

# Das Sonnensystem

## Planeten, Trümmer und Staub

### Inhalt

Überblick	1
Einführung	1
Sonne und Planeten	2
Terrestrische Planeten	2
Gasriesen	4
Felsen, Eis und Staub	7
schmutzige Schneebälle	8
Die Entstehung des Sonnensystems	9
Literatur	10
Websites	10

### Überblick

Das Sonnensystem enthält nicht nur neun Planeten, unzählige Felsbrocken und Kometen, es enthält auch Gas, Staub, Magnetfelder und darin eingeschlossene elektrisch geladene Teilchen. Das Sonnensystem ist also in sich bereits äußerst vielfältig. Die Planeten lassen sich nach ihrer Größe und Zusammensetzung in zwei Gruppen einteilen und auch die Felsbrocken, die Planetoiden, weisen mehrere Untergruppen mit unterschiedlicher Zusammensetzung auf. All diese Objekte liefern Hinweise auf die Entstehung des Sonnensystems und die turbulenten Zeiträume und Prozesse, die direkt auf diese Phase folgten. Daraus lassen sich Modelle ableiten, die andere gerade entstehende Sonnensysteme beschreiben. Die Entdeckung solcher Sterne, die den Modellvorhersagen entsprechen, wirft die Frage auf, ob es noch mehr Sonnensysteme wie unseres gibt, und ob weitere erdähnliche Planeten existieren.

### EINFÜHRUNG

Das Sonnensystem, unsere kosmische Heimat, besteht neben der im Zentrum strahlenden Sonne aus den neun Planeten, zwei Planetoidengürtel, einer Kometenwolke, Unmengen von Staub sowie geladenen Teilchen. Es enthält zudem Magnetfelder, von denen das solare Magnetfeld dominiert und bis in eine Entfernung von etwa 15 Milliarden Kilometern reicht. Durch die elektrisch geladenen Teilchen wird es noch weiter nach außen transportiert, bis es schließlich auf das interstellare Magnetfeld trifft. Die Magnetfelder der Planeten sind deutlich schwächer. Nur Jupiter, der größte Planet unseres Sonnensystems, besitzt ein Magnetfeld, das bisweilen sogar den zweitgrößten Planeten Saturn umhüllt.

Die Eigenschaften der Planeten wurden von der Erde aus, besonders aber durch Raumsonden gemessen. Die kleineren Objekte, die Planetoiden und Kometen, wurden dagegen bislang nur selten im Detail untersucht. Nach heutiger Vorstellung sind sie jedoch direkte Zeitzeugen der Entstehung des Sonnensystems und könnten so einige Aufschlüsse über diese Zeitspanne liefern. Sie befinden sich heute noch an der Außengrenze des Sonnensystems, die sich fast ein Lichtjahr weit in den Weltraum hinaus erstrecken soll.

Ein Blick in die kosmische Umgebung des Sonnensystems zeigt unzählige Sterne, die der Sonne ähneln. Dies warf schon früh die Frage auf, ob das Sonnensystem eine einzigartige Erscheinung im Weltall ist. Da dieser Gedanke den kosmologischen Vorstellungen widerspricht (nach denen es keine herausgehobenen Orte im Universum gibt), erwartet man im Weltraum eine große Zahl anderer Sonnensysteme. Deren Beobachtung stößt jedoch aufgrund der hohen Helligkeitsunterschiede zwischen Sternen und Planeten auf erhebliche Schwierigkeiten. Selbst Riesenplaneten wie Jupiter ständen so eng neben ihren Sternen, dass sie von ihnen überstrahlt würden. Zudem wären sie viele Milliarden mal schwächer als die Sterne, die sie umkreisen. Die Entdeckung neuer Planeten um andere Sterne war daher nur durch indirekte Methoden möglich.

