Planeten

Allgemeine Eigenschaften

Grundlagen aus dem ersten Semester:
03-Unser Sonnensystem (Seite 3 - 13)

Die 8 Planeten unseres Sonnensystems sind alle weniger als 40AU von uns entfernt. Bei allen 8 Planeten haben wir bereits Raumsonden vorbeigeschickt. Dementsprechend gut kennen wir die Eigenschaften dieser Planeten.

Die Exoplaneten in anderen Sternsystemen sind alle mehr als 1 Parsec von uns entfernt, das ist mehr als 5000-fach so weit.

Dementsprechend kennen wir viele der Eigenschaften nur von den Planeten unseres Sonnensystems. Die Begründung dieser Eigenschaften hilft dabei abzuschätzen, wie häufig diese Eigenschaften bei anderen Planeten außerhalb unseres Sonnensystems ist.

1 Aufbau unseres Sonnensystems

Bei unserem Sonnensystem handelt es sich um ein voll ausgefülltes leicht chaotisches Sonnensystem.

Chaotisch deshalb, weil sich die Abstände zwischen den Planetenbahnen im Laufe der Entwicklung geändert haben, nur leicht chaotisch weil sich die Bahnen nicht vertauscht haben. Ohne äußere gravitative Einflüsse würde das auch so bleiben.

Voll ausgefüllt ist es deshalb, weil kein weiterer Planet innerhalb der Neptunbahn Platz hätte: Jeder Planet der in unser Sonnensystem hineinfliegt, würde durch seine Gravitation mindestens einen anderen Planeten aus dem Sonnensystem hinauskatapultieren oder in die Sonne hineinstürzen lassen.

Wie wahrscheinlich so ein leicht chaotisches Sonnensystem ist, wissen wir nicht. Es gibt die Theorie, dass der Jupiter durch seine Gravitation für die Ordnung im Sonnensystem verantwortlich ist. Auch ein Zusammenhang mit der Titius-Bode-Reihe wird diesbezüglich vermutet. Bewiesen ist in diesem Zusammenhang nur, dass er den Asteroidengürtel durch seine Resonanzen in mehrere Ringe unterteilt hat.

2 Planetenarten

In unserem Sonnensystem unterscheidet man zwischen zwei Arten von Planeten: Gasplaneten und Gesteinsplaneten. Die vier Gasplaneten und die vier Gesteinsplaneten ähneln einander in vielen Eigenschaften. Die Begründung für diese Eigenschaften werden im folgenden beschrieben.

Lage und Größe

In unserem Sonnensystem ist auffällig, dass sich in der Nähe der Sonne ausschließlich kleine Gesteinsplaneten und weit von der Sonne entfernt ausschließlich große Gasplaneten befinden.

Das liegt daran, dass in einer großen Entfernung vom Stern, alle Objekte die mehr als ein hundertstel der Erdmasse wiegen, das Gas aus der protoplanetaren Scheibe ansaugen können. Da sich in der Scheibe besonders viel Gas befindet, nehmen sie dadurch viel stärker an Masse zu und können dadurch auch mehr festes und flüssiges Material anziehen. Nur Zwergplaneten und Monde können aufgrund der geringen Masse wenig bis gar kein Gas halten und werden nicht zu Gasriesen.

In Sonnennähe sind die Sonnenwinde so stark, dass sie die Atmosphäre der Planeten laufend abtragen. Dadurch können auch größere Planeten kaum Gas halten und die Masse nimmt nur langsam zu.

Bevor man die ersten Exoplaneten beobachtet hat, vermutete man daher, dass alle Sternsysteme so aufgebaut sind, dass sich in der Nähe des Sterns nur kleine Gesteinsplaneten und in großer Entfernung nur riesige Gasplaneten befinden. Man entdeckte jedoch bereits Gasriesen in der Nähe des Sterns, Gaszwerge und riesige Gesteinsplaneten. Gesteinsplaneten die weit von ihrem Stern entfernt sind, sind mit der derzeitigen Technik noch nicht messbar.

Als möglichen Grund vermutet man die Wanderung der Planeten innerhalb der Sternsysteme. Stabile und leicht chaotische Sternsysteme müssten jedoch so wie unser Sonnensystem aufgebaut sein.

