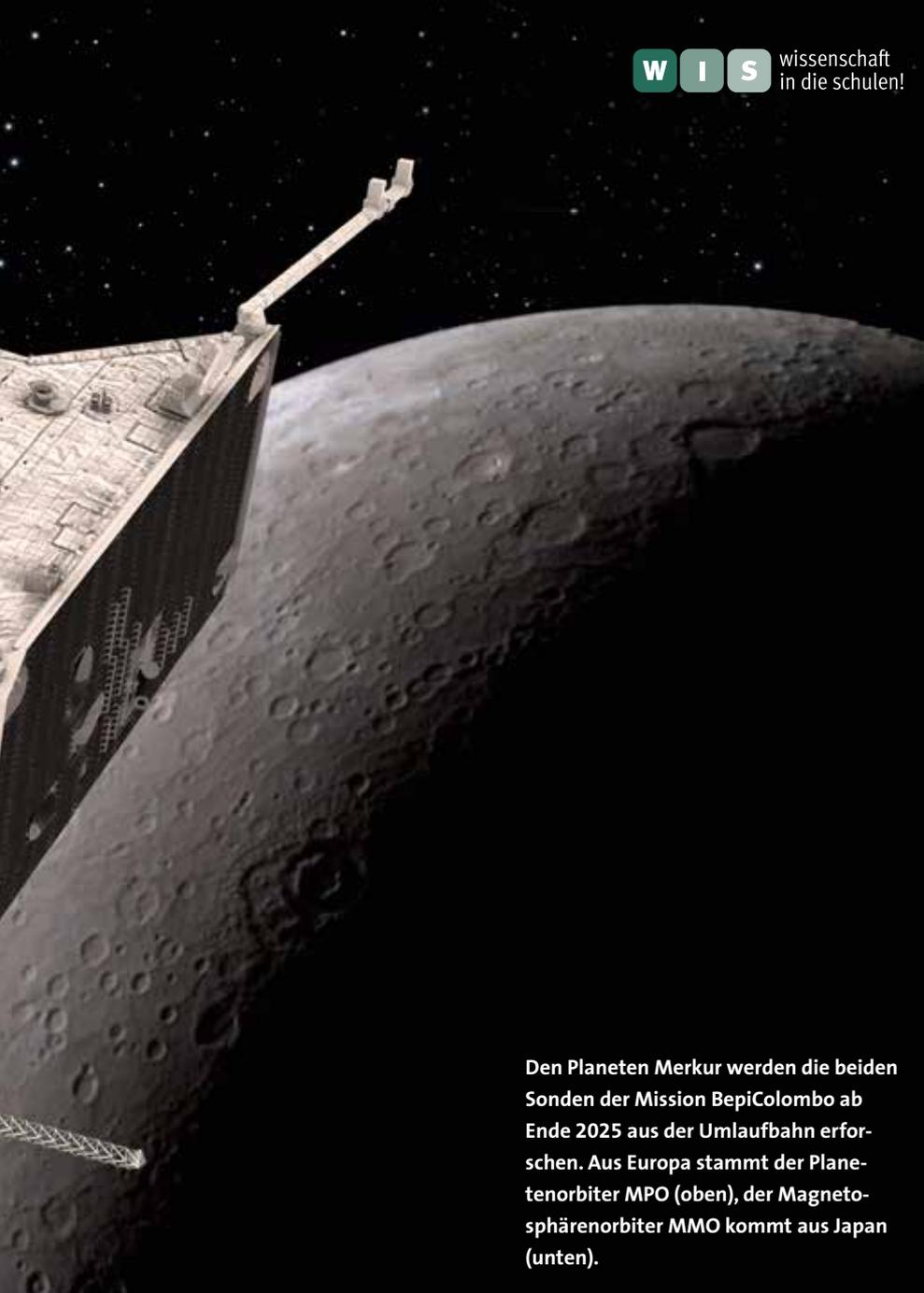


Sonden: ESA/ATG medialab; Merkur: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington / ESA

Aufbruch zum **Merkur**

Die Mission der Raumsonde BepiColombo beginnt

Merkur ist bisher weniger gut erforscht als andere Planeten unseres Sonnensystems. Ein Grund ist die Nähe zu unserem Tagesgestirn, die komplexe Vorkehrungen für den Flug und die Messphase einer Raummission erfordert. Eine europäisch-japanische Doppelsonde soll dem Planeten nun die letzten Geheimnisse entreißen.



Den Planeten Merkur werden die beiden Sonden der Mission BepiColombo ab Ende 2025 aus der Umlaufbahn erforschen. Aus Europa stammt der Planetenorbiter MPO (oben), der Magnetosphärenorbiter MMO kommt aus Japan (unten).

Sonden: ESA/ATG medialab; Merkur: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington / ESA

ten, wo sie sich im Dezember 2025 voneinander trennen und jeweils in eigene Umlaufbahnen eintreten. Bei Erfolg wird BepiColombo durch umfangreichere und genauere Untersuchungen die Ergebnisse ihrer beiden Vorgänger vervollständigen und beträchtlich erweitern.

Die heißeste Welt im Sonnensystem

Merkur ist ein Planet der Extreme: Für einen Beobachter auf seiner Oberfläche erscheint der Durchmesser der Sonne im sonnennächsten Punkt, dem Perihel, etwa dreimal so groß wie auf der Erde, und die Sonneneinstrahlung ist etwa zehnmals so intensiv. Dadurch steigt die Temperatur in der Äquatorregion auf etwa 470 Grad Celsius, in der Nacht kann sie dagegen am selben Ort bis auf -183 Grad Celsius absinken. Die Neigung der Rotationsachse gegen die Bahnebene des Planeten beträgt nahezu null, so dass es in den Polarregionen vor der Sonneneinstrahlung geschützte Gebiete wie etwa Einschlagkrater und Tiefen gibt, in denen es nie wärmer als etwa -163 Grad Celsius wird. Die Forscher vermuten, dass sich dort durch Kometeneinschläge abgelagertes Wassereis trotz der sonst sehr hohen Temperaturen über sehr lange Zeiträume halten könnte (siehe Bild S. 29 links unten).

Mit einem Äquatordurchmesser von 4880 Kilometern ist Merkur der kleinste Planet in unserem Sonnensystem und nur etwa 40 Prozent größer als unser Erdmond. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt er 88 Tage. Seine Umlaufbahn ist

Von Harald Krüger, Norbert Krupp und Markus Fränz

Merkur, benannt nach dem Götterboten der griechisch-römischen Mythologie, ist der innerste Planet unseres Sonnensystems. Von der Erde aus gesehen steht er immer an einem aufgehellten Himmel und lässt sich nur schwer mit Teleskopen beobachten. Lange Zeit waren deshalb nur vage Details auf seiner Oberfläche bekannt. Seit dem Beginn des Raumfahrtzeitalters lieferten die Untersuchungen von zwei Raumsonden eine Vielzahl an neuen Erkenntnissen über den sonnennächsten und kleinsten Planeten.