## SONNE UND PLANETEN

Die Sonne ist das dominierende Mitglied unseres Sonnensystems. Sie enthält 99,85 Prozent der gesamten Masse und ist der einzige Körper, der Energie – und Licht – durch Kernprozesse im Inneren erzeugt. Alle anderen Mitglieder des Sonnensystems reflektieren nur das Licht, das sie von der Sonne empfangen. Aufgrund ihrer hohen Masse kreisen alle anderen Mitglieder des Sonnensystems um die Sonne, wobei die Umlaufbahnen jedoch mehr oder weniger von der Kreisform abweichen. Am deutlichsten wird diese Abweichung beim innersten Planeten Merkur und beim äußersten Planeten Pluto.

Aufgrund ihres Aufbaus kann man die Mitglieder des Sonnensystems in drei Gruppen unterteilen: Die terrestrischen Planeten, die Gasplaneten sowie kleine heterogen aufgebaute Objekte. Eine Sonderstellung nehmen dabei die Kometen ein, die man oft als »schmutzige Schneebälle« bezeichnet.

Alle Mitglieder des Planetensystems befinden sich in vergleichsweise naher Umgebung der Sonne. Kein Planet ist weiter entfernt als das fünfzigfache der Erdumlaufbahn. Lediglich die Mitglieder des zweiten Planetoidengürtels liegen außerhalb dieser Region, dürften sich aber noch innerhalb des solaren Magnetfelds befinden. Noch weiter draußen sollten nur noch Kometen zu finden sein – aber trotz gegenteiliger Aussagen der Theoretiker und Beobachter reißt die Diskussion um einen zehnten Planeten nicht ab.

### Terrestrische Planeten

Die terrestrischen Planeten befinden sich in relativer Nähe zur Sonne. Sie bestehen aus Gesteinen mit relativ hoher Dichte, zwischen etwa 4 und 5,5 Gramm pro Kubikzentimeter. Ihre Durchmesser variieren zwischen 5000 und 13000 Kilometer. Anzeichen von Vulkanismus deuten darauf hin, dass einige dieser Planeten im Inneren einen geschmolzenen Kern besitzen. Die meisten besitzen eine Atmosphäre, von denen jedoch nur diejenige von Venus und Erde eine hohe Dichte aufweisen.

### Merkur

Merkur ist der innerste Planet des Sonnensystems. Er ist mit etwa 5000 Kilometer größer als der Erdmond, aber kleiner als der Jupitermond Ganymed. Merkurs hohe Dichte deutet darauf hin, dass sein inneres überwiegend aus Eisen besteht. Die Bilder von Mariner 10, der einzigen Raumsonde, die Merkur bislang einen Besuch abstattete, zeigen eine vollständig verkraterte Oberfläche, aber keine Anzeichen für Vulkanismus. Dies bedeutet, dass Merkur kein glutflüssiges sondern ein überwiegend starres Inneres besitzt. Auch sein schwaches Magnetfeld legt diesen Schluß nahe.

...

hält. Nur dadurch ist offenes Wasser auf der Erde möglich. Ein Verständnis des Klimageschehens wird aber erschwert durch die Anwesenheit der Eiskappen sowie die Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und den Ozeanen. Die Eiskappen werfen nämlich einen Teil des Sonnenlichts in den Weltraum zurück, während die Ozeane gleichzeitig als Wärme- wie als Kohlendioxidspeicher dienen. Man schätzt, dass die Gesamtmenge dieses Gases bei Venus und Erde etwa gleich groß ist. Wäre es im Lauf der Erdgeschichte aber nicht in den Ozeanen gebunden worden, könnten auf der Erde ähnliche Bedingungen herrschen wie auf der Venus.

Durch das Vorkommen freien Wassers und durch die Entwicklung von Leben ist die Erde im Sonnensystem einzigartig. Es gibt kein anderes Mitglied der Planetenfamilie, auf dem offenes Wasser sicher bekannt ist. Allerdings vermutet man unter der Eisdecke des Jupitermonds Europa einen Ozean, in dem ähnliche Bedingungen herrschen könnten, wie in den urzeitlichen Ozeanen der jungen Erde.