Monde und Ringe

In unserem Sonnensystem haben die Gesteinsplaneten nur wenige bis gar keine Monde und auch Ringe kommen nur selten und vorübergehend vor. Die Gasriesen hingegen besitzen alle eine Vielzahl von Monden und Ringen.

Gasplaneten haben eine größere Masse und dadurch auch eine höhere Gravitation, die mehr Gesteinsbrocken anzieht. Außerhalb der Rochegrenze ist die Gravitation der Teilchen untereinander größer als die Gravitation des Gasriesen und sie bilden einen Mond. Innerhalb der Rochegrenze hält die Gravitation des Gasriesen die Teilchen auf fixen Bahnen und sie können sich nicht zu einem Mond verbinden. Es bleibt dauerhaft ein Ring erhalten.

Gesteinsplaneten ziehen viel weniger Masse an und können daher nur wenige und kleine Monde bilden. Große Monde entstehen nur durch Kollission mit einem anderen Planeten, so wie das bei unserer Erde der Fall war. Solche Ereignisse kommen aber nur selten vor. Ringe können sich überhaupt nicht dauerhaft bilden, weil die Rochegrenze so nahe beim Planeten ist, dass die Gesteinsbrocken, die diese durchqueren abstürzen.

Dichte

Da die Gesteinsplaneten fast ausschließlich aus Gestein bestehen, sind sie zumindest in unserem Sonnensystem insgesamt vierfach so dicht wie die Gasplaneten.

Die einzelnen Komponenten (feste, flüssige und gasförmige Komponenten) werden jedoch bei den Gasplaneten aufgrund der hohen Gravitation viel dichter. Bei der Atmosphäre der Gasplaneten kann man die Dichte besonders gut erkennen: Sie wirkt mehr wie ein präsolarer Nebel.

Aufbau

Bei Gasplaneten befindet sich der feste Kern in der Mitte. Darüber befindet sich die flüssige Komponente und ganz außen die Gaskomponente. Das liegt daran, dass die festen Teile am schwersten sind und von der Gravitation am stärksten nach innen gezogen werden. Die leichten Gase werden am wenigsten stark nach innen gezogen. Außerdem ist der Druck innen am höchsten, sodass die Materialien erst bei viel höheren Temperaturen schmelzen und kondensieren.

Bei Gesteinsplaneten ist der Druck im Inneren geringer und die Temperatur ist durch die Sonnennähe höher. Dadurch kommt es vor, dass die ursprünglich festen Materialien im inneren des Planeten (hier ist es aufgrund des Treibhauseffekts besonders heiß) schmelzen. Die Oberfläche ist auf jeden Fall fest (etwaige Meere oder Atmosphären sind im Vergleich zum Gesamtradius vernachlässigbar dünn).

3 Hill-Radius

Der Hill-Radius ist der maximale Abstand den ein Mond von seinem Planeten haben kann. Verlässt der Mond den Hill-Radius, ist die Gravitation des Sterns stärker als die Gravitation des Planeten und der Mond würde um diesen kreisen.

Der Hill-Radius ist in unserem Sonnensystem stets von der Gravitation der Sonne und nie von jener des nächstinneren oder nächstäußeren Planeten beschränkt. Das heißt der Hillradius ist stets dort, wo die Gravitation des Planeten und die Gravitation des Sterns gleich groß sind.

Der Hillradius ist hier mit Absicht genau auf der Verbindungslinie zwischen Sonne und Planet eingezeichnet. Auf der gegenüberliegenden Seite des Planeten, wäre der Abstand zu dem Punkt, an dem sich die Gravitationskräfte ausgleichen, aufgrund der größeren Entfernung zum Stern etwas größer. Wenn sich der Mond dort befinden würde, würde er sich jedoch beim Fortsetzen der Drehbewegung aus dem Hillradius herausbewegen.

Um die Lage des Hillradius herzuleiten, kann man die Gravitationskraft des Sterns und die Gravitationskraft des Planeten vom Hillradius aus gleichsetzen.

$$\frac{GM}{(r-r_H)^2} = \frac{Gm}{r_H^2} \tag{3.1}$$

In dieser Formel steht M für die Masse des Sterns, m für die Masse des Planeten, r für den Abstand zwischen Stern und Planet und r_H für den Hillradius.

