 1	15. Dez. 1984	Sowjetische Mission, Vorbeiflug im Juni 1985 auf dem Weg zum Kometen Halley, Aussetzen eines Landers und eines Ballons zur Untersuchung der zentralen Wolkendecke, Ballon arbeitete für 46,5 Stunden
Vega 2	21. Dez. 1984	Sowjetische Mission, Vorbeiflug im Juni 1985 auf dem Weg zum Kometen Halley, Aussetzen eines Landers und eines Ballons zur Untersuchung der zentralen Wolkendecke, Ballon arbeitete für etwa 47 Stunden
Magellan	04. Mai 1989	NASA-Mission, Untersuchung der Landformen und Tektonik, Einschlagsprozesse, Erosion, Ablagerung, chemischer Prozesse und des Inneren, Orbit, Radarkartierung von 95% der Oberfläche mit Synthetic Aperture Radar; maximale Auflösung: 75 m pro Bildpunkt, Kontaktabbruch am 12.10.1994
Galileo	18. Okt. 1989	NASA-Mission, Vorbeiflug an der Venus auf dem Weg zum Jupiter am 10.02.1990, Aufnahmen der Wolkendecke
Cassini	15. Okt. 1997	NASA-Mission, zwei Vorbeiflüge an der Venus auf dem Weg in das Saturnsystem am 26.04.1998 und 24.06.1999

MESSENGER	03. Aug. 2004	„Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry and Ranging“, NASA-Mission, zwei Vorbeiflüge an der Venus auf dem Weg zum Merkur am 24.10.2006 und 05.06.2007
Venus Express	09. Nov. 2005	ESA-Mission, Untersuchung der komplexen Dynamik und Chemie des Planeten und der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberfläche, Eintritt in den Venusorbit am 11. April 2006, Missionsende: Nov. 2014
Akatsuki (Planet-C)	20. Mai 2010	Japanische Mission, Untersuchung der Dynamik der Atmosphäre aus dem Orbit, Eintritt in den Venusorbit misslang, Sonde flog an der Venus vorbei, Eintritt in den Venusorbit: Dez. 2015, noch aktiv
Bepi-Colombo	20. Okt. 2018	ESA-Mission in Kooperation mit JAXA, Erforschung des Merkur und seiner Magnetosphäre mit zwei Orbitern, Ankunft am Merkur im Dez. 2025 nach mehreren Vorbeiflügen an Venus und Merkur

Missionen zur Erde

Der gegenwärtige Stand der Erkenntnis zu den Körpern des Sonnensystems ist zu einem sehr großen Teil der Raumfahrt zu verdanken. Sie ermöglicht es der Wissenschaft, die Planeten, ihre Monde und die unzähligen kleinen Körper mit Raumsonden zu erreichen und Bilddaten oder Messungen aller Art aus der Nähe zu gewinnen. Selbst die Sonne wird von Raumsonden erforscht.

Das gilt auch und erst recht für die Erde. Im Gegensatz zu Missionen zum Mars oder zur Venus ist es längst Routine, Orbiter in der erdnahen Umlaufbahn, dem Low Earth Orbit“ (LEO), in wenigen hundert Kilometer Höhe der Erdrotation folgend um die Erde kreisen zu lassen, oder in mittleren Höhen von 23.000 Kilometern synchron mit dem Tageslauf oder schließlich auf geostationären Bahnen in 36.000 Kilometer Höhe fest über einem Punkt auf der Erdoberfläche der Erdrotation zu folgen. Im Mai 2024 befinden sich fast zehntausend Satelliten auf Bahnen um die Erde.

Nur die wenigsten dieser Satelliten werden wissenschaftlich genutzt. Doch diese sind für die Erforschung der Erde als – von Menschen bewohntem und „genutztem“ – Planeten von allergrößter Bedeutung. Nur mit der Erforschung aus dem All lassen sich der physische Zustand der Erde und die vielen dynamischen Prozesse, die sich in ihrer Atmosphäre, der Hydrosphäre (Ozeane, Gewässer) und auf ihrer Landoberfläche mitsamt ihrer Biosphäre global, regional und lokal erfassen.

Hierzu werden passive Sensoren (Aufzeichnung von abgestrahlter elektromagnetischer Strahlung wie UV- und sichtbares Licht oder Infrarotstrahlung) und aktive Messverfahren (Radar) eingesetzt. Ihre Leistungsfähigkeit wird immer größer und mit jeder Generation neuer Satelliten verfügt die Wissenschaft über bessere Daten. Diese sind beispielsweise für die Erfassung der Parameter, die zur Einschätzung des globalen Klimawandels notwendig sind, unerlässlich, neben vielen weiteren wichtigen Anwendungen.

Wegen der großen Anzahl der seit 1959 zum Einsatz gekommenen Satelliten zur Erforschung der Erde – die freilich auch ein Körper des Sonnensystems ist – führen wir diese Missionen in diesem Kapitel nicht auf. Wir verweisen stattdessen auf die permanent aktualisierte Internetseite *solarsystem.dlr.de/erde*, auf der im Stil der in diesem Kapitel gelisteten Missionen, die in den tiefen Raum vorgedrungen sind, alle wissenschaftlichen Missionen „zur Erde“ aufgeführt sind. Auch sei darauf hingewiesen, dass das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) an seinem Standort in Oberpfaffenhofen das Earth Observation Center (EOC) betreibt. Mit dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) und dem DLR-Institut für Methodik der Fernerkundung ist das EOC das größte Kompetenzzentrum für die Erdfernerkundung in Deutschland: *www.dlr.de/eoc*

Missionen zum Mond

Pioneer 0	17. Aug. 1958	NASA-Mission, Misserfolg, erste Stufe explodierte
Pioneer 1	11. Okt. 1958	NASA-Mission, Misserfolg, hat Fluchtgeschwindigkeit nicht erreicht
Pioneer 3	06. Dez. 1958	NASA-Mission, Misserfolg, hat Fluchtgeschwindigkeit nicht erreicht
Luna 1 (Lunik 1)	02. Jan. 1959	Sowjetische Mission, Größte Annäherung: 5995 km; danach Umlaufbahn um die Sonne
Pioneer 4	03. März 1959	NASA-Mission, Mondvorbeiflug in 60.000 km Entfernung, danach Umlaufbahn um die Sonne
Luna 2 (Lunik 2)	12. Sept. 1959	Sowjetische Mission, erster Aufschlag auf dem Mond der Region Palus Putredinus östlich von Mare Serenitatis am 14.9.1959
Luna 3 (Lunik 3)	04. Okt. 1959	Sowjetische Mission, erstmals 29 Aufnahmen der Vorder- und der Rückseite, verglühte vermutlich nach Hinterfliegung des Mondes in der Erdatmosphäre im April 1960

Ranger 3	04. Okt. 1959	NASA-Mission, Untersuchung der Oberfläche vor dem Aufschlag, Absetzen einer Seismometerkapsel, Erfassung der Gammastrahlung während des Fluges und der Radarreflexion der Oberfläche, Mondorbit verfehlt, Umlaufbahn um die Sonne
Ranger 4	23. April 1962	NASA-Mission, Untersuchung der Oberfläche vor dem Aufschlag, Absetzen einer Seismometerkapsel, Erfassung der Gammastrahlung während des Fluges und der Radarreflexion der Oberfläche, aufgrund eines Computerfehlers Ausklappen der Sonnenkollektoren und Inbetriebnahme des Navigationssystems nicht erfolgreich, Aufschlag am 26.04.1962 auf der Mondrückseite bei 15,5° S, 229,3° O
Ranger 5	18. Okt. 1962	NASA-Mission, Untersuchung der Oberfläche vor dem Aufschlag, Absetzen einer Seismometerkapsel, Erfassung der Gammastrahlung während des Fluges und der Radarreflexion der Oberfläche, Fehlfunktion während Einschuss in die Mondbahn, verfehlte den Mond um 725 km, Umlaufbahn um die Sonne
Luna 4	02. April 1963	Sowjetische Mission, Fehlfunktion der Astro-navigation, verfehlte den Mond um 8400 km am 5.4.1963, Datenübertragung bis 7.4.1963
Ranger 6	30. Jan. 1964	NASA-Mission, Studium der Oberfläche in hoher Auflösung vor dem Aufschlag mit verschiedenen Kameras, Aufschlag am Ostrand des Mare Tranquillitatis bei 9,3866° N und 21,4806° O am 02.02.1964, Fehlfunktion der Kameras, Datenübertragung nicht erfolgreich
Ranger 7	28. Juli 1964	NASA-Mission, Studium der Oberfläche in hoher Auflösung vor dem Aufschlag mit verschiedenen Kameras, Aufschlag im Mare Cognitum bei 10,6340° S und 339,3229° O am 31.7.1964; 4308 Aufnahmen während des Anfluges
Ranger 8	17. Febr. 1965	NASA-Mission, Studium der Oberfläche in hoher Auflösung vor dem Aufschlag mit verschiedenen Kameras, Aufschlag im Mare Tranquillitatis bei 2,6377° N und 24,7881° O am 20.2.1965; über 7000 Aufnahmen während des Anfluges
Ranger 9	21. März 1965	NASA-Mission, Studium der Oberfläche in hoher Auflösung vor dem Aufschlag mit verschiedenen Kameras, Aufschlag im Krater Alphonsus bei 12,8281° S und 356,6116° O am 24.3.1965; über 5800 Aufnahmen, zusätzliche Stabilisierung der Kameras in Flugachse