#### Mars

Auch vom Mars, dem vierten Planeten, ist bekannt, dass es in seiner Geschichte eine Periode offenen Wassers gegeben haben muss, denn sowohl durch Satellitenaufnahmen, wie auch durch Messungen auf der Marsoberfläche sind Regionen bekannt, die sehr wahrscheinlich von Wasser geformt wurden. Heute ist der Mars jedoch trocken. Möglicherweise sind größere Wassermengen in Form von Eiskristallen im Marsboden gebunden. Sie könnten beispielsweise durch Einschläge großer Meteorite und das damit verbundene Aufschmelzen von Gestein freigesetzt werden, und dann zu großen Strömen anschwellen.

Die auf der Marsoberfläche sichtbaren Einschlagkrater zeigen, dass der Mars geologisch nicht mehr sonderlich aktiv ist, obwohl Lavaströme noch vor einigen Jahrmillionen einen Teil der Oberfläche umgestaltet haben. Der Mars besitzt heute eine äußerst dünne Atmosphäre, in der offenes Wasser sofort verdampfen würde. Er ist zudem so kalt, dass sich an den Polkappen überwiegend Trockeneis (gefrorenes Kohlendioxid) niederschlägt. Mars wird von zwei Monden begleitet, die jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit eingefangene Planetoiden sind.

#### Gasriesen

Im Gegensatz zu den terrestrischen Planeten bestehen die Gasplaneten überwiegend aus Wasserstoff und Helium und haben Durchmesser zwischen etwa 50 000 und 120 000 Kilometer. Sie befinden sich im äußeren Bereich des Planetensystems und werden durch den Planetoidengürtel von den terrestrischen Planeten getrennt. Die Gasriesen selbst können wieder in zwei Gruppen untergliedert werden, in denen möglicherweise unterschiedliche Bildungsprozesse wirksam waren: die großen Gasriesen, Jupiter und Saturn, sowie die kleinen Gasriesen, Uranus und Neptun.

#### Jupiter

Der mit Abstand größte Planet des Sonnensystems ist Jupiter. Er hat den elffachen Erddurchmesser und besitzt immerhin ein Tausendstel der Sonnenmasse. Bereits mit kleinen Teleskopen sind die äquatornahen Wolkenbänder sichtbar. Jupiter besitzt mehrere übereinander liegende Wolken-schichten, wobei Druck und Temperatur nach unten allmählich zunehmen. Der Planet besitzt nur einen vergleichsweise kleinen zentralen Gesteinskern. Er besteht zum größten Teil aus Gas. Tief im Planeteninneren herrschen durch die darüber lastende Atmosphäre hohe Dichte und hohe Temperaturen. Sie führen dazu, dass das Gas einen metallischen Zustand einnimmt. Es ist extrem hoch komprimiert und elektrisch leitend. Dies ermöglicht Dynamoprozesse, die das starke Mag-

...

## Pluto

Der bekannteste Vertreter dieser Gruppe von Himmelskörpern ist der neunte und letzte Planet Pluto. Nach seiner Entdeckung zeigte sich, dass Pluto ein sehr kleiner Planet ist, der aber dennoch viel Licht reflektiert. Pluto besitzt einen Durchmesser von etwa 2000 Kilometern und ist damit kleiner als der Erdmond. Seine Oberfläche ist wahrscheinlich mit Eis, Kohlendioxid und Methan bedeckt.

