

ZACK SCOTT

KOSMOS

DAS

UNI VER SUM

DER ILLUSTRIERTE ATLAS
DES WELTALLS

Das einmalige Werk mit
200 besonderen Infografiken



Welches Thema dich auch begeistert – auf unsere Expertise kannst du dich verlassen. Und das schon seit über 200 Jahren.

Unser Anspruch ist es, dich mit wertvollem Rat zu begleiten, dich zu inspirieren und deinen Horizont zu erweitern.

BEGEISTERUNG DURCH KOMPETENZ

Unsere Autorinnen und Autoren vereinen professionelles Know-how mit großer Leidenschaft für ihre Themen.

WISSEN, DAS DICH WEITERBRINGT

Leicht verständlich, lebensnah und informativ für dich auf den Punkt gebracht.

SACHVERSTAND, DEN MAN SEHEN KANN

Mit aussagestarken Fotos, Zeichnungen und Grafiken werden Inhalte besonders anschaulich aufbereitet.

QUALITÄT FÜR HEUTE UND MORGEN

Dafür sorgen langlebige Verarbeitung und ressourcenschonende Produktion.

Du hast noch Fragen oder Anregungen?
Dann kontaktiere unsere Service-Hotline: 0711 25 29 58 70
Oder schreibe uns: [kosmos.de/servicecenter](https://www.kosmos.de/servicecenter)

Einführung

Lange Zeit erschien uns Menschen der Nachthimmel wie ein Wunder. Einst glaubten wir, er sei von göttlicher Natur und getrennt von unserer sterblichen Welt. Heute wissen wir, dass dies nicht der Fall ist, sondern dass der Himmel und wir selbst Teil eines überwältigenden Ganzen sind, das wir Universum nennen.

Seit jeher versuchten wissbegierige Gemüter, dem Verständnis des Kosmos und der Frage nach unserem Platz darin ein Stück näherzukommen. Früher schauten die Astronomen dazu mit bloßen Augen in den Nachthimmel, heute haben wir leistungsfähige Teleskope – einige in Umlaufbahnen hoch über der Erde –, die uns tiefgehende Einblicke ermöglichen. Über Jahrtausende hinweg, in denen wir die Geheimnisse des Universums mehr und mehr aufdecken konnten, ist unsere Technologie enorm vorangeschritten. Dennoch waren die frühen Astronomen für unser Bestreben, die Rätsel des Universums zu lösen, genauso wichtig wie die modernen Teams von Wissenschaftlern, die Teleskope an Bord von Raketen in den Weltraum schießen.

Die Reise in diesem Buch beginnt in unserer unmittelbaren Nachbarschaft mit den Objekten unseres Sonnensystems. Sie sind uns am vertrautesten, über sie wissen wir am meisten. Die Planeten wurden schon von alten Zivilisationen benannt und bereits lange vorher – in vorge-

schichtlicher Zeit – verehrte man die lebensspendende Sonne. Es ist daher nicht falsch, zu behaupten, dass uns Menschen eine lange und innige Beziehung mit diesen himmlischen Objekten verbindet. Die Sonne ist der letzte unserer Nachbarn, den wir kennenlernen werden, und gleichzeitig der einzigartigste Himmelskörper im Sonnensystem. Sie ist unser Stern, der uns beständig in Licht und Wärme badet. Nachdem wir alle Planeten und die Sonne besucht haben, verlassen wir die Geborgenheit unseres eigenen Sonnensystems, um andere Sterne, Planeten und Galaxien in größerer Entfernung zu erkunden. Wir erfahren dabei, wie Sterne entstehen und wieder vergehen und lernen den Lebenszyklus des gesamten Universums kennen – was nach dem Urknall geschah und wie es vermutlich seine Existenz beenden wird.

Im Laufe unserer Reise veranschaulichen zahlreiche Beispiele, wie Astronominen und Astronomen diese Wunder enthüllt haben, von denen der Kosmos nur so wimmelt. Auf den ersten Blick erscheint es absurd, geradezu fantastisch, dass sie überhaupt in der Lage dazu sind, uns so viel über die Sterne zu erzählen. Immerhin sind diese so weit entfernt, dass ihr Licht zum Teil Millionen Jahre braucht, um uns zu erreichen. Mithilfe von Einblicken in die wissenschaftliche Forschung werden jedoch hoffentlich einige der befremdlichen Zahlen und Fakten nachvollziehbarer, die vor allem der Kosmologie zu eigen sind.

Inhalt

- 8 Das Sonnensystem
- 96 Die Sterne
- 162 Exoplaneten
- 182 Galaxien
- 210 Der Urknall
- 228 Das Ende
des Universums

Das Sonnensystem

Schwerkraft und die Bewegung der Gestirne	10
Merkur	16
Venus	20
Erde	24
Kometen	28
Meteoroiden, Meteore und Meteoriten	32
Der Mond	36
Mars	44
Asteroidengürtel	48
Jupiter	52
Saturn	56
Uranus	60
Neptun	64
Kuiper-Gürtel und Oortsche Wolke	68
Unsere Sonne	82

Die Sterne

Das Licht untersuchen	98
Nebel	106
Protosterne	110
Braune Zwerge	111
Das H-R-Diagramm	112
Hauptreihensterne	114
Kernfusion in Sternen	116
Sterne geringer Masse	118
Proxima Centauri	120
Sterne mittlerer Masse	122
Mira	124
Van Maanens Stern	126
Das Leben unserer Sonne	128
Massereiche Sterne	130
Beteigeuze	132
Supernovae	134
Neutronensterne	138
Schwarze Löcher	142
Der Lebenszyklus von Sternen	146
Die größten Sterne	148
Nicht-Hauptreihensterne	150
Mehrfachsternsysteme	152
Sirius A & B	154
Sternbilder	156

Exoplaneten

Wie Planeten entstehen	164
Planetenarten	166
Anordnung von Planeten	168
Exoplaneten entdecken	170
Entdeckungsmethoden	172
Leben auf anderen Welten	174

Galaxien

Die Entstehung von Galaxien	184
Galaxientypen	186
Die Milchstraße	188
Andromeda-Galaxie	192
Große Magellansche Wolke, Hoags Objekt	193
Dunkle Materie	194
Supermassereiche Schwarze Löcher	196
Quasare	200
Messier 87	202
Die Expansion des Universums	204
Dunkle Energie	206

Der Urknall

Der früheste Anfang	212
Die erste Sekunde	214
Materie entsteht	216
Die Verteilung der Materie	218
Die ersten Sterne	220
Die Struktur des Universums	222
Die Größe des Universums	224

Das Ende des Universums

Mögliche Schicksale	230
Die Sterne verlöschen	232
Zeitleiste des Universums	234

Quellen	242
Bildnachweis	243
Impressum	243



”

*Die Natur
freut sich der
Einfachheit.*

“

Isaac Newton; 1643-1727

DAS SONNEN- SYSTEM




8 UNSERE NACHBARSCHAFT

Unser Ausflug ins Universum beginnt in unserer kosmischen Nachbarschaft, dem Sonnensystem. Geformt aus einer kollabierenden Wolke aus Gas und Staub, leuchtete unsere Sonne erstmals vor rund 4,6 Milliarden Jahren auf, während sich die Planeten aus den umgebenden Resten der Wolke bildeten.

