

2 Merkur und Venus

Die beiden Planeten, die innerhalb der Erdbahn die Sonne umkreisen, könnten unterschiedlicher kaum sein. Der Merkur ist der kleinste Planet des Sonnensystems, er hat keine Atmosphäre und zeigt zwischen seiner Tag- und Nachtseite die extremsten Temperaturunterschiede. Seine Oberfläche ist von Kratern bedeckt, die von den Einschlägen von Asteroiden und Kometen über einen Zeitraum von mehr als vier Milliarden Jahren herrühren. Damit hat er Ähnlichkeit mit dem Mond der Erde, doch von diesem unterscheidet er sich vor allem durch seinen großen Kern aus Eisen.

Die Venus wiederum gleicht mehr der Erde – sie ist fast genauso groß, besteht aus denselben Stoffen, und ist von einer Atmosphäre umgeben. Diese ist jedoch viel dichter und hat eine ganz andere Zusammensetzung. Sie sorgte im Laufe der Jahrtausende durch einen extremen „Treibhauseffekt“ für eine so starke Aufheizung des Planeten, dass sämtliches Wasser verdunstet ist und die Venus im Gegensatz zur Erde zu einem lebensfeindlichen, viel zu heißen Planeten wurde. Die Ursachen für diese Unterschiede zwischen Venus und Erde gehören zu den interessantesten Fragen der Planetenforschung.

Sonderling Merkur

Ein Planet der Extreme

Merkur, der „erste“, also sonnennächste Planet, ist eine Welt der Extreme. Natürlich lassen sich an allen acht Planeten des Sonnensystems ganz außergewöhnliche Tatsachen feststellen, Extreme eben, doch der innerste Planet kann tatsächlich mit einer ganzen Reihe bemerkenswerter Eigenschaften aufwarten.

Merkur ist der kleinste aller Planeten. Seine Bahn um die Sonne ist die am stärksten exzentrische, und auch die am stärksten gegenüber der Ekliptik geneigte. Auf seiner engen Bahn ist er naturgemäß schneller als alle anderen Planeten um die Sonne unterwegs. Andererseits hat er eine sehr langsame Eigenrotation, was dem Merkur mit die längsten Tage im Sonnensystem beschert – und dadurch bedingt die größten Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht.

Auch sein innerer Aufbau ist ungewöhnlich: Kein Planet hat in Relation zu seinem Durchmesser einen so großen Metallkern. Nach der Erde ist Merkur der Planet mit der höchsten Dichte, und wenn man die unkomprimierte

Dichte (→ Dichte ist nicht gleich Dichte, S. 39) betrachtet, ist diese sogar höher als die der Erde. Sein Kern ist teilweise geschmolzen, wodurch die Existenz eines, wenn auch nur schwachen, Magnetfeldes erklärt werden kann. Als Folge des überproportional großen Metallkerns hat Merkur einen verhältnismäßig dünnen Gesteinsmantel, der diesen Kern umhüllt.

Die Erforschung des Merkur ist extrem schwierig: Mit Teleskopen ist er nur mit Mühe zu beobachten, und Raumsonden können dieses Ziel in Sonnennähe nur mit sehr aufwendigen Flugmanövern erreichen. Erst zwei Sonden haben den Merkur erforscht. Ihre Bilder zeigen eine kraterübersäte Landschaft, die stark von Tektonik und Vulkanismus geprägt ist und auf den ersten Blick sehr an den Mond erinnert. Allerdings weisen sie auch markante Unterschiede zum Erdmond auf, so zum Beispiel eine hauchdünne Atmosphäre. Wie die Venus hat auch der Merkur keinen Mond.

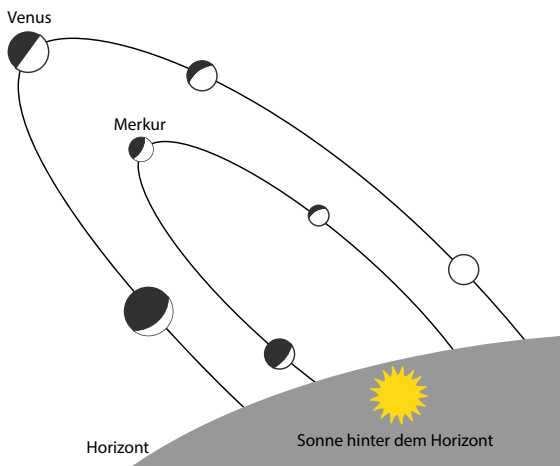


Die Oberfläche des Merkur ist von zahlreichen Einschlagskratern geprägt, monoton grau und ähnelt auf dem ersten Blick der des Erdmondes. Doch es fehlen Flächen dunkler vulkanischer Gesteine.