Pluto besitzt die exzentrischste Umlaufbahn aller Planeten. Ihr sonnennächster Punkt liegt noch innerhalb der Neptunbahn (bei etwa 30 AU), der sonnenfernste Punkt liegt jedoch fast 50 astronomische Einheiten von der Sonne entfernt. Die Bahn ist zudem 17 Grad gegen die Bahnebene der Erde geneigt, mehr als fünfmal so stark wie die Bahnen der übrigen Planeten (mit Ausnahme Merkurs, dessen Bahnneigung 7 Grad beträgt). Daher vermutete man lange, dass Pluto ein ehemaliger Mond des Neptun sein könnte, der durch den Einfang von Triton aus seiner Bahn geworfen wurde. Heute ist jedoch sicher, dass Pluto weit draußen im Sonnensystem entstand, denn mittlerweile kennt man etwa hundert Himmelskörper, einige davon mit 800 Kilometern Durchmesser nicht viel kleiner als Pluto, die ähnlich ungewöhnliche Umlaufbahnen aufweisen: Es sind die Mitglieder des Kuiper-Gürtels.

1978 wurde Charon, der Mond des Pluto entdeckt. Dadurch konnten viele der früheren Mutmaßungen über Pluto aus der Welt geschafft werden. Die Beobachtungen der beiden Himmelskörper ermöglichten die Messung ihrer Massen und Durchmesser, aus denen sich wiederum die geringen Dichten ableiten ließen. Dabei wurde auch deutlich, dass Plutos Rotationsachse ähnlich wie Uranus um 94 Grad gegen die Umlaufbahn geneigt ist, er also ebenfalls auf der Bahn entlang rollt.

## Kuiper-Gürtel

Lange Zeit galt Pluto als das letzte Mitglied des Sonnensystems. Außerhalb der Plutobahn sollten nur noch die Kometen zu finden sein. Dies änderte sich, als man 1992 das erste von derzeit etwa hundert bekannten sogenannten Transneptunischen Objekten entdeckte. Eine Weile rätselte man, ob man einen Kometen auf einer ungewöhnlichen Bahn entdeckt hatte. Die Entdeckung weiterer Himmelskörper im Bereich außerhalb der Neptunbahn zeigte jedoch, dass man den, bislang nur aufgrund theoretischer Überlegungen vermuteten, Kuiper-Gürtel entdeckt hatte.

Es handelt sich um einen Planetoidengürtel, der aus Trümmerobjekten besteht, die sich bei der Entstehung des Sonnensystems bildeten. Im Gegensatz zu den Mitgliedern des inneren Planetoidengürtels, der sich zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter befindet, bestehen die Mitglieder des Kuiper-Gürtels wie Pluto überwiegend aus einem Gemisch von Gestein und Eis. Obwohl sie dadurch relativ viel Licht reflektieren, sind sie aufgrund ihrer geringen Größe und großen Entfernung nicht einfach zu entdecken. Die bis heute bekannten Objekte dürften mit Durchmessern von bis zu 800 Kilometern zu den größeren Mitgliedern dieses Gürtels gehören und man vermutet, dass der Kuiper-Gürtel in seinem Außenrand nahtlos in die Oortsche Wolke übergeht, der vermutete Ursprung aller Kometen.

## Der innere Planetoidengürtel

Einen weitgehend anderen Aufbau weisen die Mitglieder des klassischen Planetoidengürtels auf. Sie bestehen aus Gestein und können aufgrund ihrer Zusammensetzung und Albedo in verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Im Wesentlichen unterscheidet man dabei Planetoiden mit hoher Dichte und solchen, mit geringer Dichte. Hervorgerufen wird dieser Unterschied vermutlich durch einen höheren Anteil von Eisen und Nickel in der ersten Gruppe, während die zweite Gruppe überwiegend aus silikathaltigem Material besteht.

Die Unterschiede wurden früher als Anzeichen gedeutet, dass im Bereich des Planetoidengürtels ein etwa erdgroßer Planet existierte, der durch eine kosmische Katastrophe auseinandergerissen wurde. Heute herrscht jedoch die Auffassung, dass diese Objekte bereits bei der Entstehung des Sonnensystems entstanden, sich jedoch aufgrund der Anziehungskraft des Jupiter nie zu einem Planeten zusammenlagern konnten.

