

**Die Gezeitenkraft als eine Auswirkung der  
Gravitation im Physikunterricht**

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Magisters der Naturwissenschaften

vorgelegt von  
Freddy Wittwer

eingereicht bei  
Dr. Walter Saurer

am Institut für Astrophysik der Naturwissenschaftlichen Fakultät an  
der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

Innsbruck, Juli 2005

# **Danksagung**

Ich möchte mich besonders bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium aufgrund ihrer großzügigen Unterstützung überhaupt erst ermöglicht haben.

Ein besonderer Dank gilt weiters dem Betreuer meiner Diplomarbeit Prof. Dr. Walter Saurer, der mir mit wertvollen Ratschlägen jederzeit zur Seite stand.

Außerdem bedanke ich mich bei all meinen Freunden und Kollegen für die schöne Zeit, die ich mit ihnen während meines Studiums verbracht habe.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Grundlagen .....</b>	<b>6</b>
1.1 Gravitation .....	6
1.2 Gezeitenkraft.....	14
<b>2 Die Auswirkungen der Gezeitenkraft auf die Erde .....</b>	<b>20</b>
2.1 Historisches zum Thema Ebbe und Flut.....	20
2.2 Die Entstehung von Ebbe und Flut.....	23
2.3 Wovon hängt die Höhe des Tiden ab .....	32
2.4 Der tägliche Verlauf von Ebbe und Flut.....	42
2.5 Die Nutzung der Gezeiten .....	44
2.5.1 Geschichtliche Entwicklung .....	44
2.5.2 Gezeitenkraftwerke .....	49
<b>3 Der Einfluss der Gezeitenkraft auf den Erdmond.....</b>	<b>58</b>
3.1 Allgemeines .....	58
3.2 Gebundene Rotation und Libration .....	61
<b>4 Die Planeten und Monde im Einfluss der Gezeitenkraft.....</b>	<b>68</b>
4.1 Rochesche Stabilitätsgrenze .....	68
4.2 Merkur .....	74
4.3 Mars .....	80

4.4	Jupiter .....	83
4.4.1	Die Monde Jupiters.....	86
4.5	Saturn.....	91
4.5.1	Saturns Ringe.....	93
4.6	Uranus.....	95
4.7	Planetenparade.....	97
<b>5</b>	<b>Die Beeinflussung von Galaxien durch die Gezeitenkraft .....</b>	<b>100</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>105</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>107</b>

## **Einleitung**

Schon seit tausenden von Jahren ist der Mensch von den physikalischen Vorgängen am Himmel und auf der Erde fasziniert. Die Erforschung jener Gesetzmäßigkeiten, die zur Beschreibung dieser Abläufe notwendig sind, zieht sich wie ein roter Faden durch unsere Geschichte und inspirierte so manchen Naturwissenschaftler zu außergewöhnlichen geistigen Höchstleistungen.

Einer dieser erforschten Zusammenhänge ist die so genannte Gezeitenkraft. Tagtäglich lassen sich Auswirkungen dieser, aufgrund von gravitativen Unterschieden entstandenen Kraft auf der Erde und im Weltall eindrucksvoll beobachten. Bekannte Folgen, wie beispielsweise Ebbe und Flut gehören ebenso zu unserer Erlebniswelt, wie unser Mond, der uns bekanntlich stets die gleiche Seite zuwendet. Um diese und viele andere Auswirkungen der Gezeitenkraft im Unterricht physikalisch korrekt erklären zu können, bedarf es eines Fundus an physikalischem Wissen, der in Schulbüchern nur spärlich bis gar nicht zu finden ist. Auch gefundene Information, wie beispielsweise jene aus dem Internet, können oft nicht als Quelle heran gezogen werden, da sie teils lückenhaft, teils schlicht und einfach falsch sind.

Aus diesem Grunde, verbunden mit persönlichem Interesse meinerseits, ist diese Arbeit entstanden. Sie soll engagierten Lehrern dazu dienen, nötiges Hintergrundwissen zur Hand zu haben, damit sie dieses Thema im Unterricht einbringen bzw. auf anfallende Fragen eine plausible und inhaltlich korrekte Antwort geben können.

# 1 Grundlagen

Im ersten Kapitel meiner Arbeit geht es mir grundsätzlich darum, nötiges Vorwissen zu den Themen Gravitations- und Gezeitenkraft zu schaffen bzw. bereits erworbene Kenntnisse etwas aufzufrischen.

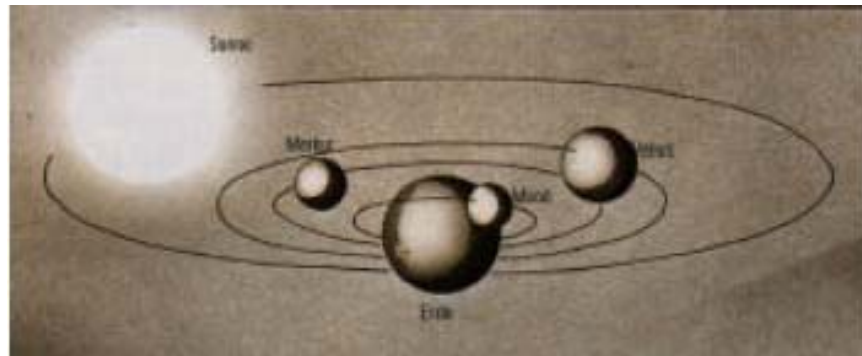
## 1.1 Gravitation

In der heutigen Physik geht man davon aus, dass es vier fundamentale Kräfte im Universum gibt. Neben der elektromagnetischen Kraft, der starken und der schwachen Wechselwirkung ist die Gravitationskraft die vierte, die unseren Alltag prägt. In Größenordnungen von Atomen und Molekülen (ca.  $10^{-10}$  Meter) ist die Gravitation die schwächste der vier Wechselwirkungen. Mit zunehmender Entfernung fallen die Kräfte der schwachen und der starken Wechselwirkung bzw. der elektromagnetischen Kraft jedoch sehr viel schneller ab, als die der Gravitation.

Die Erforschung der Gravitationskraft stellte sich als schwierig heraus. Auch wenn man Massen von mehreren 100 Kilogramm für einen Versuch verwendete, war es lange Zeit nicht möglich, die auftretende Kraft zu bestimmen. Dies lag daran, dass die Größe der gemessenen Kräfte innerhalb akzeptabler Messfehler der verwendeten Geräte lag.

Da es den Wissenschaftlern mit den damaligen Möglichkeiten nicht möglich war die Gravitationskraft zwischen zwei Objekten auf der Erde zu bestimmen, ging man dazu über, dies an Hand der sichtbaren und damals bekannten Körper unseres Sonnensystems am Himmel zu versuchen. Sie hatten den Vorteil, dass sie über genügend Masse verfügten.

Rund 2000 Jahre lang waren die Lehren von Aristoteles und von Ptolemäus gültig. Diese besagen, dass sich die Erde im Mittelpunkt unseres Sonnensystems befindet (Abbildung 1). Um sie kreisen alle damals bekannten Himmelskörper, wie Sonne, Mond und die damals bekannten Planeten.



**Abbildung 1: Ptolemäisches Weltbild**

Ende des 16. Jahrhunderts machten sich Physiker und Astronomen daran, das herrschende Weltbild zu überarbeiten. Einer von ihnen war Johannes Kepler (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Johannes Kepler (1571 – 1630)**

Er führte die Arbeiten seines Lehrers, dem Hofastronomen und Mathematiker Tycho Brahe fort und beschrieb die Gesetze für die

Bewegungen der Planeten, welche uns bis zum heutigen Tag als die drei Keplerschen Gesetze bekannt sind. Diese besagen folgendes:

1. Alle Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne. Diese befindet sich jeweils in einem der beiden Brennpunkte der Bahnellipse.
2. Die Verbindungslinie zwischen der Sonne und den Planeten überstreicht in gleicher Zeit die gleiche Fläche. (Bekannt als Flächensatz)
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen der Bahnellipsen.

Die Keplerschen Gesetze waren ein wichtiger Schritt zum Verständnis der Planetenbewegung. Es handelte sich bei ihnen aber nur um empirisch aufgestellte Regeln, die aus den astronomischen Beobachtungen von Brahe hervorgingen.

Der britische Physiker Sir Isaac Newton (Abbildung 3) war schließlich der Erste, der das Konzept der Kraft postulierte. Dieses konnte beispielsweise auch die von Kepler beschriebenen elliptischen Bahnen beschreiben.



**Abbildung 3: Sir Isaac Newton (1643 – 1727)**

Ein weiterer großer Schritt, den wir Newton verdanken, war die Erkenntnis, dass diese Kraft zwischen allen Objekten im Universum wirke, was die Wissenschaftler bis zu jenem Zeitpunkt nicht angenommen hatten.



Mit Hilfe des dritten Keplerschen Gesetzes veröffentlichte Newton 1686 schließlich das Gravitationsgesetz.

$$\vec{F} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

Es besagt, dass die zwischen zwei Massenpunkten (oder homogenen Kugeln)  $m_1$  und  $m_2$  wirkende Gravitationskraft  $F$  umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung  $r$  zwischen den beiden ist. Zudem ist sie direkt proportional den Massen und wirkt in Richtung des Verbindungsvektors der beiden Objekte (Abbildung 4).

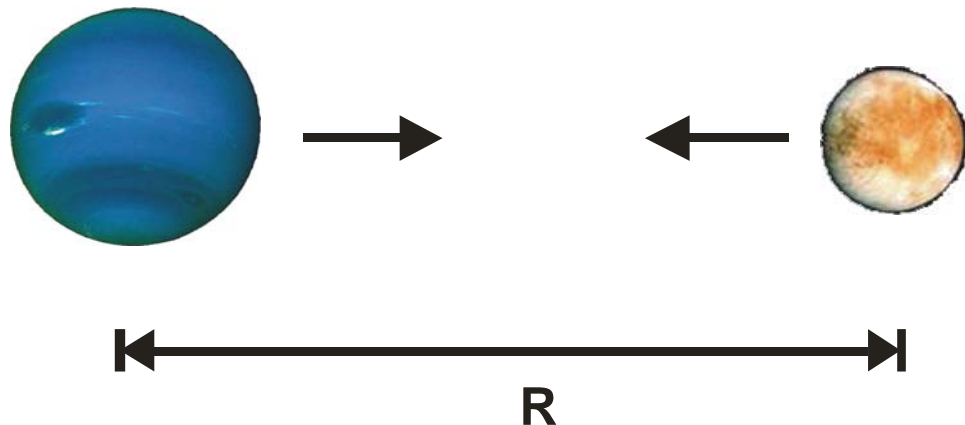


Abbildung 4: Gravitationskraft zwischen 2 Planeten

Newton beschrieb das Gravitationsgesetz für Massenpunkte. Ausgedehnte Körper können jedoch derart modelliert werden, dass man sie durch ihre Schwerpunkte ersetzen kann, womit die Formel auch hier ihre Anwendung findet.

Die Bestimmung der Gravitationskonstanten ( $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ ) war mit damaligen Möglichkeiten sehr schwierig. Um den Wert von  $G$  angeben zu können, ist es nötig die Massen, den Abstand und die ausgeübte Gravitationskraft zwischen den zu untersuchenden Körpern zu wissen. Dies war im 17. und 18. Jahrhundert jedoch schwierig, da die Messgeräte beispielsweise bei der Bestimmung der Gravitationskraft zu ungenau waren und die Messfehler in der Größenordnung des zu messenden Wertes lagen.

So dauerte es beinahe ein Jahrhundert bis Henry Cavendish (Abbildung 5) mit Hilfe eines Experimentes im Labor  $G$  bestimmen konnte.



Abbildung 5: Henry Cavendish (1731 – 1810)

Im Jahre 1778 bestimmte Cavendish mit einer Drehwaage  $G$  auf zwei Kommastellen. Sein Vorteil gegenüber den astronomischen Beobachtungen seiner Kollegen war der, dass er die vorkommenden Massen leicht bestimmen konnte. Sein Problem jedoch war die Messung der außerordentlich geringen Gravitationskraft. Er wählte hierfür folgenden Versuchsaufbau:

Eine leichte Stange, an deren Enden jeweils eine kleine Kugel hängt, wurde an einem langen dünnen Faden befestigt. Das Ganze wurde unter einer Glasglocke aufgestellt, um störende Luftströmungen ausschließen zu können. Außerhalb der Glocke sind zwei sehr schwere Kugeln aufgestellt, die um eine Mittelachse gedreht werden können. Abbildung 6 stellt eine

Nachbildung von Cavendish' Drehwaage dar, wobei die Glasglocke entfernt wurde.

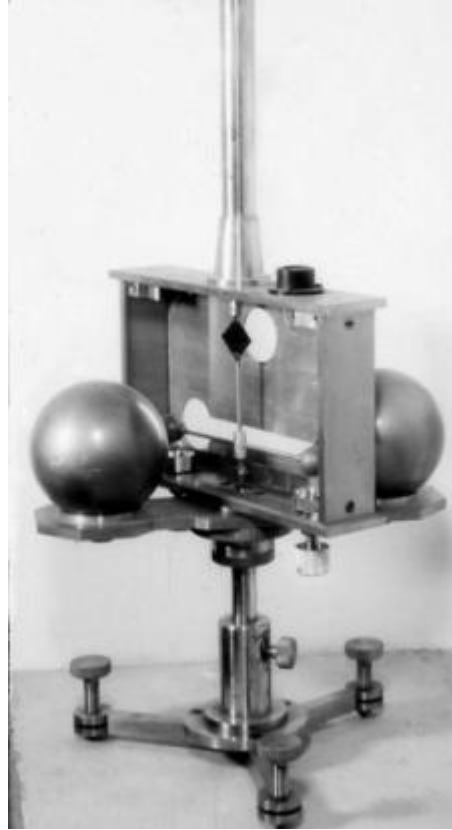


Abbildung 6: Cavendish' Drehwaage

Wenn die Waage zur Ruhe gekommen ist, wird die Stellung der großen Kugeln verändert und es wird beobachtet, dass die Stange mit den kleinen Kugeln auf Grund der Gravitationskräfte um einen gewissen Winkel gedreht wird. Aus dem gemessenen Winkel und dem Widerstand des Fadens gegenüber Verdrillung kann man nun die Kraft berechnen, mit der sich die Massen anziehen und daraus  $G$  bestimmen.

Nachdem man nun auch die Gravitationskonstante  $G$  in Newtons Gravitationsgesetz kannte, konnten weitere wichtige Berechnungen getätigt werden. So wurde unter anderem die Masse und die Dichte der Erde bestimmt. Die Erdmasse beispielsweise wurde mit  $m_e = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$  berechnet.

Der Astronom U.J.J. Leverrier (1811 – 1877) berechnete im Jänner 1847 aufgrund von beobachteten Störungen bereits bekannter Planetenbahnen, dass an einer bestimmten Stelle des Himmels ein weiterer Körper sein müsse. Tatsächlich fand er unweit der errechneten Koordinaten einen bis dahin unbekanntem kleinen Körper am Himmel, den er noch in der gleichen Nacht als Planet identifizieren konnte. Er erhielt den Namen Neptun. Einen ähnlichen Verlauf nahm auch die Entdeckung von Pluto.

Ein zudem am Sternenhimmel beobachtetes Phänomen konnte nun mit Hilfe der neu gewonnenen Erkenntnisse erklärt werden: die so genannte Präzession der Erdachse.

Wenn man sich eine Ebene durch den Erdäquator denkt, so stellt man fest, dass diese gedachte Ebene um  $23^\circ 27'$  gegenüber der Ebene, die man durch die Planetenbahnen unseres Sonnensystems (Ekliptik) legen kann, geneigt ist.

Die beiden Äquatorwulste der Erde liegen in verschiedener Entfernung zur Sonne und zum Mond. Deshalb wirken dort verschieden große Gravitationskräfte und somit eine Gezeitenkraft.

Die Anziehungskraft der Sonne und des Mondes auf den jeweils zugewandten Äquatorwulst ist größer als jene auf den Wulst der abgewandten Seite.

Die um die eigene Achse rotierende Erde weicht der, von der Gravitation des Mondes und Sonne ausgeübten Kraft und dem so entstehenden Drehmoment

$$\vec{D} = \vec{r} \times \vec{F}$$

(Drehmoment ( $\vec{D}$ ) = Kreuzprodukt zwischen dem Ort ( $\vec{r}$ ) und der dort angreifenden Kraft ( $\vec{F}$ )), welches versucht die Erdachse wieder aufzurichten, im rechten Winkel aus. Diese Achsenverlagerung wird mit Präzession (lat. praecedere = voranschreiten) bezeichnet.

Abbildung 7 zeigt die Präzession der Erde, welche einen Kegelmantel um die Senkrechte auf der Erbahnebene beschreibt.

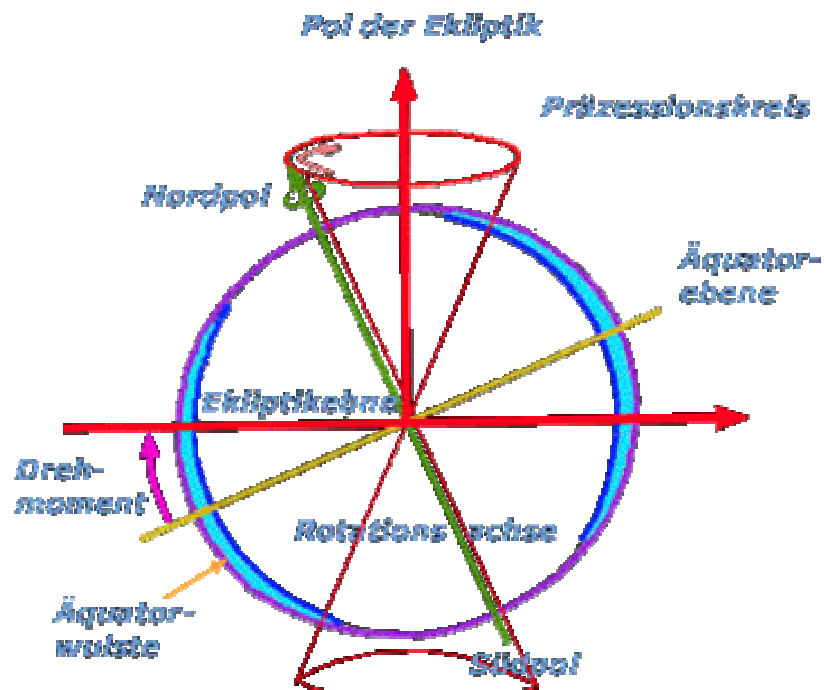


Abbildung 7: Die Präzession der Erde

Diese Präzession der Erdachse benötigt für einen Umlauf ca. 25700 Jahre und wird als Platonisches Jahr bezeichnet.

## 1.2 Gezeitenkraft

Der Begriff der Gezeitenkraft wird oft nur im Zusammenhang mit dem Erde-Mond-System verwendet. Zudem verstehen viele darunter die Tidenwirkungen Ebbe und Flut.

Zur Herleitung und Erklärung der Bedeutung der Gezeitenkraft im physikalischen Sinne verwende ich folgende Illustration (Abbildung 8):

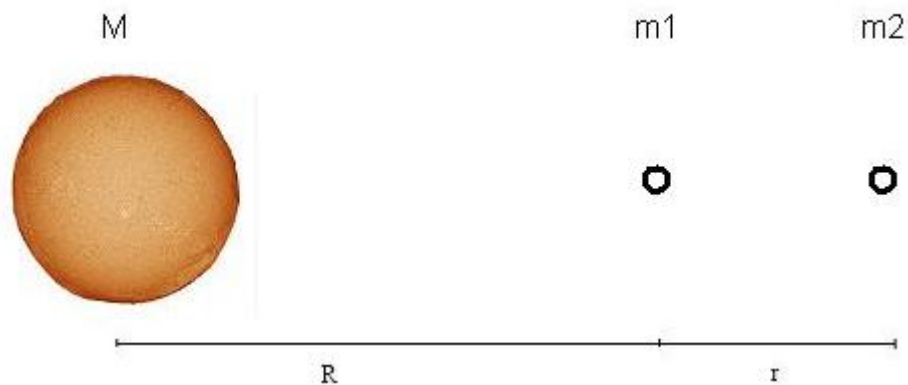


Abbildung 8: 2 Körper im Schwerefeld von M

Angenommen die beiden Himmelskörper mit den Massen  $m_1$  und  $m_2$  befinden sich im Schwere- bzw. Gravitationsfeld des Körpers mit der Masse M. Auf diese beiden wirken deshalb folgende Gravitationskräfte:

$$F_1 = G \cdot \frac{m_1 \cdot M}{R^2} \quad (\text{wirkt auf } m_1)$$

$$F_2 = G \cdot \frac{m_2 \cdot M}{(R + r)^2} \quad (\text{wirkt auf } m_2)$$

Aufgrund des Newtonschen Axioms  $\text{actio} = \text{reactio}$  bzw. Kraft = Gegenkraft wirken diese beiden Kräfte auch auf M. Dieser Umstand wird aber im Folgenden außer Acht gelassen, da er zur Erklärung und Herleitung der Gezeitenkraft nicht benötigt wird.

Wegen  $(R+r) > R$  gilt ebenfalls  $F_1 > F_2$ . Wenn man nun die beiden Massen  $m_1$  und  $m_2$  durch zwei Massen auf einem größeren Körper ersetzt (Abbildung 9), ändert sich nichts daran, dass auf  $m_1$  und  $m_2$  die bereits beschriebenen Kräfte wirken.

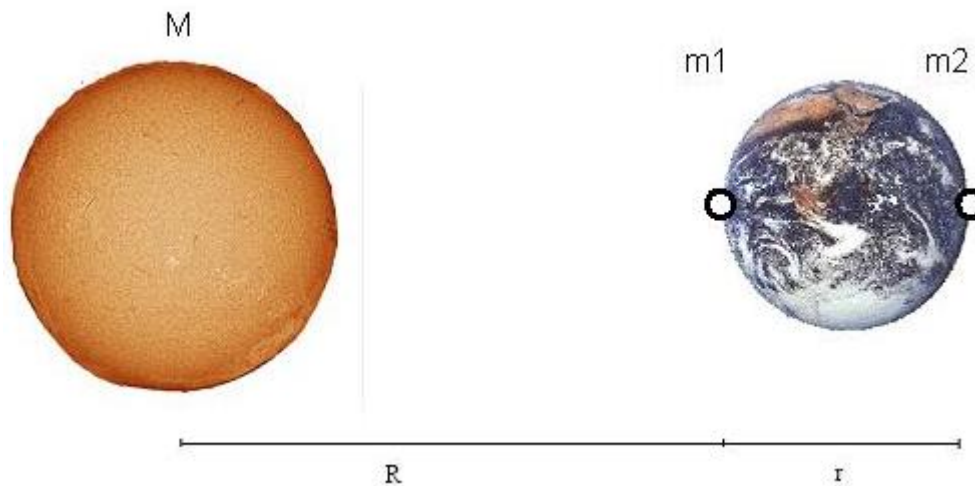


Abbildung 9: 2 Massenpunkte auf einem Körper

Die nun vorhandene Differenz zwischen den Kräften für  $m_1$  und  $m_2$  nennt man in der Physik Gezeitenkraft. Sie ist also jene Kraft, die versucht Körper aufgrund der vorherrschenden Gravitation auseinander zu ziehen und wirkt nur auf ausgedehnte Körper.

Obwohl die Gravitationskraft mit  $\frac{1}{R^2}$  abnimmt, zeigen die folgenden Herleitungen, dass dies für die Gezeitenkraft nicht der Fall ist.