Fast die gesamte Menschheitsgeschichte über war uns unser Platz im Sonnensystem oder gar im gesamten Universum nicht bewusst. Wir glaubten, unbewegt im Zentrum von allem zu stehen; getrennt von den Gestirnen, die über den Himmel wandern. Erst zu Beginn der wissenschaftlichen Revolution im 16. Jahrhundert erkannten wir, dass die Sonne das Zentrum der Planetenbahnen bildet und

dass sich das Universum nicht um uns dreht. Seither hat sich unser Wissen über den Kosmos exponentiell vermehrt. Das Teleskop, das seit seiner Erfindung stets weiterentwickelt wurde, sowie in neuerer Zeit die Raumsonden, die wir zu fremden Welten schicken können, liefern uns eine Fülle an Informationen, die unseren Horizont fortlaufend erweitern. Ohne diese Technologien wüssten wir nur einen Bruchteil dessen, was wir heute wissen.

Wir starten unsere Planetentour beim sonnennächsten Planeten Merkur. Von dort aus bewegen wir uns nach außen, machen Halt bei den inneren Gesteinsplaneten sowie im Asteroidengürtel und setzen unsere Reise anschließend zu den

A space scene showing the Sun, planets, and a Kuiper Belt. The Sun is a bright yellow star in the upper right. To its left are several planets: a small grey one, a blue and white one (Earth), and a larger reddish one (Mars). Further left is a small brown one. A large, reddish planet (Jupiter) is in the foreground on the right. A ring of small grey objects (the Kuiper Belt) is visible in the background, curving around the Sun. The background is a dark blue space filled with stars.

riesigen Gasplaneten im äußeren Sonnensystem fort. Unterwegs treffen wir auf Monde, Kometen und Zwergplaneten, bevor wir zur geheimnisvollen Oort'schen Wolke im äußersten Bereich des Sonnensystems vordringen. Der letzte Körper, auf den wir beim Verlassen des Sonnensystems zurückblicken, ist die Sonne selbst: Sie spendet allem, was sie umgibt, Licht und Wärme. Aber warum kreisen die Planeten eigentlich um die Sonne? Um dies zu verstehen, müssen wir uns zunächst mit dem Phänomen der Schwerkraft befassen. Sie ist verantwortlich für die Bewegungen der Planeten und Sterne und verleiht dem Universum darüber hinaus seine großräumige Struktur.

Schwerkraft und die Bewegung

der Gestirne

10

Die Schwerkraft (oder Gravitation) ist eine anziehende Kraft, die zwischen allen Objekten des Universums wirkt – sie hält uns am Boden, den Mond auf seiner Bahn und Galaxien zusammen. Die Gravitation ist auf großen Skalen die vorherrschende Kraft, die dem Universum seine Gestalt verleiht; ohne sie hätten sich keine Planeten und leuchtenden Sterne gebildet. Die wissenschaftliche Erforschung der Gravitation begann mit dem italienischen Astronomen Galileo Galilei im späten 16. Jahrhundert. In seinen Fall-experimenten ließ er der Legende nach Kugeln verschiedener Masse vom Schiefen Turm von Pisa stürzen, um ihre Fallgeschwindigkeiten zu messen. Er fand seine Voraussage bestätigt, dass verschiedene Kugeln die gleiche Zeit benötigen, um zu Boden zu fallen. Damit war bewiesen, dass die Masse eines Objekts seine Fallgeschwindigkeit nicht beeinflusst. Isaac Newton, der die Bewegung der Himmelskörper studierte, erweiterte später Galileis Theorie der fallenden Körper, um damit auch die Planetenbewegungen zu beschreiben. Newton nahm an, dass die gleiche Kraft, die Körper zu Boden fallen lässt, auch Planeten und Monde in ihren Umlaufbahnen hält. 1687 veröffentlichte er seine Arbeiten zur Gravitation und den Bewegungsgesetzen in dem Buch *Principia*, einem der wichtigsten Werke in der Geschichte der Wissenschaft.

NEWTONS ALLGEMEINES GRAVITATIONSGESETZ

Newtons Gravitationsgesetz besagt, dass ein Körper auf einen anderen Körper eine anziehende Kraft ausübt und dass diese Kraft von den Massen der Körper und ihrem gegenseitigen Abstand abhängt. Da die Gravitation mit dem Quadrat der Entfernung zwischen den Objekten abnimmt, handelt es sich um ein quadratisches Abstandsgesetz. Es kann mit einer einfachen Gleichung beschrieben werden.

$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

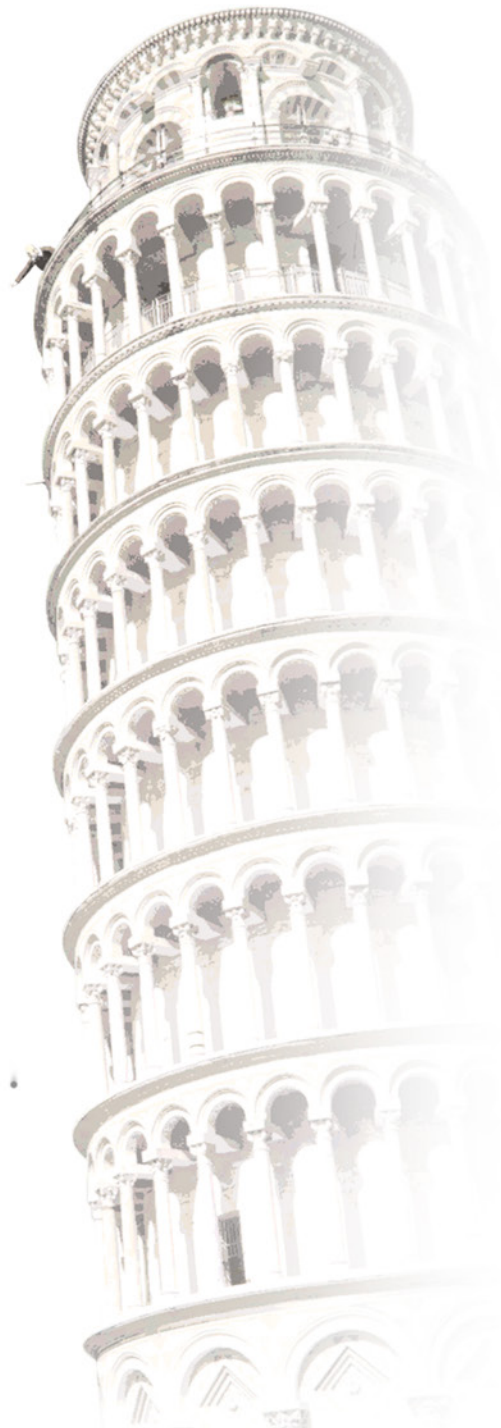
Kraft

Gravitationskonstante

Masse Körper 1

Masse Körper 2

Abstand zwischen den Schwerpunkten der Körper

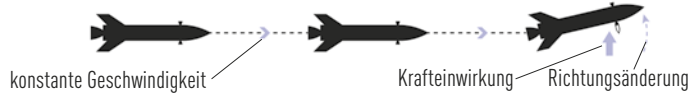


DIE BEWEGUNGSGESETZE

Die drei Bewegungsgesetze, die Newton in seinem Buch *Principia* formulierte, beschreiben, wie Körper, die auf sie wirkenden Kräfte sowie ihre Bewegungen miteinander zusammenhängen. Die Gesetze gelten für alle Objekte, von Billardkugeln bis zu Planeten, unter extremen Bedingungen verlieren sie allerdings ihre Gültigkeit. Bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit, in immensen Gravitationsfeldern oder wenn die Masse eines Körpers kleiner ist als die eines Atoms, müssen andere Theorien herangezogen werden.