Um die Gleichung nach dem Hillradius umzuformen, multipliziert man die Klammer aus, kürzt die Gravitationskonstante und nimmt den Kehrwert

$$\frac{r^2 - 2rr_H + r_H^2}{M} = \frac{r_H^2}{m} \tag{3.2}$$

Um die Mitternachtsformel anwenden zu können, ordnen wir die Formel nach r_H^2, r_H und sonstigen Termen

$$(\frac{1}{M} - \frac{1}{m})r_H^2 - \frac{2r}{M}r_H + \frac{r^2}{M} = 0 \tag{3.3}$$

Einsetzen in die Mitternachtsformel ergibt

$$r_H = \frac{\frac{2r}{M} \pm \sqrt{\frac{4r^2}{M^2} - 4(\frac{1}{M} - \frac{1}{m})\frac{r^2}{M}}}{2(\frac{1}{M} - \frac{1}{m})} \tag{3.4}$$

Ausmultiplizieren der Klammern ergibt

$$r_H = \frac{\frac{2r}{M} \pm \sqrt{\frac{4r^2}{M^2} - \frac{4r^2}{M^2} + \frac{4r^2}{Mm}}}{\frac{2}{M} - \frac{2}{m}} \tag{3.5}$$

Die zwei ersten Terme in der Wurzel fallen weg. Um die Formel weiter zu vereinfachen, teilen wir den Bruchstrich und bringen die untere Subtraktion auf den gleichen Nenner

$$r_H = \frac{\frac{2r}{M}}{\frac{2m-2M}{mM}} \pm \frac{\sqrt{\frac{4r^2}{Mm}}}{\frac{2m-2M}{mM}} \tag{3.6}$$

Um den Doppelbruch wegzubekommen, kann man mit dem Kehrwert multiplizieren.

$$r_H = \frac{2r}{M}\frac{mM}{2m-2M} \pm \frac{2r}{\sqrt{mM}}\frac{mM}{2m-2M} \tag{3.7}$$

In dieser Formel wurde bereits teilweise die Wurzel gezogen. Im linken Term kürzt sich die 2 und die Sternmasse weg. Im rechten Term kürzt sich ebenfalls die 2 und man kann statt Mm $\sqrt{Mm}\sqrt{Mm}$ schreiben und so eine Wurzel wegkürzen

$$r_H = \frac{rm}{m-M} \pm \frac{r\sqrt{Mm}}{m-M} \tag{3.8}$$

Durch Zusammenlegung des Bruchstrichs erhält man

$$r_H = \frac{r(m \pm \sqrt{mM})}{m-M} \tag{3.9}$$

Da die Planetenmasse viel kleiner als die Sternmasse ist, können wir diese in den meisten Anwendungen vernachlässigen

$$r_H \sim \pm r\frac{\sqrt{mM}}{M} \tag{3.10}$$

Da ein negativer Radius nicht möglich ist, muss man nur die positive Lösung betrachten. Die Sternmasse kann man in die Wurzel ziehen und erhält dadurch

$$r_H \sim r\sqrt{\frac{mM}{M^2}} \tag{3.11}$$

Durch kürzen durch die Sternmasse erhält man die einfachste Formel für den Hillradius

$$r_H \sim r\sqrt{\frac{m}{M}} \tag{3.12}$$

Jetzt könnte man auf die Idee kommen, dass auch die Atmosphäre bis zum Hillradius geht, schließlich ist der Planet aus der protostellaren Scheibe entstanden, in der überall Gase waren und die Gase innerhalb des Hillradius sind an den Planeten gebunden. Das ist ein Trugschluss:

Bei Gesteinsplaneten wurde die so entstandene Atmosphäre schon im Anfangsstadium zur Gänze durch Sonnenwinde abgetragen. Die aktuelle Atmosphäre ist erst später durch Vulkanismus entstanden. Sie wird mit der barometrischen Höhenformel beschrieben, die im Skriptum über Gesteinsplaneten erklärt wird.

Auch bei Gasplaneten reicht die Atmosphäre nicht bis zum Hillradius: Die Gasteilchen stoßen oft aneinander und werfen sich dadurch aus der Bahn. In der Nähe vom Hillradius genügt schon ein sehr kleiner Zusammenstoß, um die Gasteilchen aus den gravitativen Einflussbereich des Planeten zu katapultieren.