Luna 5	09. Mai 1965	Sowjetische Mission, Test einer weichen Landung, Fehlfunktion der Bremstriebwerte, Aufschlag auf dem Mond am 12. Mai 1965 700 km vom geplanten Landeplatz entfernt	Surveyor 2	20. Sept. 1966	NASA-Mission, versuchte weiche Landung, nach nicht erfolgreicher Bahnkorrektur außer Kontrolle; Aufschlag südlich des Kraters Copernicus bei 5,5° N, 12° W am 23.09.1966
Luna 6	08. Juni 1965	Sowjetische Mission, versuchte weiche Landung, verfehlte den Mond durch nicht erfolgte Kurskorrektur um 161.000 km, Sonnenorbit, Verlust des Kontakts in 600.000 km Entfernung zur Erde	Luna 12	22. Okt. 1966	Sowjetische Mission, Aufnahmen der Oberfläche aus der Umlaufbahn, Datenübertragung endete am 19.01.1967
Zond 3	18. Juli 1965	Sowjetische Mission, Vorbeiflug in 9200 km Entfernung am 20.07.1965, 25 Aufnahmen der Rückseite in sehr guter Qualität, Übertragung endete im März 1966	Lunar Orbiter 2	06. Nov. 1966	NASA-Mission, Untersuchung der Oberfläche hinsichtlich potentieller Landestellen für Surveyor und Apollo aus dem Orbit; 817 Aufnahmen mit Tele-Weitwinkeloptik wurden übermittelt, Missionsende am 11.10.1967 durch geplanten Aufschlag
Luna 7	04. Okt. 1965	Sowjetische Mission, Erprobung der Systeme für eine Landung, durch Fehlfunktion der Lageregelung Aufschlag im Bereich des Oceanus Procellarum am 7.10.1965	Luna 13	21. Dez. 1966	Sowjetische Mission, weiche Landung bei Krater Seleucus; Panoramaaufnahmen zu unterschiedlichen Sonnenständen, Abbruch des Funkkontakts am 30.12.1966
Luna 8	03. Dez. 1965	Sowjetische Mission, Erprobung der Systeme für eine Landung, weiche Landung misslang, Aufschlag im Bereich des Oceanus Procellarum am 6.12.1965	Lunar Orbiter 3	05. Febr. 1967	NASA-Mission, Untersuchung der Oberfläche hinsichtlich potentieller Landestellen für Surveyor und Apollo aus dem Orbit; Übertragung von nur 626 Aufnahmen durch Störung im Bildtransportsystem, Missionsende am 09.10.1967 durch geplanten Aufschlag
Luna 9	31. Jan. 1966	Sowjetische Mission, erste weiche Landung eines Messgerätebehälters auf der Mondoberfläche am 03.02.1966 im Oceanus Procellarum bei 7,08° N und 295,63° O; Panoramaaufnahmen der Oberfläche, Missionsende: 06.02.1966	Surveyor 3	17. April 1967	NASA-Mission, neben TV-Kamera auch Bodenexperimente, Messungen der Temperatur und der Radarreflektivität, weiche Landung im südöstlichen Teil des Oceanus Procellarum bei 3,0163° S und 336,582° O am 20.4.1967; 6326 Aufnahmen, letzte Übertragung am 04.05.1967
Luna 10	31. März 1966	Sowjetische Mission, erster künstlicher Satellit des Mondes, arbeitete 56 Tage im Orbit, Missionsende: 30.05.1966	Lunar Orbiter 4	04. Mai 1967	NASA-Mission, Untersuchung der Oberfläche hinsichtlich potentieller Landestellen für Surveyor und Apollo aus dem Orbit; 546 Aufnahmen, Abdeckung: 99% der Vorderseite, Missionsende am 31.10.1967 durch geplanten Aufschlag
Surveyor 1	30. Mai 1966	NASA-Mission, weiche Landung nach direkter Injektion in die Übergangsbahn am 2.6.1966 bei 2,4745° S und 316,6602° O im Inneren eines großen Kraters im südwestlichen Oceanus Procellarum; 10.338 Aufnahmen, 812 Bilder am zweiten Montag, Missionsende: 13.07.1966	Surveyor 4	14. Juli 1967	NASA-Mission, Kontaktabbruch 2,5 Minuten vor der Landung am 17.07.1967, weiche Landung fehlgeschlagen, Aufschlag auf dem Mond oder Explosion des Landers kurz vor dem Aufschlag, Einschlagsstelle unbekannt
Lunar Orbiter 1	10. Aug. 1966	NASA-Mission, Untersuchung der Oberfläche hinsichtlich potentieller Landestellen für Surveyor und Apollo aus dem Orbit; etwa 5,18 Mio. km² abgedeckt, 229 Aufnahmen wurden übertragen, Missionsende am 29.10.1966 durch geplanten Aufschlag	Explorer 35	19. Juli 1967	NASA-Mission, Untersuchung des interplanetaren Plasmas, Magnetfelds, geladener Teilchen und Röntgenstrahlung der Sonne aus der Mondumlaufbahn, Missionsende: 24.06.1973
Luna 11	24. Aug. 1966	Sowjetische Mission, Untersuchung der Gamma- und Röntgenstrahlung und der Schwerkraftanomalien aus dem Mondorbit, Batterie versagte am 01.10.1966	Lunar Orbiter 5	01. Aug. 1967	NASA-Mission, Untersuchung der noch nicht fotografierten Seiten des Mondes aus dem Mondorbit; 844 Aufnahmen, Missionsende am 31. Jan. 1968 durch geplanten Aufschlag

Surveyor 5	08. Sept. 1967	NASA-Mission, neben TV-Kamera auch Bodenexperimente, weiche Landung im Mare Tranquillitatis bei 1,4550° N und 23,1944° O am 11.09.1967; 18.006 Aufnahmen und Bodenanalysen am ersten Mondtag, 19.118 Aufnahmen über vier Mondtage, Kontaktabbruch am 17.12.1967	Apollo 10	18. Mai 1969	NASA-Mission, bemannter Mondflug, Abstiegssimulation im Mondumlauf; größte Annäherung an die Mondoberfläche: 15.185 m, fotografische Erkundung des Mondes, sichere Rückkehr zur Erde am 26.05.1969 Astronauten: Thomas B. Stafford, John W. Young und Eugene A. Cernan
Surveyor 6	07. Nov. 1967	NASA-Mission, neben TV-Kamera auch Instrument zur Bodenanalyse, weiche Landung im Sinus Medii bei 0,4743° N ,358,5725° O am 10.11.1967; 15.000 Aufnahmen und ca. 55 Bodenanalysen; 15.000 Bilder aus neuer Position (stereoskopische Erfassung), letzter Kontakt: 14.12.1967	Luna 15	13. Juli 1969	Sowjetische Mission, Untersuchung der Umgebung des Mondes, des lunaren Schwerfeldes, und der chemischen Zusammensetzung des Mondgesteins, Fotografie der Oberfläche, Missionsende am 21.07.1969 durch Aufschlag
Surveyor 7	07. Jan. 1968	NASA-Mission, neben TV-Kamera auch Instrumente zur Bodenanalyse, weiche Landung ca. 40 km nördlich des Randes von Krater Tycho bei 40,9811° S, 348,4873° O am 10.01.1968; 21.038 Aufnahmen, erstmals Aufnahmen mit Polarisationsfilter; Bodenanalysen, Datenübertragung endete am 21.02.1968	Apollo 11	16. Juli 1969	NASA-Mission, erste bemannte Mondlandung; Landung im Mare Tranquillitatis bei 0,67° N und 23,47° O am 20.07.1969; Aufstellung wissenschaftlicher Experimente, Rückführung von Bodenproben und Aufnahmen, sichere Rückkehr zur Erde am 24.07.1969 Astronauten: Neil A. Armstrong, Michael Collins und Edwin A. Aldrin, Jr.
Luna 14	07. April 1968	Sowjetische Mission, Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Erde und Mond, des lunaren Schwerfeldes, geladener Sonnenwindpartikel, kosmischer Strahlung und der Bewegung des Mondes aus der Umlaufbahn, Missionserfolg konnte nicht nachgewiesen werden	Zond 7	07. Aug. 1969	Sowjetische Mission, Farbaufnahmen von Mond und Erde aus verschiedenen Entfernungen, größte Annäherung: 2000 km; aerodynamische Rückführung, weiche Landung auf der Erde am 14.08.1969
Zond 5	14. Sept. 1968	Sowjetische Mission, Erprobung der Rückführung einer Raumsonde mit biologischer Nutzlast nach Mondvorbeiflug; erfolgreiche Mondhinterfliegung und Rückkehr zur Erde; größte Annäherung: 1950 km, kontrollierter Wiedereintritt am 21.09.1968	Apollo 12	14. Nov. 1969	NASA-Mission, zweite bemannte Mondlandung im Oceanus Procellarum bei 3,01° S und 23,42° W am 19.11.1969, Aufstellung wissenschaftlicher Experimente, Rückführung von Bodenproben und Aufnahmen, sichere Rückkehr zur Erde am 24.11.1969 Astronauten: Charles P. Conrad, Jr., Richard F. Gordon und Alan L. Bean
Zond 6	10. Nov. 1968	Sowjetische Mission, erstmals aerodynamische Rückführung einer biologischen Nutzlast; größte Annäherung: 2420 km; zwei Aufnahmeserien aus 10.000 km und 3000 km Entfernung; kontrollierter Wiedereintritt am 17.11.1968	Apollo 13	11. April 1970	NASA-Mission, versuchte Mondlandung; Abbruch nach Explosion eines Sauerstofftanks im Servicemodul; erfolgreiche Rückkehr zur Erde nach Mondhinterfliegung am 17.04.1970 Astronauten: James A. Lovell, Jr., John L. Swigert, Jr. und Fred W. Haise, Jr.
Apollo 8	21. Dez. 1968	NASA-Mission, erster bemannter Mondflug; fotografische Erkundung des vorgesehenen Apollo-Landeplatzes sowie anderer Gebiete, Test der Systeme des Kommandomoduls, 10 Orbits um den Mond, sechs live TV-Übertragungen, sichere Rückkehr zur Erde am 27.12.1968 Astronauten: Frank Borman, James A. Lovell, Jr. und William A. Anders	Luna 16	12. Sept. 1970	Sowjetische Mission, erstmalig Rückführung von 101 Gramm an Bodenproben mit Hilfe eines unbemannten fernsteuerbaren halbautomatischen Lande-Rückkehr-Gerätes, weiche Landung in Mare Foecunditatis bei 0,5137° S und 56,3836° O am 20.09.1970, Rückstart zur Erde 26 Stunden später, Landung am 24.09.1970