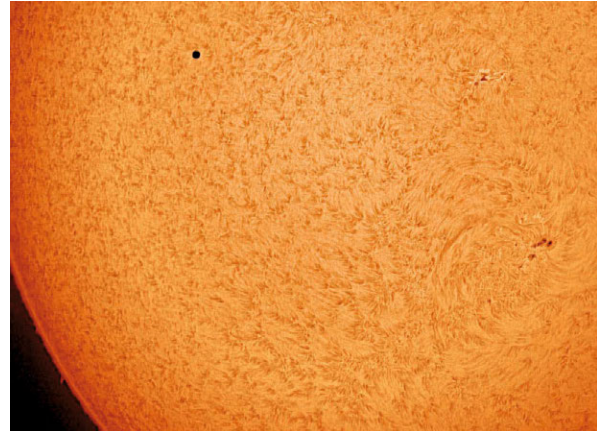
Flüchtiger „Himmelsbote“ in Sonnennähe

Die Betrachtung der Größenverhältnisse zwischen den verschiedenen Gruppen der Planeten und der Sonne ist immer wieder beeindruckend. Nimmt man die Erde mit ihren 12.756 Kilometern Durchmesser als Maßstab, so wissen wir um die nahezu gleich große Venus (12.104 Kilometer) als inneren und den nur halb so großen Mars (6772 Kilometer) als äußeren Nachbarn. Der Merkur aber ist mit 4879 Kilometern Durchmesser noch einmal deutlich kleiner als der Mars. Gemeinsam mit den vier anderen erdähnlichen Körpern (der Mond wird auch als solcher betrachtet) unterscheidet sich Merkur also stark von den gas- und eisreichen Planeten im äußeren Sonnensystem.

Noch eindrucksvoller ist der Unterschied zwischen der Sonne als größtem Objekt des Sonnensystems mit einem Durchmesser von 1,4 Millionen Kilometern und dem ersten Planeten, dem Merkur. Er umkreist unseren



Wegen seiner Sonnennähe ist der Merkur stets nur in einem kleinen Winkelabstand zur Sonne sichtbar. Im Gegensatz zur Venus, die die Sonne in größerem Abstand umkreist, ist der kleinste Planet des Sonnensystems mit bloßem Auge von der Erde schwieriger zu beobachten.



Der Vorbeizug des Merkur vor der Sonnenscheibe ist von der Erde 13- bis 14-mal in einem Jahrhundert zu beobachten. Das gelingt nur mit einem Teleskop und unter Einhaltung strengster Vorsichtsmaßnahmen für das Augenlicht. Für einen solchen "Transit" müssen Sonne, Merkur und Erde nahezu exakt auf einer Linie stehen.

Stern in gerade einmal 50 bis 60 Millionen Kilometern Entfernung und besitzt einen Durchmesser von nicht einmal 5000 Kilometern – das ist nur ein Dreihundertstel des Sonnendurchmessers.

Trotz seiner geringen Größe gehört der Merkur zu den fünf Planeten, die mit bloßem Auge beobachtet werden können – neben Merkur sind dies Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Bestimmt ist er unseren Vorfahren schon in prähistorischer Zeit bekannt gewesen, zumal er als innerster Planet seine Position vor dem Fixsternhimmel auffallend schnell, von Nacht zu Nacht verändert. Über ihn wurde schon in frühen Dokumenten der Antike berichtet: in der ägyptischen Hochkultur, bei den Maya, in Mesopotamien (wo er den Namen Nabu trug), in China und Japan, natürlich bei den Griechen (die ihn mit dem Götterboten Hermes personifizierten) und schließlich den Römern (in deren Mythologie Mercurius der Gott der fahrenden Händler, aber auch der Räuber war).

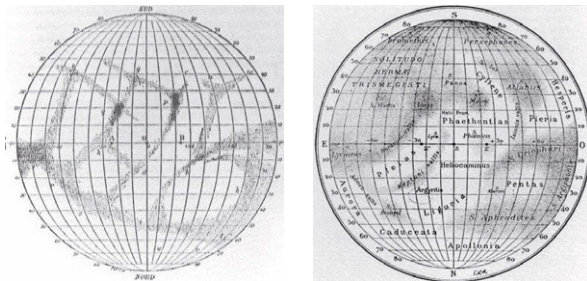
Bild oben: R. Gerstheimer

Bild unten: DLR, adaptiert nach Robert G. Strom: Mercury – The Iron Planet, Springer (2003), S. 3



Seine scheinbare Helligkeit entspricht in größter Erdferne etwa der des Polarsterns. In maximaler seitlicher Entfernung zu beiden Seiten der Sonne, den größten Elongationen, ist er sogar fast so leuchtstark wie die hellsten Sterne. Ein Astronaut auf der Sonnenseite des Merkurs würde unser Zentralgestirn etwa dreimal so groß wie auf der Erde wahrnehmen und elfmal so hell. In Ermangelung einer nennenswerten Atmosphäre wäre aber wie auf dem Mond auch am Tag ein Sternenhimmel zu sehen. Als innerer Planet zeigt auch der Merkur Phasen, genau wie Mond und Venus, die jedoch nur mit einem Teleskop um die Tage des größten Winkelabstandes zur Sonne beobachtet werden können – dann als zunehmender bzw. abnehmender „Halbmerkur“. Die besten wenn auch kurzen Beobachtungszeiten sind im Herbst, Winter und Frühling.

