

Konzeption einer Unterrichtseinheit zum Thema Astrophysik unter besonderer Berücksichtigung der Methodenvielfalt

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Dominik Köth

geboren am 8. August 1988



15. September 2012

Betreuer: Prof. Dr. Thomas Trefzger

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Fakultät für Physik und Astronomie

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik

Abstract

Die Schüler eines bayerischen Abiturjahrgangs haben die Möglichkeit, in der zwölften Jahrgangsstufe im Fach Physik den Themenbereich **Astrophysik** zu wählen. In diesem liegt u.a. ein Hauptaugenmerk auf dem Sonnensystem mit all seinen Objekten. Die vorliegende Bachelorarbeit enthält Unterrichtseinheiten zu diesem Thema unter **besonderer Berücksichtigung der Methodenvielfalt**. Weiterhin wird insbesondere auf das Argumentieren, Präsentieren, aber auch auf das Lösen von klassischen Aufgaben als Vorbereitung auf das Abitur Wert gelegt. Die Schüler sollen hierbei an wissenschaftliches Arbeiten herangeführt werden.

Inhalt

1.	Einleitung.....	5
2.	Lehrplan.....	6
2.1.	Lehrplan vor „Astrophysik“	6
2.2.	Lehrplan Astrophysik.....	7
2.2.1.	<i>Orientierung am Himmel</i> oder <i>Was bisher geschah</i>	7
2.2.2.	Sonnensystem	7
2.3.	Verwendung in Bachelorarbeit	8
3.	Didaktische Grundlagen	9
3.1.	Methodenvielfalt.....	9
3.2.	Begeisterung für Physik und Astronomie.....	10
3.3.	Schwierigkeiten der Astronomie	10
4.	Unterrichtsstunden	12
4.1.	Größenverhältnisse im Sonnensystem.....	13
4.2.	Entstehung des Sonnensystems.....	22
4.3.	Mond	33
4.4.	Kepler'sche Gesetze	47
4.5.	Planeten.....	58
4.6.	Flug zum Mars	63
4.7.	Kosmische Objekte	77
4.8.	Stunde mit Teleskop.....	118
5.	Zusammenfassung.....	121
6.	Ausblick.....	122
7.	Danksagung	123
8.	Literaturverzeichnis.....	124
9.	Verzeichnis	125
	Anhang A: Zusätzliche Referatsthemen:	126
	Anhang B: Beschreibung der Begleit-CD	127
	Erklärung	128

1. Einleitung

„Was ist Physik?“

Physik wird von dem altgriechischen Wort *Physika* abgeleitet. *Physika* bedeutet die Wissenschaft von natürlichen Dingen. [...] Es ist ein warmer Sommerabend circa 600 vor Christus [...] und du siehst hinauf zum nächtlichen Himmel und da, einige der Sterne scheinen sich zu bewegen und deswegen nennst du sie *Planeten* oder *Wanderer*. Das ist der Beginn einer 2600 Jahre währenden Reise, angefangen von den alten Griechen und Isaac Newton, Niels Bohr und Erwin Schrödinger bis hin zu den deutschen Forschern [...].“

So beschreibt Dr. Sheldon Cooper aus der amerikanischen Sitcom *The Big Bang Theory* seiner Nachbarin Penny, was Physik ist.¹

Physik als eine der ältesten Naturwissenschaften hat seinen Ursprung in dem Bereich, den wir später **Astronomie** nennen werden. Die Menschen fast aller antiken Kulturen haben sich mit der Beobachtung der leuchtenden Erscheinungen befasst und ihr Leben nach ihnen ausgerichtet. So wussten sie, wann sie ihre Felder bestellen mussten oder wann die Jahreszeiten wechselten. Im Laufe der Zeitgeschichte brachten Astronomen und Forscher neue bahnbrechende Errungenschaften wie die Kepler'schen Gesetze, das Gravitationsgesetz oder die Mondlandung hervor.

Auch die Schülerinnen und Schüler (Anmerkung: im Folgenden wird aufgrund der Einfachheit nur noch das Wort „Schüler“ benutzt, ebenso für Lehrerinnen und Lehrer nur das Wort „Lehrer“) der bayerischen gymnasialen Oberstufe haben die Möglichkeit, im Fach Physik den Themenbereich **Astrophysik** zu wählen. Dort erfahren sie u.a. Wissenswertes über das Sonnensystem mit all seinen kosmischen Objekten wie Sonne, Planeten und Monde. Außerdem werden sie ihre bisherigen Kenntnisse weiter vertiefen und auch anwenden. So soll bei Schülern das Interesse für Astronomie, Physik und Naturwissenschaften geweckt und gefördert werden.

Einen Beitrag dazu lieferte das *Internationale Jahr der Astronomie 2009*², das anlässlich Galileo Galileis erster Beobachtungen mit einem Teleskop und Keplers Deutung der Planetenbewegung 400 Jahre und der Mondlandung 40 Jahre zuvor ausgerichtet wurde. Dabei wurden vor allem die Auswirkungen und Einflüsse der Astronomie auf die Menschen und ihre Kultur hervorgehoben.

Die hier vorliegende Arbeit bietet zehn Unterrichtsstunden für den Themenbereich „Sonnensystem“. Neben dem Erwerb und der Vertiefung von Fachwissen liegt das Hauptaugenmerk auf dem Einsatz verschiedenster Methoden. Die Schüler sollen mittels unterschiedlicher Herangehensweisen Themen wie *Entstehung des Sonnensystems*, *Kepler'sche Gesetze* oder *Kosmische Objekte* erkunden.

¹ [TBBT] Staffel 3, Episode 10 – The Gorilla Experiment (dt. Das Gorilla-Projekt).

² [IYU]

2. Lehrplan

2.1. Lehrplan vor „Astrophysik“

Der Einstieg in die Astronomie erfolgt für Schüler in der fünften Jahrgangsstufe im Fach Geographie innerhalb des Schwerpunkts *Geo 5.1 Planet Erde*. Schüler lernen hierbei die *Grundstruktur unseres Sonnensystems sowie Grundlagen des Lebens auf der Erde*.³

Ebenso befinden sich im Schwerpunkt *Ev 5.5 Der Glaube an Gott* im Fach Evangelische Religionslehre Überlegungen, die *die biblische Vorstellung von Gott als Schöpfer, Erhalter und Vollender der Welten klären*.⁴

In der zehnten Jahrgangsstufe werden in *Ph 10.1 Astronomische Weltbilder*⁵ die *Entwicklung des astronomischen Weltbilds von der Antike bis zu Kepler* und die *Aspekte der modernen Kosmologie* behandelt. Das *geozentrische und heliozentrische Weltbild vor dem jeweiligen geistesgeschichtlichen und gesellschaftlichen Hintergrund* und die *Mitteilung der Kepler'schen Gesetze und ihre Anwendung auf die Bewegungen von Himmelskörpern* sowie ein *Überblick über Urknall, Expansion und Struktur des Universums* werden durchgenommen.

In dem Schwerpunkt *Ph 10.2 Die Mechanik Newtons*⁶ werden nach der Einführung der *Newton'schen Gesetze*, der *Impuls- und Energieerhaltungssätze* auch *Kreisbewegungen mit konstanter Geschwindigkeit* behandelt. Dabei lernen Schüler *Winkelgeschwindigkeit, Zentripetalkraft, das Newton'sche Gravitationsgesetz* und die *Bewegungen unter Einwirkung der Gravitationskraft; Planetenbewegung* kennen.

Der *Ph 10.4 Profilbereich am NTG* gibt Schülern eines naturwissenschaftlich-technologischen Gymnasiums die Möglichkeit, an die bisher behandelten Themen anzuknüpfen und mit *aufwändigeren experimentellen und mathematischen Verfahren* zu vertiefen. Neben dem Thema *Physik am Computer*, das *Computermodellierung* und *Computersimulationen eines komplexeren mechanischen Systems* wie *Zwei-oder Dreikörperproblem* beinhaltet, bietet das Thema *Kosmologie* eine Vertiefung in den Themen *Sternentwicklung* und *kosmische Größenordnungen* an.

³ [LP Geo5]

⁴ [LP Ev5]

⁵ [LP Ph10]

⁶ [LP Ph10]

2.2. Lehrplan Astrophysik

Der bayerische Lehrplan⁷ sieht in *12 Lehrplanalternative Astrophysik* fünf große Themenblöcke vor:

1. Ph_{Ast} 12.1 Orientierung am Himmel
2. Ph_{Ast} 12.2 Überblick über das Sonnensystem
3. Ph_{Ast} 12.3 Die Sonne
4. Ph_{Ast} 12.4 Sterne
5. Ph_{Ast} 12.5 Großstrukturen im Weltall

Dabei stehen den Schülern wöchentlich drei Unterrichtsstunden zu jeweils 45 Minuten zur Verfügung, die in eine Einzel- und eine Doppelstunde aufgeteilt sein können.

2.2.1. Orientierung am Himmel oder Was bisher geschah

Der Themenblock *Orientierung am Himmel* ist nach der zehnten Jahrgangsstufe⁸ der erste Kontakt mit dem Thema Astronomie. Den Schülern wird dabei der *erste Eindruck von der Vielfalt der Strukturen im Weltall* vermittelt. Sie lernen *markante Sternbilder sowie typische astronomische Objekte* kennen. Sie erhalten einen *Überblick über astronomische Größenordnungen von Entfernungen, Zeiten, Massen* und lernen wichtige Begriffe für die *tägliche und jährliche Bewegung von Himmelskörpern* kennen, sodass sie *scheinbare Bewegungen von Sternen und Planeten* und die *Bewegung der Sonne und Planeten relativ zum Fixsternhintergrund* beschreiben können. Zur Motivation für das Thema Astronomie und Astrophysik bietet sich ein Besuch eines Planetariums oder einer Sternwarte an. Dabei machen die Schüler eigene Beobachtungen und Erfahrungen mit dem Thema.

2.2.2. Sonnensystem

Dem in dieser Arbeit behandelten Themenblock *Überblick über das Sonnensystem* werden vom Lehrplan neun Unterrichtsstunden angerechnet. Ziel der Unterrichtsstunden ist, dass Schüler die *typischen physikalischen Eigenschaften der Objekte unseres Sonnensystems im Überblick* kennenlernen.

Gemäß dem Lehrplan sollen die Schüler einen *Überblick über den Aufbau des Sonnensystems* haben, der *Planeten und ihre Monde, ausgewählte Beispiele zu Zwergplaneten und Kometen, Meteoriten, Hinweis auf Kleinkörper im Sonnensystem* beinhaltet. Weiterhin sind für die *Bestimmung von Massen und Bahnparametern im Sonnensystem* die *Wiederholung der Gesetze von Kepler und des Gravitationsgesetzes*, das *Prinzip der Massenbestimmung von Sonne, Planeten und Monden* und die *künstlichen Satelliten und Raumsonden* wichtig.

⁷ [LP Ph12]

⁸ [LP Ph12]

Als weitere Orientierung für den Inhalt dient die Handreichung *Grundlagen der Astrophysik*⁹, auf deren beigelegter CD eine Sammlung von Abituraufgaben und Begleitmaterial ist.

2.3. Verwendung in Bachelorarbeit

Die vorliegende Arbeit behandelt all die o.g. Punkte. Der thematische Ablauf (*roter Faden*) des Unterrichtsstoffes ist folgender:

Nach einer Einführung, in der die Schüler einen Überblick über die Körper im Sonnensystem und deren Größen erhalten, lernen Schüler die Entstehung des Sonnensystems kennen. Anschließend werden – ausgehend von der Erde – die nächstgelegenen Objekte behandelt und ihre physikalischen Besonderheiten untersucht. Zu diesen gehören der Mond (Mond- und Sonnenfinsternis, Mondphasen), die Kepler'schen Gesetze (Weltbilder, Ellipsen, Verbindung zu Gravitationsgesetz) und die Bewegung der Planeten (siderische und synodische Umlaufzeiten). Eine eigene Doppelstunde widmet sich dem Flug zum Mars (Energieniveaus auf Bahnen, Kosmische Geschwindigkeiten, Hohmannbahnen, Swing-By-Methode). Abschließend werden alle bisher nicht besprochenen kosmischen Objekte behandelt (Meteoriten, Asteroiden, Zwergplaneten, Kometen etc.).

⁹ [Hand]

3. Didaktische Grundlagen

3.1. Methodenvielfalt

Das Augenmerk dieser Arbeit liegt in der **Methodenvielfalt**. Hilbert Meyer¹⁰ unterscheidet dabei zwischen Makromethodik, Mesomethodik und Mikromethodik.

Makromethodik enthält die methodischen Großformen, bei denen sich der gemeinsame Unterricht aus Freiarbeit, Lehrgängen und Projektarbeit zusammenfassen lässt. Mesomethodik beschreibt die Dimensionen methodischen Handelns, die Hilbert in Sozialformen wie Plenar-, Gruppen-, Tandem- und Einzelarbeit, in Handlungsmuster wie Vortrag, Erzählung, Disput, Textarbeit oder Tafelanschrieb und in Verlaufsformen wie „nach Einstieg folgt Erarbeitung mit anschließender Ergebnispräsentation“ einteilt. Die Inszenierungstechniken wie zeigen, vormachen, modellieren, provozieren, verfremden, Impuls geben, verkleinern etc. seitens der Schüler und Lehrer sind in der Mikromethodik enthalten.

Der Aufbau der Unterrichtseinheiten kann verschiedenen **thematischen Gängen**¹¹ folgen:

- 1) Linear, der Sachlogik folgender Gang
- 2) Aus verschiedenen Ecken kommender, vernetzter Gang mit Zusammenführung
- 3) Verschiebe-Bahnhof
- 4) „Eins im anderen“
- 5) Spiralcurriculum: Ein und dasselbe Thema wird wiederholt und auf jeweils höherem Niveau durchgenommen.

Die (Methoden-) Vielfalt kommt durch den Einsatz verschiedener Medien wie z.B. Computer, Tabellen, Landkarten, Teleskope, Texte, durch die Verwendung verschiedener Sozialformen wie Gruppenarbeit und Einzelarbeit, durch verschiedene Handlungsmuster wie Vorträge, Präsentationen, Dispute, Textarbeit und Tafelanschrieb und durch verschiedene thematische Gänge zustande.

¹⁰ [Meyer] S. 51

¹¹ [Meyer] S. 58

3.2. Begeisterung für Physik und Astronomie

Da derzeit Nachwuchsmangel in MINT-Fächern (**M**athematik, **I**nformatik, **N**aturwissenschaften und **T**echnik) herrscht¹², ist es auch ein Ziel dieser Arbeit, mit gezielten und nicht alltäglichen Konzepten die Neugier für Naturwissenschaften und besonders für die Physik zu wecken, die vor allem bei Mädchen ein schlechtes Bild abliefern¹³. Sie soll auf anderem Wege versuchen, den Schülern Physik nahezubringen und sie für die Vielfalt im Universum zu begeistern.

Das *Internationale Jahr der Astronomie 2009*¹⁴, das im selben Jahr u.a. das vierhundertjährige Jubiläum der ersten Benutzung eines Teleskops durch Galilei feierte, setzte sich als Ziel, mit Ausstellungen und Events den Menschen die Errungenschaften der Astronomie nahezubringen. So können Bürger sich über Raumfahrt und Astronomie informieren und mehr über ihren Platz im Universum erfahren.

Einen weiteren Anstoß, sich mit Naturwissenschaften und Physik zu beschäftigen, ist die sehr beliebte¹⁵ und erfolgreiche amerikanische Sitcom *The Big Bang Theory*, die das Leben von vier Physikern portraitiert, die versuchen, sich trotz ihrer hohen Intelligenz im alltäglichen Leben und den Interaktionen mit „Nicht-Physikern“ zu bewähren. Authentizität erlangt die Serie vor allem durch die Auftritte der Astrophysiker Briane Greene¹⁶, Neil deGrasse Tyson¹⁷, Stephen Hawking¹⁸ und des Nobelpreisträgers George Smoot¹⁹. Auf lustige und ironische Weise werden hier Begriffe wie Schrödingers Katze, Doppelspaltexperiment, Quantenmechanik oder Astronomie beleuchtet.

3.3. Schwierigkeiten der Astronomie²⁰

Bei der Beobachtung von Ereignissen in der astronomischen Forschung, insbesondere in der modernen Kosmologie, finden diese in unvorstellbaren Entfernungen statt. Während Experten auf Bildern von großen Teleskopen Vorgänge mit heftigster Dynamik sehen, spielen diese sich doch über einen riesigen Zeitraum ab. Für die Forscher auf der Erde und im Weltall und vor allem für die Schüler bleibt da lediglich die Rolle des passiven Beobachters, der nicht aktiv in das Geschehen eingreifen kann. Somit sind „Was wäre, wenn“-Fragen nur durch Computersimulationen beantwortbar. Durch die langsame Bewegung der Himmelskörper sind außerdem schnelle Schlüsse auf die Bewegungsmuster fast unmöglich. Außerdem müssen fast alle Beobachtungen mittels teurer Instrumente nachts – also nicht zur Schulzeit – durchgeführt werden.

¹² http://stifterverband.info/wissenschaft_und_hochschule/hochschulen_im_wettbewerb/mint_absolventen/index.html (28.08.2012)

¹³ [Kirchner] S. 583

¹⁴ [IYA]

¹⁵ <http://www.sueddeutsche.de/medien/lieblingsserie-the-big-bang-theory-ein-herz-fuer-nerds-1.981477> (06.08.2012)

¹⁶ [TBBT] Staffel 4, Episode 20 – The Herb Garden Germination (dt. *Sag's nicht weiter!*)

¹⁷ [TBBT] Staffel 4, Episode 07 – The Apology Insufficiency (dt. *Besuch vom FBI*)

¹⁸ [TBBT] Staffel 5, Episode 21 – The Hawking Excitation (noch nicht auf Deutsch erschienen)

¹⁹ [TBBT] Staffel 2, Episode 17 – The Terminator Decoupling (dt. *Das Placebo-Bier*)

²⁰ [Kirchner] S. 509

Somit treten in Bezug auf Astronomie Differenzen zwischen dem *Gewussten* (d.h. aus Bücher, Fernsehen etc.) und dem *Erfahrenen* auf. Diese beziehen sich nicht nur auf weit entfernte Objekte, sondern auch auf einfache Beobachtungen. Kirchner gibt hier ein Beispiel²¹:

„Diese Aussage soll im Folgenden kurz am Beispiel der Entstehung der Mondphasen erläutert werden. Bei Umfragen zeigt sich immer wieder, dass Befragte jeden Alters und unterschiedlichster Bildung (sogar unabhängig vom Umfang des erfahrenen Astronomieunterrichts!) sich die Phasengestalten des Mondes dadurch erklären, dass der Schatten der Erde auf den Mond falle. Ist diese Erklärung bei Sichelmond im allerersten Moment vielleicht noch einleuchtend, so erstaunt sie hinsichtlich des Halbmondes [...] und noch mehr bei beim fast vollen Vollmond.“

Kirchner²² nennt folgende vier hauptsächliche Ursachen für Diskrepanz zwischen dem *Gewussten* und dem *Erfahrenen*:

- 1) Verstärkung, moderne Medien und Ähnliches haben den Menschen von der Natur entfremdet. Ebenso sind astronomische Beobachtungen durch die Lichtverschmutzung erschwert.
- 2) Das hat zur Folge, dass viele Phänomene gar nicht bekannt sind und Theorien und Modelle Lösungen für Beobachtungen/Messungen liefern, die nicht „gegenwärtig“ sind. Sie liefern Lösungen für *ungestellte* Fragen.
- 3) Der Übergang von geozentrischer zu heliozentrischer Beobachtung überfordert das Abstraktionsvermögen. Es ist schwer vorstellbar, wie die Bewegung eines Körpers in zwei unterschiedlichen (Inertial-) Systemen aussieht, einmal von der Erde aus und einmal von einem externen Beobachter.
- 4) Astronomische Zahlenangaben überschreiten das menschliche Vorstellungsvermögen. Oftmals sind die vereinfachenden Darstellungen zu simpel oder auch falsch.

Somit ist es vor allem Aufgabe der Lehrer, den Schülern die Phänomene aufzuzeigen und diese entsprechend darzulegen. Persönlich finde ich es sehr wichtig – aber auch sehr schwer – den Übergang der beiden Weltbilder den Schülern zu erklären. Betrachtet man beispielsweise noch einmal das Modell von den Mondphasen (s.o.), so kann man Folgendes erkennen. Der Mond wandert in der Zeit nach Neumond tief vom Westen hoch über den Süden wieder tief in den Osten, während sich gleichzeitig die Phasengestalt ändert. Betrachtet man gleichzeitig noch die gerade untergegangene Sonne (hierbei braucht der Schüler Hilfe!), so erkennt man, dass der Mond wie eine Kugel im Licht der Sonne hängt. Somit hat man den Übergang von einem geozentrischen zu einem heliozentrischen Weltbild gemacht.

²¹ [Kirchner] S. 510 f

²² [Kirchner] S. 511

4. Unterrichtsstunden

Obwohl im Lehrplan lediglich neun Unterrichtsstunden für das Thema „Sonnensystem“ eingeplant sind, wird dieses Thema in der vorliegenden Arbeit auf acht Unterrichtseinheiten mit insgesamt elf Unterrichtsstunden (zu je 45 Minuten) „erweitert“ werden, um möglichst alle Objekte im Sonnensystem eingehend zu erläutern. Die Anregung zu der Stunde „Messungen mit dem Teleskop“ ist zusätzlich zu den bisherigen sieben Unterrichtseinheiten. Sie kann je nach Intention und Möglichkeiten des Lehrers als Inspiration dienen. Mehrere Stunden sind als Doppelstunden konzipiert, um so zusammengehörige Themen ausführlicher durchnehmen zu können.

Weiterhin sind die Unterrichtsstunden variabel gestaltet. Der Lehrer hat somit die Möglichkeiten einzelne Aspekte je nach Bedarf weiter zu vertiefen oder zu kürzen.

Da jedoch nicht nur reines theoretisches Wissen vermittelt werden soll, sondern auch die gezielte Vorbereitung auf das Abitur wichtig ist, sind die hier verwendeten Übungsaufgaben allesamt aus vorhergegangenen Abituraufgaben²³ entnommen worden. Das Niveau der Aufgaben orientiert sich somit zwar an der finalen Abschlussprüfung, jedoch ist die Lösung mittels Separation in einzelne Teilaufgaben auch für mit dem Stoff weniger vertraute Schüler erreichbar.

Das Unterrichtsmaterial befindet sich jeweils im Anschluss an die Beschreibung der Unterrichtsstunde und ebenfalls auf der CD zur einfacheren Handhabung. Eine Beschreibung des Inhaltes befindet sich in Anhang B.

²³ [Hand] Die Aufgaben stammen aus der Begleit-CD und enthalten noch viele weitere Aufgaben.

4.1. Größenverhältnisse im Sonnensystem

Das am besten erforschte Planetensystem ist unser Sonnensystem, in dem sich die Erde befindet. Bis zum Beginn des 17. Jahrhunderts waren neben der Erde nur fünf weitere Planeten bekannt. Die Entdeckung des Plutos im Jahre 1930 vervollständigte zusammen mit den Planeten Uranus und Neptun das Planetensystem, bis es 2006 auf acht Planeten *reduziert* wurde (Siehe Unterrichtseinheit *Komische Objekte*).

Motivation

Dies ist die erste Unterrichtsstunde im Themenblock „Sonnensystem“. Als Einführung soll der Aufbau des Sonnensystems veranschaulicht werden. Die Schüler bekommen den ersten Kontakt mit den typischen Größen der wichtigsten Himmelskörper in der näheren Umgebung zur Erde, den Planeten.

Richt-, Grob- und Feinziele

Zu den Fähigkeiten der Schüler in der Oberstufe gehört neben dem Lesen und Auswerten von Tabellen auch der Umgang mit Computern und Tabellenkalkulationsprogrammen wie Excel. In der vorliegenden Unterrichtsstunde sollen beide Aspekte verknüpft werden.

Ziel der Stunde ist es, anhand einer Tabelle der Größen der Planeten ein maßstabsgetreues Modell derer Umlaufbahnen auf eine bekannte Umgebung mittels einer Stadt/Landkarte zu übertragen.

Dabei sollen die Schüler (Grobziele)

- die für das Modell relevanten Daten (Planetendurchmesser und Bahnradien) aus einer Tabelle in ein Tabellenkalkulationsprogramm übertragen, was das Lesen und Auswerten von Graphiken und Datenreihen lehrt.
- aus diesen Daten gemäß der Anleitung²⁴ eine Anwendung erstellen, die automatisch alle Größen umrechnet.
- lernen, wie das Erstellen einfacher Anwendungen funktioniert und welche Möglichkeiten Programme wie Microsoft[®] Excel und Apache OpenOffice[™] Calc bieten.
- die so gewonnen Größen auf eine Karte (per Hand oder mit dem PC) übertragen, was die Bedienung von Zeichenprogrammen bzw. den Umgang mit Zirkel und Landkarten schult.

Die Schüler sollen dabei insbesondere (Feinziele)

- die Größenverhältnisse im Sonnensystem erkennen.
- erkennen, dass trotz der Größe der Planeten die Abstände der Planeten untereinander sehr groß sind.

²⁴ S. 20

- sehen, dass man die Planeten anhand ihrer Umlaufbahnen in zwei Gruppen (terrestrisch und jovianisch) unterteilen kann.
- als Erweiterung erkennen, dass die Sonne fast die gesamte Masse des Sonnensystems besitzt.

Lernvoraussetzung

Aus den vorausgegangenen Jahrgangsstufen und dem ersten Thema der Astrophysik (Orientierung im Weltall²⁵) kennen die Schüler bestimmte Größenordnungen im Universum, wie die Astronomische Einheit (*AE*, im Englischen *AU* für *astronomical unit*), die Parallaxensekunde (Parsec, kurz pc) oder die Masse von Sonne und Erde. Außerdem sind sie mit der Bewegung von Planeten um die Sonne vertraut.

Weitere Voraussetzungen sind grundlegende Kenntnisse in Tabellenkalkulation (z.B. Excel, Calc), d.h. die Schüler können einfache Rechnungen wie Multiplikation von Spalten/Zeilen mit bestimmten festen Werten berechnen.

Unterrichtsverlauf

Als Einstieg sollen die Schüler schätzen, wie weit Planeten von der Sonne entfernt sind, wenn ein gewisser Gegenstand (z.B. Erbse, Tennisball, Fußball) die Sonne darstellt. Man wird (höchstwahrscheinlich) feststellen, dass diese Schätzungen mehrere Größenordnungen auseinander liegen. Dies ist nicht verwunderlich, denn der Umgang mit Zahlenwerten in diesen Größenordnungen fällt sehr schwer und ist im bisherigen Schulunterricht nicht vorgekommen.

Es ist möglich, die Stunde auf **zwei verschiedene Arten** zu gestalten:

- a) Die Schüler zeichnen die Planetenbahnen mit Stift, Schnur und Zirkel auf eine Stadtkarte.
- b) Die Schüler suchen sich eine hochauflösende Stadtkarte und zeichnen die Kreise mit einem Programm auf diese Karte.

Der weitere Stundenverlauf ist in vier Schritte eingeteilt:

1. Die Schüler suchen im Internet oder Büchern eine Tabelle, die alle wichtigen Daten über die Planeten und die Sonne enthält. Aus dieser lesen sie nun die Größen (**Durchmesser**) der Himmelskörper und die **Bahnradien** heraus und übertragen sie in ein Tabellenkalkulationsprogramm wie Excel.
2. Es soll ein Programm erstellt werden, das die Größen und Umlaufbahnen maßstabsgerecht umrechnet. Die Schüler finden mit Hilfe einer Anleitung aus dem ursprünglichen Durchmesser der Sonne und der Modellsonne den Maßstab heraus und übertragen diesen auf die

²⁵ [LP PH12]

Größen der Planeten und die Bahnradien. Dabei gibt der Lehrer Hilfestellungen für Schüler, die mit dem Programm vielleicht nicht vertraut sind.

Das Programm muss enthalten:

- Eine Spalte, in der die **Planetennamen** stehen.
- Eine Spalte, in der die **Originaldurchmesser** der Planeten stehen.
- Eine Spalte, in der die **Modelldurchmesser** der Planeten stehen.
- Ein Feld, das den Quotienten aus Modellsonne und Originalsonne enthält. Dieses Feld zeigt das **Verhältnis** an. Mit diesem Verhältnis berechnet man die übrigen Durchmesser der Modellplaneten.
- Eine Spalte, die die **Originalbahnradien** der Planeten angibt. (Da diese oftmals in AU bzw. AE angegeben sind, können sie in einer weiteren Spalte in Kilometer umgerechnet werden.
- Eine Spalte, die die **Modellbahnradien** angibt. Diese berechnet sich aus dem Produkt aus den Originalbahnradien und dem Verhältnis. Dabei kann man sich überlegen, ob eine Angabe in Meter oder in Kilometer sinnvoll ist.

3. Die Schüler nehmen eine Karte einer beliebigen Stadt zur Hand. (Am besten ist diese Stadt den Schülern vertraut, sodass sie Abstände gut einschätzen können.) Sie wählen einen geeigneten Ort (der allen bekannt ist) als Platz für die Modellsonne aus. Nun legen sie die Größe (Durchmesser) dieser Modellsonne fest. (Die Größe kann sich auch an einem vor Ort befindlichen Objekt orientieren.)

Nun gibt man diese Größe in das vorher geschriebene Programm ein, sodass die fehlenden Größen maßstabsgetreu berechnet werden. Ist das Programm gut geschrieben, lassen sich alle Größen in Abhängigkeit lediglich der Größe der Modellsonne ausrechnen.

4. **Zeichnung**

a. **per Hand:**

Die Schüler nehmen die Karte von der Stadt und suchen auf ihr den festgelegten Punkt der Sonne. Sie sollen bemerken, dass sie die Größe der Sonne nicht beliebig groß wählen können, da sonst nicht alle Planetenbahnen auf die Karte passen. Von diesem Punkt ausgehend zeichnen sie Kreise (Ellipsen sind aufgrund der kleinen Exzentrizität zu schwer zu konstruieren), die die Planetenbahnen darstellen, mit einer Schnur und einem Stift auf die Karte.

b. **am Computer:**

Die Schüler suchen im Internet ein hochauflösendes Bild (mind. 1024x768 Pixel) der ausgewählten Stadt, das sowohl den Ort der Modellsonne zeigt als auch die Bahnen aller Planeten enthält. (Die Schüler können die Größe grob abschätzen.) Nun zeichnen sie mit einem Programm wie DynaGeo die Planetenbahnen auf das Bild. (Anleitung s.u.)

Schließlich erhält man ein maßstabsgetreues Abbild der Planetenbahnen in einem Maßstab, der die Relationen der Entfernungen den Schülern offen darlegt.

Ein Programm, das mit Excel geschrieben werden soll, kann z.B. folgendermaßen aussehen: (Abb.1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Maßstäbliches Sonnensystem				AE=	150000000			
2									
3		Originalgröße	Verhältnis	neue Größe in m	Abstand Original AE	Abstand Original km	Abstand neu m	Abstand Sonne neu km	
4	Sonne	1392000	1,43678E-06	2					
5	Merkur	4878		0,007008621	0,387	58050000	83,40517241	0,083405172	
6	Venus	12102		0,017387931	0,723	108450000	155,8189655	0,155818966	
7	Erde	12756		0,018327586	1	150000000	215,5172414	0,215517241	
8	Mars	6757		0,009708333	1,52	228000000	327,5862069	0,327586207	
9	Jupiter	142796		0,205166667	5,2	780000000	1120,689655	1,120689655	
10	Saturn	120000		0,172413793	9,54	1431000000	2056,034483	2,056034483	
11	Uranus	50800		0,072988506	19,2	2880000000	4137,931034	4,137931034	
12	Neptun	49500		0,07112069	30,1	4515000000	6487,068966	6,487068966	
13		fest			fest	fest			
14									
15	Maßstab:	1 : 696000			Messgröße "Sonne"				
16									

Abb. 1: Mögliches Programm zur Berechnung der Planetenbahnen.

Das hier vorliegende Beispiel wurde folgendermaßen programmiert:

In die Spalte B wurden die Originaldurchmesser der Himmelskörper eingetragen, Spalte D ergibt die Durchmesser der Modellkörper. Dabei wurde das Programm so eingerichtet, dass man lediglich die Größe der Modellsonne einstellen muss, um alle anderen Größen zu berechnen. Das Verhältnis (Quotient) zwischen Originalgröße und Modellgröße ist in C4 angegeben, der Maßstab (Kehrwert des Verhältnisses) in B15 und B16.

Spalte E enthält die Bahnradien der jeweiligen Planeten um die Sonne in Astronomischen Einheiten. Da zur Verallgemeinerung in Kilometer gerechnet werden soll, werden diese Größen mit der „Konstante“ der Astronomischen Einheit (F1) in Bahnradien mit der Einheit Kilometer umgerechnet (Produkt von Spalte E mit Konstante F1 ergibt Spalte F). Multipliziert man diese nun mit dem Maßstab (C4), so erhält man alle Bahnradien in Meter (Spalte G) oder in Kilometer (Spalte H). Diese Abstände müssen dann auf die Karte übertragen werden. Meistens ist es so, dass die Größen der Planeten nicht eingezeichnet werden können, da sie vergleichsweise zu den Umlaufbahnen zu klein sind. Die Abstände können natürlich auf den Maßstab der Karte umgerechnet werden. Eine einfachere Methode ist es, mit einem Programm wie z.B. GoogleEarth und der Funktion „Lineal anzeigen“ die Abstände auszumessen und damit die Radien zu zeichnen.

Ein fertiges Beispiel könnte folgendermaßen aussehen: (Abb. 2 und Abb. 3)



Abb. 2: Zeichnung des Sonnensystems mit dem Computer; gezeichnet sind die Sonne und die terr. Planeten.



Abb. 3: Zeichnung des Sonnensystems mit dem Computer; gezeichnet sind die Sonne und die acht Planeten.