Zond 8	20. Okt. 1970	Sowjetische Mission, größte Annäherung: 1120 km; Erdanflug erstmalig über Nordhalbkugel; Farb- und Schwarzweißaufnahmen von Mond und Erde, Wasserung im Indischen Ozean am 27.10.1970	Apollo 16	16. April 1972	NASA-Mission, fünfte bemannte Mondlandung im Cayley-Hochplateau nahe des Kraters Descartes bei 8,97° S, 15,5° O am 21.04.1972, bemanntes Mondfahrzeug, Aufstellung wissenschaftlicher Experimente, Rückführung von Bodenproben und Aufnahmen, sichere Rückkehr zur Erde am 27.04.1972 Astronauten: John W. Young, Thomas K. Mattingly, II und Charles M. Duke, Jr.
Luna 17	10. Nov. 1970	Sowjetische Mission, weiche Landung im Mare Imbrium bei 38,3151° N, 324,9919° O; fernsteuerbares halbautomatisches Mondfahrzeug „Lunokhod 1“; arbeitete über 11 Mondtage und hat 10.540 m zurückgelegt, über 200 Panoramaaufnahmen; 20.000 weitere Aufnahmen; mehr als 500 Bodenanalysen, Betrieb offiziell eingestellt am 4.10.1971	Apollo 17	07. Dez. 1972	NASA-Mission, sechste und letzte bemannte Mondlandung in der Taurus-Littrow-Region bei 20,19° N und 30,77° O am 11.12.1972; bemanntes Mondfahrzeug, Aufstellung wissenschaftlicher Experimente, Rückführung von 113 kg Mondgestein und Aufnahmen, sichere Rückkehr zur Erde am 19.12.1972 Astronauten: Eugene A. Cernan, Ronald E. Evans und Harrison H. Schmitt
Apollo 14	31. Jan. 1971	NASA-Mission, dritte bemannte Mondlandung nahe des Kraters Fra Mauro im östlichen Oceanus Procellarum bei 3,65° S und 17,47° W am 05.02.1971, Aufstellung wissenschaftlicher Experimente, Rückführung von Bodenproben und Aufnahmen, sichere Rückkehr zur Erde am 09.02.1971 Astronauten: Alan B. Shepard, Jr., Stuart A. Roosa und Edgar D. Mitchell	Luna 21	08. Jan. 1973	Sowjetische Mission, weiche Landung im Krater Le Monnier bei 25,9994° N, 30,4077° O; fernsteuerbares halbautomatisches Mondfahrzeug „Lunokhod 2“, arbeitete über vier Monate und hat 27 Kilometer zurückgelegt; 86 Panorama-Aufnahmen und mehr als 80.000 TV-Aufnahmen, Missionsende am 04.06.1973
Apollo 15	26. Juli 1971	NASA-Mission, vierte bemannte Mondlandung im Gebiet Hadley-Rille bei 26,13° N und 3,63° O am 30.07.1971; erstmals bemanntes Mondfahrzeug, Aufstellung wissenschaftlicher Experimente, Rückführung von Bodenproben und Aufnahmen, sichere Rückkehr zur Erde am 07.08.1971 Astronauten: David R. Scott, Alfred M. Worden und James B. Irwin	Explorer 49 (Radio Astronomy Explorer B)	10. Juni 1973	NASA-Mission, zweiter eines Paares von Radioastronomie-Satelliten, Mondumlaufbahn, Untersuchung der niederfrequenten Radioemissionen der Planeten, der Sonne und der Galaxis, letzter Kontakt im Aug. 1977
Luna 18	02. Sept. 1971	Sowjetische Mission, harte Landung im Gebiet Mare Foecunditatis bei 3,57° N und 56,5° O nach 54 Umläufen am 11.09.1971, Abbruch der Funkverbindung mit Aufschlag	Luna 22	02. Juni 1974	Sowjetische Mission, Untersuchung des Magnetfelds, der Gammastrahlenemissionen der Oberfläche, der Zusammensetzung des Mondgesteins und des lunaren Schwerfeldes aus der Umlaufbahn, Missionsende im Nov. 1975
Luna 19	28. Sept. 1971	Sowjetische Mission, Untersuchung des lunaren Schwerfeldes und der Mascons aus der Mondumlaufbahn; hochauflösende Aufnahmen der Mondoberfläche, Missionsende am 20.10.1972	Luna 23	28. Sept. 1974	Sowjetische Mission, nach Mondumlaufbahn Landung mit Beschädigung des Landers im Mare Crisium bei 12,6669° N und 62,1511° O, Aufnahme von Bodenproben und deren Rückführung fehlgeschlagen, Datenübertragung vom Lander noch drei Tage nach der Landung
Luna 20	14. Febr. 1972	Sowjetische Mission, Landung am Nordostrand des Mare Foecunditatis bei 3,7863° N und 56,6242° O am 21.02.1972; Rückführung von Bodenproben, Rückstart zur Erde einen Tag später, sichere Landung der Kapsel auf der Erde mit 30 g Bodenproben am 25.02.1972	Luna 24	12. Juni 1976	Sowjetische Mission, weiche Landung am südöstlichen Rand des Mare Crisium bei 12,7145° N und 62,2129° O am 18.08.1976, erfolgreiche Rückführung von 170,1 g Mondgestein, Rückstart der Kapsel am 19.08.1976 und weiche Ladung auf der Erde am 22.08.1976