Im Jahr 1974 erreichte die US-Raumsonde Mariner 10 als erste den Merkur

und kartierte bei drei Vorbeiflügen etwa 45 Prozent seiner Oberfläche. Die zur Erde übertragenen Bilder enthüllten einen mit Einschlagkratern übersäten Himmelskörper, der dem Mond auf den ersten Blick zum Verwechseln ähnelt (siehe Kasten S. 28). Danach dauerte es mehr als 35 Jahre, bis Merkur wieder Besuch bekam: Die Raumsonde Messenger schwenkte im Jahr 2011 in eine Umlaufbahn um den Planeten ein und untersuchte ihn insgesamt vier Jahre lang.

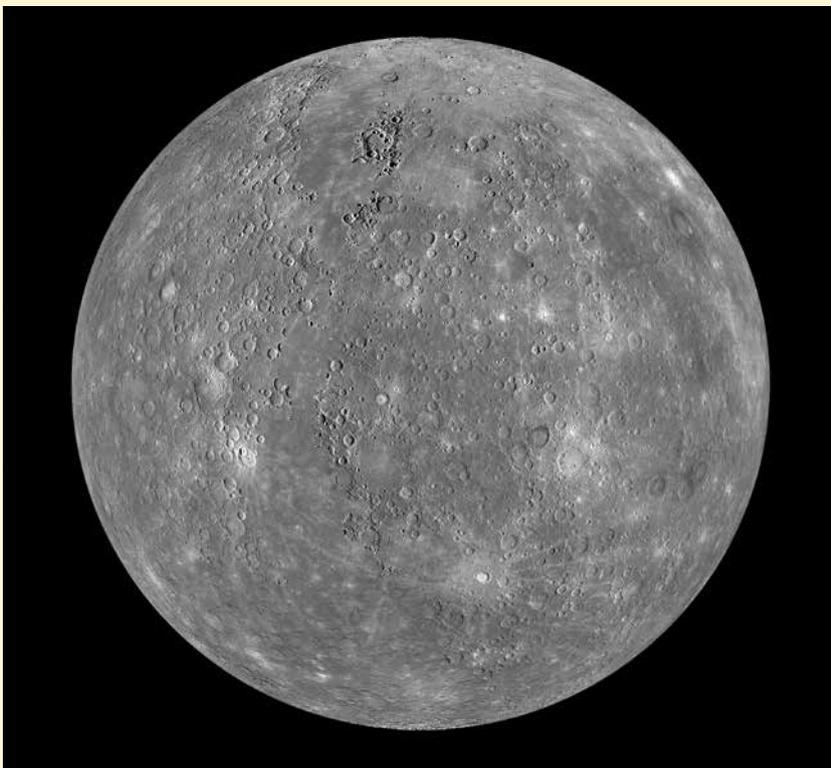
Im Oktober soll nun die europäisch-japanische Doppelmission BepiColombo zum Merkur aufbrechen. Beide Sonden fliegen gemeinsam zum innersten Plane-

IN KÜRZE

- Die Raumsonde BepiColombo ist eine der komplexesten Planetenmissionen der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA.
- BepiColombo besteht aus zwei Teilsonden, dem japanischen Magnetosphärenorbiter und dem europäischen Planetenorbiter, der vor allem den Planeten selbst erkundet.
- Die Mission soll im Oktober 2018 starten und nach einem rund siebenjährigen Flug im Dezember 2025 in den Merkurorbit einschwenken.

Merkur – Letzter Fels vor der Sonne

Mittlerer Abstand von der Sonne	57,9 Millionen Kilometer = 0,387 Astronomische Einheiten
Bahnexzentrizität	0,21
Umlaufperiode um die Sonne	88 Tage = 0,241 Jahre
Bahnneigung gegen die Ekliptik	7 Grad
Äquatordurchmesser	4880 Kilometer = 0,38 Erddurchmesser
Neigung der Rotationsachse gegen die Bahnebene	0,03 Grad
Rotationsperiode	58,65 Tage = 0,16 Jahre
Masse	0,055 Erdmassen
Mittlere Dichte	5,44 Gramm pro Kubikzentimeter
Maximale Oberflächentemperatur in Sonnennähe (Perihel)	+467 Grad Celsius
Minimale Oberflächentemperatur in Sonnennähe im Schatten	-183 Grad Celsius



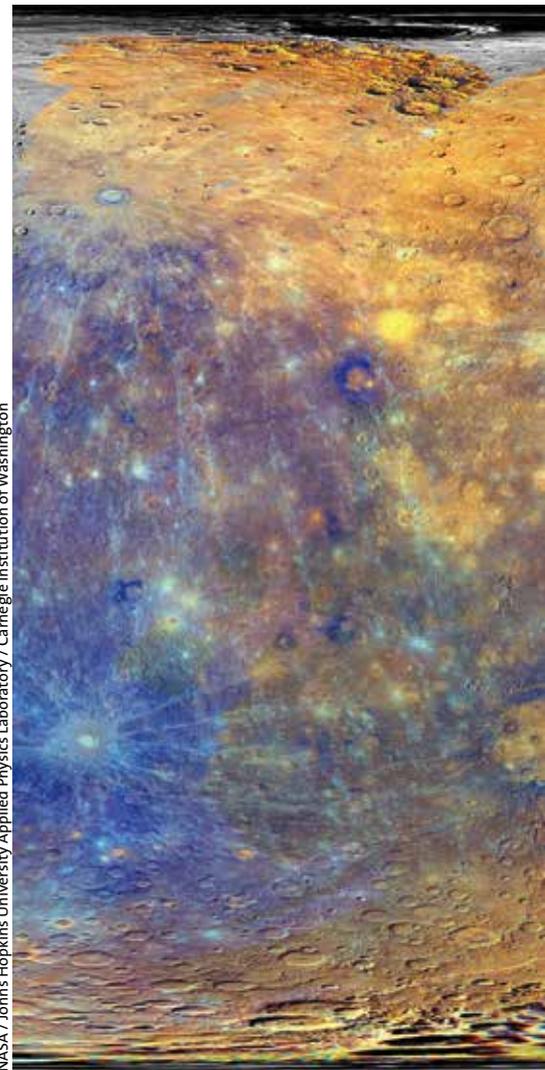
Merkur präsentiert dem Betrachter eine von Einschlagkratern übersäte Oberfläche, die aus der Frühzeit des Sonnensystems vor mehr als vier Milliarden Jahren stammt. Dieses Porträt wurde aus vielen Bildern der US-Raumsonde Messenger zusammengesetzt, BepiColombo soll die Kartierung noch detaillierter fortführen.

stark elliptisch, weshalb sein Sonnenabstand zwischen 46 Millionen Kilometern im Perihel und 70 Millionen Kilometern im sonnenfernsten Punkt, dem Aphel, schwankt. Merkur rotiert in 58,65 Tagen einmal um seine Achse; seine Rotationsperiode ließ sich erst in den 1960er Jahren durch Radarbeobachtungen von der Erde aus bestimmen. Eine Rotation erfolgt in genau 2/3 der Umlaufzeit Merkurs um die Sonne. Der Planet befindet sich somit

in einer 3:2-Resonanz zwischen seiner Umlauf- und seiner Rotationsperiode: Innerhalb von zwei Umläufen um die Sonne rotiert er dreimal um seine Achse.