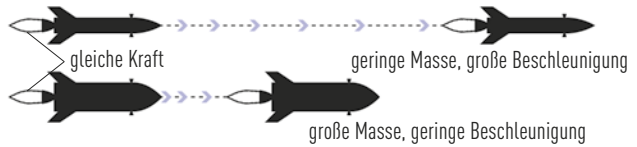
1. GESETZ

Ein Körper verharrt in Ruhe oder bewegt sich geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit, sofern keine Kraft auf ihn einwirkt.



2. GESETZ

Die Kraft auf einen Körper entspricht seiner Masse, multipliziert mit seiner Beschleunigung. Wirkt die gleiche Kraft auf zwei Körper, von denen einer die doppelte Masse des anderen hat, ist die Beschleunigung dieses Körpers halb so groß wie die des masseärmeren.



3. GESETZ

Jede „Aktion“ erzeugt eine gleich große, entgegengesetzte „Reaktion“. Übt ein Körper eine Kraft auf einen zweiten Körper aus, so übt dieser auf den ersten eine ebenso große, entgegengesetzte Kraft aus.



NEWTONS KANONENKUGEL

Um die Bahnen von Himmelskörpern zu erklären, bediente sich Newton eines etwas geräumigeren Gedankenexperiments als Galileis Fallversuche. Er stellte sich eine Kanone auf dem Gipfel eines sehr hohen Berges vor, aus der Kanonenkugeln mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten abgefeuert werden.



GERINGE GESCHWINDIGKEIT

Ist die Geschwindigkeit klein, fällt die Kanonenkugel auf die Erde zurück.



KREISBAHNGESCHWINDIGKEIT

Bei einer bestimmten Geschwindigkeit in gegebener Höhe fällt die Kanonenkugel immer weiter und umkreist so die Erde.



GROSSE GESCHWINDIGKEIT

Liegt die Geschwindigkeit zwischen Kreisbahn- und Fluchtgeschwindigkeit (s. u.), beschreibt die Kugel eine elliptische Bahn.



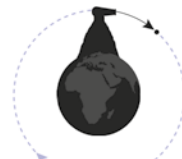
FLUCHTGESCHWINDIGKEIT

Ab der sogenannten Fluchtgeschwindigkeit verlässt die Kanonenkugel den Erdbahn auf einer parabolähnlichen Bahn.



GERINGE HÖHE

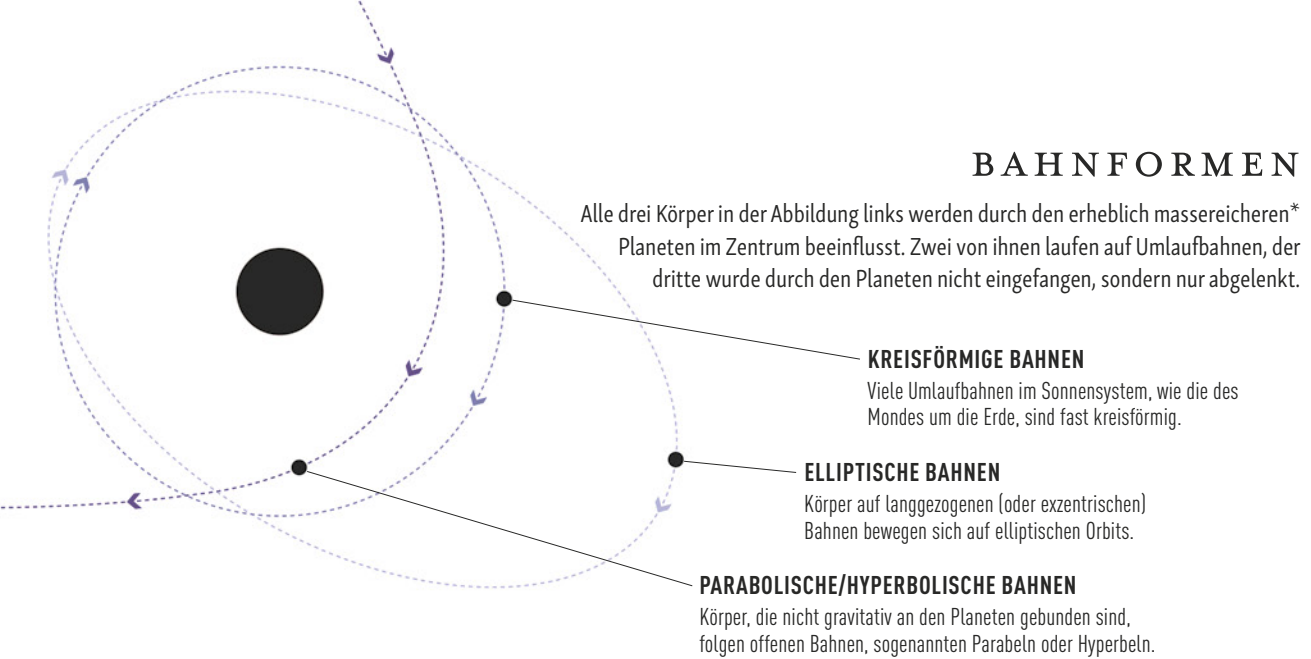
Je näher die Kanonenkugel der Erde ist, umso schneller muss sie sich bewegen, um im Orbit zu bleiben.



GROSSE HÖHE

Je größer die Entfernung von der Erde ist, umso langsamer muss sich die Kanonenkugel bewegen, um im Orbit zu bleiben.

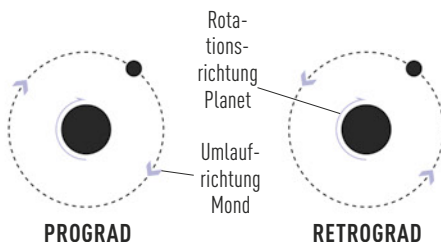
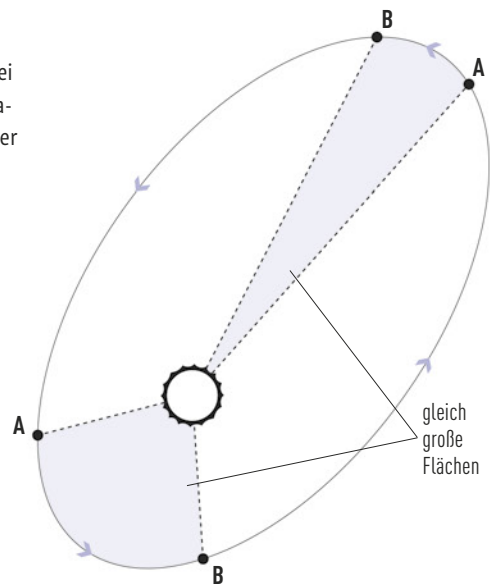
BAHNFORMEN



KEPLERS GESETZE DER PLANETENBEWEGUNG

12

Schon vor Newton formulierte der deutsche Astronom Johannes Kepler drei Gesetze, die die Planetenbewegungen um die Sonne beschreiben. Eines davon, das zweite keplersche Gesetz, besagt, dass sich ein Planet, wenn er der Sonne näher kommt, schneller bewegt. Es gibt auch an, wie die Planetengeschwindigkeit auf einer elliptischen Umlaufbahn variiert. Die Grafik rechts zeigt einen Planeten auf einer elliptischen Umlaufbahn um die Sonne und erläutert Keplers zweites Gesetz: Dargestellt ist, um welche Strecke sich der Planet an verschiedenen Punkten seiner Bahn in einer festen Zeitspanne weiterbewegt. In beiden Fällen benötigt er die gleiche Zeit, um von A nach B zu gelangen, er legt in größerer Entfernung zur Sonne jedoch eine kleinere Strecke zurück; dort bewegt er sich also langsamer. Kepler entdeckte darüber hinaus, dass ein von der Sonne zum Planeten gezogener Fahrstrahl (gestrichelte Linien) in gleichen Zeiten gleich große Flächen überstreicht.