Galileo	18. Okt. 1989	NASA-Mission, multispektrale Aufnahmen während zweier Vorbeiflüge auf dem Weg zum Jupiter (Dez. 1990, Dez. 1992)	LRO	17. Juni 2009	„Lunar Reconnaissance Orbiter“, NASA-Mission, Kartierung der Oberfläche, Charakterisierung zukünftiger Landestellen hinsichtlich Oberflächenrauigkeit, nutzbarer Ressourcen und Strahlungsumgebung aus dem Orbit, aktiv
Hiten (Muses-A)	24. Jan. 1990	Japanische Mission, Test und Verifizierung von Technologien für zukünftige Mission, Freisetzung von Subsatellit „Hagaromo“ in den Mondorbit, Datenübertragung fehlgeschlagen, mehrere Vorbeiflüge am Mond vor Eintritt in die Umlaufbahn, Aufschlag auf dem Mond am 10.04.1993	LCROSS	17. Juni 2009	„Lunar Crater Observation and Sensing Satellite“, NASA-Mission, Suche nach Wassereis, Leitsonde auf Centaur-Oberstufe als Einschlagsprojektil, Start mit LRO, Aufschlag der Centaur am 09.10.2009 bei 84,678° S und 311,275° O, Beobachtung durch Leitsonde, Aufschlag der Leitsonde wenige Minuten später bei 84,72° S und 310,38° O
Clementine	25. Jan. 1994	Amerikanische Mission, Test von Sensoren und Satellitenkomponenten, Untersuchung der Oberflächenmineralogie, globale multispektrale Kartierung aus dem Mondorbit mit einer Auflösung von 125-250 m pro Bildpunkt, geplanter Vorbeiflug an Asteroid 1620 Geographos fehlgeschlagen, Missionsende im Juni 1994	Chang'e 2	01. Okt. 2010	Chinesische Mission, modifizierter Backup-Satellit von Chang'e 1, hochauflösende Aufnahmen der Mondoberfläche, Landestellensuche aus dem Orbit, Verlassen des Orbits zum Lagrange-Punkt L2 am 09.06.2011 und Messungen des Sonnenwindes, Verlassen des L2-Punkts zum Asteroiden 4179 Toutatis, Vorbeiflug am am 13.12.2012 in 3,2 km Entfernung, Kontaktabbruch: 2014
Lunar Prospector	06. Jan. 1998	NASA-Mission, Untersuchung der Oberflächenzusammensetzung und Suche nach Eis an den Polen, Messungen des Magnet- und des Schwerefeldes und lunaren Ausgasungen aus polarem Mondorbit, Missionsende mit geplantem Aufschlag am 31.07.1999	GRAIL	10. Sept. 2011	„Gravity Recovery and Interior Laboratory“, NASA-Mission, 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, Eintritt in den Mondorbit am 31.12.2011 und 01.01.2012, Missionende mit Aufschlag der Sonden auf dem Mond am 17.12.2012
SMART-1	27. Sept. 2003	Europäische Mission, Test von Raumfahrtstechnologien, solargetriebenes Ionentriebwerk, Untersuchung der Geologie, Morphologie, Topographie, Mineralogie, Geochemie und exosphärischen Umgebung, Missionsende mit Aufschlag am 03.09.2005	LADEE	07. Sept. 2013	„Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer“, NASA-Mission, Untersuchung der Exosphäre und des Staubs in der Umgebung des Mondes mit Massenspektrometer, Spektrometer im UV/sichtbaren Bereich, und Staubexperiment, technische Demonstration eines Laserkommunikationsterminals, Missionsende mit geplantem Aufschlag am 17.04.2014 auf der Mondrückseite
Kaguya (SELENE)	14. Sept. 2007	JAXA-Mission, zwei Subsatelliten „Ouna“ und „Okina“, globale Untersuchung des Mondes hinsichtlich Mineralogie, Topographie, Geographie und Gravitation aus dem Orbit, Missionsende mit geplantem Aufschlag am 10.06.2009	Chang'e 3	01. Dez. 2013	Chinesische Mission, weiche Landung im nördlichen Mare Imbrium am 14.12.2013, Freisetzung des Rovers ‚Yutu‘, fotografische Erkundung der Landestelle, offizielles Missionsende für den Rover: 28.07.2016
Chang'e 1	24. Okt. 2007	Chinesische Mission, Technologietests für zukünftige Missionen, Untersuchung der Verteilung und Vorkommen von Elementen, 3D-Aufnahmen aus dem Orbit, Missionsende mit Aufschlag am 01.03.2009			
Chandrayaan 1	22. Okt. 2008	Indische Mission, Technologietests, Erzeugung einer hochauflösenden globalen Karte, mineralogische Kartierung, Untersuchung der Topografie mittels Laser, Freisetzung eines Einschlagkörpers am 14.11.2008, Kontaktabbruch am 28.08.2009			

Chang'e 5 Test Vehicle	23. Okt. 2014	Chinesische Mission, Technologietests für Mission Chang'e 5 (Start 2020), Mondvorbeiflug, Simulation eines Rückflugs zur Erde nach erfolgreicher Mond-Mission, Landung des Rückkehrkapsel auf der Erde am 31.10.2014, Eintritt der Raumsonde in einen lunaren Orbit am 13.01.2015	Hakuto-R M1	11. Dez. 2022	Japanische Mission, gepante Mondlandung, keine Kommunikation nach Landung möglich
Queqiao	20. Mai 2018	Chinesischer Relais-Satellit für Chang'e 4, Halo-Orbit um Langrange-Punkt L2	Chandra-yaan 3	14. Juli 2023	Indische Mission bestehend aus Orbiter, Lander und Rover, erfolgreiche Landung am 23.08.2023, aktiv bis 02.09.2023
Chang'e 4	7. Dez. 2018	Chinesische Mission, weiche Landung im Krater Von Karman im Südpol-Aitken-Becken am 13.01.2019, Freisetzung des Rovers Jadehase 2	Luna 25	10. Aug. 2023	Russische Landemission, weiche Landung fehlgeschlagen
Beresheet	22. Feb. 2019	Israelische Mission, weiche Landung fehlgeschlagen, Aufschlag auf dem Mond am 11.04.2019	SLIM	6. Sept. 2023	JAXA-Mission, Technologiedemonstration für eine weiche Landung, erfolgreiche Landung am 20.01.2024, Fehlfunktion der Sonnenkollektoren, Batterien werden nicht geladen
Chandra-yaan-2	22. Juli 2019	Indische Mission bestehend aus Orbiter, Lander Vikram und Rover Pragyan, weiche Landung fehlgeschlagen, Orbiter noch aktiv	Peregrine Mission 1	8. Jan. 2024	Amerikanische Mission im Rahmen der CLPS-Initiative, Landemission, aufgrund eines Treibstofflecks nach dem Start Wiedereintritt in die Erdatmosphäre am 18.02.2024
Chang'e 5	23. Nov. 2020	Chinesische Mission, Landung auf der Mondrückseite, Rückführung von Mondgestein	Intuitive Machines 1 (Odysseus)	15. Feb. 2024	Amerikanische Mission im Rahmen der CLPS-Initiative, Landung in Südpolnähe am 22.02.2024, Beschädigung des Landers bei der Landung und infolgedessen Umkippen des Landers, Lander arbeitete dennoch bis 28.02.2024
CAPSTONE	28. Juni 2022	„Cislunar Autonomous Positioning System Technology Operations and Navigation Experiment“, NASA-Mission zum Test von Navigationsverfahren im cislunaren Raum und einem neuartigen Halo-Orbit um den Mond	Queqiao-2	20. März 2024	Chinesischer Relais-Satellit für Chang'e-4 und zukünftige Missionen Chang'e-6, -7 und -8, elliptischer Orbit um den Mond, größere Version des Queqiao-Satelliten
Danuri/Korea Pathfinder Lunar Orbiter	04. Aug. 2022	Südkoreanische Mission, Technologiedemonstration, Untersuchung des Mondes aus dem Orbit, Eintritt in den Mondorbit am 16.12.2022	Chang'e-6	3. Mai 2024	Chinesische Mondlande- und Probenrückführungsmission bestehend aus Servicemodul, Lander, Aufstiegsvehikel und Wiedereintrittskapsel, geplante Landung auf dem Mond im südlichen Apollo-Krater, Mondorbit, Landung voraussichtlich im Juni 2024
LunaH-Map	16. Nov. 2022	NASA-Mission, CubeSat zur Bestimmung der Wassereismenge auf dem Mond aus der Umlaufbahn			
Lunar Ice Cube	16. Nov. 2022	NASA-Mission, CubeSat zur Bestimmung der Verteilung von Wasser und organischen Volatilen auf dem Mond aus der Umlaufbahn			
OMOTENA-SHI	16. Nov. 2022	„Outstanding MOon exploration TEchnologies demonstrated by NAno Semi-Hard Impactor“, japanische Mission, Technologiedemonstration, semiharte Landung auf dem Mond, stabile Kommunikation nach dem Start konnte nicht hergestellt werden			
EQUULEUS	16. Nov. 2022	„EQUilibrUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft“, japanische Mission, CubeSat als Technologiedemonstration			
Artemis 1	16. Nov. 2022	NASA-Mission, unbemannter Flug zum Mond, Test des Space Launch Systems und des Orion Crew Vehicle			
Lunar Flashlight	11. Dez. 2022	NASA-Mission, CubeSat, polare Mondumlaufbahn zur Suche nach Wasser			

Missionen zum Mars		
Marsnik 1 (Mars 1960A)	10. Okt. 1960	Sowjetische Mission, erste sowjetische planetare Raumsonde, Versagen der dritten Raketenstufe, Parkorbit nicht erreicht, nach 120 km Höhe Wiedereintritt
Marsnik 2 (Mars 1960B)	14. Okt. 1960	Sowjetische Mission, Versagen der dritten Raketenstufe, Parkorbit nicht erreicht, nach 120 km Höhe Wiedereintritt
Sputnik 22 (Mars 1962A)	24. Okt. 1962	Sowjetische Mission, geplant als Marsvorbeiflug, Misserfolg, entweder zerbrach die Sonde beim Einschuss in den Erdborbit oder die Oberstufe explodierte im Erdborbit