Innerer Aufbau

Merkur hat eine ausgesprochen hohe mittlere Dichte von 5,44 Gramm pro Kubikzentimeter. Diesen Wert übertrifft in unserem Sonnensystem nur noch die Erde mit 5,52 Gramm pro Kubikzentimeter. Be-



rücksichtigt man jedoch im Fall der Erde, dass weiter oben liegende Gesteinsschichten das darunter liegende Material komprimieren, so ist die Dichte von Merkur sogar höher als die irdische.

Ähnlich wie die Erde gliedert sich Merkur in einen Kern aus metallischem Eisen und Nickel, einen darüber liegenden silikatischen Mantel und eine Kruste (siehe Grafik S. 29 rechts unten). Die Raumsonde Messenger bestimmte den Kerndurchmesser zu etwa 4060 Kilometer, was 83 Prozent des Gesamtdurchmessers von Merkur entspricht; bei der Erde sind es nur etwa 54 Prozent. Berücksichtigt man weiterhin, dass die Kruste überwiegend aus Silikatgesteinen besteht, so zeigt sich, dass der Kern trotz seiner hohen Dichte wahrscheinlich nicht nur eine reine Legierung aus metallischem Eisen und Nickel enthält, sondern auch Beimengungen von leichteren Elementen wie Silizium oder Schwefel.

Der Mantel und die Kruste von Merkur sind zusammen nur etwa 410 Kilometer dick. Die Dicke der Kruste beträgt am

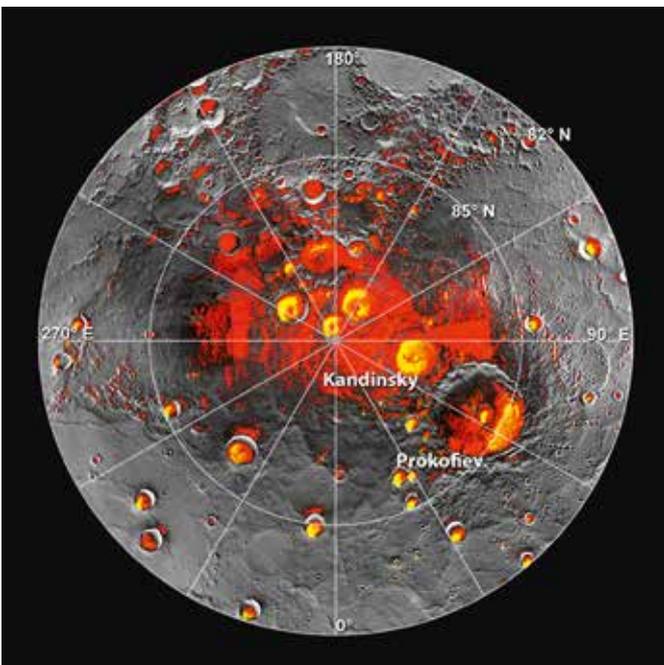


Unterschiedliche chemische, mineralogische und physikalische Eigenschaften der Gesteine des sonnennächsten Planeten treten auf dieser in Falschfarben erstellten Karte der gesamten Merkur Oberfläche hervor. Oberhalb der Bildmitte befindet sich das rund 1500 Kilometer große Einschlagbecken Caloris. Die Karte wurde aus Bilddaten der US-Raumsonde Messenger zusammengesetzt.

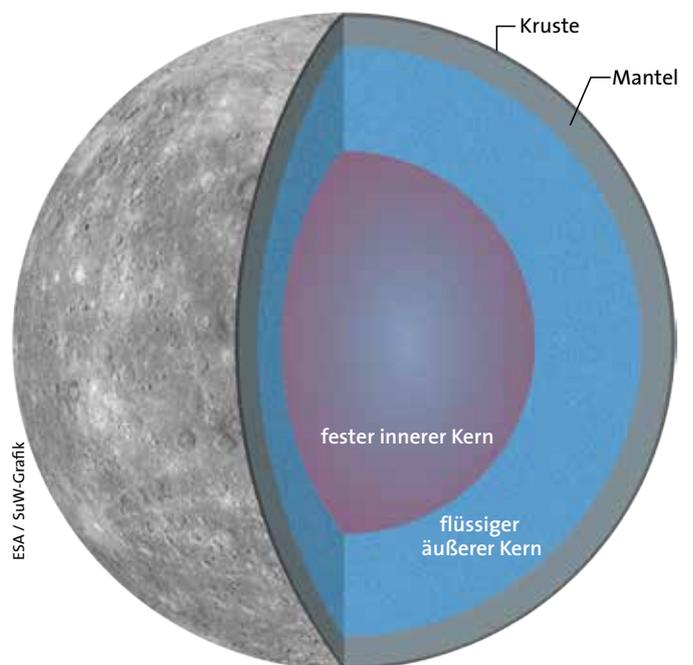
Caloris-Becken

NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington

NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington



In der Nordpolregion von Merkur gibt es Gebiete, die immer im Schatten liegen und niemals von der Sonne erwärmt werden (rot). Mit Radarkerkundungen von der Erde aus wurden in diesen Regionen mögliche Ablagerungen aus Wassereis gefunden, die hier gelb hervorgehoben sind.



ESA / SuW-Grafik

Merkur ist wie die Erde, Venus und Mars aus einer Kruste und einem Mantel aus Silikatgesteinen sowie einem Kern aus metallischem Eisen aufgebaut. Dieser besteht vermutlich aus einem flüssigen äußeren und einem festen inneren Kern und ist im Verhältnis zum gesamten Planeten riesig.



Das Caloris-Becken auf Merkur ist die größte geologische Struktur des Planeten. In diesem Falschfarbenbild erscheint sie orange, ein Hinweis auf eine andere mineralogische Zusammensetzung als in der Umgebung, die vermutlich auf Vulkanismus zurückgeht.