Der Stadtplan von Würzburg wurde mit GoogleEarth²⁶ ausgeschnitten. Als Sonne dient der Obelisk auf dem unteren Würzburger Markt (Durchmesser 2m). Es wurde ein Bild mit den terrestrischen Planeten und ein Bild mit allen Planeten angefertigt. Man erkennt sehr gut, dass man für die äußeren Planeten einen großen Abstand zur Modellsonne braucht.

Die Schüler können nun die Planetenradien besser einschätzen, da sie die Entfernungen mit bekannten Objekten aus ihrer unmittelbaren Umgebung verknüpfen können. Während die Bahn der Erde durch den südlichen Turm des Würzburger Dom verläuft, befindet sich der Neptun auf einer Bahn, die das über sechs Kilometer entfernte Rottendorf durchquert.

Als Erweiterung für Schüler, die sehr schnell mit diesem Arbeitsauftrag fertig sind, steht ihnen eine weitere Aufgabe bereit. In dieser sollen die Schüler die Massenverhältnisse im Sonnensystem darstellen. Da die Sonne jedoch über 99% der Gesamtmasse beinhaltet, ist eine sinnvolle Darstellung vor allem für die kleineren Planeten nötig, d.h. es könnten z.B. mehrere voneinander abhängige Darstellungen angefertigt werden. Die Form der Darstellung (Säulendiagramm, Balkendiagramm, Tortendiagramm etc.) ist dabei den Schülern selber überlassen.

²⁶ Man entferne vorher alle Einblendungen (Orte, Fotos, Straßen, 3D-Gebäude und Galerien), um übersichtlichere Karten zu erhalten.

Unterrichtsmaterial

Wird die Zeichnung der Karte per Hand vorgenommen, so sind die in der ersten Spalte gelisteten Objekte nötig, wird sie am Computer erstellt, so die Objekte aus der zweiten Spalte.

Zeichnung per Hand	Zeichnung am Computer
internetfähiger) Computer mit Microsoft® Office Excel oder OpenOffice™ Calc	
eine Übersicht über das Sonnensystem, die wichtige Größen (Durchmesser der Sonne und Planeten und deren Abstand zur Sonne) enthält	
ein (Filz-)Stift	Programm, das Kreise auf einem Bild zeichnen kann (DynaGeo)
ein Zirkel	
Eine Stecknadel oder ein kleiner Nagel	
eine lange Schnur (noch besser wären 2 Schnüre, um eine gerade Stifthaltung zu garantieren!)	
eine Stadtkarte	hochauflösendes Bild einer Stadt (mind. 1MP)
Taschenrechner	eventuell ein Programm, mit dem man direkt auf der Karte Abstände messen kann (GoogleEarth)

Das Unterrichtsmaterial dieser Stunde besteht aus:

- Stundematrix S. 19
- Schüleranleitung S. 20

Stundenmatrix - Planetenmodell

Zeit	Unterrichtsschritt	Lehrerverhalten	Schülerverhalten	Sozialform	Medien	Didaktischer Kommentar
8	Motivation Stellung einer Abschätzfrage	Fragestellung nach Größenverhältnis im Sonnensystem	Schüler schätzen Abstände.	SLG	Eventuell kleines Objekt	Lehrer kann geeignetes Objekt zeigen.
10	Erarbeitung I Wahl einer Tabelle	Lehrer gibt Hilfestellung.	Suche einer geeigneten Tabelle und Übertragung in ein geeignetes Programm (Excel)	Einzelarbeit/Partnerarbeit	PC	
10	Erarbeitung II Schreiben eines Maßstabsrechners	Lehrer gibt Hilfestellung bei der Funktionsweise des Maßstabsrechners.	Erstellung eines funktionsfähigen Maßstabsrechners	Einzelarbeit/Partnerarbeit	PC	Anleitung wird von Lehrer vorgegeben.
5	Wahl des Maßstabes	Lehrer passt auf, dass die Sonne geeignet gewählt wird.	Schüler suchen zusammen eine geeignete „Sonne“.	Diskussion		
12	Erarbeitung III Übertragung auf Karte	Lehrer gibt Hilfestellung.	Übertragung des Maßstabes auf die Karte	Einzelarbeit/Partnerarbeit/ Schülergespräch	PC/Karte	Lehrer tritt lediglich als Moderator auf.
	Zusatzaufgabe		Schüler erstellen Graphik über Verteilung der Massen im Sonnensystem.	Einzelarbeit/Gruppenarbeit	PC, Heft	

SLG : Schüler-Lehrer-Gespräch

Schüleranleitung: Programm (zehn Zeilen & mind. fünf Spalten)

- Schreibe zuerst die Sonne und die Planetennamen, deren Originaldurchmesser und deren Originalbahnradien in drei Spalten nebeneinander auf.
- Füge in die vierte Spalte die Modelldurchmesser ein. Zuerst wähle für die Sonne eine beliebige Größe.
- Berechne nun in einem beliebigen Feld, das nicht zur Tabelle gehört, das Verhältnis von Modellsonne zur Originalsonne.
- Berechne mit diesem Verhältnis die Größen der restlichen Planeten:
 - o Planetendurchmesser
 - o Planetenbahnen
- Überlege dir für das Ergebnis eine geeignete Größe (Meter, Kilometer). Achte - falls nötig - auf die Umrechnung von Einheiten!

Zeichnung mit **DynaGeo**:

1. Suche ein hochauflösendes Bild (mind. 1024 * 768 Pixel, 1MP) der gewählten Stadt, das sowohl den Ort der Modellsonne zeigt als auch die Bahnen aller Planeten enthält.
2. Öffne DynaGeo und füge das Bild ein (Bearbeiten → Hintergrund-Bild laden...)
3. Zeichne einen Punkt an die Stelle der Modellsonne (Konstruieren → Basispunkt). Benenne ihn als Sonne. (Rechtsklick → Benennen...)
4. Finde den Maßstab des Bildes heraus und rechne die Bahnradien auf diesen um.
5. Zeichne Kreise mit den berechneten Bahnradien. (Konstruieren → Bahnen mit bestimmtem Radius → Radius eingeben)

Zur Erleichterung von Schritt 4 kann man auch das vorher geschriebene Programm erweitern.

Für dieses braucht man sich wiederum nur einen Radius im Modell (am besten für Merkur) überlegen:

- a) Messe mit einem Programm wie GoogleEarth den Radius des Merkurs. (Lineal anzeigen → Linie)
- b) Merke dir den Endpunkt und suche diesen nun auf der Karte in DynaGeo.
- c) Messe den Abstand von der Modellsonne zu diesem Punkt. (Messen & Rechnen → Abstand messen)
- d) Trage diesen Abstand in die Tabelle ein und berechne das Verhältnis von Modellgrößen zu den Größen auf dieser Karte.
- e) Vervollständige alle Bahnradien durch DropDown.

Radius Modell km	Radius Zeichnung in cm	Verhältnis
0,083405172	4,75	56,9509044
0,155818966	8,874031008	
0,215517241	12,27390181	
0,327586207	18,65633075	
1,120689655	63,82428941	
2,056034483	117,0930233	
4,137931034	235,6589147	
6,487068966	369,4444444	

4.2. Entstehung des Sonnensystems

Unser Sonnensystem besteht aus vielen verschiedenen Objekten wie Planeten, Asteroiden und Kometen. Sie unterscheiden sich in Größe, Form und Zusammensetzung, sind aber alle im solaren Urnebel entstanden. Doch warum sind sie so unterschiedlich? Gibt es eine Theorie, die deren Entstehung erklären kann?

Nach der kopernikanischen Wende und der Entdeckung des Newtonschen Gravitationsgesetzes entstanden verschiedene Hypothesen, die versuchten, die Entstehung des Sonnensystems zu erklären. Einen erheblichen Anteil zur Lösung hatten Pierre-Simon Laplace und Immanuel Kant.

Motivation

Wissenschaftliches Arbeiten beinhaltet das Aufstellen von Hypothesen und deren Überprüfung durch Beobachtungen, Messungen und Tests. Stützen diese die Hypothese, kann man weitere Vorhersagen machen. Stützen diese die Hypothese nicht, so muss sie erneuert oder verworfen werden.²⁷

Die Schüler haben in dieser Unterrichtsstunde die Möglichkeit, selber Hypothesen zu einem wissenschaftlichen Thema aufzustellen, diese mit anderen Hypothesen zu vergleichen und argumentativ mit Hilfe verschiedener Beweise zu überprüfen.

Richt-, Grob- und Feinziele

Die Schüler sollen anhand von Bildung und Überprüfung von Hypothesen einen Einblick in wissenschaftliche Denken und Arbeiten bekommen. Ziel der Stunde ist, die Entstehung des Sonnensystems zu verstehen.

In dieser Unterrichtseinheit sollen die Schüler (Grobziele)

- eigene Hypothese zur Entstehung unseres Sonnensystems bilden,
- diese mit anderen Hypothesen vergleichen,
- diese auf ihre Vor- und Nachteile untersuchen und
- mittels vorgegebener wissenschaftlicher Fakten die richtige Hypothese herausarbeiten.

Dabei sollen die Schüler

- sich in der Klasse Gedanken über die Entstehung machen.
- sich eine plausible Hypothese ausdenken, die auf dem bisherigen Wissensstand gründet.

²⁷ [Bennett] S. 104 Graphik

- verstehen, dass es mehrere Hypothesen gab, die versucht haben, die Entstehung des Sonnensystems zu erklären.
- erkennen, welche Vor- und Nachteile jede dieser Hypothesen aufweist.
- beurteilen, ob ein mögliches Argument eine dieser Hypothesen stützt oder sie verwirft.
- argumentativ die richtige Hypothese herausfinden.
- erkennen, dass das Sonnensystem aus einem solaren Urnebel entstanden ist.
- die einzelnen Schritte der Entstehung nachvollziehen können.

Der Lehrer tritt in dieser Stunde lediglich als „Moderator“ auf.

Lernvoraussetzung

In den vorausgegangenen Jahrgangsstufen wurde vor allem in den Naturwissenschaften und der Mathematik besonderes Augenmerk auf Begründen gelegt. Dies kann man aus den Bildungsstandards der Physik²⁸ herleiten. Sie beinhalten „Physik als theoriegeleitete Erfahrungswissenschaft“, d.h. „Schülerinnen und Schüler können die naturwissenschaftliche Arbeitsweise, Vorhersage, Überprüfung im Experiment, Bewertung,... anwenden“ und „bei einfachen Zusammenhängen ein Modell erstellen [...]“ (10. Jahrgangsstufe).

Unterrichtsverlauf

Die Stunde ist in **fünf** große Phasen gegliedert.

In der ersten Phase wird die **Frage nach der Entstehung des Sonnensystems** in den Raum geworfen. Die Schüler fangen nun an, darüber zu diskutieren und verschiedene Hypothesen aufzustellen. Über deren Richtigkeit wird im Laufe der Unterrichtsstunde diskutiert. Dabei soll auch zur Sprache kommen, welche Aspekte eine erfolgreiche Hypothese klären muss. Diese wären die Bewegung der Himmelskörper, die Entstehung der zwei Planetengruppen, die Existenz aller Objekte, die nach IAU nicht als „Planet“ definiert sind. Außerdem muss sie neben allgemeinen Gesetzmäßigkeiten eine Vielzahl von Ausnahmen wie die ungewöhnliche Achsenneigung des Uranus erklären können.²⁹ Weiterhin soll die Hypothese sich auch auf andere, bisher weniger erforschte Planetensysteme übertragen lassen.

In der zweiten Phase erhalten die Schüler vom Lehrer **zusätzliche Hypothesen** („Hypothesenkarten“), von denen jedoch nur eine den „Status einer wissenschaftlichen Theorie erhielt: die **Nebulartheorie der Entstehung des Sonnensystems**.“ (Diese ist jedoch im bisherigen Verlauf der Stunde noch als Hypothese deklariert.) Diese Karten werden ausgedruckt und im Laufe der Unterrichtsstunde mit Magneten an die Tafel gepinnt. Je ein Schüler liest eine Hypothese vor und pinnt diese dann an die Tafel. Eine Alternative zum Ausdrucken und Sortieren an der Tafel stellt eine

²⁸ [Stand]

²⁹ [Bennett] S.323

Präsentation der Hypothesen mittels Computer und Beamer dar. Dabei können die Beweise den Hypothesen anschaulich auf einer Mindmap zugeordnet werden. Die Klasse vergleicht die zusätzlichen Hypothesen nun miteinander und diskutiert Vor- und Nachteile und deren Wahrheitsgehalt. Jedoch hat sie keine „wissenschaftliche Beweise“, ihre Vorgehensweise ist argumentativ.

In der dritten Phase gibt der Lehrer einige „**Beweise**“ („Beweiskarten“) vor, von denen jedoch nicht alle richtig sind. Diese stützen verschiedene Theorien, verwerfen dafür andere. Die Schüler versuchen, diese Beweise den entsprechenden Hypothesen zuzuordnen und die richtige Hypothese herauszufinden. Die Beweise müssen in eine sinnvolle Reihenfolge gebracht werden. Dazu werden (eventuell nach Aussortierung ganz unwahrscheinlich erscheinender Hypothesen) die Hypothesen an die Tafel/OHP/Whiteboard geschrieben und die Beweise darunter gesammelt. Es wird besonders auf wissenschaftliches Argumentieren und logische Zusammenhänge Wert gelegt.

Die vierte Phase dient der **Besprechung** und der **Vertiefung** der richtigen These, wenn diese gefunden wurde. Schüler erfahren hier weitere physikalische Aspekte und deren Zusammenhang bezüglich der Entstehung des Sonnensystems. Sie dient außerdem zur Klärung ausstehender Fragen, da viele unbekannte Inhalte auftauchen.

In der fünften Phase werden die gesamten Ergebnisse zusammengetragen. Die Schüler erhalten zur Nachbereitung ein **Arbeitsblatt**. Da dieses recht lang ist, kann es auch als Hausaufgabe aufgegeben werden.

Bemerkung: Im Gegensatz zum Alltag bezeichnen Astronomen alle Elemente im Universum als Metalle, die schwerer als Helium sind, also alle Elemente außer Wasserstoff und Helium!³⁰

Unterrichtsmaterial

Das Unterrichtsmaterial dieser Stunde besteht aus:

- | | |
|---|-------|
| - Stundematrix | S. 25 |
| - Hypothesenkarten | S. 26 |
| - Beweiskarten | S. 27 |
| - Die Geburt des Sonnensystems (Arbeitsblatt) | S. 30 |

Ebenso können ein PC mit Beamer bzw. eine interaktive Tafel zum Einsatz kommen.

³⁰ [Comins] S. 53

Stundenmatrix - „Entstehung Sonnensystem“

Zeit	Unterrichtsschritt	Lehrerverhalten	Schülerverhalten	Sozialform	Medien	Did. Kommentar
8	Motivation Aufstellung eigener Hypothese	Lehrer stellt einleitende Frage nach Entstehung des Sonnensystems.	Schüler suchen Erklärung.	Schülerdiskussion		
10	Erarbeitung I Hypothesen analysieren	Lehrer gibt Hypothesen vor.	Schüler erörtern Vor- und Nachteile der Hypothesen.	Schülerdiskussion	Hypothesenkarten	
12	Erarbeitung II Beweise analysieren	Lehrer gibt Beweise vor.	Schüler versuchen, die Beweise den Thesen zuzuordnen und Beweise auszusortieren.	Schülerdiskussion	Beweiskarten	
7	Besprechung	Klärung von Fragen	Schüler stellen ihre Fragen zu der bisherigen Stunde.	SLG		
8	Vertiefung Arbeitsblatt		Schüler lesen Arbeitsblatt zur Nachbereitung.	Einzelarbeit	Arbeitsblatt	Eventuell als Hausaufgabe

Hypothesenkarten

Das ganze Universum und das Planetensystem entstanden durch die **Schöpfung** einer übermenschlichen Kraft. (Schöpfungsthese)

Sonne und Planeten existierten gemeinsam als **Protoplanet** in derselben Wolke, aus der sie entstanden sind. („protoplanet theory“)

Die Planeten wurden geformt während der Annäherung eines Sterns an die Sonne. Die **Beinahe-Kollision** hat große Mengen der Sonnenmaterie und des anderen Sterns herausgezogen und so die Planeten geformt. („tidal theory“)

Die Protosonne und die Planeten formten sich aus einer dichter werdenden **Wolke**, die zu rotieren anfing. (Nebularhypothese)

Die Sonne bewegte sich durch eine dichte **interstellare Wolke** und holte, eingehüllt in Gas und Staub, diese heraus. Aus diesen bildeten sich die Planeten. („interstellar cloud theory“)

Sonnensystem entstand durch die Wechselwirkung der Sonne und einem niedrigdichtem Protostern. Die Sonne hat **Material** von der diffusen Atmosphäre des Protosterns **abgezogen**, die dann zu den Planeten wurde. („capture theory“)

Beweiskarten

Terrestrische Planeten sind gleich aufgebaut.

Planeten haben einen heißen Kern.

Jovianische Planeten sind gleich aufgebaut.

Terrestrische Planeten sind schwerer (dichter)
als jovianische Planeten.

Kometen enthalten gefrorenes Wasser.

Gaswolken, die sich zusammenziehen, entwickeln
hohen Druck und hohe Temperatur.

Andromedagalaxie und Milchstraße werden
kollidieren.

Der Strahlungsdruck der Sonne wirft bei Start der Kern-
fusion Kleinteile aus dem entstehenden Sonnensystem.

Das Universum entstand im Urknall.

Die einzigen Elemente waren Wasserstoff, Helium
und ein sehr geringer Teil an Metallen.

Sonne und Jupiter bestehen aus denselben
chemischen Stoffen.

Alle Planeten bewegen sich auf Kreisbahnen
im selben Drehsinn.

Eine schnell rotierende Scheibe flacht ab.

Gasteilchen, die ins Zentrum gelangen, erhitzen sich.

Die schweren Elemente sind Überreste anderer Sterne.

Bei der Kernfusion verschmilzt Wasserstoff zu Helium.

Der Sonnenwind bläst leichte Elemente
von der Sonne weg.

Planeten bestehen aus Staub und Gas.

In Sonnenferne kondensieren leichte Elemente.

Die gesamte Masse der Urwolke stürzte ins Zentrum.

In Sonnennähe kondensierten schwere Elemente.

Planeten entstanden durch Akkretion.
(Zusammenballung von Materie)

Die Kernfusion begann durch hohen Druck
und hohe Temperatur.

Wasserstoff und Helium kondensieren
im Sonnensystem nicht.

Innere Planeten bewegen sich schneller um die Sonne.

Der Higgs-Mechanismus erklärt,
warum Teilchen Masse haben.

Das Sonnensystem entstand aus einem Wurmloch.

Aufgrund der Drehimpulserhaltung bewegen sich
Partikel in Sonnennähe schneller.

Je dichter ein Objekt ist, desto höher ist
der dort herrschende Druck.

Gasteilchen kondensieren – je nach Material – bei
bestimmten Temperaturen.

Das Sonnensystem entstand vor ca. 4,7 Mrd. Jahren.

Der Kollaps der Gaswolke wurde durch eine
benachbarte Supernova gestartet.

Wenn sich ein großer rotierender Körper
zusammenzieht, dreht er sich schneller.

Teilchen auf der Umlaufbahn um die Sonne werden
von der Gravitation ins Zentrum gedrückt.

Jovianische Planeten haben einen Kern
aus Gestein, Metall und Eis.

Jovianische Planeten haben durch ihre Gravitation
riesige Mengen Gas angesammelt.

Die Geburt des Sonnensystems³¹

Die **Nebularhypothese** geht davon aus, dass eine Gaswolke unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenfällt. Wir bezeichnen diese Wolke als die solare Urwolke.

Soweit wir das heute sagen können, ist das Universum im *Urknall* entstanden. Wasserstoff und Helium (sowie Spuren von Lithium) waren im jungen Universum die einzig vorhandenen Elemente. Alle schwereren Elemente wurden seit dieser Zeit in Sternen hergestellt, sowohl durch Kernfusion als auch während der Explosionen, die ihren Tod begleiten. Wenn Sterne sterben, geben sie einen großen Teil ihrer Materie an den Weltraum ab, darunter auch die neu entstandenen schweren Elemente.

Als sich unser Sonnensystem vor etwa 4,5 Milliarden Jahren bildete, waren etwa 2% (der Masse) des ursprünglichen Wasserstoffs und Heliums in der Galaxie in schwere Elemente umgewandelt worden. Aus diesen Gasen entstanden die Sonne und die Planeten, wobei die Erde und die anderen terrestrischen Planeten überwiegend aus den darunter gemischten schweren Elementen bestehen.

Weshalb gibt es regelmäßige Bewegungsmuster in unserem Sonnensystem?

Der solare Urnebel begann als große, etwa kugelförmige Wolke aus sehr kaltem Gas geringer Dichte. Anfänglich war dieses Gas soweit ausgedehnt, dass die Gravitation alleine den Kollaps nicht in Gang brachte. Vermutlich wurde der Kollaps durch ein einschneidendes Ereignis ausgelöst, etwa die Einwirkung der Stoßwelle einer Supernova eines nahegelegenen Sterns.

Sobald der Kollaps begonnen hatte, stellte das Gravitationsgesetz sicher, dass er von selbst weiterlief. Die Gravitationsstärke ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ($\sim \frac{1}{r^2}$). Weil die Wolkenmasse beim Kollaps gleich blieb, nahm die Stärke der Schwerkraft mit sinkendem Durchmesser der Wolke zu.

Die Schwerkraft ist allerdings nicht das einzige physikalische Gesetz, das den Wolkenkollaps beeinflusst. Unter Berücksichtigung aller Gesetze, die den Verlauf des Kollapses einer Wolke bestimmen (vor allem dem Gesetz der Drehimpulserhaltung), sollte der solare Nebel vielmehr eine rotierende abgeflachte Scheibe gewesen sein, die einen zentralen Stern umgab.

Aufheizung, Rotation und Abflachung

Während die Ausdehnung des solaren Urnebels abnahm, veränderten drei wichtige Prozesse seine Dichte, Temperatur und Form. Dabei entstand aus einer großen, diffusen (und weit ausgedehnten) Wolke eine wesentlich kleinere, rotierende Scheibe.

Aufheizung: Die Temperatur des solaren Urnebels stieg während des Kollapses als Folge der Energieerhaltung. Bei der Kontraktion der Wolke wandelte sich ihre potentielle Energie in kinetische Energie der einzelnen, sich auf dem Weg nach innen befindlichen Gasteilchen um. Diese Teilchen stießen miteinander zusammen und wandelten die kinetische Energie des Einfalls in thermische Energie um. Die Sonne bildete sich im Zentrum, wo Temperatur und Dichte am höchsten waren.

Rotation: Wie eine Eisläuferin, die ihre Arme während einer Pirouette anzieht, rotierte der solare Urnebel während der Kontraktion als eine Folge der *Drehimpulserhaltung* immer schneller. Die Rotation war vor dem Kollaps vermutlich unmerklich gering, doch durch die Kontraktion war eine schnelle Rotation unausweichlich. Durch die Rotation war sichergestellt, dass nicht die ganze Materie des solaren Urnebels ins Zentrum gelangte: Je größer der Drehimpuls einer rotierenden Wolke ist, desto ausgedehnter ist sie.

Abflachung: Der solare Urnebel flachte sich zu einer Scheibe ab. Zu Beginn kann eine Wolke jede Größe oder Form aufweisen und unterschiedliche Bereiche innerhalb der Wolke können sich mit zufälliger Geschwindigkeit in zufällige Richtungen bewegen. Diese Bereiche kollidieren und verschmelzen und jeder neue Bereich hat dann genau die mittlere Geschwindigkeit der Wolkenbereiche aus denen er sich geformt hat. Dadurch werden zufällige Bewegungen in der ursprünglichen Wolke während des Kollapses immer

³¹ [Bennett] S. 324

mehr geordnet und die ursprüngliche klumpige Form verändert sich zu einer rotierenden abgeflachten Scheibe.

Die Entstehung einer rotierenden Scheibe erklärt die heutigen regelmäßigen Bewegungen in unserem Sonnensystem. Die Planeten umkreisen alle die Sonne in nahezu derselben Ebene, weil sie in einer flachen Scheibe entstanden sind. Die Richtung, in der die Wolke rotiert hatte, wurde zu der Richtung der Sonnenrotation und der Umlaufbahnen der Planeten.

Die Entstehung der Planeten

Die Entstehung der Planeten nahm ihren Anfang, nachdem der solare Urnebel zu einer abgeflachten Scheibe von etwa 200 AE Durchmesser (etwas das Doppelte vom heutigen Durchmesser der Pluto-Umlaufbahn) kollabiert war.

Die Mischung des Gases im solaren Urnebel dürfte sichergestellt haben, dass im Nebel überall dieselbe Zusammensetzung herrschte: 98% Wasserstoff und Helium sowie 2% schwere Elemente. Den wichtigsten Hinweis für die Unterschiede geben ihre Orte: die terrestrischen Planeten haben sich in den warmen, inneren Bereichen gebildet, die jovianischen Planeten entstanden in den kalten, äußeren Regionen.

Kondensation: die Saat der Planetenkeime

Im Zentrum des kollabierenden solaren Urnebels zog die Gravitation genug Materie zusammen, um die Sonne zu bilden. In der umgebenden Scheibe war die Materie jedoch zu fein verteilt, als dass sie sich durch die Gravitation allein zusammenballen konnte. Stattdessen begann das Material, sich auf andere Weise zusammenzuklumpen und diese Klumpen wuchsen dann weiter, bis die Gravitation sie zu Planeten zusammenziehen konnte. Im Wesentlichen erforderte die Planetenentstehung die Anwesenheit von „Keimen“ – festen Materiestückchen, aus denen die Schwerkraft schließlich Planeten formen konnte.

Ist die Temperatur niedrig genug, binden sich einige Atome oder Moleküle aneinander und verfestigen sich. Der Prozess, bei dem sich feste (oder flüssige) Teilchen aus einem Gas bilden, heißt **Kondensation** – wir sagen, dass sich die Teilchen aus dem Gas *kondensieren*.

Verschiedene Materialien kondensieren bei verschiedenen Temperaturen. Auf Basis ihrer Kondensationseigenschaften lassen sich die Bestandteile des solaren Urnebels in vier Gruppen aufteilen:

- **Wasserstoff- und Heliumgas (98% des Urnebels).** Diese Gase kondensieren bei den Bedingungen im Nebel nie.
- **Wasserstoffverbindungen (1,4% des Urnebels).** Materialien wie Wasser (H_2O), Methan (CH_4) und Ammoniak (NH_3) können sich bei geringen Temperaturen (bei dem geringen Druck im solaren Urnebel unterhalb von 150K) zu **Eis** verfestigen.
- **Gestein (0,4% des solaren Urnebels).** Gestein ist bei hohen Temperaturen gasförmig, kondensiert aber – je nach Art des Gesteins – bei Temperaturen zwischen 500K und 1300K zu festen Mineralteilchen (Ein *Mineral* ist ein Teil eines Gesteins mit einer bestimmten chemischen Zusammensetzung und Struktur).
- **Metalle (0,2% des solaren Urnebels).** Metalle wie Eisen, Nickel und Aluminium sind bei hohen Temperaturen ebenfalls gasförmig, kondensieren aber bei höheren Temperaturen zu einer festen Form als Gestein – üblicherweise im Bereich von 1000 bis 1600 K. Weil Wasserstoff und Helium 98% des solaren Urnebels ausmachten und nie kondensierten, blieb der größte Teil des Nebels immer gasförmig. Allerdings konnten Wasserstoffverbindungen, Gestein und Metalle überall dort auskondensieren, wo die Temperaturen es zuließen.

In der Nähe der sich bildenden Sonne betragen die Temperaturen mehr als 1600 K – zu heiß, als dass irgendwelche Materie auskondensieren konnte. In der Nähe der heutigen Merkurbahn waren die Temperaturen gering genug, sodass Metalle und einige Gesteinsarten zu winzigen, festen Teilchen (d.h. Staubkörnern) auskondensieren konnten, doch andere Gesteine und alle Wasserstoffverbindungen blieben gasförmig. Mehr Mineralien sowie alle Metalle konnten im Bereich der Umlaufbahnen auskondensieren, auf denen sich Venus, Erde und Mars geformt haben. Wasserstoffverbindungen konnten nur jenseits der sogenannten **Frostgrenze** zu Eis kondensieren – das ist die Entfernung, bei der es kalt genug ist, dass sich Eis

bilden kann. Sie liegt zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter.

Die Frostgrenze kennzeichnet den Übergang zwischen den warmen, inneren Regionen des Sonnensystems, in denen sich die terrestrischen Planeten gebildet haben, und den kühlen, äußeren Regionen, wo sich die jovianischen Planeten bildeten. Bis zur Frostgrenze konnten nur Metalle und Gesteine kondensieren und „Keime“ bilden. Daher bestehen terrestrische Planeten heute überwiegend aus Metall und Gestein. Jenseits der Frostgrenze, wo es kalt genug war, dass Wasserstoffverbindungen zu Eis kondensieren konnten, bestanden diese festen Keime aus Eis, vermischt mit Metall und Gestein. Damit war die Bühne für zwei planetare Gruppen bereit: Planeten, entstanden aus Keimen von Metall und Gestein im inneren Sonnensystem, sowie Planeten, die aus Saatkörnern aus Eis (sowie eingelagertem Metall und Gestein) im äußeren Sonnensystem entstanden.

Wie sind die terrestrischen Planeten entstanden?

Die festen Keime aus Metall und Gestein wuchsen zu den terrestrischen Planeten, die wir heute kennen. Weil Gesteine und Metalle im solaren Urnebel einen so geringen Anteil hatten, sind die terrestrischen Planeten nur relativ klein.

Der Prozess, in dem kleine „Keime“ zu Planeten wachsen, wird als **Akkretion** bezeichnet. Die Akkretion begann mit mikroskopisch kleinen Staubkörnern, die aus dem Gas des solaren Urnebels auskondensiert waren. Diese Teilchen umkreisten die Ursonne in derselben geordneten Weise wie das Gas, aus dem sie entstanden waren. Kleine Teilchen wuchsen aufgrund elektrostatischer Kräfte zu größeren zusammen. Während ihre Masse stieg, nahm auch die Schwerkraft zu und beschleunigte ihr Wachstum zu Felsstücken, die groß genug waren, um als **Planetesimale** („Teil eines Planeten“) zu gelten.

Planetesimale wuchsen zu Beginn schnell. Einige Planetesimale erreichten Größen von einigen Hundert Kilometern. Da sich nun verschiedene Umlaufbahnen kreuzten, stieg die Häufigkeit der Kollisionen; dabei wurden die beteiligten Körper oft zerstört. Nur die größten Planetesimale konnten der Zerstörung entgehen und wuchsen zu vollständigen terrestrischen Planeten heran. Dieses Modell wird auf theoretischer

Seite durch Simulationen des Akkretionsprozesses gestützt.

Wie sind die jovianischen Planeten entstanden?

Die Akkretion sollte auf ähnliche Weise auch im äußeren Sonnensystem abgelaufen sein, aber die Kondensation von Eis bedeutet, dass dort mehr festes Material zur Verfügung gestanden hat. Deshalb enthielten die Planetesimale, die sich im äußeren Sonnensystem gebildet haben, neben Gestein und Metall auch große Mengen an Eis. Allerdings kann das Wachstum von Planetesimalen auf Basis von Eis nicht die ganze Wahrheit bei der Entstehung der jovianischen Planeten sein, denn die jovianischen Planeten bestehen zum größten Teil *nicht* aus Eis. Vielmehr enthalten sie große Mengen an Wasserstoff und Heliumgas.

Im vorherrschenden Modell begannen sie ihre Existenz als große eishaltige Planetesimale und sammelten das Gas an. Einige der zahlreichen und eishaltigen Planetesimale des äußeren Sonnensystems wuchsen so sehr, dass ihre Masse das Vielfache der Erdmasse betrug. Dadurch war ihre Schwerkraft so hoch, dass sie einen Teil des Wasserstoff- und Heliumgases, das den größten Teil des sie umgebenden solaren Urnebels ausmachte, einfangen und festhalten konnten. Letztendlich wuchsen die jovianischen Planeten dadurch so sehr, dass sie keine Ähnlichkeit mehr mit den kleinen eishaltigen „Keimen“ aus ihrer Frühphase hatten (Gasplaneten).

Dieses Akkretionsmodell, gefolgt von Gaseinfang, erklärt die beobachteten Eigenschaften der jovianischen Planeten ziemlich gut.

Was hat die Ära der Planetenentstehung beendet?

Der größte Teil des Wasserstoff- und Heliumgases im Urnebel wurde nie Teil von Planeten. Er wurde in den interstellaren Raum gefegt durch eine Kombination aus der Strahlung der jungen Sonne und dem **Sonnenwind** – einem Strom geladener Teilchen (wie Protonen und Elektronen), der ständig von der Sonne aus in alle Richtungen abströmt. Obwohl der Sonnenwind heute recht schwach ist, scheinen Beobachtungen anderer Sterne zufolge die Winde bei jungen Sternen viel stärker zu sein. Daher sollte auch die Ursonne einen starken Sonnenwind gehabt haben.

4.3. Mond

Der wohl bekannteste Himmelskörper ist der Mond. Er ist am nächsten an der Erde und konnte daher am besten beobachtet werden. Er ist auch der einzige natürliche Satellit der Erde. Selbst mit bloßem Auge erkennt man dunkle Regionen, die man als Meere bezeichnet. Jedoch bringt er auch die spektakulären Ereignisse mit sich wie zum Beispiel eine Mondfinsternis oder sogar eine Sonnenfinsternis. Solche wurden im Mittelalter als Zeichen Gottes und des Weltuntergangs gedeutet. Obwohl der Mond der Erde am nächsten ist, dauerte es bis zum 21. Juli 1969, bis der erste Mensch den Mond betrat.