Mars 1	01. Nov. 1962	Sowjetische Mission, Untersuchung des interplanetaren Raums zwischen Erde und Mars, Vorbeiflug am Mars in 193.000 km am 19.06.1963, Abbruch der Funkverbindung am 21.03.1963
Sputnik 24 (Mars 1962B)	04. Nov. 1962	Sowjetische Mission, Fehlfunktion der Oberstufe, konnte Erdorbit nicht verlassen, Wiedereintritt am 19.01.1963
Mariner 3	05. Nov. 1964	NASA-Mission, Untersuchung der Umgebung des Mars und der Oberfläche, Abtrennung der Hülle missglückte, kein Vorbeiflug am Mars, Abbruch der Funkverbindung
Mariner 4	28. Nov. 1964	NASA-Mission, erster erfolgreicher Vorbeiflug am Mars am 14.07.1965, größte Annäherung: 9844 km; 22 Aufnahmen der Marsoberfläche, Abbruch der Funkverbindung am 21.12.1967
Zond 2	30. Nov. 1964	Sowjetische Mission, Vorbeiflug am Mars am 06.08.1965, größte Annäherung; 1500 km, Versagen des Kommunikationssystems Anfang Mai 1965
Zond 3	18. Juli 1965	Sowjetische Mission, Vorbeiflug am Mond am 20.07.1965 in 9200 km Entfernung, Weiterflug zum Mars, Ende der Datenübertragung: März 1966
Mariner 6	25. Febr. 1969	NASA-Mission, Sonde identisch mit Mariner 7, Untersuchung der Oberfläche und der Atmosphäre während des Vorbeiflugs am 31.07.1969 in 3431 km Entfernung, Übertragung von 49 Aufnahmen während des Anflugs auf Mars und 26 Nahaufnahmen, Einstellung des Funkkontakts im Frühjahr 1971
Mariner 7	27. März 1969	NASA-Mission, Sonde identisch mit Mariner 6, Untersuchung der Oberfläche und der Atmosphäre während des Vorbeiflugs am 05.08.1969 in 3430 km Entfernung, Übertragung von 93 Aufnahmen während des Anflugs auf Mars und 33 Nahaufnahmen, Einstellung des Funkkontakts im Frühjahr 1971
Mars 1969A	27. März 1969	Sowjetische Mission, geplant als Marsorbiter, Explosion der dritten Raketenstufe 7 min nach dem Start
Mars 1969B	02. April 1969	Sowjetische Mission, geplant als Marsorbiter, Versagen der ersten Raketenstufe direkt nach dem Start
Mariner 8	08. Mai 1971	NASA-Mission, geplant als Marsorbiter, Fehlfunktion der Centaur-Stufe, Wiedereintritt

Cosmos 419	10. Mai 1971	Sowjetische Mission, geplant als Marsorbiter, Erreichen der Parkbahn um die Erde, Verlassen der Parkbahn aufgrund des Versagens der Oberstufe nicht möglich, Wiedereintritt
Mars 2	19. Mai 1971	Sowjetische Mission, Orbiter und Lander, Untersuchung der Oberfläche, Atmosphäre, Temperatur, Topographie und physikalischen Eigenschaften, Erreichen des Marsorbits am 27.11.1971, erstmaliges Absetzen einer Landekapsel, weiche Landung fehlgeschlagen, Missionsende: 22.08.1972
Mars 3	28. Mai 1971	Sowjetische Mission, identisch mit Mars 2, Untersuchung der Oberfläche, Atmosphäre, Temperatur, Topographie und physikalischen Eigenschaften, Erreichen des Marsorbits am 02.12.1971; Absetzen einer Landekapsel, weiche Landung; Instrumente des Landers arbeiteten nur für 20 Sekunden, Missionsende: 22.08.1972
Mariner 9	30. Mai 1971	NASA-Mission, Kartierung der Oberfläche und Untersuchung der Temperaturveränderungen von Atmosphäre und Oberfläche des Mars, Erreichen des Marsorbits am 14.11.1971, erster künstlicher Satellit eines Planeten, über 7000 Aufnahmen der Marsoberfläche; max. Auflösung: 100 m pro Bildpunkt, Missionsende: 27.10.1972
Mars 4	21. Juli 1973	Sowjetische Mission, geplanter Marsorbiter, gelangte durch technische Fehler nicht in die Mars-Umlaufbahn, Vorbeiflug am 10.02.1974 in ca. 2200 km Entfernung
Mars 5	25. Juli 1973	Sowjetische Mission, Untersuchung der Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften der Marsatmosphäre und der Oberfläche, Erreichen des Marsorbits am 12.02.1974, Orbiter arbeitete nur wenige Tage, Atmosphären- und Aufnahmen eines kleinen Teils der südlichen Hemisphäre konnten übertragen werden, letzter Kontakt am 28.02.1974
Mars 6	05. Aug. 1973	Sowjetische Mission, Flyby-Bussystem und Lander, Ankunft am Mars am 12.03.1974, Landung im Margaritifer Sinus; Versagen der Datenübertragung
Mars 7	09. Aug. 1973	Sowjetische Mission, Flyby-Bussystem und Lander, Ankunft am Mars am 09.03.1974, Landekapsel verfehlte ihr Ziel

Viking 1	20. Aug. 1975	NASA-Mission, Orbiter und Lander, identisch mit Viking 2, hochauflösende Aufnahmen der Oberfläche, Untersuchung der Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre, Suche nach Leben, Erreichen des Marsorbits am 19.06.1976, weiche Landung am 20.07.1976 in Chryse Planitia bei 22,697° N, 48,222° W, beide Orbiter und 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, Abschaltung des Orbiters am 17.08.1980, Lander arbeitete bis 13. Nov. 1982	Mars Global Surveyor	07. Nov. 1996	NASA-Mission, Ersatz für Mars Observer, Eintritt in den Marsorbit am 12.09.1997, aufgrund nicht korrekt ausgeklappter Sonnenkollektoren ein Jahr länger Aerobraking zum Orbit für Oberflächenkartierung, über 243.000 Aufnahmen, hochaufgelöste, globale topographische Karte, Abbruch des Funkkontaktes: 02.11.2006
Viking 2	09. Sept. 1975	NASA-Mission, Orbiter und Lander, identisch mit Viking 1, hochauflösende Aufnahmen der Oberfläche, Untersuchung der Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre, Suche nach Leben, Erreichen des Marsorbits am 07.08.1976, weiche Landung am 03.09.1976 in Utopia bei 48,269° N, 225,990° W, Abschaltung des Orbiters am 25.07.1978, Lander arbeitete bis 11.04.1980	Mars-96	16. Nov. 1996	Russische Mission mit internationaler Beteiligung, instabiler Erdborbit aufgrund eines Fehlers in der 4. Stufe der Trägerrakete, Verlust von Sonde und 4. Stufe, Wiedereintritt: 17.11.1996
Phobos 1	07. Juli 1988	Sowjetische Mission, geplant als Marsorbiter und Verbeiflug an Phobos mit Freisetzung von kleinen Landern, Abbruch der Funkverbindung durch falsches Steuersignal am 02.09.1988, Rettung der Sonde nicht möglich	Mars Pathfinder	04. Dez. 1996	NASA-Mission, weiche 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, mehr als 17.000 Aufnahmen
Phobos 2	12. Juli 1988	Sowjetische Mission, Marsorbiter und Vorbeiflug an Phobos mit Freisetzung kleiner Lander, Erreichen des Marsorbits am 29.01.1989, Wärmebilder eines ca. 1500 km breiten Geländestreifens am Äquator; Auflösung etwa 2 km pro Bildpunkt; 9 Aufnahmen von Phobos; Abbruch der Funkverbindung: 27.03.1989	Nozomi (Planet B)	04. Juli 1998	Japanische Mission, Untersuchung der Marsatmosphäre aus dem Orbit, Eintritt in den Marsorbit zweimal fehlgeschlagen, Aufgabe der Mission: 09.12.2003
Mars Observer	25. Sept. 1992	NASA-Mission, geplant als Marsorbiter, Untersuchung der Geologie und des Klimas, Abbruch der Funkverbindung am 21.08.1993 drei Tage vor Erreichen des Marsorbits; wahrscheinliche Ursache: Explosion des Triebwerks bei Wiederinbetriebnahme für Einschussmanöver	Mars Climate Orbiter	11. Dez. 1998	NASA-Mission, Untersuchung von Wetter und Klima, Wasser- und CO ₂ -Haushalt, Verlust der Sonde bei Eintritt in Umlaufbahn am 23.09.1999
			Mars Polar Lander	03. Jan. 1999	NASA-Mission, Untersuchung von Wetter und Klima, Wasser- und CO ₂ -Haushalt, Landung fehlgeschlagen am 03.12.1999
			Deep Space 2	03. Jan. 1999	NASA-Mission, Teil des New Millennium Programms, bestand aus 2 Mikropenetratoren, die in den Marsboden nahe des Südpols eindringen sollten, Mitführung auf Mars Polar Lander, Landung fehlgeschlagen am 03.12.1999
			2001 Mars Odyssey	07. April 2001	NASA-Mission, detaillierte mineralogische Untersuchung der Oberfläche und Untersuchung der Strahlungsumgebung, auch Kommunikationsrelais für zukünftige Landemissionen, noch aktiv
			Mars Express	02. Juni 2003	ESA-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, noch aktiv