Der Planetoidengürtel ist ein relativ weit ausgedehntes Gebilde, das sich in einem Bereich von etwa zwei bis vier Astronomischen Einheiten erstreckt. Nahaufnahmen verschiedener Raumsonden zeigen überwiegend längliche und elliptische Körper, die von Kratern unterschiedlicher Größe bedeckt sind. Sie zeigten auch, dass sogar Planetoiden von Monden umkreist werden können: Der etwa 50 Kilometer lange Planetoid Ida besitzt beispielsweise einen beinahe kugelförmigen Begleiter von etwa 2 Kilometer Durchmesser, der auf den Namen Dactyl getauft wurde.

### Schmutzige Schneebälle

Von ihrer Zusammensetzung her mit den Mitgliedern des Kuiper-Gürtel verwandt, sind die Kometen. Sie bestehen jedoch überwiegend aus Eis, in das Staub und kleinere Gesteinsbrocken eingelagert sind. Die meisten Kometen vermutet man in einem ausgedehnten Bereich, der Oort'schen Wolke, dessen Innenradius möglicherweise mit dem Kuiper-Gürtel überlappt und dessen Außenrand sich in etwa 100 000 AU von der Sonne befindet. Dort sollen einige Millionen Kometen schlummern, die von Zeit zu Zeit durch Störungen aus ihrer Bahn geworfen und in Richtung Sonne beschleunigt werden.

Nähert sich ein Komet der Sonne, heizt sich das Eis auf und kann verdunsten. Es bildet sich daher zunächst die Koma, eine weite Gaswolke, die um den eigentlichen Kern liegt. Der Kern selbst besitzt Durchmesser von etwa einem bis zu mehreren Kilometern und ist wahrscheinlich unregelmäßig geformt. Nähert sich der Komet der Sonne noch mehr, reicht der Sonnenwind aus, um die Gas- und Staubteilchen aus der Koma zu entfernen und es entwickeln sich ein Gas- und ein Staubschweif, die den Kometen ihr charakteristisches Aussehen verleihen.

Der Flug durch das Sonnensystem ist für einen Kometen nicht ohne Risiko. Bei zu großer Annäherung an einen Planeten können sie zerbrechen und sogar auf dem Planeten aufschlagen. Zuletzt wurde dies 1994 beim Kometen Shoemaker-Levy 9 beobachtet, der auf dem Planeten Jupiter niederging und mehrere Monate lang sichtbare Störungen in der Atmosphäre des Planeten hinterließ. Die Sonden SOHO beobachtete wiederum andere Kometen, die in der Atmosphäre der Sonne verdampften.

Die meisten Kometen scheinen diesem Schicksal jedoch zu entgehen. Nach einigen hundert Sonnenumläufen ist ihr Gehalt an leichtflüchtigen Gasen verbraucht. Sie umkreisen dann weiterhin die Sonne, entwickeln jedoch keine Schweife mehr und sind daher von Planetoiden praktisch nicht zu unterscheiden. Während ihrer Zeit als Kometen (mit Schweif) verloren sie ständig Staubkörner und kleinere Gesteinsbrocken, die sich entlang ihrer Bahn verteilten. Kreuzt die Erde eine solche Bahn, treten mehr Trümmerreste als sonst in die Atmosphäre ein. Sie rufen die periodisch wiederkehrenden Meteorschauer hervor.