Motivation

Viele Schüler wissen, dass man verschiedene Mondphasen unterscheidet und dass der Mond die Mond- und Sonnenfinsternis verursacht. Jedoch können sie dies oftmals nicht näher erklären. Auch wissen viele nicht, dass Finsternisse durchschnittlich zweimal im Jahr stattfinden.

Da oftmals für die Trabanten anderer Planeten auch das Wort „Mond“ verwendet wird, sollte man zur Abgrenzung das Wort „Erd(en)mond“ benutzen.

Richt-, Grob- und Feinziele

Das Grobziel der Stunde ist es, den Schülern die physikalischen Begriffe wie Mondphase, Sonnen- und Mondfinsternis zu erklären und ihnen einen kurzen Einblick in die Geschichte der Raumfahrt der 60er Jahre zu geben.

Dabei sollen Schüler (Grobziele)

- zur Motivation ein Quiz lösen.
- ein Video zur Entstehung von Sonnen- und Mondfinsternissen aufmerksam ansehen.
- abschließend mit einer Animation ihr bisheriges Wissen überprüfen und
- herausfinden, welche Parameter man für Sonnen- und Mondfinsternisse benötigt.

Die Schüler sollen (Feinziele)

- die Ursache für die Entstehung der verschiedenen Mondphasen kennenlernen und
- die Ursache von Sonnen- und Mondfinsternis verstehen.
- erkennen, dass dabei vor allem die besondere Neigung der Mondbahn eine Rolle spielt
- erkennen, dass Mond- und Sonnenfinsternisse jeweils zweimal im Jahr auf der Erde stattfinden, es jedoch ein großer Zufall ist, wenn dies gerade in Deutschland geschieht.

Lernvoraussetzung

Diese Stunde bedarf keiner besonderen inhaltlichen oder methodischen Voraussetzungen.

Unterrichtsverlauf

Die Unterrichtsstunde beginnt mit einem Quiz im Stil der Fernsehsendung *Wer wird Millionär*³². Ein Schüler kommt vor die Klasse und darf fünf Fragen³³ beantworten. Bei jeder Frage erhält er vier Antwortmöglichkeiten, von denen lediglich eine richtig ist. Dabei kann er einmal einen Mitschüler um Hilfe bitten oder sich zwei falsche Antworten streichen lassen (siehe Spielregeln). Diese Fragen dienen als Einstieg in das Thema Mond.

Die Schüler bekommen danach ein Arbeitsblatt mit dem Auftrag, aufmerksam den folgenden Film anzusehen und die dazu gestellten Fragen zu beantworten. Im Anschluss werden diese besprochen.

Der Film erklärt ausführlich mittels einer graphischen Animation die Entstehung von Mondphasen, Mond- und Sonnenfinsternis. Ebenso wird veranschaulicht, dass durch die besondere Neigung des Mondes gegen die Ekliptik der Erde eine Finsternis nicht jeden Monat auftritt, sondern nur alle sechs Monate (genauer 177 Tage). Da der Schatten des Mondes nur einen sehr kleinen Bereich der Erdoberfläche trifft, sind Sonnenfinsternisse an demselben Ort sehr selten. Mondfinsternisse können dagegen in einem großen Teil der Erde gleichzeitig beobachtet werden, da der Erdschatten sehr viel größer als der Mond ist. Bei Schwierigkeiten können einzelne Teile des Videos wiederholt werden.

Zur anschließenden Vertiefung steht die GeoGebra-Anwendung zur Verfügung. Mit dieser lassen sich mehrere Dinge nachvollziehen:

- a) Mondphasen: Dreht man den Mond (am Mondmittelpunkt) gegen den Uhrzeigersinn um die Erde, kann man erkennen, dass immer eine Hälfte des Mondes beleuchtet ist und von der Erde aus die verschiedenen Mondphasen sichtbar sind.
- b) Sonnenfinsternis: Dreht man den Mond um die Erde, sodass Sonne, Mond und Erde in einer Linie stehen, dann fällt die Spitze des Mondschatens auf die Erdoberfläche.
- c) Mondfinsternis: Dreht man den Mond so um die Erde, dass Sonne, Erde und Mond in einer Linie stehen, erkennt man, dass der Mond im Erdschatten verschwindet.

Anmerkungen: die Anwendung enthält *vier Variablen*.

- 1) Die Variable a verändert den Abstand von Erde und Mond. Bei großen Abständen erkennt man, dass keine Sonnenfinsternisse mehr zu Stande kommen.

³² Beschreibung: Ein Kandidat muss 5 Fragen mithilfe von 3 Jokern (50:50; Klasse befragen; einzelne Person anrufen) richtig beantworten.

³³ Siehe CD.

- 2) Die Variable o ändert den Durchmesser des Mondes. Ein kleiner Mond Durchmesser verhindert Sonnenfinsternisse, ein großer Durchmesser totale Mondfinsternisse.
- 3) Die Variable v ändert den Abstand von Sonne und Erde.
- 4) Ebenso lässt sich Punkt G auf der Sonnenoberfläche verschieben. Er simuliert den Winkel, unter dem das Sonnenlicht auf Erde und Mond fällt.

Achtung: der Punkt G muss immer im ersten Quadranten bewegt werden. Rutscht er unter die x-Achse, so funktioniert die Anwendung nicht mehr!

Mit der Animation kann man auch sehr gut zeigen, dass viele Faktoren für das Zustandekommen von Sonnen- und Mondfinsternis verantwortlich sind. Die Schüler können sich deshalb überlegen, ob es Finsternisse auch auf anderen Planeten geben kann und wenn nicht, warum dies so ist.

Unterrichtsmaterial

Das Unterrichtsmaterial dieser Stunde besteht aus:

- | | |
|--|-------|
| - Stundenmatrix | S. 37 |
| - Quizkarten inklusive Anleitung und Lösung | S. 38 |
| - Der Mond - Arbeitsblatt | S. 45 |
| - Der Mond - Lösung | S. 46 |
| - GeoGebra-Anwendung (Mond und Sonnensystem.ggb) | CD |
| - Video (Erde und Mond – Ein Doppelspiel im Weltall.flv) ³⁴ | CD |

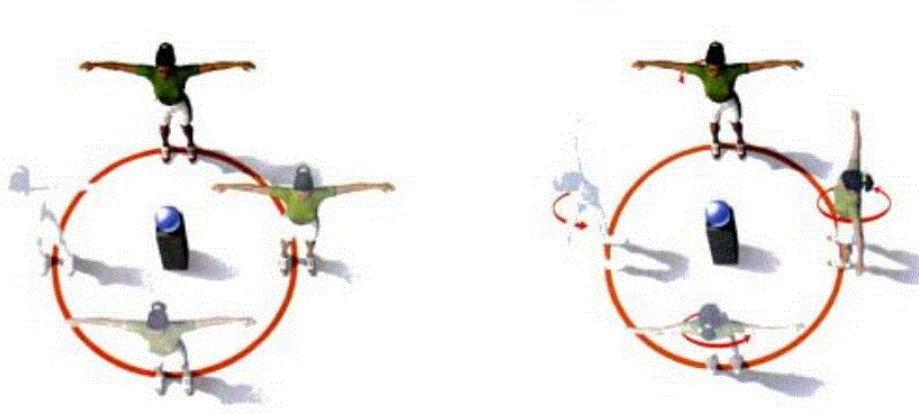
Alternative

An einem sonnigen Tag (oder durch den Einsatz einer Lampe) kann man die Entstehung der Mondphasen auch mit einem Modell darstellen. Dazu braucht man eine helle Kugel (ca. 15-40 cm Durchmesser, eventuell Fußball/Basketball). Man stellt einen Schüler zuerst mit dem Gesicht zur Sonne (Lampe) und bewegt die Kugel entsprechend der Mondbahn auf einer zum Boden geneigten Bahn. Der Schüler dreht sich mit der Kugel mit und beschreibt jeweils, welchen Teil der Kugel er gerade sieht. Aus der so gewonnenen Beschreibung lassen sich die einzelnen Mondphasen rekonstruieren.

Man zeige an dieser Stelle den Schülern Bilder von den einzelnen Mondphasen und frage nach, warum sich nur der Anteil der beleuchteten Fläche auf der Mondoberfläche ändert, jedoch nicht die Oberfläche selber. Dabei kommen Schüler auf die Idee, dass der Mond der Sonne immer dieselbe Seite zuwendet und er sich daher „einmal im Monat“ um sich selber dreht. Dies nennt man gebundene Rotation oder synchrone Rotation. Die Schüler können das auch im Experiment gut nachvollziehen. Ein Schüler dreht sich als Mond einmal um die Erde (man nehme dazu jetzt die Kugel). Dabei

³⁴ <http://www.youtube.com/watch?v=w9dv4JDMSxU> (13.8.2012)

schaut er immer in dieselbe Richtung. Man merkt, dass er jedoch der Erde immer verschiedene Seiten zeigt, somit muss der Mond sich drehen. Man sieht, dass die Rotationsdauer des Mondes mit der Umlaufzeit des Mondes um die Erde übereinstimmt (die tatsächliche Abweichung beträgt weniger als eine halbe Minute pro Umlauf).



Ebenso kann man mit der Kugel die Entstehung von Finsternissen erklären. Zur Darstellung der Sonnenfinsternis stellt sich ein Schüler wieder mit dem Gesicht zur Sonne (Lampe) auf. Ein zweiter Schüler bewege die Kugel so, dass der Kugelschatten genau auf den Kopf des ersten Schülers fällt.

Wichtig ist dabei den Schülern zu erklären, dass eine Mond- bzw. Sonnenfinsternis nicht alle 29,5 Tage (dies ist die Dauer eines Mondumlaufes), sondern nur nach sechs Mondumläufen, also 177 Tagen stattfindet. Dies liegt an der besonderen Neigung der Umlaufbahn gegen die Ekliptik. Dabei bewegt der Schüler den Mond nicht auf einer zum Boden parallelen Kreisbahn, sondern auf einer dazu geneigten. Der Schatten fällt jetzt nicht mehr bei jedem Umlauf direkt auf das Gesicht des anderen Schülers. Dies verdeutlicht die geringere Anzahl an Finsternissen.

Stundenmatrix - Mond

Zeit	Unterrichtsschritt	Lehrerverhalten	Schülerverhalten	Sozialform	Medien	Did. Kommentar
10	Motivation Schüler spielen Quiz.	Lehrer spielt Moderator des Quiz und stellt Fragen.	Ein Schüler beantwortet Fragen.	SLG	Quizkarten, Beamer	Fragen können per Beamer gezeigt werden.
3	Arbeitsauftrag	Lehrer erklärt Arbeitsauftrag.		SLG	Arbeitsblatt	Schüler bekommen Arbeitsblatt schon vor dem Video ausgeteilt, sodass ggf. Lösungen auch gleich mitnotiert werden können.
10	Erarbeitung I Video	Lehrer führt Video vor.	Schüler sehen Video aufmerksam.	Einzelarbeit	Video, Arbeitsblatt	
5	Erarbeitung II Lösung des Aufgabenblattes	Fragen beantworten	Schüler lösen Aufgabenblatt.	Einzel/Partnerarbeit	Arbeitsblatt	
10	Sicherung I	Lehrer verbessert Aufgaben.	Schüler korrigieren ihre Lösungen.	SLG	Arbeitsblatt	
7	Sicherung II GeoGebra-Anwendung		Schüler erfahren mit der Anwendung, welche Parameter für das Zustandekommen von Finsternissen wichtig sind.	Einzelarbeit	GeoGebra-Anwendung	Anwendung dient zur Vertiefung. Man erkennt von welchen Parametern Finsternisse abhängen.

Spielregeln:

- Nur eine der vier Antwortmöglichkeiten ist richtig.
- Man darf einmal eine Person aus dem Publikum fragen.
- Man darf einmal zwei falsche Möglichkeiten ausschließen.



Viel Glück!

Frage 1

Wie heißt der Trabant der Erde (100 €)

- a) Merkur
- b) Ceres
- c) Erdmond
- d) Sirius

Frage 2

Wie weit ist der Erdmond von der Erdoberfläche entfernt? (1 000 €)

- a) 384 400 km
- b) 0,5 Lichtjahre
- c) 149 000 000 km
- d) 1,88 AE

Frage 3

**Wer betrat als erster Mensch den Mond?
(8000 €)**

- a) Louis Armstrong
- b) Lance Armstrong
- c) Neil Armstrong
- d) Craig Armstrong

Frage 4

Wie groß ist die Fallbeschleunigung auf der Erdoberfläche? (64 000 €)

- a) $3,14 \text{ m/s}^2$
- b) $1,62 \text{ m/s}^2$
- c) $9,81 \text{ m/s}^2$
- d) $2,71 \text{ m/s}^2$

Frage 5

Nach welcher Theorie ist der Mond entstanden? (1 000 000 €)

- a) Abspaltungstheorie
- b) Schwesterplanet-Theorie
- c) Einfangtheorie
- d) Kollisionstheorie

Lösungen:

1 c (Erdmond)

2 a (384 400 km)

3 c (Neil Armstrong)

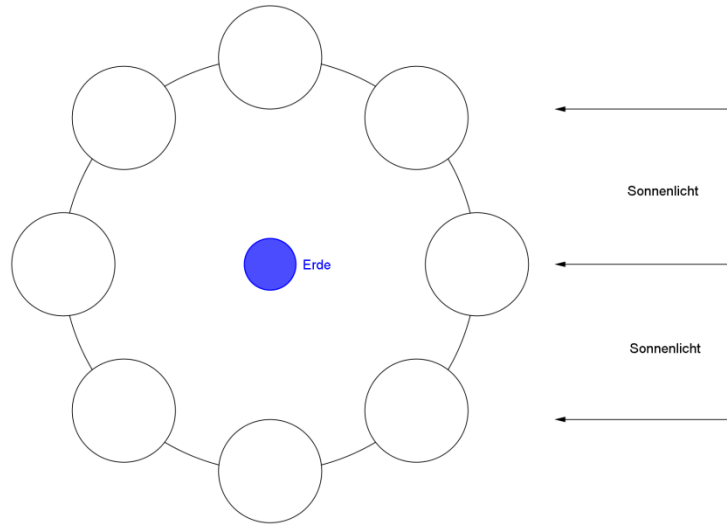
4 b ($1,62 \text{ m/s}^2$)

5 d (Kollisionstheorie)

Der Mond – Arbeitsblatt

Schau den Film aufmerksam und beantworte folgende Fragen:

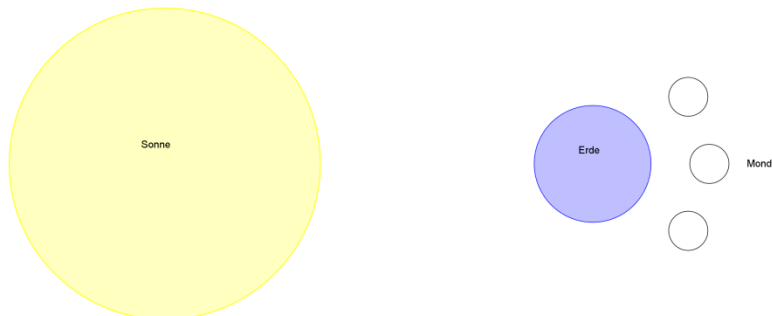
1) Wie entstehen die verschiedenen **Mondphasen**?



3) Wie entsteht eine **Sonnenfinsternis**?



2) Wie entsteht eine **Mondfinsternis**?

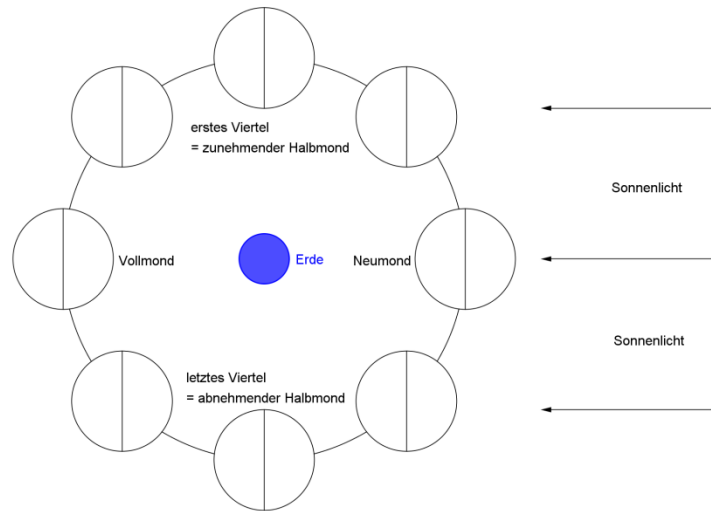


4) Wie oft finden **Sonnen- und Mondfinsternisse** statt?

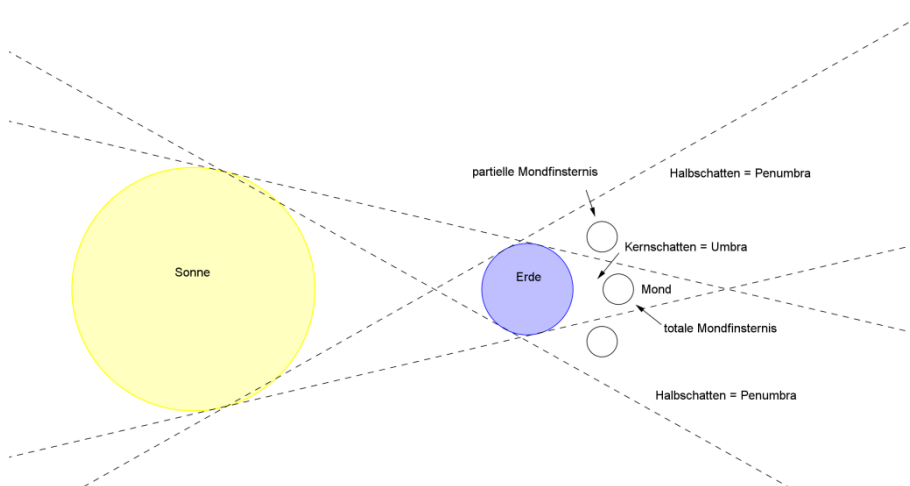
Der Mond – Lösung

Schauen den Film aufmerksam und beantworte folgende Fragen:

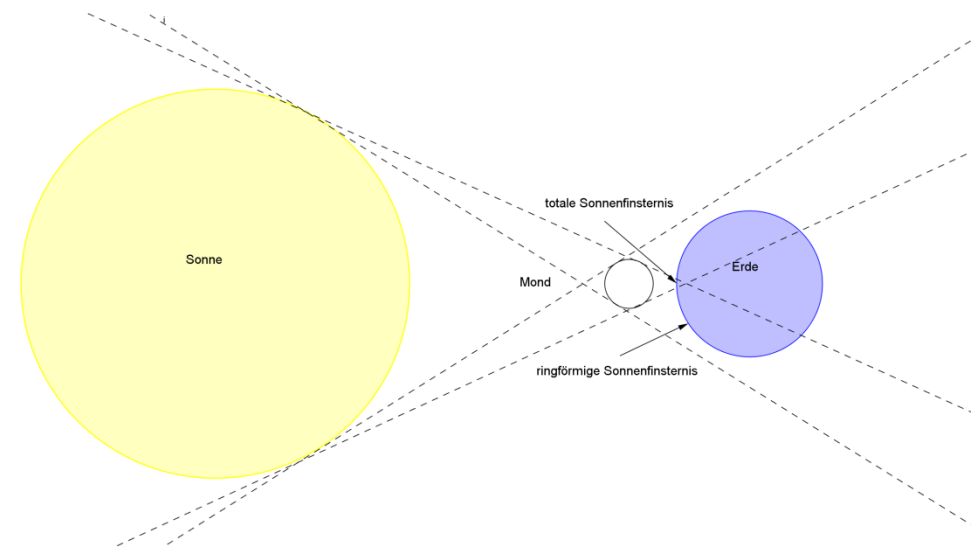
1) Wie entstehen die verschiedenen **Mondphasen**?



2) Wie entsteht eine **Mondfinsternis**?



3) Wie entsteht eine **Sonnenfinsternis**?



4) Wie oft finden **Sonnen- und Mondfinsternisse** statt?

Eine Sonnenfinsternis findet ca. jedes halbe Jahr statt. Dies liegt an der Neigung der Mondumlaufbahn gegen die Ekliptik. Der Mondschatten läuft dabei nur alle 177 Tage über die Erdoberfläche, sodass eine Sonnenfinsternis beobachtbar ist.

Eine Mondfinsternis findet auch jedes halbe Jahr statt, jedoch ist dabei der Erdschatten viel größer als der Mond. Eine Mondfinsternis kann von einem Großteil der Erde aus gesehen werden.

4.4 Kepler'sche Gesetze

Kopernikus stellte bei der Veröffentlichung seiner Überlegungen die damals bekannte Welt auf den Kopf. Bisher war das geozentrische Weltbild allseits anerkannt, mit dem heliozentrischen Weltbild revolutionierte er die Ansicht auf die Bewegung der Planeten. Die Planeten befinden sich auf Bahnen um die Sonne, nicht wie vorher angenommen um die Erde. Johann Kepler konnte mittels der genauen Beobachtungen seines Lehrers Tycho Brahe die exakten Bewegungen der Planeten als Ellipsen identifizieren. Die nach ihm benannten drei Kepler'schen Gesetze veröffentlichte er in dem Werk *Harmonices mundi*, kurz *Weltharmonik*. Die physikalisch-mathematische Begründung folgte erst durch Newtons Gravitationsgesetz.

Motivation

Die Kepler'schen Gesetze enthalten einige der wenigen und somit wichtigsten physikalischen Formeln, die in dem Themenblock „Sonnensystem“ vorkommen. Außerdem bilden sie die Grundlage für das Verständnis der Planetenbewegung. Obwohl die Kepler'schen Gesetze das erste Mal in der zehnten Jahrgangsstufe auftauchen, enthielten die Abituraufgaben der letzten Jahrgänge viele Aufgaben zu den Gesetzen und Newtons Gravitationsgesetz. Somit werden diese in der vorliegenden Unterrichtsstunde auch mit Ausblick auf das Abitur nochmal wiederholt.

Richt-, Grob- und Feinziele

Ziel der Stunde ist es, die drei Kepler'schen Gesetze zu wiederholen³⁵ und zu vertiefen.

Dabei sollen Schüler (Grobziele)

- mittels Tabukarten ihren Mitschülern die Begriffe *Gravitationsgesetz*, *heliozentrisches Weltbild* und *Johannes Kepler* erklären.
- die Vor- und Nachteile des geozentrischen und heliozentrischen Weltbildes erörtern.
- die Bewegung eines Planeten auf einer Ellipsenbahn nachvollziehen.
- die wichtigsten Begriffe über die Ellipse kennenlernen.
- in Eigenarbeit nur mittels des Internets sich das zweite und dritte Kepler'sche Gesetz aneignen. Eine Veranschaulichung mittels Animationen ist empfehlenswert.
- Aufgaben zu den Kepler'schen Gesetzen lösen.

Die Schüler sollen (Feinziele)

- sehen, dass sich Planeten nicht auf Kreisen, sondern auf Ellipsen um die Sonne bewegen.
- erkennen, dass sich in einem Brennpunkt der Ellipse die Sonne befindet.

³⁵ Diese wurden in der zehnten Jahrgangsstufe eingeführt.

- die wichtigsten Größen der Ellipse kennen.
- erkennen, dass sich Planeten auf der Ellipsenbahn mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen.
- erkennen, dass die Kepler'schen Gesetze sich aus dem Gravitationsgesetz herleiten lassen.
- abschließend verschiedene Aufgaben zu den Kepler'schen Gesetzen berechnen können.

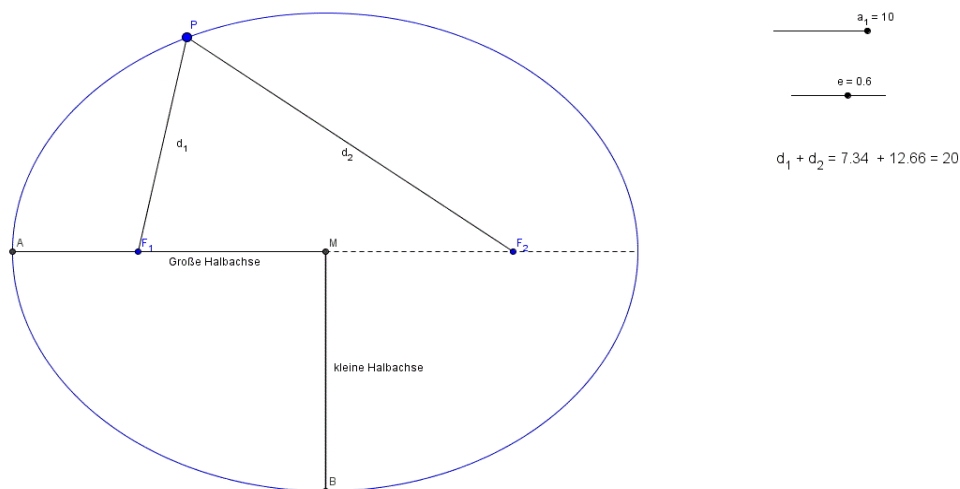
Lernvoraussetzung

Die Schüler haben in der zehnten Jahrgangsstufe zum ersten Mal den Begriff der Kepler'schen Gesetze gelernt. Ebenso sind die Formen der Kreise und Ellipsen seit der zehnten Jahrgangsstufe³⁶ bekannt. Die Schüler kennen eventuell schon die Ellipsengleichung und können Ellipsen bei gegebenen Halbachsen oder Brennpunkten konstruieren. Jedoch kennen sie keine expliziten Formeln zur Beschreibung der Ellipsen³⁷.

Unterrichtsverlauf

Der Einstieg zu dieser Stunde wird mittels dreier Tabukarten vorgenommen. Ein Schüler muss jeweils einen Begriff erklären und darf dabei bestimmte Worte nicht nennen. Dazu hat er 60 oder 90 Sekunden Zeit. Die Klasse muss diesen Begriff erraten. Die zu erratenden Begriffe beziehen sich auf den in der Stunde behandelten Stoff. Man sollte zuerst das Heliozentrische Weltbild, dann Johannes Kepler und anschließend das Gravitationsgesetz erraten lassen.

Die Stunde geht mit einem kurzen Ausblick auf das geo-und heliozentrische Weltbild weiter. Dazu wird ein Bild gezeigt, das die Bewegung der Planeten um das jeweilige Zentrum darstellt. Die



³⁶ <http://uploader.wuerzburg.de/lehrplan/M-10.html> (14.08.2012)

³⁷ [LP M10]

Schüler erkennen dabei vor allem die Probleme, die das geozentrische Weltbild hatte und die Einfachheit und Eleganz des heliozentrischen Weltbildes. Es soll aber auch auf die Schwierigkeit des Wechsels zwischen den beiden Weltbildern hingewiesen werden. Es ist schwer, die Beobachtungen, die man von der Erde aus macht, in ein sinnvolles Bild zu fügen, das einen externen Beobachter hat. (Wechsel des Inertialsystems!)

Danach werden die drei Kepler'schen Gesetze wiederholt:

Was hinter dem Begriff der Ellipse steckt, können die Schüler mittels einer GeoGebra-Anwendung selbst ausprobieren. Dort wird die Bewegung eines Planeten auf einer Ellipsenbahn in Abhängigkeit der großen Halbachse und der Exzentrizität aufgezeigt. Dabei sehen die Schüler, dass die Summe der Abstände des Planeten zu den beiden Brennpunkten immer konstant ist.³⁸

Das zweite und dritte Kepler'sche Gesetz sollen Schüler in Eigenarbeit im Internet recherchieren. Es finden sich dort viele Seiten, die die Gesetze erklären. Besonders anschaulich sind die Simulationen von Walter Fendt³⁹ oder die Simulation der englischsprachigen Seite astro.unl.edu⁴⁰ (siehe Abb. 1). Letztere zeigt innerhalb nur einer Simulation alle drei Kepler'schen Gesetze. Dabei sind die Parameter wie große Halbachse, Exzentrizität, Größe der Flächen im zweiten Kepler'schen Gesetz oder Geschwindigkeit des Planeten individuell einstellbar. Dazu zeigt sie auch die beiden Brennpunkte und den Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor an.

Vorteilhaft ist, dass bisher lediglich die Bewegung der Planeten betrachtet wurde und auf Begriffe wie Kraft und Energie verzichtet wurde.

Im Anschluss wird die Ellipse genauer untersucht. Das Arbeitsblatt sollen die Schüler durchlesen und dann mit dem Lehrer diskutieren. Die Begriffe wie Exzentrizität, große und kleine Halbachse sollen dabei geklärt werden.

Ein weiteres Arbeitsblatt behandelt die Herleitung des dritten Kepler'schen Gesetzes aus dem Gravitationsgesetz. Dem Schüler wird bewusst, dass die Kepler'schen Gesetze aus Beobachtungen (d.h. mit dem Teleskop aufgenommene Messwerte) hergeleitet wurden und erst viel später durch Newtons Gravitationsgesetz erklärt wurden. Dabei sollen die Schüler vor allem sehen, dass das Gesetz nur für $M \gg m$ anwendbar ist. In dem Fall unseres Sonnensystems hat die Sonne über 99,8% der gesamten Masse in sich vereint. Diese Tatsache ist auch aus der Unterrichtsstunde „Größenverhältnisse im Sonnensystem“ bekannt.

Danach lösen Schüler Aufgaben dazu. Diese beziehen sich auf die eben gelernten Inhalte. Es wird mit einer einfachen Aufgabe gestartet, die neben der Geometrie der Ellipse die Umlaufzeit eines Planeten mittels dritten Kepler'schen Gesetzes berechnet. Eine weitere zeigt nochmals, wie die Kepler'schen Gesetze mit Newtons Gravitationsgesetz zusammenhängen (vgl. Arbeitsblatt).

³⁸ vgl. Gärtnerzirkel

³⁹ <http://www.walter-fendt.de/ph14d/> (30.07.2012)

⁴⁰ <http://astro.unl.edu/naap/pos/animations/kepler.swf> (30.07.2012)

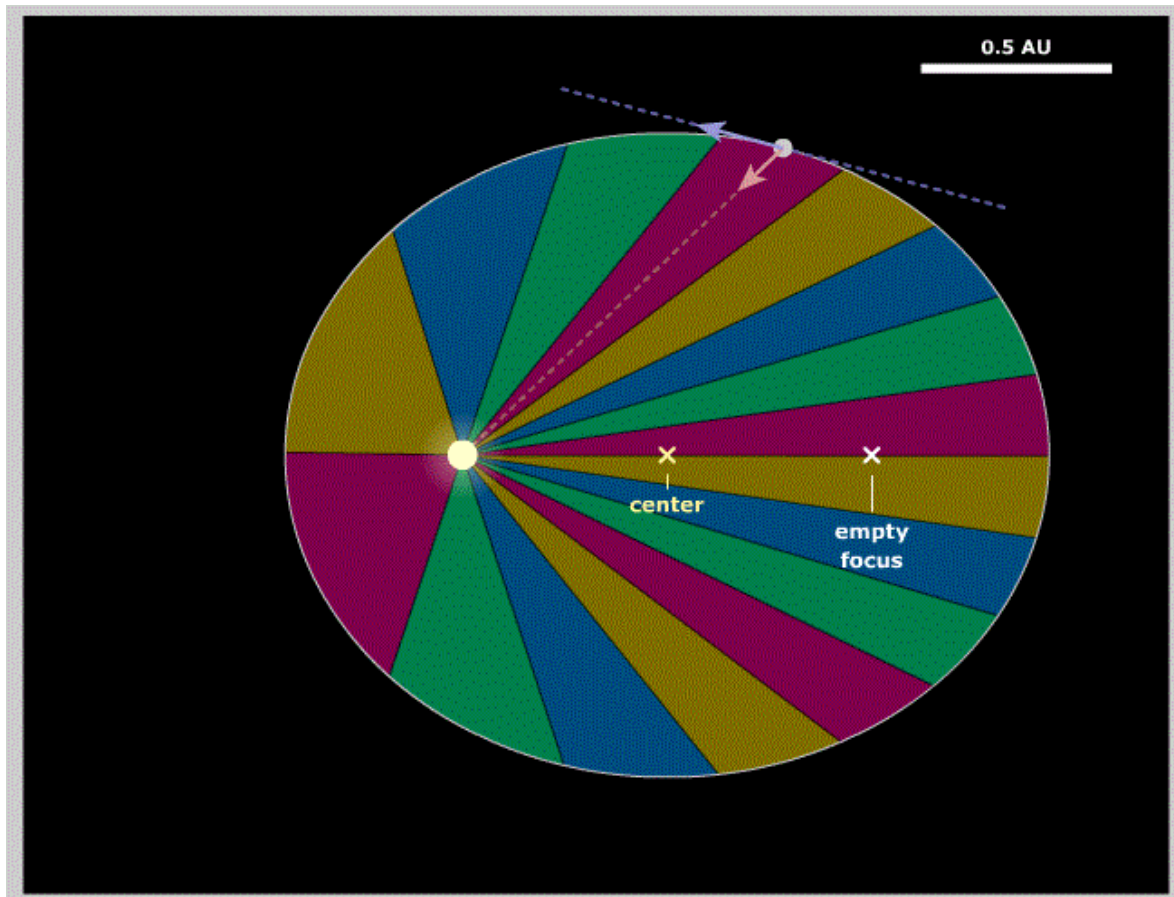


Abbildung 1: Simulation der astro.unl.edu

Unterrichtsmaterial

Die in dieser Unterrichtsstunde benutzten Computer brauchen das Programm GeoGebra. Ebenso müssen Internet oder alternativ einige Schulbücher zur Verfügung stehen.