Angeblich habe es Nikolaus Kopernikus (→ Fußnote Kap. 1, S. 12) sehr bedauert, Merkur nie zu Gesicht bekommen zu haben, obwohl er in seinen Berechnungen, die zum Kopernikanischen, also heliozentrischen Weltbild führten, eine Rolle spielte. Anders als bei Venus und Mars oder sogar Jupiter und Saturn konnte



Die ältesten Aufzeichnungen über den Merkur stammen von assyrischen Astronomen aus dem 14. Jahrhundert vor Christi. Erste Karten, die Details der Oberfläche zeigen, gibt es erst seit der Erfindung des Teleskops im 17. Jahrhundert. Im Jahre 1880 veröffentlichte Giovanni Schiaparelli (♃) die links gezeigte Karte des Merkur. Erst 50 Jahre später präsentierte Eugenios Antoniadi (♃) eine deutlich verbesserte Merkurkarte.

Fakten zum Merkur

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

über diesen Planeten jedoch selbst nach der Erfindung des Teleskops zu Beginn des 17. Jahrhunderts so gut wie nichts in Erfahrung gebracht werden: Denn wegen seiner Sonnennähe beträgt sein Winkelabstand zum Zentralgestirn maximal 28 Grad. Das bedeutet, dass der Merkur immer nur kurz nach Sonnenuntergang im Westen oder kurz vor Sonnenaufgang im Osten beobachtet werden kann, und dies, wegen seiner schnellen Bewegung auf seiner Umlaufbahn, nur für wenige Wochen im Jahr. In der Morgen- oder Abenddämmerung sind die Bedingungen für eine Beobachtung mit dem Teleskop jedoch schon wegen der Luftunruhe über dem Erdhorizont und dem viel längeren Weg des Lichts durch die Schichten der Erdatmosphäre sehr stark schwankend, sodass selbst heute viele günstige Faktoren zusammenkommen müssen, um auf Merkur auch nur andeutungsweise Großstrukturen erkennen zu können. Das *Hubble*-Weltraumteleskop kann den Merkur wegen seiner Sonnennähe gar nicht beobachten: Zu groß ist die Gefahr, die lichtempfindlichen Sensoren durch einfallendes Sonnenlicht zu zerstören, deshalb wird dies nie versucht.

Da Merkur nahe der Sonne über den Himmel wandert, ist er theoretisch auch tagsüber „sichtbar“, sofern er sich nicht gerade auf der gegenüberliegenden Seite der Sonne

Giovanni Schiaparelli (1835–1910): italienischer Astronom und langjähriger Direktor der Mailänder Sternwarte. Neben der hier gezeigten Merkurkarte erlangte der ausgezeichnete Beobachter Berühmtheit durch die ersten detaillierten Karten des Mars aus dem Jahre 1877.

Eugenios Antoniadi (1870–1944): griechischer Astronom, der die meiste Zeit in Paris am Observatoire de Meudon wirkte. Ihm gelangen bedeutende teleskopische Beobachtungen der Planeten Mars, Venus und Merkur.

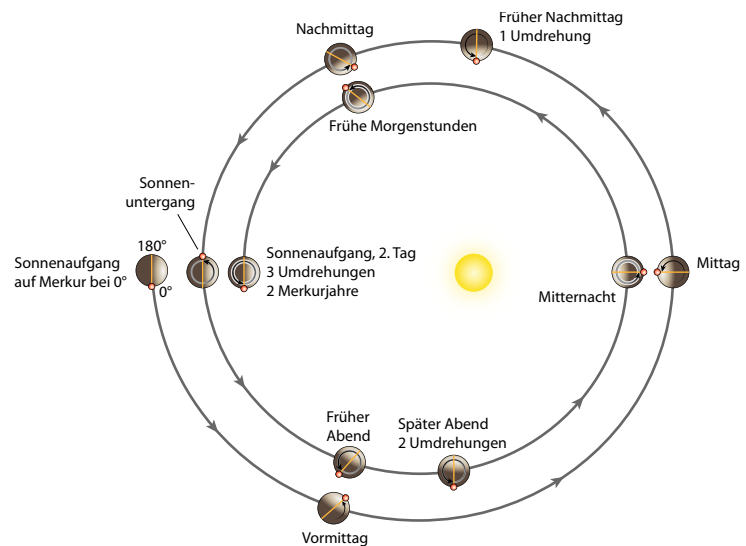
Bilder: Antoniadi. E. M., La Planete Mercure, Gauthier-Villars. Paris, 1934. English translation by Patrick Moore, Keith Reid, Ltd., Shaldon, England, 1974

befindet. Im Abstand von $3\frac{1}{2}$, 7, $9\frac{1}{2}$, 10 und 13 Jahren (und sich dann in diesem Zyklus wiederholend) kommt es zu einem „Merkurtransit“, das heißt, der Planet zieht dann auf seiner um sieben Grad gegen die Ekliptik geneigten Bahn von der Erde aus betrachtet im Laufe mehrerer Stunden genau vor der Sonnenscheibe vorbei – gewissermaßen dieselbe Konstellation wie bei einer Sonnenfinsternis, nur dass der etwa mondgroße Merkur aufgrund der viel größeren Entfernung von der Erde aus betrachtet die Sonnenscheibe nur als kleiner schwarzer Punkt bedeckt. Der nächste Merkurtransit wird am 11. November 2019 stattfinden, gefolgt von einem Transit am 13. November 2032. Erstmals wurde ein Merkurtransit im Jahre 1631 von Pierre Gassendi (↓) beobachtet, nachdem er von Johannes Kepler auf Grundlage der Beobachtungen von Tycho Brahe (→ Fußnoten Kap. 1, S. 11) vorausberechnet wurde.