Erst weit innerhalb des Hillradius, beim sogenannten Bondiradius, ist die Gravitation des Planeten um so vieles stärker als die Gravitation der Sonne, dass ein derart starker Zusammenstoß unwahrscheinlich ist.

4 Fallbeschleunigung

Die Formel für die Fallbeschleunigung lautet

$$g = \frac{GM}{a^2} \tag{4.1}$$

In dieser Formel steht a für den Abstand zum Zentrum des Planeten. In vielen Anwendungen ist die Fallhöhe vernachlässigbar klein im Vergleich zum Radius des Planeten. In dem Fall gilt a=r und die Fallbeschleunigung wird zu einer Konstanten. In allen anderen Fällen gilt a=r+h und die Fallbeschleunigung nimmt mit der Fallhöhe ab

$$g = \frac{GM}{(r+h)^2} \tag{4.2}$$

5 Potentielle Energie

Die Formel für die potentielle Energie lautet

$$E_{pot} = mgh \tag{5.1}$$

Wenn die Fallhöhe klein im Vergleich zum Planetenradius ist, ist die Fallbeschleunigung konstant und die potentielle Energie nimmt linear mit der Höhe zu.

Für den Fall, dass die Fallhöhe nicht so klein ist, setzen wir 4.2. für die Fallbeschleunigung in 5.1. ein

$$E_{pot} = m\frac{GM}{(r+h)^2}h \tag{5.2}$$

Durch Ausmultiplizieren der Klammer erhält man

$$E_{pot} = m\frac{GM}{r^2 + 2rh + h^2}h \tag{5.3}$$

Durch Trennen des Bruchs und Ausmultiplizieren mit h erhält man

$$m(\frac{GMh}{r^2} + \frac{GM}{2r} + \frac{GM}{h}) \tag{5.4}$$

Durch Herausheben der Fallbeschleunigung auf der Oberfläche erhält man

$$mg(h + \frac{r}{2} + \frac{r^2}{h}) \tag{5.5}$$

6 Hydrostatisches Gleichgewicht

Alle Planeten unseres Sonnensystems sind annähernd rund. Das gilt sowohl für die Atmosphäre, als auch für die flüssige Komponente, als auch für den Gesteinskern. Der Grund dafür ist, dass sich die Planeten im hydrostatischen Gleichgewicht befinden: Der Druck nach außen und die Gravitation nach innen sind an der Oberfläche gleich groß.

Die Abweichungen vom hydrostatischen Gleichgewicht sind sehr gering: Wenn man einen Golfball machen würde, der so glatt wie die Erde ist, wäre das der glatteste Golfball der jemals produziert wurde.

Rotationsabplattung

Die größte Abweichung erfolgt an den Polen: Diese sind aufgrund der Zentrifugalkraft der Rotation leicht abgeflacht. Da es außerhalb der Planeten keine Winde gibt, wird die Zentrifugalkraft ausschließlich durch die Magnetfelder übertragen. Wie sehr die Pole abgeflacht sind, hängt von der Rotationsgeschwindigkeit und vom sogenannten „Elastizitätsmodul“ ab.

Das Elastizitätsmodul gibt die Kraft an, die man benötigt, um ein Material zu verformen. Hat das Material, aus dem der Planet besteht, also nur ein geringes Elastizitätsmodul, genügt eine geringe Zentrifugalkraft um den Planeten zu verformen. Bei einem hohen Elastizitätsmodul muss die Zentrifugalkraft ungleich größer sein.

Plattentektonik

Planeten, die unter ihrer Oberfläche flüssig sind, besitzen Plattentektonik: Unterschiedliche Teile der Oberfläche schwimmen in unterschiedliche Richtungen. Wenn zwei Platten aufeinandertreffen, können sie sich zu Gebirgen auffalten.

Die Höhe der Berge ist jedoch begrenzt: Die Abweichung von der Kugelgestalt hängt von der Kohäsion (also der Zusammenhaltkraft) des Materials und von der Gravitation des Planeten ab:

Die Gesteinsberge auf der Erde sind nie höher als 9km. Auf dem kleineren Mars existieren hingegen viel größere Berge. Der Olympus Mons ist 22km hoch. Auf Neutronensternen ist die Abweichung von der Kugelgestalt kleiner als ein Millimeter.