Spirit (Mars Exploration Rover A)	10. Juni 2003	NASA-Mission, Landung im Krater Gusev am 04.01.2004, Rover mit wissenschaftlichen Instrumenten und einer Reichweite von 100 m pro Tag, Untersuchung des Bodens auf Spuren von Leben, Klima, Geologie, Abbruch des Funkkontaktes: 22.03.2010, Missionsende: 25.05.2011
Opportunity (Mars Exploration Rover B)	08. Juli 2003	NASA-Mission, Landung in Meridiani Planum am 25.01.2004, Rover mit wissenschaftlichen Instrumenten und einer Reichweite von 100 m pro Tag, Untersuchung des Bodens auf Spuren von Leben, Klima, Geologie, letzter Funkkontakt am 18.06.2018
Mars Reconnaissance Orbiter	12. Aug. 2005	NASA-Mission, Untersuchung des gegenwärtigen Klimas und der Oberfläche mit hochauflösender Kamera und Suche nach Landeplätzen, Eintritt in den Marsorbit am 10.03.2006, noch aktiv
Phoenix	04. Aug. 2007	NASA-Mission, kleiner stationärer Lander, Untersuchung der Oberfläche in den hohen Breiten, Bestimmung des polaren Klimas und Wetters, Zusammensetzung der unteren Atmosphäre, Geomorphologie, Rolle des Wassers, Landung in der Nordpolregion bei 68,15° N, 125,9° W am 25.05.2008, Missionsende: 02.11.2008
Phobos Grunt	08. Nov. 2011	Russische Mission zum Marsmond Phobos, Erkundung der Landestelle, Probennahme von der Oberfläche und Rückführung zur Erde, Flugbahn zum Mars nicht erreicht durch Fehler in der Antriebseinheit, Erdborbit, Wiedereintritt: 15.01.2012
Yinghuo-1	08. Nov. 2011	Chinesische Mission, „Glühwürmchen“, Tandem-Flug mit Phobos Grunt, Vermessung des Schwerefeldes des Mars über ein Jahr aus dem Orbit, Verlust der Sonde mit Phobos Grunt, Wiedereintritt: 15.01.2012
Mars Science Laboratory	25. Nov. 2011	NASA-Mission, großer Rover „Curiosity“ mit zahlreichen wissenschaftlichen Instrumenten zur Suche nach Leben, erfolgreiche Landung im Krater Gale am 06.08.2012, nominaler Betrieb am Mars: ein Marsjahr (687 Tage), noch aktiv
Mangalyaan (Mars Orbiter Mission)	05. Nov. 2013	Indische Mission, Untersuchung der Oberfläche, Morphologie, Mineralogie und Atmosphäre, Eintritt in den Orbit: 24.09.2014, Missionsende: 01.07.2020

MAVEN	18. Nov. 2013	„Mars Atmosphere and Volatile Evolution“, NASA-Mission, Untersuchung der oberen Atmosphäre, Ionosphäre und Wechselwirkung mit dem Sonnenwind, Ankunft am Mars: 22.09.2014
ExoMars	14. März 2016	ESA-Mission in Zusammenarbeit mit Roskosmos, Orbiter und Lander, Untersuchung der Spurengase in der Marsatmosphäre, Lander „Schiaparelli“ Testmodul für Abstieg und Landung, Abtrennung des Landers drei Tage vor Eintritt des Orbiters in den Orbit, erfolgreicher Eintritt in Orbit am 19.10.2016, Abbruch des Funkkontakts zum Lander während der Landephase, Landung fehlgeschlagen, Orbiter noch aktiv
InSight	05. Mai 2018	NASA-Mission, Absetzen eines stationären Landers am 26.11.2018, Aussetzen eines Seismometers und einer Wärmeflusssonde, Kontaktabbruch infolge völlig verstaubter Solarpaneele am 15.12.2022, Missionsende: 21.12.2022
Hope	19. Juli 2020	Mission der Vereinigten Arabischen Emirate, Marsorbit, Eintritt in den Marsorbit am 09.02.2021
Tianwen 1	23. Juli 2020	Chinesische Mission, Marsorbit und Rover, Eintritt in den Marsorbit am 10.02.2021, erfolgreiche Landung in Utopia Planitia am 14.05.2021, Rover „Zhurong“ rollte am 22.05.2021 auf die Oberfläche
Mars 2020	30. Juli 2020	NASA-Mission, Marsrover „Perseverance“ und Helikopter „Ingenuity“, erfolgreiche Landung im Krater Jezero, noch aktiv

Missionen zu den Asteroiden

Galileo	18. Okt. 1989	NASA-Mission, Vorbeiflug an 951 Gaspra (Okt. 1991) und 243 Ida (Aug. 1993) auf dem Weg zum Jupiter
NEAR	17. Febr. 1996	„Near Earth Asteroid Rendezvous“, NASA-Mission, Untersuchung des Asteroiden 433 Eros aus dem nahen Orbit, Vorbeiflug an 253 Mathilde am 27.06.1997, von Februar 2000 bis Februar 2001 im Orbit um Eros, anschließend kontrollierter Abstieg auf Eros, Abbruch der Funkverbindung: 28.02.2001
Cassini	15. Okt. 1997	NASA-Mission, Vorbeiflug an 2685 Masursky (Jan. 2000) auf dem Weg zum Saturn

Deep Space 1	24. Okt. 1998	NASA-Mission, Test neuer Technologien (Ionenantriebswerk) für den Einsatz im Weltraum, Vorbeiflug am Asteroiden 9969 Braille (29.07.1999) und am Kometen Borrelly (22.09.2001), Missionsende: 18.12.2001
Hayabusa (Muses-C)	09. Mai 2003	Japanische Mission, Orbiter und Lander „Minerva“ zur Probenrückführung von der Oberfläche des Asteroiden 25143 Itokawa, Technologie-Demonstrator, Ankunft bei Itokawa im Sept. 2005, Freisetzung des Landers am 12.11.2005 mit Kontaktverlust, Landung des Orbiter am 25.11.2005, Probennahme und Rückstart, Wiedereintritt der Probenkapsel in die Erdatmosphäre am 13.07.2010
Rosetta	26. Febr. 2004	ESA-Mission, Orbiter und Lander „Philae“, Vorbeiflug an 2867 Šteins (05.09.2008) und 21 Lutetia (10.07.2010) auf dem Weg zum Kometen Churyumov-Gerasimenko, Ankunft am Kometen im Mai 2014, Landung von Philae im Nov. 2014, Missionsende am 30.09.2016 mit Absetzen des Landers auf dem Kometen
Dawn	27. Sept. 2007	NASA-Mission, Orbiter zu 4 Vesta und im Anschluss zu 1 Ceres, Ankunft an Vesta und Orbit vom 14.08.2011 bis 05.09.2012, Ankunft bei 1 Ceres: 06.03.2015, Missionsende: 31.10.2018
Hayabusa2	3. Dez. 2014	JAXA-Mission, modifizierte Version des Hayabusa-Designs, Untersuchung des Asteroiden Ryugu, Abfeuern eines Projektils auf den Asteroiden, Absetzen des Landers MASCOT, Untersuchung des Einschlags, Rücksendung von Proben, Landung der Probenkapsel am 05.12.2020, Weiterflug des Orbiter zum Asteroiden 1887 KY26
PROCYON	3. Dez. 2014	„PROximate Object Close flyBy with Optical Navigation“, JAXA-Mission, gestartet mit Hayabusa2, Vorbeiflug an einem oder mehreren Asteroiden, Ausfall des Ionenantriebswerks am 10.03.2015
OSIRIS-REx	8.Sept. 2016	„Origins Spectral Interpretation Resource Identification, Security, Regolith Explorer“, NASA-Mission zum erdnahen Asteroiden 101955 Bennu, globale, chemische und mineralogische Kartierung, Untersuchung der Textur, Morphologie und spektralen Eigenschaften an der Stelle der Probennahme, Rückführung einer Probe, Ankunft an Bennu: Aug. 2018, Begleitung des Asteroiden über 500 Tage Ankunft der Probe auf der Erde am 24.09.2023, Nachfolgemission zu Apophis