DIE BEWEGUNGSRICHTUNG

Die Begriffe prograd und retrograd definieren die Bewegungsrichtungen von Planeten relativ zur Rotation ihres Muttersterns oder von Monden relativ zur Rotation ihres Mutterplaneten.

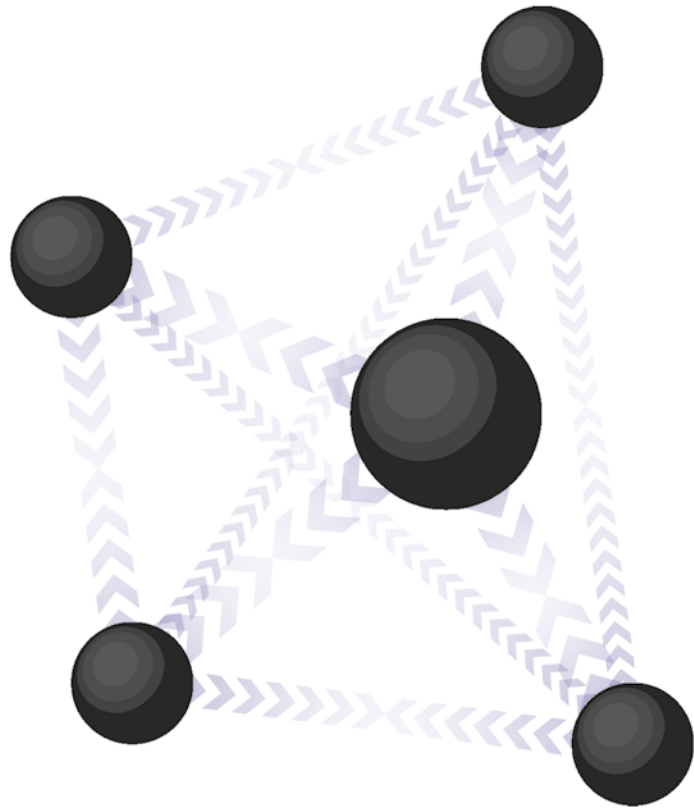
* Von hier an wird der Begriff *massereich* nur noch in Bezug auf die Masse und nicht mehr in Bezug auf die physische Größe verwendet. Jupiter ist zwar zum Beispiel nur geringfügig größer als der Saturn, aber wesentlich massereichere.

MEHRERE KÖRPER

Das Verständnis der Gravitation ermöglicht es uns, die Bahnen von Himmelsobjekten und ihre Positionen vorherzusagen. Über längere Zeiträume wird die Genauigkeit allerdings geringer.

Betrachten wir die Gravitationseffekte zwischen zwei Körpern, so lassen sich die auf sie einwirkenden Kräfte theoretisch exakt berechnen. In der Realität ist das aber eher nicht möglich. Der Mond zum Beispiel befindet sich zwar im Umlauf um die Erde, wird aber zusätzlich stark durch die Gravitation der Sonne beeinflusst. Daher ist seine Bahn keine perfekte Ellipse mit der Erde im Zentrum, sondern leicht verzerrt. Tatsächlich wirkt sogar jeder Körper im Sonnensystem sowie der Sog der gesamten Milchstraße auf die Bewegung des Mondes ein.

Angesichts der schieren Anzahl von beteiligten Variablen ist die Vorhersage der Positionen von Monden, Planeten und Sternen also eher wie die Wettervorhersage: gut machbar über kurze Zeitabschnitte, über längere Zeiträume allerdings kniffliger.



13

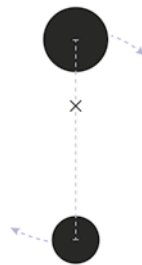
DER SCHWERPUNKT

Den Punkt, den zwei einander umlaufende Objekte umkreisen, bezeichnet man als Schwerpunkt (auch Baryzentrum). Er ist der Massenmittelpunkt der beiden Objekte.



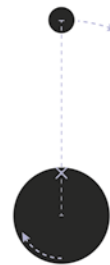
GLEICHE MASSE

Besitzen zwei Planeten die gleiche Masse, so befindet sich der Schwerpunkt genau in der Mitte zwischen ihnen.



DOPPELTE MASSE

Ist der eine Planet doppelt so massereich wie der andere, liegt der Schwerpunkt doppelt so nah am Massenzentrum dieses Planeten.



ERDE-MOND-SYSTEM

Der Schwerpunkt des Erde-Mond-Systems befindet sich im Mittel rund 1700 Kilometer unter der Erdoberfläche.

AKKRETION

Die Gravitation hält die Planeten aber nicht nur auf ihren Umlaufbahnen, sondern ist auch verantwortlich für ihre Entstehung. Am Anfang existierten nur Staub und Moleküle. Mit der Zeit zog die Schwerkraft diese mikroskopischen Partikel zusammen und formte Asteroiden und Planeten, die Sonne und andere Sterne. Das weitere Einsammeln von Material bezeichnet man als Akkretion.