Ich habe deshalb zwei Arten der Herleitung gewählt, da beide in der Schule verwendet werden können, die zweite Herleitung jedoch eine

Reihenentwicklung beinhaltet, was nicht im Lehrplan jedes Schultyps vorgeschrieben ist.

Angenommen es herrscht die Situation wie in Abbildung 9. Zudem nehmen wir an, dass  $\frac{r}{R} \ll 1$ .

An den Positionen von den Massen  $m_1$  und  $m_2$  herrscht nun folgende Differenz der Beschleunigungen:

$$\begin{aligned}
 \Delta a &= \frac{GM}{R^2} - \frac{GM}{(R+r)^2} \\
 &= GM \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{(R+r)^2} \right) \\
 &= GM \left( \frac{(R+r)^2 - R^2}{R^2 (R+r)^2} \right) \\
 &= GM \left( \frac{2Rr + r^2}{R^2 (R+r)^2} \right) \\
 &= GM \left( \frac{2Rr + r^2}{R^2 (R^2 + 2Rr + r^2)} \right) \\
 &= GM \left( \frac{2r + \frac{r^2}{R}}{R(R^2 + 2Rr + r^2)} \right) \\
 &= GM \left( \frac{2r + \frac{r^2}{R}}{R^3 \left( 1 + \frac{2r}{R} + \frac{r^2}{R^2} \right)} \right)
 \end{aligned}$$

Aus der Annahme  $\frac{r}{R} \ll 1$  folgt  $\frac{r^2}{R} \ll r$ , womit sich für die

Differenz Folgendes abschätzen lässt:

$$\Delta a = GM \left( \frac{2r}{R^3} \right)$$



Eine alternative Herleitung hierfür wäre folgende:

$$\begin{aligned}
 \Delta a &= \frac{GM}{R^2} - \frac{GM}{(R+r)^2} \\
 &= GM \cdot \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{R^2 + 2rR + r^2} \right) \\
 &= GM \cdot \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{R^2(1 + 2r/R + r^2/R^2)} \right) \\
 &= \frac{GM}{R^2} \cdot \left( 1 - \left( 1 + 2\frac{r}{R} + \frac{r^2}{R^2} \right)^{-1} \right)
 \end{aligned}$$

Die Reihenentwicklung für die innere Klammer ergibt:

$$\left( 1 + 2\frac{r}{R} + \frac{r^2}{R^2} \right)^{-1} \cong 1 - 2\frac{r}{R} + 3\frac{r^2}{R^2} \mp \dots$$

Da wir auch hier  $\frac{r}{R} \ll 1$  annehmen können, folgt durch Weglassen des quadratischen Terms auch hier die Abschätzung:

$$\Delta a = \frac{2GMr}{R^3}$$

Der Vorteil der zweiten Herleitung liegt darin, dass hier die Terme erst ab dem quadratischen Term vernachlässigt werden.

Für die Gezeitenkraft erhält man schließlich:

$$F_{Gez} = m \cdot \Delta a$$

Daraus folgt:

$$F_{Gez} \cong \frac{2r}{R^3} \quad \text{bzw.} \quad F_{Gez} \cong \frac{1}{R^3}$$

Also ist die Gezeitenkraft proportional  $\frac{1}{R^3}$ .

Die Überprüfung, ob es sich bei obigem Ergebnis  $\Delta a$  tatsächlich um eine Beschleunigung handelt, könnte man in der Schule als eine Anwendung der Dimensionsanalyse verwenden.

Das Einsetzen der jeweiligen Einheiten in  $\Delta a = GM \left(\frac{2r}{R^3}\right)$  liefert die Dimension  $[\Delta a]$ .

$$[\Delta a] = \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot kg \cdot \frac{m}{m^3} = \frac{m}{s^2}$$

Die Reichweite der Gezeiten- bzw. Gravitationskraft ist theoretisch unendlich groß. Die Gezeitenkraft nimmt jedoch mit der dritten Potenz des Abstands ab, die Gravitationskraft wird mit dem Abstandsquadrat kleiner. Deshalb ist ihre Reichweite der Gezeitenkraft verglichen mit jener der Gravitation geringer.

Ausschlaggebend für den Wirkungsbereich der Gezeitenkraft ist das Verhältnis zwischen Masse und Entfernung. Will man beispielsweise wissen wo die Gezeitenkraft auf  $\frac{1}{e}$  der ursprünglichen Kraft abgefallen ist, stellt man folgende Gleichung auf:

$$\frac{GM \left(\frac{2r}{R_1^3}\right)}{GM \left(\frac{2r}{R_2^3}\right)} = \frac{1}{e}$$

Durch Kürzen und Umformen erhält man:

$$R_1 = R_2 \cdot \sqrt[3]{e} \cong R_2 \cdot 1,4$$

D.h.: Wenn man die Entfernung um nur 40% erhöht, so wird die Gezeitenkraft bereits auf  $\frac{1}{e}$  der ursprünglichen Kraft abgeschwächt.

## 2 Die Auswirkungen der Gezeitenkraft auf die Erde

Im zweiten Kapitel meiner Arbeit werde ich anhand eines Modells mit hinreichender Allgemeinheit und Genauigkeit versuchen die Entstehung und die Nutzung der Gezeiten auf der Erde zu erklären.

Die Gezeiten auf der Erde, im speziellen die des Meeres, werden als Tiden bezeichnet.

### 2.1 Historisches zum Thema Ebbe und Flut



Abbildung 10: Ebbe an der Nordsee

*Daß Ebbe und Fluth sey, ist eine ausgemachte Sache, und der Augenschein zeigt es hier und dar, ohnerachtet sich der Naturkündiger wegen der Ursach, und wie es zugehe, nicht vergleichen können, wird auch wohl unausgemacht bleiben.*

Wie dieses Zitat aus dem Philosophischen Lexikon von Johann Georg Walch aus dem Jahre 1775 zeigt, konnte man sich vor rund 200 Jahren die Entstehung der Gezeiten Ebbe und Flut auf der Erde nicht erklären. Auch heute noch ist das Wissen über die Gezeiten beim Großteil der Bevölkerung nur sehr dürftig bis gar nicht vorhanden. Die Ursache hierfür lässt sich wohl darin finden, dass dieses Thema im Unterricht nur kurz bis gar nicht behandelt wird. Dies ist deshalb sehr bedauerlich, da es sich bei den Gezeiten um eine elementare Anwendung des Newtonschen Gravitationsgesetzes aus der direkten Erlebniswelt des Schülers handelt. Weiters ist die korrekte Bearbeitung dieses Themas in der Schule ebenfalls von Bedeutung, da viele Bücher und vor allem das heutzutage häufig als Informationsquelle benützte Internet Wissen hierzu liefern, das teils mangelhaft, oft leider sogar schlicht und einfach falsch ist.

Als Beispiel führe ich hier eine sehr häufig verwendete Erklärung für die Entstehung der Flutberge an: die Herleitung mit Hilfe der „Fliehkraft“ oder der „Zentrifugalkraft“. Diese Scheinkräfte, die mittlerweile im Physikunterricht nicht mehr Verwendung finden sollten, müssen immer wieder für physikalische Begründungen herhalten, die der jeweilige Autor entweder selber nicht verstanden hat oder bei der er zu bequem war, die Situation ordentlich zu erläutern. Beispiele, wie Abbildung 11 sind leider verhäuft zu finden. Bei dieser Grafik sind die Zentrifugalkräfte (grün) ebenso als handfeste Kräfte mit Pfeilen dargestellt, wie die Anziehungskraft (rot) des Mondes. Mit Hilfe der Vektoraddition erhält man in diesem Beispiel schließlich die resultierenden Kräfte (rosa). Ein Schüler, der mit einer solchen Abbildung arbeitet, ist versucht, diese Scheinkräfte ebenso zu Hand haben, wie handfeste Kräfte.

In Kapitel 2.2 werde ich die Flutberge mit Hilfe der Newtonschen Mechanik ohne die Zuhilfenahme von Scheinkräften erklären.

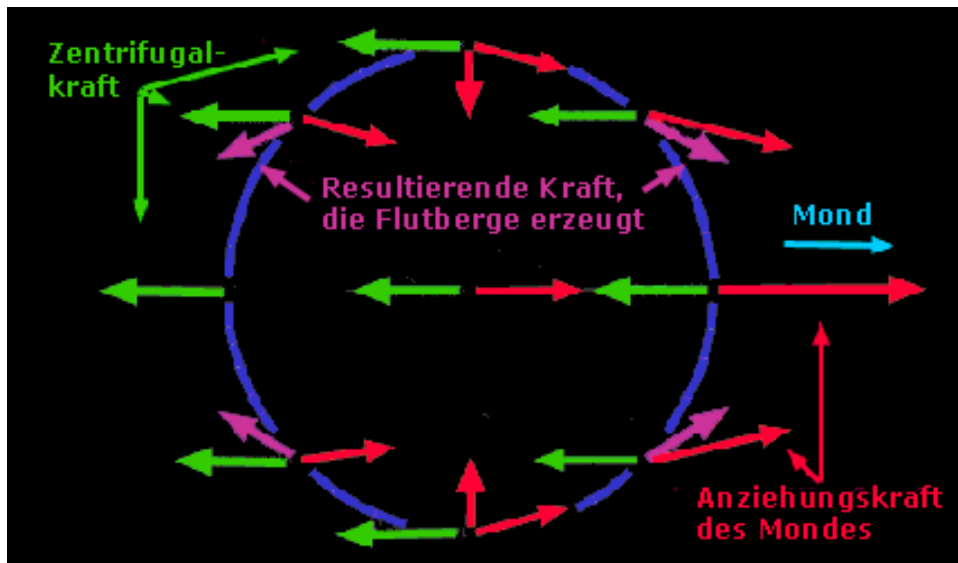


Abbildung 11: Negativbeispiel mit Zentrifugalkraft

Im Laufe der Zeit gab es immer wieder Wissenschaftler, die Ebbe und Flut auf die verschiedensten Arten zu erklären versuchten. Der berühmte italienische Physiker, Mathematiker und Philosoph Galileo Galilei (1564 – 1642) meinte über den Ansatz, dass der Mond die Bildung der Gezeiten mit verursachen könne, er halte dies für „mystisch und kindisch“ und wolle keinerlei weitere Gedanken daran verschwenden. Er glaubte vielmehr die Gezeiten durch eine Relativbewegung der festen Erdteile und Meere erklären zu können. In der Antike andererseits glaubte man, dass das Ganze eine Machenschaft der Götter sei. Poseidon oder später Neptun wollten damit ihre Mächtigkeit und Überlegenheit gegenüber den Menschen zum Ausdruck bringen.

Erst die Erkenntnisse von Newton im 17. Jahrhundert brachten die zur Erklärung der Gezeiten nötige Theorie. Dieses Wissen nutzten beispielsweise die beiden französischen Astronomen und Mathematiker Pierre Simon Laplace (1749 – 1827) und Henri Poincaré (1854 – 1912), welche die ersten Berechnungen mit Hilfe von Newtons Erkenntnissen aufstellten.

## 2.2 Die Entstehung von Ebbe und Flut

Im folgenden Abschnitt werde ich die Entstehung der beiden Flutberge ohnedie zu Hilfenahme von Begriffen wie „Fliehkraft“ und „Zentrifugalkraft“ erklären. Hierfür betrachte ich vorerst das Zweikörpersystem Erde-Mond.

Diese beiden Himmelskörper ziehen einander aufgrund der Gravitationskraft an. Ein Zahlenwert für diese Kraft lässt sich mit Hilfe von Newtons Formel berechnen.

$$F = G \cdot \frac{m_{\text{Erde}} \cdot m_{\text{Mond}}}{r^2}$$

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \frac{5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}}{(3,847 \cdot 10^8 \text{ m})^2}$$

$$F \cong 2 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

Erde und Mond drehen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt  $SP$ . Da die Erde aber rund 81mal schwerer als ihr Trabant ist, liegt der Schwerpunkt im Inneren unseres Planeten, nämlich rund  $\frac{3}{4}$  Erdradien vom Erdmittelpunkt entfernt, was in Abbildung 12 veranschaulicht wird.

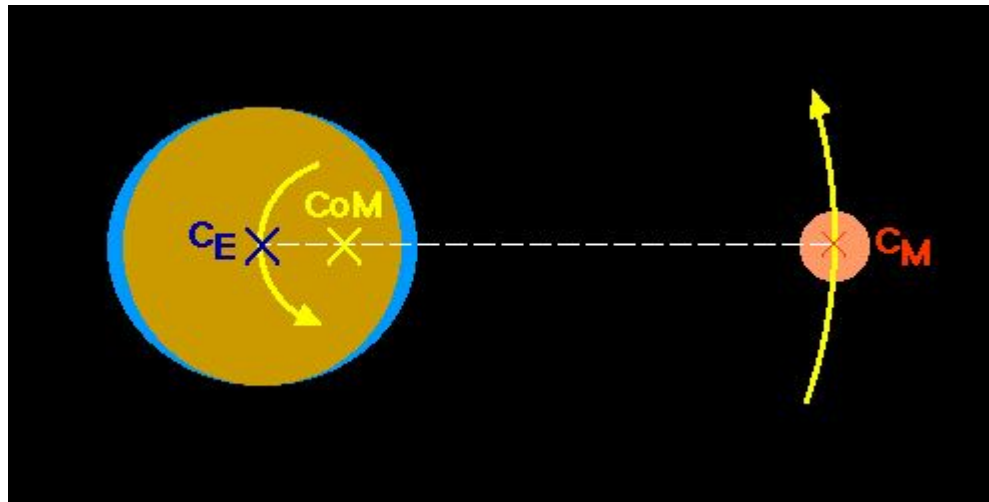


Abbildung 12: Lage des gemeinsamen Schwerpunkts (CoM)

Im Schulunterricht kann es des Öfteren sinnvoll sein Sachverhalte übertrieben darzustellen, wie beispielsweise die Verformung der Meere in Abbildung 12. Dies wird von den Lehrern deshalb gemacht, damit man dem Schüler die eigentliche Aussage eines Beispiels veranschaulichen kann. Wichtig ist dabei aber, dass der Schüler mehrfach darauf hingewiesen wird, dass es sich bei der übertriebenen Darstellung nicht um eine maßstabsgetreue Abbildung handelt. Auch in Abbildung 12 und Abbildung 15 wurde die Wasserhülle sehr stark deformiert dargestellt, um zu verdeutlichen, dass die Anziehungskraft des Mondes die Weltmeere verformt.

Bei meiner Erklärung der Entstehung der beiden Flutberge werde ich ebenfalls eine übertriebene Darstellung verwenden. Ich werde eine größere Mondmasse verwenden, wodurch sich der gemeinsame Schwerpunkt des Erde-Mond-Systems außerhalb der Erde befinden wird. Dieses Modell dient der leichteren Erklärung und führt zum selben qualitativen Ergebnis. Damit ich die Entstehung der beiden Flutberge aufgrund der Einwirkung des Mondes erklären kann, wähle ich folgendes Modell:

In der direkten Verbindungslinie Erde-Mond wurden an beiden Seiten der Erde Massen mit Hilfe von Federn befestigt, was in Abbildung 13



veranschaulicht wird. Diese Federn sind dabei derart modelliert, dass sie die Kräfte darstellen, welche nötig sind, damit die Massen  $m_{zu}$  bzw.  $m_{ab}$  auf ihrer jeweiligen Kreisbahn um  $SP$  bleiben.

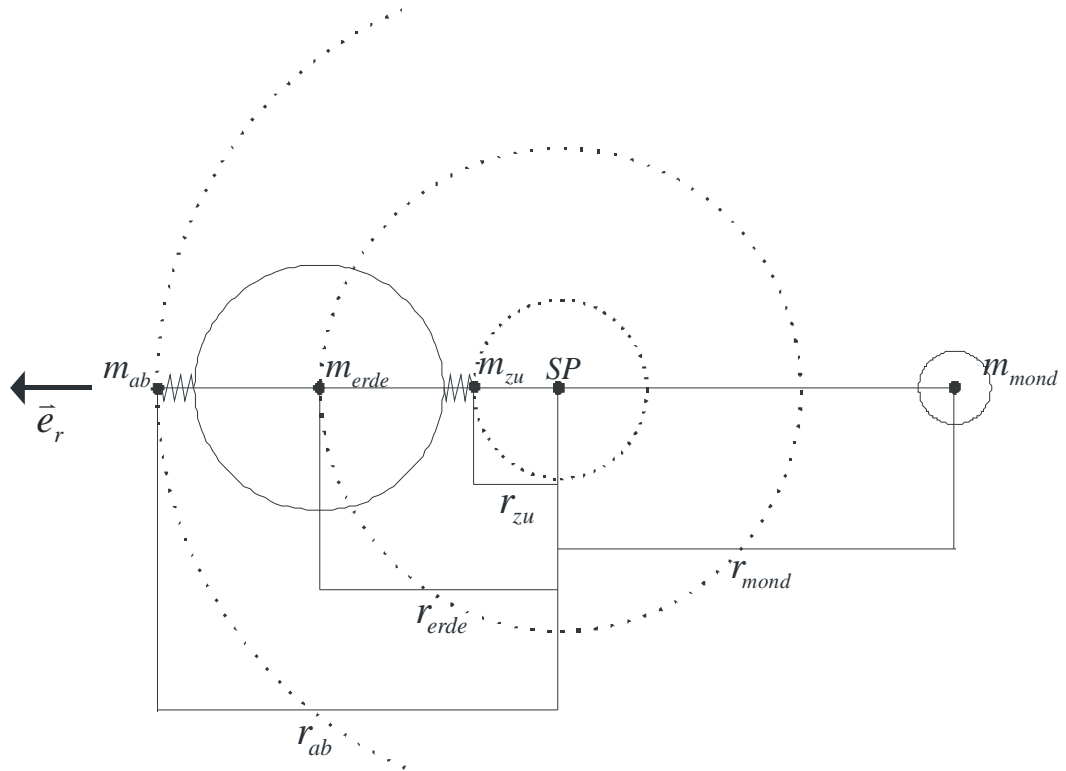


Abbildung 13: Bahnen um den Schwerpunkt

Wir betrachten nun die Bewegungsgleichungen der drei Massen  $m_{ab}$ ,  $m_{erde}$  und  $m_{zu}$ , die sich um den Schwerpunkt  $SP$  drehen. Für  $m_{erde}$  erhält man:

$$m_{erde} a = -\frac{m_{erde} m_{mond} G}{(r_{mond} + r_{erde})^2} - \text{Federkraft}_{zu} + \text{Federkraft}_{ab}$$

Da man die beiden Federkräfte als gleich groß annehmen kann, fallen diese weg.

Für die Masse  $m_{zu}$  ist der zugehörige Radius  $r_{zu}$  nun kleiner als  $r_{erde}$ . Somit befindet sich  $m_{zu}$  auf einer kleineren Kreisbahn um  $SP$ , als  $m_{erde}$ .

Nach dem 2. Keplerschen Gesetz (Flächensatz) müsste sich nun  $m_{zu}$  schneller um  $SP$  drehen als  $m_{erde}$ .

Da wir in unserem Modell aber starre Rotation annehmen ist die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  für alle Massen gleich groß.

Somit ist laut Kepler  $m_{zu}$  zu langsam und würde in Richtung  $SP$  stürzen.

Es ist also eine weitere Kraft nötig, die  $m_{zu}$  auf der Bahn um  $SP$  hält.

Diese Kraft bringt die gedehnte Feder auf, welche in Richtung  $\bar{e}_r$  wirkt.

Für die Masse  $m_{ab}$  ist der Radius  $r_{ab}$  größer als  $r_{erde}$ . Deshalb gilt hier der umgekehrte Fall.

Nach dem 2. Keplerschen Gesetz müsste sich  $m_{ab}$  langsamer um  $SP$  bewegen als  $m_{erde}$ , was auch hier aufgrund der starren Rotation nicht der Fall ist. Somit ist  $m_{ab}$  zu schnell für seine Bahn und würde somit seinen Radius vergrößern.

Es wird also auch hier eine weitere Kraft benötigt damit  $m_{ab}$  auf seiner Bahn bleibt. Auch diese Kraft kommt von der gedehnten Feder, welche in diesem Fall aber in Richtung  $-\bar{e}_r$  wirkt.

In der Realität entsprechen  $m_{ab}$  und  $m_{zu}$  den Mond ab- bzw. zugewandten Flutbergen und die beiden Federn der Gravitation der Erde auf die beiden Flutberge.

In einer Leistungsgruppe oder einem Realgymnasium könnte man obiger Erklärung für die Entstehung der Flutberge eine Herleitung mit Hilfe einer Rechnung hinzufügen. Hierfür könnte man folgendermaßen vorgehen:

Wir betrachten ein Massenelement  $\Delta m$  auf der Erdoberfläche. Weiters stellen wir für dieses die Bewegungsgleichung auf. Abbildung 14 dient der Veranschaulichung der Situation.

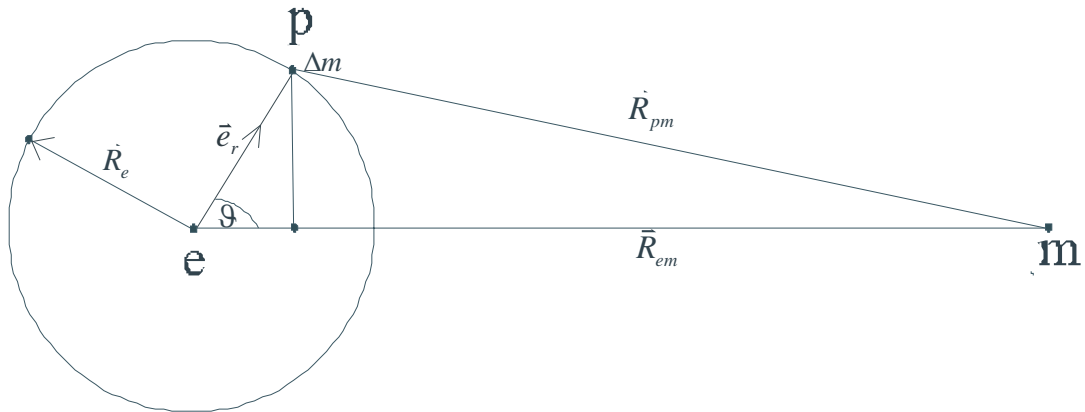


Abbildung 14: Grafik zur Herleitung der Flutberge

Folgende Bewegungsgleichung für ein Massenelement  $\Delta m$  am Punkt P auf der Erdoberfläche lässt sich aufstellen:

$$\Delta m \vec{a} = \Delta m \vec{g} + \Delta m MG \frac{\vec{R}_{pm}}{R_{pm}^3} + \vec{F}_{elastisch}$$

Mit  $\vec{F}_{elastisch}$  ist die Kraft der Erdoberfläche auf ein Massenelement  $\Delta m$  gemeint. Diese ist notwendig, da  $\Delta m$  sonst ins Zentrum der Erde stürzen würde. Diese elastische Kraft wird durch  $-\Delta m \vec{g}_{eff}$  ersetzt, wobei das negative Vorzeichen daher kommt, dass diese Kraft entgegen der Gravitation der Erde wirkt.