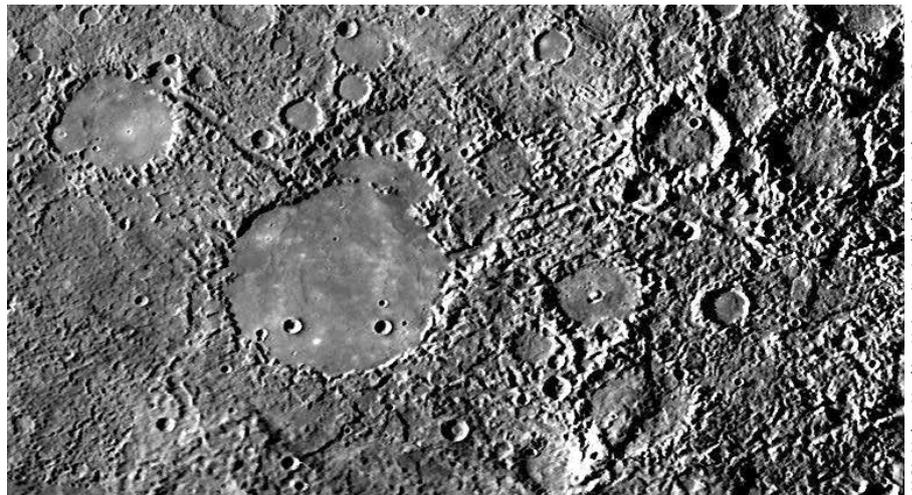
Genau gegenüber dem Einschlagbecken Caloris auf der anderen Seite von Merkur befindet sich eine Region, die von den Planetenforschern als »seltsames Gebiet« bezeichnet wird, da die Oberfläche ungewöhnlich zerrüttet erscheint – offenbar eine indirekte Folge des Einschlags.

Äquator 50 bis 80 Kilometer, in der nördlichen Polarregion dagegen nur 20 bis 40 Kilometer. Auf Grund der Lage der Umlaufbahn von Messenger um Merkur ließ sich die Krustendicke im Bereich des Südpols nicht ermitteln.

Krater und Vulkanismus

Die Bilder der Raumsonden enthüllten die mit Kratern übersäte Oberfläche des Merkurs, die ähnlich wie diejenige des Mondes die Einschlagsgeschichte aus der frühen Phase des Sonnensystems vor mehr als vier Milliarden Jahren widerspiegelt. Im Gegensatz zum Mond gibt es jedoch auf Merkur nur ein einziges großes Einschlagbecken, Caloris, das durch den Impact eines mehr als 100 Kilometer großen Himmelskörpers entstanden sein muss (siehe Bild oben). Es hat einen Durchmesser von 1500 Kilometern und wurde durch nachfolgende vulkanische Aktivitäten stark verändert. In seinem Zentrum befindet sich eine vulkanische Ausbruchsstelle, und der Boden von Caloris liegt höher als dessen Rand. Offenbar wurde das Beckeninnere von aufquellendem Magma aus der Tiefe aufgefüllt, ähnlich wie die Marebecken des Mondes.

Genau auf der gegenüberliegenden Seite des Planeten befindet sich ein eigenartiges, chaotisch wirkendes Gebiet mit unregelmäßig geformten, bis zu einem Kilometer hohen Hügeln und Tälern (siehe Bild rechts). Vermutlich bündelten sich hier die heftigen seismischen Schwin-



NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington

gungen, die der Einschlag verursachte. Das betroffene Gebiet ist etwa so groß wie das Caloris-Becken selbst.

Die hohen nördlichen Breiten sind durch große, mit Flutbasalten bedeckte Regionen geprägt – ein weiterer Hinweis auf starken Vulkanismus auf dem sonnennächsten Planeten. Es gibt keine Anzeichen für großräumige Krustenbewegungen, also Plattentektonik, aber zahlreiche Belege für vulkanische Eruptionen.

Die gesamte Oberfläche ist von einer Vielzahl von mehrere hundert Kilometer langen Steilstufen überzogen, die mitunter eine Höhe von drei Kilometern erreichen. Ihre Gesamtlänge beträgt etwa 42.000 Kilometer. Zum Teil durchschneiden sie früher entstandene Krater und Ebenen; seitlich versetzte Kraterteile zeigen an, dass die

Oberfläche auch horizontal verschoben wurde (siehe Bild S. 31 oben).

Die Steilstufen entstanden durch eine globale Schrumpfung des Planeten. Dabei nahm sein Radius um bis zu sieben Kilometer ab. Bei keinem anderen Planeten im Sonnensystem ergeben die krustalen Bewegungen eine derart starke Schrumpfung. Die Ursache liegt höchstwahrscheinlich darin, dass sich das Merkurinnere seit seiner Entstehung beträchtlich abkühlte und dabei zusammenzog.

Exosphäre statt Atmosphäre

Im Gegensatz zu den drei anderen erdähnlichen Planeten im Sonnensystem weist Merkur keine nennenswerte Atmosphäre auf. Lediglich eine extrem dünne, so genannte Exosphäre wurde bereits im Jahr 1974 von Mariner 10 entdeckt.

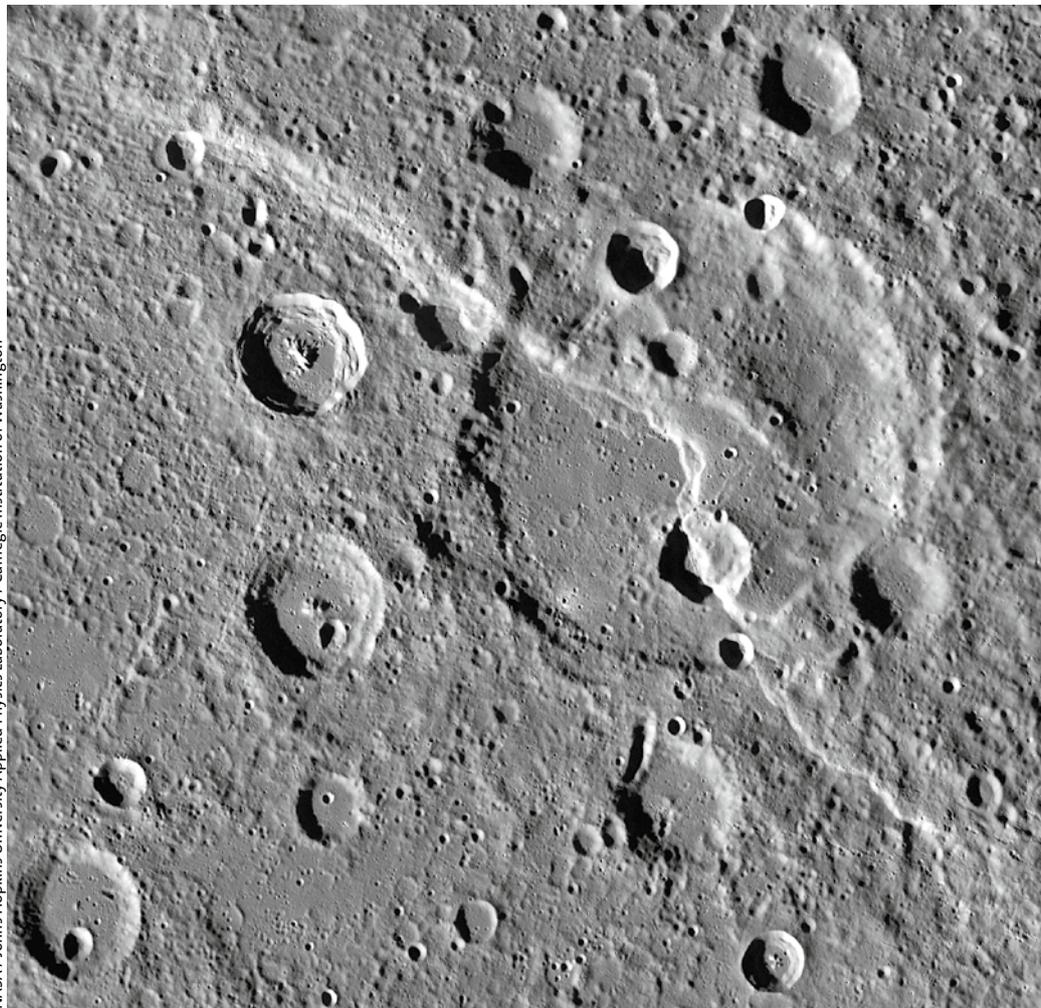
Sie besteht aus einer Gashölle, in der die Teilchendichte so gering ist, dass die Gasteilchen praktisch nicht miteinander kollidieren. Der Druck an der Oberfläche Merkurs beträgt nur etwa ein Billionstel des irdischen Werts. Die Exosphäre besteht hauptsächlich aus den Elementen Wasserstoff und Sauerstoff sowie Wasserdampf, Helium und Natrium mit Spuren von Magnesium, Kalium und Argon.