Detaillierte teleskopische Beobachtungen des Merkurs gibt es erst seit dem frühen 19. Jahrhundert. Der italienische Astronom Giovanni Schiaparelli versuchte zwischen 1881 und 1889 eine erste grobe Karte des Planeten zu erstellen. Es sollte weitere 50 Jahre dauern, ehe sein Landsmann Eugenios Antoniadi alles, was bis dahin über den Merkur bekannt war, in einem Buch zusammenfasste. In diesem war auch festgehalten, dass – darin waren sich alle Astronomen jener Zeit einig – die Rotationsperiode und die Zeit eines Merkurumlaufs um die Sonne identisch seien. Das würde bedeuten, dass Merkur, wie beispielsweise auch der Erdmond, die Sonne in einer gebundenen Rotation umkreise, was er, wie später gezeigt wird, aber nicht tut.

Kurze Jahre, lange Tage und eine Sonne, die Schleifen macht

Die Dauer eines Merkurjahres und die Eigenrotation des Planeten sind ungewöhnlich und komplex miteinander verknüpft. Zunächst weist die Umlaufbahn des Merkur von allen Planetenbahnen die stärkste Abweichung von einer Kreisbahn (Exzentrizität) auf. Der Abstand der Mittelpunkte des Planeten und der Sonne schwankt zwischen 0,31 und 0,47 Astronomischen Einheiten, also etwa zwischen 46 und 70 Millionen Kilometern; im Mittel beträgt sie ungefähr 58 Millionen Kilometer. Für einen Umlauf, ein Merkurjahr, benötigt der Merkur 88 Erdtage. Das bedeutet, dass seine Bahngeschwindigkeit bis zu 50 Kilometer pro Sekunde beträgt, dem höchsten Wert aller Planeten (Erde: 30 km/s). Seit den ersten



Die Umlaufbahn des Merkur steht in einem 3:2-Resonanzverhältnis zu seiner Eigendrehung: Während zweier Umläufe um die Sonne dreht sich der Planet dreimal um seine eigene Achse. Für einen hypothetischen Astronauten auf der Merkur Oberfläche (orange Punkt) bedeutet dies, dass er nur alle 176 Tage einen Sonnenaufgang erlebt (Die Spiralform der Umlaufbahn dient nur der besseren Übersicht.).

Pierre Gassendi (1592–1655): französischer Theologe, Philosoph und Astronom, der gemeinsam mit Galileo Galilei (→ Fußnote Kap. 1, S. 13) einer der frühen Verteidiger des heliozentrischen Weltbildes war. Auch mit Cassini (→ Fußnote Kap. 7, S. 229) und Kepler (→ Fußnote Kap. 1, S. 11) führte er Briefwechsel, letzterer sagte mit seinen Berechnungen den von Gassendi beobachteten Merkurtransit voraus.

Bild: K. Riebe, adaptiert nach Robert G. Strom: Mercury – The Iron Planet, Springer (2003), S. 42

Schwierig! Mit Raumsonden zum Merkur

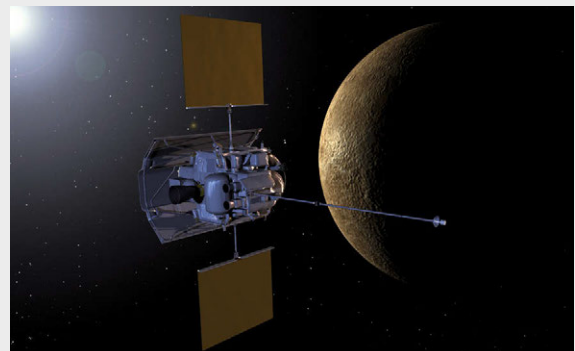
Die Raumfahrt verwendet Begriffe, die im ersten Moment seltsam anmuten. So *fliegen* Astronauten auf der Raumstation in der Umlaufbahn nicht um die Erde – sie *fallen* um die Erde. Warum das? Stellen wir uns vor, wir stehen auf freiem Feld und werfen einen Tennisball soweit wir können: Er wird nach ein paar Sekunden auf den Boden *fallen*. Ein viel athletischerer Freund wirft natürlich viel weiter, aber auch sein Ball wird auf dem Boden landen. Nun stellen wir uns einen Wurf vor, der so kräftig ausfällt, dass der Ball fliegt und fliegt, und wenn kein Hindernis im Weg ist, landet er auf gleicher Höhe, aus der wir ihn weggeworfen haben, nämlich an unserem Hinterkopf. Er ist einmal um die Erde *gefallen*.

Eine Sonde zum Merkur „fällt“ also ins innere Sonnensystem – idealerweise um die Sonne. Da diese eine enorme Anziehungskraft ausübt, wird die Sonde dabei beschleunigt. Raumsonden zum Merkur zu schicken, der nur 50 bis 70 Millionen Kilometer über der Sonnenkorona seine Bahn zieht, gehört trotz seiner geringen Entfernung zur Erde zu den schwierigsten Manövern der Raumfahrt. Bisher wurden erst zwei Flüge zum Merkur unternommen, beide Male waren sie von Erfolg gekrönt. Sie gelten als Meilensteine der Raumfahrt. Dabei wurden zwei ganz unterschiedliche Methoden gewählt.