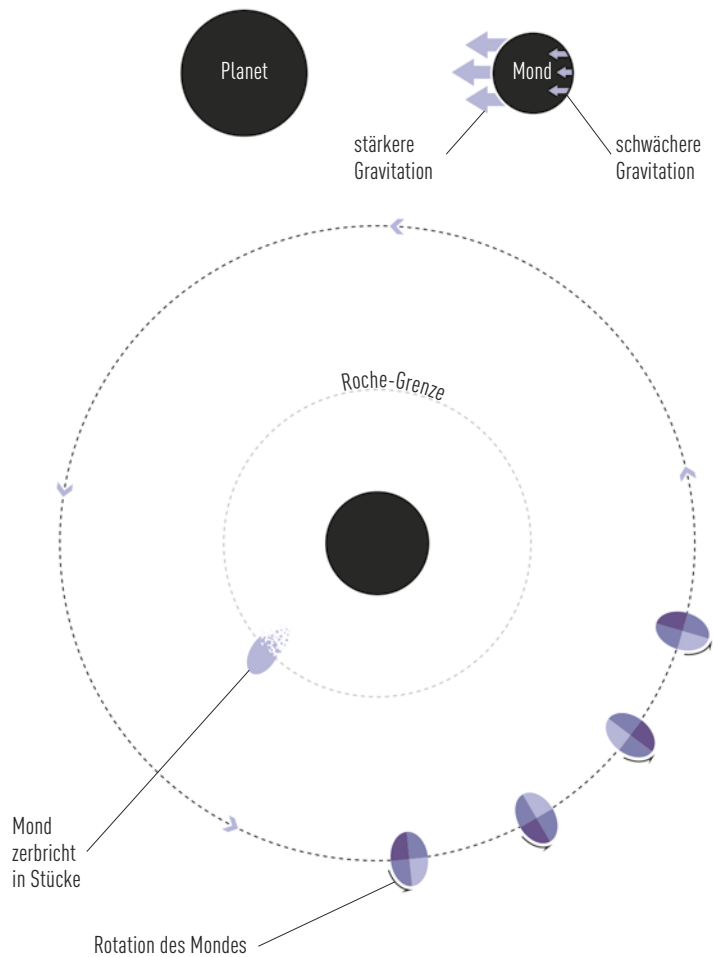


GEZEITENKRÄFTE

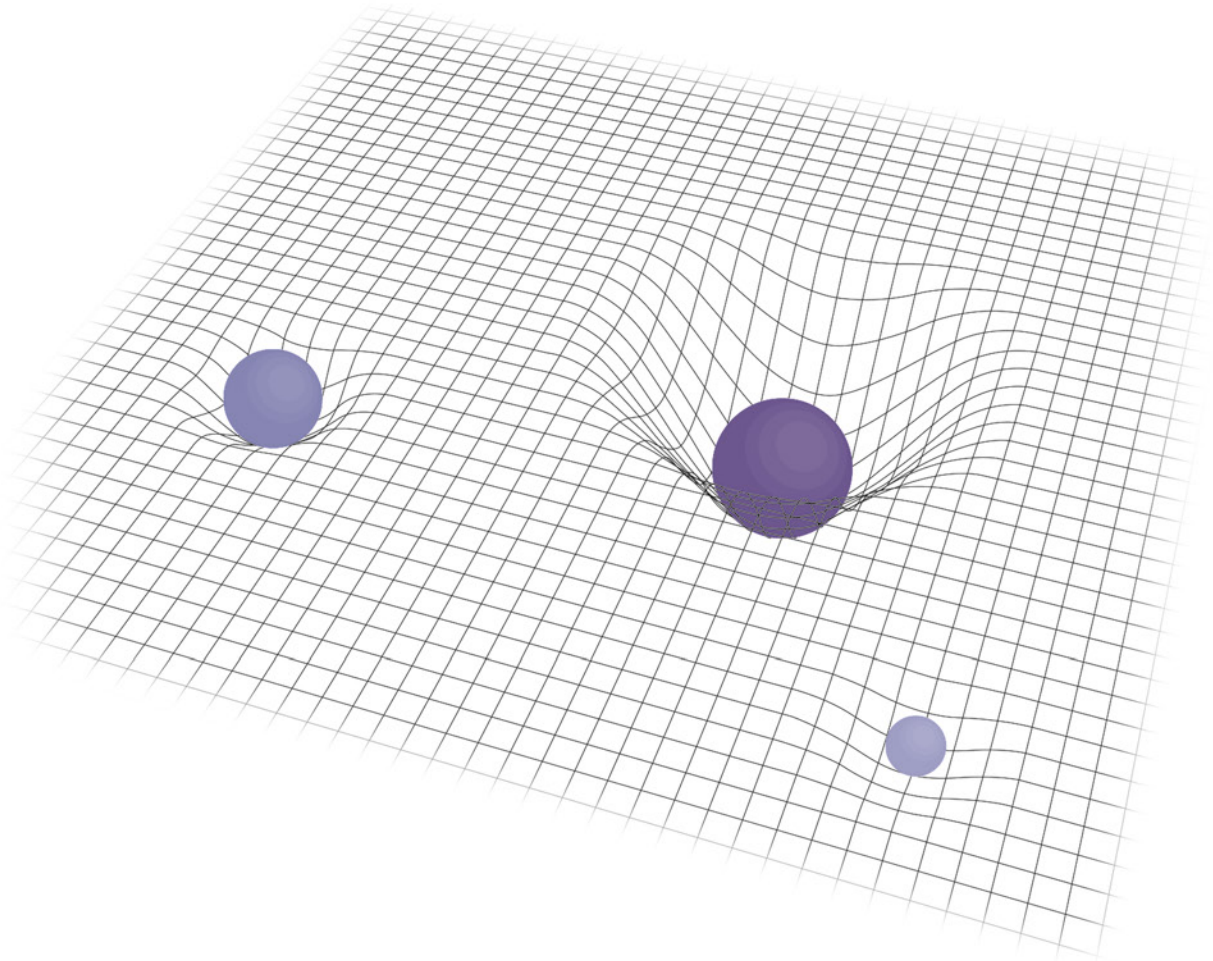
14

Wir wissen bereits, dass die Schwerkraft mit dem Abstand abnimmt. Von zwei einander umlaufenden Körpern werden daher die jeweils näheren Seiten stärker zueinander gezogen als die entfernteren. Ein Mond wird also durch die Schwerkraft eines Planeten auseinandergezogen. Dreht sich der Mond, so weist immer eine andere Seite zum Planeten, er dehnt sich kontinuierlich aus und zieht sich wieder zusammen. Diese geologischen Bewegungen können Beben verursachen und die innere Reibung durch die Gezeitenkräfte heizt den Mond auf und kann zu Vulkanismus führen. Durch Gezeitenkräfte wird die Rotation von Körpern abgebremst; dies war auch bei unserem Mond der Fall, der nun „gebunden“ rotiert und der Erde immer dieselbe Seite zuwendet.

Der Einfluss der Gezeitenkräfte ist umso größer, je näher der Mond dem Planeten kommt. Ab einer bestimmten „Nähe“, der sogenannten Roche-Grenze, wird der Mond von den ungleichen Gravitationskräften in Stücke gerissen. Die Roche-Grenze ist unter anderem abhängig von den Massen der beteiligten Körper und der physikalischen Beschaffenheit des Mondes.



WAS IST EIGENTLICH GRAVITATION?



15

Bisher haben wir uns damit befasst, wie die Gravitation wirkt und wie sie sich bei Himmelskörpern bemerkbar macht – aber was genau verursacht die Gravitation? Eine Antwort auf diese Frage gab es erst, als Albert Einstein im Jahr 1915 seine Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte, in der er postulierte, dass Massen die „Struktur“ des Raumes krümmen. In seiner Arbeit erklärte Einstein, dass die drei bekannten Raumdimensionen sowie eine vierte (die Zeit) Teil eines Gesamtgefüges sind, der sogenannten Raumzeit. Er schlug vor, dass diese Raumzeit nicht einfach flach oder konstant ist, sondern durch die Anwesenheit von Materie verzerrt wird. In der Abbildung oben wird die Raumzeit durch eine karierte Fläche verbildlicht. Stellen wir uns nun vor, dass sich diese Fläche wie das Sprungtuch eines Trampolins verhält und wir darauf eine Bowlingkugel platzieren: Das Material dehnt sich, wobei es das Gebiet um sich herum deformiert. Wenn nun eine sehr viel kleinere Masse wie beispielsweise eine Murmel an die Bowlingkugel heranrollt, ändert sich ihre Bahn, sodass die Murmel auf die größere Masse zurollt. Dieses Bild veranschaulicht sehr gut, wie größere Körper, etwa Planeten, vorbeifliegende Objekte einfangen, die dann zu ihren Monden werden. Der amerikanische Physiker John Archibald Wheeler fasste die Theorie sehr prägnant so zusammen: „Die Raumzeit sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll; die Materie sagt der Raumzeit, wie sie sich krümmen soll.“

Merkur



16



Der erste Planet, den wir auf unserer Reise durch das Sonnensystem passieren, ist Merkur. Er ist klein, hat eine große Dichte und befindet sich so nah an der Sonne, dass er von der Erde aus betrachtet häufig in ihrem Glanz verschwindet. Durch seine geringe Größe und seine sonnen-nahe Position ist Merkur selbst mit moderner Technologie nicht leicht zu beobachten.