Die in der Unterrichtsstunde verwendeten Materialien sind:

- | | |
|---|-------|
| - Stundenmatrix | S. 51 |
| - Kepler'sche Gesetze (Aufgabenblatt) | S. 52 |
| - Kepler'sche Gesetze – Musterlösung (Lehrerlösung) | S. 53 |
| - Tabukarten | S. 54 |
| - Kepler'sche Gesetze und Gravitationsgesetz (Arbeitsblatt) | S. 55 |
| - Graphik der Weltbilder | S. 56 |
| - Die Ellipse (Arbeitsblatt) | S. 57 |
| - GeoGebra-Anwendung für die Ellipse (Kepler1.ggb) | CD |

Stundematrix – Kepler'sche Gesetze

Zeit	Unterrichtsschritt	Lehrerverhalten	Schülerverhalten	Sozialform	Medien	Did. Kommentar
8	Motivation Tabu		Schüler erraten Begriffe mittels Tabukarten.	Schülergespräch	Tabukarten	Ratespiel
10	Erarbeitung I Weltbilder	Lehrer zeigt Graphik mit Weltbildern.	Diskussion über Weltbilder	SLG	Graphik	Problematik der Beobachtung von Himmelskörpern
7	Erarbeitung II Wiederholung Ellipse		Schüler probieren Anwendung aus und erlernen spielerisch die Größen der Ellipse.	Einzelarbeit	PC, Anwendung	
15	Erarbeitung III Kepler'sche Gesetze Recherche	Lehrer klärt auftretende Fragen.	Schüler recherchieren Kepler'sche Gesetze.	Einzelarbeit	PC	
20	Erarbeitung IV Ellipse	Lehrer erklärt in SLG.	Schüler lernen mathematische Zusammenhänge der Ellipsengrößen.	SLG	AB	Erklärung der relevanten Größen
15	Erarbeitung V Herleitung des 3. Kepler'schen Gesetzes	Lehrer erklärt mittels AB und SLG.	Schüler erkennen die Physik des dritten Kepler'schen Gesetzes.	SLG	AB	
15	Festigung Aufgaben		Klasse löst gemeinsam Aufgaben.		AB	Aufgabe 2 evtl. als HA

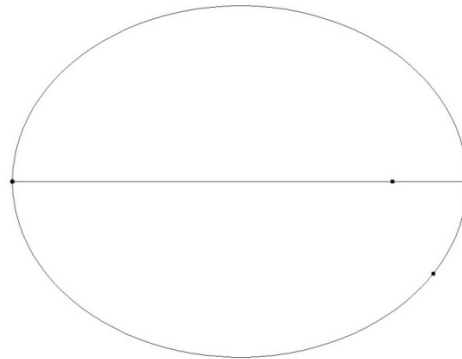
Kepler'sche Gesetze

- 1) Im Jahr 2005 wurde auf Himmelsaufnahmen aus dem Jahr 2003 ein planetenähnliches Objekt entdeckt, das sich auf einer stark exzentrischen Bahn um die Sonne bewegt. Dieses Objekt wurde im August 2006 in die neue Gruppe der Zwergplaneten eingeordnet und erhielt den Namen Eris. Inzwischen geht man von folgenden Daten aus:

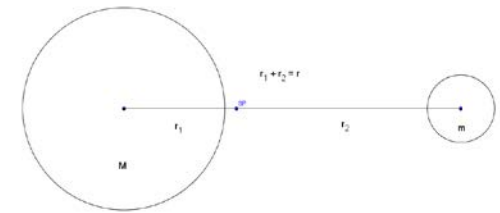
Aphelentfernung $r_A = 98 \text{ AE}$

Perihelentfernung $r_P = 38 \text{ AE}$

- a) Bestimmen Sie die große Halbachse der Eris-Bahn sowie die numerische Exzentrizität der Bahn. Vergleichen Sie letztere mit dem Wert für die Pluto-Bahn.
- b) In wie vielen Jahren wird Eris das nächste Mal das Perihel seiner Bahn durchlaufen, wenn seine Sonnenentfernung zur Zeit 98 AE beträgt? (Abitur 2007)



- 2) Plutos Begleiter Charon hat ungefähr 12 % der Gesamtmasse des Systems Pluto-Charon. Beide umkreisen sich in 6,4 Tagen mit einem Mittelpunktsabstand von $d = 1,94 \cdot 10^4 \text{ km}$. Berechnen Sie daraus die Masse Charons. (Abitur 2008)



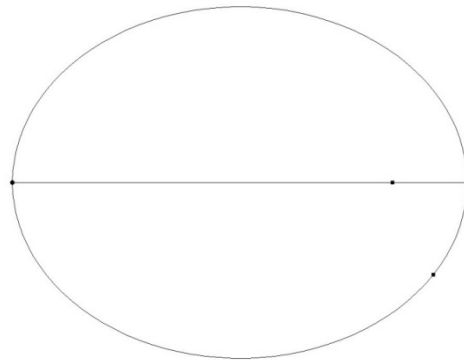
Kepler'sche Gesetze - Musterlösung

- 1) Im Jahr 2005 wurde auf Himmelsaufnahmen aus dem Jahr 2003 ein planetenähnliches Objekt entdeckt, das sich auf einer stark exzentrischen Bahn um die Sonne bewegt. Dieses Objekt wurde im August 2006 in die neue Gruppe der Zwergplaneten eingeordnet und erhielt den Namen Eris. Inzwischen geht man von folgenden Daten aus:

Aphelentfernung $r_A = 98 \text{ AE}$

Perihelentfernung $r_P = 38 \text{ AE}$

- a) Bestimmen Sie die große Halbachse der Eris-Bahn sowie die numerische Exzentrizität der Bahn. Vergleichen Sie letztere mit dem Wert für die Plutobahn.



- b) In wie vielen Jahren wird Eris das nächste Mal das Perihel seiner Bahn durchlaufen, wenn seine Sonnenentfernung zur Zeit 98 AE beträgt? (Abitur 2007)

Lösung:

$$a = \frac{r_A + r_P}{2} = \frac{98\text{AE} + 38\text{AE}}{2} = 68 \text{ AE}$$

$$e = r_A - a = 98\text{AE} - 68\text{AE} = 30 \text{ AE}$$

$$\varepsilon = \frac{e}{a} = 0,44$$

$$\varepsilon_{\text{Pluto}} = 0,25$$

Somit besitzt Eris eine größere Exzentrizität als Pluto.

$$T_{\text{Eris}} = \left(\frac{a_{\text{Eris}}}{1\text{AE}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot 1\text{a} = 5,6 \cdot 10^2 \text{a}$$

Jetzt ist Eris im Aphel, also ist er in $2,8 \cdot 10^2 \text{a}$ im Perihel.

- 2) Plutos Begleiter Charon hat ungefähr 12 % der Gesamtmasse des Systems Pluto-Charon. Beide umkreisen sich in 6,4 Tagen mit einem Mittelpunktsabstand von $d = 1,94 \cdot 10^4 \text{ km}$. Berechnen Sie daraus die Masse Charons. (Abitur 2008)

Lösung:

Die Zentralkräfte für beide Körper sind betragsgleich:

$$M_P \omega_P^2 r_P = m_{\text{Ch}} \omega_{\text{Ch}}^2 r_{\text{Ch}}$$

Da beide die gleiche Umlaufdauer haben ($\omega_P = \omega_{\text{Ch}}$), gilt teils $M_P r_P = m_{\text{Ch}} r_{\text{Ch}}$ und $r_P + r_{\text{Ch}} = r$ nun $(M_P + m_{\text{Ch}}) r_P = m_{\text{Ch}} r$.

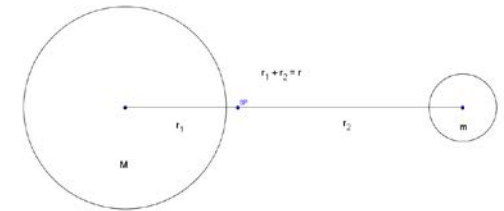
Da $F_Z = F_G$ gilt, folgt:

$$G \cdot \frac{M_P m_{\text{Ch}}}{r^2} = M_P \omega^2 r_P = M_P \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \frac{m_{\text{Ch}}}{M_P + m_{\text{Ch}}} \cdot r$$

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G (M_P + m_{\text{Ch}})} = \frac{4\pi^2}{G M_{\text{ges}}}$$

$$M_{\text{ges}} = \frac{4\pi^2 r^3}{G T^2} = 1,4 \cdot 10^{22} \text{kg}$$

$$m_{\text{Ch}} = M_{\text{ges}} \cdot 0,12 = 1,7 \cdot 10^{21} \text{kg}$$



Tabukarten

Kepler'sche Gesetze

Heliozentrisches
Weltbild

Kopernikus
Sonne
Planet
Zentrum
Geozentrisch

Johannes Kepler

Planetenbewegung
Ellipse
Gesetze
Astronom
Fernrohr

Gravitationsgesetz

Newton
Apfel
Zu Boden fallen
Masse
Kraft

Kepler'schen Gesetze und Gravitationsgesetz

Die Kepler'schen Gesetze lassen sich aus dem Gravitationsgesetz ableiten:

Ein Planet P mit der Masse m umkreist einen Zentralkörper Z mit der Masse M , wobei die Massen gegenüber einander nicht vernachlässigbar sind. Dies nennt man ein **Zweikörperproblem**. Die ersten beiden Kepler'schen Gesetze gelten unverändert, bei dem dritten Kepler'schen Gesetz muss die Gesamtmasse betrachtet werden:

Die Zentralkräfte $F_Z = m \omega^2 r^2$ für beide Körper sind betragsgleich:

$$m_P \omega_P^2 r_P = M_Z \omega_Z^2 r_Z$$

Da beide die gleiche Umlaufdauer haben ($\omega_P = \omega_Z$), gilt mittels $m_P r_P = M_Z r_Z$ und $r_P + r_Z = r$ nun $(m_P + M_Z) r_P = M_Z r$.

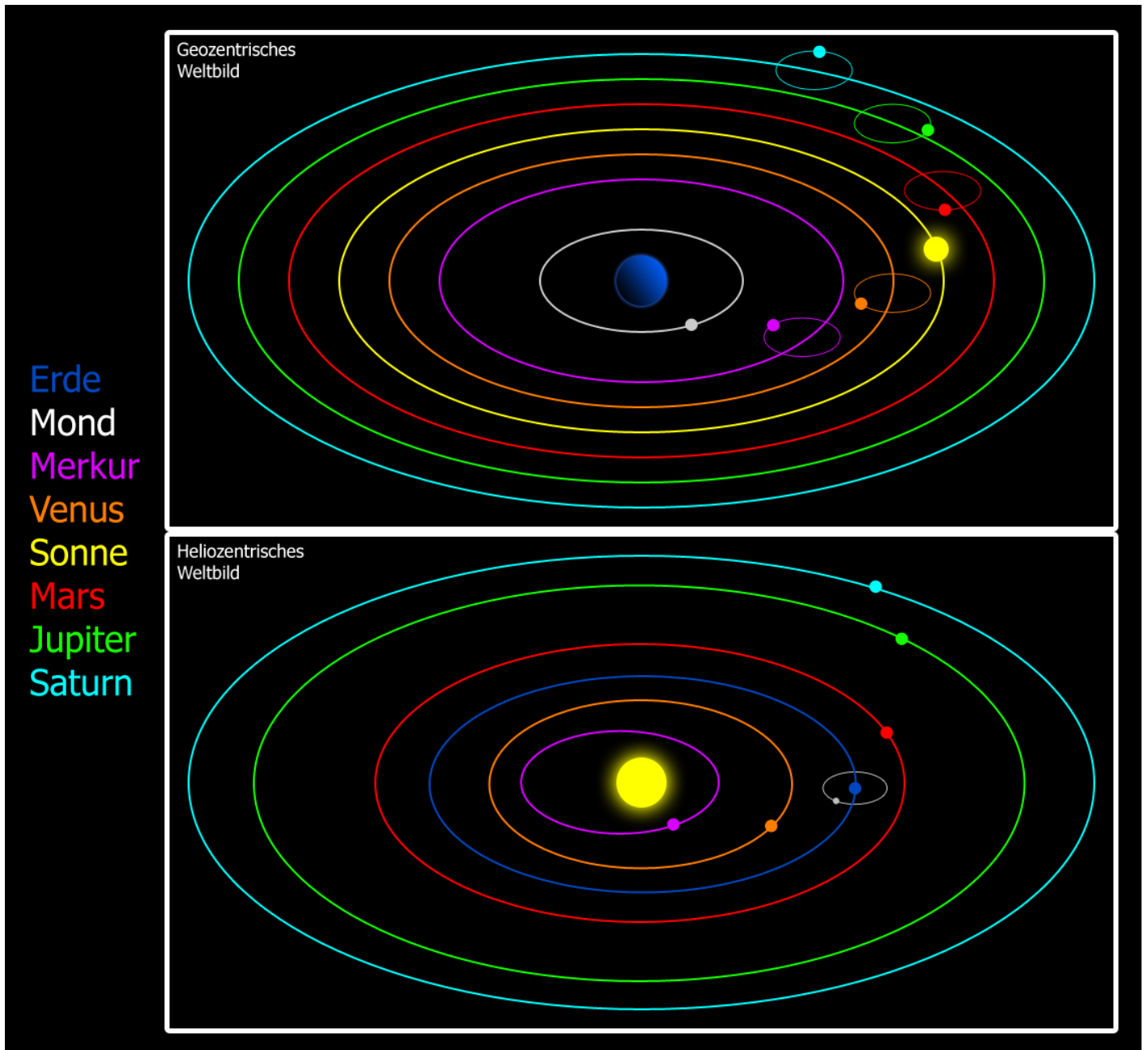
Da außerdem $F_Z = F_G$ gilt, folgt daraus:

$$G \cdot \frac{m_P M_Z}{r^2} = m_P \omega^2 r_P = m_P \cdot \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \frac{M_Z}{m_P + M_Z} \cdot r$$

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G (m_P + M_Z)} = \frac{4\pi^2}{G M_{\text{ges}}}$$

$$\rightarrow \frac{T^2}{r^3} = \text{konstant für } M_Z \gg m_P$$

Man kann die Konstanz für alle Planeten nur annehmen, wenn die Zentralmasse sehr viel größer ist als die des umkreisenden Körpers. Somit stellt das dritte Kepler'sche Gesetz im Vergleich zu den ersten beiden nur eine Näherung (für ein Mehrkörperproblem) dar.



Vergleich der Umlaufbahnen der Planeten und der Sonne bei **geozentrischem** und **heliocentrischem Weltbild**.

Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Geoz_wb_de.jpg (15.8.2012)

Die Ellipse⁴¹

Die Ellipse ist der geometrische Ort aller Punkte P in der Ebene, für die die Summe der Abstände von zwei festen Punkten, den Brennpunkten F_1 und F_2 , konstant ist. Diese Definition ist die Grundlage für die Faden- oder Gärtnerkonstruktion der Ellipse. Ihr zufolge haben wir in Abb. 1.

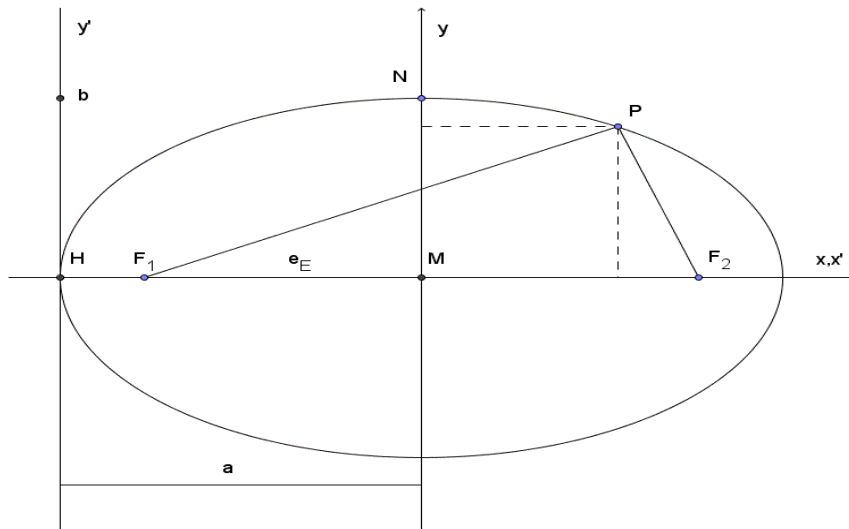


Abb. 1: Zur Mittelpunkts- und Scheitelgleichung der Ellipse

$$\overline{F_1P} + \overline{F_2P} = \text{const.} \quad (1)$$

Um den Wert dieser Konstanten zu finden, betrachten wir speziell den Punkt H , einen der beiden Hauptscheitel. Für ihn gilt mit den Beziehungen der Abbildung

$$\overline{F_1H} + \overline{F_2H} = (a - e_E) + (a + e_E) = 2a \quad (2)$$

⁴¹ nach [PidS] (S. 29 f)

Die Größe a heißt **große Halbachse**, e_E die **lineare Exzentrizität** der Ellipse. Für den Nebenscheitel N ist aus Symmetriegründen mit dieser Konstanten $2a$

$$\overline{F_1N} + \overline{F_2N} = a \quad (3)$$

und in dem Dreieck ΔF_1MN gilt $b^2 + e_E^2 = a^2$, also⁴²

$$b = \sqrt{a^2 - e_E^2}. \quad (4)$$

Die Länge b heißt **kleine Halbachse** der Ellipse.

Schreiben wir die Definition (1) für die (x', y') -Koordinaten des Punktes P explizit auf, so lesen wir aus dem Dreieck ΔF_1PF_2 , das durch das Lot von P auf die x' -Achse in zwei rechtwinklige Teildreiecke zerlegt wird,

$$\sqrt{(e_E + x')^2 + y'^2} + \sqrt{(e_E - x')^2 + y'^2} = 2a \quad (5)$$

ab. Durch elementare Umformungen unter Verwendung von (4) kommen wir da zur **Mittelpunktsgleichung**

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1 \quad (6)$$

der Ellipse. Durch Koordinatentransformation $x = x' + a$, $y = y'$ rückt der Koordinatenursprung aus dem Mittelpunkt M der Ellipse in den Scheitelpunkt H . Die Mittelpunktsgleichung (6) geht damit in die **Scheitelgleichung** über:

$$\frac{y^2}{b^2} = \frac{x}{a} \left(2 - \frac{x}{a} \right) \quad (7)$$

⁴² Oftmals wird auch die **numerische Exzentrizität** ε verwendet, die sich als $\varepsilon = \frac{e_E}{a}$ berechnet.

4.5 Planeten

Die Erde ist uns als der „blaue Planet“ bekannt, da er zu einem Großteil mit Wasser bedeckt ist. Merkur, Venus und Mars sind ähnlich wie die Erde aufgebaut, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun bestehen zum Großteil aus Wasserstoff und Helium. Sie unterscheiden sich auch in ihrem Abstand zur Sonne, ihrer Dichte und ihrem Durchmesser.

Motivation

Die Planeten unterscheiden sich in vielen physikalischen Eigenschaften. Zu diesen gehören die Massen, Umlaufzeiten und großen Halbachsen, für die man einen einfachen Zusammenhang mittels der Kepler'schen Gesetze formulieren kann. Den Schülern ist bisher nicht bekannt, dass sie mittels der bereits gelernten Gesetze schon selber viele derer Eigenschaften selber berechnen können.

Außerdem stellt sich oft die Frage, wie man die Umlaufzeiten der Planeten messen kann. Dieser Frage wird in dieser Unterrichtsstunde nachgegangen.

Richt-, Grob- und Feinziele

Die Schüler haben schon erfahren, wie das Sonnensystem entstanden ist, nun erhalten sie in dieser Unterrichtseinheit einen Überblick über die physikalischen Eigenschaften der Planeten. Dabei sollen Schüler

- vor allem die Unterschiede zwischen terrestrischen und jovianischen Planeten kennenlernen.
- den Zusammenhang von Gravitations- und Zentripetalkraft wiederholen.
- die siderischen und synodischen Umlaufzeiten und deren Zusammenhang zur Messung von Umlaufzeiten verschiedener Planeten kennen lernen.

Wichtig ist vor allem, dass Schüler

- den Unterschied zwischen siderischer und synodischer Umlaufzeit verstehen.
- erkennen, dass die Planetenbewegung, die von der Erde aus beobachtbar ist, lediglich die synodische Umlaufzeit ist.
- die Unterschiede zwischen Bahn- und Winkelgeschwindigkeit kennen.

Lernvoraussetzung

Obwohl viele physikalische Gesetze schon Bestandteil der zehnten Jahrgangsstufe waren, werden sie hier noch einmal wiederholt. Außerdem werden Begriffe wie Bahngeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit und die Umrechnung von Winkel- in Bogenmaß verwendet.

Außerdem wird in der Stunde auf die Kepler'schen Gesetze, die in den vorherigen Stunden behandelt wurden und auf das Gravitationsgesetz zurückgegriffen.

Unterrichtsverlauf

Der Einstieg beginnt mit der Fragestellung, wie man denn Planeten und ihre Bewegung beobachten und messen kann. Die Schüler sollen darauf kommen, dass die beobachteten Umlaufzeiten nicht dieselben sind, die ein äußerer Beobachter messen würde.

Anschließend werden die Begriffe der siderischen und synodischen Umlaufzeiten eingeführt und erklärt. Die Schüler bekommen dazu ein Arbeitsblatt mit Lückentext, das die Klasse dann gemeinsam ausfüllt.

Anschließend werden die zwei dazugehörigen Aufgaben besprochen. Diese orientieren sich an vorangegangenen Abituraufgaben.

Unterrichtsmaterial

Das Unterrichtsmaterial zu dieser Stunde besteht aus

- | | |
|---|-------|
| - Stundenmatrix | S. 60 |
| - Siderische und synodische Umlaufzeiten | S. 61 |
| - Siderische und synodische Umlaufzeiten – Musterlösung | S. 62 |

Stundenmatrix-Planeten

Zeit	Unterrichtsschritt	Lehrerverhalten	Schülerverhalten	Sozialform	Medien	Did. Kommentar
10	Motivation Problemstellung	Lehrer fragt nach Beobachtungsmöglichkeiten der Planeten.	Schüler erkennen Probleme bei Planetenbewegung, wenn Beobachtung auf der Erde stattfindet.	SLG		Lehrer macht auf Problem bei Planetenbeobachtung aufmerksam.
20	Erarbeitung Aufgabenblatt zu Umlaufzeiten	Lehrer erklärt siderische und synodische Umlaufzeit.	Schüler füllen AB aus.	SLG	AB	
15	Festigung Aufgaben zu Umlaufzeiten	Lehrer gibt Hilfestellung.	Schüler lösen Aufgaben.	SLG	AB	Aufgaben auf Abiturniveau

Siderische und synodische Umlaufzeiten

Die **synodische** Umlaufzeit T_{syn} bezeichnet den Zeit(raum) zwischen zwei aufeinanderfolgenden _____ für obere Planeten bzw. _____ für untere Planeten.

Die **siderische** Umlaufzeit T_{sid} ist die Zeitspanne, in der eine vom Sonnenzentrum durch das Planetenzentrum gezogene Halbgerade einen _____ Winkel durchläuft.

Der Planet befindet sich in Opposition. Der Zeitraum zwischen zwei Oppositionen ist T_{syn} . Der Planet ist dabei um einen Winkel φ_P weitergelaufen. In derselben Zeit hat die Erde den Winkel

$$\varphi_E =$$

durchlaufen. Somit gilt:

$$\varphi_P =$$

Da $\varphi =$ _____ gilt, lässt sich

$$\omega_P \cdot T_{\text{syn}} =$$

formulieren. Mit der siderischen Umlaufzeit und der Erdumlaufzeit folgt dann:

$$\frac{2\pi}{T_{\text{sid}}} \cdot T_{\text{syn}} =$$

Dividiert man nun durch _____ so erhält man folgenden Zusammenhang:

Aufgaben:

- 1) Berechnen Sie für den Planeten Mars, wie viele Tage zwischen zwei aufeinanderfolgenden Oppositionen liegen. (Abitur 2002)
- 2) Zwischen zwei Saturnoppositionen liegen ein Jahr und 12,8 Tage. Berechnen Sie aus diesem Wert die siderische Umlaufzeit des Planeten und die Länge der großen Halbachse der Bahnellipse. (Abitur 2006)

Siderische und synodische Umlaufzeiten - Musterlösung

Die **synodische** Umlaufzeit T_{syn} bezeichnet den Zeit(raum) zwischen zwei aufeinanderfolgenden **Oppositionen** für obere Planeten bzw. **Konjugationen** für untere Planeten. Die **siderische** Umlaufzeit T_{sid} ist die Zeitspanne, in der eine vom Sonnenzentrum durch das Planetenzentrum gezogene Halbgerade einen **360° (2π)** Winkel durchläuft.

Der Planet befindet sich in Opposition. Der Zeitraum zwischen zwei Oppositionen ist T_{syn} . Der Planet ist dabei um einen Winkel φ_P weitergelaufen. In derselben Zeit hat die Erde den Winkel

$$\varphi_E = \varphi_P + 2\pi$$

durchlaufen. Somit gilt:

$$\varphi_P = \varphi_E - 2\pi.$$

Da $\varphi = \omega \cdot T$ gilt, lässt sich

$$\omega_P \cdot T_{\text{syn}} = \omega_E \cdot T_{\text{syn}} - 2\pi$$

formulieren. Mit der siderischen Umlaufzeit und der Erdumlaufzeit folgt dann:

$$\frac{2\pi}{T_{\text{sid}}} \cdot T_{\text{syn}} = \frac{2\pi}{T_E} \cdot T_{\text{syn}} - 2\pi$$

Dividiert man nun durch $2\pi \cdot T_{\text{syn}}$, so erhält man folgenden Zusammenhang:

$$\frac{1}{T_{\text{sid}}} = \frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_{\text{syn}}}$$

Aufgaben:

- 1) Berechnen Sie für den Planeten Mars, wie viele Tage zwischen zwei aufeinanderfolgenden Oppositionen liegen. (Abitur 2002)

Lösung:

$$\frac{1}{T_{\text{sid}}} = \frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_{\text{syn}}}$$

$$T_{\text{syn}} = \left(\frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_{\text{sid}}} \right)^{-1} \quad \text{mit } T_{\text{sid}} = 686,980 \text{ d} = 1,8808 \text{ a}; T_E = 1 \text{ a}$$

$$T_{\text{syn}} = 2,1353 \text{ a} = \mathbf{779,94 \text{ d}}$$

- 2) Zwischen zwei Saturnoppositionen liegen ein Jahr und 12,8 Tage. Berechnen Sie aus diesem Wert die siderische Umlaufzeit des Planeten und die Länge der großen Halbachse der Bahnellipse. (Abitur 2006)

Lösung:

$$\frac{1}{T_{\text{sid}}} = \frac{1}{T_E} - \frac{1}{T_{\text{syn}}}; \quad \frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}$$

Man benötigt folgende Größen:

$$T_E = 1\text{a}; T_{\text{syn}} = 1,035\text{a} = 1 \text{ Jahr } 12,8 \text{ Tage}$$

$$\rightarrow T_{\text{sid}} = 29,57 \text{ a} \hat{=} T_{\text{Sat}}$$

$$a_{\text{Sat}}^3 = \left(\frac{T_{\text{Sat}}}{T_E} \right)^2 \cdot a_E^3 \rightarrow a_{\text{Sat}} = \mathbf{9,56 \text{ AE}}$$

4.6 Flug zum Mars

Warum übt der „rote Planet“ seit jeher eine besondere Faszination auf die Menschen aus? Schon früh erkannten Menschen, dass der Mars sich vor dem Fixsternhimmel zeitweise sogar rückwärts bewegt (Planetenschleife). Seit Mitte des 18. Jahrhunderts – als die ersten Beobachtungen von den Geschwistern William und Caroline Herschel gemacht wurden – sind gewisse Ähnlichkeiten zur Erde beobachtet worden. Sollte es somit sogar Leben auf dem Mars geben?

Motivation

Ziel der Stunde ist es, den Schülern das Thema Raumfahrt nahezubringen. Wie können Menschen zu entfernten Himmelsobjekten gelangen? Der direkte Weg ist möglich, jedoch energetisch ungünstig. Eine Alternative dazu ist, Satelliten und Raumschiffe auf sogenannten Hohmannbahnen zu bringen.

Richt-, Grob- und Feinziele

Die Schüler spielen eine Reise zum Mars - wie sie in ferner Zukunft stattfinden könnte - nach.

Dabei sollen Schüler

- zunächst mit Hilfe des Lehrers und eines Arbeitsblattes eine allgemeine Formel für die Fluchtgeschwindigkeit herleiten. Dazu sind komplizierte Denk- und Rechenschritte nötig, die auf der Energieerhaltung und der Verwendung (und damit Wiederholung) des Gravitationsgesetzes beruhen.
- verschiedene Fluchtgeschwindigkeiten ausrechnen.
- sich überlegen, wie man zu einem Planeten fliegen kann unter Zuhilfenahme eines Artikels⁴³. Dieser beschreibt die Hohmannbahnen. Mittels dieses Artikels schlägt man die Überleitung zu der Swing-By-Methode.

Wichtig ist dabei, dass

- die Schüler den Ansatz für die Herleitung der Fluchtgeschwindigkeit verstehen.
- die Schüler sehen, dass auf den Bahnen Energieerhaltung gilt.
- die Schüler alle relevanten Größen dafür kennen.
- den Unterschied der einzelnen Fluchtgeschwindigkeiten kennen.
- sie verstehen, dass nicht der direkte Flug zu einem Planeten, sondern der Weg auf Ellipsenbahnen energetisch günstiger ist. (Hohmannbahnen)
- die Schüler die Hohmannbahnen in den Aufgaben berechnen können.

⁴³ <http://www.sterne-und-weltraum.de/alias/dachzeile//837670> (31.07.2012)

- sie verstehen, wie Himmelskörper wie Satelliten ihre Bewegung mittels Swing-by-Methode ändern können.
- sie sehen, mit welchen Schwierigkeiten der Flug zu anderen Planeten verbunden ist.

Lernvoraussetzung

Zu dem in der Unterrichtseinheit verwendeten Vorwissen gehören die siderischen und synodischen Umlaufzeiten sowie die Kepler'schen Gesetze und das Gravitationsgesetz. Ebenso werden Ansätze der Energieerhaltung (10. Jgst.) und die Gesamtenergie als Summe von potentieller und kinetischer gebraucht. Auch wird das Wissen über Ellipsen und die Bewegung von Planeten auf ihnen benötigt.

Unterrichtsverlauf

Das Thema der Unterrichtsstunde ist der Flug zum Mars. Die Stunde beginnt mit einem *Brain-Storming*. Die Schüler sollen ihre Assoziationen zum Planeten Mars nennen und diese an der Tafel/OHP sammeln. Es können Begriffe wie Marsmenschen, Leben auf dem Mars, Kriegsgott Mars, rote Oberfläche, Marsgesicht, Kanäle oder Wasser auf dem Mars fallen.

Anschließend überlegt sich die Klasse, wie man zum Mars gelangen kann:

Dabei spielen zwei Aspekte eine Rolle: die Startgeschwindigkeit von der Erde und die Bahn, auf der sich ein Raumschiff zu einem Planeten bewegt.

Zuerst werden die „Kosmischen Geschwindigkeiten“ behandelt. Diese geben an, mit welcher Geschwindigkeit sich ein Objekt wie eine Rakete von der Erde bezüglich verschiedener Bezugssysteme entfernen muss, um auf Bahnen um oder außerhalb der Erde zu gelangen. Dies wird auf einem Arbeitsblatt gesichert.

Danach werden die erste und zweite Kosmische Geschwindigkeit ausgerechnet. Diese sind die Geschwindigkeiten eines Satelliten, um auf einer Kreisbahn um die Erde zu bleiben und um diese wieder zu verlassen. Die Benennung und Erklärung höherer kosmischer Geschwindigkeiten kann den Schülern erklärt werden, eine ausführliche Berechnung ist nicht zwingend nötig.

Bei Bedarf kann auf eine einfachere Herleitung zurückgegriffen werden, die lediglich Kräfte bzw. Energien gleichsetzt.

In der zweiten Unterrichtsstunde lesen die Schüler anfangs einen Artikel über Hohmannbahnen, welcher im Anschluss besprochen wird.

Danach werden die Aufgaben des Arbeitsblattes gemeinsam gerechnet. Diese beinhalten neben den gerade gelernten Hohmannbahnen auch die Fluchtgeschwindigkeiten, die aus dem ersten Teil der Doppelstunde bekannt sind. Außerdem kommt zur Sprache, warum diese Geschwindigkeiten bei der Betrachtung von verschiedenen Inertialsystemen nicht so hoch sein müssen.

Anschließend wird die Frage gestellt, wie Satelliten ihre Bewegungsrichtung ändern, wenn sie einmal im Weltall sind. Denn eine Beschleunigung in eine andere Richtung ist nur mit großer Energie möglich. Den Schülern wird hier die einfachere Swing-By-Methode mittels des Titelblattes eines weiteren Artikels erklärt. Die Schüler sehen, dass durch gezielte Annäherung an Himmelskörper wie Planeten oder Meteoriten die beiden Komponenten der Geschwindigkeit (Richtung und Betrag) geändert werden können. Dabei sollen keine Formeln gelernt werden, sondern das Verständnis für die Betrachtung in den Inertialsystemen im Vordergrund stehen.

Abschließend kann in einem freien Gespräch geklärt werden, warum Reisen zum Mars besonders reizvoll für die Menschheit sind. Dafür gibt es mehrere Ansätze:

- Die Schüler erfahren, dass man den Mond (mit großem Aufwand) bewohnbar machen kann, sodass in fernerer Zukunft Menschen dort leben und forschen können.
- Neben dem Ziel der Monderforschung durch Menschen vor Ort gilt der Mars als gute Alternative zum längerfristigen Leben, wenn die Lebensbedingungen auf der Erde sich verschlechtern (Ozon, Luftverschmutzung, Erderwärmung...).
- Es liegt auch die Vermutung nahe, dass auf dem Mars früher schon Leben existiert haben könnte. Somit liegt ein Teil der Forschung auf der Untersuchung des Marsgesteins nach Bakterien und ähnlichen Lebensformen.
- Die Erde und der Mars haben einen sehr ähnlichen geologischen Aufbau. Somit kann man mit Hilfe des Mars mehr über die Geschichte und den Aufbau der Erde erfahren.