Mit *Mariner 10* wurde 1973 zum ersten Mal eine Sonde zu einem anderen Himmelskörper als den „Nachbarn“ Mond, Mars oder Venus geschickt. Dabei wurde auch erstmals ein „Swing-By-“ oder „Gravity-Assist-Manöver“ angewandt, bei dem die Bahn der Sonde durch einen genau gezielten, nahen Vorbeiflug an der Venus vom Schwerefeld des Planeten abgelenkt

wird. Das verändert die Geschwindigkeit der Sonde, gleichzeitig wird Treibstoff eingespart. Meist werden diese Manöver zur Beschleunigung einer Raumsonde angewandt, um insbesondere weit entfernte Ziele im äußeren Sonnensystem anzusteuern. Im Falle von *Mariner 10* wurde die Venus jedoch zum Abbremsen genutzt. Denn die Sonde sollte am Merkur nicht zu schnell vorbeifliegen. Am 29. März 1974 passierte *Mariner 10* sein Ziel in 700 Kilometern Entfernung, konnte fast 2500 Fotos aufnehmen und wichtige physikalische Messungen durchführen. Unter anderem wurde dabei das Magnetfeld des Planeten entdeckt.

Merkur lenkte die Sonde auf eine Sonnenumlaufbahn, auf der sie nach 176 Tagen, das entspricht zwei Merkurjahren, in 50.000 Kilometern Höhe wieder am Planeten vorbeiflog. Dasselbe Spiel wiederholte sich nochmal, sodass *Mariner 10* am 16. März 1975 ein drittes und letztes Mal am Merkur vorbeikam, 375 Kilometer über der Oberfläche. Wegen der 3:2-Resonanz von Merkurs Orbit und Eigenrotation war bei allen drei Vorbeiflügen leider immer nur dieselbe Planetenhemisphäre von der Sonne beschienen, sodass



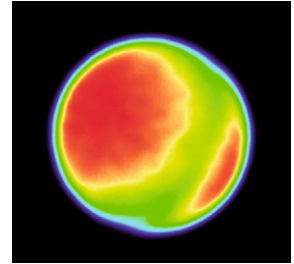
MESSENGER am Merkur, künstlerische Darstellung.

Mariner 10 nur 45 Prozent der Oberfläche erfassen konnte.

Die 9000 Fotos von *Mariner 10* blieben lange Zeit die einzigen Nahaufnahmen vom innersten Planeten. Erst 2004 startete die NASA mit *MESSENGER* eine zweite Merkursonde, mit der der Planet diesmal aus einer Umlaufbahn länger erforscht werden konnte. Damit dies möglich wurde, musste sie auf einer komplizierten Bahn durch das innere Sonnensystem etwa auf Merkursgeschwindigkeit von 50 Kilometer pro Sekunde abgebremst werden. Das gelang, indem der Planet selbst dreimal als Swing-By-Körper genutzt wurde. Dabei konnten zwar schon wertvolle wissenschaftliche Messungen und Fotos aufgezeichnet werden, doch sollte es noch sieben Jahre dauern, ehe *MESSENGER* langsam genug war, um im März 2011 seine Umlaufbahn zu erreichen. Endlich wurde der Rest des Planeten „sichtbar“, unzählige detaillierte Messungen wurden durchgeführt. Als der Treibstoff für Bahnkorrekturen verbraucht war, wurde *MESSENGER* am 30. April 2015 kontrolliert zum Absturz gebracht.

Als dritte Raumsonde wird 2018 der europäische Orbiter *BepiColombo* auf eine wiederum siebenjährige Reise zum innersten Planeten geschickt. Sie ist nach dem italienischen Mathematiker Giuseppe „Bepi“ Colombo benannt, der für die Mission *Mariner 10* die Flugbahn berechnete. Beobachtete *MESSENGER* hauptsächlich die Nordhalbkugel des Merkur, wird *BepiColombo* auch die Südhalbkugel im Blick haben, sodass sich die Experimente beider Missionen ideal ergänzen. An Bord ist ein zweiter kleiner Orbiter, der aus größerer Entfernung die Magnetosphäre des Planeten untersuchen soll. Dieser „*Mercury Magnetospheric Orbiter*“ (MMO) wird von Japan beigesteuert.

Wegen seiner langsamen Eigenrotation und der starken Abweichung des Orbits von einer idealen Kreisbahn kommt es auf dem Merkur auch auf der Tagseite zu starken Temperaturschwankungen. In dieser Darstellung der Messwerte eines Mikrowellenexperiments sind die Hitzepole des Merkur, die sich bei den kürzesten Sonnenentfernungen bilden, in rot dargestellt.



brauchbaren teleskopischen Beobachtungen nahmen die Astronomen an, auch die Eigenrotation, also die Tageslänge, betrüge 88 Tage. Tatsächlich sind es aber nur 59 Tage. Damit befindet sich die Rotationsdauer in einer ungewöhnlichen 3:2-Resonanz mit der Umlaufzeit: Während zweier Merkurjahre dreht sich der Planet dreimal um seine eigene Achse. In der Astronomie wird dies als gebrochen gebundene Rotation bezeichnet.