Nach Kürzung durch  $\Delta m$  bleibt schließlich:

$$\vec{a} = \vec{g} + MG \frac{\vec{R}_{pm}}{R_{pm}^3} - \vec{g}_{eff}$$

Für die Entstehung von Ebbe und Flut ist die monatliche Rotation um den gemeinsamen Schwerpunkt verantwortlich, nicht jedoch die Eigenrotation der Erde. Diese ist nur der Grund dafür ist, dass wir täglich zweimal Ebbe bzw. Flut haben. Die Bewegung jedes Punktes der Erde ist aber eine Überlagerung dieser beiden Kreisbewegungen. Die Eigenrotation der Erde

ist sehr viel schneller als die 28 Tage dauernde Drehung des Erde-Mond-Systems um sich selbst. Aufgrund dieser relativ hohen Rotationsgeschwindigkeit ist es zulässig die beiden Bewegungen jedes Punktes der Erde folgendermaßen zu betrachten:

Man kann die Erde fixiert mit ständig gleich bleibender Orientierung annehmen, die der Erdmond in 28 Tagen einmal umkreist. Die Erde führt dabei eine kreisende (exzentrische) Bewegung aus, ohne dabei ihre Orientierung zu ändern.

Dies ergibt nun, dass jeder Punkt der Erde während seiner Rotation um den Schwerpunkt einen gleich großen Kreis beschreibt und somit einer gleich großen Beschleunigung unterliegt. Da dies für alle Punkt bzw. Masselemente der Erde gilt, ist dies auch für ein Masselement im Erdmittelpunkt gültig. Die Bewegungsgleichung für ein Masselement im Zentrum der Erde lautet folgendermaßen:

$$\Delta m \bar{a} = \Delta m M G \frac{\bar{R}_{em}}{R_{em}^3}$$

Da dies nun für alle Punkte der Erde gilt, kann man nach dem Kürzen durch  $\Delta m$  die beiden Gleichungen gleichstellen.

$$M G \frac{\bar{R}_{em}}{R_{em}^3} = \bar{g} + M G \frac{\bar{R}_{pm}}{R_{pm}^3} - \bar{g}_{eff}$$

$$\bar{g}_{eff} = \bar{g} + M G \left( \frac{\bar{R}_{pm}}{R_{pm}^3} - \frac{\bar{R}_{em}}{R_{em}^3} \right)$$

Weiters gilt folgendes:

$$\bar{R}_{pm} = \bar{R}_{em} - \bar{R}_e$$

$$|\bar{R}_{pm}| = \sqrt{R_e^2 + R_{em}^2 - 2R_e R_{em} \cos(\vartheta)}$$

Daraus folgt:

$$\bar{g}_{eff} = \bar{g} + MG \left( \frac{\bar{R}_{em} - \bar{R}_e}{(\sqrt{R_e^2 + R_{em}^2 - 2R_e R_{em} \cos(\vartheta)})^3} - \frac{\bar{R}_{em}}{R_{em}^3} \right)$$

Um den Wurzelausdruck im ersten Nenner zu vereinfachen, machen wir folgende Abschätzung:

$$(R_e^2 + R_{em}^2 - 2R_e R_{em} \cos(\vartheta))^{-3/2} = \frac{1}{R_{em}^3} \cdot \left(1 - 2 \frac{R_e}{R_{em}} \cos(\vartheta) + \frac{R_e^2}{R_{em}^2}\right)^{-3/2}$$

Unter Verwendung der Taylorreihenentwicklung und  $\frac{|R_e|}{|R_{em}|} \ll 1$  erhält

man:

$$\cong \frac{1}{R_{em}^3} \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \left(-2 \frac{R_e}{R_{em}} \cos(\vartheta)\right)\right) = \frac{1}{R_{em}^3} \cdot \left(1 + 3 \frac{R_e}{R_{em}} \cos(\vartheta)\right)$$

Mit dieser Abschätzung ergibt sich schließlich:

$$\begin{aligned} \bar{g}_{eff} &= \bar{g} + \frac{MG}{R_{em}^3} ((\bar{R}_{em} - \bar{R}_e) \left(1 + 3 \frac{R_e}{R_{em}} \cos(\vartheta)\right) - \bar{R}_{em}) \\ &= \bar{g} + \frac{MG}{R_{em}^3} (\bar{R}_{em} - \bar{R}_e + 3 \frac{R_e \bar{R}_{em}}{R_{em}} \cos(\vartheta) - 3 \frac{R_e \bar{R}_e}{R_{em}} \cos(\vartheta) - \bar{R}_{em}) \end{aligned}$$

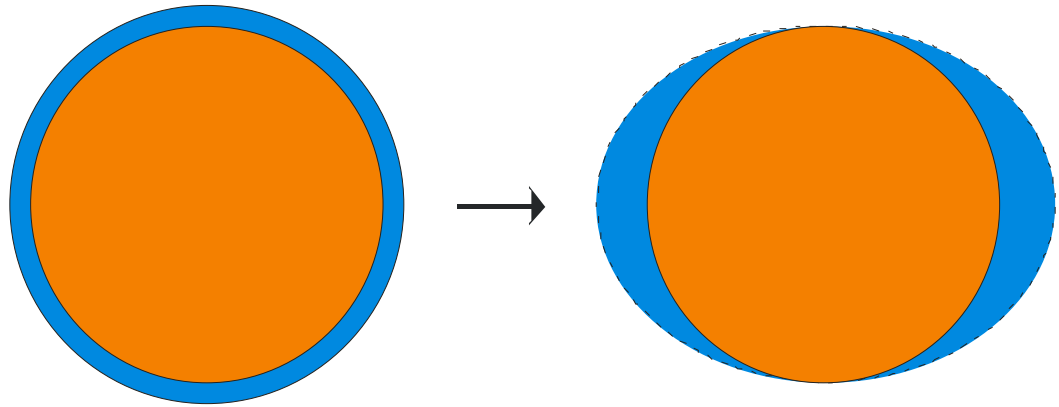
Da im ersten Cosinusterm der Klammer  $\frac{\bar{R}_{em}}{R_{em}}$  die Länge 1 besitzt, wird der zweite Cosinusterm mit  $\frac{\bar{R}_e}{R_{em}}$  vernachlässigbar klein. Somit erhält man schließlich folgende Abschätzung:

$$\bar{g}_{eff} = \bar{g} + \frac{MG}{R_{em}^3} (3R_e \cos(\vartheta) \frac{\bar{R}_{em}}{R_{em}} - \bar{R}_e)$$

Nach der anfänglichen Wahl der Richtungsvektoren ergibt sich, dass

$$\bar{g} = -g \cdot \bar{e}_r(\vartheta) \text{ ist.}$$

Nun betrachtet man  $\bar{g}_{eff}$  für den Winkel  $\vartheta$  im Intervall von  $[0, 2\pi]$ . Dies ergibt, dass die Richtung von  $\bar{g}_{eff}$  nur an den Polen normal auf die Erdkugel steht. Je weiter man  $\bar{g}_{eff}$  in Richtung Äquator betrachtet, desto mehr weicht es von  $90^\circ$  ab. Die Wassermassen auf der Erdoberfläche versuchen nun aber, normal auf die Auflagekraft und somit auch auf  $\bar{g}_{eff}$  zu stehen. Aus diesem Grund verformen sie sich so lange, bis dies der Fall ist. Diese Verformung ergibt folgende, in Abbildung 15 (übertrieben) dargestellte Form der Wasserhülle der Erde in Richtung der Verbindungslinie Erde-Mond:



**Abbildung 15: Verformung der Wasserhülle**

## 2.3 Wovon hängt die Höhe des Tiden ab

Der vorherige Abschnitt lieferte die Erklärung für Ebbe und Flut mit Hilfe des Zweikörpersystems Erde-Mond. Hierbei wurde aber die Sonne als ein bedeutender Faktor außer Acht gelassen, den ich nun in obiges Modell einfügen werde. Wie am Verlauf der Erdbahn ersichtlich ist, ist die von der Sonne auf die Erde ausgeübte Gravitationskraft erheblich stärker als jene des Mondes.

$$F_{\text{Mondgravitation}} = 2 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

$$F_{\text{Sonnengravitation}} = 3,5 \cdot 10^{22} \text{ N}$$

Die Gravitationskraft der Sonne ist also 175-mal größer als die des Mondes. Aufgrund der ca. 400-mal größeren Entfernung zur Erde ist die Gezeitenkraft der Sonne auf die Erde jedoch nur ungefähr 45% der Kraft des Mondes.

$$F_{\text{Mondgezeitenkraft}} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

$$F_{\text{Sonnengezeitenkraft}} = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

Die Lage von Sonne, Mond und Erde zueinander hat entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Tiden.

Angenommen alle drei Gestirne stehen in einer Linie. Es wäre in diesem Falle Voll- bzw. Neumond (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17) auf der Erde zu sehen.



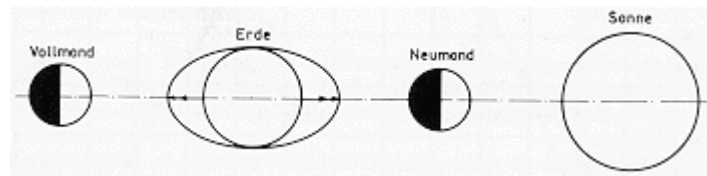


Abbildung 16: Alle drei Gestirne in einer Linie



Abbildung 17: Situation bei Springflut

In diesem Falle würden sich die vom Mond und die von der Sonne erzeugte Flut verstärken und das Wasser würde besonders stark ansteigen. Diese Art des Tidenhubs wird als Springtide bzw. als Springflut bezeichnet, wohingegen man eine besonders schwache Flut Nipptide bzw. Nippflut nennt.

Folgende wichtige Faktoren für die Höhe des Tidenhubs müssen aber ebenfalls beachtet werden:

- Erdachsenneigung
- Küstenform
- Beschaffenheit und Form des Meeresbodens
- Wind und Wetter
- Lage des Mondes bezüglich der Erdäquatorebene

Erdachsenneigung:

Bezüglich der Ekliptik ist die Erdachse um ca.  $23,5^\circ$  geneigt.

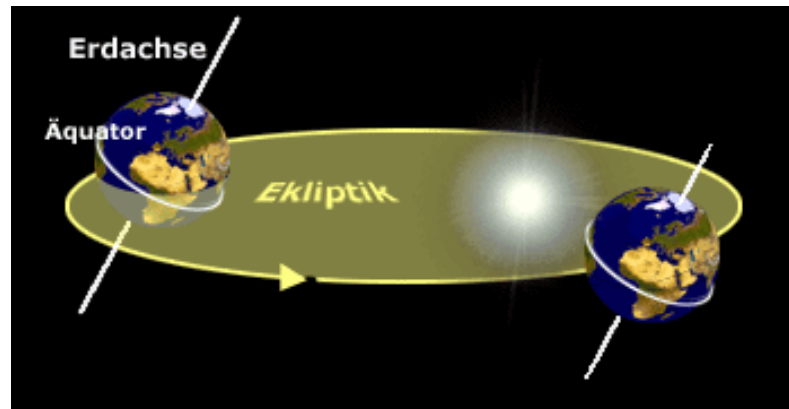


Abbildung 18: Neigung der Erdachse bzgl. der Ekliptik

Während des jährlichen Umlaufs der Erde um unser Zentralgestirn kommt es deshalb zustande, dass sowohl Nord- als auch Südhalbkugel verschiedene Stellungen bzgl. der Sonne haben, was der Grund für das Entstehen der Jahreszeiten ist (siehe Abbildung 19).

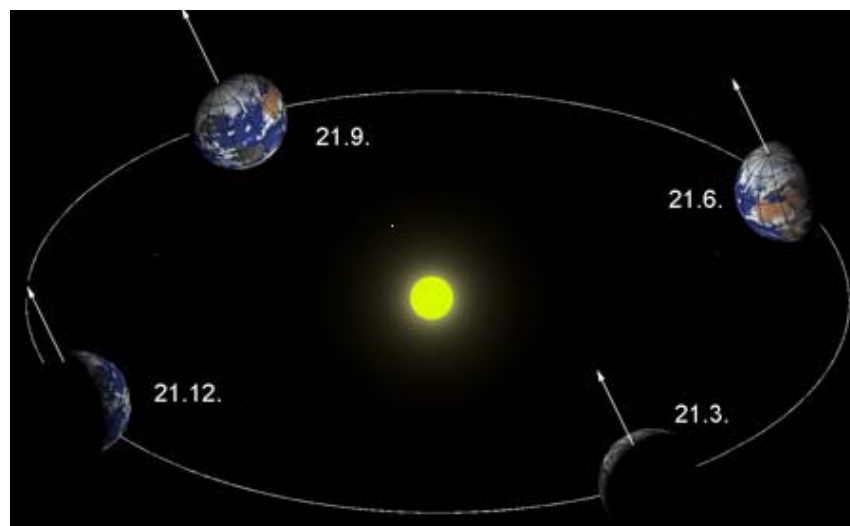


Abbildung 19: Entstehung der Jahreszeiten

Diese verschiedene Stellung zur Sonne, verbunden mit dem unterschiedlichen Abstand zu unserem Zentralgestirn während eines Jahres verursacht einen verschieden starken Tidenhub.

Grund dafür ist folgendes:

Unterschiedlicher Abstand bedeutet auch verschieden große Gravitations- bzw. Gezeitenkraft, da diese Kräfte mit wachsendem Abstand abnehmen.

Die verschiedene Stellung zur Sonne im Laufe eines Jahres bewirkt, dass die Gezeitenkraft in einem verschiedenen Winkel angreift. Sie ist am stärksten, wenn sie normal auf die Erdoberfläche wirkt.

#### Küstenform:

Bei speziellen Formen z.B. trichterförmigen Flussmündungen kann es zur Aufstauung der Wassermassen kommen, was beträchtliche Höhendifferenzen des Wasseranstieges zur Folge haben kann.

#### Beschaffenheit und Form des Bodens:

Durch spezielle Formen bzw. durch besonders steile Anstiege des Meeresbodens kann es zu Stauungen des Wassers kommen, was ebenfalls Einfluss auf die Stärke des Tidenhubs hat.

#### Wetter und Winde:

Starke Winde, wie Stürme oder Orkane können der Flutbildung ebenfalls stark beeinflussen, was ein nur sehr schwer kalkulierbares Risiko darstellt. Je nach Windrichtung können Stürme etc. die herannahende Flut stark bremsen bzw. zurückdrängen. Bei plötzlicher Änderung der Windrichtung tritt dann der gegenteilige Effekt ein, was schon oft zu Katastrophen auf und am Meer geführt hat.

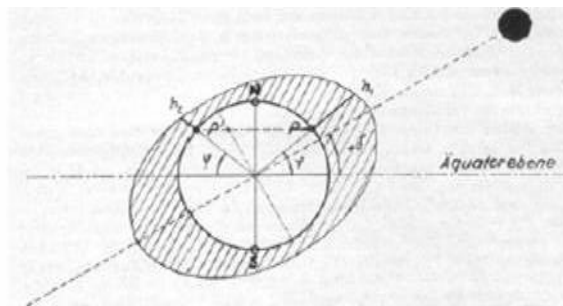
Lage des Mondes bezüglich der Erdäquatorebene:

Ebbe und Flut sind beispielsweise an der französischen Bretagneküste und der Küste Brasiliens besonders stark. Ein Grund dafür ist neben den oben genannten Einflüssen die Lage des Mondes bezüglich der Erdäquatorebene.

Die Bahn des Mondes ist gegenüber der Bahn der Erde um  $5^\circ$  geneigt. Somit steht der Mond einmal während seines Umlaufs um die Erde unter und einmal über der Äquatorebene der Erde.

Die Gezeitenkraft des Mondes, welche in der Verbindungslinie Erdmittelpunkt-Mondmittelpunkt wirkt, zieht nun die Flutberge in Richtung dieser Verbindungslinie.

Dieser Sachverhalt wird in dieser, bewusst übertrieben gezeichneten Grafik (Abbildung 20) verdeutlicht.



**Abbildung 20: Einfluss der geneigten Bahn des Mondes**

Weltweit beträgt die mittlere Höhe des Tidenhubs ungefähr zwei Meter. Dies ist aber nur ein Durchschnittswert. Denn auf dem offenen Meer nimmt der Tidenhub eine Höhe zwischen 0,5 und 0,6 Meter an. An manchen Küstengegenden hingegen kann der Höhenunterschied des Wassers zwischen Ebbe und Flut mehr als zehn Meter betragen. Der höchste Tidenhub der Welt wird jährlich an der Küste der Bretagne in Frankreich und in den Fjorden Norwegens gemessen.

An einigen Orten nimmt er überdurchschnittliche Ausmaße an:

- Penmarc'h 5,5 m
- Bucht von Saint Malo 12 m
- Mont-Saint-Michel 16m
- In einigen Fjorden Norwegens können Fluten bis 14 Meter Höhe gemessen werden. Grund dafür sind verschieden starke Küstenverengungen, welche Aufstauungen zur Folge hat.

Folgende zwei Bilder zeigen die Höhe des Tidenhubs an der französischen Küste. Während der Ebbe ist es bei Mont-Saint-Michel (Abbildung 21) einer schaulustigen Menschenkette möglich bis zu 25 Kilometer weit ins mehr Meer hinauszulaufen, was weltweit als weitester Wasserrückgang bei Ebbe in Büchern angegeben wird. Abbildung 22 zeigt einen kleinen Teil der französischen Küste vor und nach dem Eintreffen der Flut.



**Abbildung 21: Ebbe bei Mont-Saint-Michel**



**Abbildung 22: Ebbe und Flut an der franz. Küste**

Den Grund dafür anzugeben, weshalb es bei der Bewegung des Wassers bei Ebbe und Flut eine horizontale Komponente gibt, wäre zu umfangreich. Qualitativ entspricht dieses Phänomen jedoch der Ausbreitung einer stehenden Welle in einer breiten und flachen Wanne.

Für einige Leute, wie Schifffahrtskapitäne und Fischer ist das Wissen über die Höhe des jeweiligen Wasserspiegels wichtig für die Ausübung ihres Berufs. Deshalb gibt es eigens angefertigte Kataloge mit deren Hilfe man die voraussichtliche Höhe zu einer bestimmten Jahres- und Uhrzeit bestimmen kann. In diesen Katalogen wird der Tidenhub in eine Skala von 0-120 unterteilt. Ab einer Stärke von 95-100 spricht man bereits von Springtide.

Auch für Krebs- und Muschelsammler ist es interessant zu wissen, wie stark die voraussichtliche Ebbe sein wird. Diese Sammelleidenschaft wird in einigen Gebieten der Welt (z.B. Ostfriesland in Norddeutschland) als Touristenattraktion bereits vermarktet.



**Abbildung 23: Muscheln sammeln bei Ebbe**

Was bei dieser Art des Vergnügens aber nicht vernachlässigt werden darf, ist die oft unterschätzte Geschwindigkeit des Wassers beim Ansteigen der Flut. Wenn die Küstenform flach genug ist, kann das Wasser Geschwindigkeiten eines galoppierenden Pferdes (rund 50-60 km/h) erreichen.

Abbildung 24 zeigt eine Zeichnung aus dem Jahr 1965. Der Maler erlebte in China, wie rasch und heftig das Ansteigen der Flut sein kann und verewigte dies in diesem Gemälde.



**Abbildung 24: Flut bei Tsien-tang Kiang, Dietrich 1965**

Was weiters oft nicht beachtet wird und daher schon des Öfteren zu tragischen Ereignissen geführt hat, ist das Verhalten des Bodens beim Steigen des Wassers. Denn das feuchte Nass fließt nicht einfach nur schnell über den Boden dahin. Es kommt auch von unten aus dem feuchten Sand. Bevor man eigentlich genau weiß, was vor sich geht, steht man schon knöcheltief im Meerwasser. Es ist daher sinnvoll das Suchen nach den Schalentieren oder den romantischen Spaziergang an der Küste abubrechen, bevor die Flut im Anmarsch ist.

Am Ende des Kapitels über die Höhe der Gezeiten werde ich auf drei Fragen eingehen auf die ich während meiner Recherchen zu diesem Thema des Öfteren im Internet stieß.

Ich bearbeite diese deshalb etwas detaillierter, da sie so oder in ähnlicher Form durchaus im Unterricht auftauchen können und auch behandelt gehören.

#### Beispiel 1:

Warum gibt es keine Gezeiten in der Badewanne bzw. warum kann der Mond das Wasser in der Badewanne nicht heben, wenn er das Wasser eines ganzen Ozeans zu heben vermag?

Es gibt in jeder Wasseransammlung Auswirkungen der Gezeitenkraft, auch im Wasserglas, im Waschbecken und in der Badewanne. Nur darf dabei nicht außer Acht gelassen werden, dass es sich hier um Wassertiefen von nur einigen Zentimetern handelt. Auf den Weltmeeren mit einer Wassertiefe bis max. 11000 Meter ist der durchschnittliche Unterschied zwischen dem Wasserstand bei Ebbe und Flut „nur“ 0,7 Meter.



Beispiel 2:

Warum gibt es keine Gezeiten im Mensch, obwohl er zum überwiegenden Teil aus Wasser besteht?

Neben der Erklärung von Beispiel 1, welche auch hier zutrifft, gibt es noch einen zweiten Grund. Der Mensch besteht in der Tat zu mehr als zwei Dritteln aus Wasser. Doch kommt dieses nur in sehr geringem Ausmaß ungebunden vor (Blut, Magen). Der überwiegende Teil des im Körper gespeicherten Wassers ist in Muskeln etc. gebunden. Die Gezeitenkraft hat deshalb nicht die Möglichkeit diese Wassermoleküle, wie beispielsweise in den Weltmeeren einfach so frei zu bewegen.

Beispiel 3:

Warum ist die Flut in der Ostsee bezüglich jener im Atlantik vielerorts zeitversetzt und unterschiedlich hoch, obwohl man sich auf demselben Breitengrad befindet?

Diese Tatsache ist ein Paradebeispiel für die meisten oben genannten Punkte, wie die Höhe der Flut zustande kommt. Das Wasser der Ostsee muss mit der Meerenge Dänemark-Schweden ein Hindernis umlaufen, wenn es mit dem Wasser der Nordsee und des Atlantiks wechselwirken will. Diese Landsperre verhindert auf Grund der Reibung des Wassers mit den Küstenrändern und der inneren Reibung des Wassers ein rasches Eindringen der Flut aus dem Atlantik, was die zeitversetzte Flut erklärt. Zudem ist der Boden flacher und weniger tief, was einen zusätzlichen Stau effekt zur Folge hat. All dies verursacht die angesprochenen Unterschiede zwischen Ostsee und Atlantik.

## 2.4 Der tägliche Verlauf von Ebbe und Flut

Die Erde dreht sich einmal pro Tag um die eigene Achse. Diese Tatsache hat auch in Hinsicht auf Ebbe und Flut Auswirkungen. Aufgrund dieser Rotation befindet sich jede Stelle auf der Erde, abgesehen von den beiden Polen, sowohl einmal auf der dem Mond zugewandten, wie auch auf der abgewandten Seite, weshalb es täglich zweimal Ebbe und zweimal Flut gibt. Nun liegen aber beispielsweise die beiden Flutmaxima nicht exakt 12 Stunden auseinander.

Wenn sich die Erde einmal um sich selber gedreht hat, hat sich der Mond auf seiner 28 Tage dauernden Umkreisung der Erde weiterbewegt.

Somit muss sich die Erde jeden Erdtage um ca.  $\frac{24}{28}$  Stunden länger drehen, damit man wieder dieselbe Position bezüglich des Mondes hat. (Der Mond steht dabei bezüglich der Erde nicht exakt an derselben Stelle, da seine Achse einen anderen Neigungswinkel gegenüber der Ekliptik hat und der Mond somit für einen Beobachter auf der Erde eine verschiedene Höhe am Himmel aufweist. Weiters sind es nicht exakt  $\frac{24}{28}$  Stunden, da sich der Mond auch weiterbewegt, während die Erde sich in seine Richtung nähert.)

Diese ungefähr  $\frac{24}{28}$  Stunden entsprechen 50 Minuten Unterschied zwischen der jeweils ersten Flut des Tages. Somit liegt die Wartezeit von Flutberg bis zum nächsten Flutberg bei 12 Stunden und 25 Minuten.