Lucy	16. Okt. 2016	NASA-Mission, Vorbeiflug an einem Hauptgürtel-Asteroiden und den Jupiter-Trojanern bei L4 und L5, Vorbeiflug an Dinkinesh am 01.11.2023, Vorbeiflug an Donaldjohanson am 25.04.2025, Ankunft bei dem Trojanern im August 2027
DART	24. Nov. 2021	„Double Asteroid Redirection Test“, NASA-Mission, Teil des Projekts AIDA zur Asteroidenabwehr, Einschlag auf dem Asteroiden Dimorphos am 26.09.2022
LICIACube	24. Nov. 2021	Italienische Mission, gemeinsamer Start mit DART, CubeSat zur Beobachtung des Einschlags von DART auf Dimorphos
NEA Scout	16. Nov. 2022	NASA-Mission, CubeSat, geplanter Asteroiden-Vorbeiflug, nach dem Start kein Kontakt zur Sonde möglich
Psyche	13. Okt. 2023	NASA-Mission zum Asteroiden Psyche im Asteroidengürtel, Ankunft bei Psyche im Aug. 2029

Missionen zum Jupiter

Pioneer 10	03. März 1972	NASA-Mission, erste Sonde in das äußere Sonnensystem, Untersuchung des Jupiter während des Vorbeiflugs am 04.12.1972 in 200.000 km Entfernung, zahlreiche Aufnahmen der Äquatorregion und einiger Monde, erste Sonde, die das Sonnensystem verlassen hat, letzter Kontakt: 23.01.2003
Pioneer 11	06. April 1973	NASA-Mission, zweite Sonde zum Jupiter und in das äußere Sonnensystem, erste Sonde zum Saturn, Vorbeiflug an Jupiter am 03.12.1974 in 42.000 km Entfernung, zahlreiche Aufnahmen von Jupiter und einiger Monde, Ende 1995 letzter Kontakt bei einer Entfernung von 44,7 AE
Voyager 2	20. April 1977	NASA-Mission, Untersuchung der äußeren Planeten, Vorbeiflug an Jupiter am 09.07.1979 in 722.000 km Entfernung, ca. 18.000 Aufnahmen von Jupiter und seinen Monden, Verlassen des Sonnensystems, noch aktiv
Voyager 1	05. Sept. 1977	NASA-Mission, Untersuchung der äußeren Planeten, Vorbeiflug an Jupiter am 05.03.1979 in 349.000 km Entfernung, ca. 18.000 Aufnahmen von Jupiter und seinen Monden, interstellaren Raum am 25.08.2012 erreicht, noch aktiv

Ulysses	06. Okt. 1990	Europäisch-Amerikanische Mission, Untersuchung der Sonne, Vorbeiflug an Jupiter am 08.02.1992, Missionsende: 29.06.2009
Galileo	18. Okt. 1989	Amerikanisch-deutsche Mission, erste Sonde mit komplexer Flugbahn unter Ausnutzung der Schwerkraft; Orbiter und Atmosphären-eintrittskörper, Untersuchung der Atmosphäre und Magnetosphäre Jupiters und der Galileischen Monde, Ankunft am Jupiter am 07.12.1995, Missionsende mit Einschlag auf Jupiter: 21.09.2003
Cassini	15. Okt. 1997	Amerikanisch-europäische Mission, Untersuchung des Saturnsystems, Vorbeiflug an Jupiter im Dez. 2000 auf dem Weg in das Saturnsystem
New Horizons	19. Jan. 2007	NASA-Mission, Untersuchung von Pluto und seinem Mond Charon und Weiterflug in den Kuipergürtel, Vorbeiflug an Jupiter am 28.02.2007 auf dem Weg in das Pluto-Charon-System
Juno	05. Aug. 2011	NASA-Mission, Untersuchung der Atmosphäre, des Magnetfeldes, des Schwerefeldes und der Magnetosphäre aus einem polaren Orbit, nach Erdvorbeiflug am 09.10.2013 Ankunft am Jupiter am 05.07.2016, geplantes Ende der Mission im Sept. 2025 mit Verglühen in der Jupiteratmosphäre
JUICE	14. April 2023	„JUpiter ICy moons Explorer“, ESA-Mission ins Jupitersystem, Untersuchung der großen Eismonde, geplante Ankunft: Juli 2031

Missionen zum Saturn

Pioneer 11	06. April 1973	NASA-Mission, zweite Sonde zum Jupiter und in das äußere Sonnensystem, erste Sonde zum Saturn, Vorbeiflug an Saturn am 01.09.1979 in 20.800 km Entfernung, 440 Aufnahmen von Saturn und einigen Monden, Ende 1995 letzter Kontakt bei einer Entfernung von 44,7 AE
Voyager 2	20. Aug. 1977	NASA-Mission, Untersuchung der äußeren Planeten, Vorbeiflug an Saturn am 16.08.1981 in 102.000 km Entfernung, ca. 16.000 Aufnahmen von Saturn und seinen Monden, Verlassen des Sonnensystems, noch aktiv

Voyager 1	05. Sept. 1977	NASA-Mission, Untersuchung der äußeren Planeten, Vorbeiflug an Saturn am 26.08.1981 in 124.000 km Entfernung, ca. 16.000 Aufnahmen von Saturn und seinen Monden, erreichte den interstellaren Raum am 25.08.2012, noch aktiv
Cassini	15. Okt. 1997	Amerikanisch-europäische Mission, Erkundung des Saturnsystems aus dem Orbit, Absetzen der Landekapsel Huygens zur Untersuchung des Mondes Titan im Dez. 2004, Missionsende mit Einschlag auf Saturn: 15.09.2017

Missionen zum Uranus

Voyager 2	20. Aug. 1977	NASA-Mission, Untersuchung der äußeren Planeten, Vorbeiflug an Uranus am 24.01.1986 in 107.000 km Entfernung, 7000 Aufnahmen von Uranus und seinen Monden, Verlassen des Sonnensystems, noch aktiv
-----------	---------------	--

Missionen zum Neptun

Voyager 2	20. Aug. 1977	NASA-Mission, Untersuchung der äußeren Planeten, Vorbeiflug an Neptun am 25.08.1989 in 29.240 km Entfernung, 9000 Aufnahmen von Neptun und seinen Monden, Verlassen des Sonnensystems, noch aktiv
-----------	---------------	---

Missionen zu den Zwergplaneten

New Horizons	19. Jan. 2006	NASA-Mission, Untersuchung von Pluto und seinem Mond Charon, Ankunft im Pluto-Charon-System im Juli 2015, Weiterflug in den Kuipergürtel, noch aktiv
Dawn	27. Sept. 2007	NASA-Mission, Orbiter zu 4 Vesta und im Anschluss zu 1 Ceres, Ankunft an Vesta und Orbit vom 14.08.2011 bis 05.09.2012, Ankunft bei 1 Ceres: 06.03.2015, Missionsende: 31.10.2018

Missionen zu den Kometen

ISEE 3/ICE	12. Aug. 1978	„International Sun Earth Explorer 3“, NASA-Mission, Umbenennung in „International Cometary Explorer“, Untersuchung der Wechselwirkungen des Sonnenwindes mit der Kometenatmosphäre, Flug durch Plasmaschweif des Kometen Giacobini-Zinner am 11.09.1985, erneute Kontaktaufnahme 2014, geplante Kurskorrekturen nicht möglich
Vega 1	15. Dez. 1984	Sowjetische Mission, Vorbeiflug am Kometen Halley am 06.03.1986 nach Venusvorbeiflug im Juni 1985
Vega 2	21. Dez. 1984	Sowjetische Mission, Vorbeiflug am Kometen Halley am 09.03.1986 nach Venusvorbeiflug am Juni 1985
Sakigake	07. Jan. 1985	Japanische Mission, Vorbeiflug am Kometen Halley am 11.03.1986, Kontaktabbruch: 14.11.1995
Giotto	02. Juli 1985	ESA-Mission, Untersuchung des Kometen Halley während des Vorbeiflugs am 13.03.1986 in 605 km Entfernung, Aufnahmen vom Kometenkern, Vorbeiflug am Kometen Grigg-Skjellerup am 10.07.1992 in 200 km Entfernung, Missionsende: 23.07.1992
Suisei	18. Aug. 1985	Japanische Mission, Vorbeiflug am Kometen Halley am 08.03.1986 in 151.000 km Entfernung, Missionsende: 22.02.1991
Galileo	18. Okt. 1989	Amerikanisch-deutsche Mission, erste Sonde mit komplexer Flugbahn unter Ausnutzung der Schwerkraft, Aufnahmen der Spuren nach Einschlag der Fragmente des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter vom 17.-22.04.1994
NEAR	17. Febr. 1996	„Near Earth Asteroid Rendezvous“, Untersuchung des Asteroiden 433 Eros aus dem Orbit, Vorbeiflug an Komet Hyakutake am 24.03.1996 auf dem Weg zu 433 Eros
Deep Space 1	24. Jan. 1998	NASA-Mission, Test neuer Technologien (Ionenantriebswerk) für den Einsatz im Weltraum, Vorbeiflug am Asteroiden 9969 Braille (29.07.1999) und am Kometen Borrelly (22.09.2001), Missionsende: 18.12.2001
Stardust	07. Febr. 1999	NASA-Mission, Untersuchung des Kometen P/Wild 2, Gewinnung von Staubproben und flüchtigen Stoffen aus der Koma, Kartierung des Kometenkerns während des Vorbeiflugs am 31.12.2003, Rückführung der Proben zur Erde am 15.01.2005, Verlängerung der Mission als Stardust/NEXT (New Exploration of Tempel 1), Untersuchung des Kometen Tempel 1 während des Vorbeiflugs am 15.02.2011 in 200 km Entfernung, Kontaktabbruch: 25.03.2011
CONTOUR	03. Juli 2002	„Comet Nucleus Tour“, NASA-Mission, nahe Vorbeiflüge an den Kometen Encke und Schwassmann-Wachmann 3 und möglicher Vorbeiflug am Kometen d'Arrest, konnte Erdbahn nicht verlassen, Kontaktabbruch: 15.08.2002
Rosetta	26. Febr. 2004	ESA-Mission, Orbiter und Lander „Philae“, Vermessung und Kartierung des Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko aus dem „Orbit“, weiche Landung auf Kometenkern, Ankunft am Kometen 06.08.2014, Landung von Philae am 12.11.2014, Missionsende mit Absetzen des Orbiters auf dem Kometen: 30.09.2016
Deep Impact	12. Jan. 2005	NASA-Mission, Untersuchung des Kometen Tempel 1 während des Vorbeiflugs am 03.07.2005, Abfeuern eines Projektils auf den Kern, Untersuchung des Einschlags, Verlängerung der Mission als EPOXI, Untersuchung des Kometen Hartley 2 während des Vorbeiflugs am 04.11.2010 aus 700 km Entfernung, Missionsende: 19.09.2013