Dabei kann mittels der auf dem Arbeitsblatt gelernten Methode die Flugzeit zum Mars berechnet werden. Ebenso können Projekte wie die Landung der Marsfähre *Curiosity* oder das Experiment *Mars500* angesprochen werden, das die psychischen und physischen Auswirkungen des Fluges zum Mars auf Menschen simuliert⁴⁴.

Unterrichtsmaterial

Zu den Unterrichtsmaterialien dieser Stunde gehören:

- | | |
|--|-------|
| - Stundenmatrix | S. 66 |
| - Aufgaben – Hohmannbahnen (Aufgabenblatt) | S. 68 |
| - Lösungen – Hohmannbahnen (Lehrerlösung) | S. 69 |
| - Energieniveaus auf Ellipsenbahnen (Arbeitsblatt) | S. 71 |
| - Hohmannbahnen ⁴⁵ (Artikel) | S. 72 |
| - Swing By ⁴⁶ (Titelblatt) | S. 76 |
| - Sonnensystem – Der Mars (Film als Alternative) | CD |

Die Artikel befinden sich ebenfalls als PDF auf der CD.

⁴⁴ <http://www.esa.int/SPECIALS/Mars500/> (04.08.2012)

⁴⁵ [WIS0409]

⁴⁶ [WIS0312]

Stundenmatrix - Mars

Zeit	Unterrichtsschritt	Lehrerverhalten	Schülerverhalten	Sozialform	Medien	Did. Kommentar
5	Motivation Assoziationen zu Mars	Lehrer fragt, welche Begriffe Schülern zum Mars einfallen.	Schüler nennen ihre Assoziationen zum Mars.	SLG	Tafel, OHP	Brainstorming
20	Erarbeitung I Herleitung für Energie auf Bahnen	Lehrer erklärt Schülern, wie man die Energieniveaus der Planetenbahnen berechnen kann.	Schüler hören aufmerksam zu.	SLG, Vortrag	Arbeitsblatt	Herleitung der Energien der verschiedenen Bahnen
10	Berechnung Kosmischer Geschwindigkeiten	Lehrer erklärt, was genau die einzelnen kosmischen Geschwindigkeiten bedeuten.	Schüler berechnen die Werte für diese Geschwindigkeiten.	SLG	Heft, Taschenrechner	Es sollen nur die ersten zwei kosmischen Geschwindigkeiten berechnet werden.
15	Erarbeitung II Artikel über Hohmannbahnen		Schüler lesen Artikel über Hohmannbahnen.	Einzelarbeit	Text „Hohmannbahnen“	Textarbeit
15	Beispielrechnungen auf Arbeitsblatt	Lehrer erklärt Herangehensweise an die Aufgaben.	Schüler rechnen mit Hilfe des Lehrers Aufgaben zu den Hohmannbahnen.	SLG	Arbeitsblatt	
15	Erarbeitung III Swing-By		Schüler lesen einen Artikel über Swing-By und diskutieren mit Lehrer.	SLG	Text „Swing-by“	Hierbei sollen Schüler keinerlei Formel lernen, sondern lediglich das zugrunde liegende Prinzip verstehen

10	Diskussion über Flug zum Mars	Lehrer leitet Diskussion durch gezielte Fragen.	Schüler diskutieren über Reise zum Mars.	SLG	Eventuell Film ⁴⁷	Individuelle Wahl des Schwerpunktes, z.B. Wiederholung der Flug- bahn zu Mars (Hohmann- bahnen), Technische Möglichkeiten, um auf dem Mars zu überleben etc.
----	---	--	---	-----	------------------------------	---

⁴⁷ <http://www.youtube.com/watch?v=CVmrIDxQtml> (25.07.2012) oder CD: Sonnensystem – Der Mars

Aufgaben - Hohmannbahnen

1. Die energetisch günstigste Bahn für einen interplanetaren Flug ist die sog. Hohmann-Bahn.
 - a) Skizzieren Sie für einen Flug von der Erde zum Saturn die Hohmann-Bahn und bestimmen Sie deren große Halbachse sowie die dazugehörige Reisezeit von der Erde zum Saturn.
Hinweise: $a_{\text{Sat}} = 9,55 \text{ AE}$, $T_{\text{sid}} = 29,5 \text{ a}$
 - b) Bestimmen Sie für die Bahn von Teilaufgabe a) die Geschwindigkeit im Perihel.
 - c) Mit der heutigen Raketentechnik ist eine Beschleunigung auf die in Teilaufgabe b) berechnete Geschwindigkeit nicht möglich. Nennen Sie zwei Gegebenheiten im Sonnensystem, die man geschickt nutzen kann, um dennoch derartige Geschwindigkeiten zu erreichen. (Abitur 2006)

2. Ein Satellit fliegt von der Erde aus zum Pluto.
 - a) Welche Startgeschwindigkeit wäre nötig, um von einem Punkt der Erdbahn aus auf einer Hohmann-Ellipse zum Rendezvous mit Pluto im Juli 2015 zu gelangen? Wie lange würde in diesem Fall die Hinreise dauern?

Abstand Sonne-Pluto: $a = 33 \text{ AE}$
 - b) Tatsächlich genügt eine deutlich kleinere Startgeschwindigkeit bezüglich der Erde als die in Teilaufgabe a) berechnete. Erläutern Sie dies. (Abitur 2008)

Lösungen - Hohmannbahnen

Die energetisch günstigste Bahn für einen interplanetaren Flug ist die sog. Hohmann-Bahn.

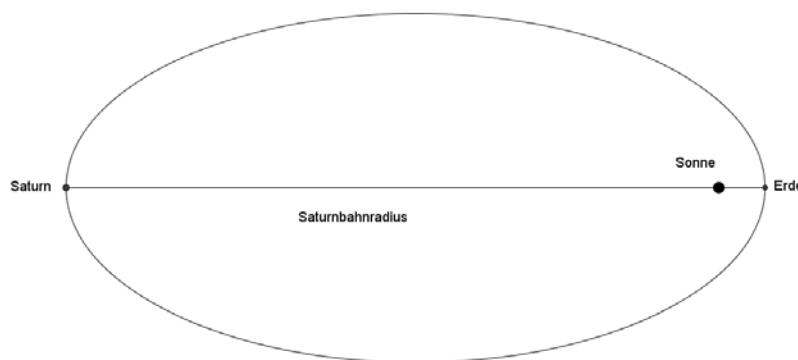
- a) Skizzieren Sie für einen Flug von der Erde zum Saturn die Hohmann-Bahn und bestimmen Sie deren große Halbachse sowie die dazugehörige Reisezeit von der Erde zum Saturn.

Hinweise: $a_{\text{Sat}} = 9,55 \text{ AE}$, $T_{\text{sid}} = 29,5 \text{ a}$

- b) Bestimmen Sie für die Bahn von Teilaufgabe a) die Geschwindigkeit im Perihel.
 c) Mit der heutigen Raketentechnik ist eine Beschleunigung auf die in Teilaufgabe b) berechnete Geschwindigkeit nicht möglich. Nennen Sie zwei Gegebenheiten im Sonnensystem, die man geschickt nutzen kann, um dennoch derartige Geschwindigkeiten zu erreichen. (Abitur 2006)

Lösung:

- a)



$$a_{\text{Hohmann}} = \frac{1}{2}(a_{\text{Sat}} + a_{\text{E}}) = 5,28 \text{ AE}$$

$$T_{\text{Hohmann}}^2 = \left(\frac{a_{\text{Hohmann}}}{a_{\text{E}}}\right)^3 \cdot T_{\text{E}}^2 \rightarrow T_{\text{Hohmann}} = 12,1 \text{ a} \rightarrow T_{\text{FLug}} = \frac{1}{2} T_{\text{Hohmann}} = 6,1 \text{ a}$$

- b)

$$v = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} = \sqrt{GM \left(\frac{2}{1\text{AE}} - \frac{1}{a_{\text{Hohmann}}} \right)} = 40,1 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

- c) Antwortmöglichkeiten:

- a. Rotation der Erde um sich selbst
- b. Bewegung der Erde um die Sonne
- c. Beschleunigung durch andere Planeten (Swing By)

- a) Welche Startgeschwindigkeit wäre nötig, um von einem Punkt der Erdbahn aus auf einer Hohmann-Ellipse zum Rendezvous mit Pluto im Juli 2015 zu gelangen? Wie lange würde in diesem Fall die Hinreise dauern?

Abstand Sonne-Pluto: $a = 33 \text{ AE}$

- b) Tatsächlich genügt eine deutlich kleinere Startgeschwindigkeit bezüglich der Erde als die in Teilaufgabe a) berechnete. Erläutern Sie dies. (Abitur 2008)

Lösung:

- a)

$$a_{\text{Hohmann}} = \frac{1}{2}(33\text{AE} + 1\text{AE}) = 17 \text{ AE}$$

$$v = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} = \sqrt{GM \left(\frac{2}{1\text{AE}} - \frac{1}{a_{\text{Hohmann}}} \right)} = 42 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{Hohmann}}^2 = \left(\frac{a_{\text{Hohmann}}}{a_{\text{E}}} \right)^3 \cdot T_{\text{E}}^2 \rightarrow T_{\text{Hohmann}} = 70 \rightarrow T_{\text{FLug}} = \frac{1}{2} T_{\text{Hohmann}} = 35\text{a}$$

- b) Die Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne und die Rotation der Erde um sich selber bringen einen großen Teil der oben berechneten Geschwindigkeit bereits auf, sodass man mit einer deutlich geringeren Geschwindigkeit von der Erde aus starten kann.

Energieniveaus auf Ellipsenbahnen

Um die Startgeschwindigkeit eines Satelliten zu bestimmen, muss zuerst die Energie des Planeten selbst auf der Ellipsenbahn berechnet werden. Man nimmt zunächst an, dass die Masse des Planeten sehr viel kleiner als die der Sonne ist, sodass die Rechnung mit einer reduzierten Masse nicht verwendet werden muss.

$$m \ll M$$

Die Gesamtenergie setzt sich aus kinetischer und potentieller Energie zusammen, wobei man die potentielle Energie aus dem Gravitationsgesetz erhält.

$$E_{\text{Ges}} = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = -\frac{GMm}{r} + \frac{m}{2}v^2$$

Man kann nun ausgehend von der Energieerhaltung sagen, dass die Energie im Perihel gleich der Energie im Aphel sein muss.

$$E_{\text{Ges}} = -\frac{GMm}{r_A} + \frac{m}{2}v_A^2$$

$$E_{\text{Ges}} = -\frac{GMm}{r_P} + \frac{m}{2}v_P^2$$

Daraus lässt sich durch Umformen folgern:

$$v_A = v_P \cdot \frac{r_P}{r_A}$$

$$E_{\text{Ges}} = -\frac{GMm}{r_A} + \frac{m}{2}v_P^2 \cdot \frac{r_P^2}{r_A^2}$$

$$E_{\text{Ges}} = -\frac{GMm}{r_A} + \left(E_{\text{Ges}} + \frac{GMm}{r_P} \right) \cdot \frac{r_P^2}{r_A^2}$$

$$E_{\text{Ges}} \cdot (r_A^2 - r_P^2) = -GMm \cdot (r_A - r_P)$$

Man erhält nun eine Formel für die Gesamtenergie, die nur von r abhängt:

$$E_{\text{Ges}} = -\frac{GMm}{r_A + r_P} = -\frac{GMm}{2a}$$

$$\frac{m}{2}v^2 - \frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{2a}$$

Man kann diese Formel nach der Geschwindigkeit auflösen:

$$v = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

Nun gilt für die ersten beiden kosmischen Geschwindigkeiten:

$$a = r : v_K = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

$$a \rightarrow \infty : v_F = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Bahnen niedriger Energie

Wie kommen die Raumsonden am besten zum Ziel?

VON DONALD WISS

Die als Hohmann-Bahn bekannte halbelliptische Transferbahn zwischen zwei Umlaufbahnen ist das klassische Beispiel einer optimalen Bahn niedriger Energie. Sie kommt nach wie vor bei den meisten Raumfahrtmissionen zur Anwendung, wenn auch manchmal in leicht abgeänderter Form.

Um ein Raumfahrzeug zu einem anderen Planeten zu schicken, muss eine Übergangsbahn benutzt werden, welche die Bahnen von Ausgangs- und Zielplanet entweder schneidet oder mindestens tangiert. Bereits vor 80 Jahren beschäftigte sich der deutsche Ingenieur Walter Hohmann (1880–1945) nebenberuflich mit Bahnberechnungen von Himmelskörpern. Dabei ging er auch der Frage nach, wie interplanetare Raumschiffe mit geringstem Energieaufwand zu ihrem Ziel gelangen könnten.

1925 erschien sein berühmtes Buch »Die Erreichbarkeit der Himmelskörper«, wo er unter anderem darlegte, dass die günstigste Übergangsbahn zwischen zwei Planeten exakt eine halbe Ellipsenbahn um die Sonne ist. Diese schneidet die Umlaufbahnen von Ausgangs- und Zielplanet aber nicht, sondern berührt sie bloß in je einem ihrer Scheitelpunkte, dem Aphel beziehungsweise Perihel.

Da sich die Geschwindigkeiten von Planet und Raumschiff in beiden Berührungspunkten deutlich unterscheiden, müssen sie deshalb durch kurzzeitigen Raketenschub angepasst werden. Da sich dort beide Objekte aber momentan parallel zu einander bewegen, benötigt der Raumflugkörper bei diesem Bahnwechsel eine geringere Antriebsleistung als bei jeder anderen Form von Transferbahn.

Leider zeigt sich aber auch, dass der Zeitbedarf für diese halbelliptische Bahn größer ist als bei direkter verlaufenden, mehr Energie benötigenden Flugbahnen, welche mindestens eine der Planetenbahnen überschneiden. Heute werden die halbelliptischen, energieoptimalen Über-

gangstrajektorien nach ihrem Entdecker »Hohmann-Transferbahnen« genannt.

Das Grundprinzip

Die Überlegungen Hohmanns basieren auf der klassischen Theorie des Zweikörperproblems. Danach stellt jede interplanetare Transferbahn im Wesentlichen eine einfache Umlaufbahn um die Sonne in Form eines Kegelschnittes dar, wenn vorerst vom Einfluss der Planeten selbst einmal abgesehen wird. Handelt es sich dabei insbesondere um die Energie sparende Hohmann-Bahn, so lässt sich der Antriebsbedarf für das Übergangsmanöver wie folgt beschreiben.

Beim Start vom Ursprungsplaneten muss eine Geschwindigkeitsdifferenz erzeugt werden, damit die Sonde von der Planetenbahn in die Transferbahn übergehen kann. Mit der herkömmlichen Raketentechnik wird dies durch einen kräftigen Schubimpuls erreicht. Weil die Brenndauer einer Rakete im Vergleich zur gesamten Reisezeit jedoch so kurz ist, darf deren Antriebswirkung praktisch als sprunghafte Geschwindigkeitszunahme angesehen werden. Man spricht daher offiziell von einem »Kick in die Transferbahn«.

Ist der Bahnradius des Zielplanetens größer als derjenige des Startplanetens, wie z.B. bei einem Flug von der Erde zum Mars, so erfordert dies einen Schubimpuls in derselben Richtung wie die Planetenbewegung. Das Raumfahrzeug muss ja schneller werden. Weist der Zielplanet hingegen einen kleineren Bahnradius auf, wie z.B. beim Weg von der Erde zur Venus, so hat die Schubwirkung der Planetenbewegung entgegengesetzt zu

erfolgen, da der Flugkörper von der Sonne aus gesehen langsamer werden muss.

Analog dazu besteht auch beim Erreichen des Zielplanetens zwischen diesem und der Raumsonde eine Geschwindigkeitsdifferenz, die durch eine geeignete Maßnahme, wie eine weitere Raketenschubbeinwirkung, abgebaut werden muss. Diese kann jedoch mit einer Abbremsung in der Gashölle des Planetens kombiniert werden, sofern der Zielplanet eine Atmosphäre besitzt. Die Richtung des Schubvektors hängt hier ebenfalls davon ab, ob das Raumschiff von einem inneren oder äußeren Planeten kommt. Falls der Start von einer inneren Planetenbahn aus erfolgte (z. B. von der Erde zum Mars), so ist die Sonde das langsamere Objekt und wird vom Zielplaneten von hinten her eingeholt.

Der Endschub muss also nach vorne, d. h. in Richtung der Planetenbewegung wirken. Von der Sonne aus gesehen, versucht das künstliche Objekt quasi vor dem Zielplaneten zu »fliehen«, während es sich vom Planeten aus gesehen in einer abgebremsten Sturzbewegung von vorne nähert. Kommt das Raumfahrzeug jedoch von einem äußeren Planeten (z. B. von der Erde zur Venus), so fliegt es beim Zusammentreffen schneller als der Zielplanet und holt diesen von hinten ein. Deshalb muss hier der Raketenschub entgegen der Planetenbewegung gerichtet sein, was sowohl im solaren als auch im planetaren Bezugssystem als Bremsmanöver wahrgenommen wird.

Das Geschehen beim Zielplaneten ist durchaus vergleichbar mit einer prekären Verkehrssituation, die zu einer Auffahrkollision führen könnte. Angenommen,

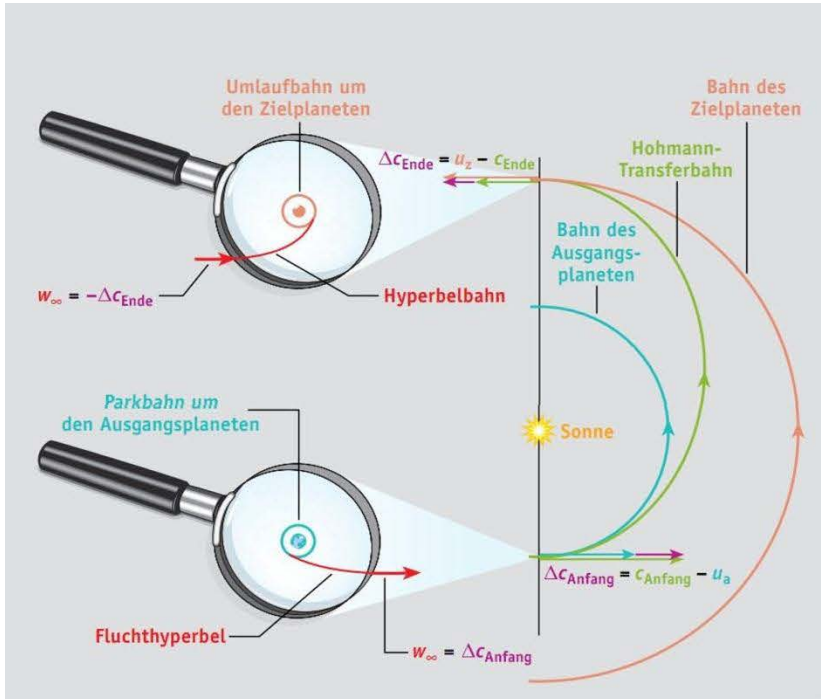


Abb. 1: Vollständige, optimale Transferbahn zwischen zwei Planeten. In Grün ist die eigentliche Hohmann-Transferbahn dargestellt.

zuerst von 7.8 km/s auf Fluchtgeschwindigkeit beschleunigt werden, d. h. eine Zusatzgeschwindigkeit von 3.32 km/s erhalten. Wie bereits erwähnt, ist es in der Raketentechnik üblich, die Antriebsphasen als Geschwindigkeits sprünge » ΔV « zu betrachten, die bei mehreren getrennten Raumflugmanövern einfach zu einem »Gesamtgeschwindigkeitsbedarf« zusammengezählt werden dürfen.

Man könnte nun versucht sein, das ganze Startproblem in zwei Schritten zu lösen: zuerst Flucht aus dem Erdschwerefeld und dann Zusatzbeschleunigung in die Hohmannbahn. Dies würde auf einen Geschwindigkeitsbedarf von 3.32 km/s + 2.94 km/s = 6.17 km/s = C_{Anfang} führen. Doch es gibt eine bessere Lösung! Erhöht man nämlich die Geschwindigkeit beim Start aus der Parkbahn mit einem einzigen Kick direkt um 3.62 km/s (statt nur 3.32 km/s), entfernt sich die Raumsonde auf einer Hyperbelbahn und weist am Rande der Gravisphäre gerade noch die nötige Übergeschwindigkeit von 2.94 km/s auf, mit der sie bei richtigem Abschusswinkel automatisch in die Transferbahn zum Mars übergeht. Man spart auf diese Weise also Antriebsenergie, die einer Geschwindigkeitsänderung entspricht von 6.17 km/s – 3.62 km/s = 2.55 km/s! ($C_{\text{Anfang}} - U_a = \Delta C_{\text{Anfang}}$)

Reale Anwendungen

Die einfachste und buchstäblich nächstliegende Anwendungsform von Hohmanns Optimierungsgedanken ist aber nicht der Transfer zwischen zwei Planeten, sondern der als Geostationary Transfer Orbit (GTO) bezeichnete, heute routinemäßig praktizierte Übergang eines Satelliten von einer erdnahen Umlaufbahn in eine 24-Stunden-Bahn, wo die Bewegung synchron mit der rotierenden Erdoberfläche verläuft.

Zu diesem Zweck bringt die Hauptantriebseinheit einer Träger Rakete (ARIANE 5, DELTA etc.) den Satelliten zunächst auf eine niedrige Umlaufbahn, den so genannten Low Earth Orbit (LEO), z. B. in 200 Kilometern Höhe mit einer Kreisbahngeschwindigkeit von 7.8 km/s. Dort beschleunigt ihn eine Oberstufe weiter auf 10.3 km/s, worauf der Satellit entlang einer perfekten Hohmann-Ellipse (eben dem GTO) während 5.3 Stunden antriebslos auf die Höhe von 35 900 km (über dem Erdboden) aufsteigt. Hier trifft er relativ langsam mit 1.6 km/s ein, weshalb nun ein nochmaliger, als »Apogäumskick« be-

ein Kleinwagen will von einer Zufahrt in eine Autobahn einfahren, wo gerade ein schwerer Lastwagen vorbeifährt, der nicht bremsen kann. Dann ist der Letztere vergleichbar mit dem Planeten, der Personewagen mit der Raumsonde.

Kommt diese von einer inneren Planetenbahn, entspricht dies dem Fall, wo der Kleinwagen dem Laster mit geringerer Geschwindigkeit »vor die Nase« fährt. Um eine Kollision zu vermeiden, muss der Privatautolenker kräftig Gas geben. Dabei sieht der LKW-Fahrer das kleine Fahrzeug von vorne auf sich zukommen und empfindet dessen Beschleunigung als ein »Abbremsen« dieser Relativbewegung. Kommt die Planetensonde jedoch von einem äußeren Ausgangsplaneten, so verhält es sich so, wie wenn der Kleinwagen mit überhöhter Geschwindigkeit knapp hinter den Lastwagen heranfährt und nun kräftig bremsen muss, damit es nicht zum Zusammenstoß kommt.

Leider sind die Schwerkräftfelder der Planeten selbst bei den soeben beschriebenen Vorgängen noch nicht berücksichtigt worden. Aus diesem Grund ist die bisherige, vereinfachte Betrachtungsweise der Hohmann-Bahnen eigentlich nur anwendbar, wenn man sie sinngemäß auf Bahnübergänge von Satelliten um Einzelplaneten (ohne Mondeinfluss) überträgt.

Die Beeinflussung durch die Planeten

Bei interplanetaren Übergängen ist zusätzlich zur Energiedifferenz zwischen den beiden Planetenbahnen auch noch der Energieaufwand zur Überwindung der Gravitationsfelder von Ausgangs- und Zielplanet zu berücksichtigen. Am

Anfang und Ende der interplanetaren Ellipsenbahn befindet sich nämlich je das Einflussgebiet eines Planeten, in diesem Inneren seine Schwerkraft gegenüber allen anderen Kräften überwiegt. Diese Zone wird Gravisphäre genannt und als relativ klein und eng begrenzt vorausgesetzt. Bei der Erde beträgt z. B. ihr Durchmesser knapp ein Prozent des Erdbahndurchmessers, also etwa drei Millionen km. Die oben beschriebenen Geschwindigkeitsunterschiede an den Übergangsstellen zwischen der Hohmann-Bahn und den Planetenumlaufbahnen gelten deshalb erst außerhalb der dort vorhandenen Gravisphären.

Die notwendigen Schubimpulse für den Bahnwechsel werden in Wirklichkeit aber nicht »am Rande« der Gravisphären angebracht, sondern im Innern, wenn sich der Raumflugkörper möglichst nahe am jeweiligen Planeten aufhält. Beim Ausgangsplaneten geschieht der »Anfangskick« deshalb schon beim Start von der Parkbahn aus, beim Zielplaneten erfolgt der »Endkick« erst beim Einschwenken in die gewünschte Umlaufbahn. Dieses Vorgehen ist äußerst wichtig im Hinblick auf einen minimalen Energieaufwand und sei deshalb am Beispiel des Übergangs aus einer 200 Kilometer hohen Erdumlaufbahn in eine Hohmann-Transferbahn zum Mars noch näher erläutert.

Damit ein Raumfahrzeug aus der Erdbahn gerade bis zur Marsbahn aufsteigen kann, wird am Rande der Erdgravisphäre eine um 2.94 km/s höhere Geschwindigkeit benötigt als die 29.79 km/s, mit der die Erde um die Sonne kreist. Um das Objekt aber an die Grenze der Gravisphäre zu bringen, müsste es in der Parkbahn

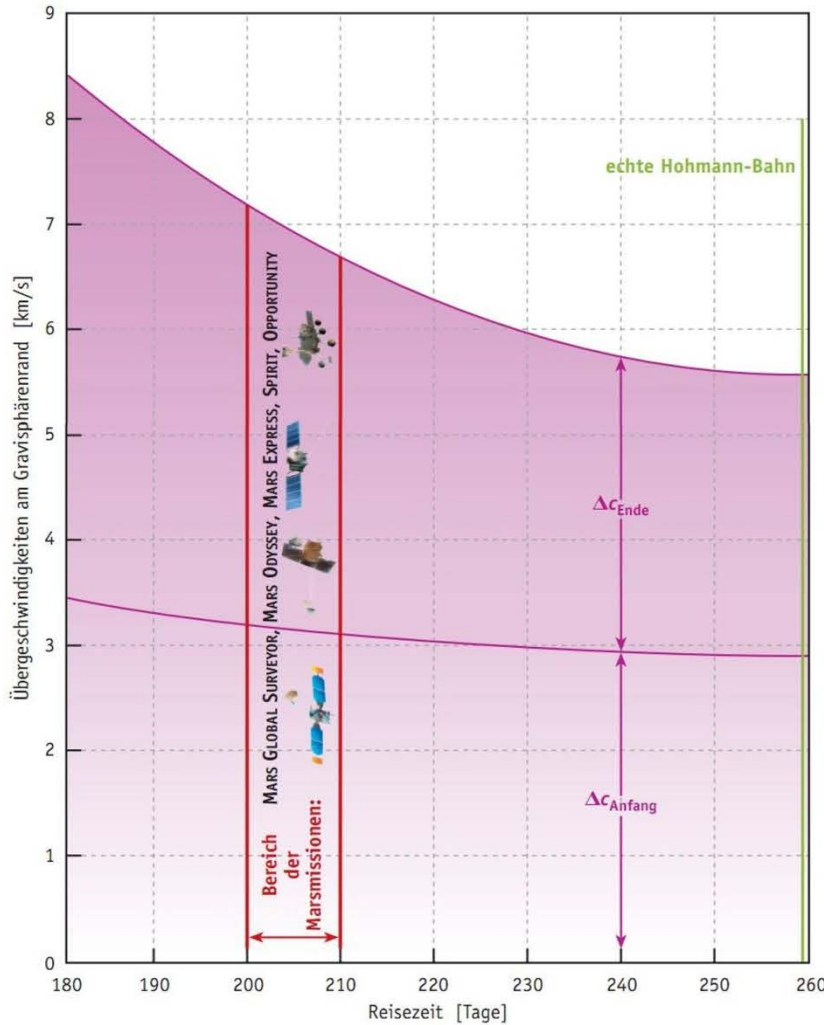


Abb. 2: Antriebsbedarf für den Marstransfer in Abhängigkeit der Flugdauer.

digkeit gerade der Differenz zwischen den sonnenbezogenen Geschwindigkeiten von Transfer- und Umlaufbahn entsprechen. Diese Randbedingungen bestimmen die Geschwindigkeit und den Winkel beim Abschuss aus der Parkbahn.

Analoge Überlegungen gelten auch bei der Ankunft am Zielplaneten. Beim Eintauchen in die planetare Gravisphäre von einer echten Hohmann-Übergangsbahn aus verläuft die Asymptote der »Abstiegshyperbel« automatisch tangential zur Umlaufbahn des Zielplaneten. Auch die Übergeschwindigkeit ist gleich dem heliozentrischen Geschwindigkeitsunterschied von Hohmann-Ellipse und Planetenbahn.

Durch eine minimale Lagekorrektur wird sichergestellt, dass das Raumfahrzeug einen Kurs einhält, der in einem gewünschten Abstand am Planeten vorbeiführen würde. Dann erfolgt erst an der Stelle der größten Annäherung ein »Bremskick, U_z «, welcher eine bestimmte, beabsichtigte Umlaufbahn um den Zielplaneten bewirkt. Ohne diesen Kick würde sich sonst automatisch ein Swing-by ergeben.

Modifizierte Hohmann-Bahnen in der Praxis

Ein großer Nachteil der echten Hohmann-Bahn im interplanetaren Einsatz ist ihre relativ lange Flugzeit. Besonders langsam bewegt sich der Flugkörper in der Nähe des Aphels. Es liegt nun nahe zu versuchen, bei gleich bleibendem Perihel die große Halbachse der Transferellipse etwas zu vergrößern, wodurch ihr Aphel außerhalb der äußeren Planetenbahn zu liegen kommt. Dadurch schneidet die Planetenbahn den langsamsten Teil der Transferbahn effektiv ab, wobei die Flugzeit zwischen Perihel und dem Schnittpunkt mit der äußeren Planetenbahn deutlich verkürzt werden kann. Selbstverständlich erfordert dies eine größere Antriebsenergie als bei der echten Hohmann-Bahn, weil sowohl im Perihel als auch im äußeren Bahnschnittpunkt die notwendigen Geschwindigkeitsanpassungen größer sind. Bei mäßiger Erhöhung des Aphels bleibt dieser Mehraufwand im Vergleich zum erzielten Zeitgewinn jedoch noch relativ klein.

Am Beispiel des Fluges zum Mars zeigt Abb. 2 wie die als Maß für den Antriebsbedarf geltenden Geschwindigkeiten am Rande der Gravisphären von Erde und Mars von der Reisezeit abhängen. In letzter Zeit benutzten etliche Marsmissionen, wie MARS EXPRESS, SPIRIT und OPPORTUNI-

zeichner Schubimpuls durch ein bord-eigenes Triebwerk nötig ist.

Dieser bewirkt einerseits eine Drehung der Bahnebene in die Äquatorebene und beschleunigt den Satelliten andererseits auf die erforderliche Kreisbahngeschwindigkeit von 3.1 km/s. Von nun an befindet er sich im so genannten Geosynchronen Equatorial Orbit (GEO), wo er über einem bestimmten Ort am Äquator still zu stehen scheint. Der GTO erfüllt damit die klassische Vorstellung vom effizientesten Zweiimpulsübergang mittels einer halb-elliptischen Bahn.

Bei interplanetaren Missionen ist die Situation durch den erwähnten Einfluss der planeteneigenen Schwerfelder etwas komplizierter. Abb. 1 zeigt, wie eine vollständige Transferbahn zwischen zwei Planeten in drei Abschnitte unterteilt werden muss: Zunächst fliegt das Raumfahrzeug nach dem Start aus der Parkbahn für kurze Zeit im Kraftfeld des Ausgangsplaneten, bis es dessen Gravisphäre verlässt. Danach befindet es sich auf der vergleichsweise sehr viel Zeit benötigten Sonnenumlaufbahn, be-

vor es schließlich auf die Gravisphäre des Zielplaneten trifft. Ab da bewegt sich das Raumfahrzeug wiederum nur kurzzeitig in dessen Schwerfeld, bis entweder eine Landung vollzogen oder eine Umlaufbahn erreicht ist.

Der Hauptabschnitt der Trajektorie besteht also aus der Sonnenumlaufbahn und stellt bei optimalem Verlauf die erwähnte Hohmann-Ellipse dar. Innerhalb der planetaren Gravisphären jedoch beschreiben die Flugbahnen Hyperbelstücke. Beim Start nennt man diese Bahn die »Fluchthyperbel«, die durch den Schubkick aus der Parkbahn erzeugt wird. In großer Entfernung vom Ausgangsplaneten – theoretisch unendlich weit, praktisch aber schon beim Verlassen der Gravisphäre – bewegt sich das Raumfahrzeug entlang einer Asymptote der Fluchthyperbel.

Damit anschließend im heliozentrischen Bezugssystem eine Hohmann-Ellipse entsteht, muss diese Asymptote tangential zur Umlaufbahn des Ausgangsplaneten um die Sonne verlaufen. Ferner muss die hyperbolische Übergeschwin-

ty (vgl. SuW 2/2004, S. 17, SuW 3/2004, S. 22, SuW 4/2005, S. 26, SuW 5/2004, S. 36), verkürzte Transferbahnen mit Flugzeiten um 200 bis 210 Tagen an Stelle einer 259 Tage dauernden idealen Hohmann-Bahn.

Die Änderung der Bahnebene

Bei interplanetaren Transferbahnen ist eine Winkeländerung der Bahnebene kaum ein Thema, da die Umlaufebenen aller Planeten (mit Ausnahme von Pluto und Merkur) nur sehr wenig gegeneinander geneigt sind. Eventuelle Querkomponenten der Schubimpulse für diesbezügliche Bahnanpassungen sind deshalb immer relativ klein. Dies ändert sich jedoch drastisch, wenn Umlaufbahnen um einzelne Planeten – insbesondere auch der Erde – betrachtet werden, deren Ebene aus irgend welchen Gründen stark gedreht werden muss.