Eine weitere „Unregelmäßigkeit“ ist die Tatsache, dass sich die jeweiligen maximalen Flutberge auf beiden Seiten der Erde nicht direkt beim mondnächsten bzw. mondfernten Punkt befinden, sondern sich leicht versetzt bewegen.

Zwei der Gründe dafür sind folgende:

Innere Reibung des Wassers:

Das Wasser braucht eine gewisse Zeit um sich zu heben und in Meerengen und Buchten einzudringen

Reibung mit der Umgebung:

Die Wassermassen bewegen sich entlang des Meeresbodens und stoßen mit den Kontinentalrändern zusammen. Dieser Widerstand an der Umgebung stellt einen weiteren Zeitverlust dar.

## 2.5 Die Nutzung der Gezeiten

### 2.5.1 Geschichtliche Entwicklung

Beim täglichen Zusammenspiel von Erde, Mond, Meere, Winde etc. sind gewaltige Kräfte und Massen am Werk. Schon vor mehr als 1000 Jahren begannen sich die Menschen deshalb zu überlegen, wie sie zumindest einen Teil dieser Wechselwirkungen zu ihrem eigenen Vorteil nützen könnten. Denn könnte man die gesamte, aufgrund der Gezeitenkraft entstandene und im Wasser gespeicherte Energie mit Hilfe von Kraftwerken gewinnen, so würde diese Form der Energieerzeugung um ein vielfaches mehr an Energie liefern, als alle bisher erschlossenen Formen der Energieerzeugung durch Wasserkraft. Mit einem mittleren Tidenhub der Meere von 0,7 Meter könnte so eine Leistung von  $5,4 \cdot 10^{10}$  PS gewonnen werden, was ungefähr  $4 \cdot 10^{13}$  Watt entspricht. Die Gesamtleistung aller laufenden Wasserkraftwerke auf der Erde betrug im Jahr 2002  $7,6 \cdot 10^9$  PS bzw.  $5,6 \cdot 10^{12}$  Watt.

Die ersten bestätigten Nutzungen von Ebbe und Flut gab es während der römischen Besatzung in England. Diese wurden damals vor allem zum Mahlen von Korn verwendet.

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen Funde, die auf das Jahr 787 n. Chr. datiert werden.



Abbildung 25: Mühle mit Mühlenstein 787 n. Chr.



Abbildung 26: Schaufeln einer antiken Mühle

Der Aufbau und die Funktion waren sehr effektiv: Während der Flut wurde Wasser hinter einen eigens dafür errichteten Damm geleitet (siehe Abbildung 27). War das Becken hinter diesem Damm gefüllt, so wurde der Zufluss gekappt. Anschließend wartete man solange, bis der Wasserspiegel aufgrund der Ebbe erheblich gesunken war. Danach ließ man das gestaute Wasser langsam über die Schaufelräder einer Mühle in Richtung Meer ablaufen (siehe Abbildung 28).

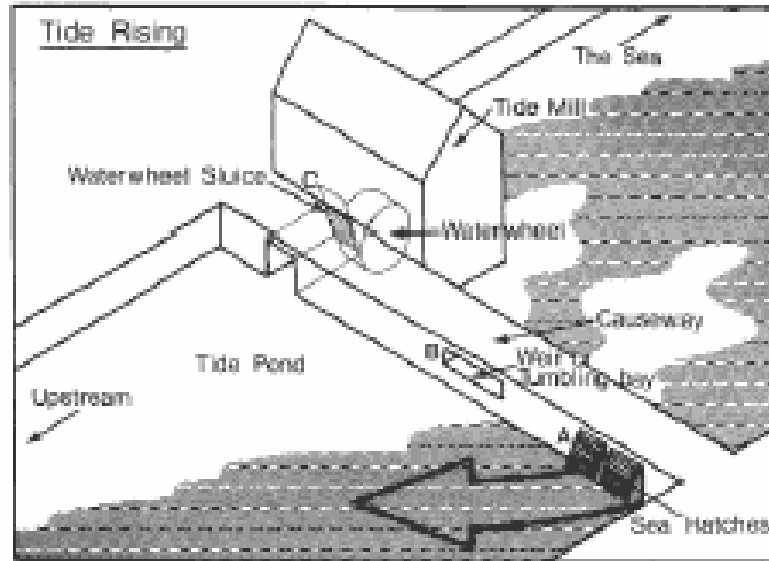


Abbildung 27: Stauvorgang während der Flut

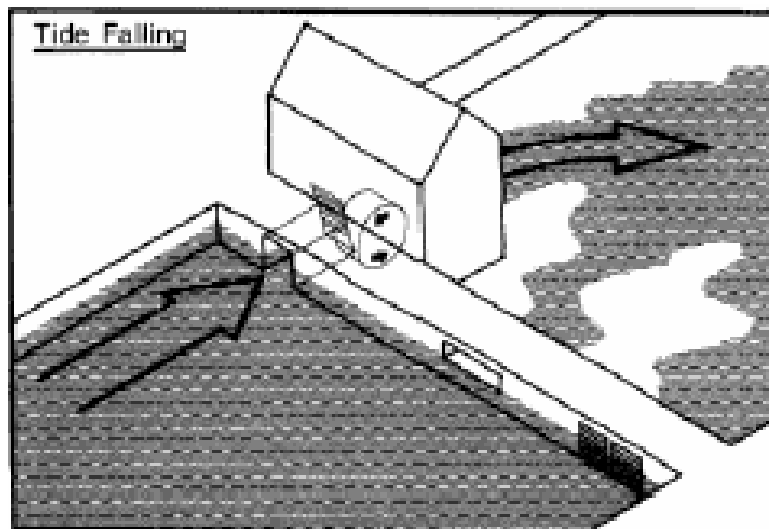
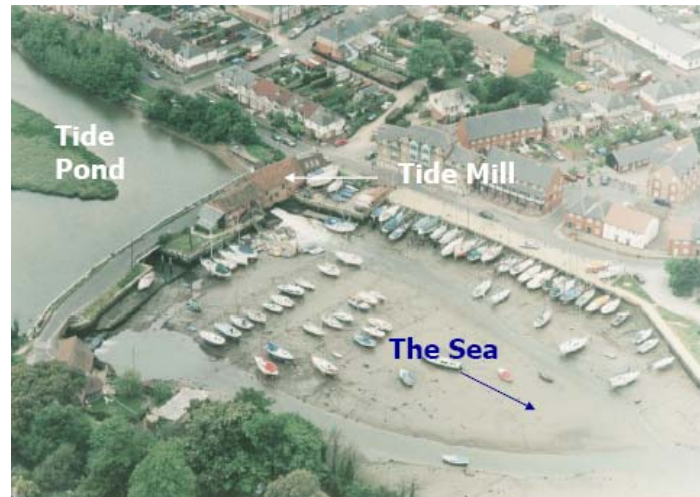


Abbildung 28: Abfließen während der Ebbe

Auch heute findet man noch Beispiele von Mühlen, die das Prinzip der Flutstauung und Ebbeableitung nutzen, wie folgendes Bild (Abbildung 29) aus England zeigt.



**Abbildung 29: Gezeitenmühle in England**

Laut schriftlicher Überlieferungen zu Beginn des 11. Jahrhunderts gab es an der französischen Bretagneküste noch eine andere Form der Nutzung der Gezeiten. Diese lag darin, dass man schwimmende Flutmühlen baute, welche folgendermaßen funktionierten:

Die Mühle schwamm verankert auf der Wasseroberfläche. Ihre Schaufelräder (meist wurden mehrere verwendet) waren dabei so positioniert, dass sie vom Fluss der heranströmenden Flut in Bewegung versetzt wurden. War die Flut vorbei und das Wasser begann zurück zu fließen, so wurden die Schaufelräder gedreht. Somit konnte auch der Wasserrückfluss genutzt werden.

Die älteste bekannte und ausführliche Arbeit diesbezüglich stammt aus dem Jahre 1438 von J. Mariano. Sie umfasst neben den genauen Skizzen auch eine detaillierte Bauausführung.

Auch heute gibt es in der Bretagne noch ca. 100 solcher Mühlen, welche sich in den vergangenen Jahrhunderten nur geringfügig verändert haben. Der dort herrschende große Tidenhub und die besondere Küstenform begünstigen die Verbreitung dieser Mühlen. Sie werden dort großteils immer noch zum Kornmahlen genutzt.

Im Laufe der Zeit versuchten Forscher und Erfinder immer wieder andere Nutzungsmöglichkeiten zu entwickeln, ohne dabei jedoch Bahn brechende Weiterentwicklungen bzw. neue Errungenschaften gemacht zu haben. Einer dieser Forscher war M. Boisner. Er war der erste der begann die Wirkungsweisen der Tiden mit Hilfe verschiedener Becken zu simulieren. Das Prinzip der Verwendung von Beckenanlagen wird heute noch in Kraftwerken praktiziert.

Im Jahr 1920 war es schließlich die französische Regierung, die sich daran machte, neue Nutzungsmöglichkeiten mit Hilfe staatlicher Förderungen zu suchen. Da zu jener Zeit viele ausbauwürdige Flüsse bereits erschlossen waren, Kohle immer teurer wurde und der Umgang mit Atomkraft noch in weiter Ferne war, beschloss man Geldmittel in die Erforschung zur verbesserten Nutzung der Gezeiten zu stecken.

Anfangs versuchte man die Energie der Wellen in Druckluft umzusetzen, was man aber bald wieder ließ, da es sich als unrentabel herausstellte.

Schließlich griff man auf das schon bewährte System der Flusskraftwerke zurück. Die Probleme hierbei waren die Dimensionen der hierfür nötigen Bauten. Trotzdem machte man sich mit der Zeit weltweit an die Entwicklung und den Bau von so genannten Gezeitenkraftwerken.



## 2.5.2 Gezeitenkraftwerke



**Abbildung 30: Gezeitenkraftwerk bei St. Malo**

Wie Abbildung 30 verdeutlicht, handelt es sich bei der Errichtung eines Gezeitenkraftwerkes um ein großes und daher kostspieliges Bauvorhaben. Damit man die auftretenden Änderungen des Wasserspiegels so optimal wie möglich nutzen kann, ist die Wahl des Standorts sehr wichtig.

Es wird hierbei vor allem auf den maximalen und durchschnittlichen Tidenhub, sowie die Küstenform Acht gegeben.

Mögliche Standorte für rentable Gezeitenkraftanlagen veranschaulicht Abbildung 31

Diese, in der Abbildung rot gekennzeichneten Küstenstreifen, kommen deshalb für einen möglichen Kraftwerksstandort in Frage, da hier die Tiden besonders stark sind.



Abbildung 31: Mögliche Standorte für ein Gezeitenkraftwerk

Im Gegensatz zu den früher verwendeten Gezeitenmühlen, die vor allem zum Mahlen von Getreide genutzt wurden, versucht man bei Gezeitenkraftwerken elektrische Energie mit Hilfe des Tidenhubs zu gewinnen. Zur optimalen Nutzung der vom Wasser verrichteten Arbeit ging man schon während der Entwicklungsphase dazu über eine modifizierte Form der bisher üblichen Schaufelräder für die Kraftwerke zu verwenden.

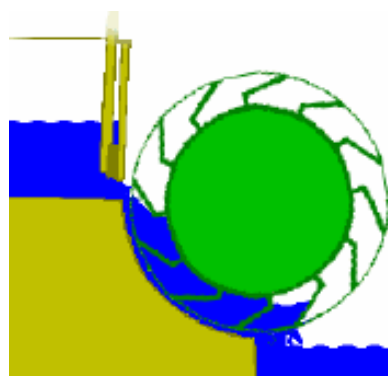


Abbildung 32: Schaufelrad einer Mühle

Im Laufe der Zeit kristallisierten sich schließlich drei verschiedene Typen von Turbinen (Bulbturbine, Rimturbine, Tubularturbine) als verbesserte

Lösungen heraus. Diese kommen je nach Küstenlage, Höhe des Tidenhubs, Bauweise, sowie Größe des jeweiligen Kraftwerks zum Einsatz.

Außerdem entwickelte man im Laufe der Zeit verschiedene Typen von Anlagen, welche je nach den geografischen bzw. finanziellen Möglichkeiten verwendet werden.

Derzeit verwendete Kraftwerke sind folgende:

- Einbeckenanlage:

In der Sperre, die das Becken vom Meer trennt, ist die Turbinenanlage eingebaut. Meist verwendet man Turbinen in beide Richtungen, damit auch das Wasser, das bei Ebbe aus dem Becken in Richtung Meer fließt genutzt werden kann. Der Vorteil dieser Anlage ist der relativ simple Aufbau und somit die Kosten. Der Nachteil liegt darin, dass diese nur während Ebbe und Flut genutzt werden kann.

- Zweibeckenanlage:

Bei der Zweibeckenanlage mit einem gemeinsamen Krafthaus wird der Wasserspiegelunterschied zwischen Hoch- und Tiefbecken genutzt. Bei diesem Typ eines Gezeitenkraftwerks wird mit zwei unterschiedlich hohen, unabhängigen Becken gearbeitet. Diese ergänzen sich bei Ebbe und Flut derart, dass keine Betriebspausen herrschen, was auch der große Vorteil gegenüber der Einbeckenanlage ist.

- Dreibeckenanlage:

Bei dieser Art des Kraftwerks ist eine Zwischenkammer zwischen den drei gleich hoch liegenden Becken und dem Meer derart eingebaut, dass jedes der Becken separat mit dem Meer verbunden werden kann. Da die drei Becken abwechselnd das Krafthaus versorgen und vom Meer neues Betriebswasser erhalten, arbeitet man hier in einem 6-Phasenbetrieb.

Eine Erweiterung dieser Art von Anlage ist der Bau von drei verschiedenen hoch liegenden Becken. Mit Hilfe von Schleusensystemen und Pumpen kann hier eine sehr effiziente Nutzung erreicht werden. Der Nachteil dieser Anlage liegt darin, dass die drei Becken, sowie die Schleusenanlage sowohl große finanzielle als auch und geografische Möglichkeiten (nur möglich, wenn Küste ein Gefälle aufweist) verlangen.

Bei allen drei Typen kann man weiters mit Hilfe der Änderung der Turbinenlage eine optimierte Nutzung erreichen.

Das größte derzeit existierende Gezeitenkraftwerk steht bei La Rance in Frankreich. Die Größe dieser Anlage ist beeindruckend, was folgende Daten veranschaulichen:

- La Rance betreibt 24 Bulb-Turbinen von denen jede 470 Tonnen wiegt und deren Richtung verändert werden kann
- Die Mauer der Anlage ist 750 Meter lang
- Es wurde 25 Jahre lang gebaut, bevor man La Rance 1967 in Betrieb nahm



**Abbildung 33: Das Gezeitenkraftwerk in La Rance**

La Rance könnte jedoch nicht mehr lange die größte Anlage sein, denn bei Long Island an der New Yorker Küste ist ein Projekt geplant (siehe Abbildung 34), welches kurz vor Baubeginn steht. Dieses Kraftwerk hat deswegen sehr gute Verwirklichungschancen, weil man den dort nötigen Damm als Straßenverbindung nutzen will, was eine wesentliche Entlastung des überforderten New Yorker Verkehrs bedeuten würde.

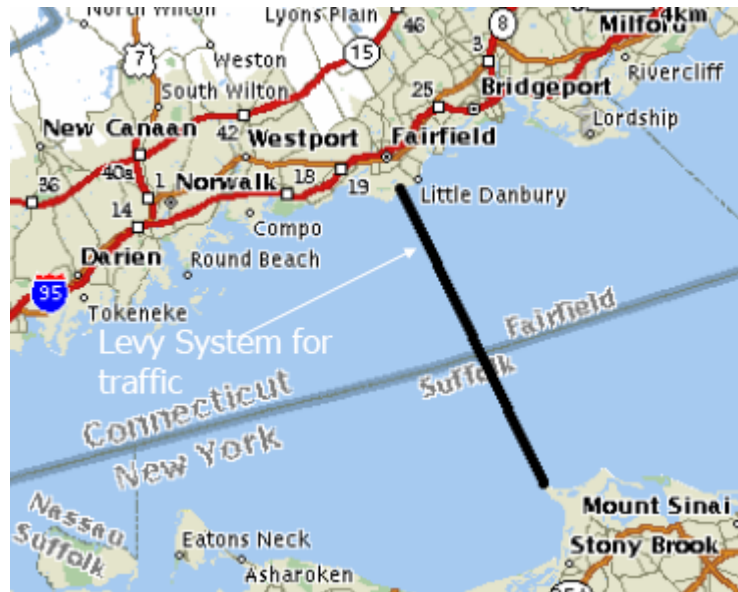


Abbildung 34: Long Island Sound Barrage

Neben der Nutzung des Damms für eine Straße gibt es noch weitere Punkte, die für bzw. gegen den Bau einer Gezeitenkraftanlage anstelle einer alternativen Form der Energiegewinnung sprechen.

Einige der wichtigsten sind hier angeführt:

#### Vorteile:

- Es besteht eine gute Kalkulierbarkeit der Stromerzeugung, da die Gezeiten täglich pünktlich einsetzen
- Ein Gezeitenkraftwerk ist eine langfristige Investition, da es immer Gezeiten geben wird
- Die Energie bringende Materie, nämlich Wasser ist umsonst
- Der Bau einer mittelgroßen Anlage kostet ca. 5-6 Milliarden Euro und hat jährliche Wartungskosten von circa 7-8 Millionen Euro, was verglichen mit z.B. einem Atomkraftwerk günstig ist
- Die Gefahr einer Überschwemmung der nahen Küste wird gesenkt, da der Damm strömungsregulierend wirkt

- Die Umwelt wird nur geringfügig beeinflusst, da keine Abfallprodukte und nur wenig Abgase (Dieselmotoren) entstehen
- Der Platzaufwand ist verglichen mit beispielsweise einem Atomkraftwerk gering, da ein Großteil der Bauten im und unter Wasser stehen

#### Nachteile:

- Es kommen auf der ganzen Welt überhaupt nur etwa 30 Gebiete für den Standort eines Gezeitenkraftwerks wegen des nötigen Tidenhubs in Frage
- Der vom Meer herangeführte Dreck und Schlamm, die so genannte Verlandung, kann mit Hilfe der zu schwachen Strömung nicht zur Genüge abtransportiert werden, was groß angelegte und kostspielige Baggerarbeiten nötig macht
- Gezeiten können nicht oder nur sehr schwer (Schleusensystem) dem, der Tageszeit spezifischen Stromverbrauch (Spitzenstrom) angepasst werden
- Die Effektivität ist, verglichen mit beispielsweise einem Atomkraftwerk gering. La Rance, das größte Kraftwerk seiner Art der Welt, liefert durchschnittlich 5630 GWh/Jahr bei einer elektrischen Leistung von 860 MW und einer Laufzeit von insgesamt 198 Tagen mit 18 Stunden pro Tag. Das macht nur 0,2% der Stromversorgung Frankreichs aus. Ein modernes AKW hat eine Leistung von bis zu 2GW, womit es rund 17500GWh/Jahr liefert.
- Bei Kraftwerken, wie beispielsweise dem geplanten Long Island Sound Barrage können natürliche Fischwanderungen erheblich gestört werden

Neben den bisher verwendeten Staumauerwerken von Gezeitenkraftwerken wird weiterhin an einer Verbesserung gearbeitet. Hierbei wird nicht nur versucht eine optimierte Form von Gezeitenkraftwerken mit Dämmen und Mauern zu finden, sondern die Verwendung anderer Bauweisen und –arten zu erforschen.

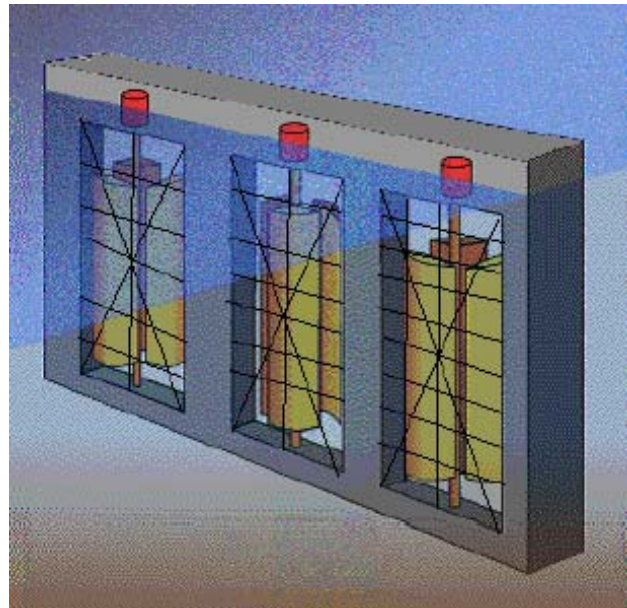
Mögliche Verwirklichungsansätze die Gezeitenenergie zu nutzen, die aber allesamt noch in der Entwicklungsphase stecken, könnten irgendwann folgendermaßen aussehen:



**Abbildung 35: Nutzung ähnlich der Windkraft**

Projekte, wie sie Abbildung 35 zeigt, in denen versucht wird den beim Wechsel von Ebbe und Flut entstehenden Fluss des Wassers mit Hilfe von windradähnlichen Konstruktionen zu nutzen sind schon gebaut worden und werden derzeit in den USA auf ihre Effizienz und Rentabilität getestet.





**Abbildung 36: Propellersystem im Wasser stehend**

Abbildung 36 zeigt den Versuch die Strömungen beim Wechsel der Gezeiten mit Hilfe von Propellersystemen zu nutzen. Dieses Projekt ist jedoch erst in der frühen Entwicklungsphase (Stand 2003), gilt jedoch als viel versprechende Alternative der Energieerzeugung.

### **3 Der Einfluss der Gezeitenkraft auf den Erdmond**

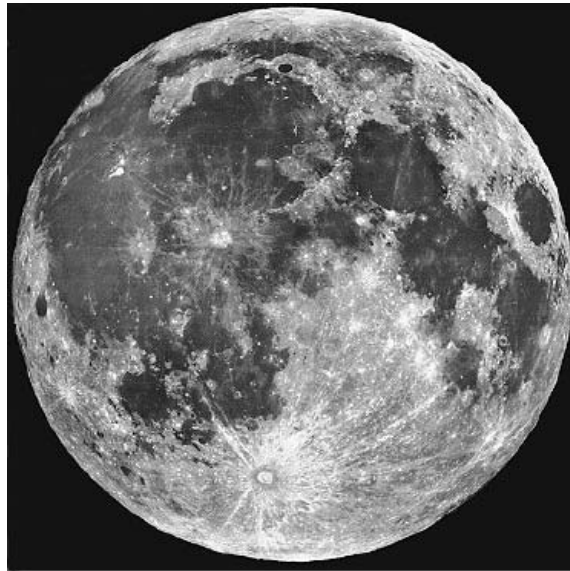


Abbildung 37: Die Erdzugewandte Seite des Mondes

#### **3.1 Allgemeines**

Schon seit Jahrtausenden befassen sich die Menschen mit dem Erdmond, dem erdnächsten Himmelskörper.

Im Vordergrund dieser Erforschungen stand unter anderem der Einfluss unseres Trabanten auf das Leben und die Menschen der Erde.