Die zunächst fehlerhafte Annahme beruhte auf einem himmelsmechanischen Zufall. Der Orbit des Merkur steht auch mit dem der Erde in einem fast perfekten Resonanzverhältnis: In 13,006 Erdjahren umkreist Merkur die Sonne 54-mal. Während eines Erdjahres steht der Merkur etwa sechsmal seitlich der Sonne. Drei dieser „Elongationen“ finden statt, wenn Merkur auf seiner Bahn nördlich des Erdäquators sichtbar ist, und drei, wenn er in südlichen Breiten gesehen werden kann. Das bedeutet, dass in jedem dieser Intervalle von 13 Erdjahren bei ohnehin stets mäßigen Beobachtungsbedingungen auf der Nordhalbkugel der Erde – auf der sich bis zum 20. Jahrhundert nahezu alle bedeutenden Sternwarten befanden – stets nur jene Merkurseiten zu sehen sind, durch deren Mitte der 90. bzw. der 270. Längengrad verläuft (↓). Die Sichtbarkeit der Hemisphären, die auf den 180-Grad- bzw. den Nullmeridian zentriert sind, können in diesen Intervallen nur von der Südhalbkugel der Erde beobachtet werden, auf der es

Nullmeridian: wurde per Definition als derjenige Längengrad festgelegt, der beim ersten Perihel des Jahres 1950 der Sonne genau gegenüberliegt: Die Merkur-„Vorderseite“ erstreckt sich demnach von 270 Grad Ost über den Nullmeridian bis 90 Grad Ost, die Merkur-„Rückseite“ von 90 Grad bis 270 Grad Ost.
Bild: National Radio Astronomy Observatory



jedoch damals noch kaum Observatorien gab. Die Astronomen auf der Nordhalbkugel der Erde sahen also immer wieder aufs Neue dieselbe Seite des Merkur, was zu der Fehlannahme führte, er zeige der Sonne in dieser scheinbaren gekoppelten Rotation stets dieselbe Hemisphäre.

Als im Jahr 1962 amerikanische Wissenschaftler Mikrowellenmessungen auswerteten, stellten sie überrascht fest, dass sie auch von der vermeintlich nie von der Sonne beschienenen Nachtseite des Merkur Wärmesignale erhielten. Die Oberfläche eines Planeten ohne Atmosphäre, auf die nie ein Sonnenstrahl fällt, konnte jedoch nicht erwärmt sein. Zwei Jahre später wurde das Rätsel mittels Radarwellen gelöst, die von der Erde zum Merkur ausgestrahlt und von dessen rauer Oberfläche mit einem veränderten, aber periodisch wiederkehrenden Muster reflektiert wurden: Merkur dreht sich in 59 Tagen, also in zwei Dritteln der Zeit, die er für einen Sonnenlauf benötigt, einmal um sich selbst.

Das führt dazu, dass es auf Merkur eben doch überall einen Tag-Nacht-Wechsel gibt. In der schematischen Darstellung (→ Bild S. 33) wird deutlich, dass an jedem beliebigen Punkt auf der Merkur Oberfläche die Sonne alle 176 Tage aufgeht, also alle zwei Merkurjahre. Der Passus „für jeden Punkt“ ist insofern von Bedeutung, da die Rotationsachse des Planeten nur um 0,01 Grad gegenüber der Bahnebene geneigt ist, sodass es im Gegensatz zur Erde oder dem Mars so gut wie keine Jahreszeiten auf dem Merkur gibt und es folglich auch nicht zu Polarnächten kommt, in denen die Sonne überhaupt nicht über dem Horizont erscheint. Entsprechend dauert ein Merkurtag 88 Erdtage, nach 44 Tagen steht die Sonne im Zenit.

Albert Einstein und der Planet Vulkan

Mit Erfindung des Fernrohrs im 17. Jahrhundert und später mit den großen Teleskopen drang die Astronomie buchstäblich in neue Dimensionen vor. Im Sonnensystem sah man nun auch Monde um Planeten kreisen, zwei neue Planeten (Uranus, Neptun) wurden entdeckt (mit Pluto gewissermaßen sogar drei), außerdem Asteroiden und Kometen. Gleichzeitig erreichte die Positionsbestimmung der Planeten die Präzision von Bogensekunden.

Die zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt gemessene Position eines Planeten wurde mit der berechneten Bahn verglichen. Nicht selten kam es dabei zu Abweichungen, was nach einer Erklärung verlangte: Handelte es sich um eine fehlerhafte Beobachtung oder um einen Effekt der Himmelsmechanik, der noch nicht bekannt war? Als Kepler anhand der Messungen Tycho Brahes sah, dass sich die Planeten nicht auf Kreisbahnen, sondern auf Ellipsen um die Sonne bewegten, hatte er den Fehler in Kopernikus' Modell gefunden und gleichzeitig den Schlüssel zu seinen beiden ersten Gesetzen der Planetenbahnen in der Hand. Edmond Halley (↓) bestätigte mit den Bahnbeobachtungen des nach ihm benannten Kometen das Gravitationsgesetz seines Freundes Isaac Newton. Unregelmäßigkeiten in der Uranusbahn führten zur Entdeckung Neptuns.