Typische Beispiele dafür sind die bei Erdsatelliten notwendige Veränderung der Umlaufrichtung nach dem Start in eine Ebene für äquatoriale oder polare Erdumkreisung etc. Bei den reinen Hohmann-Bahnen bewirken die oben erwähnten Schubimpulse keine Richtungsänderung, sondern lediglich eine Verlängerung oder Verkürzung des Geschwindigkeitsvektors.

Im Gegensatz dazu muss bei Anpassungen des Neigungswinkels der Bahnebene dieser Vektor als Ganzes auch noch gedreht werden. Dies hat zur Folge, dass für jede gegebene Winkeländerung die Länge des Korrekturvektors direkt proportional dem vollen Geschwindigkeitsbetrag ist. Es ist deshalb klar, dass größere Drehungen der Bahnebene durchweg bei möglichst niedriger Geschwindigkeit durchgeführt werden müssen. Für diesen Zweck eignen sich deshalb die Apozentren von Ellipsenbahnen hoher Exzentrizität besonders gut. Wenn also eine Kreisbahn um einen größeren Winkel energiesparend in eine andere Ebene gedreht werden soll, ist es sinnvoll, diese zuerst in eine Ellipse umzuformen, in deren Apozentrum die Drehung vorzunehmen und nachher die ursprüngliche Kreisform in der neuen Ebene wieder herzustellen.

Dieses Vorgehen wird Dreiimpulsmethode genannt. Dabei wird ein Satellit mit einem ersten Raketen-»Kick« aus dem ursprünglichen Orbit in eine Hohmann-Ellipse befördert. Im höchsten Punkt erzeugt ein zweiter »Kick« quer zur Flugrichtung die gewünschte Richtungsänderung, worauf der Rückflug entlang der Hohmann-Bahn in einer neuen Ebene verläuft. Am Ende sorgt ein Bremsimpuls (dritter »Kick«) im Perizentrum für die gewünschte Form der endgültigen Umlaufbahn.

Berechnungsmöglichkeiten

Die oben beschriebene stückweise Zusammensetzung interplanetarer Übergangsbahnen aus Kegelschnittkurven beruht auf der Basis des Zweikörperproblems und ist deshalb einer mathematischen Behandlung mit einfachen algebraischen Formeln gut zugänglich. Eine entsprechende Zusammenstellung von theoretischen Ergänzungen zu diesem Aufsatz findet sich im Internet unter: www.wissenschaft-schulen.de. Bitte anklicken: »Materialien Sterne und Weltraum«, »Elementare Grundlagen für Hohmann-Transferbahnen«

Andere Niedrigenergie-Bahnen

Abschließend muss noch darauf hingewiesen werden, dass in den letzten zwei Jahrzehnten in der Raumfahrt Trajektorien zwischen Himmelskörpern studiert und teilweise schon angewendet wurden, die unter gewissen Bedingungen energetisch noch weit günstiger sind als Hohmann-Bahnen. Diese stellen aber Lösungen des kosmischen Mehrkörperproblems dar und sind nicht mehr durch geschlossene Formeln beschreibbar. Sie müssen von Fall zu Fall durch aufwändige numerische Computerberechnungen gefunden werden, bei denen der simultane Einfluss mehrerer Himmelskörper über die Zeit laufend berücksichtigt wird.

Ein großer Nachteil sind die meist enorm langen Flugzeiten, da solche Bahnen sich oft als sehr verschlungen und weitläufig herausstellen. Deswegen können sie für bemannte Missionen nie in Frage kommen, auch wenn nur sehr wenig Antriebsenergie benötigt wird. Zum tieferen Verständnis ihres Verlaufs sind Kenntnisse in den Spezialgebieten Dynamische Systemanalyse und Chaostheorie erforderlich. Die amerikanische Kometensonde ISEE-3/ICE war eine der ersten Missionen, bei der diese alternative Flugbahntechnik zur Anwendung gelangte (im Internet siehe z. B. http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/image/isee3_traj.jpg). □



Donald Wiss studierte Maschinenbau an der ETH Zürich und arbeitete anschließend einige Jahre für die Firmen Boeing und Rohr Industries in den USA. Nach seiner Rückkehr in die Schweiz war er bis zur

Pensionierung im Jahre 2001 im Forschungszentrum der Firma Sulzer als Experte für numerische Strömungssimulationen in Turbomaschinen tätig. Heute beschäftigt er sich freischaffend mit Bahnberechnungen von Raumflugkörpern.

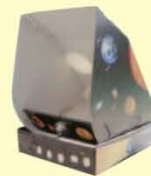
Science & Fun im Science-Shop



Der Sonnenprojektor

Mit seinem handlichen Format von nur 200 x 250 x 250 mm und seinem bequemen Einblick, recht winklig zum Lichteinfall, verspricht der Sonnenprojektor gefahrloses Beobachtungsvergnügen. Die Optik besteht aus einem

zweilinsigen Glas-Achromaten mit 30 mm Durchmesser und 250 mm Brennweite, der in 5 Stufen bis auf 12 mm abgeblendet werden kann, einer Wechseloptik mit 2 Konkavspiegeln mit 10 bzw. 14 mm Brennweite und einem Planspiegel aus Acrylglas. *Vorgestanzter Kartonbausatz für ein Sonnen-Projektionsgerät zur gefahrlosen Sonnenbeobachtung.* Bestell-Nr. 1709. € 19,90



Solarscope

Ein preiswertes Teleskop zur Sonnenbeobachtung im Projektionsverfahren. Beobachter Sie Sonnenflecken, Venustran- und Finsternisse. Eine hochwertige Optik (Öffnungsblende 40 mm) in Kombination mit stabiler Kartonbauweise ermöglicht puren Beobachtungsgenuss.

Format: 370 x 260 x 410 mm. Bestell-Nr. 1676. € 49

Solarscope Ausbildungsversion

Daran können bis zu 7 Beobachter gleichzeitig arbeiten. Es enthält zusätzlich eine Messschablone und ein Bleilot.

Format: 380 x 450 x 600 mm. Best-Nr- 1677. € 84,-



EVERlight XXL

Die Taschenlampe EVERlight benötigt keine Batterien oder Akku und ist extrem benutzerfreundlich. Sie schütteln einfach die Taschenlampe eine halbe Minute waagrecht und haben ca. 8 Minuten einen kräftigen Lichtstrahl dank LED-Birne. *Wasserdicht, stoßfest und rostfrei; 280 mm lang, 330 g schwer.* Bestell-Nr. 1672. € 34,90



Magnetschwebeglobus

Durch einen Magnetsensor wird der Schwebeglobus in einem Schwebezustand gehalten.

Farbe: silbermetalllic, Ø 100 mm, mit Netzstecker. Bestell-Nr. 1668. € 39,-



Science-Shop.de

vor allem Wissen

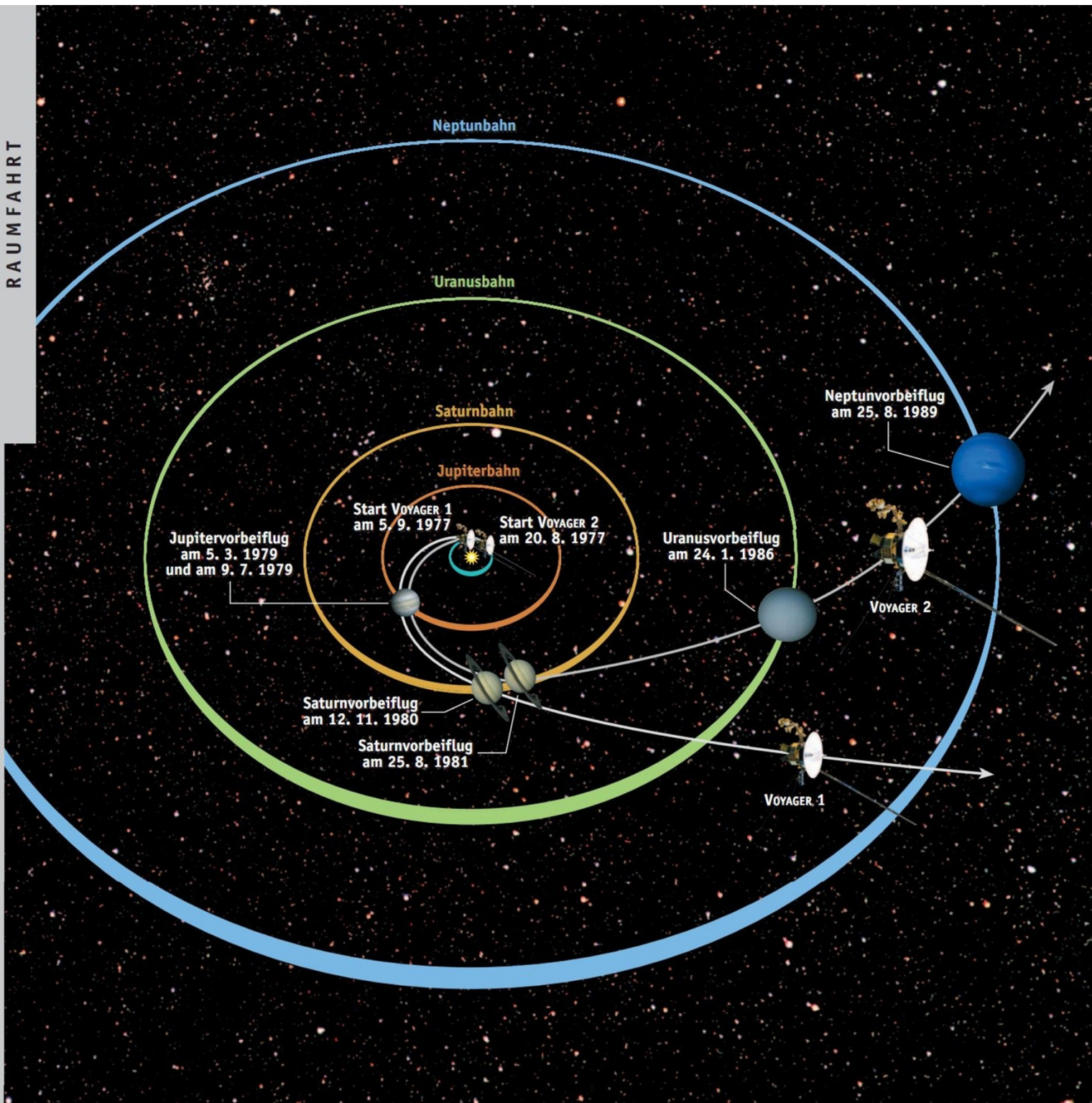
Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ telefonisch 06221/9126

→ per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de

→ per Fax: 06221/9126



Swing-by-Manöver – Was steckt dahinter?

Zahlreiche Raumsonden machen zur Erfüllung ihrer Aufgaben von der Gravitationsumlenkung durch nahe Vorbeiflüge an Planeten Gebrauch. Mit dieser Technik können Raumsonden ihre Flugbahn im Sonnensystem ohne eigenen Energieaufwand so verändern, dass nacheinander Himmelskörper angefliegen werden können, die sich auf völlig verschiedenen Bahnen bewegen.

VON DONALD WISS

4.7 Kosmische Objekte

Zu den bisher noch nicht besprochenen kosmischen Objekten des Sonnensystems gehören **Asteroiden**, die sich hauptsächlich im Asteroidengürtel, aber auch außerhalb dessen befinden, **Meteorite**, Kometen aus der Oort'schen Wolke und dem Kuipergürtel und **Zwergplaneten**, zu denen seit 2006 auch der vormalig neunte Planet Pluto gehört. Einen Ausblick und Abrundung des Themenblocks *Sonnensystem* geben die extrasolaren Planeten (**Exoplaneten**), die ein neues Forschungsgebiet bilden.

Die Präsentation jeder Gruppe soll enthalten:

- durchdachte Reihenfolge der Teilthemen
- kurzer, anschaulicher Eintrag mit den wichtigsten Inhalten (diese sind an den zu behandelnden Fragen orientiert)
- graphische Skizzen, wenn hilfreich

Einige Texte enthalten Passagen, die nicht beim ersten Lesen verstanden werden. Jedoch haben die Schüler in Gruppen die Möglichkeit über diese Inhalte zu sprechen und diese sich gegenseitig nahezubringen.

Motivation

Auch das Hineindenken in komplexere Sachverhalte gehört zu den Fähigkeiten eines Abiturienten. Vor allem bei bisher nicht bekannten Themen wie „Kirkwood-Lücken“, „Bahnresonanzen“ oder der englischen Definition vom Begriff Planet ist es wichtig, dass Themen sorgfältig durchdacht und verstanden werden.

Richt-, Grob- und Feinziele

Diese Doppelstunde soll den Schülern einen Überblick über die verbleibenden Objekte des Sonnensystems geben, die neben der Sonne – diese wird in einem weiteren Themenblock⁴⁸ ausführlich beschrieben – und den acht Planeten existieren.

Didaktisches Ziel dieser Stunde ist es den Schülern folgende Kompetenzen nahezubringen:

- Hineinarbeiten in ein unbekanntes Thema
- Durchdenken schwieriger Inhalte
- Soziale Interaktion mit Mitschülern
- Übersetzung englischer Texte
- Vorbereitung und Halten einer Präsentation (nur mittels der vorliegenden Materialien)

⁴⁸ [LP PH12] Themenblock 3: die Sonne

Schüler sollen dabei (Grobziele)

- in Gruppenarbeit einen Text analysieren.
- diesen Text so verstehen, um aus ihm eine Kurzpräsentation machen zu können.
- die Arbeit in der Gruppe möglichst effektiv erledigen.
- einen Eintrag erstellen und anschließend
- diese Präsentation vor der ganzen Klasse vortragen.

Dabei sollen die Schüler

- einen Überblick über die verschiedenen Objekte des Sonnensystems bekommen.
- erfahren, wie diese klassifiziert worden sind.
- erkennen, dass diese Objekte aus unterschiedlichen Materialien bestehen, unterschiedlich alt sind und aus verschiedenen Regionen des Sonnensystems stammen.
- erfahren, welche Wechselwirkungen diese Objekte zu den Planeten haben (Meteorschauer, Trojaner bzgl. Jupiter oder Kometen in Sonnennähe).

Lernvoraussetzung

Für das Gelingen dieser Gruppe ist Gruppenarbeit wichtig. Die Schüler müssen in den einzelnen Gruppen einen längeren Text lesen. Dabei können sie auch die einzelnen Abschnitte untereinander aufteilen. Ebenso sollen Schüler Präsentationen erstellen und halten können.

Unterrichtsverlauf

Diese Stunde läuft in Gruppenarbeit ab. Der thematische Gang ist dabei laut Hilbert Meyer der „aus verschiedenen Ecken kommende, vernetzte Gang mit Zusammenführung“⁴⁹.

Nach der Frage, welche kosmischen Objekte sich im Sonnensystem befinden, lesen die Schüler in Gruppen jeweils einen Text und erstellen aufbauend auf den gestellten Fragen eine kurze Präsentation von circa 5-10 Minuten. Für das Durchlesen, Beantworten der Fragen und die Erstellung der Präsentation haben sie circa 45 Minuten Zeit.

In der darauffolgenden Stunde werden die Präsentationen vorgestellt. Dabei können die Gruppen entscheiden, ob sie das Thema alleine, zu zweit oder als ganze Gruppe vorstellen, jedoch sollte JEDER Schüler aus der Gruppe an der Erstellung des Referats beteiligt sein. Möglich ist auch, dass jeder „Experte“ sein behandeltes Thema bzw. seine beantwortete Frage vorstellt.

⁴⁹ Siehe 3.1

Unterrichtsmaterial

Das Unterrichtsmaterial dieser Stunde besteht aus:

- Stundenmatrix S. 80
- Sachtexten mit Arbeitsaufträgen
 - Asteroiden S. 81
 - Meteoriten S. 85
 - Kometen S. 89
 - Zwergplaneten und Exoplaneten S. 94
 - Terrestrische Planeten S. 100
- Musterlösungen zu den Sachtexten
 - Asteroiden S. 105
 - Meteoriten S. 107
 - Kometen S. 110
 - Zwergplaneten und Exoplaneten S. 112
 - Terrestrische Planeten S. 114

Ebenso ist ein englischsprachiges Wörterbuch für die Übersetzung des Textes „Definition of a Planet“ hilfreich.

Stundematrix - „Kosmische Objekte“

Zeit	Unterrichtsschritt	Lehrerverhalten	Schülerverhalten	Sozialform	Medien	Did. Kommentar
5	Motivation Frage nach kosmische Objekten	Fragestellung nach weiteren kosmischen Objekten des Sonnensystems, die bisher nicht besprochen wurden.	Schüler überlegen sich, welche Objekte im Sonnensystem existieren.	SLG		Was genau diese Objekte sind, soll hier nicht vertieft werden.
5	Erarbeitung I Aufgabenstellung	Lehrer erklärt die Erstellung der Präsentation.	Aufteilung in verschiedene Gruppen	Lehrervortrag		
35	Erarbeitung II Vorbereitung der Präsentation	Hilfestellung bei Fragen	Schüler erarbeiten selbstständig in Gruppen ein vorgegebenes Thema.	Gruppenarbeit	Texte	
40	Festigung Vortrag der erstellen Präsentationen		Schüler tragen in Gruppen ihre Kurzpräsentation vor und schreiben einen kurzen Eintrag an die Tafel/OHP.	Präsentation	Heft, Tafel, OHP	Die Form der Präsentation ist den Schülern selber überlassen.
Restliche Zeit		Klärung möglicher Fragen		SLG		

Asteroiden

Was sind Asteroiden? ⁵⁰

Asteroiden sind mit bloßem Auge praktisch nicht zu sehen und wurden nach der Erfindung des Teleskops noch 200 Jahre lang übersehen. Die ersten Asteroiden wurden erst vor 200 Jahren entdeckt. Es dauerte nochmal 50 Jahre, bis die ersten zehn bekannt waren. Heutzutage können leistungsfähige Teleskope in nur einer Nacht weit mehr aufspüren. Über 400 000 sind bereits katalogisiert worden. Asteroiden lassen sich auf Teleskopbildern erkennen, weil sie sich schon nach kurzer Zeit gegenüber den Sternen deutlich bewegt haben. (Abb. 1) [...]

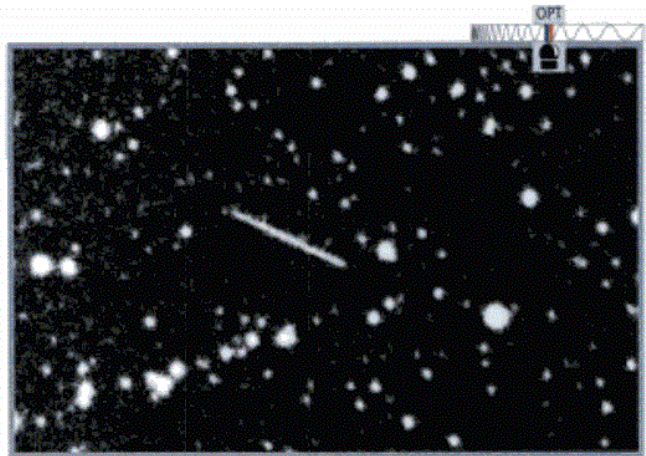


Abb. 1: In dieser Langzeitaufnahme sind Sterne als weiße Punkte erkennbar, während sich die Bewegung eines Asteroiden relativ zu den Sternen als kurzer Strich zeigt.

Größe, Anzahl und Formen von Asteroiden ⁵¹

Asteroiden haben sehr unterschiedliche Abmessungen. Der größte, Ceres, hat einen Durchmesser von 1000 Kilometern, also knapp ein Drittel des Monddurchmessers. Etwa ein Dutzend andere sind so groß, dass man sie als mittelgroße Monde einstufen könnte, wenn sie einen Planeten umkreisen würden. Kleinere Asteroiden sind jedoch viel häufiger. Es gibt schätzungsweise mehr als eine Million Asteroiden mit einem Durchmesser von über einem Kilometer und noch viel mehr noch kleinere. Trotz der großen Anzahl ist die Summe der Massen aller Asteroiden nicht allzu groß. Wenn wir alle Asteroiden zusammensetzen könnten und es der Gravitation so ermöglichen, sie zu einer Kugel zu komprimieren, würde ein Himmelskörper von unter 2000 Kilometern Durchmesser entstehen – viel kleiner als unser Mond. (Abb. 2) [...]

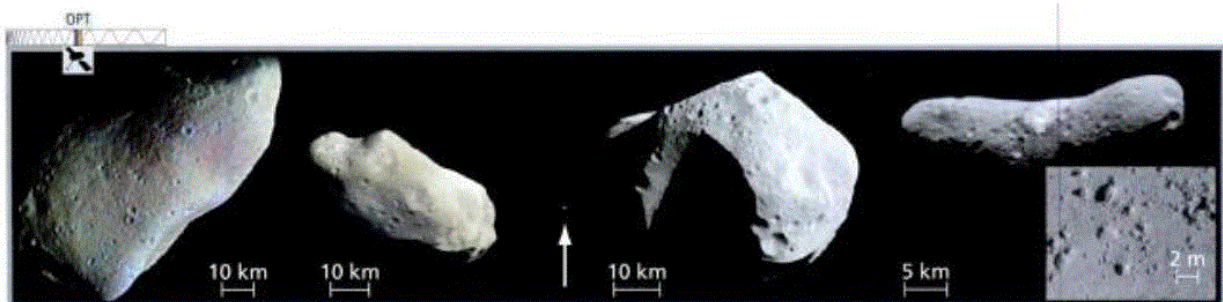


Abb. 2: Nahaufnahmen von den Asteroiden Gaspra, Ida, Mathilde und Eros.

Die Form der Asteroiden hängt von der Stärke ihrer Schwerkraft ab. Ist ein Asteroid relativ groß, kann die Schwerkraft das Gestein zu einer Kugel formen. Doch nur Ceres ist groß genug, damit die Schwerkraft ihr in etwa kugelförmige Gestalt gegeben hat – Ceres ist deshalb ein Zwergplanet. [...]

⁵⁰ [Bennett] S. 510

⁵¹ [Bennett] S. 511

Zusammensetzung der Asteroiden ⁵²

Die Analyse des Lichtes verrät uns auch etwas über die Zusammensetzung der Asteroiden. Wie erwähnt, enthalten die Spektren ferner Himmelskörper Spektrallinien, die wie „Fingerabdrücke“ ihre chemischen Bestandteile verraten. Tausende von Asteroiden sind mittels Spektroskopie untersucht worden. Die Ergebnisse stimmen mit dem überein, was wir aus unserer Theorie der Entstehung des Sonnensystems erwarten. Asteroiden bestehen zum größten Teil aus Metall und Gesteinen, denn sie haben sich innerhalb der Frostgrenze im solaren Urnebel gebildet. Diejenigen, die an den Außenrändern des Asteroidengürtels entstanden sind, enthalten größere Mengen eines dunklen kohlenstoffreichen Materials, das bei den relativ kühlen Temperaturen in diesem Bereich des solaren Urnebels, nicht aber in den sonnennäheren Gebieten auskondensieren konnte, einige enthalten sogar geringe Anteile an Wasser, sie müssen sich also in der Nähe der Frostgrenze gebildet haben. [...]

Umlaufbahnen von Asteroiden ⁵³

Der größte Teil der katalogisierten Asteroiden befindet sich im Asteroidengürtel zwischen den Umlaufbahnen des Mars und des Jupiters. Alle Asteroiden kreisen in derselben Richtung um die Sonne wie die Planeten, allerdings sind ihre Umlaufbahnen elliptischer und stärker gegen die Ekliptik geneigt als bei den Planeten (etwa um 20° bis 30°).

Science-Fiction-Filme zeigen den Asteroidengürtel oft als einen dicht gefüllten und gefährlichen Ort, dabei ist der Asteroidengürtel so groß, dass seine hunderttausende Asteroiden sehr weit voneinander entfernt sind. Die mittlere Entfernung zwischen den Mitgliedern des Asteroidengürtels beträgt einige Millionen Kilometer. In einem maßstabsgetreuen System, in dem die Asteroiden so groß wie Sandkörner wären, wären sie einige Kilometer voneinander entfernt.

Nicht alle Asteroiden befinden sich im Asteroidengürtel. Zwei Gruppen von Asteroiden, deren Mitglieder als *Trojaner* bezeichnet werden (wie in der griechischen Geschichte des Trojanischen Kriegs), bewegen sich auf annähernd derselben zwölfjährigen Umlaufbahn um die Sonne wie Jupiter. Wie in Abb. 3 erkennbar, eilt eine Gruppe der Trojaner dem Planeten in der Umlaufbahn immer in einem Winkelabstand von 60° voraus, die andere folgt ihm in einem Abstand von 60°. (Begründung: Diese Objekte befinden sich in den sog. Lagrange-Punkten. In diesen festen Punkten sind die Körper kräftefrei, d.h. ohne Gravitations- oder Zentrifugalkraft.) [...]

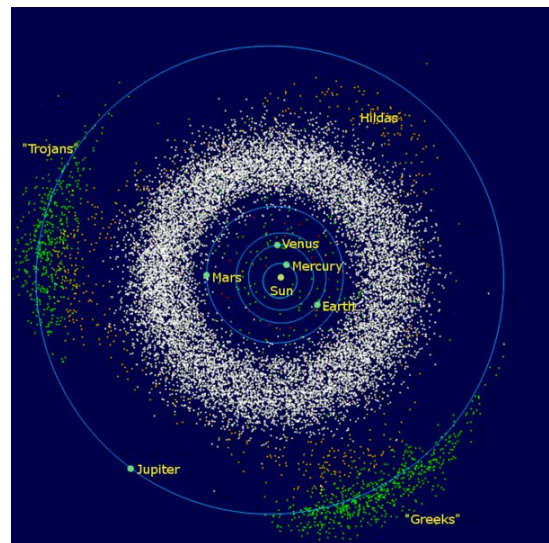


Abb. 3: Überblick über Asteroidengürtel

Eine relativ kleine Zahl der Asteroiden hat Umlaufbahnen, die bis in das innere Sonnensystem hineinreichen – darunter auch diejenigen, die als *erdnahe Asteroiden* (Near-Earth-Asteroids) bezeichnet werden, weil sie die Erdumlaufbahn tangieren oder kreuzen. Diese Asteroiden sind möglicherweise „zukünftige Einschläge“. Viele Asteroiden mit ähnlichen Umlaufbahnen müssen in der Vergangenheit mit unserem Planeten zusammengestoßen sein. [...]

⁵² [Bennett] S.512

⁵³ [Bennett] S.513 f

Warum gibt es einen Asteroidengürtel? ⁵⁴

Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter trägt seinen Namen, weil wir in diesem Gebiet die meisten Asteroiden finden. Warum sind dort aber so viele Asteroiden versammelt und warum hat sich dort kein vollständiger Planet gebildet? Die Antworten liegen in den Bahnresonanzen, [...] Bahnresonanzen treten auf, wenn zwei Himmelskörper in regelmäßigen Zeitabständen auf einer Linie (zusammen mit ihrem Zentralobjekt) zu liegen kommen. Weil die Schwerkraft bei dieser Anordnung die Körper immer wieder in dieselbe Richtung „schubst“, kann sich der Effekt im Laufe der Zeit immer mehr verstärken, genau wie ein Kind auf einer Schaukel durch gleichmäßige, aber geringe Stöße eine große Höhe erreichen kann. Himmelskörper ordnen sich immer dann periodisch auf einer Linie an – und befinden sich damit in einer Bahnresonanz – wenn die Umlaufzeit des einen Körpers ein Vielfaches der Umlaufzeit des anderen Körpers ist, etwa 1:2, 1:4 oder 2:5.

Im Asteroidengürtel treten Bahnresonanzen zwischen Asteroiden und Jupiter auf, dem bei weitem massenreichsten Planeten. Diese Resonanzen wirken so, dass Lücken im Asteroidengürtel geöffnet werden, [...] Benötigt beispielsweise ein Asteroid sechs Jahre für einen Umlauf um die Sonne – also die Hälfte der zwölfjährigen Umlaufzeit des Jupiters – dann erhält er alle zwölf Jahre denselben gravitativen Stoß durch Jupiter und wird daher bald seine Umlaufbahn verlassen. Dasselbe gilt für Asteroiden mit Umlaufbahnen von vier Jahren (1:3 Resonanz mit der Jupiterumlafbahn) und drei Jahren (1:4 Resonanz mit der Jupiterumlafbahn). [...] Das Ergebnis dieser Bahnresonanzen wird in einem Graphen erkennbar, in dem die Anzahl der Asteroiden mit einer bestimmten Bahnperiode gegen die Umlaufzeit aufgetragen wird. (Abb. 4) Beachten Sie beispielsweise das Fehlen von Asteroiden, deren Umlaufzeit genau die Hälfte, ein Drittel oder ein Viertel der Jupiterumlaufzeit beträgt – das sind Werte, bei denen die Schwerkraft des Jupiters Lücken im Asteroidengürtel verursacht hat. (Diese Lücken werden nach ihrem Entdecker, dem amerikanischen Astronomen Daniel Kirkwood (1814 – 1895), oft als *Kirkwood-Lücken* bezeichnet.)

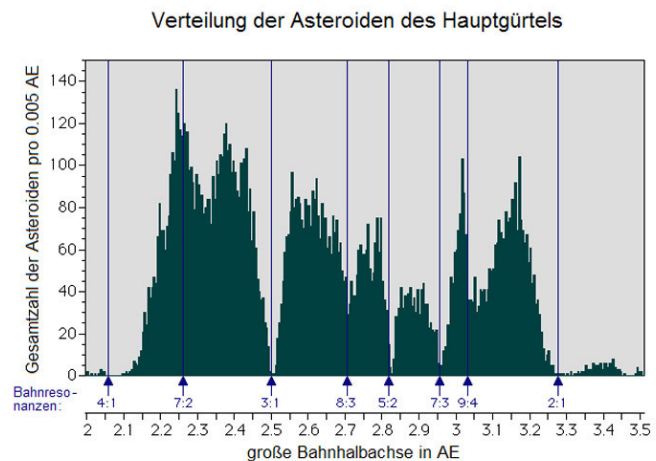


Abb. 4: Anzahl der Asteroiden bei unterschiedlichen Umlaufzeiten, die verschiedenen mittleren Entfernungen von der Sonne entsprechen

Die Bahnresonanzen mit Jupiter erklären vermutlich auch, warum sich niemals ein Planet zwischen Mars und Jupiter gebildet hat. Als das Sonnensystem entstand, waren in diesem Gebiet des solaren Urnebels vermutlich genügend Felsbrocken enthalten, um einen weiteren Planeten von der Größe des Mars oder der Erde zu bilden. Die Resonanzen mit dem jungen Planeten Jupiter haben jedoch die Umlaufbahnen der Planetesimale in dieser Region gestört und so verhindert, dass sie sich zu einem vollständigen Planeten zusammenlagern konnten. Im Verlauf der folgenden 4,5 Milliarden Jahre haben die ständigen Störungen mögliche Teile eines „unfertigen Planeten“ aus dem Asteroidengürtel hinausgeschleudert. Nachdem diese Brocken aus dem Asteroidengürtel entfernt worden waren, schlugen sie auf einem Mond oder einem Planeten auf oder wurden ganz aus dem Sonnensystem hinausgeschleudert. Der Asteroidengürtel hat dadurch einen Großteil seiner ursprünglichen Masse verloren, was erklärt, warum die Gesamtmasse der Asteroiden nun geringer ist als die eines terrestrischen Planeten.

⁵⁴ [Bennett] S.514 ff

Arbeitsauftrag

Erstellen Sie eine **Kurzpräsentation** zum Thema „Asteroiden“.

Gehen Sie dabei auf folgende **Fragen** ein:

- a. Wann und wie wurden die ersten Asteroiden entdeckt?
- b. Wie sind Asteroiden aufgebaut? (Größe, Anzahl, Erscheinen)
- c. Wie sind Asteroiden entstanden?
- d. Wie ist der Asteroidengürtel aufgebaut?
- e. Welche Rolle spielt Jupiter für die Asteroiden?

Die Kurzpräsentation soll die Inhalte der behandelten Fragen widerspiegeln.

Meteorite

Der Unterschied zwischen Meteoren und Meteoriten ⁵⁵

[...] Im täglichen Gebrauch verwenden Menschen die Begriffe *Meteorit* und *Meteor* als Synonyme. Genau genommen bedeuten sie aber etwas Unterschiedliches. Ein **Meteor** – das griechische Wort bedeutet „Ding in der Luft“ – ist nur ein Lichtblitz, der durch ein mit hoher Geschwindigkeit in unsere Atmosphäre eintretendes Teilchen hervorgerufen wird, aber nicht das Teilchen selbst. Meteore werden oft als *Sternschnuppen* oder *fallende Sterne* bezeichnet, weil die Menschen früher dachten, es würde sich tatsächlich um vom Himmel stürzende Sterne handeln. Der größte Teil der Teilchen, die Meteore hervorrufen, sind nicht größer als eine Erbse. Sie verglühen vollständig, bevor sie den Boden erreichen können. Nur in seltenen Fällen wird ein Meteor durch einen Felsbrocken verursacht, der so groß ist, dass er den Sturz durch die Atmosphäre übersteht und als *Meteorit* am Boden auftritt. Ein Meteorit ist also ein richtiger Stein, der zu Boden gestürzt ist. (Das Wort *Meteorit* bedeutet „mit Meteoren zusammenhängend“.) Felsbrocken, die groß genug sind, um Meteorite zu hinterlassen, rufen ungewöhnlich helle Meteore hervor, die beim Sturz durch die Atmosphäre als *Feuerbälle* bezeichnet werden. Beobachter können durch Verfolgen der Flugbahnen von Feuerbällen jedes Jahr mehrere Meteorite auffinden. Auf diese Weise aufgefundene Meteorite sind für die Wissenschaft von besonderem Interesse, weil wir ihre Flugbahnen zurückverfolgen und so genau herausfinden können, woher sie stammen. [...]