Folgende Zahlen sind ein Auszug der derzeit über den Mond bekannten Daten:

Radius:	1738 <i>km</i>
Masse:	$7,35 \cdot 10^{22}$ <i>kg</i>
Umlaufzeit:	$2,36 \cdot 10^6$ <i>s</i>
Mittlere Entfernung Erde-Mond:	384700 <i>km</i>
Mittlere Dichte:	$3,34 \cdot 10^3$ <i>kgm<sup>-3</sup></i>

Mit Hilfe dieser Daten ist ersichtlich, dass der Mond in etwa 27 % der Erdgröße und ungefähr  $\frac{1}{81}$  der Erdmasse besitzt. Weiters ist die Fallbeschleunigung auf dem Mond nur ca.  $\frac{1}{6}$  so groß wie die auf der Erde, was man beispielsweise an den Hüpfbewegungen der US-amerikanischen Astronauten bei den Mondlandungen sehen konnte.

Aufgrund seiner geringen Dichte (nur ca. 60 % der Dichte der Erde) und der, verglichen mit der Erde relativ geringen Größe des Mondes, besitzt er nur wenig Masse. Deshalb war er nicht in der Lage gasförmige Stoffe über längere Zeit an sich zu binden, weshalb der Mond weder eine Atmosphäre, noch Wasser oder Eis auf der Oberfläche besitzt.

Auf der Mondoberfläche, welche von Kratern übersät ist, herrschen, verglichen mit der Erde, zum Teil extreme Temperaturen. Diese können von ca. minus 150° C bis hin zu plus 120° C reichen. Die großteils mit freiem Auge sichtbaren Krater und Meere bedecken ca. 34 % der Mondoberfläche. Meere nennt man dabei die großen dunkel erscheinenden Ebenen, welche ihre Farbe aufgrund der chemischen Zusammensetzung (Basaltlaven, Mg, K, Al) des Bodens erhalten.

Wie der Erdmond entstanden ist, sind sich die Wissenschaftler nicht einig. Grundsätzlich gibt es vier gängige Methoden die Entstehung unseres Mondes zu erklären.

- Der Mond war ein Teil der damals noch flüssigen Erde, welcher sich im Laufe der Zeit abgespalten hat
- Erde und Mond haben sich gleichzeitig als so eine Art „Doppelplanet“ gebildet
- Der Mond ist in einem anderen Teil unseres Sonnensystems entstanden und ist irgendwann von der Schwerkraft der Erde eingefangen worden
- Die Erde ist mit einem anderen Himmelskörper kollidiert, der, wie auch die Erde, in halbflüssigem Zustand war und in etwa die Größe des Mars hatte. Dabei vermischte sich Material der Mäntel beider

Himmelskörper, welche ins All geschleudert wurden. Das daraus entstanden Gebilde wurde schließlich unser Erdmond.

Welche dieser Theorien zutrifft ist noch unklar, da es für jede der vier gute Argumente gibt. Einig ist man sich grundsätzlich nur über das Alter des Mondes, das mit ca.  $4,5 \cdot 10^9$  Jahren beziffert wird. Diese Altersangabe wird dadurch gestärkt, dass man das vom Mond mitgebrachte Gestein auf ca.  $4,2 \cdot 10^9$  Jahre alt bestimmt hat.

### 3.2 Gebundene Rotation und Libration

Die heutige Wissenschaft nimmt an, dass vor ca.  $4,5 \cdot 10^9$  Jahren, also direkt nach der angenommenen Entstehung des Erdmondes der Abstand Erde-Mond nur rund  $\frac{1}{10}$  der heutigen Entfernung betrug. Dementsprechende Unterschiede gab es auch in den damals herrschenden Kräften zwischen den beiden Himmelskörpern. Die Gravitationskräfte waren somit ca. 100-mal so stark wie heute und die Gezeitenkräfte ca. 1000-mal.

Da sich die Oberflächen der beiden Himmelskörper noch nicht verfestigt hatten, waren die Auswirkungen der Gezeitenkraft verglichen mit denen von heute stärker. Die Flutberge der Kruste auf dem Mond werden kilometerhoch geschätzt, die zu jener Zeit auf der Erde bis hin zu 10 Meter.

Diese starken Auswirkungen der Gezeiten walkten Erde und Mond somit durch. Die so durch innere Reibung entstehende Energie hatte zur Folge, dass sich Erde und Mond erwärmten.

Die Eigendrehung der Erde um ihre Achse ist schneller als die Drehung des Mondes um die Erde. Da die Bewegung der Flutberge an die Stellung des Mondes bezüglich der Erde gekoppelt ist, versucht die Erde unter den Flutbergen hindurch zu rotieren. Aufgrund der Reibung zwischen Erde und dem Meer schiebt die Rotation der Erde die Flutberge vor sich her, womit sie nicht mehr genau in der Verbindungslinie Erde-Mond liegen. Diese Reibung zwischen der Erde und den Flutbergen hat zur Folge, dass sich die Rotation der Erde verlangsamt.

Da die Gezeitenkraft der Erde auf den Mond stärker ist als die Gezeitenkraft des Mondes auf die Erde, bedeutete das, dass die Eigenrotation des Mondes stärker gebremst wurde als jene der Erde. Dies ergab im Laufe der Zeit, dass sich der Mond während einer Umdrehung

um die Erde nur mehr einmal um seine Achse dreht. Dieser Zustand wird als gebundene Rotation bezeichnet.

Somit kann man von der Erde aus stets nur die gleiche Seite des Mondes sehen.

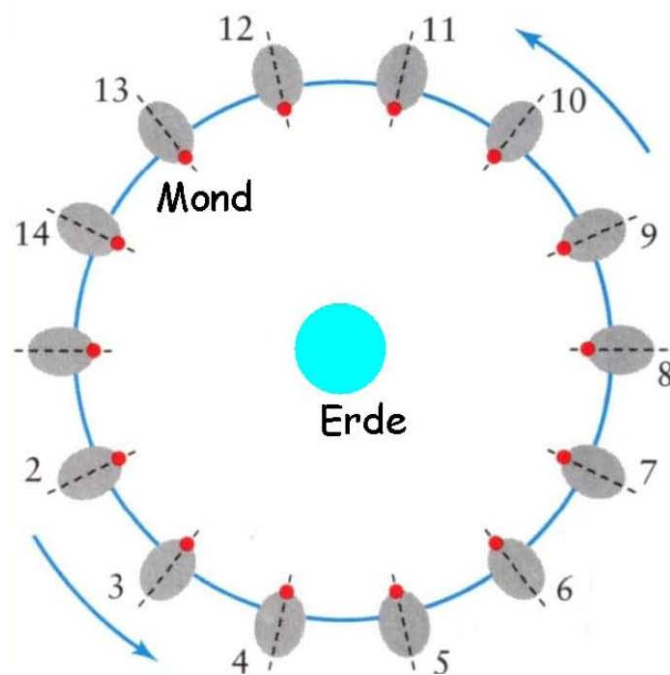


Abbildung 38: Gebundene Rotation des Mondes

Abbildung 38 soll mit Hilfe eines fix markierten, hier rot gekennzeichneten Punktes zeigen, wie sich die Lage des Mondes bei der Umlaufbewegung der Erde verhält.

Dieses jetzige Verhalten des Mondes bezüglich der Erde hatte zur Folge, dass die erd zugewandte Seite (siehe Abbildung 39) von Astronomen längst genau kartographisiert war, als über die erd abgewandte Seite noch nichts bekannt war.

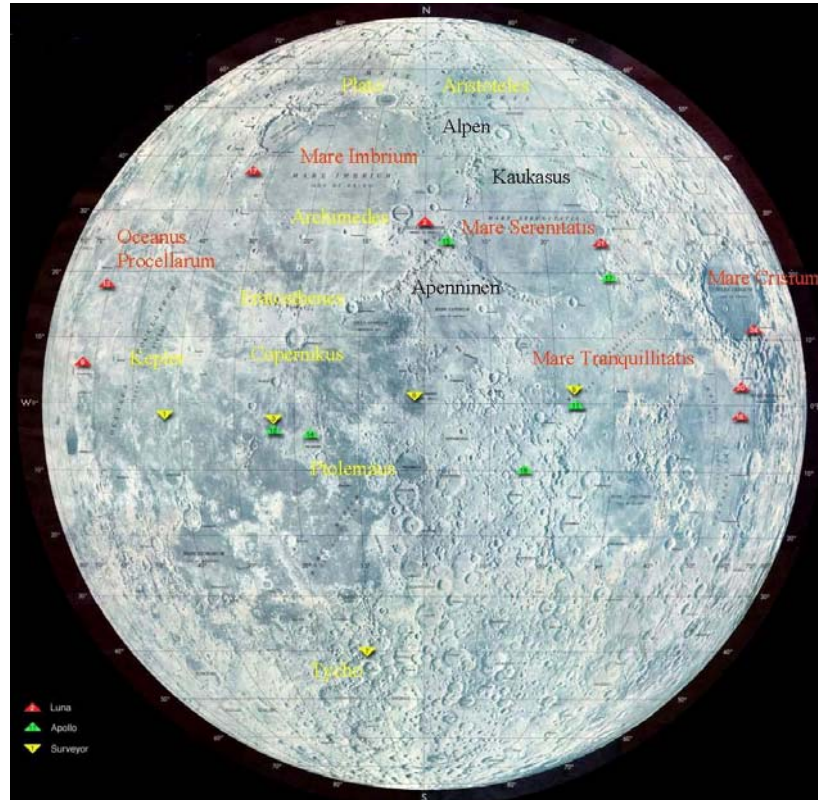


Abbildung 39: Kartographie der Erd zugewandten Seite

Bei dieser Kartographie wurden vor allem Namen von berühmten Astronomen, sowie Erdgebirgen verwendet.

Da man lange Zeit über die Mondrückseite nichts wusste, wurde sie beispielsweise als „The dark side of the moon“ (Pink Floyd-Song) bezeichnet.

Diese Namensgebung trifft jedoch deshalb nicht zu, da beide Seiten des Mondes den Strahlen der Sonne gleich oft ausgesetzt sind (siehe Abbildung 40).

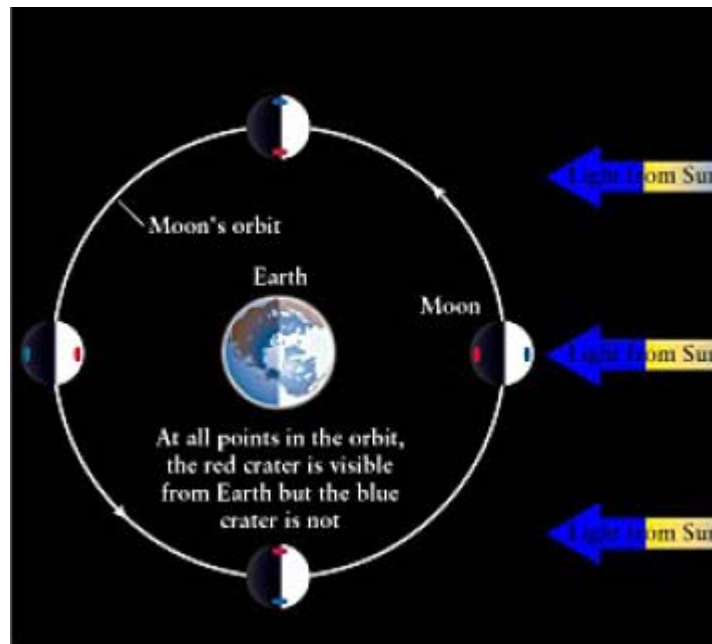


Abbildung 40: Beleuchtung des Mondes

Erst im Jahre 1959 war die damalige Sowjetunion mit Hilfe der rasch fortschreitenden Technik in der Lage, die der Erde abgewandte Seite mit Satelliten zu untersuchen.

Aufgrund der gebundenen Rotation sollte man von der Erde stets die gleiche Mondhalbkugel sehen. Man kann bei der Beobachtung des Mondes über einige Nächte hinweg jedoch feststellen, dass die von der Erde aus gesehene Hälfte Schwankungen unterliegt. Diese Schwankungen gibt es sowohl in der Länge (d.h. bezüglich der Mond-Längengrade), als auch in der Breite (bezüglich der Mond-Breitengrade) und wird Libration genannt.

#### Libration in der Länge:

Der Grund für die Libration der Länge liegt in der elliptischen Bahn des Mondes um die Erde. Aufgrund dieser Bahn kann man die in Abbildung 41 rot dargestellten Flächen des Mondes zusätzlich sehen.



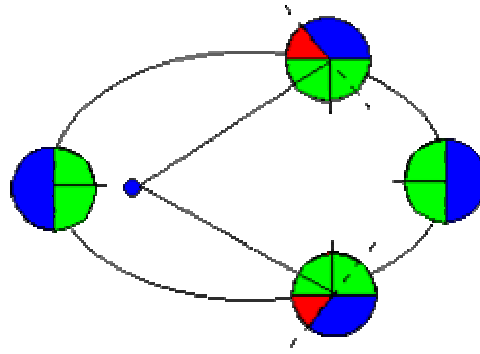


Abbildung 41: Libration in der Länge

Libration in der Breite:

Die Ursache der Libration in der Breite ist die Neigung der Mondachse zur Umlaufebene des Mondes um  $6^{\circ} 40'$ .

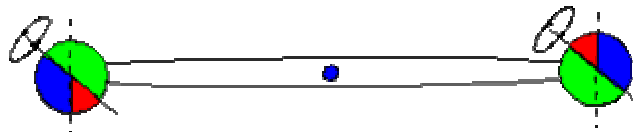
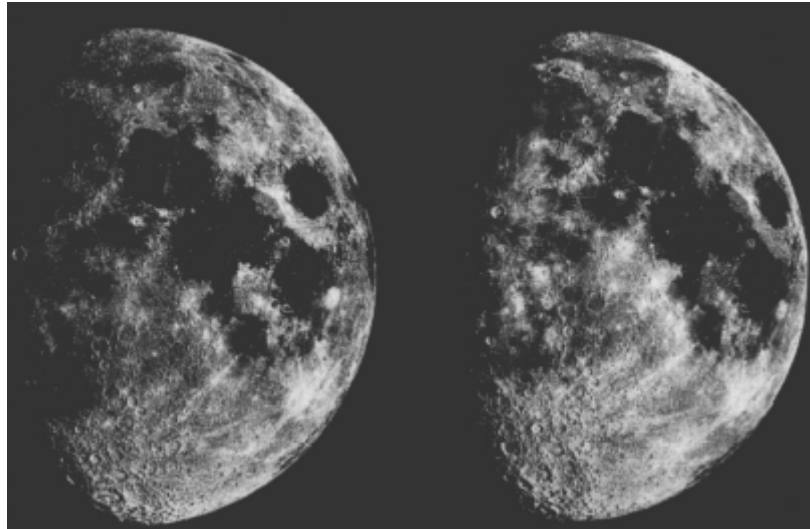


Abbildung 42: Libration in der Breite

Die roten Teile in Abbildung 42 können aufgrund der Libration in der Breite zusätzlich gesehen werden, die grünen Teile würde man sehen, wenn die Rotationsachse des Mondes senkrecht zur Umlaufbahn stehen würde.

Diese beiden Arten der Libration ermöglichen nun, dass wir von der Erde aus etwas mehr als nur eine Hälfte des Mondes beobachten können, da er stetig zwischen einer leichten Vor- und Rücklage bzw. seitlich pendelt. Alles in allem ist man deshalb in der Lage beinahe 60 % der Mondoberfläche im Laufe eines Jahres zu beobachten. Abbildung 43 zeigt den Mond in den beiden unterschiedlichen Extremlagen.



**Abbildung 43: Extremlagen der Libration**

Die Verschiebung der Flutberge aufgrund der Eigenrotation der Erde hat noch einen zweiten Effekt. Da sich die Flutberge nicht in der direkten Verbindungslinie Erde-Mond befinden wirkt die Gezeitenkraft des Mondes nicht parallel zur dieser Verbindungslinie.

Aufgrund des Newtonschen Axioms „Kraft ist gleich Gegenkraft“ wirkt nun auch eine Kraft auf den Mond, die nicht parallel zur Verbindungslinie ist.

Diese Kraft kann in eine Normalkomponente und eine Horizontalkomponente zerlegt werden. Die Horizontalkomponente der Kraft beschleunigt den Mond, wodurch er sich im Laufe der Zeit von der Erde entfernt.

Der Abstand vergrößerte sich in den Jahrmilliarden immer mehr, bis er schließlich auf das Zehnfache der ursprünglichen Entfernung angewachsen war. Mit dem größer werdenden Abstand wurde die Gezeitenkraft jedoch immer kleiner. Dies war nötig, dass sowohl auf der Erde, als auch auf dem Mond eine Verfestigung der Oberfläche einsetzen konnte. Denn bisher hatten das ständige Durchkneten der Oberfläche und die starke Erwärmung durch die innere Reibung dies unmöglich gemacht. Diese

Verfestigung ist beim Mond dermaßen fortgeschritten, dass man bei ihm im Gegensatz zur Erde annimmt, dass die abgekühlte Kruste einen Großteil des gesamten Mondvolumens ausmacht. Heutzutage heben die gegenseitigen Gezeitenkräfte von Erde und Mond die Oberflächen nur mehr wenige Zentimeter an.

## **4 Die Planeten und Monde im Einfluss der Gezeitenkraft**

Im vierten Kapitel meiner Arbeit werde ich jene Planeten und Monde unseres Planetensystems behandeln, die aufgrund der jeweils vorherrschenden Gravitations- bzw. Gezeitenkräfte besondere Merkmale bzw. Auswirkungen vorweisen. Da dies nicht bei allen übrigen acht Planeten und deren Monden der Fall ist, habe ich jene ohne Relevanz für meine Arbeit nicht erwähnt.

### **4.1 Rochesche Stabilitätsgrenze**

Wie in Kapitel 1.2 besprochen, hängt die Größe der Gezeitenkraft vom Abstand der betroffenen Körper oder Objekte ab.

Im Jahre 1848 stellte sich der französische Mathematiker Edouard Albert Roche (1820 – 1883) nun aber die Frage was denn passieren würde, wenn sich beispielsweise ein Satellit einem Himmelskörper, dessen Masse größer ist, nähern würde. Die Gezeitenkraft würde aufgrund ihrer Abhängigkeit mit der dritten Potenz des Abstands rasch zunehmen und würde deshalb immer stärker versuchen den Satelliten auseinander zu reißen.

Vorerst halten die eigene Schwerkraft und die zwischenmolekularen Kräfte, die wir hier aber außer Acht lassen, den sich nähernden Satelliten zusammen. Irgendwann jedoch würde jener kritische Punkt erreicht sein, an dem die beiden Kräfte in einem Gleichgewicht sind. Rückt der Satellit nun noch näher an den massereicheren Himmelskörper heran, so würde dieser beginnen den Satelliten zu zerreißen.

Aufgrund dieser theoretischen Überlegung stellte Roche nun Berechnungen an diese Stabilitätsgrenze genau festzulegen.

Folgende Herleitung ist eine Möglichkeit der Bestimmung der Rocheschen Stabilitätsgrenze:

Angenommen man nimmt der Einfachheit halber an, dass ein Körper der Masse  $m$  aus zwei gleichschweren Teilen mit Masse  $m_1 = m_2 = \frac{m}{2}$  besteht. Dieser nähert sich nun einem massereicheren Körper mit Masse  $M$ , wie es in Abbildung 44 dargestellt ist.

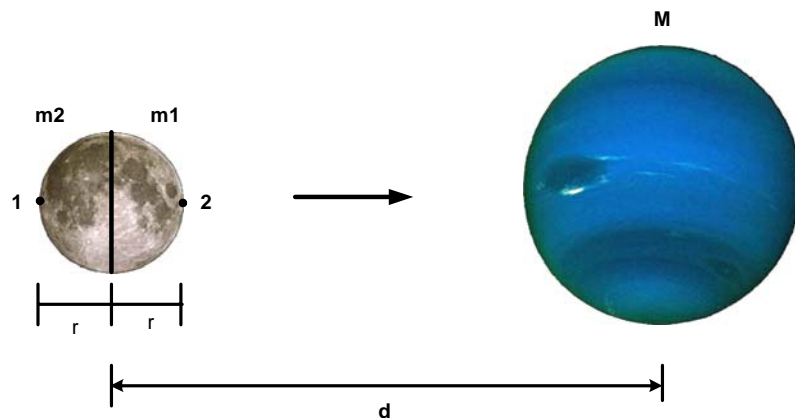


Abbildung 44: Satellit nähert sich Rochescher Stabilitätsgrenze

An den Punkten 1 bzw. 2 wirken nun folgende Kräfte:

$$F_1 = GMm \cdot \frac{1}{(d+r)^2} \quad \text{bzw.} \quad F_2 = GMm \cdot \frac{1}{(d-r)^2}$$

Die Kräftedifferenz  $\Delta F$  die versucht den Satelliten zu zerreißen lässt sich nun folgendermaßen berechnen:

$$\Delta F = F_2 - F_1 = GMm \cdot \left( \frac{1}{(d-r)^2} - \frac{1}{(d+r)^2} \right)$$

$$\begin{aligned}
&= GMm \cdot \frac{(d+r)^2 - (d-r)^2}{(d-r)^2 \cdot (d+r)^2} \\
&= GMm \cdot \frac{d^2 + 2dr + r^2 - d^2 + 2dr - r^2}{(d^2 - r^2)^2} \\
&= GMm \cdot \frac{4dr}{(d^2 - r^2)^2} \\
&= GMm \cdot \frac{\frac{4dr}{d^4}}{\frac{d^4}{d^4} + \frac{2d^2r^2}{d^4} - \frac{r^4}{d^4}} \\
&= GMm \cdot \frac{\frac{4r}{d^3}}{1 + \frac{2r^2}{d^2} - \frac{r^4}{d^4}}
\end{aligned}$$

Da man  $\frac{d}{r} \gg 1$  annehmen kann, folgt daraus, dass der Nenner gleich 1 wird.

Somit ergibt sich für die Kräftedifferenz folgendes:

$$\Delta F \cong GMm \cdot \frac{4r}{d^3}$$

Wenn man nun davon ausgeht, dass der sich nähernden Körper rein von der Gravitation zusammengehalten wird und wir weiterhin annehmen, dass beide Hälften gleiche Masse besitzen, so ergibt sich für die herrschende Gravitationskraft folgendes:

$$F_G = G \cdot \frac{\frac{m}{2} \cdot \frac{m}{2}}{r^2} = G \cdot \frac{m^2}{4r^2}$$

Falls sich nun der Satellit zu sehr dem massereicheren Himmelskörper nähert, tritt irgendwann der Fall ein, dass  $\Delta F > F_G$  wird und er auseinander gerissen wird.

$$GMm \cdot \frac{4r}{d^3} > G \cdot \frac{m^2}{4r^2} \Rightarrow M \cdot \frac{4r}{d^3} > \frac{m}{4r^2}$$

Somit ergibt sich für die Rochesche Stabilitätsgrenze:

$$d^3 < \frac{M}{m} \cdot 16 r^3 \quad \text{bzw.} \quad d < r \cdot \sqrt[3]{16 \frac{M}{m}}$$

In der Literatur wird dieses Ergebnis des Öfteren auch mit Hilfe der Dichten und mit dem Radius des größeren der beiden betroffenen Körper angegeben.

Hierfür werden beide der Einfachheit halber als Kugeln angenommen, was Folgendes ergibt:

$$M = \frac{4}{3} \rho_M R^3 \pi \quad \text{bzw.} \quad m = \frac{4}{3} \rho_m r^3 \pi$$

$$d < R \cdot \sqrt[3]{16 \frac{\rho_M}{\rho_m}}$$

Diese Formel wird deshalb oft bevorzugt, da die einzelnen Radien der Himmelskörper bekannt sind und sich die Dichte bestimmen lässt.

Beispiele für die Verwendung dieser Abschätzung folgen bei der Besprechung der Planeten in den kommenden Kapiteln.