Newtons Gesetz wurde auch bei Bahnberechnungen des Merkur schon früh angewendet. Dies führte zu der Vorhersage, dass die benachbarte Venus und alle anderen Planeten an der Ellipsenbahn des kleinen Planeten zerren müssten. Beobachtungen bestätigten dies bald: Die größere der beiden Bahnachsen vollzieht in der Ebene des Weges um die Sonne eine

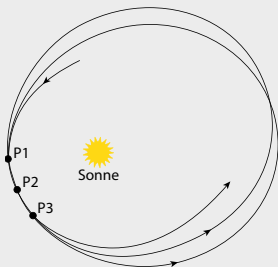
Edmond Halley (1656–1742): englischer Astronom, Mathematiker, Kartograph, Geophysiker und Meteorologe, beobachtete 1677 als erster einen Merkurtransit von Anfang bis Ende. Im Jahre 1705 berechnete er aus früheren Kometensichtungen die Wiederkehr des später nach ihm benannten Kometen für das Jahr 1759.

Bild rechte Seite: DLR

rechtläufige Drehung. Dabei wandert der sonnen-nächste Punkt ganz langsam um die Sonne, weshalb man von einer „Perihel-“ oder „Apsidendrehung“ der Merkurbahn spricht. Sie beschreibt also eigentlich eine Art Rosette und ist streng genommen keine Ellipsenbahn.

Das Gravitationsgesetz sagte voraus, dass der Wert etwa 530 Bogensekunden pro Jahrhundert betragen müsse – die Venus trägt zur Hälfte dazu bei, Jupiter und die übrigen Planeten zu je einem Viertel. Der französische Astronom Urbain Le Verrier (↓) stellte aber 1859 nach der Beobachtung einiger Merkurdurchgänge vor der Sonne fest, dass diese, auch Präzession genannte, Drehung höhere Werte aufwies, nämlich 574 Bogensekunden pro Jahrhundert. Und wieder die Frage: Ein Beobachtungseffekt? Ein Rechenfehler? Oder eine noch nicht berücksichtigte Kraft, die das Merkurperihel schneller als berechnet wandern lässt? Der Unterschied betrug 0,43 Bogensekunden pro Jahr, das sind gerade mal 29 Kilometer Abweichung auf der über 350 Millionen Kilometer langen Bahn des Planeten um die Sonne. Was also „zerrt“ da noch an der Merkurbahn? Die Astronomen fühlten sich genarrt. Merkur hat keinen Mond! Gab es im inneren Sonnensystem etwa noch einen zweiten

Asteroidengürtel? Nichts deutete darauf hin. Ein noch nicht entdeckter Planet? Le Verrier und die führenden Astronomen machten sich auf die Suche nach „Vulkan“,



Wanderung des Perihels (↓) der Merkurbahn (P1, P2, P3, ...) um die Sonne.

dem unbekanntem Planeten, der für die Abweichungen verantwortlich sein könnte. Doch einen Planeten Vulkan gibt es nicht.

Die Lösung des Rätsels war ein Effekt, von dem die allein mit der Newtonschen Mechanik (brillant!) rechnenden Astronomen noch nichts wissen konnten: In unmittelbarer Umgebung starker Schwerfelder – und die Sonne hat sechs Millionen Mal mehr Masse als der Merkur! – wird das Newtonsche Gravitationsgesetz mehr und mehr durch die allgemeine Relativitätstheorie ersetzt, die Albert Einstein aber erst 1915 vorgestellt hatte. Sie besagt, dass die Raumzeit nahe einer großen Masse gekrümmt ist.

Einstein hatte im Jahr darauf auch berechnet, dass der Unterschied zwischen der Beobachtung der Merkurbahn und der kalkulierten Wirkung des relativistischen Effekts auf diese „Apsidendrehung“ (↓) nahezu deckungsgleich sind. Für eine komplette Periheldrehung um die Sonne benötigt Merkur etwa 930.000 Umläufe oder 224.000 Erdenjahre. Pro Umlauf wandert das Perihel also 1,4 Bogensekunden. Und tatsächlich, die Genauigkeit der Beobachtungen von der Erde wurde immer besser, so dass die Bahn Merkurs auf wenige Zehnermeter genau vermessen werden konnte: Einstein hatte Recht. An Merkurs Bahn zerren zum einen die Planeten, und die durch die Sonne erwirkte Raumzeitkrümmung steuert ihren Teil dazu bei. Ganz nebenbei wurde über den Merkur die allgemeine Relativitätstheorie bestätigt, ein großer Erfolg für Einstein. Und ein Beispiel, wie in der Wissenschaft Theorie und Experiment, also die Beobachtung der Realität, miteinander verschränkt werden müssen, um zu neuen Erkenntnissen zu gelangen.

Urbain Le Verrier (1811–1877): französischer Astronom und Mathematiker, lange Zeit Direktor des berühmten Observatoire de Paris, dessen Berechnungen auf Grundlage der Laplaceschen Himmelsmechanik als die präzisesten ihrer Zeit galten.

Apsidendrehung: Als Apsis (vom altgriechischen Wort für Wölbung, Bogen) werden in der Astronomie die beiden „Scheitel“, die Apsiden, einer elliptischen Umlaufbahn um einen anderen Körper bezeichnet – mit der Apoapsis als der größten und der Periapsis als der geringsten Entfernung zum Zentralkörper. Die Verbindungsgerade heißt Apsidenlinie. Diese Apsidenlinie beschreibt beim Merkur in 224.000 Jahren eine vollständige 360-Grad-Drehung.