Die Exosphäre ist nicht über längere Zeiträume stabil. Würde die Planetenoberfläche nicht ständig Gasteilchen nachliefern, so würde sie sich innerhalb von zwei bis drei Tagen in den Weltraum verflüchtigen. Bei den Exospharenteilchen handelt es sich um Oberflächenmaterial des Planeten, um Partikel aus dem Sonnenwind und um Staubpartikel, die überwiegend von Kometen stammen und die sich auf Merkur ablagern. Anschließend können diese Teilchen durch chemische und physikalische Prozesse, welche durch die Sonneneinstrahlung oder durch Einschläge von Partikeln ausgelöst werden, wieder von der Oberfläche freigesetzt werden.

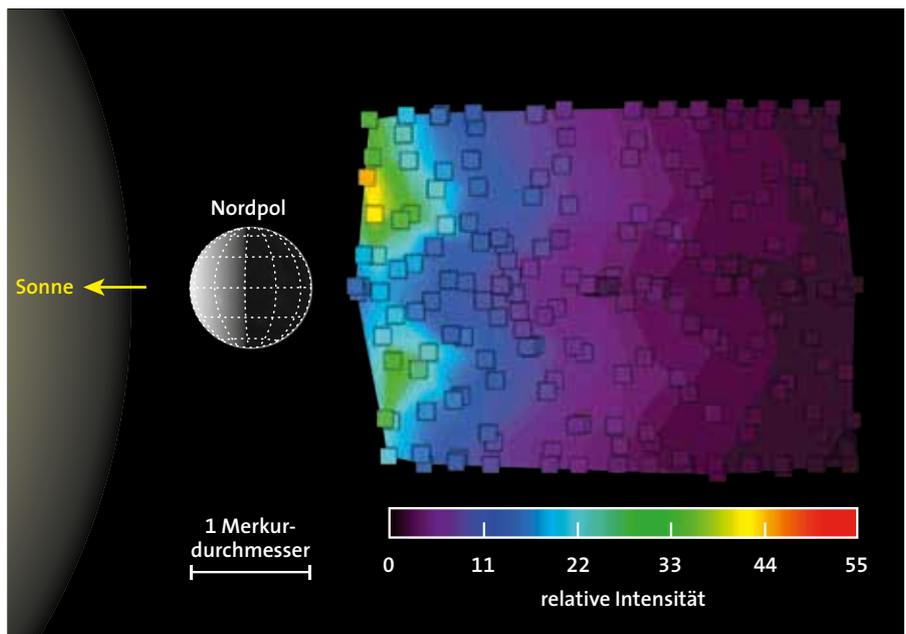
Die Dichte der Exosphäre variiert mit dem Abstand von Merkur zur Sonne. Dies ist vermutlich eine Folge der veränderlichen Sonneneinstrahlung und des Zustroms von Teilchen von der Sonne während des Umlaufs sowie durch zeitliche Schwankungen im Einstrom von Kometenmaterial. Außerdem gibt es Unterschiede in der Teilchendichte und der Zusammensetzung auf der Tag- und der Nachtseite des Planeten (siehe Bild unten).

Eine winzige Magnetosphäre

Neben der Erde ist Merkur der einzige weitere terrestrische Planet mit einem im Inneren erzeugten Magnetfeld. Es wurde bereits von Mariner 10 entdeckt und später mit Messenger genauer vermessen. ähnlich wie das irdische Magnetfeld ist es ein Dipolfeld, das demjenigen eines Stabmagneten ähnelte. Allerdings ist es um einen Faktor 130 bis 340 schwächer als sein irdisches Gegenstück. Die Achse des Dipols ist um weniger als 0,8 Grad gegen die Rotationsachse Merkurs geneigt – bei der Erde beträgt dieser variable Winkel zurzeit etwa elf Grad. Der Dipol ist um 480 Kilometer in nördlicher Richtung vom Planetenzentrum versetzt, was etwa 20 Prozent des Planetenradius entspricht, bei der Erde sind es nur acht Prozent (siehe Bild S. 33 oben). Das Merkurmagnetfeld entsteht höchstwahrscheinlich ähnlich wie



Eine zwei Kilometer hohe Steilkante namens Carnegie Rupes durchschneidet den Krater Duccio und hat Teile des Kraters gegeneinander verschoben. Sie entstand bei der Schrumpfung des gesamten Planeten, als das Innere immer mehr abkühlte und sich dabei zusammenzog.



Die extrem dünne Exosphäre von Merkur enthält auch Natriumatome, die sich auf der von der Sonne abgewandten Seite des Planeten verteilen. Bepi-Colombo soll bei ihren Umläufen die Strukturen der Exosphäre erkunden.

NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington

SuW-Grafik, nach: NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Arizona State University / Carnegie Institution of Washington, Figure 1, from McClintock et al., Science, 321, 92–94, 2008

Die Messinstrumente des Planetenorbiters (MPO)



Name	Beschreibung	Zielsetzung	Verantwortliches Institut/Land
BELA*	BepiColombo Laser Altimeter	Topografische Kartierung der Merkuroberfläche	Universität Bern, Schweiz und DLR Berlin, Deutschland
ISA	Italian Spring Accelerometer	Messung der nicht-gravitativen Beschleunigung der Raumsonde	Istituto Nazionale di Astrofisica, Italien
MPO/MAG*	Magnetic Field Investigation	Messung des Merkurmagnetfelds, sowie seiner Entstehung und Wechselwirkung mit dem Sonnenwind	Universität Braunschweig, Deutschland
MERTIS*	Mercury Radiometer and Thermal Imaging Spectrometer	Kartierung der mineralogischen Zusammensetzung, der Temperatur und des thermischen Trägheitsmoments der Oberfläche	Universität Münster, Deutschland
MGNS	Mercury Gamma-Ray and Neutron Spectrometer	Elementzusammensetzung der Oberfläche und oberflächennaher Schichten; Untersuchung von Ablagerungen leicht flüchtiger Substanzen in den Polarregionen	Institute for Space Research, Moskau, Russland
MIXS*	Mercury Imaging X-ray Spectrometer	Globale Kartierung der Elementzusammensetzung der Merkuroberfläche	University of Leicester, Großbritannien
MORE	Mercury Orbiter Radio Science Experiment	Untersuchung der Struktur von Kern und Mantel des Planeten	Sapienza-Universität, Rom, Italien
PHEBUS	Probing of Hermean Exosphere by UV Spectroscopy	Spektrale Kartierung der Exosphäre im Ultravioletten Licht, Oberflächenzusammensetzung	Service d'Aéronomie/IPSL, Paris, Frankreich
SERENA*	Search for Exospheric Refilling and Emitted Natural Abundances	In-Situ-Untersuchung der Zusammensetzung, vertikalen Struktur und der Quellen und Senken für Teilchen in der Exosphäre	INAF-Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario, Italien
SIXS	Solar Intensity X-Ray and Particle Spectrometer	Messung der Intensität der solaren Röntgenstrahlung und der solaren Teilchen zur Unterstützung der Messungen von MIXS	Universität Helsinki, Finnland
SIMBIO-SYS	Spectrometers and Imagers for MPO BepiColombo Integrated Observatory	Hochauflösende optische Stereobilder, abbildende Nahinfrarot-Spektroskopie zur globalen mineralogischen Kartierung	Agenzia Spaziale Italiana, Rom, Italien

* Instrumente mit Beteiligungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz

das irdische durch Bewegungen von elektrisch leitendem, flüssigem Material im Planeteninneren.

Da das Merkurmagnetfeld mit dem Sonnenwind in Wechselwirkung tritt, bildet sich eine Magnetosphäre um den Planeten. Sie enthält elektrisch geladene Teilchen, ein Plasma. Die Teilchen werden von der Merkuroberfläche durch Einschläge von Partikeln und durch die Sonneneinstrahlung freigesetzt oder direkt aus dem Sonnenwind eingefangen. Die Magnetosphäre besitzt eine ähnliche Struktur wie die Erdmagnetosphäre, allerdings beträgt ihr Volumen wegen des wesentlich schwächeren Magnetfelds nur etwa ein Zwanzigstel. Sie ist viel dynamischer als die Erdmagnetosphäre, sie verändert sich also wesentlich schneller und auf kürzeren räumlichen Skalen.

Auf der sonnenzugewandten Seite von Merkur befindet sich die Magnetopause, die Grenze der Magnetosphäre, nur etwa 1000 Kilometer über der Oberfläche. Die Merkurmagnetosphäre ist etwa so groß wie das Magnetfeld des Jupitermonds Ganymed, des einzigen Mondes in unserem Sonnensystem mit einem derartigen Feld.

In den Polarregionen von Merkur finden sich wie bei der Erde Zonen, in denen

der Sonnenwind tief in die Magnetosphäre eindringen kann. Da der Planet keine Atmosphäre aufweist, erreicht der Sonnenwind hier ungehindert die Oberfläche. In Zeiten starker Sonnenaktivität wird die Magnetopause sogar bis fast zur Oberfläche heruntergedrückt, wodurch dort vermehrt Teilchen freigesetzt werden. Da das Dipolfeld stark gegenüber dem Planetenzentrum verschoben ist, erstreckt sich die dem Sonnenwind ausgesetzte Oberfläche am Südpol über ein viermal so großes Areal wie am Nordpol (siehe Bild S. 33).

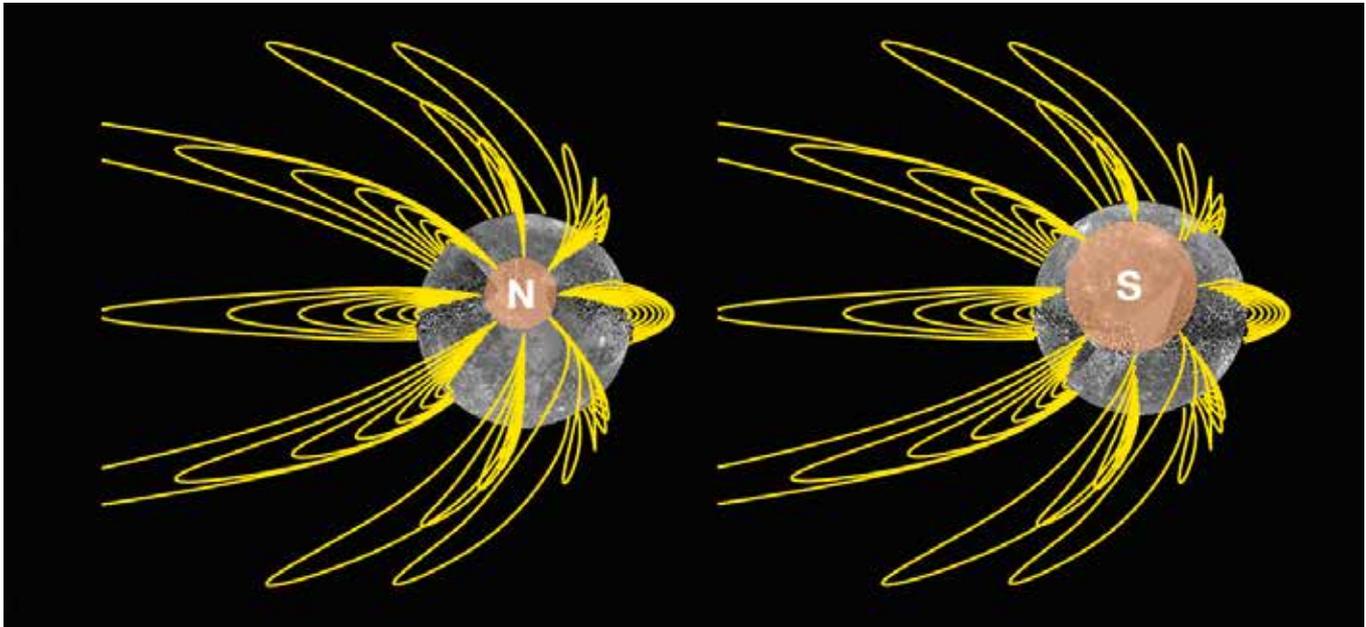
Besonders starke Sonnenaktivität drückt zeitweise die Magnetosphäre so stark zusammen, dass große Teile der Planetenoberfläche direkt dem Sonnenwind ausgesetzt sind – was bei der Erde nicht vorkommt. Auf der von der Sonne abgewandten Seite des Merkurs entsteht analog zur Erde ein langer Schweif, in dem elektrisch geladene Teilchen aus der Magnetosphäre vom Planeten wegströmen. Das magnetosphärische Plasma besteht hauptsächlich aus Wasserstoff- und Heliumionen aus dem Sonnenwind sowie aus Sauerstoff-, Natrium-, Magnesium- und Kalziumionen, die überwiegend von der Merkuroberfläche stammen.