Eine eindrucksvolle, optische Demonstration konnte im Jahre 1994 von den Astronomen beobachtet werden. Shoemaker-Levy 9, ein Komet der sich damals spiralförmig dem Jupiter näherte, wurde schon längere Zeit von verschiedenen Astronomen untersucht.

Man berechnete, wann er die Rochesche Stabilitätsgrenze erreichen würde und konnte anschließend das erwartete Resultat beobachten. Shoemaker-Levy 9 wurde von den Gezeitenkräften, die Jupiter auf ihn ausübte in über 20 Fragmente zerrissen, die im Juli 1994 mit dem Gasriesen kollidierten und gigantische Impakte verursachten.

Folgende Aufnahmen konnte damals von der U.S.-amerikanischen Weltraumbehörde NASA während der Zerstörung des Kometen gemacht werden.

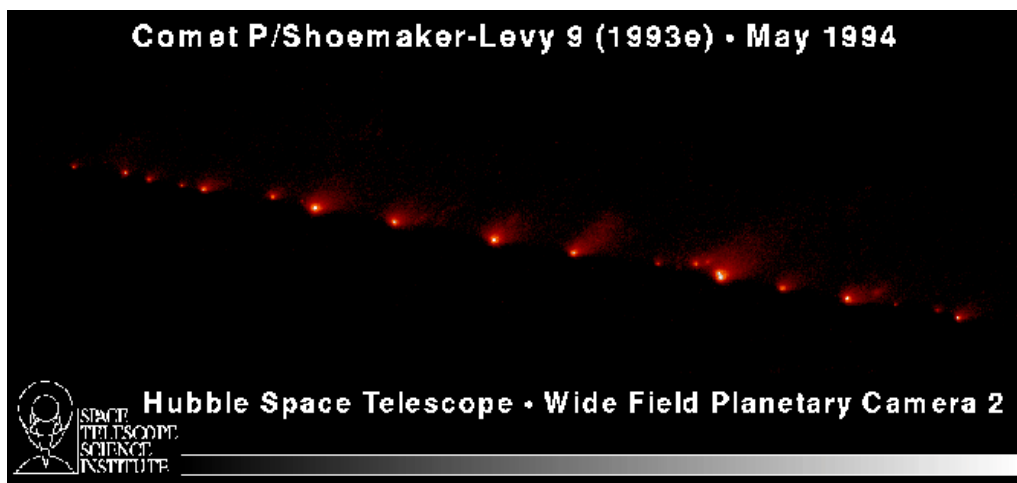


Abbildung 45: Fragmente von Shoemaker-Levy 9 stürzen auf Jupiter

Während meiner Rechenchen stieß ich mehrere Male auf eine Frage, die ich hier abschließend behandeln werde.

„Wie ist es möglich, dass z.B. künstliche Satelliten so nahe um die verschiedenen Planeten fliegen können, ohne dabei durch die Gezeitenkraft zerstört zu werden?“



Tatsächlich fliegen die diversen Beobachtungssatelliten bzw. auch unsere Kommunikationssatelliten innerhalb der Roche'schen Stabilitätsgrenze um die betreffenden Planeten.

Die kritische Grenze liegt bei der Erde beispielsweise bei 18470 km, beim Jupiter 175000 km und beim Saturn 147000 km, was von den einzelnen Satelliten zum Teil erheblich unterschritten wird.

Die Antwort dieser Frage liegt in der Definition der Rocheschen Stabilitätsgrenze:

Das Phänomen des Zerrissenwerdens trifft nur für Körper zu, die (fast) ausschließlich aufgrund ihrer Eigengravitation zusammengehalten werden.

## 4.2 Merkur

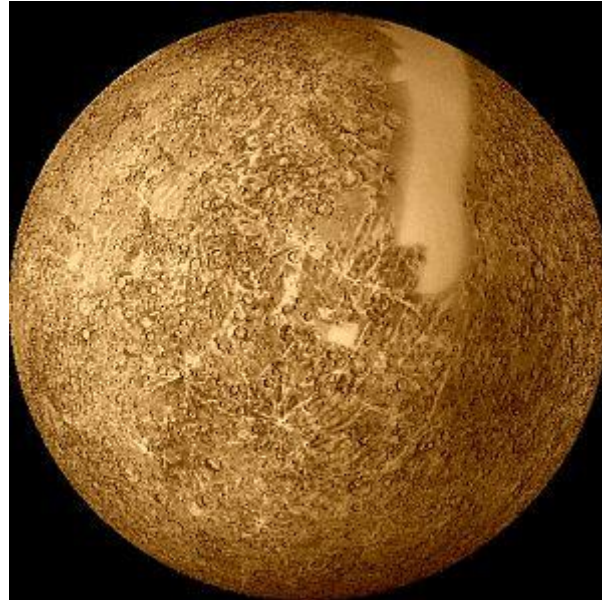


Abbildung 46: Merkur

Merkur ist der sonnennächste und kleinste Planet unseres Sonnensystems. Aufgrund des geringen Abstands zur Sonne herrschen auf der Oberfläche extreme Temperaturdifferenzen. Auf der Sonnen zugewandten Seite kann es im Extremfall bis zu  $+430^{\circ}\text{C}$  erreichen, hingegen können auf der abgewandten Seite Temperaturen unter  $-180^{\circ}\text{C}$  herrschen.

Hier einige weitere Daten zum Planeten Merkur:

Durchmesser:	$4876 \text{ km}$
Dichte:	$5,43 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$
Masse:	$3,3 \cdot 10^{23} \text{ kg}$
Bahnneigung zur Ekliptik:	$7^{\circ}00'11''$
Atmosphärendruck:	$2 \cdot 10^{-13} \text{ bar}$
Abstand zur Sonne:	<i>Perihel</i> : $0,3075 \text{ AE}$ <i>Aphel</i> : $0,4667 \text{ AE}$
Rotationsperiode:	$58,646 \text{ Erdtage}$

Merkur ist mit seinen 4876 km nicht viel größer als unser Erdmond (3476 km) und sogar kleiner als Saturnmond Titan (5150 km).

Im Laufe der Jahrmilliarden seit der Entstehung unseres Sonnensystems hat die Gezeitenkraft, ähnlich wie beim Erde-Mond-System, bei der sie sogar zur gebundenen Rotation geführt hat, auch das Rotationsverhalten des Merkur stark beeinflusst. Grund dafür war der geringe Abstand zur massereichen Sonne.

Beobachtungen hierfür waren lange Zeit schwierig, da die nötigen Geräte noch nicht weit genug entwickelt waren. Nikolaus Kopernikus, der Begründer des heliozentrischen Weltbildes beispielsweise, hat den Merkur als Planeten gar nicht erwähnt.

Eine weitere Schwierigkeit lag darin, dass der Merkur so nahe an der Sonne liegt. Nur kurz nach Sonnenuntergang bzw. in der Morgendämmerung besteht die Möglichkeit der Beobachtung des Merkurs. Kopernikus hatte Merkur zwar gesehen, hielt ihn aber für einen Stern.

Später, als man erkannte, dass es sich bei Merkur um einen sonnennahen Planeten handelt, fing man an ihn genauer zu untersuchen. Man fand heraus, dass er rund 88 Erdtage für eine Umkreisung um die Sonne benötigt. Aufgrund der Erfahrungen, die man aus dem Erde-Mond-System gewonnen hatte, nahmen die Wissenschaftler an, dass auch im Sonne-Merkur-System gebundene Rotation herrsche. Erst im Jahre 1962 wurde dies widerlegt. Damals stellten Radioastronomen fest, dass die angenommene Nachtseite des Merkurs zu warm für eine ständige Abstinenz von der Bestrahlung durch die Sonne ist.

Raumsonde Mariner 10 (siehe Abbildung 47) war es schließlich, die in den Jahren 1973/74 genauere Untersuchungen über Merkur machte.



Abbildung 47: Mariner 10

Mit Hilfe dieser Sonde fand man heraus, dass die genaue Rotationsdauer konstant 58,646 Erdtage beträgt.

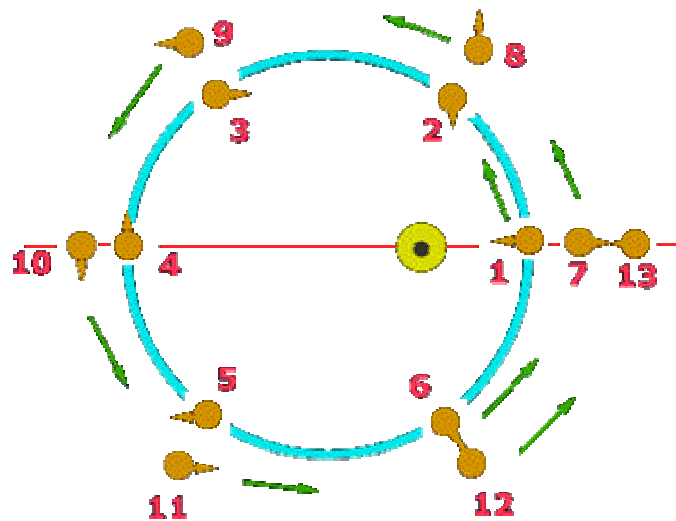


Abbildung 48: 2:3 Verhältnis von Eigenrotation und Umlaufzeit

Wie in Abbildung 48 dargestellt ist dreht sich Merkur in rund 59 Erdtagen einmal um sich selbst (Position 1 bis 5), braucht aber rund 88 Tage für einen Sonnenumlauf. Somit erfolgen nach zwei Umläufen drei Umdrehungen des Planeten. Dies entspricht einem konstanten Verhältnis

von 2:3. Aufgrund dieser Tatsache ist ein Merkurtag, von Sonnenaufgang bis zum nächsten Sonnenaufgang, verglichen mit einem Tag auf der Erde sehr lange. Er dauert 176 Erdtage, was zu einer starken Erwärmung der jeweiligen Sonnen zu gewandten Seite führt. Bei dieser Art der Kopplung von Rotation und Umlauf spricht man von einer Spin-Bahn-Kopplung.

Der Grund für die konstante 2:3-Resonanz ist folgender:

Die Bahn des Merkurs um die Sonne ist stark elliptisch. Das 2. Keplerschen Gesetz besagt, dass ein von der Sonne zu einem Planeten gezogener Leitstrahl in gleicher Zeit die gleiche Fläche überstreicht. Somit ist Merkur im Perihel, wo er sich näher zur Sonne befindet schneller als im weiter entfernten Aphel.

Beim Erde-Mond-System führte die ständige Wirkung der Gezeitenkraft zur gebundenen Rotation. Ebenso verhält es sich beim Perihel der Merkurbahn um die Sonne. Der Grund für die dort herrschende gebundene Rotation ist die Gezeitenkraft der Sonne.

Diese Kraft hat im Perihel im Laufe der Zeit die Eigenrotation des Merkurs derart gebremst, dass dort Eigenrotation und Rotation um das Zentralgestirn 1:1 synchronisiert sind. Im Aphel ist Geschwindigkeit des Merkurs auf seiner Bahn um die Sonne nun kleiner als jene im Perihel. Die Eigenrotation des Merkurs um seine Achse bleibt aber die gleiche, wie jene im Perihel. Da er nun im Aphel sehr viel weiter von der Sonne entfernt ist, ist auch die von der Sonne wirkende Gezeitenkraft sehr viel geringer. Diese Kraft ist hier nun nicht groß genug, um die beiden Rotationen des Merkurs 1:1 zu synchronisieren, womit im Aphel keine gebundene Rotation herrscht.

Das Resultat der unterschiedlichen Umlaufverhältnisse entlang der gesamten Bahn des Merkurs ergibt in Summe schließlich eine 2:3-Resonanz. Ist diese einmal erreicht, so bleibt sie konstant bestehen, da sich auch die Bahn des Merkurs um die Sonne nicht mehr ändert.

Verglichen mit den ebenfalls elliptischen Bahnen der restlichen Planeten unseres Sonnensystems ist die Flugbahn des Merkurs etwas außergewöhnlich. Das Perihel dieser Bahnellipse verschiebt sich ständig zwischen den einzelnen Umrundungen.

Dieser Umstand war im 20. Jahrhundert ein wichtiger Bestandteil bei der Überprüfung der Richtigkeit der Relativitätstheorie von Albert Einstein, die die Periheldrehung des Merkurs als ein Ergebnis lieferte.

Als Hauptgrund für die Periheldrehung der Merkurbahn nahmen die Wissenschaftler den Einfluss der Gravitation der anderen Planeten auf Merkur an. Besonders groß ist dabei jener der Venus, da sich diese auf der merkurnächsten Bahn bewegt.

Stellte man mit Hilfe dieser Annahme Berechnungen an, so ergab dies eine Verschiebung von 532 Bogensekunden in 100 Jahren. Da die Verschiebung aber 575 Bogensekunden beträgt, blieben 43 Bogensekunden pro Jahrhundert unerklärt.

Einsteins Berechnungen ergaben eine zusätzliche relativistische Periheldrehung von  $43,03''$  in 100 Jahren (beobachtet wurden  $43,11''$ ), was als großer Erfolg der Relativitätstheorie gefeiert wurde.

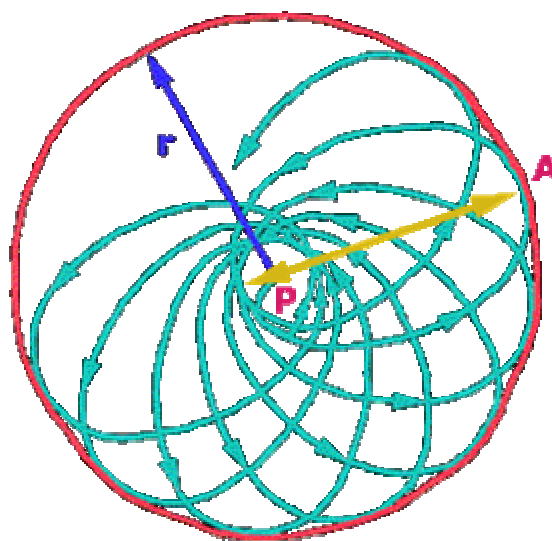


Abbildung 49: Darstellung der Rosettenbahn des Merkurs

Abbildung 49 ist eine Darstellung der Rosettenbahn, wie Merkur sie beschreibt. Die Apsidienlinie (gelb), das ist die Verbindungslinie zwischen Perihel (P) und Aphel (A, = sonnenfernster Punkt der Bahn), dreht sich langsam um die Sonne durch die relativistische "Verzerrung" des Gravitationsfeldes. Dabei verschiebt sich das Perihel rechtsläufig langsam auf der Merkurbahn, wodurch diese die Form einer Rosette erhält.  $r$  zeigt dabei den größten Halbmesser der Merkurbahn an.

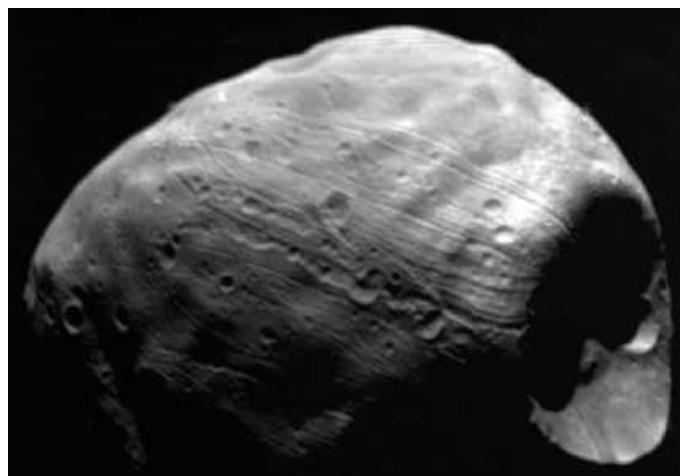
### 4.3 Mars



**Abbildung 50: Mars**

Mars, einer unserer Nachbarplaneten, ist mit 6794 km im Durchmesser ungefähr halb so groß wie die Erde.

Er besitzt zwei Monde: Phobos (griech: Furcht) und Deimos (griech: Panik). Bei beiden nimmt man an, dass sie aus dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter stammen und irgendwann vom Mars eingefangen wurden. Die beiden vorbei fliegenden Körper wurden von der Atmosphäre des Mars stark genug abgebremst, sodass sie von der Gravitation unseres Nachbarplaneten eingefangen werden konnten.



**Abbildung 51: Phobos**



Phobos besitzt einen Durchmesser von 22,2 km, Deimos ist 12,6 km groß. Aufgrund ihrer kleinen Masse haben die beiden, trotz ihrer niederen Umlaufbahn nur einen geringen messbaren Einfluss auf den Mars.

Wie groß die Gezeitenkraft ist, die Phobos auf den Mars ausübt, lässt sich einfach berechnen und könnte deshalb im Schulunterricht als Rechenbeispiel eingebaut werden.

Die Frage hierfür könnte folgendermaßen lauten:

Wie groß ist die Beschleunigung aufgrund der Gezeitenkraft des Phobos auf den Mars verglichen mit jener des Mondes auf die Erde?

Die Formel hierfür lautet:

$$a_{Gez} = GM \left( \frac{2r}{R^3} \right)$$

mit

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$$

$$M_{Phobos} = 1,08 \cdot 10^{16} kg$$

$$r_{Mars} = 3,397 \cdot 10^6 km$$

$$R_{Phobos - Mars} = 9,38 \cdot 10^6 m$$

$$M_{Mond} = 7,35 \cdot 10^{22} kg$$

$$r_{Erde} = 6,37 \cdot 10^6 km$$

$$R_{Mond - Erde} = 3,847 \cdot 10^8 m$$

Durch einsetzen dieser Werte erhält man folgendes:

$$a_{Gez - Mond} = 1,1 \cdot 10^{-6} ms^{-2}$$

$$a_{Gez - Phobos} = 5,93 \cdot 10^{-6} ms^{-2}$$

Somit zieht die Gezeitenkraft des Mondes die Erde 185mal stärker auseinander als Phobos den Mars.

Phobos umkreist die Oberfläche des Mars in weniger als 10000 km Höhe. Damit ist er seinem Zentralgestirn näher, als jeder andere Mond in unserem Sonnensystem. Da Phobos den Mars unter dem geostationären Orbitalradius umkreist, geht er im Westen auf, bewegt sich sehr schnell über den Himmel (in 4,5 Stunden) und geht im Osten wieder unter, wobei er mehr als die Hälfte seiner Phasen zeigt.

Die Bahn von Phobos liegt dabei nur sehr wenig außerhalb der Rocheschen Stabilitätsgrenze des Mars. Da sich Phobos jedoch Mars mit etwa 1,8 Meter pro Jahrhundert nähert, ist es wahrscheinlich, dass er in ca. 50 Millionen Jahren von den Gezeitenkräften zerrissen wird und in einen Ring zerfällt.

Folgende Abbildung zeigt Phobos, der Mars in einem niederen Orbit umkreist.

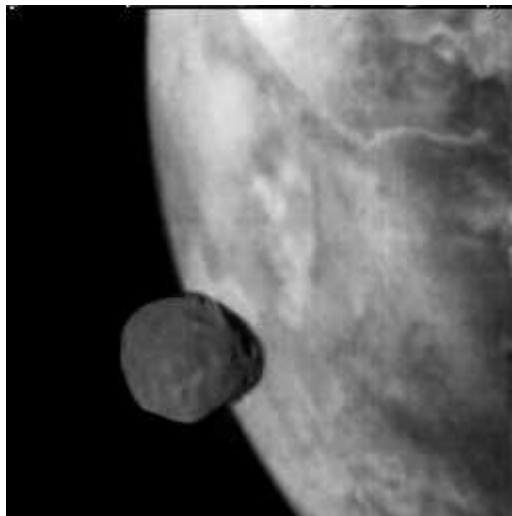


Abbildung 52: Der niedere Orbit von Phobos

## 4.4 Jupiter



**Abbildung 53: Jupiter**

Jupiter ist einer der fünf Planeten, die von der Erde aus ohne Zuhilfenahme von Fernrohren beobachtet werden können. Er ist der größte Planet unseres Sonnensystems und aufgrund seiner enormen Größe und Helligkeit manchmal die ganze Nacht über als winziges Scheibchen am Sternenhimmel zu sehen.

Die ersten Beobachtungen des Gasriesen können heute nicht mehr genau datiert werden. Mit Sicherheit war er aber schon in der Antike bekannt, da er von den Römern den Namen ihres höchsten Gottes erhielt. Schon bald nach der Erfindung des Fernrohrs zu Beginn des 17. Jahrhunderts wurden festgestellt, dass auf Jupiters Oberfläche Streifen- und Fleckenstrukturen zu erkennen waren. Im Jahre 1610 wurden zudem die vier größten Monde des Jupiters von Galilei entdeckt, weshalb sie heute noch Galileische Monde genannt werden.

In den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde Jupiter schließlich von vier Raumsonden genauer untersucht. Die damaligen u.s.-amerikanischen Pioneer- und Voyagermissionen untersuchen dabei Atmosphäre,

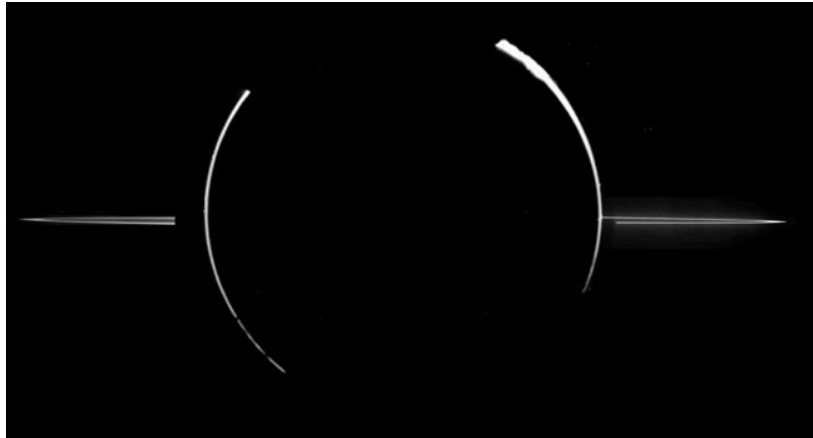
Magnetfeld und die Wechselwirkung des Sonnenwindes mit Jupiter genauer.

Folgende Daten sind eine Auswahl dessen, was über den Jupiter bekannt ist:

Durchmesser:	142984 <i>km</i>
Masse:	$1,9 \cdot 10^{27} \text{ kg}$ (~318 Erdmassen)
Mittlere Dichte:	$1,326 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$
Neigung der Achse:	3,13°
Rotationsperiode:	9h 55min
Mittlere Temperatur:	-130° C
Atmosphärendruck:	1000 bar

Die Atmosphäre, welche genauer von der fünften und bisher letzten Raumsonde Galileo untersucht wurde, besteht aus 79% Wasserstoff und 19% Helium. Zudem sind noch Spuren der Gase Methan, Ammoniak, Äthan und Acetylen vorhanden.

Aufgrund der großen Masse und der daraus resultierenden Gravitations- bzw. Gezeitenkraft hat Jupiter einen starken Einfluss auf seine Umgebung. So besitzt Jupiter einen Ring, welcher von der Erde aus nicht sichtbar ist. Dieser wurde erstmals 1979 von Voyager 1 nachgewiesen. Es herrscht die Vermutung, dass hier ein möglicher Mond innerhalb des Bereichs der Rocheschen Grenze geriet und deshalb von den Gezeitenkräften des Jupiters zerstört wurde.