## DIE ENTSTEHUNG DES SONNENSYSTEMS

Das Sonnensystem entstand vor etwa fünf Milliarden Jahren aus einer Gas- und Staubwolke. Sie besaß vermutlich eine Masse von zwei oder mehr Sonnenmassen und enthielt eine zentrale Verdichtung, aus der sich die Sonne bildete. Die noch junge Sonne war von den Überresten dieser kosmischen Wolke umgeben, in der nun eine Reihe unterschiedlicher Prozesse abgelaufen sein

müssen. So lagerten sich Atome zu Molekülen zusammen, die durch die Sonnenstrahlung wieder aufgespalten wurden. Man vermutet, dass sich jedoch ein gewisser Anteil der Moleküle an Staubkörnern anlagerte, die so allmählich immer mehr anwuchsen. Auch dabei treten physikalische und chemische Prozesse auf, die zu einer Zerstörung der Teilchen führen können. Insgesamt muss der Anteil der Wachstumsprozesse den der Vernichtungsprozesse jedoch überwogen haben, denn sonst gäbe es keine Planeten.

Auch die Staubkörner lagerten sich schließlich zusammen. In astronomischen Zeitmaßstäben lief der Prozess recht schnell ab, denn schon nach einigen Jahrmillionen waren etliche Staubkörner zu Felsen von einigen Kilometer Dicke gewachsen. Ein Teil von ihnen kollidierte und lagerte sich zu noch größeren Körpern zusammen, die allmählich durch ihre größere Anziehungskraft weitere Felsen anzogen. Diese so genannten Planetesimale bildeten die Keimzellen aller Planeten und Planetoiden.

Zur gleichen Zeit muss die Sonnenstrahlung dafür gesorgt haben, dass im Bereich des inneren Planetensystems nur noch geringe Gasmengen vorhanden waren, während im äußeren Planetensystem noch Gas im Überfluss existierte. Dies bewirkte vermutlich die heute beobachtbare Trennung in terrestrische Planeten und Gasriesen. Die Kerne der Gasplaneten sammelten allmählich immer mehr Gas aus ihrer Umgebung an und fegten so den Bereich ihrer Umlaufbahnen frei. Die Sonnenstrahlung konnte so immer weitere Bereiche des Sonnensystems erreichen, und dadurch auch die letzten Gasreste der ursprünglichen Wolke entfernen.

Aufgrund der Gravitationskraft der Gasriesen und der großen Abstände im äußeren Sonnensystem konnten sich weit draußen die Planetesimale nicht mehr zu Planeten zusammenlagern. Sie bildeten die überwiegend aus Felsen und Eis bestehenden Körper des Kuiper-Gürtels und die Kometen, während die Planetoiden zwischen Mars und Jupiter durch die störende Gravitationskraft von Jupiter an der Zusammenlagerung zu einem Planeten gehindert wurden.

Das Innere der Planeten heizte sich durch die wachsende Masse so sehr auf, dass es schmolz. Dabei liefen verschiedene chemische und physikalische Prozesse ab, welche die Zusammensetzung des Gesteins veränderte. Planetoiden und Kometen blieben dagegen weitgehend unverändert. In ihnen sollte daher die ursprüngliche chemische Zusammensetzung der solaren Urwolke konserviert sein. Mit Hilfe von Raumsonden sollen direkte Messungen an diesen Himmelskörpern die Zusammensetzung der Wolke aufklären und so den Vergleich mit heutigen Gas- und Staubwolken um andere Sterne ermöglichen.

Nachdem die Planeten sich gebildet hatten, existierten immer noch weitaus mehr Planetesimale, als es der heutigen Zahl von Planetoiden entspricht. In einer langanhaltenden »Epoche der Einschläge«, die vor etwa 4,5 Milliarden Jahren stattfand, »regneten« diese Trümmer auf die Planeten nieder und bewirkten eine vollständige Aufschmelzung des Gesteins. In den geschmolzenen Planeten konnten die schwereren chemischen Elemente (vor allem Eisen und Nickel) in das Innere absinken und die planetaren Kerne bilden, während die leichteren Elemente (wie Silizium und Sauerstoff) an die Oberfläche stiegen. Ein ähnlicher Zusammenstoß zwischen der Erde und einem anderen großen Körper, dessen Durchmesser zwischen denen von Mars und Merkur gelegen haben dürfte, führte vermutlich zur Bildung des Doppelplaneten Erde-Mond.

...