Wie entstand Merkurs Eisenkern?

Eine der wesentlichen Fragen der Merkurforschung ist, wie dieser im Vergleich zu den anderen erdähnlichen Planeten einen derart großen Eisenkern bilden konnte.

Derzeit werden mehrere Hypothesen diskutiert: Die erste geht von einer Anreicherung von Eisen im inneren Bereich des solaren Urnebels aus, aus dem sich unser Sonnensystem vor 4,56 Milliarden Jahren bildete. Alternativ könnte bereits früh nach der Entstehung des Planeten ein großer Teil seines Mantels wieder entfernt worden sein. Entweder wurde Merkur von einem großen Himmelskörper getroffen, der dabei einen großen Teil der noch jungen Kruste und des Mantels wegsprengte, oder die damals noch junge und heißere Sonne bombardierte den werdenden Planeten mit starker elektromagnetischer und Teilchenstrahlung. In einem weiteren Modell wird das metallische Eisen chemisch durch Reaktionen mit kohlenstoffreichem Staub im inneren Sonnensystem angereichert.

Obwohl alle diese Erklärungsansätze unterschiedliche Vorhersagen für die Zusammensetzung der siliziumreichen Kruste des Planeten machen, ließ sich anhand der Ergebnisse von Messenger bisher



NASA / Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory / Carnegie Institution of Washington

keiner eindeutig ausschließen. Das letztgenannte Modell scheint die Messungen im Augenblick am besten zu beschreiben. Die Planetenforscher hoffen daher durch die Weltraummission BepiColombo auf neue Aufschlüsse über die Entstehung des Planeten.

Die Mission BepiColombo

Das Projekt BepiColombo ist nach dem italienischen Mathematiker Giuseppe (Bepi) Colombo (1920–1984) benannt, einem Weltraumpionier, der unter anderem durch seine Bahnberechnungen den Flug von Mariner 10 zum Merkur überhaupt erst ermöglicht hatte. BepiColombo besteht aus zwei voneinander unabhängigen Raumsonden und einem Transfermodul (siehe S. 36). Die Mission ist ein Gemeinschaftsprojekt der ESA und der japanischen Weltraumagentur JAXA. Für die ESA ist es eine so genannte Cornerstone-Mission, also ein finanziell besonders großes und wissenschaftlich aufwändiges Programm.

Ursprünglich sollte BepiColombo bereits im Jahr 2013 starten. Technische Probleme, insbesondere wegen der hohen thermischen Belastungen in der Merkurumgebung, verzögerten den Start immer wieder. Auf den Außenseiten der beiden Sonden werden die Temperaturen mehr als 360 Grad Celsius betragen, während im Inneren für den Betrieb der wissenschaftlichen Instrumente 40 Grad Celsius nicht überschritten werden dürfen. Dabei wird nicht nur die direkte Sonneneinstrahlung die Sonden aufheizen, sondern auch die Wärmestrahlung von der bis zu 470 Grad Celsius heißen Merkureroberfläche (siehe Kasten S. 28).

Die größere der beiden Sonden, der »Mercury Planetary Orbiter« (MPO), wurde federführend von der ESA entwickelt und gebaut. Sie ist mit insgesamt elf wissenschaftlichen Instrumenten bestückt (siehe Tabelle S. 32). Die Instrumente auf MPO sollen den Planeten global untersuchen und widmen sich seinem Inneren, seiner Oberfläche sowie seiner Exosphäre

Das Magnetfeld des Merkur ist ein Dipolfeld und gegenüber dem Zentrum des Planeten versetzt. Somit wird die südliche Hemisphäre des Planeten weniger durch das Magnetfeld abgeschirmt, wodurch ein viel größeres Areal dem Sonnenwind ausgesetzt ist.

und Magnetosphäre. Außerdem soll der MPO Einsteins Relativitätstheorie überprüfen, indem mit Hilfe seiner Funksignale die Periheldrehung der Merkurbahn sehr genau vermessen wird.

Die zweite Sonde, den »Mercury Magnetospheric Orbiter« (MMO), steuert die JAXA bei. Ihre wissenschaftliche Nutzlast besteht aus fünf Instrumenten (siehe Tabelle unten). In der Merkurumlaufbahn führen beide Sonden unter anderem koordinierte Messungen von unterschiedlichen Positionen im Raum durch. So können sie die Exosphäre und die Magnetosphäre sowie deren Wechselwirkungen mit dem Sonnenwind und dem Planeten untersuchen – ein großer Vor-

Die Messinstrumente des Magnetosphärenorbiters (MMO)

Name	Beschreibung	Zielsetzung	Verantwortliches Institut/Land
MMO/MGF*	Mercury Magnetometer	Magnetfeldmessungen in der Merkurumgebung	Weltraumforschungsinstitut Graz, Österreich
MPPE*	Mercury Plasma Particle Experiment	Messung von Eigenschaften und Mengen von Elektronen, Ionen und neutralen Atomen in der Merkurmagnetosphäre	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, Japan
PWI	Plasma Wave Instrument	Messung der elektrischen Felder, der Plasmawellen und Radiowellen in der Merkurumgebung	Universität Tohoku, Japan
MSASI	Mercury Sodium Atmospheric Spectral Imager	Kartierung von Konzentration und Verteilung von Natrium im Umfeld des Planeten	Universität Tokyo, Japan
MDM*	Mercury Dust Monitor	Messung der von der Merkureroberfläche freigesetzten festen Materiepartikel	Chiba Institute of Technology, Japan

* Instrumente mit deutscher Beteiligung

teil gegenüber den Einzelmessungen der Raumsonde Messenger.