**Abbildung 54: Der Ring des Jupiters**

Der Jupiter hat wegen seiner großen Masse eine wichtige Funktion in unserem Sonnensystem. Da er schwerer ist als alle anderen Planeten zusammen ist er eine wichtige Komponente unseres Sonnensystems. Er stabilisiert durch seine Masse den Asteroidengürtel. Ohne den Jupiter würde vermutlich alle 100.000 Jahre ein Asteroid aus dem Asteroidengürtel die Erde treffen und Leben dadurch unmöglich machen. Die Existenz eines jupiterähnlichen Planeten in einem Sonnensystem ist dadurch Voraussetzung für Leben auf einem, dem Stern näherem Planeten. Es wird angenommen, dass Planeten von der Größe der Erde nur dann auf einer gleich bleibenden Bahn um eine Sonne kreisen können, wenn zusätzlich zur Gravitation der Sonne, eine Anziehungskraft durch einen Gasriesen auf sie einwirkt.

#### **4.4.1 Die Monde Jupiters**

Wenn es um die Anzahl der Jupitermonde geht, sind sich die Wissenschaftler uneinig. Meist wird die Zahl der Jupitertrabanten mit 16 oder 17 beziffert, es gibt jedoch Literatur zu Arbeiten, die alle um den Jupiter kreisenden Gesteinsbrocken mitzählen und so auf eine Bezifferung von 63 (Stand Mai 2004) kommen. Einige von diesen, wie beispielsweise S/2003 J 9 haben einen Durchmesser von nur einem Kilometer. Da es aber keine allgemein gültige Definition für den Mindestdurchmesser eines Mondes gibt, sind auch die ca. 30, nur wenige Kilometer großen Gesteinsbrocken, die Jupiter umkreisen als Monde zu zählen.

Die vier Galileischen Monde Io, Europa, Ganymed und Kallisto, die alle einen Durchmesser über 3000 km besitzen wurden schon 1610 von Galilei und fast gleichzeitig von Marius entdeckt. Ihre Helligkeit ist eigentlich groß genug, damit man sie mit bloßem Auge von der Erde aus sehen kann. Ihre nahe Lage am Jupiter macht dies aber unmöglich.

##### **4.4.1.1 Jupitermond Io**

Io, der innerste der vier Galileischen Monde umkreist den Jupiter in einer durchschnittlichen Entfernung von 421600 km, was etwa sechs Jupiterradien entspricht.

Schon lange vor der Erforschung des Jupitersystems durch Raumsonden stellte Io die Astronomen vor Rätsel. Im Jahre 1974 entdeckte der amerikanische Astronom Robert Brown eine gelbe Nebelwolke, die sich vor und hinter dem Mond Io ausdehnt und aus Natriumatomen besteht. Man fand jedoch damals keine Erklärung für dieses Phänomen.

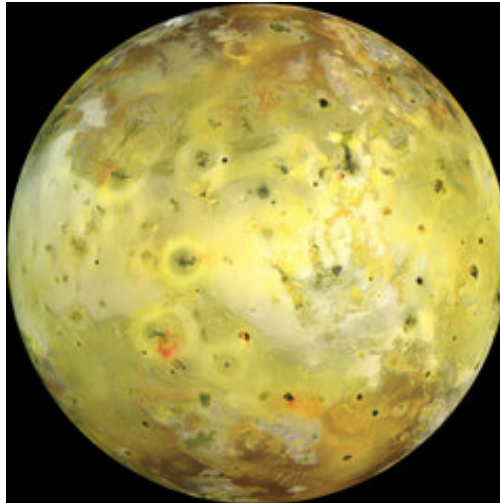


Abbildung 55: Io

Die Größe und Dichte Ios ähneln der unseres Erdmondes. Man hielt ihn daher für einen erkalteten, mit Einschlagskratern übersäten Himmelskörper. Zur Überraschung der Jupiterforscher zeigten die Voyageraufnahmen jedoch nicht die erwarteten Krater, sondern eine glatte, mit Schwefel bedeckte gelb-braune Oberfläche, aus der Vulkankegel ragen.

Eine weitere verblüffende Entdeckung der Voyager-Sonden waren die acht tätigen Vulkane, aus denen das Material mit einer Geschwindigkeit von etwa einem Kilometer pro Sekunde mehrere hundert Kilometer in die Höhe schießt.

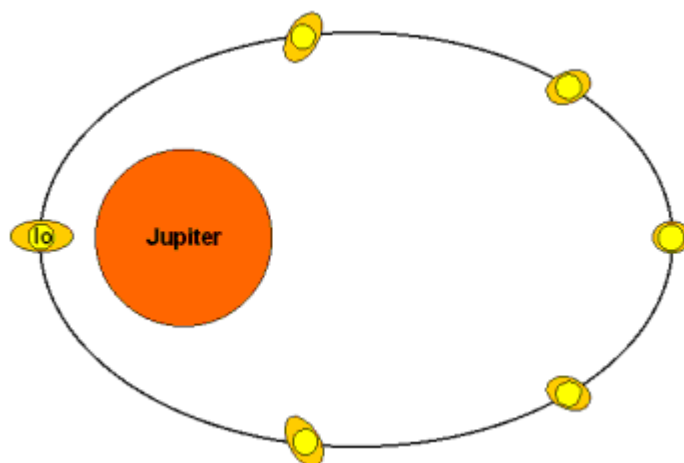
Aufgrund der geringen Schwerkraft Ios dehnen sich die aus Gas und Staub bestehenden Fontänen weithin aus und bilden durch Ablagerung Ringe mit einem Durchmesser von bis zu 1400 Kilometern um die Vulkankegel herum. Man vermutet, dass Mantel und Kruste des Mondes Io durch Eruptionen bereits mehrfach erneuert wurden, durch Meteoreinschlag entstandene Krater wurden von dem ausgestoßenen Material immer wieder aufgefüllt.

Grund für dieses starke vulkanische Vorkommen auf dem Io ist seine Nähe zu Jupiter (siehe Abbildung 56).



**Abbildung 56: Der geringe Abstand von Io zu Jupiter**

In 1,76 Tagen umkreist der Io sein Zentralgestirn einmal. Zwischen den beiden Himmelskörpern herrscht, wie auch bei allen anderen Galileischen Monden gebundene Rotation. Da die, bei der Umkreisung beschriebene Bahn eine große Elliptizität hat, wirken auf den Io trotz der gebundenen Rotation verschieden starke Gezeitenkräfte.



**Abbildung 57: Bahn von Io um Jupiter**



Diese sind im Falle des Io 6000mal stärker als die des Erdmondes. Zudem wirken auf Io noch die Gezeitenkräfte der in der Nähe vorbei fliegenden Monde Europa und Ganymed.

Alles in allem sind die vorherrschenden Gezeitenkräfte auf dem Io dermaßen groß, dass sie die Oberfläche des Jupitertrabanten um 100 Meter heben. Verglichen mit der Erde, auf der die Ozeane im Durchschnitt um 0,7 Meter gehoben werden und die Deformierung der Kruste aufgrund der Gezeitenkraft lediglich 20 bis 30 Zentimeter beträgt, wird ersichtlich, welchen äußeren Einflüssen der Io ausgesetzt ist. Das Innerste des Mondes wird nun derart durch gewalkt, dass eine enorme Reibungswärme entsteht. Diese und die ständige Deformierung der Oberfläche verursachen die starke, beobachtete Vulkanaktivität.

#### 4.4.1.2 Jupitermond Europa



Abbildung 58: Europa

Europa ist mit einem Durchmesser von 3066 km der kleinste der vier Galileischen Monde. Er umkreist Jupiter in einem Abstand von 671.400 km (= 9,47 Planetenradien) und ist der nach Io zweitnächste Trabant

Jupiters. Europa benötigt für einen Umlauf ungefähr drei Tage und dreizehn Stunden.

Wenn man die glatte Oberfläche von Europa näher betrachtet, so kann man einige faszinierende Einzelheiten feststellen. Europa sieht aus wie zerbrochenes Glas, das mit einem Eiskleber repariert wurde. Niedrige Bergrücken, gerade und kurvig, durchkreuzen sich an der Oberfläche. Brüche, Gräben und gefrorene Pfützen sind alles Hinweise auf eine einzigartige geologische Geschichte. Große runde Objekte können von Meteoriteneinschlägen stammen oder das Ergebnis von aufströmendem Material aus dem Untergrund sein.

Aufgrund der Gezeitenkraft von Jupiter und den Nachbarmonden auf Europa besteht die Möglichkeit, dass sich unter der Oberfläche ein Ozean befindet. Die Ausdehnung und Zusammenpressung könnte genug Reibungswärme erzeugen, um einen Teil des Eispanzers unter der Oberfläche zu schmelzen. Dies führt zur Frage, ob sich dort Leben entwickelt haben könnte. Wissenschaftler haben auf der Erde Leben gefunden, das unter Wasser in der Nähe von Wärmequellen gedeiht. Diese Entdeckung gibt uns eine Vorstellung, wie ähnliche Organismen auf Europa leben könnten.

## 4.5 Saturn

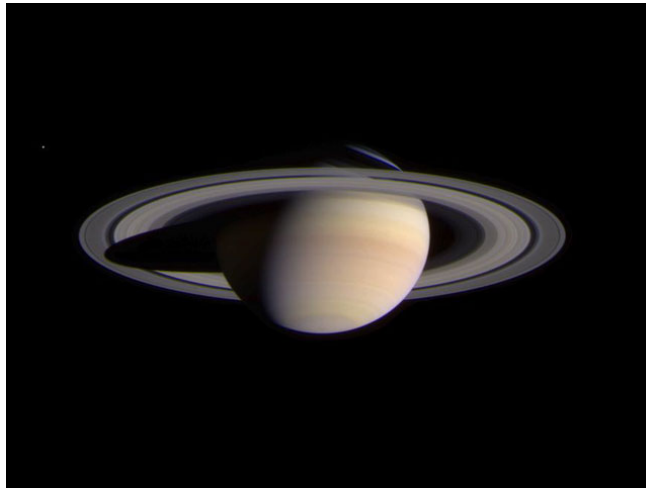


Abbildung 59: Saturn

Saturn, der zweitgrößte Planet unseres Sonnensystems kann zu recht als „Herr der Ringe“ bezeichnet werden. Er ist der weitest entfernte Planet, der ohne den Einsatz von Fernrohren von der Erde aus wahrgenommen werden kann.

Trotz seiner großen Entfernung zur Sonne weist er durch seine Größe eine beachtliche Helligkeit auf und wurde deshalb bereits in der Antike am nächtlichen Himmel von Wissenschaftlern beobachtet. Saturn bewegt sich von allen damals beobachtbaren Planeten am langsamsten.

Die Griechen meinten, er habe es nicht eilig und gaben ihm nach ihrem Gott der Zeit, dem Vater Jupiters, den Namen Kronos. Seinen heutigen Namen erhielt Saturn von den Römern nach ihrem Gott des Landbaus. Vermutlich geschah dies, weil sie seine langsame Bewegung mit der behäbig anmutenden Pflügearbeit auf dem Feld verglichen.

Schon bald nach der Entdeckung der "Galileischen" Jupitermonde untersuchte Galilei im Jahr 1610 mit seinem Fernrohr auch den Planeten Saturn. Hierbei entdeckte er zwei zum Saturn symmetrisch liegende Monde, die jedoch den Planeten nicht zu umkreisen schienen und zwei Jahre später wieder verschwanden. Nach einer Periode der Unsichtbarkeit

erschienen sie erneut und die zeitgenössischen Astronomen standen vor einem Rätsel. Erst 1656 erkannte der holländische Optiker Christiaan Huygens den wahren Sachverhalt: Saturn hat einen sehr dünnen, flachen, gegen die Ekliptik geneigten Ring, der in Kantenstellung von der Erde aus nicht sichtbar ist.

Während eines Saturnumlaufs um die Sonne variiert der Neigungswinkel unter dem uns die Ringebene von der Erde aus erscheint zwischen  $0^\circ$  und  $28^\circ$ . Im Jahre 1612 konnte Galilei einen "ringlosen" Saturn beobachten, da zu diesem Zeitpunkt einige Monate lang Kantenstellung herrschte.

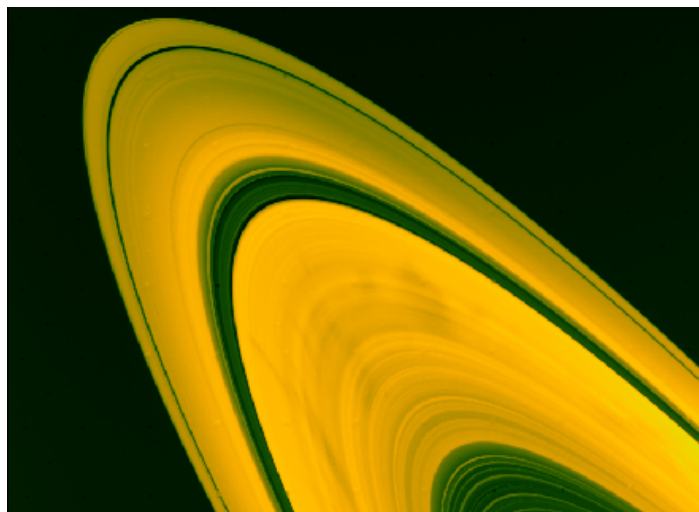
Der Großteil der uns heute bekannten Daten über Saturn stammt jedoch aus der modernen Raumfahrt. In den Jahren 1979 – 1981 erforschten die Raumsonden Pioneer-Saturn, Voyager 1 und 2 den Gasriesen und seinen Ringe genauer. Hier nun eine Auswahl der heute bekannten Daten über den Saturn:

Durchmesser:	120660 km
Masse:	$5,7 \cdot 10^{26}$ kg (~95 Erdmassen)
Mittlere Dichte:	$0,7 \cdot 10^3$ kgm <sup>-3</sup>
Umlaufzeit:	29,5 Erdjahre
Rotationsperiode:	10h 40min
Mittlere Sonnenentfernung:	9,5 AE

### 4.5.1 Saturns Ringe

Im Jahre 1656 hatte Huygens festgestellt, dass sich bei den rätselhaften Monden, die von Galilei entdeckt wurden, um einen Ring handelt. Seither untersuchten die Saturnforscher immer wieder die Struktur des Ringes und erforschten dessen Entstehung. 1675 stellte der italienische Astronom Cassini fest, dass es eine Trennung innerhalb des Ringsystems gab, die die Ringzonen in zwei Teile teilt.

Heute bezeichnet man die äußere, etwa 14700 km breite Ringzone als A-Ring, die innere Zone, deren Breite etwa 25500 km beträgt als B-Ring und die dazwischen liegende Trennungszone, deren Breite mit ca. 3500 km etwa dem Durchmesser unseres Erdmondes entspricht, als Cassini-Teilung.



**Abbildung 60: Die Ringe Saturns**

Im 19. Jahrhundert fanden Astronomen, wie beispielsweise Encke, Bond und Keeler heraus, dass sowohl der A-, als auch der B-Ring weiter unterteilt waren.

Raumsonden entdeckten später noch weitere Unterteilungen.

Heute vermuten Wissenschaftler, dass sich die Ringe vor mehreren Hundert Millionen Jahren gebildet haben, als einer oder mehrere Monde innerhalb der Rocheschen Grenze des Saturns gerieten und somit zerstört wurden.

Eine andere Theorie besagt, dass ein verirrtes Objekt aus dem Kuiper-Gürtel (Anhäufung von Kometen und Asteroiden hinter der Flugbahn von Neptun und Pluto, rund 500 AE entfernt) sich dem Gasriesen zu weit angenähert hat und dabei in Millionen Stücke verrissen wurde.

Cassini vermutete bereits im 17. Jahrhundert, dass der Ring aus Einzelteilen besteht. 1857 lieferte Maxwell ein Modell eines aus Materiebrocken aufgebauten Ringes, dessen Teile getrennt voneinander schweben. Rund 40 Jahre später gelang der Beweis für dieses Modell mit Hilfe des optischen Dopplereffekts. Es konnte bewiesen werden, dass sich die Ringe entsprechend dem 3. Keplerschen Gesetz verhielten, wonach die inneren schneller rotierten, als die weiter außerhalb liegenden.

Eine Frage beschäftigt die Wissenschaft jedoch weiterhin. Wie ist die scharfe Abgrenzung der Einzelringe nach innen und außen erklärbar.

Eines der meist anerkannten Modelle lautet, dass so genannte Schäfer- bzw. Hirtenmonde mit „passender“ Umlaufzeit das Aufweiten eines Ringes verhindern können, indem sie aus dem Ring ausbrechende Teilchen durch gravitativen Einfluss dermaßen beschleunigen bzw. verzögern, dass sie wieder in der ursprünglichen Ringzone kreisen.

Ein Beispiel, das diese Theorie untermauert ist die Geschwindigkeit der am Rand des B-Ringes verlaufenden Teilchen. Diese stehen in einem ganzzahligen Verhältnis zur Umlaufgeschwindigkeit des sich dort aufhaltenden Saturnmondes Mimas.

## 4.6 Uranus

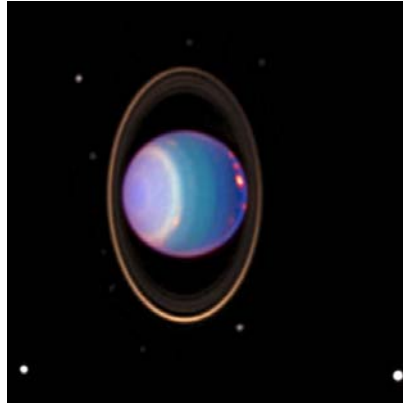


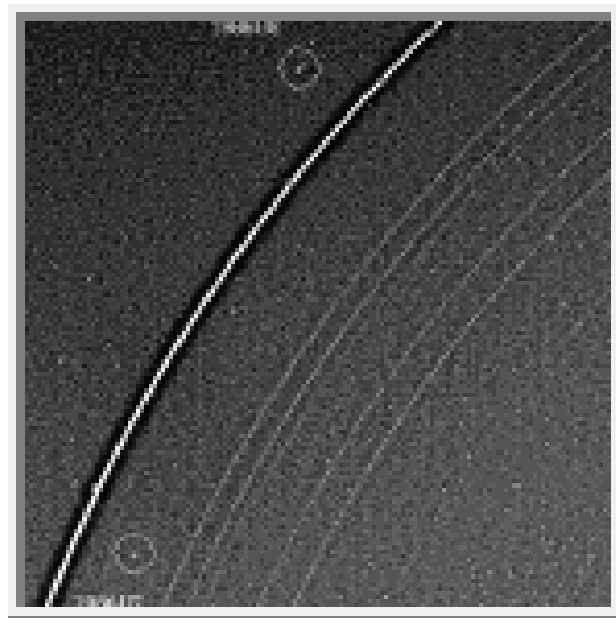
Abbildung 61: Uranus

Uranus wurde im Jahre 1781 von Wilhelm Herschel während dessen systematischer Suche nach neuen Planeten entdeckt. Der Gasriese hat einen Äquatordurchmesser von ca. 52000 km und umrundet die Sonne in einer Entfernung von 19,2 AE alle 84 Jahre einmal. Wie man auf dem Fehlfarbenbild (Abbildung 61) sehen kann besitzt auch der Uranus Ringe. Diese werden nach neusten Erkenntnissen (Voyager 2, 1986) mit zehn bzw. elf beziffert und umkreisen Uranus in einem Abstand zwischen 46000 km und 52000 km.



Abbildung 62: Die Ringe des Uranus

Auffällig ist dabei allerdings die Lage bezüglich der Ekliptik. Da Uranus einen um  $98^\circ$  gegen die Bahnebene geneigten Äquator besitzt, steht auch sein Ring beinahe senkrecht zu dieser. Seine ungewöhnliche Lage erklärt man sich als Resultat einer Kollision mit einem Körper in Planetengröße in der Frühgeschichte des Sonnensystems. Zudem wird der Ring, ähnlich wie beim Saturn, von den zwei so genannten Hirtenmonden Cordelia und Ophelia (siehe Abbildung 63) zusammengehalten. Insgesamt besitzt Uranus 21 Monde (Stand 2005).



**Abbildung 63: Hirtenmonde Cordelia u. Ophelia im Uranusring**

Die sehr anspruchsvolle Erklärung, wie der Ring von den beiden Hirtenmonden stabilisiert wird, wurde hier deshalb nicht ausführlich behandelt, da sie meiner Meinung nach zu umfangreich und für den Schulunterricht ist.

Entdeckt wurde der Ring erst 1977, als man feststellte, dass beobachtete Sterne von einem, den Uranus begleitenden Objekt verdunkelt wurden. Wie auch bei den Ringen des Jupiters und des Saturns wird jener des Uranus als ein Produkt von Körpern angenommen, die innerhalb der Rocheschen Grenze des Uranus gerieten.



## 4.7 Planetenparade

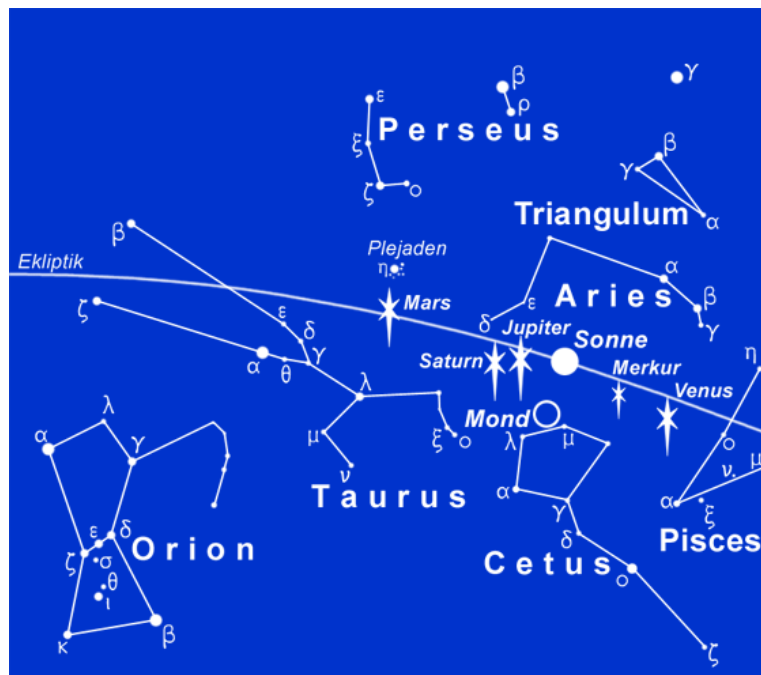


Abbildung 64: Planetenparade vom Mai 2000

Die Freude über die totale Sonnenfinsternis im August 1999 war noch nicht recht verflogen, als sich Hobbyastronomen schon auf das nächste besondere Ereignis am Himmel einstellen konnten. Denn vom 3. – 5. Mai 2000 ergab sich eine spezielle Konstellation einiger Planeten unseres Sonnensystems, welche als Planetenparade bezeichnet wurde. Sonne, Erde, Mond und alle fünf mit freiem Auge erblickbaren, so genannten klassischen Planeten würden derart positioniert sein, dass sie sich innerhalb von  $15^\circ$  am Himmel befinden würden.

Natürlich rief ein derartiges Schauspiel nicht nur diejenigen auf den Plan, die den Himmel aus naturwissenschaftlichem Interesse mit Hilfe von Teleskopen etc. beobachten. Auch Esoteriker, Astrologen und Weltuntergangspropheten hatten die helle Freude mit diesem besonderen Ereignis. Gewaltige Erdbeben, Flutwellen und ähnliches wurden

prophezeit. Sogar das Kippen der Erde und der Untergang der einzelnen Kontinente wurden angekündigt.