Meteoritenfälle ⁵⁶

[...] Meteorite werden bei ihrem feurigen Sturz durch unsere Atmosphäre oft zersprengt und zerstreuen ihre Bruchstücke über ein Gebiet von mehreren Kilometern Durchmesser. [...] Meteorite sind üblicherweise von einer dunklen, narbigen Kruste bedeckt (Abb. 1), die von ihrem feurigen Abstieg durch die Atmosphäre herrührt. Einige haben einen ungewöhnlich hohen Metallgehalt, [...]. Meteorite enthalten oft Elemente wie Iridium, die im irdischen Gestein sehr selten sind, und selbst häufige Elemente weisen in Meteoriten oft andere Isotopenverhältnisse auf als auf der Erde.



Abb. 1: die dunkle zernarbte Oberfläche des Ahnighito-Meteorit geht auf den feurigen Sturz durch die Erdatmosphäre zurück.

Typen von Meteoriten

Der genaue Ursprung der Meteorite war lange ein Rätsel, doch in den letzten Jahrzehnten ist es gelungen herauszufinden, in welchen Gebieten des Sonnensystems sie entstanden sein müssen. Direkte Hinweise haben die relativ wenigen Meteorite gegeben, deren Flugbahnen beobachtet oder gefilmt werden konnten, während sie zu Boden stürzten. In all diesen Fällen stammen die Meteorite

⁵⁵ [Bennett] S.516

⁵⁶ [Bennett] S.516ff

eindeutig aus dem Asteroidengürtel. Genauere Analysen tausender Meteorite zeigen, dass es zwei unterschiedliche Haupttypen gibt, die jeweils in zwei Untergruppen gegliedert werden können:

1. **Primitive Meteorite** (Abb. 2) heißen primitiv, weil sie die erste (primäre) Art von Meteoriten sind, die sich gebildet hatte. Radiometrischer Altersbestimmung zufolge sind sie etwa 4,6 Milliarden Jahre alt. Damit sind sie Überbleibsel der Geburt des Sonnensystems und haben sich seit ihrer Bildung im solaren Urnebel praktisch nicht verändert. Primitive Meteorite haben zwei Unterarten.
 - a. *Primitive Steinmeteorite* bestehen aus Gesteinsmineralien, die mit geringen, aber feststellbaren Anteilen reiner Metallkörper vermischt sind.
 - b. *Primitive kohlenstoffreiche Meteorite* ähneln im Allgemeinen den primitiven Steinmeteoriten, enthalten aber zusätzlich erhebliche Mengen von Kohlenstoffverbindungen. Einige kohlenstoffreiche Meteorite enthalten sogar geringe Mengen Wasser.
2. **Prozessierte Meteorite** (Abb. 3) waren allem Anschein nach früher Bestandteile eines größeren Objekts, das die Materie des solaren Urnebels in eine andere Form prozessiert (umgewandelt) hat. Radiometrische Altersbestimmung zeigt, dass prozessierte Meteorite im Allgemeinen einige hundert Millionen Jahre jünger sind als die primitiven Meteorite. Die prozessierten Meteorite können ebenfalls in zwei Untergruppen gegliedert werden.
 - a. *Metallreiche prozessierte Meteorite* bestehen zum größten Teil aus Eisen und Nickel hoher Dichte, vermischt mit geringen Mengen anderer Metalle. Daher ähnelt ihre Zusammensetzung den Kernen terrestrischer Planeten.
 - b. *Steinige prozessierte Meteorite* weisen eine geringere Dichte auf und bestehen aus Gestein in einer Zusammensetzung, die an Mantel und Kruste terrestrischer Planeten erinnert. Einige haben eine Zusammensetzung, die sehr an Basalt irdischer Vulkane erinnert.

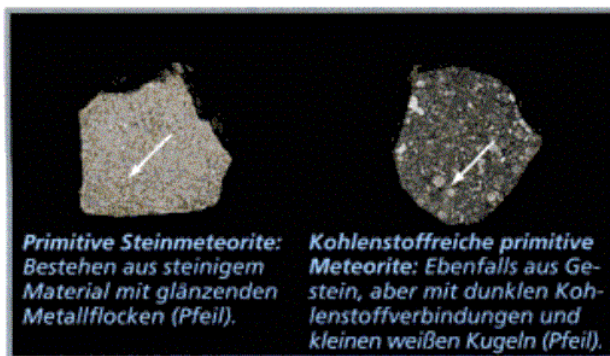


Abb. 2: Primitive Meteorite

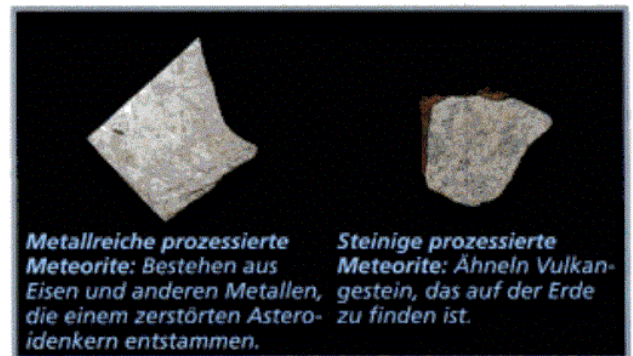


Abb. 3: Prozessierte Meteorite

Die Herkunft der primitiven Meteorite

Der weitaus größte Teil aller Meteorite gehört zu den primitiven Meteoriten. [...] Es handelt sich um Gestein, das sich im solaren Urnebel zusammengelagert hat und seit Jahrmilliarden die Sonne umkreist hat, bevor es schließlich zur Erde gestürzt ist.

[...] Warum bestehen einige Meteorite aus Stein, während andere reich an Kohlenstoff sind? Die Antwort gibt uns ihr Entstehungsort im solaren Urnebel. Im gesamten Asteroidengürtel waren die Temperaturen zu hoch, als dass Eis hätte kondensieren können, daher bestehen alle Asteroiden aus

Gestein und Metall. Ab einem Sonnenabstand von drei AE aber waren die Temperaturen niedrig genug, sodass Kohlenstoffverbindungen auskondensieren konnten. Daher müssen sich die kohlenstoffreichen primitiven Steinmeteorite in der Region gebildet haben, die wir heute als die Außenbereiche des Asteroidengürtels bezeichnen, die primitiven Steinmeteorite hingegen eher in dessen Innenbereich. Laboranalysen bestätigen diese Überlegungen. [...]

Die Herkunft der prozessierten Meteorite

Die prozessierten Meteorite erzählen eine kompliziertere Geschichte. Ihre Zusammensetzungen ähneln denen des Kerns, des Mantels und der Kruste terrestrischer Planeten. Daher müssen sie Fragmente größerer Asteroiden sein, in denen *Differentiation* aufgetreten ist; dabei ist ihr Inneres geschmolzen, sodass die Metalle ins Zentrum sinken konnten und das Gestein zur Oberfläche emporsteigen konnte. Dies erklärt, warum zwei Arten prozessierter Meteorite auftreten.

Die steinigen prozessierten Meteorite ähneln in ihrer Zusammensetzung dem vulkanischen Gestein der Erde so sehr, dass sie durch Lavaflüsse entstanden sein müssen. Wir schließen daraus, dass diese Meteorite im Wesentlichen von den Oberflächen von Asteroiden, die früher einmal aktiven Vulkanismus aufgewiesen hatten, abgesplittert sein müssen, möglicherweise bei Kollisionen mit kleineren Asteroiden. Bis zu einem Dutzend großer Asteroiden könnten kurz nach der Entstehung des Sonnensystems geologisch aktiv gewesen sein. Das hohe Alter der prozessierten Meteorite sagt uns, dass diese aktive Phase nur kurz andauert haben kann – das Innere dieser Asteroiden muss schnell abgekühlt sein.

Metallreiche prozessierte Meteorite treten weniger häufig auf. Ihre Zusammensetzung ähnelt denen von Planetenkernen, was darauf hindeutet, dass es sich um Bruchstücke größerer Asteroiden handelt, die bei Kollisionen zertrümmert wurden. Dadurch haben diese Himmelskörper nicht nur die Chance verloren, zu einem Planeten anzuwachsen, sondern haben auch eine große Zahl an Trümmerstücken für Kollisionen mit anderen Asteroiden und Planeten – auch mit der Erde – geliefert. Daher bieten uns prozessierte Meteorite eine Gelegenheit, einen aufgeschnittenen Planeten zu untersuchen. Sie liefern zudem einen direkten Beweis, dass in großen Planeten tatsächlich Differentiation stattfindet und bestätigen damit die Ergebnisse seismischer Untersuchungen auf der Erde.

Meteorite von Mond und Mars

In einigen Fällen passt die Zusammensetzung der prozessierten Meteorite nicht mit der bekannter Asteroiden zusammen. Stattdessen scheint sie eher mit derjenigen von Mond und Mars übereinzustimmen. Nach der sorgfältigen Analyse der Zusammensetzung solcher Meteorite sind wir davon überzeugt, dass sie tatsächlich früher Bestandteile des Mondes oder des Mars waren. Schon mäßig intensive Einschläge können die Oberflächenmaterie von terrestrischen Himmelskörpern in den interplanetaren Raum schleudern. Befinden sie sich erst im Weltraum, umkreisen die Steine die Sonne, bis sie auf einen anderen Planeten stürzen.

Arbeitsauftrag

Erstellen Sie eine **Kurzpräsentation** zum Thema „Meteorite“.

Gehen Sie dabei auf folgende **Fragen** ein:

- a. Welche Fachbegriffe unterscheidet man bzgl. Meteorite?
- b. Welche Arten von Meteorite unterscheidet man?
- c. Wie entstanden primitive Meteorite?
- d. Wie entstanden prozessierte Meteorite?

Die Kurzpräsentation soll die Inhalte der behandelten Fragen widerspiegeln.

Hierbei ist die Erstellung einer MindMap als Eintrag geeignet.

Kometen

Asteroiden ⁵⁷

Asteroiden sind eine der beiden Gruppen kleiner Körper im Sonnensystem. Die andere sind Kometen, [...] Asteroiden und Kometen haben viel gemeinsam. Beide sind Überreste der Entstehung unseres Sonnensystems und beide kommen in unterschiedlichen Größen vor. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Zusammensetzung, in der sich ihre Entstehungsorte widerspiegeln. Die Asteroiden bestehen aus Stein, weil sie sich im inneren Sonnensystem gebildet haben, in dem Gestein und Metall auskondensieren konnten. Kometen enthalten große Mengen Eis, weil sie sich jenseits der Frostgrenze bildeten, wo die häufigen Wasserstoffverbindungen zu Eis kondensieren konnten. Beachten Sie, dass wir jedes übrig gebliebene eishaltige Planetesimal, das die Sonne umkreist, als Kometen bezeichnen, ganz egal, welche Größe dieser Komet hat, ob er einen Schweif aufweist oder nicht und ganz egal, aus welchem Gebiet er stammt. [...] (Abb. 1)



Abb. 1: Der Komet Hyakutake



Abb. 2: der Komet Hale-Bopp, fotografiert über dem Mono Lake in Kalifornien

Zusammensetzung der Kometen

Die Zusammensetzung der Kometen lässt sich aus ihren Spektren bestimmen. [...] Kometen sind im Wesentlichen Brocken aus Eis, vermischt mit Gesteinsstaub und einigen komplexeren Chemikalien. Sie werden deshalb oft als „schmutzige Schneebälle“ bezeichnet.

Kometenspektren deuten auf einen weit entfernten Ursprungsort hin, denn in ihnen werden Verbindungen erkennbar, die nur in den äußeren Bereichen des solaren Urnebels auskondensieren konnten. So zeigen Kometenspektren ausnahmslos Emissionslinien von Wasserstoffverbindungen, darunter auch Wasser. Auch Emissionslinien von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid – Gase, die nur in den kältesten und entferntesten Gebieten des solaren Urnebels kondensieren konnten – sind beobachtet worden. Kometenspektren weisen darüber hinaus auf viele komplexe Moleküle hin, darunter einige organische Moleküle; dies hat manche Wissenschaftler zu der Vermutung geführt, dass ein Teil der organischen Moleküle, die das Leben auf die Erde möglich gemacht haben, durch Kometen auf unseren Planeten gebracht worden sind. [...]

⁵⁷ [Bennett] S.519 ff

Das leuchtende Leben der Kometen

Kometen entwickeln erst einen Schweif, wenn sie in das innere Sonnensystem eintreten, in dem sie von der Sonnenwärme aufgeheizt werden. [...]

In großer Entfernung von der Sonne ist der Komet vollständig gefroren – er ist im Wesentlichen ein „schmutziger Schneeball“. Bei Annäherung an die Sonne beginnt er Gas und Staub zu verlieren, hat aber immer noch einen zentralen Eisblock, den wir als **Kern** des Kometen bezeichnen. [...] Trotz ihrer eisigen Zusammensetzung sind Kometenkerne dunkler als Holzkohle und reflektieren weniger als 5% des auf sie einfallenden Lichts. Anscheinend benötigt man keine dicke Felsschicht oder kohlenstoffreiche Materie, um einen Kometen abzdunkeln. Dichtemessungen zeigen, dass Kometenkerne nicht sehr dicht gepackt sind. Die Dichte des Kerns des Halley'schen Kometen (Abb. 2) liegt um einiges unter der Dichte von Wasser (1g/cm^3), was nahelegt, dass der Kern zum Teil aus Eis und zum Teil aus Hohlräumen besteht.

Die Maßstäbe zeigen, dass Kometenkerne typischerweise keine 20 Kilometer Durchmesser haben. Wie können so kleine Himmelskörper so grandiose Schauspiele bieten? Beschleunigt ein Komet in Richtung Sonne, so erhöht sich seine Oberflächentemperatur; das Eis beginnt zu Gas zu sublimieren und kann der schwachen Gravitation des Kometen entkommen. Ein Teil des entweichenden Gases zieht Staubteilchen vom Kern ab, sodass dieses Gas und der Staub eine ausgedehnte staubhaltige Atmosphäre erzeugen, die als **Koma** bezeichnet wird. Die Koma ist viel größer als der Kern, den sie umgibt. Beobachtungen durch Raumfahrzeuge zeigen, dass das Gas ziemlich heftig aus dem Kometenkern ausströmen kann; einzelne Gas- und Staubstrahlen schießen mit Geschwindigkeiten von hunderten Metern pro Sekunde aus dem Inneren des Kerns in den Weltraum. (Abb. 3)

Während sich der Komet weiter in das innere Sonnensystem hineinbewegt, wächst die Koma weiter an und schließlich bildet sich als Erweiterung der Koma der Schweif. Kometenschweife können mehrere hundert Kilometer lang werden. Weil sie sehr an die Abgasströme hinter Raketen erinnern, nehmen viele Menschen fälschlicherweise an, dass sich die Schweife hinter den Kometen erstrecken, während diese auf ihrer Umlaufbahn entlangziehen. Tatsächlich weisen Kometenschweife aber immer von der Sonne weg, egal in welche Richtung sich der Kern bewegt. Kometen haben üblicherweise zwei sichtbare Schweife; der eine besteht aus ionisiertem Gas, dem Plasma, der andere enthält Staub. Der **Plasmaschweif** besteht aus Gas, das aus der Koma entweicht. Ultraviolettes Licht der Sonne ionisiert das Gas und der Sonnenwind trägt es mit einer Geschwindigkeit von hundert Kilometern pro Sekunde in direkter Linie von der Sonne fort. Daher zeigt der Plasmaschweif immer direkt von der Sonne weg. Der **Staubschweif** besteht aus staubgroßen Teilchen, die aus der Koma entweichen. Sie werden nicht vom Sonnenwind

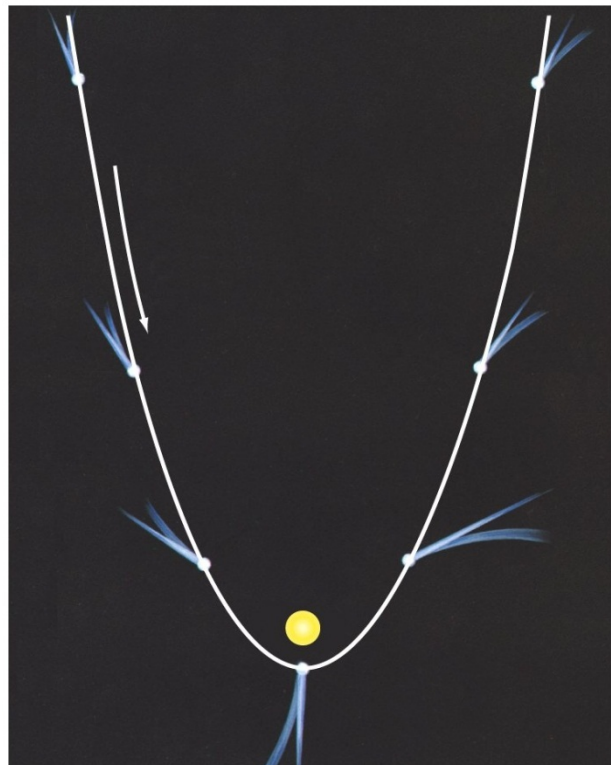


Abb. 3: Komet beim Umlauf um die Sonne

weggeweht, sondern vom viel schwächeren Druck des Sonnenlichts (dem *Strahlungsdruck*) in die Richtung von der Sonne weggedrückt. Obwohl also auch der Staubschweif im Allgemeinen immer von der Sonne weg weist, ist er geringfügig in die Richtung gebogen, aus der der Komet angekommen ist.

Kometenschweife und Meteorschauer

Neben dem Plasma und dem Staub (Abb. 4) in den beiden sichtbaren Schweifen trägt das aus den Kometen entweichende Gas auch sandkorn- bis kieselsteingroßes Gestein mit sich. Diese Teilchen sind zu groß, als dass sie von Sonnenwind oder Sonnenlicht beeinflusst werden konnten; daher treiben sie nur allmählich weg und breiten sich entlang der Umlaufbahn aus. Diese Teilchen bilden im Wesentlichen einen dritten, unsichtbaren Schweif, der dem Kometen auf seiner Umlaufbahn folgt. Dies sind auch die Teilchen, die für die meisten Meteore und Meteoritenschauer verantwortlich sind.⁵⁸



Abb. 4: Hale Bopp

Tritt eines dieser kleinen Teilchen (oder ein ähnliches kleines Teilchen von einem Asteroiden) in unsere Atmosphäre ein und verglüht, dann sehen wir einen Meteor am Himmel aufleuchten. Die sandkorn- bis kieselsteingroßen Teilchen sind viel zu klein, um selbst sichtbar zu sein. Sie treten aber mit so hoher Geschwindigkeit in die Erdatmosphäre ein (bis zu 250 000 Kilometer pro Stunde oder 70 km/s), dass sie die umgebende Luft erhitzen und zum Glühen bringen. Dieses Glühen sehen wir als kurzen, aber blendend hellen Blitz des Meteors. Die kleinen Teilchen werden durch die Hitze verdampft und erreichen daher nie den Boden. Geschätzte 25 Millionen Teilchen aus Kometenschweiften treten jeden Tag weltweit in die Atmosphäre ein, verbrennen dort als Meteore und fügen der Erde täglich hunderte Tonnen Kometenstaub hinzu.

Noch mehr Kometenstaub tritt während eines Meteorschauers in die Erdatmosphäre ein. Ein Teil des Kometenstaubs ist zwar über das innere Sonnensystem verteilt, doch die „dritten Schweife“ aus herausgelösten Teilchen sind hauptsächlich entlang der Umlaufbahnen der Kometen konzentriert. Meteorschauer treten daher auf, wenn die Erde die Bahn eines Kometen durchquert. Weil die Erde die Umlaufbahn eines bestimmten Kometen jedes Jahr zur selben Zeit durchquert, treten Meteorschauer jedes Jahr zur selben Zeit auf. Der als Perseiden bezeichnete Meteorschauer tritt beispielsweise jedes Jahr um den 12. August herum auf – zu dieser Zeit passiert die Erde die Umlaufbahn des Kometen Swift-Tuttle. [...]

Üblicherweise können Sie in einer klaren Nacht pro Stunde nur einige wenige Meteore erkennen. Während eines der jährlichen Meteorschauer sind jedoch viel mehr zu sehen. Während eines „guten“ Schauers können Sie an einem dunklen Beobachtungsort Dutzende Meteore pro Stunde beobachten. [...] Meteore scheinen [...] von einem ganz bestimmten Punkt am Himmel auszugehen und zwar aus demselben Grund, aus dem auch Schnee oder heftiger Regen für einen Autofahrer stets von einem bestimmten Punkt vor dem Fahrzeug zu kommen scheint. Weil mehr Meteore die Erde von vorne als von hinten treffen (so wie auch mehr Schneeflocken auf der Frontscheibe des fahrenden Wagens auftreffen), sind Meteorschauer am besten vor der Morgendämmerung am Himmel zu

⁵⁸ Diese Teilchen werden, solange sie sich durch das Sonnensystem bewegen, also *Meteoroiden* bezeichnet.

beobachten, denn dies ist die Tageszeit, während der ein Teil des lokalen Himmels in die Richtung zeigt, in der sich die Erde bewegt.

Wichtige jährliche Meteorschauer		
Name des Schauers	Ungefähres Datum	Zugehöriger Komet
Lyriden	22. April	Thatcher
Eta Aquariden	05. Mai	Halley
Perseiden	12. August	Swift-Tuttle
Orioniden	22. Oktober	Halley
Tauriden	03. November	Encke
Leoniden	17. November	Temple-Tuttle
Geminiden	14. Dezember	Phaeton

Woher kommen Kometen?

Wie bereits erwähnt stammen Kometen aus dem äußeren Sonnensystem, aber wir können das noch genauer festlegen. Indem sie die Umlaufbahnen von Kometen analysieren, die nahe an der Sonne vorbeiziehen, haben Wissenschaftler festgestellt, dass es zwei große „Quellen“ von Kometen im äußeren Sonnensystem gibt.

Die meisten Kometen, die in das innere Sonnensystem eintreten, scheinen sich auf beinahe zufälligen Umlaufbahnen zu befinden. Sie umkreisen die Sonne nicht in derselben Richtung wie die Planeten und ihre elliptischen Umlaufbahnen können in jede Richtung weisen. Darüber hinaus zeigen ihre Umlaufbahnen, dass sie aus einem Gebiet weit außerhalb der Umlaufbahnen der Planeten stammen – manchmal sogar aus einer Entfernung, die fast einem Viertel der Entfernung zum nächsten Stern entspricht. Diese Kometen stürzen aus einer riesigen sphärischen Region des Weltraums in Richtung Sonne, welche die Wissenschaftler als **Oort'sche Wolke** bezeichnen ([...] Jan Hendrik Oort, 1900 – 1992). Diese Oort'sche Wolke ist keine Gaswolke, sondern eine Ansammlung vieler einzelner Kometen. Anhand der Anzahl der Kometen aus der Oort'schen Wolke, die jedes Jahr in das innere Sonnensystem eintreten, können wir schließen, dass die Wolke etwa eine Billion (10^{12}) Kometen enthalten muss, welche die Sonne in Entfernung von bis zu 50 000AE umkreisen.

Eine kleinere Anzahl von Kometen, die in das innere Sonnensystem eintreten, zeigt eine andere Verteilung der Umlaufbahnen. Sie umkreisen die Sonne in derselben Ebene und Richtung wie die Planeten und bewegen sich dabei auf elliptischen Umlaufbahnen, die sie bis auf etwa in die doppelte Neptunentfernung tragen. Diese Kometen müssen einem Ring aus Kometen entstammen, welcher außerhalb der Neptunbahn die Sonne umschließt. Dieser Ring wird üblicherweise als **Kuiper-Gürtel** bezeichnet ([...] Gerard Peter Kuiper, 1905 – 1973).

Arbeitsauftrag

Erstellen Sie eine **Kurzpräsentation** zum Thema „Kometen“.

Gehen Sie dabei auf folgende **Fragen** ein:

- a. Wie sind Meteorite aufgebaut?
- b. Aus welchen Teilen setzt sich die Leuchterscheinung zusammen?
- c. Welche Schweife gibt es?
- d. Was sind Meteorschauer und wann kann man diese beobachten?
- e. Aus welchen Regionen des Sonnensystems stammen Kometen?

Die Kurzpräsentation soll die Inhalte der behandelten Fragen widerspiegeln.

Definition of a Planet ⁵⁹

The IAU members gathered at the 2006 General Assembly agreed that a **"planet" is defined as a celestial body that (a) is in orbit around the Sun, (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape, and (c) has cleared the neighbourhood around its orbit.**

This means that the **Solar System consists of eight "planets" Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune.** A new distinct class of objects called **"dwarf planets"** was also decided. It was agreed that "planets" and "dwarf planets" are two distinct classes of objects. The first members of the "dwarf planet" category are Ceres, Pluto and 2003 UB₃₁₃ (temporary name). More "dwarf planets" are expected to be announced by the IAU in the coming months and years. Currently a dozen candidate "dwarf planets" are listed on IAU's "dwarf planet" watchlist, which keeps changing as new objects are found and the physics of the existing candidates becomes better known.

The IAU therefore resolves that planets and other bodies in our Solar System, except satellites, be defined into three distinct categories in the following way:

(1) A "planet" [\[1\]](#) is a celestial body that (a) is in orbit around the Sun, (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape, and (c) has cleared the neighbourhood around its orbit.

(2) A "dwarf planet" is a celestial body that (a) is in orbit around the Sun, (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape [\[2\]](#), (c) has not cleared the neighbourhood around its orbit, and

(d) is not a satellite.

(3) All other objects [\[3\]](#), except satellites, orbiting the Sun shall be referred to collectively as "Small Solar-System Bodies".

IAU Resolution: Pluto - RESOLUTION 6A

The IAU further resolves:

Pluto is a "dwarf planet" by the above definition and is recognized as the prototype of a new category of trans-Neptunian objects.

[\[1\]](#) The eight planets are: Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune.

[\[2\]](#) An IAU process will be established to assign borderline objects into either "dwarf planet" and other categories.

[\[3\]](#) These currently include most of the Solar System asteroids, most Trans-Neptunian Objects (TNOs), comets, and other small bodies.

⁵⁹ [IAU] 25.07.2012

Pluto: Kein Außenseiter mehr ⁶⁰

Vermutlich haben Sie irgendwann in Ihren ersten Schuljahren zum ersten Mal etwas über das Sonnensystem gehört. Man wird Ihnen dort etwas über Asteroiden und Kometen erzählt haben und sicherlich hat man Ihnen auch etwas über die „neun Planeten“ beigebracht. [...] Damit bleibt nur noch ein Objekt aus Ihrer Schulzeit zu behandeln: der neunte Planet, Pluto. (vgl. Abb. 1)

Schon bei seiner Entdeckung 1930 schien Pluto ein Außenseiter unter den Planeten zu sein [...]. Wir wissen von Anfang an, dass seine 248 Jahre dauernde Umlaufbahn viel elliptischer und viel stärker gegen die Ekliptik geneigt ist als die jedes anderen Planeten. Wir wissen zudem, dass – obwohl Pluto sich bisweilen näher bei der Sonne befindet als Neptun – keine Gefahr einer Kollision besteht: Neptun umkreist die Sonne genau dreimal während zweier Plutoumläufe. Wegen dieser stabilen Bahnresonanz ist Neptun immer in sicherer Entfernung, wenn Pluto seine Bahn kreuzt.

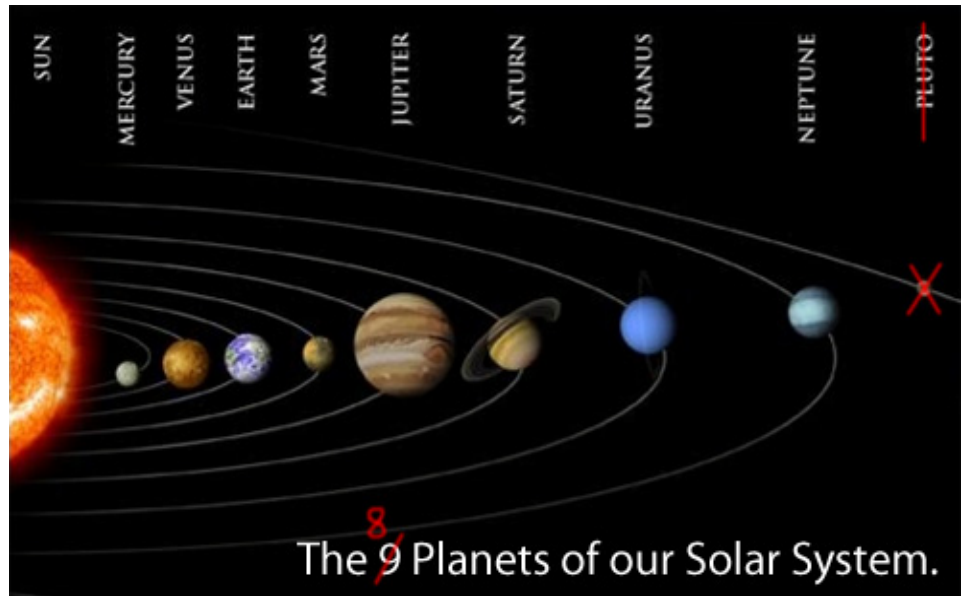


Abb. 1: Die acht Planeten des Sonnensystems

In dem Maße, in dem wir mehr über Pluto erfahren haben, entpuppte er sich auch hinsichtlich Größe und Zusammensetzung als Außenseiter. Er ist viel kleiner als die terrestrischen Planeten und seine eisreiche Zusammensetzung passt weder zu den terrestrischen noch zu den jovianischen Planeten. Diese Ungereimtheiten ließen Pluto lange Zeit wie einen Einzelgänger im äußeren Sonnensystem erscheinen. Das ist er aber nicht: Wir wissen nun, dass Pluto zu einer großen Gruppe ähnlicher Objekte gehört – im Wesentlichen sind dies Kometen -, die in diesem Gebiet des Sonnensystems die Sonne umkreisen. Pluto ist nicht einmal das größte Objekt dieser Gruppe.

Warum ist das Entdecken von Planeten bei anderen Sternen so schwierig? ⁶¹

Wir wissen seit Jahrhunderten, dass andere Sterne ferne Sonnen sind [...]; es lag also die Annahme auf der Hand, dass sie ihre eigenen Planetensysteme haben. In der Nebulartheorie der Entstehung des Sonnensystems, die Mitte des 20. Jahrhunderts weitgehend akzeptiert war, sind extrasolare Planeten äußerst wahrscheinlich. [...] Wenn die Theorie richtig ist, dann sollten Planeten im ganzen Universum sehr verbreitet sein. Aber sind sie das auch? Vor 1995 fehlten uns dafür jegliche Beobachtungshinweise.

Wie entdecken wir Planeten bei anderen Sternen?

Mit der Entdeckung extrasolarer Planeten hat eine neue Ära der Planetenwissenschaften begonnen. Die erste Entdeckung – ein Planet, der den Stern 51 Pegasi umkreist – gelang 1995 den Schweizer Astronomen Michael Mayor und Dinier Queloz. Sie wurde bald darauf von Geoffroy W. Marcy und R. Paul Butler von der San Francisco State University bestätigt. Seitdem sind mehr als 300 andere extrasolare Planeten entdeckt worden, viele davon von diesen

⁶⁰ [Bennett] S.527

⁶¹ [Bennett] S.551

astronomischen Arbeitsgruppen. Im Wesentlichen gibt es zwei Methoden, mit denen extrasolare Planeten entdeckt werden können:

- 1) Direkt: Bilder oder Spektren der Planeten selbst sind direkte Hinweise auf deren Existenz.
- 2) Indirekt: Genaue Messungen von Sterneneigenschaften (etwa ihre Positionen, Helligkeiten oder Spektren) können die Anwesenheit eines Planeten in einer Umlaufbahn enthüllen.

Eigenschaften extrasolarer Planeten ⁶²

Die bloße Existenz von Planeten um andere Sterne hat das Verständnis unserer Stellung im Universum grundlegend verändert, denn sie zeigt, dass unser Planetensystem keineswegs einzigartig ist. Darüber hinaus bieten uns extrasolare Planeten zwei Möglichkeiten, unsere Kenntnisse der Planeten und ihre Entstehung zu verbessern.

Zunächst geben uns die Eigenschaften der einzelnen Planeten selbst eine Gelegenheit, mehr über die Spannweite der möglichen Planeten zu erfahren. Die Planeten unseres Sonnensystems gehören beispielsweise zu zwei Kategorien: terrestrischen und jovianischen Planeten. Untersuchungen extrasolarer Planeten könnten uns zeigen, ob dies die einzigen beiden Planetenkategorien sind oder ob es noch weitere gibt, die in unserem Sonnensystem nicht vorkommen.

Zum anderen kann eine Untersuchung der Anordnungen anderer Planetensysteme etwas darüber aussagen, ob der Aufbau unseres Sonnensystems typisch oder ungewöhnlich ist. Dies sollte auch die Frage erhellen, ob die Nebularhypothese die Entstehung unseres Sonnensystems wirklich so einfach erklären kann, wie wir das angenommen haben. So befinden sich beispielsweise in unserem Sonnensystem alle terrestrischen Planeten in der Nähe der Sonne, während sich die jovianischen Planeten in größerer Entfernung befinden - was durch die Nebularhypothese zwanglos erklärt wird. Kann die Nebularhypothese aber ebenso einfach auch den Aufbau anderer Planetensysteme erklären?