Derzeit ist der Start von BepiColombo mit einer Ariane 5-Rakete von Kourou in Französisch-Guayana im Oktober dieses Jahres vorgesehen. Während des Flugs zum Merkur sind beide Raumsonden fest miteinander verbunden und befinden sich auf dem Transfermodul (siehe S. 36). Zusätzlich umgibt ein Sonnenschutzschild die Raumsonde MMO und schützt diese vor zu hohen Temperaturen.

Das Transfermodul ist mit zwei unterschiedlichen Antrieben ausgerüstet: Für den interplanetaren Flug gibt es vier Ionenantriebe, die durch Solarzellen mit einer Gesamtfläche von 40 Quadratmetern mit dem für ihren Betrieb notwendi-

gen Strom versorgt werden. Als Treibstoff dient Xenon-Gas.

BepiColombo ist eine der bislang komplexesten Planetenmissionen der europäischen Raumfahrt.

gen Strom versorgt werden. Als Treibstoff dient Xenon-Gas.

Um Treibstoff zu sparen, sind Swingby-Manöver an der Erde, an der Venus und am Merkur geplant. Sie ermöglichen es erst, den sonnennächsten Planeten zu erreichen und sich seiner Bahngeschwindigkeit anzupassen. Ohne diese Swingbys wären viele Tonnen an Treibstoff für Schubmanöver erforderlich, welche die Gesamtmasse von BepiColombo so hoch treiben würden, dass sich die Sonde nicht mehr mit einer Ariane-5 starten ließe. Während der langen Flugphasen dazwischen ist der Ionenantrieb für längere Zeiträume aktiv. Zusätzliche chemische Triebwerke dienen der Lage- und der Orbitkontrolle und werden bei den Swingby-Manövern eingesetzt.

Im Jahr 2021 soll BepiColombo zum ersten Mal an Merkur vorbeifliegen und dies noch fünf Mal wiederholen, bevor die beiden Sonden im Dezember 2025 in unterschiedliche Umlaufbahnen um den sonnennächsten Planeten eintreten. Beide Sonden sollen Merkur zunächst für ein Jahr umrunden. In der Folge könnte die Mission um ein weiteres Jahr verlängert werden.

Beide Sonden werden den Planeten auf polaren Umlaufbahnen umlaufen. Diese sind so ausgelegt, dass die Umlaufzeiten der Sonden in einem Verhältnis von etwa 1:4 stehen, das heißt, wenn MMO einen Umlauf macht, umrundet MPO Merkur viermal. Die Bahnebenen der Sonden sind identisch. Während der ersten Monate

Die wissenschaftlichen Ziele

Die NASA-Raumsonde Messenger lieferte bereits viele neue Erkenntnisse über Merkur, welche die Grundlage für die weitere detaillierte Erforschung des Planeten mit BepiColombo sind. Unter anderem soll MPO die von Messenger wenig untersuchte Südpolregion des Planeten erkunden.

Erstmals werden zwei Raumsonden gleichzeitig Messungen in der Umgebung des Planeten durchführen, um so zeitliche und räumliche Veränderungen insbesondere in der Magnetosphäre und

der Exosphäre zu untersuchen. Die nahezu kreisförmige Umlaufbahn von MPO erlaubt eine genaue Vermessung des Gravitationsfelds des Planeten. Ein weiterer Schwerpunkt sind Untersuchungen seiner Oberflächenzusammensetzung und seiner Topografie.

Die offenen wissenschaftlichen Fragen betreffen im Wesentlichen den Ursprung und die Entwicklung des Planeten so nahe an seinem Zentralgestirn, seinen inneren Aufbau und seine Zusammensetzung. Des Weiteren soll BepiColombo die Dynamik im Merkurinneren und das dort erzeugte Magnetfeld untersuchen. Weitere Ziele betreffen Veränderungen auf der Planetenoberfläche durch geologische Prozesse wie Kraterbildung, Tektonik und Vulkanismus. Des Weiteren werden die Struktur und die Dynamik der Exosphäre und der Magnetosphäre sowie die Zusammensetzung und der Ursprung möglicher Eisablagerungen in den Polregionen des Planeten untersucht. Interessant ist auch die Frage, ob Merkur noch heute vulkanisch aktiv ist, worüber Messenger keine Informationen liefern konnte.

BepiColombo ist eine der bislang komplexesten interplanetaren Weltraummissionen der ESA. Bei Gelingen werden die beiden Raumsonden eine Vielzahl an neuen Erkenntnissen über den innersten Planeten unseres Sonnensystems liefern. Sie werden hoffentlich auch neue Aufschlüsse über die Bedingungen ermöglichen, unter denen sich Merkur vor 4,56 Milliarden Jahren bildete.



HARALD KRÜGER arbeitet am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen. Seine wissenschaftlichen Hauptarbeitsgebiete sind die Erforschung von kosmischem Staub und von Kometen. Harald Krüger lehrt als Privatdozent an der Universität Göttingen.



NORBERT KRUPP ist Wissenschaftler in der Abteilung Planeten und Kometen am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung. Sein Arbeitsgebiet ist die Erforschung der planetaren Magnetosphären unseres Sonnensystems, sowie die Wechselwirkung von planetaren Plasmen mit der Planetenatmosphäre, Monden und Ringen.



MARKUS FRÄNZ untersucht am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung die Wechselwirkungen zwischen der Sonne und planetaren Atmosphären und Oberflächen durch die Konstruktion und Auswertung von Weltraumexperimenten.

Literaturhinweise

Althaus, T.: Die Merkursonde BepiColombo – Ein vergessener Planet wird erforscht. In: *Sterne und Weltraum*, 7/2007, S. 26–36

Benkhoff, J. et al.: BepiColombo – Comprehensive Exploration of Mercury: Mission Overview and Science Goals. In: *Planetary and Space Science* 58, S. 2–20, 2010

Murchie, S.L. et al.: Mercury, in »Encyclopedia of the Solar System«, Hrg.: Spohn, T. et al., 3. Auflage, S. 283–304, 2014

Dieser Artikel und Weblinks unter:

www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1585020



Didaktische Materialien:

www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1069119

Verpassen Sie keine Ausgabe!



JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:

12 x im Jahr **Sterne und Weltraum** für nur € 89,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 67,80), mehr als 10 % günstiger als der Normalpreis.

Wunschgeschenk:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Auch als Kombiabo:

Privatkunden erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,-/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Buch »Die verborgene Wirklichkeit«

Brian Greene zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir in den Weiten des Kosmos nicht allein sind, und welchen Parallelwelten die Astrophysiker auf der Spur sind.



WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK



Spiel »Exit – Die Grabkammer des Pharaos«

Bei diesem einmaligen Spiel kommen die in der Grabkammer des Pharaos gefangenen Teilnehmer durch Kombinationsgabe, Teamgeist und Kreativität der Freiheit nach und nach näher. Dabei müssen sie auch ungewöhnliche Wege beschreiten.

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.sterne-und-weltraum.de/abo