Tag X kam schließlich und die Welt ging nicht unter. Schnell fand man die passende Erklärung von astrologischer Seite. Erstens waren die sogenannten sieben klassischen Wandelsterne nicht an der richtigen Position und zweitens waren Erde und Mond auf der falschen Seite der Sonne. Denn die restlichen fünf Planeten befanden sich diesseits unseres Zentralgestirns. Da hatten wir offensichtlich gerade noch einmal Glück.

Welche messbaren Auswirkungen hat nun eine derartige Konstellation der Gestirne wirklich?

Um dies zu verdeutlichen vergleicht man am besten die Gravitations- und Gezeitenkraft, die vom Mond auf die Erde wirken, mit jenen aller restlichen Planeten.

#### Gravitationskraft:

Die Summe der Gravitationskräfte aller Planeten beträgt auch in der extremsten Situation, in welcher wirklich alle in einer Reihe direkt zur Erde stehen, nicht einmal 1,5% von jener des Mondes. Dabei stammen mehr als 1% allein vom Jupiter. Um weiter zu verdeutlichen wie wenig diese 1,5% eigentlich ausmachen, nun folgende Überlegung:

Der Mond bewegt sich auf seiner elliptischen Bahn um die Erde in einer Entfernung zwischen 363.000 und 405.000 km. Diese Unterschiede bewirken eine Änderung der Gravitationskraft des Mondes auf uns von stolzen 25,4 %. Alle 14 Tage unterliegen wir also einer 25-prozentigen Schwankung, die beinahe unbemerkt an uns vorübergeht. Und nun soll eine Änderung von maximal 1,5% die Erde in den Untergang treiben?

Gezeitenkraft:

Da ja die Gezeitenkraft mit der dritten Potenz noch stärker auf eine Änderung des Abstands reagiert, ist hier der Einfluss der Planeten verglichen mit dem Erdmond noch deutlich geringer.

Hier macht allein die elliptische Bahn des Mondes eine Schwankung von mehr als 38% aus, wogegen alle Planeten im Idealfall ungefähr 0,4% der durchschnittlichen Kraft des Mondes ausmachen.

An Hand dieser Zahlen wird nun deutlich, wie wenig Einfluss die Stellung der Planeten auf uns hat. Wenn man jedoch will, kann man jeden Tag das Weltuntergangsszenario simulieren. Denn schon die Masse eines Zuckerwürfels, der am anderen Ende des Zimmers liegt, hat denselben gravitativen Einfluss auf einen Menschen, wie alle Planeten zusammen.

## 5 Die Beeinflussung von Galaxien durch die Gezeitenkraft

Im Laufe von Jahrmillionen kommt es immer wieder vor, dass sich Galaxien aufgrund verschiedener Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen im Weltall begegnen.

Solch ein Vorbeiflug kann gravierende Auswirkungen auf die Form der beiden betroffenen Galaxien haben. Galaxien sind eine Anhäufung von hunderten Milliarden von Sternen, die aufgrund der gegenseitigen Gravitationsanziehung zusammengehalten werden. Wenn nun zwei dieser enormen Massenansammlungen auf einander treffen, beginnen die Gezeitenkräfte des jeweiligen Gegenübers die Galaxie zu deformieren, was sich am Beispiel des Paares NGC 5394/95 (Abbildung 65) zeigen lässt. NGC 5395 ist dabei die größere der beiden.

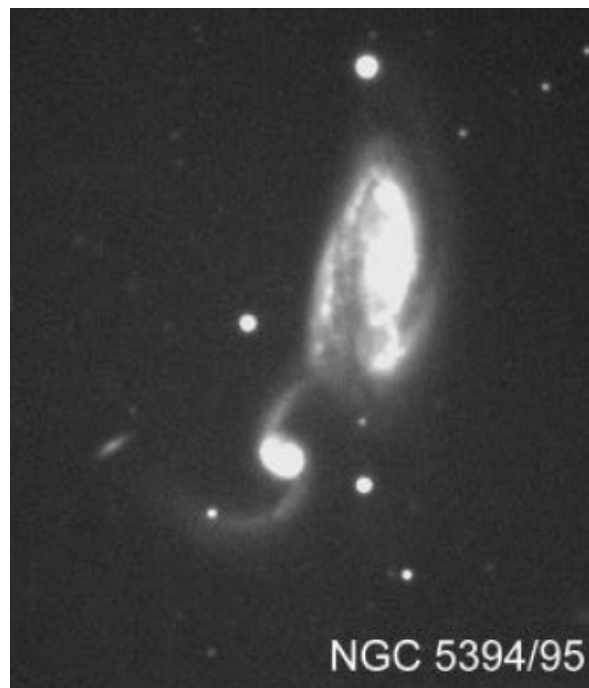


Abbildung 65: Deformierung von NGC 5394

Was in Abbildung 65 bei der kleineren Galaxie wie zwei Spiralarme aussieht, sind die vom größeren Nachbarn herausgezogenen, so genannten Gezeitenarme. Diese Spiralarme bestehen aus Sternen und sind jeweils etwa 70000 Lichtjahre lang. Auch die größere der beiden Galaxien ist derart stark deformiert, dass von einem regulären Spiralmuster keine Rede mehr sein kann.

Eines der bizarrsten Beispiele eines Gezeitenarms, der zwei vom Typ unterschiedliche Galaxien verbindet, kann man bei NGC 5216/18 (Abbildung 66) sehen.

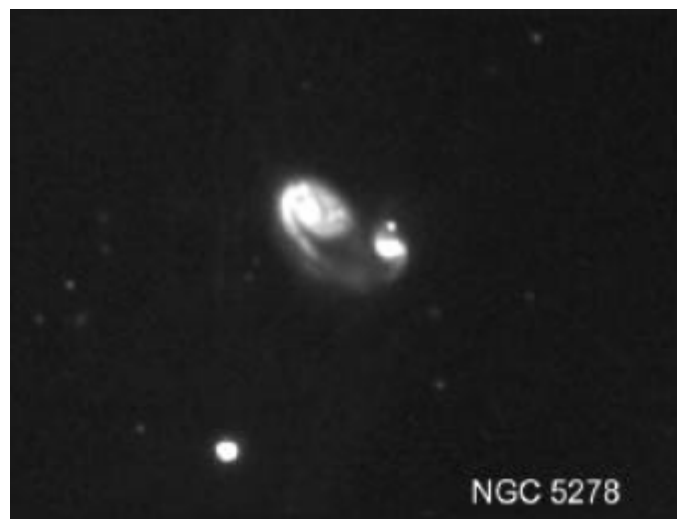


**Abbildung 66: Der lange Gezeitenarm zwischen NGC 5216/18**

Auf dieser Aufnahme, die aus einer 36 Minuten dauernden Belichtung zusammengesetzt ist, kann man unten eine Balkengalaxie (NGC 5218) und oben eine Elliptische Galaxie (NGC 5216) sehen. Da die Entfernung zwischen den beiden Galaxien mit 137 Millionen Lichtjahren angenommen wird, ist die so genannte Gezeitenbrücke mindestens 140 Millionen Lichtjahre lang. Die Länge wird deswegen mit mindestens 140 Lichtjahren angegeben, weil diese Verbindung wahrscheinlich stärker

gebogen sein wird, da die beiden Galaxien nicht genau in der gleichen Entfernung von der Erde liegen. Interessant für Astrophysiker ist hier herauszufinden, aus welcher der beiden Galaxien dieser Galaxienarm herausgerissen wurde und ob der kleine Bogen links oben bei der elliptischen Galaxie nur die Verlängerung des unteren oder ein eigenständiger Arm ist. Das Galaxienpaar in Abbildung 66 veranschaulicht gut, dass Gezeitenarme über enorme Distanzen reichen können.

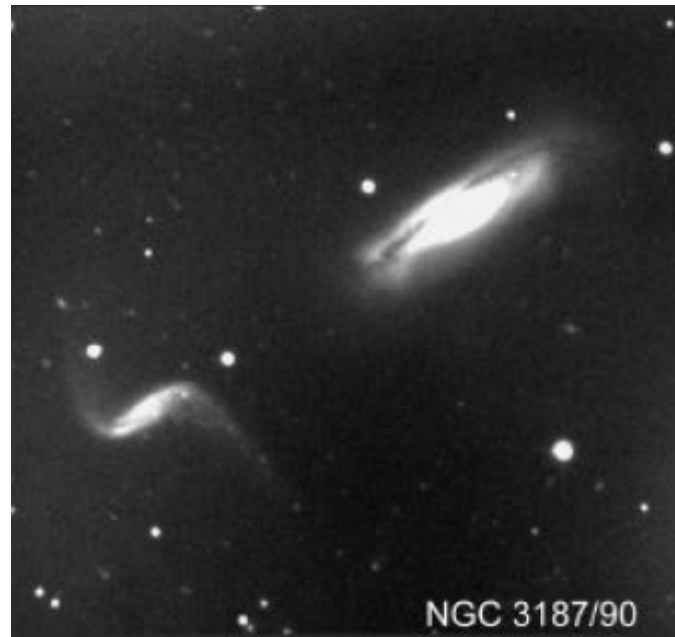
Ein Gegenbeispiel dazu stellt das Paar NGC 5278/79 (Abbildung 67) dar.



**Abbildung 67: Gezeitenarm zwischen NGC5278 und NGC5279**

Hier scheint es so zu sein, als gäbe es nur einen einzigen eng gewickelten Gezeitenarm, der sich mit dem unteren Arm der rechten Galaxie kreuzt. Leider ist dieses Paar dermaßen weit von uns entfernt, dass nur wenige Einzelheiten auf dieser Aufnahme zu sehen sind.

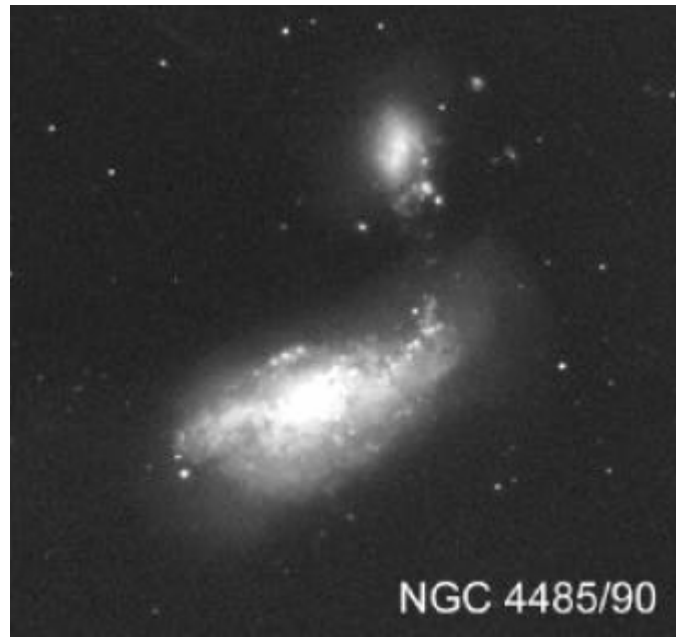
Durch weiterführende Untersuchungen gelang es zu erkennen, dass die nahe Begegnung die beteiligten Galaxien nicht nur stark deformiert ( siehe das Paar NGC 3187/90 (Abbildung 68)) sondern dass dabei auch heftige interne Entwicklungsprozesse angestoßen oder beschleunigt werden.



**Abbildung 68: Deformierung der beiden Galaxien**

Von Bedeutung ist auch, wie die Galaxien sich begegnen. Besonders intensiv sind die Auswirkungen der Gezeitenkräfte, wenn das Treffen in Drehrichtung der Galaxien erfolgt. In diesen Fällen sind die Sterne auf den zugewandten Seiten am längsten den gegenseitigen Anziehungskräften ausgesetzt.

So zeigen NGC 4485/90 (Abbildung 69) mehrere Ketten heller Punkte. Das sind riesige, hell leuchtende Gaswolken von der Art des Orionnebels, in denen zahlreiche neue heiße Sterne entstanden sind. Diese intensive Sternentstehung ist durch die Verdichtung der Gaswolken während der nahen Begegnung oder Durchdringung der beiden Galaxien ausgelöst worden.



**Abbildung 69: Sichtbare Sternketten zw. NGC 4485 und NGC 4490**



## Literaturverzeichnis

[1]	<a href="http://www.zdf.de/ZDFde/inhalt/8/0,1872,2024072,FF.html">www.zdf.de/ZDFde/inhalt/8/0,1872,2024072,FF.html</a> (24.11.2002)
[2]	<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Gezeitenkr%C3%A4fte">de.wikipedia.org/wiki/Gezeitenkr%C3%A4fte</a>
[3]	<a href="http://www.physik.uni-muenchen.de/leifphysik/web-ph12/grundwissen/12gezeiten/io.htm">www.physik.uni-muenchen.de/leifphysik/web-ph12/ grundwissen/12gezeiten/io.htm</a>
[4]	<a href="http://www.weltallkunde.de/Gezeiten.htm">www.weltallkunde.de/Gezeiten.htm</a>
[5]	<a href="http://www.humboldt-gymnasium-egerswalde.barnim.de/gezeiten/funktionsweise.htm">www.humboldt-gymnasium-egerswalde.barnim.de/ gezeiten/funktionsweise.htm</a>
[6]	<a href="http://www.nordwestreisemagazin.de/ebbeflut.htm">www.nordwestreisemagazin.de/ebbeflut.htm</a>
[7]	<a href="http://www.bhkw-infozentrum.de/innov_energien/meeresstr%C3%B6mung.html">www.bhkw-infozentrum.de/innov_energien/ meeresstr%C3%B6mung.html</a>
[8]	Leubner C. – VO Mechanik und Relativitätstheorie, Skriptum SS00
[9]	<a href="http://www.wappswelt.de/tnp/nineplanets/jupiter.html">www.wappswelt.de/tnp/nineplanets/jupiter.html</a>
[10]	Hecht E., Optik, 3.Auflage, Ouldenbourg 2001
[11]	<a href="http://www.planetenkunde.de/p005/p00501/p0050107001.htm">www.planetenkunde.de/p005/p00501/p0050107001.htm</a>
[12]	<a href="http://www.bres.de/knowledgebase/merkur">www.bres.de/knowledgebase/merkur</a>
[13]	Kartunnen, Hannu: Fundamental Astronomy, 4.Auflage Springer-Verlag, 2003
[14]	<a href="http://www.br-online.de/wissen-bildung/thema/mars/monde.xml">www.br-online.de/wissen-bildung/thema/mars/monde.xml</a>
[15]	<a href="http://science.orf.at/science/news/108338">science.orf.at/science/news/108338</a>
[16]	<a href="http://www.astrocorner.de/aktuell/aktuell_cassini_mission.php">www.astrocorner.de/aktuell/aktuell_cassini_mission.php</a>
[17]	<a href="http://www.bbs-winsen.de/GoBlack/Astronom/Sonnensy/&lt;br/&gt;Uranus/Ura_Ring.htm">www.bbs-winsen.de/GoBlack/Astronom/Sonnensy/ Uranus/Ura_Ring.htm</a>
[18]	<a href="http://www.ccdastronomy.de/uninfo.html">www.ccdastronomy.de/uninfo.html</a>
[19]	<a href="http://www.sonnenwen.de/sonnensystem/mars/phobos.html">www.sonnenwen.de/sonnensystem/mars/phobos.html</a>
[20]	<a href="http://www.steffen-lebach.de/merkur.htm">www.steffen-lebach.de/merkur.htm</a>
[21]	<a href="http://www.aip.de/People/MSteinmetz/classes/WiSe03/PDF">www.aip.de/People/MSteinmetz/classes/WiSe03/PDF</a>
[22]	Breuer, Hans: dtv-Atlas Physik, Deutscher Taschenbuch Verlag, 5.Aufl.

[23]	<a href="http://www.weingrill.net/astrophysik/fragen.pdf">www.weingrill.net/astrophysik/fragen.pdf</a>
[24]	<a href="http://abenteuer-universum.vol4u.de/roche.html">abenteuer-universum.vol4u.de/roche.html</a>
[25]	<a href="http://Pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA96/Pfeiffer/pfeiffer.html">Pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA96/Pfeiffer/pfeiffer.html</a>
[26]	<a href="http://www.aal.lu/SPECIAL-TOPIC/8">www.aal.lu/SPECIAL-TOPIC/8</a>
[27]	Joachim Hermann: dtv-Atlas Astronomie, Deutscher Taschenbuch Verlag, 14.Auflage, April 2000
[28]	<a href="http://home.t-online.de/home/Dr.Papke/bb0900.htm">home.t-online.de/home/Dr.Papke/bb0900.htm</a>
[29]	<a href="http://www.chemie.uni-bremen.de/stoherer/biograph/newton.htm">www.chemie.uni-bremen.de/stoherer/biograph/newton.htm</a>
[30]	<a href="http://lexikon.astronomie.info/konjunktion">lexikon.astronomie.info/konjunktion</a>
[31]	<a href="http://www.ems.psu.edu/~elsworth/courses/cause2003/finalprojects/canutepresentation.pdf">www.ems.psu.edu/~elsworth/courses/cause2003/finalprojects/canutepresentation.pdf</a>
[32]	<a href="http://www.uni-muenster.de/Physiker/DP/lit/Diverse/ebbeundflut.pdf">www.uni-muenster.de/Physiker/DP/lit/Diverse/ebbeundflut.pdf</a>
[33]	<a href="http://www.wasser.de/wasserkraft/gezeiten.htm">www.wasser.de/wasserkraft/gezeiten.htm</a>
[34]	<a href="http://www.astrolink.de/p012/p01200/index.htm">www.astrolink.de/p012/p01200/index.htm</a>
[35]	<a href="http://www.netzmedien.de">www.netzmedien.de</a>
[36]	<a href="http://www.astronomie.info/calsky/Moon/index.html">www.astronomie.info/calsky/Moon/index.html</a>
[37]	<a href="http://members.dokom.net/g.gantschigg">members.dokom.net/g.gantschigg</a>
[38]	<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Gravitaionstheorie">de.wikipedia.org/wiki/Gravitaionstheorie</a>
[39]	<a href="http://www.solarviews.com/ger/jupiter.htm">www.solarviews.com/ger/jupiter.htm</a>
[40]	Berber, Kacher, Langer: Physik in Formeln und Tabellen, B.G. Teubner Stuttgart, 1994
[41]	<a href="http://www.astro-os.de/galaxien.pdf">www.astro-os.de/galaxien.pdf</a>
[42]	<a href="http://www.gwup.org/aktuell/news.php?aktion=detail&amp;id=27">www.gwup.org/aktuell/news.php?aktion=detail&amp;id=27</a>
[43]	Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik 1 – Mechanik und Wärme, Springer-Verlag, 1994
[44]	<a href="http://www.tourismusbretagne.com (02/99)">www.tourismusbretagne.com (02/99)</a>
[45]	<a href="http://www.t-online.de/home/Kreuer.Dieter/Astro/Tides/Tides.htm">www.t-online.de/home/Kreuer.Dieter/Astro/Tides/Tides.htm</a>
[46]	<a href="http://www.astronomy.nju.edu.cn/astron/at3/at30803.htm">www.astronomy.nju.edu.cn/astron/at3/at30803.htm</a>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ptolemäisches Weltbild.....	7
Abbildung 2: Johannes Kepler (1571 – 1630) .....	7
Abbildung 3: Sir Isaac Newton (1643 – 1727) .....	8
Abbildung 4: Gravitationskraft zwischen 2 Planeten.....	9
Abbildung 5: Henry Cavendish (1731 – 1810) .....	10
Abbildung 6: Cavendish´ Drehwaage .....	11
Abbildung 7: Die Präzession der Erde .....	13
Abbildung 8: 2 Körper im Schwerfeld von M.....	14
Abbildung 9: 2 Massenpunkte auf einem Körper .....	15
Abbildung 10: Ebbe an der Nordsee .....	20
Abbildung 11: Negativbeispiel mit Zentrifugalkraft.....	22
Abbildung 12: Lage des gemeinsamen Schwerpunkts (CoM).....	24
Abbildung 13: Bahnen um den Schwerpunkt .....	25
Abbildung 14: Grafik zur Herleitung der Flutberge.....	27
Abbildung 15: Verformung der Wasserhülle .....	31
Abbildung 16: Alle drei Gestirne in einer Linie .....	33
Abbildung 17: Situation bei Springflut .....	33
Abbildung 18: Neigung der Erdachse bzgl. der Ekliptik .....	34
Abbildung 19: Entstehung der Jahreszeiten .....	34
Abbildung 20: Einfluss der geneigten Bahn des Mondes .....	36
Abbildung 21: Ebbe bei Mont-Saint-Michel.....	37
Abbildung 22: Ebbe und Flut an der franz. Küste.....	38
Abbildung 23: Muscheln sammeln bei Ebbe .....	39
Abbildung 24: Flut bei Tsien-tang Kiang, Dietrich 1965 .....	39
Abbildung 25: Mühle mit Mühlenstein 787 n. Chr. ....	45
Abbildung 26: Schaufeln einer antiken Mühle .....	45
Abbildung 27: Stauvorgang während der Flut .....	46
Abbildung 28: Abfließen während der Ebbe.....	46
Abbildung 29: Gezeitenmühle in England .....	47
Abbildung 30: Gezeitenkraftwerk bei St. Malo .....	49
Abbildung 31: Mögliche Standorte für ein Gezeitenkraftwerk.....	50
Abbildung 32: Schaufelrad einer Mühle .....	50
Abbildung 33: Das Gezeitenkraftwerk in La Rance .....	53
Abbildung 34: Long Island Sound Barrage.....	54
Abbildung 35: Nutzung ähnlich der Windkraft.....	56
Abbildung 36: Propellersystem im Wasser stehend.....	57
Abbildung 37: Die Erdzugewandte Seite des Mondes.....	58
Abbildung 38: Gebundene Rotation des Mondes .....	62
Abbildung 39: Kartographie der Erd zugewandten Seite.....	63
Abbildung 40: Beleuchtung des Mondes .....	64
Abbildung 41: Libration in der Länge.....	65
Abbildung 42: Libration in der Breite.....	65
Abbildung 43: Extremlagen der Libration .....	66
Abbildung 44: Satellit nähert sich Rochescher Stabilitätsgrenze.....	69

Abbildung 45: Fragmente von Shoemaker-Levy 9 stürzen auf Jupiter .....	72
Abbildung 46: Merkur.....	74
Abbildung 47: Mariner 10.....	76
Abbildung 48: 2:3 Verhältnis von Eigenrotation und Umlaufzeit .....	76
Abbildung 49: Darstellung der Rosettenbahn des Merkurs .....	78
Abbildung 50: Mars .....	80
Abbildung 51: Phobos .....	80
Abbildung 52: Der niedere Orbit von Phobos.....	82
Abbildung 53: Jupiter.....	83
Abbildung 54: Der Ring des Jupiters .....	85
Abbildung 55: Io .....	87
Abbildung 56: Der geringe Abstand von Io zu Jupiter .....	88
Abbildung 57: Bahn von Io um Jupiter .....	88
Abbildung 58: Europa .....	89
Abbildung 59: Saturn .....	91
Abbildung 60: Der Ring des Saturns.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
Abbildung 61: Uranus .....	95
Abbildung 62: Die Ringe des Uranus .....	95
Abbildung 63: Hirtenmonde Cordelia u. Ophelia im Uranusring.....	96
Abbildung 64: Planetenparade vom Mai 2000.....	97
Abbildung 65: Deformierung von NGC 5394.....	100
Abbildung 66: Der lange Gezeitenarm zwischen NGC 5216/18 .....	101
Abbildung 67: Gezeitenarm zwischen NGC5278 und NGC5279 .....	102
Abbildung 68: Deformierung der beiden Galaxien.....	103
Abbildung 69: Sichtbare Sternketten zw. NGC 4485 und NGC 4490.....	104