Sand hat eine viel niedrigere Kohäsion als Stein. Folglich sind Sanddünen wesentlich niedriger als Berge aus Gestein. Das Hauptproblem am Bau eines Weltraumliftes ist, dass man ein Material benötigt, mit einer so hohen Kohäsion, dass es aus der Erdatmosphäre heraus reichen kann.

Gezeitenwechselwirkung

Durch die gravitative Wechselwirkung zwischen dem Planeten mit seinen Monden oder mit dem Zentralstern, kann es bei Flüssigkeiten und Gasen zu Gezeiten kommen. Dieser Vorgang wurde im Skriptum über die Newton'sche Mechanik am Beispiel von Ebbe und Flut auf der Erde ausführlich hergeleitet.

7 Temperatur

Ein Planet erwärmt sich dadurch, dass er von seinem Stern angestrahlt wird. Wie stark sich der Planet genau erwärmt, hängt aber nicht nur von der Temperatur des Sterns und dem Abstand zum Stern, sondern auch von der Oberfläche des Planeten ab.

Den Effekt, dass sich unterschiedliche Oberflächen unterschiedlich stark erhitzen, kennen wir aus dem Alltag. So sind zum Beispiel schwarze Oberflächen im Sommer viel heißer als weiße Oberflächen. Der Grund für dieses Phänomen ist, dass weiße Oberflächen viel mehr Strahlung reflektieren und dadurch viel weniger Wärme aufnehmen.

Bei Planetenoberflächen wird dieser Wert mit dem sogenannten „Albedo“ angegeben. Der Albedo ist eine Zahl zwischen 0 und 1, wobei 0 bedeutet, dass der Planet die gesamte Strahlung absorbiert und 1, dass der Planet die gesamte Strahlung reflektiert.

Der Treibhauseffekt kommt dadurch zustande, dass die Strahlung in der Atmosphäre so viel hin- und herreflektiert wird, dass sie fast nicht mehr herauskommt. Mit zunehmendem Albedo nimmt also auch der Treibhauseffekt zu.

Insgesamt kann man die Temperatur der angestrahlten Seite eines Planeten mit gebundener Rotation mit der Formel

$$T_{Pl} = \sqrt[4]{1-A}\, T_{St} \sqrt{\frac{r_{St}}{r}} \tag{7.1}$$

berechnen. In dieser Formel steht T_{Pl} für die Temperatur des Planeten, T_{St} für die Temperatur des Sterns, A für den Albedo des Planeten, r_{St} für den Radius des Sterns und r für den Abstand zwischen Stern und Planet.

Durch die Rotation wird die Temperatur zusätzlich beeinflusst, weil jeder Teil der Oberfläche die Hälfte der Zeit nicht angestrahlt wird. Wenn der Planet eine Atmosphäre hat, kann diese Wärme speichern und durch Luftzirkulationen die Temperatur zusätzlich ausgleichen. Wenn keine Atmosphäre vorhanden ist, ist der Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht stärker.

Um die durchschnittliche Temperatur eines rotierenden Planeten auszurechnen, muss man die Formel 7.1. durch die Wurzel aus 2 dividieren

$$T_{Pl} = \sqrt[4]{1-A}\, T_{St} \sqrt{\frac{r_{St}}{2r}} \tag{7.2}$$

8 Strahlungsleistung

Die allgemeine Formel für den Strahlungsfluss F lautet

$$F = \sigma T^4 \tag{8.1}$$

mit der Stefan-Bolzmann-Konstante $\sigma = 5,67x10^-8 \frac{W}{m^2K}$. Durch Einsetzen von 7.2. für die Temperatur erhält man

$$F = \sigma(1-A) T_{St}^4 \frac{r_{St}^2}{4r^2} \tag{8.2}$$

Um die Strahlungsleistung auf der gesamten Oberfläche zu berechnen, muss man den Strahlungsfluss mit der Oberfläche der Kugel multiplizieren.

$$P = \pi\sigma(1-A) T_{St}^4 r_{Pl}^2 \frac{r_{St}^2}{r^2} \tag{8.3}$$