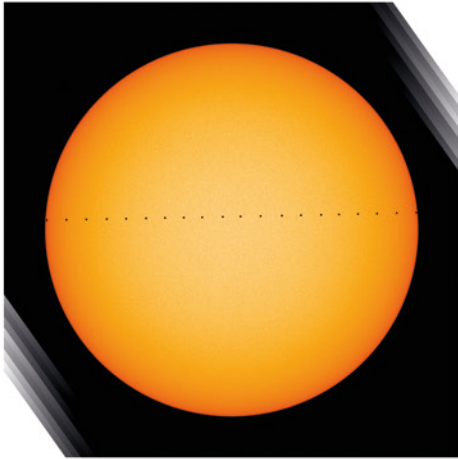
Von der Erde aus scheint der Planet am Himmel hin und her zu flitzen, im Verlauf einiger Wochen taucht er links oder rechts von der blendenden Sonne auf. Wegen der großen Schwerkraft des nahen Tagesgestirns ist er ziemlich flink. Dieses „leichtfüßige Hin- und Herlaufen“ brachte dem Planeten den Namen des römischen Götterboten Merkur ein.

Man könnte nun meinen, dass der gesamte Planet wegen seiner Nähe zur Sonne glühend heiß ist. Das ist jedoch nicht der Fall. Denn obwohl er die Sonne in nur 88 Erdtagen umläuft, rotiert er um seine eigene Achse unglaublich langsam – ein Merkurtag dauert ganze 176 Erdtage (und in dieser Zeit umrundet er zweimal die Sonne!). Während dieser langen Tagzeiten kann sich seine sonnenzugewandte Seite auf

430 Grad Celsius aufheizen – heiß genug, um Blei zu schmelzen. Auf der gegenüberliegenden Nachtseite jedoch fällt die Temperatur auf –200 Grad Celsius ab, da die Wärme durch die extrem dünne Atmosphäre des Planeten leicht entweichen kann. Merkurs geringe Masse und seine schwache Gravitation sind kaum in der Lage dazu, atmosphärische Gase festzuhalten. Die geringen Mengen vorhandener „Luft“ bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, die von der Sonne eingefangen wurden, hinzu kommen weniger häufige Elemente, die durch den Sonnenwind und Meteoriteneinschläge aus der Planetenkruste freigesetzt wurden.

Der ganze Planet ist übersät mit Kratern, von denen viele vermutlich in der Zeit des sogenannten Großen Bombardements entstanden sind. Man nimmt an, dass während dieser Zeit (vor etwa 3,9 Milliarden Jahren) eine große Zahl von Asteroiden auf die erdähnlichen Planeten im inneren Sonnensystem niedergegangen ist. Damals war Merkur geologisch aktiv, es gab Vulkane und Becken mit flüssiger Lava, die schließlich abkühlten und zu glatten Ebenen wurden. Die zahlreichen Krater auf Merkurs Oberfläche beweisen, dass der Planet nun schon seit Milliarden Jahren geologisch inaktiv ist – denn wenn sich die Planetenoberfläche regelmäßig erneuern würde, wären diese Strukturen zwischenzeitlich erodiert.

Erstaunlicherweise existieren auf Merkur, dem innersten Sonnennachbar, Wasservorräte in Form von Eis. Diese Vorkommen wurden im Jahr 2008 durch die Raumsonde Messenger entdeckt, indem man die Reflexion von Radarstrahlen an der Oberfläche untersuchte und in einigen der tiefsten Krater in der Nähe der Pole Eis fand. Die Böden dieser Krater sind ständig von der Sonne abgeschirmt und erwärmen sich daher niemals über –160 Grad Celsius. Man vermutet, dass die Eisablagerungen durch Kometen auf den Planeten gelangt sind. Beim Einschlag auf einen Planeten verdampfen die großen Wassermengen, die in Kometen enthalten sind, und für kurze Zeit nach einer solchen Kollision war Merkur umhüllt von einer Atmosphäre aus Wasserdampf. Ein Teil des Dampfes, der auf die Oberfläche fiel, landete in den ewig dunklen und kalten Kratern, kondensierte und wurde zu einer Eisschicht, die dort auf immer verbleibt.



Dieses Kompositbild wurde vom NASA-Satelliten Solar Dynamics Observatory am 11. November 2019 aufgenommen. Es zeigt Merkur jeweils im Abstand von 21 Minuten während seines 5½-stündigen Transits.

MERKURTRANSITE

In der Abbildung links ist die winzige Silhouette von Merkur zu erkennen, der zwischen uns und der Sonne hindurchläuft. Man bezeichnet dies als *Transit*. Im Mittel erfolgen Merkurtransite alle sieben Jahre. Der erste Transit, der mit einem Teleskop beobachtet wurde, ereignete sich im Jahr 1631. Anhand seiner Beobachtungen konnte der französische Astronom Pierre Gassendi damals als Erster den Durchmesser eines anderen Planeten genau bestimmen.

GROSSER EISENKERN

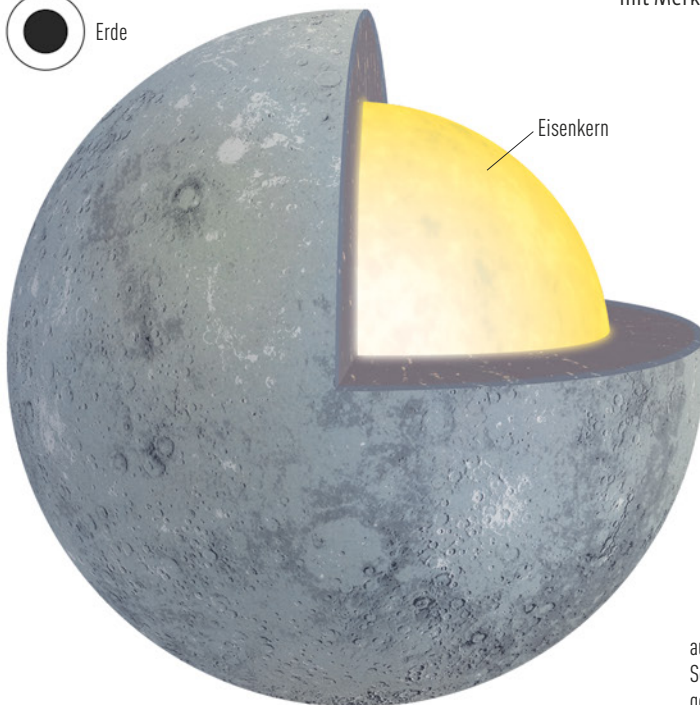
Merkur besitzt wie die Erde einen Eisenkern. Während der Erdkern aber nur 17 Prozent des Gesamtvolumens unseres Planeten ausmacht, sind es bei Merkur 55 Prozent – der Merkurkern ist also im Verhältnis viel größer. Man vermutet, dass in früherer Zeit ein Gesteins- oder Eiskörper mit Merkur kollidiert ist, wodurch seine äußeren Schichten in den Weltraum abgesprengt wurden.