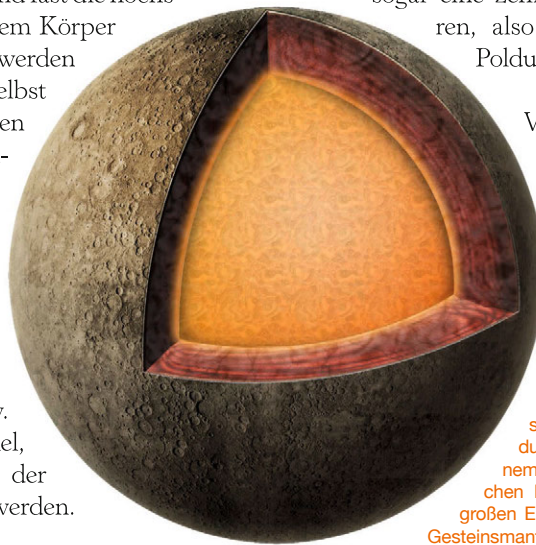
Eine weitere Besonderheit ist dem Umstand geschuldet, dass in jenen Zeiten, in denen Merkur seine höchsten Bahngeschwindigkeiten erreicht, also während des Periheldurchgangs, als Folge des zweiten Keplerschen Gesetzes die Winkelgeschwindigkeit seiner Bahnbewegung am größten ist – und diese ist dann sogar höher als die seiner Rotation. Das führt dazu, dass die Sonne am Merkurhimmel zeitweise eine rückläufige Schleifenbewegung macht.

Die 3:2-Resonanz führt in Verbindung mit dem stark elliptischen Orbit außerdem dazu, dass bei aufeinanderfolgenden „Periheldurchgängen“, wenn der Planet also seinen sonnennächsten Punkt durchläuft, zunächst eine bestimmte Seite des Merkur der Sonne zugewandt ist, beim nächsten Perihel dann die gegenüberliegende Hemisphäre. So kommt es, dass der Nullmeridian und der 180-Grad-Meridian immer genau im Perihel zur Sonne weisen. Das bedeutet aber auch, dass dann die höchsten Temperaturen auf dem Merkur herrschen, nämlich bis zu 430 Grad Celsius. Das sind fast die höchsten Temperaturen, die auf einem Körper des Sonnensystems erreicht werden – sieht man von der Sonne selbst ab. Auf der Venus werden wegen des Treibhauseffekts der dichten Atmosphäre noch etwas höhere Temperaturen (bis zu fast 500 Grad Celsius) gemessen. Entsprechend gibt es zu diesen „Hitzepolen“ auf dem Merkur die beiden etwas kühleren Hemisphären mit den Meridianen bei 90 Grad bzw. 270 Grad, die stets nur im Aphel, dem sonnenfernsten Punkt der Merkurbahn, durchlaufen werden.

Dort erreichen die Temperaturen Werte von „nur“ 250 Grad Celsius, sind also deutlich niedriger. Infolge der Bahnexzentrizität empfängt die Merkur Oberfläche bei einem Periheldurchgang etwa 2,3-mal mehr Energie als beim Aphel. Die Temperaturen auf der Nachtseite des Merkur fallen, auch infolge der nicht vorhandenen Atmosphäre, auf unter –180 Grad Celsius, das ist etwa so kalt wie auf den Oberflächen der Saturnmonde.

Planet mit Eisenüberschuss

Schon frühe Beobachtungen ohne Teleskop führten zu einer erstaunlich genauen Abschätzung der Größe Merkurs. Heute ist der Durchmesser mit 4879,4 Kilometern vor allem dank der Langzeitmessungen durch die Mission *MESSENGER* (→ Schwierig! Mit Raumsonden zum Merkur, S. 34) sehr genau bekannt. Merkur ist darüber hinaus der einzige Planet, der eine nahezu perfekte Kugelform hat – alle anderen Planeten haben im Zuge ihrer Entwicklung und infolge ihrer raschen Rotation eine leichte (oder im Falle des Saturns sogar eine zehnprozentige) Abplattung erfahren, also einen größeren Äquator- als Poldurchmesser.



Verknüpft mit den Werten der Umlaufbahn, dem Einfluss des Nachbarplaneten Venus auf diese Umlaufbahn, Beobachtungen von Kometen, die vom Schwerefeld des Merkur beeinflusst wurden, und vor allem aber den Messungen

Die auffallendste physikalische Eigenschaft des Merkur ist seine hohe globale durchschnittliche Dichte. Sie rührt von einem im Vergleich zu den anderen erdähnlichen Planeten und dem Mond ungewöhnlich großen Eisenkern her. Im Gegensatz dazu ist der Gesteinsmantel des Merkur vergleichsweise dünn.



<http://www.springer.com/978-3-662-54995-7>

Expedition zu fremden Welten

20 Milliarden Kilometer durch das Sonnensystem

Jaumann, R.; Köhler, U.; Sohl, F.; Tirsch, D.; Pieth, S.

2018, XV, 381 S. 55 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-54995-7