Missionen in den Kuipergürtel

New Horizons	19. Jan. 2006	NASA-Mission, Untersuchung von Pluto und seinem Mond Charon, Ankunft im Pluto-Charon-System im Juli 2015, Weiterflug in den Kuipergürtel, noch aktiv
--------------	---------------	--

Weiterführende Literatur

Jaumann, R.; Köhler, U.; Sohl, F.; Tirsch, D.; Pieth, S.: Expedition zu fremden Welten : 20 Milliarden Kilometer durch das Sonnensystem. – Springer, 2017.

Jaumann, R.; Köhler, U.: Der Mond : Entstehung, Erforschung, Raumfahrt. – Köln : Fackelträger, 2009

Jaumann, R.; Köhler, U.: Der Mars : Ein Planet voller Rätsel. – Köln : Fackelträger, 2013

Feuerbacher, B.: Mission Rosetta: Mit Philae zum Kometen 67P – eine spektakuläre Reise. – München : Geramond, 2016

Dambeck, T.: Planetenwelten: In den Tiefen des Sonnensystems – KOSMOS, 2018

Englischsprachige Fachliteratur

de Pater, I. und Lissauer, J.J.: Planetary Sciences. – Cambridge University Press, 2015

Faure, G. und Mensing, T.M.: Introduction to Planetary Science : The Geological Perspective. – Springer, 2007

Melosh, J.H.: Planetary Surface Processes. – Cambridge University Press, 2012

Spohn, T., Breuer, D., Johnson, T.V.: Encyclopedia of the Solar System. – Elsevier, 3. Auflage 2014

Vita-Finzi, C. und Fortes, A.D.: Planetary Geology : An Introduction. – Dundee Academic Press, 2. Auflage 2013

Alle Zahlenangaben beziehen sich auf Quellen von NASA, ESA und DLR sowie einschlägige Literatur (wie Encyclopedia of the Solar System, Landolt-Börnstein) und auf die aktuelle veröffentlichte Fachliteratur.

Weiterführende WWW-Adressen

International Astronomical Union
<https://www.iau.org/>

National Aeronautics and Space Administration (NASA)
<https://www.nasa.gov/>

European Space Agency (ESA)
<https://www.esa.int/>

Deutsche Raumfahrtagentur im DLR
<https://www.dlr.de/de/ar/>

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
<https://global.jaxa.jp/>

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

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

National Space Science Data Center (NSSDC)
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/>

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

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

ESA Planetary Science Archive (PSA)
<https://archives.esac.esa.int/psa/>

Gazetteer of Planetary Nomenclature
<https://planetarnames.wr.usgs.gov/>

NASA Science
<https://science.nasa.gov/>

NASA Image and Video Library
<https://images.nasa.gov/>

Windows to the Universe
<https://www.windows2universe.org/>

Views of the Solar System
<https://solarviews.com>

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

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

WIE KOMME ICH AN BILDDATEN?

Die Regional Planetary Image Facility (RPIF)

Sicherlich haben Sie sich nach der Lektüre dieser Broschüre gefragt, ob es denn eine Einrichtung in Deutschland gibt, wo man Bildmaterial zum Sonnensystem bekommen kann. Heutzutage kann man sehr viel selbst im Internet recherchieren, aber mitunter ist es einfacher, mit einer Einrichtung Kontakt aufzunehmen, die darauf spezialisiert ist 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 im Jahre 1985 auf der Basis eines Abkommens zwischen dem DLR und der NASA wurde die Bibliothek vier Jahre später eröffnet. Seit 1992 befindet sich die RPIF am Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof. Die RPIF ist Teil eines internationalen, von der NASA koordinierten Netzes von Bildbibliotheken. Weltweit gibt es insgesamt 16 derartige Einrichtungen, von denen sich neun in den USA, vier in Europa und je eine in Kanada, Japan und Israel befinden. Die Berliner RPIF bedient den gesamten deutschsprachigen Raum. 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.

Bestand

Der Bestand umfasst Bilddaten, spektrale Daten sowie die zugehörigen Lage- und Positionsdaten der jeweiligen Raumsonde. Ergänzt werden diese Daten durch Dokumentationen, Karten und eine Auswahl an Fachzeitschriften und Fachliteratur in einer Präsenzbibliothek. Alle Daten stehen in dokumentierter und katalogisierter Form sowohl für wissenschaftliche Forschungszwecke als auch für die Öffentlichkeit zur Verfügung.

* Fernerkundungsdaten der Erde werden im Earth Observation Center (EOC) des DLR in Oberpfaffenhofen archiviert: www.dlr.de/eoc

Es stehen hauptsächlich Daten US-amerikanischer, aber auch europäischer und sowjetischer/russischer sowie japanischer Missionen zur Verfügung. Mit dieser im Hinblick auf die amerikanischen Missionen fast lückenlosen Datenbank, ist die RPIF die „erste Adresse“ für Planetenbilddaten im deutschsprachigen Raum.

Die Daten aktueller sowie auch zukünftiger Raumflüge werden der RPIF von NASA-Seite zur Verfügung gestellt. 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 und die seit 2003 Bilddaten liefert.

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. 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: www.dlr.de/rpif Dort finden Sie im Downloadbereich auch andere Materialien wie Poster, Bildserien oder Bastelsets im PDF-Format.

Anfragen sind zu richten an:

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

Die DLR_School_Labs und das Jugendportal DLR_next

Über die Erforschung des Sonnensystems und viele weitere Projekte aus Luft- und Raumfahrt, Energie und Verkehr informiert das DLR Schülerinnen und Schüler in seinen DLR_School_Labs, die es an über 15 Orten in Deutschland gibt. Insgesamt besuchen jährlich rund 40.000 junge Gäste diese Schülerlabore, wo sie spannende Mitmach-Experimente durchführen und dabei in die faszinierende Welt der Forschung eintauchen können. So betrachten sie beispielsweise Meteoriten unter dem Polarisationsmikroskop, beschäftigen sich mit Pflanzenwachstum im All oder erfahren, wie die Seismologie Rückschlüsse auf das Innere von Himmelskörpern ermöglicht. In anderen Hands-on-Versuchen wird Kometen-Materie künstlich nachgebildet und in einer Vakuumkammer untersucht oder die Schülerinnen und Schüler analysieren mithilfe eines speziellen Teleskops das aktuelle Geschehen auf der Sonne. Und auch der Mars ist ein wichtiges Thema: Da werden hochaufgelöste Bilder der HRSC-Kamera interpretiert und kleine Rover über eine künstliche Marslandschaft gesteuert.

Junge Leute, die uns zunächst einmal virtuell kennenlernen wollen, können das auf unserem Jugendportal DLR_next tun: Anhand von leicht verständlichen Texten werden hier viele aktuelle Projekte vorgestellt und eindrucksvolle Bildergalerien sowie spektakuläre Videos laden zum Staunen ein. Auch dabei geht es immer wieder um die Erkundung unserer kosmischen Nachbarschaft: von den damaligen *Apollo*-Flügen über Sonden wie *Mars Express*, *Rosetta* und *New Horizons* bis zum heutigen *Artemis*-Programm. In der Rubrik „Materialien für den Unterricht“ sind unsere DLR_School_Infos u.a. zu den Themen „Erde und Mond“, „Unser Sonnensystem“, „Mit Astronauten ins Weltall“ und „Leben im All“ zu finden.

Links:

www.DLR.de/dlrschoollab
www.DLR.de/next