Einschläge auf Merkur sind tendenziell heftiger als auf der Erde, nicht nur weil es keine Atmosphäre gibt, die die Planetenoberfläche schützt, sondern auch, weil sich Merkur durch seine Sonnennähe deutlich schneller bewegt. Kollisionen erfolgen deshalb häufig mit höheren Geschwindigkeiten.



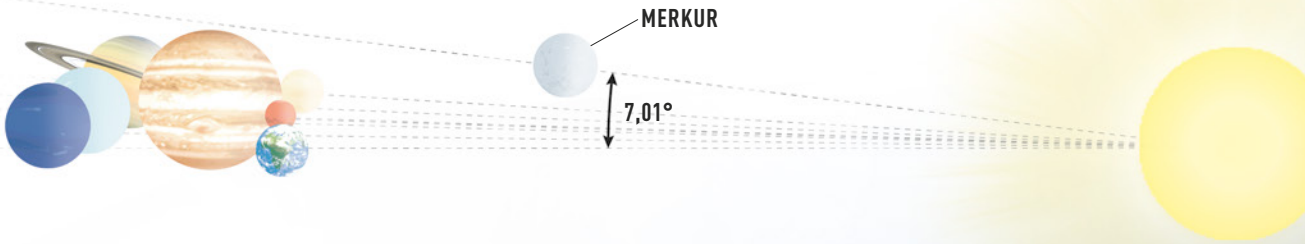
VERGLEICH DER KERNGRÖSSEN

18



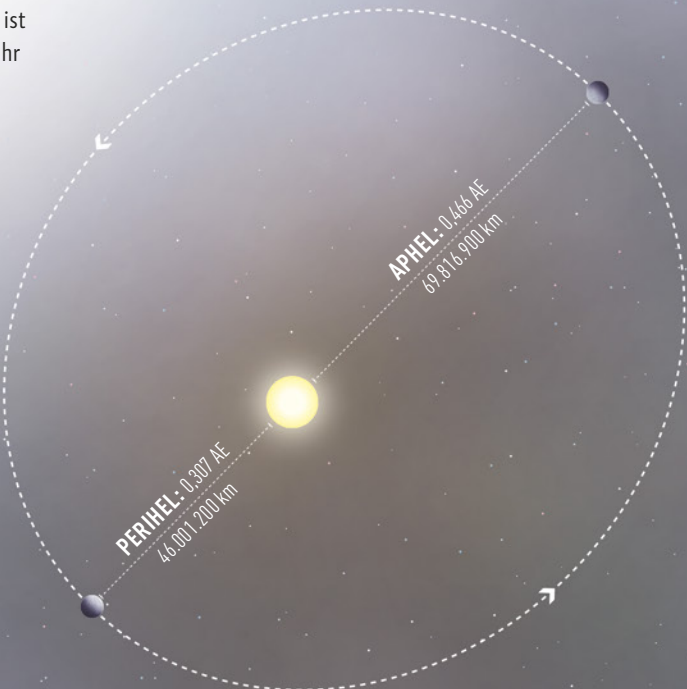
GENEIGTE BAHN

Die Umlaufbahn von Merkur ist die von allen Planeten am stärksten geneigte. Nur kleinere Körper wie der Zwergplanet Pluto und andere Objekte im Kuiper- und Asteroidengürtel laufen auf noch „schieferen“ Bahnen.



ELLIPTISCHER ORBIT

Abgesehen von den kurzen Jahren und den außergewöhnlich langen Tagen unterscheidet sich die Merkurbahn noch in einer weiteren Hinsicht von denjenigen der restlichen Planeten: Merkur hat die am stärksten elliptische (und damit die exzentrischste) Umlaufbahn. Das bedeutet, dass seine Bahn am wenigsten kreisförmig ist. Bei einer perfekt kreisförmigen Bahn ist die sogenannte Exzentrizität null, während sie bei sehr langgestreckten, schmalen Bahnen gegen eins geht. Merkurs Exzentrizität liegt bei 0,21, wodurch die Differenz zwischen seinem Perihel (dem kleinsten Sonnenabstand) und seinem Aphel (der größten Sonnendistanz) beträchtlich ist.



Venus

Die Venus ist der zweite Planet von der Sonne aus, sie ist unsere innere Nachbarin. Nach Sonne und Mond strahlt sie als dritthellstes Objekt am Himmel und ist häufig kurz vor Sonnenaufgang oder kurz nach Sonnenuntergang sichtbar. Vor der typischen Kulisse eines rot gefärbten Himmels assoziierte man das strahlend weiße Leuchten des Planeten in früheren Zeiten mit Schönheit – Venus trägt daher den Namen der römischen Göttin der Liebe und Schönheit. Doch der Schein kann trügen.

Der Glanz der Venus ist nämlich nur oberflächlich, hervorgerufen durch eine dicke Wolkenschicht, die einen Großteil des Sonnenlichts reflektiert. Wie wir sehen werden, täuscht die äußere Erscheinung des Planeten; unter ihrer Maske ist Venus ein höllischer Ort.

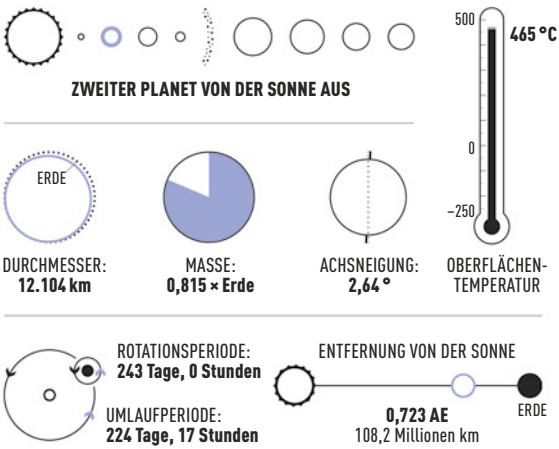
Die Venuswolken bestehen nicht aus Wasser, sondern aus Schwefelsäure, die die dämmerige Welt darunter in ein schwaches gelbliches Licht tauchen. Jegliche Sonnenstrahlung, die es durch die Wolken hindurch schafft, bleibt in der dichten Atmosphäre gefangen. Hohe Konzentrationen von CO₂ in der Venusluft erzeugen den stärksten Treibhauseffekt im ganzen Sonnensystem. Obwohl sie fast doppelt so weit von der Sonne entfernt ist wie Merkur und damit nur ein Viertel seiner Sonneneinstrahlung erhält, sind die Oberflächentemperaturen auf der Venus höher. Die unfassbare Hitze in der unteren Atmosphäre führt dazu, dass der saure Regen aus den Wolken vollständig verdampft, bevor er die Oberfläche erreicht.

Die detailreichsten Informationen über die Venusoberfläche hat uns das sowjetische Raumfahrtprogramm Venera beschert. Im Rahmen dieser Missionen gelang 1970 die erste Landung einer Raumsonde auf der Venus und damit die erste Landung auf der Oberfläche eines anderen Planeten überhaupt. Insgesamt zehn Venera-Sonden setzten erfolgreich auf der Venus auf; jede von ihnen wurde beim Fallschirmflug durch die obere Atmosphäre durch Orkane mit Windge-

schwindigkeiten von 300 Stundenkilometern schwer gebeutelt. Die Sonden gingen auf rissigen Platten schwarzen Vulkangesteins nieder und funktionierten in der feindlichen Umgebung nur maximal zwei Stunden, in denen sie ihre Daten zur Erde funkten. Die Venusatmosphäre ist nahe der Oberfläche durch den enormen Luftdruck sehr dicht; fast wie eine Flüssigkeit schleift sie Gestein und Staub mit sich. Durch diese dicke „Luft“ konnten die Sonden im schwachen Umgebungslicht nur wenige Kilometer weit sehen, Radarabstastungen enthüllten später weit mehr Informationen über die großflächige Landschaft.

Rund drei Viertel des Planeten sind mit vulkanischen Formationen bedeckt, zum Beispiel mit glatten, erstarrten Lavaebenen und Tausenden Vulkanen, von denen über 100 an ihrer Basis mehr als 100 Kilometer Durchmesser haben. Sehr wahrscheinlich ist die Venus immer noch vulkanisch aktiv, worauf das Schwefelvorkommen in der Atmosphäre und die sichtbaren Vulkankrater hinweisen. Die meisten Einschlagkrater auf der Venus sind in einem gut erhaltenen Zustand, woraus wir schließen können, dass die Oberfläche des Planeten vermutlich in jüngerer Zeit „erneuert“ wurde und ältere, stärker verwitterte Krater durch vulkanische Asche und Lava verschüttet wurden. Abgesehen von den Vulkanen, der Hitze, dem immensen Druck, den heftigen Stürmen, der giftigen Luft und Wolken aus Säure gibt es vermutlich noch Blitze und Donner – als Zugabe sozusagen.

Möglicherweise war die Venusatmosphäre der irdischen einst sehr ähnlich und es gab reichlich flüssiges Wasser auf der Oberfläche. Der zusätzliche Wasserdampf in der Luft verstärkte jedoch den Treibhauseffekt, bis schließlich ein kritischer Punkt überschritten war: Die Temperatur nahm immer schneller zu, wodurch weiteres Wasser verdampfte – die globale Erwärmung hatte sich verselbstständigt.



VERBORGENE GEFAHREN

Unter ihrem schönen Wolkenschleier versteckt die Venus ihre alptraumartige Natur. Hier sind einige Bedrohungen aufgelistet, die der Planet birgt.

22



BLITZE



VULKANE



HOHE TEMPERATUR

Mit einer durchschnittlichen Oberflächentemperatur von 465 °C ist Venus der heißeste Planet im Sonnensystem.



ROLLENDE STEINE

Winde in Oberflächennähe fegen Staub durch die Gegend und lassen Steine über den Boden rollen.



GIFTIGE WOLKEN

aus Schwefelsäure



GIFTIGE ATMOSPHÄRE

96,5 % Kohlendioxid, die restlichen 3,5 % zum größten Teil Stickstoff



HOHER DRUCK

Der Atmosphärendruck auf der Planetenoberfläche ist 92-mal so hoch wie der auf der Erde. Er entspricht einem Druck in 900 Metern Meerestiefe.

Grand Canyon,
Erde 446 km

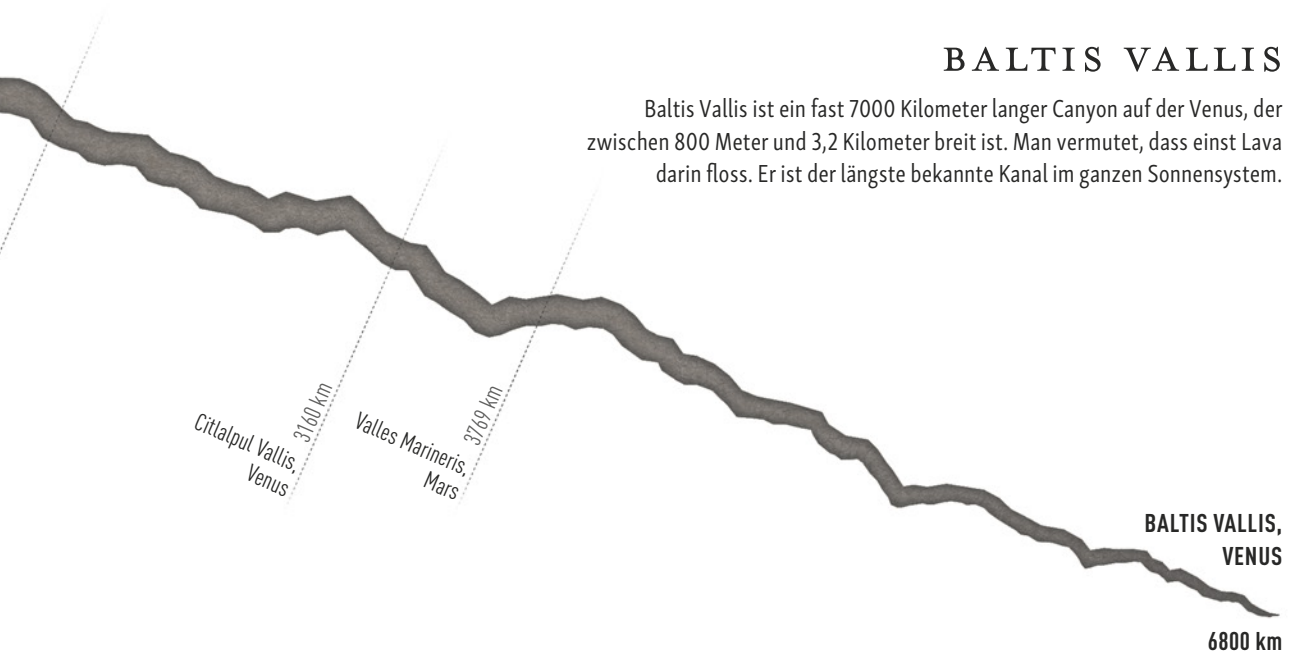
Galunlati Chasmata,
Rhea (Saturnmond) 740 km

Ithaca Chasma,
Tethys (Saturnmond) 1219 km

Ares Valles,
Mars 1758 km

BALTIS VALLIS

Baltis Vallis ist ein fast 7000 Kilometer langer Canyon auf der Venus, der zwischen 800 Meter und 3,2 Kilometer breit ist. Man vermutet, dass einst Lava darin floss. Er ist der längste bekannte Kanal im ganzen Sonnensystem.



ALBEDO

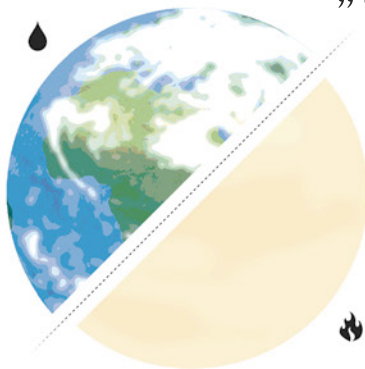
Die *Albedo* eines Planeten ist ein Maß dafür, wie viel Licht er reflektiert. Ein schwarzer Körper, der nichts reflektiert, hat eine Albedo von null; ein Objekt dagegen, das alles zurückwirft, hat eine Albedo von eins. Die Nähe der Venus zur Sonne und zur Erde sowie ihre hohe Albedo führen dazu, dass sie uns als hellster Planet erscheint.

23



„SCHWESTERPLANET“ DER ERDE

Wegen ihrer ähnlichen Größe, Masse und Position innerhalb des Sonnensystems wird die Venus häufig als Schwesterplanet der Erde bezeichnet. Wie wir jedoch gesehen haben, enden die Ähnlichkeiten damit bereits.



Erde

24