Was sind die Grundvoraussetzungen für Leben? ⁶³

Wenn wir nach anderen Welten suchen, auf denen sich Leben entwickelt haben könnte, müssen wir zunächst die Grundvoraussetzungen des Lebens kennen. Obwohl das Leben auf anderen Welten völlig anders aussehen könnte als das irdische Leben, ist es am einfachsten, mit der Suche nach solchen Bedingungen zu beginnen, die für irdische Lebensformen geeignet wären. Worauf ist also irdisches Leben zum Überleben wirklich angewiesen? [...] Betrachten wir die unterschiedlichen Lebensformen auf der Erde, so kommen wir auf nur drei Grundbedingungen für das Leben als solches:

- 1) eine Quelle von Nährstoffen (Elemente und Moleküle) zum Aufbau der Zellen,
- 2) Energie, um die Aktivitäten des Lebens zu ermöglichen, egal, ob sie durch das Sonnenlicht, chemische Reaktionen oder durch die Erdwärme selbst geliefert wird
- 3) flüssiges Wasser.

Diese Bedingungen sind die Wegweiser, mit denen wir uns auf die Suche nach Leben begeben können. Wenn wir Leben auf einer anderen Welt finden wollen, ist es sinnvoll, zunächst nach Welten zu suchen, die diese drei Grundbedingungen anbieten. Interessanterweise scheint nur die dritte Bedingung tatsächlich eine Einschränkung zu bedeuten. Organische Moleküle sind fast überall anzufinden – sogar auf Meteoriten und Kometen. Viele Welten sind so groß, dass ihre innere Wärme die Energie für das Leben liefern könnte, und praktisch alle Welten werden von Sonnen- bzw. Sternlicht erhellt. [...] Wasser dagegen ist äußerst selten und die Suche nach Leben im Universum ist daher gleichbedeutend mit der Suche nach flüssigem Wasser.

⁶² [Bennett] S.565

⁶³ [Bennett] S.1044

Anforderungen an Sternsysteme ⁶⁴

[...] Die erste Bedingung an einen Stern, auf dessen Planeten es Leben geben könnte, ist sein Alter. Er muss alt genug sein, damit das Leben überhaupt entstehen konnte. Sterne höherer Masse haben kürzere Lebensdauer und die massereichsten Sterne existieren nicht länger als einige Millionen Jahre [...]. Vorausgesetzt, das Leben auf der Erde war in den ersten paar hundert Millionen Jahren nach der Entstehung unseres Sonnensystems noch nicht präsent, können wir alle Sterne mit mehreren Sonnenmassen ausschließen. Weil aber massearme Sterne viel häufiger sind als massereiche Sterne, wird durch diese Voraussetzung nur etwa 1% der Sterne ausgeschlossen.

Als zweite Voraussetzung muss der Planet eine stabile Umlaufbahn um den Stern einnehmen können. Etwa die Hälfte aller Sterne befindet sich in Doppelsternsystemen oder Mehrfachsternsystemen, bei denen stabile Planetenbahnen weniger wahrscheinlich sind als bei Einzelsternen. Wenn Leben in solchen Systemen nicht möglich ist, können wir die Hälfte aller Sterne unserer Galaxis als potenzielle Brutstätten des Lebens ausschließen. Immerhin bleibt noch die andere Hälfte der Sterne, noch beinahe 100 Millionen Sterne als potenzielle Orte des Lebens übrig. Außerdem sind unter bestimmten Bedingungen durchaus stabile Planetenbahnen in Mehrfachsternsystemen möglich, daher dürfen wir diese nicht vollständig außer Acht lassen.

Eine dritte Bedingung für die Wahrscheinlichkeit einen bewohnbaren Planeten zu finden, ist die Größe der *habitable Zone* des Sterns – der Region um den Stern, in der ein terrestrischer Planet der richtigen Größe eine Oberflächentemperatur aufweist, die flüssiges Wasser und damit Leben ermöglicht. Abb. 2 zeigt maßstabsgerecht jeweils die ungefähre Größe der habitablen Zone unserer Sonne, eines Sterns mit der halben Sonnenmasse (mit Spektraltyp K) und eines Sterns mit einer Masse von einem Zehntel der Sonnenmasse (mit Spektraltyp M). Obwohl bewohnbare Planeten in allen drei Fällen möglich sind, bedeutet die geringe Größe der habitablen Zone weniger massereicher Sterne eine geringere Wahrscheinlichkeit dafür, dass in diesen Regionen geeignete Planeten entstanden sind.

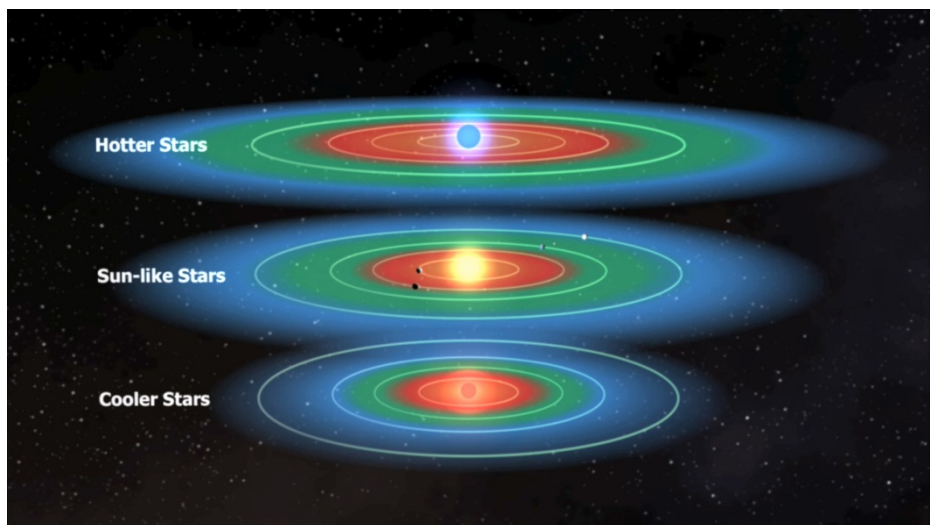


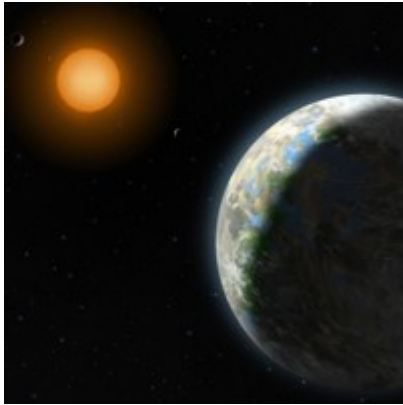
Abb. 2 Die habitable Zone im Bezug auf die Größe des Zentralgestirns

⁶⁴ [Bennett] S.1049

GLIESE 581G - Wie die Erde und doch ganz anders⁶⁵

von [Rainer Kayser](#)
30. September 2010

Der Stern Gliese 581 ist für Astronomen und die interessierte Öffentlichkeit schon ein alter Bekannter: Bereits vor drei Jahren verkündeten Forscher, dass sie um den Zwergstern eine zweite Erde entdeckt hätten, die sich allerdings bald als Gluthölle herausstellte. Jetzt haben Wissenschaftler wieder einen Planeten um Gliese 581 entdeckt, den sie für erdähnlicher halten als alle anderen bislang entdeckten.



So könnte der jetzt entdeckte Planet um Gliese 581 aussehen.

Bild: University of Hawaii/
Lynette Cook.

Um den 20 Lichtjahre entfernten Stern Gliese 581 kreisen gleich sechs Planeten. Einer zieht seine Bahn in der bewohnbaren Zone des Sterns und ist der bislang erdähnlichste Planet, den die Astronomen aufgespürt haben. Das zeigt die Auswertung von Beobachtungsdaten aus insgesamt elf Jahren, über die ein amerikanisches Forscherteam im Fachblatt *Astrophysical Journal* berichtet. Auf der Oberfläche des erdähnlichen Planeten könnte es flüssiges Wasser und damit vielleicht auch Leben geben, so die Wissenschaftler.

"Aus der Umlaufbahn des Planeten können wir ableiten, wie hoch seine Oberflächentemperatur ist", erläutert Nader Haghighipour von der *University of Hawaii*, einer der beteiligten Astronomen, "und ihr Wert ähnelt dem auf der Erde." Der Planet Gliese 581g hat etwa die dreifache Masse und den 1,2- bis 1,4-fachen Durchmesser der Erde. Er umrundet seinen Stern alle 36,6 Tage auf einer Umlaufbahn, die näher an dem Stern liegt als die Bahn Merkurs an der Sonne. Trotzdem könnten auf dem Planeten lebensfreundliche Bedingungen herrschen, denn Gliese 581 ist ein roter Zwergstern, der nur ein Drittel der Sonnenmasse und etwa ein Prozent der Helligkeit unseres Zentralgestirns besitzt.

Die enge Umlaufbahn führt allerdings vermutlich dazu, dass die Rotation des Planeten "gebunden" ist, er also seinem Stern - ähnlich wie der Mond der Erde - stets die gleiche Seite zuwendet. Dadurch könnte es zwischen Tag- und Nachtseite zu extremen Temperaturunterschieden kommen. In den Übergangszonen könnten aber, so die Forscher, lebensfreundliche Bedingungen herrschen. Da rote Zwergsterne wesentlich länger eine stabile Strahlungsumgebung bieten als sonnenähnliche Sterne, hätten Lebensformen dort sogar mehr Zeit, um sich zu entwickeln. [...] Die Forscher kennen inzwischen 45 Systeme mit mehreren Planeten, die Gesamtzahl der bekannten Planeten bei anderen Sternen nähert sich der 500.

⁶⁵ [Astronews] 13.7.2012

Arbeitsauftrag

Erstellen Sie eine **Kurzpräsentation** zum Thema „Zwergplaneten und Exoplaneten“.

Gehen Sie dabei auf folgende **Fragen** ein:

- a. Wie sind Planeten und Zwergplaneten definiert?
- b. Welche Eigenschaften unterscheiden Pluto von den übrigen Planeten?
- c. Wie entdeckt man extrasolare Planeten?
- d. Was kann man von extrasolaren Planeten lernen?
- e. Welche Voraussetzungen braucht ein Planet für die Entstehung von Leben?
- f. Was ist Gliese 581g?

Die Kurzpräsentation soll die Inhalte der behandelten Fragen widerspiegeln.

Terrestrische Planeten

Warum sind Marsianer so populär? ⁶⁶

Ist Ihnen jemals aufgefallen, dass die Menschen zwar immer wieder von Marsianern bzw. Marsmenschen reden, aber fast nie von Venusianern oder Jupiterianern? Dabei handelt es sich keinesfalls um einen Zufall, sondern um einen Irrtum, der in den frühen Jahren der Teleskopbeobachtungen gemacht wurde. Die Geschichte beginnt im späten 18. Jahrhundert mit den Geschwistern William und Caroline Herschel, zwei Astronomen deutscher Herkunft, die in England arbeiteten. Sie war eine eifrige Kometenjägerin, er wurde durch die Entdeckung des Uranus bekannt; sie führten aber auch viele Beobachtungen des Mars durch. Ihre Beobachtungen offenbarten viele unheimliche Ähnlichkeiten mit der Erde, darunter eine ähnliche Achsenneigung, einen Mars-Tag, der nur wenig länger als 24 Stunden dauert, die Existenz von Polkappen und jahreszeitliche Veränderungen im Verlauf eines marianischen Jahres (etwa 1,9 Erdjahre). In einem 1784 gehaltenen Vortrag sprach William Herschel mit Bestimmtheit über die „Bewohner“ des Mars. (siehe Abb. 1 ⁶⁷)

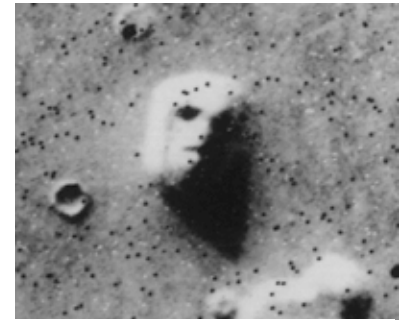


Abb. 1 Marsgesicht, aufgenommen vom Orbiter Viking I

Ein Jahrhundert später erregten die hypothetischen Marsianer erneut Aufmerksamkeit. 1879 hatte der italienische Astronom Giovanni Schiaparelli berichtet, er habe mit seinem Teleskop ein Netz feiner Linien auf dem Mars erkennen können. Er bezeichnete diese Linien als *canali*, das italienische Wort für „Graben“, es wurde jedoch häufig mit „Kanal“ übersetzt. Fasziniert von diesem scheinbaren Hinweis auf intelligentes Leben veranlasste der wohlhabende amerikanische Astronom Percival Lowell den Bau eines Observatoriums für die Erforschung des Mars.

Das Lowell Observatory wurde 1894 in Flagstaff in Arizona eröffnet. Kaum ein Jahr später veröffentlichte Lowell detaillierte Karten (Abb. 2) der Marskanäle und das erste von drei Büchern, in denen er behauptete, die Kanäle wären das Werk einer hoch entwickelten Zivilisation. Er argumentierte, dass Mars einer nachteiligen Klimaveränderung zum Opfer gefallen sei und die Kanäle gebaut worden wären, um Wasser von den Polen zu den durstigen Städten in den anderen Teilen des Planeten zu transportieren. Lowells Werke setzten zügellose Spekulationen über Marsianer in Gang und inspirierte Science-Fiction-Geschichten wie H.G.Wells „Krieg der Welten“ (das 1898 veröffentlicht wurde). Die öffentliche Erregung überdeckte auch die Skepsis der Astronomen, die weder durch ihre Teleskope noch auf ihren Aufnahmen irgendwelche Kanäle erkennen konnten.

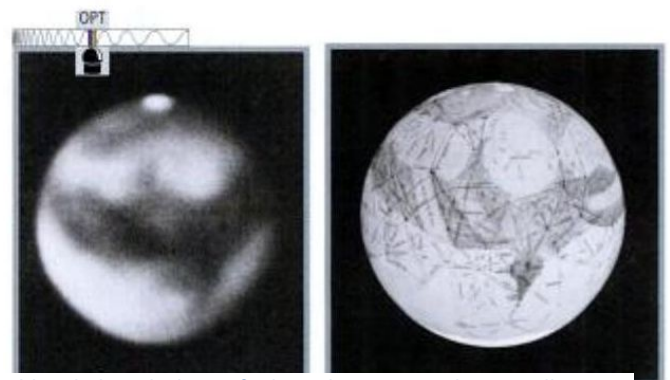


Abb. 2 links Teleskopaufnahme des Mars, rechts Lowells Zeichnung mit den Kanälen

Die gesamte Oberfläche des Mars beträgt zwar nur ein Viertel der Erdoberfläche, dennoch weisen beide Planeten etwa dieselbe Landfläche auf, weil die Erde zu drei Vierteln mit Wasser bedeckt ist. Neben den Polkappen ist das auffälligste Merkmal, dass es derart dramatische Geländeunterschiede zwischen den verschiedenen Regionen des Mars gibt. Ein Großteil der südlichen Hemisphäre ist relativ hoch gelegen und von vielen großen Einschlagskratern übersät, darunter auch das sehr große Becken Hellas Planitia. Im Gegensatz dazu zeigt die nördliche Ebene sehr wenige Krater und liegt überwiegend unter dem mittleren Oberflächenniveau des Mars. Die Unterschiede der Kraterhäufigkeit sagen uns, dass die südlichen Hochländer eine ältere Oberfläche haben als die nördlichen Ebenen, deren frühere Krater durch geologische Prozesse abgetragen worden sein müssen.

⁶⁶ [Bennett] S. 377

⁶⁷ http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Martian_face_viking_cropped.jpg (30.7.2012)

Genaueren Untersuchungen zufolge war Vulkanismus der wichtigste Prozess, durch den alte Krater auf dem Mars abgetragen wurden, obwohl auch Tektonik und Erosion eine Rolle gespielt haben. Allerdings ist unbekannt, warum die nördliche Ebene so viel stärker von vulkanischer Aktivität betroffen war als das südliche Hochland oder warum sich die Höhenlage beider Gebiete so sehr unterscheidet. Tiefer greifende Hinweise auf den marsianischen Vulkanismus zeigen verschiedene hoch aufgetürmte Schildvulkane. Einer von ihnen, der Olympus Mons (Abb. 3), ist der höchste bekannte Vulkan des Sonnensystems. An seiner Basis hat er einen Durchmesser von 600 km, könnte also halb Deutschland bedecken. Sein Gipfel erhebt sich über 26 Kilometer über das mittlere marsianische Höhenniveau.

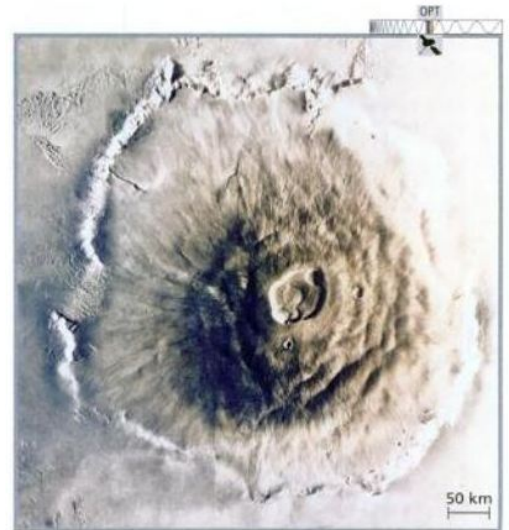


Abb. 3 Olympus Mons

Mars weist auch Merkmale der Tektonik auf, allerdings nicht in einem globalen Maßstab wie bei der Plattentektonik der Erde. Das auffälligste tektonische Geländemerkmale ist das lange tiefe System von Tälern, das als *Valler Marineris* (Mariner-Täler) bezeichnet wird. Sie sind nach der Raumsonde *Mariner 9* benannt, die sie zuerst fotografiert hat. Die Valles Marineris erstrecken sich am Äquator über beinahe ein Fünftel des Planetenumfangs. Ihre Länge entspricht der Breite des nordamerikanischen Kontinents, sie sind fast viermal tiefer als der Grand Canyon. Teile des Canyons sind auf beiden Seiten von hohen Klippen umgeben, daher kann weder flüssiges Lava noch Wasser dafür verantwortlich gewesen sein.

Geologie von Mond und Merkur⁶⁸ (Abb. 4)

Das auffälligste Merkmal sind die zahlreichen Krater, die belegen, dass auf Mond und Merkur die Entstehung von Einschlagskratern der mit Abstand wichtigste geologische Prozess war. Das ist keineswegs überraschend. Die geringe Größe bedeutet, dass er schon vor langer Zeit seine innere Wärme verloren haben muss. Daher gibt es keine Energiequelle, die dauerhaften Vulkanismus oder tektonische Aktivität ermöglichen würde. Die geringe Größe erklärt auch das Fehlen einer nennenswerten Atmosphäre und damit der Erosion. Die Schwerkraft ist zu gering, um Gas über längere Zeiträume festzuhalten. Da auch der Vulkanismus fehlt, findet keine Ausgasung statt, welche die in der Vergangenheit verlorenen Gase ersetzen könnte. Gleichwohl zeigt die genauere Untersuchung einige Merkmale auf Mond und Merkur, die vulkanischen Ursprungs sind. Also müssen diese Himmelskörper in der Vergangenheit geologische Aktivität gezeigt haben. Auch das erscheint sinnvoll: vor langer Zeit, lange bevor sie auskühlen konnten, hatten Mond und Merkur genug innere Hitze, um zumindest ein wenig Vulkanismus und tektonische Aktivität zu ermöglichen.

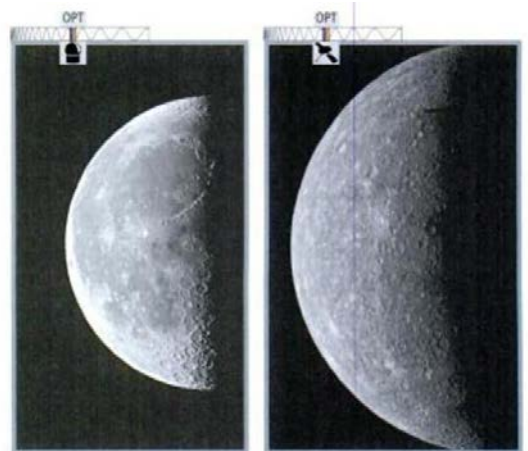


Abb. 4 Ansichten von Mond und Merkur im gleichen Maßstab

⁶⁸ [Bennett] S. 372

Welche geologischen Prozesse haben den Mond geformt?

Die hellen, dicht mit Kratern übersäten Regionen des Mondes sind die Hochländer. Die flachen, dunklen Gebiete sind die Maria des Mondes. Sie heißen so, weil sie aus großer Entfernung fast wie Ozeane aussehen (*Mare*, in der Mehrzahl *Maria*, lat. für „Meer“). Wegen der Phase des schweren Bombardements (vgl. Abb. 5) sollte aber die gesamte



Abb. 5 Entstehung der Meere

Mondoberfläche Krater aufweisen. Was ist also mit den Kratern geschehen, die in jenen Gebieten lagen, die wir heute als Maria kennen?

Vulkanismus und Tektonik erzeugen die Maria des Mondes

Während des schweren Bombardements wurde die gesamte Oberfläche des Mondes mit Kratern bedeckt. Die größten Einschläge waren heftig genug, um unter den von ihnen erzeugten riesigen Kratern die Lithosphäre des Mondes zu zerbrechen. Da allerdings das Innere des Mondes seit seiner Entstehung bereits abgekühlt war, stand kein geschmolzenes Gestein zur Verfügung, das diese Krater sofort hätte überfluten können. Stattdessen trat die Lava erst einige hundert Millionen Jahre später aus, als der Zerfall der radioaktiven Elemente im Mondinneren genügend Wärme aufgebaut hatte. Diese Wärme baute sich im Verlauf der frühen Geschichte des Mondes allmählich auf, bis das Material des Mantels vor drei bis vier Millionen Jahren schmelzen konnte. Das geschmolzene Gestein konnte dann durch die Spalten in der Lithosphäre aufsteigen und die größten Einschlagskrater mit Lava überfluten. Ihre dunkle Farbe (Abb. 6) haben sie von dem dichten, eisenreichen Gestein (Basalt), das als geschmolzene Lava aus dem lunaren Mantel emporgequollen ist.



Abb. 6 Meere auf dem Mond

Welche geologischen Prozesse haben Merkur geformt?⁶⁹

Merkur sieht heute dem Mond so ähnlich, dass man auf Nahaufnahmen kaum erkennen kann, um welchen dieser beiden es sich handelt. Dennoch zeigen diese beiden Himmelskörper deutliche Unterschiede.

⁶⁹ [Bennett] S. 375

Auf dem Merkur sind fast überall Einschlagskrater zu sehen, was auf eine alte Oberfläche hindeutet. Dennoch liegen die Krater des Merkur weniger dicht als in den ältesten Gebieten des Mondes; demnach muss geschmolzene Lava einen Teil des Krater überflutet haben, die sich auf Merkur während der Phase des schweren Bombardements gebildet hatten. Wie beim Mond sind diese Lavaflüsse erst eingetreten, als sich durch den radioaktiven Zerfall genug Hitze angesammelt hatte, um Teile des Mantels zu schmelzen. Obwohl wir keine Hinweise auf Lavaflüsse gefunden haben, die so umfangreich waren wie bei den Maria auf dem Mond, deuten die geringe Kraterdichte und die vielen kleineren Lavaebenen darauf hin, dass Merkur eine mindestens ebenso intensive geologische Aktivität erlebt haben muss wie der Mond.

Die überraschendsten Geländemerkmale auf Merkur sind die vielen Steilhänge – sie sind Hinweise auf eine frühere Tektonik, die sich von allem unterscheidet, das wir auf irgendeinem anderen der terrestrischen Planeten gefunden haben. Die Steilhänge des Merkurs steigen drei oder mehrere Kilometer senkrecht in die Höhe und ziehen sich hunderte Kilometer weit über die Oberfläche. Sie haben sich vermutlich gebildet, als tektonische Kräfte die Kruste stellenweise komprimiert haben, wodurch die Kruste wie Stanniolpapier (Alufolie) zerknittert wurde.

Wie sieht die Venus heute aus? ⁷⁰

Würden Sie auf der Venus stehen, dann würden Sie eine sengende Hitze spüren, höher als in einem Backofen, sowie einen Druck, der 90-mal höher ist als der auf der Erde. Ein Taucher auf der Erde müsste einen Kilometer tief unter die Meeresoberfläche tauchen, um einen vergleichbaren Druck zu erfahren. Die Venusatmosphäre besteht fast vollständig aus Kohlendioxid (CO₂). Es gibt so gut wie keinen Sauerstoff (O₂), daher könnten Sie in der Luft nicht atmen, selbst wenn es Ihnen gelänge, ihn auf eine angenehme Temperatur herunterzukühlen.

Sich durch die Venusatmosphäre zu bewegen, würde sich anfühlen wie eine Mischung zwischen Schwimmen und Fliegen: Ihre Dichte beträgt ein Zehntel der Dichte von Wasser. Beim Blick nach oben sähen Sie einen vollständig bedeckten Himmel, durch den nur gedämpftes Sonnenlicht dringt. Weil die dichte Atmosphäre das blaue Licht fast vollständig streut, wäre das trübe Licht von gelblich-orangener Farbe.

Die Wettervorhersage für die Venusoberfläche ist an jedem Tag dieselbe: langweilig. Durch die langsame Rotation der Venus (die 243 Erdtage dauert) gibt es nur einen sehr schwachen Coriolis-Effekt. Daher gibt es auf der Venusoberfläche kaum Wind und niemals Hurrikan-ähnliche Stürme. Die höchsten Windgeschwindigkeiten, die von den sowjetischen Venera-Sonden gemessen worden sind, betragen etwa sechs Kilometer pro Stunde. Es gibt keinen Regen, weil alle Gase, die in der kühlen oberen Atmosphäre kondensieren, schon wieder verdunstet sind, lange bevor sie den Boden erreichen. Der schwache Coriolis-Effekt bedeutet auch, dass die Venusatmosphäre nur zwei Zirkulationszellen aufweist, genau wie das auf der Erde der Fall wäre, würde unsere schnelle Rotation die Zellen nicht aufspalten. Durch die dichte Atmosphäre ist der Wärmetransport vom Äquator zu den Polen so effizient, dass die Oberflächentemperatur praktisch überall gleich ist. Dadurch sind die Pole kaum kühler als der Äquator und bei Nacht ist es genauso glühend heiß wie am Tag. Ferner gibt es auf der Venus keine Jahreszeiten, weil sie so gut wie keine Achsenneigung aufweist. Die Temperaturen bleiben also das ganze Jahr über gleich.



Abb. 7 Ansicht des Mars von der Pathfinder Sonde aufgenommen. ⁵⁴

⁷⁰ [Bennett] S. 441

⁷¹ <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/PIA01466.jpg> (30.7.2012)

Arbeitsauftrag

Erstellen Sie eine **Kurzpräsentation** zum Thema „terrestrische Planeten“.

Gehen Sie dabei auf folgende **Fragen** ein:

- a. Woher stammt der Mythos der Marsmenschen?
- b. Wie ist die Geologie des Mars aufgebaut?
- c. Welche Eigenschaften hat die Atmosphäre der Venus?
- d. Wie sieht die Oberfläche des Mondes aus?
- e. Wie ist die Oberfläche des Merkurs beschaffen?
- f. Zusatz: Überlegen Sie, warum der Mond keine Atmosphäre aufbauen konnte.

Die Kurzpräsentation soll die Inhalte der behandelten Fragen widerspiegeln.

Lösungen für die Präsentationen der Doppelstunde „Kosmische Objekte“ – „Asteroiden“

- a. Wann und wie wurden die ersten Asteroiden entdeckt?
- b. Wie sind Asteroiden aufgebaut? (Größe, Anzahl, Erscheinen)
- c. Wie sind Asteroiden entstanden?
- d. Wie ist der Asteroidengürtel aufgebaut?
- e. Welche Rolle spielt Jupiter für die Asteroiden?

Zu a.)

Die ersten Asteroiden wurden erst vor 200 Jahren entdeckt. Es dauerte nochmal 50 Jahre, bis die ersten zehn bekannt waren. Über 400 000 sind bereits katalogisiert worden. Asteroiden lassen sich auf Teleskopbildern erkennen, weil sie sich schon nach kurzer Zeit gegenüber den Sternen deutlich bewegt haben.

Zu b.)

Asteroiden haben sehr unterschiedliche Abmessungen. Ceres, hat einen Durchmesser von 1000 Kilometern, also knapp ein Drittel des Monddurchmessers. Etwa ein Dutzend andere sind so groß, dass man sie als mittelgroße Monde einstufen könnte. Es gibt schätzungsweise mehr als eine Million Asteroiden mit einem Durchmesser von über einem Kilometer und noch viel mehr noch kleinere. Die Form der Asteroiden hängt von der Stärke ihrer Schwerkraft ab. Ist ein Asteroid relativ groß, kann die Schwerkraft das Gestein zu einer Kugel formen. Doch nur Ceres ist groß genug, damit die Schwerkraft ihr eine in etwa kugelförmige Gestalt gegeben hat – Ceres ist deshalb ein Zwergplanet.

Zu c.)

Asteroiden bestehen zum größten Teil aus Metall und Gesteinen, denn sie haben sich innerhalb der Frostgrenze im solaren Urnebel gebildet. Diejenigen, die an den Außenrändern des Asteroidengürtels entstanden sind, enthalten größere Mengen eines dunklen, kohlenstoffreichen Materials, das bei den relativ kühlen Temperaturen in diesem Bereich des solaren Urnebels, nicht aber in den sonnennäheren Gebieten auskondensieren konnte, einige enthalten sogar geringe Anteile an Wasser, sie müssen sich also in der Nähe der Frostgrenze gebildet haben.

Zu d.)

Der größte Teil der Asteroiden befindet sich im Asteroidengürtel zwischen den Umlaufbahnen des Mars und des Jupiters. Alle Asteroiden kreisen in derselben Richtung um die Sonne wie die Planeten, allerdings sind ihre Umlaufbahnen elliptischer und stärker gegen die Ekliptik geneigt als bei den Planeten (etwa um 20° bis 30°).

Zwei Gruppen von Asteroiden, deren Mitglieder als *Trojaner* bezeichnet werden bewegen sich auf annähernd derselben zwölfjährigen Umlaufbahn um die Sonne wie Jupiter. Eine relativ kleine Zahl der Asteroiden hat Umlaufbahnen, die bis in das innere Sonnensystem hineinreichen – darunter auch diejenigen, die als *erdnahe Asteroiden* (Near-Earth-Asteroids) bezeichnet werden, weil sie die Erdumlaufbahn tangieren oder kreuzen.

Zu e.)

Im Asteroidengürtel treten Bahnresonanzen zwischen Asteroiden und Jupiter auf. Diese Resonanzen wirken so, dass Lücken im Asteroidengürtel geöffnet werden. Benötigt beispielsweise ein Asteroid sechs Jahre für einen Umlauf um die Sonne – also die Hälfte der zwölfjährigen Umlaufzeit des Jupiters – dann erhält er alle zwölf Jahre denselben gravitativen Stoß durch Jupiter und wird daher bald seine Umlaufbahn verlassen. Die Bahnresonanzen mit Jupiter erklären vermutlich auch, warum sich niemals ein Planet zwischen Mars und Jupiter gebildet hat.

Lösungen für die Präsentationen der Doppelstunde „Kosmische Objekte“ – „Meteorite“

- a. Welche Fachbegriffe unterscheidet man bzgl. Meteorite?
- b. Welche Arten von Meteorite unterscheidet man?
- c. Wie entstanden primitive Meteorite?
- d. Wie entstanden prozessierte Meteorite?

Zu a.)

Ein **Meteor** ist nur ein Lichtblitz, der durch ein mit hoher Geschwindigkeit in unsere Atmosphäre eintretendes Teilchen hervorgerufen wird, aber nicht das Teilchen selbst. Der größte Teil der Teilchen, die Meteore hervorrufen, sind nicht größer als eine Erbse. Sie verglühen vollständig, bevor sie den Boden erreichen können. Nur in seltenen Fällen wird ein Meteor durch einen Felsbrocken verursacht, der so groß ist, dass er den Sturz durch die Atmosphäre übersteht und als *Meteorit* am Boden auftritt. Ein Meteorit ist also ein richtiger Stein, der zu Boden gestürzt ist.

Zu b.)

Genauere Analysen tausender Meteorite zeigen, dass es zwei unterschiedliche Haupttypen gibt, die jeweils in zwei Untergruppen gegliedert werden können:

- a) **Primitive Meteorite** heißen primitiv, weil sie die erste (primäre) Art von Meteoriten sind, die sich gebildet hatte. Radiometrischer Altersbestimmung zufolge sind sie etwa 4,6 Milliarden Jahre alt. Damit sind sie Überbleibsel der Geburt des Sonnensystems und haben sich seit ihrer Bildung im solaren Urnebel praktisch nicht verändert. Primitive Meteorite haben zwei Unterarten.
 - a. *Primitive Steinmeteorite* bestehen aus Gesteinsmineralien, die mit geringen, aber feststellbaren Anteilen reiner Metallkörper vermischt sind.
 - b. *Primitive kohlenstoffreiche Meteorite* ähneln im Allgemeinen den primitiven Steinmeteoriten, enthalten aber zusätzlich erhebliche Mengen von Kohlenstoffverbindungen. Einige kohlenstoffreiche Meteorite enthalten sogar geringe Mengen Wasser.
- b) **Prozessierte Meteorite** waren allem Anschein nach früher Bestandteile eines größeren Objekts, das die Materie des solaren Urnebels in eine andere Form prozessiert (umgewandelt) hat. Radiometrische Altersbestimmung zeigt, dass prozessierte Meteorite im Allgemeinen einige hundert Millionen Jahre jünger sind als die primitiven Meteorite. Die prozessierten Meteorite können ebenfalls in zwei Untergruppen gegliedert werden.
 - a. *Metallreiche prozessierte Meteorite* bestehen zum größten Teil aus Eisen und Nickel hoher Dichte, vermischt mit geringen Mengen anderer Metalle. Daher ähnelt ihre Zusammensetzung den Kernen terrestrischer Planeten.
 - b. *Steinige prozessierte Meteorite* weisen eine geringere Dichte auf und bestehen aus Gestein in einer Zusammensetzung, die an Mantel und Kruste terrestrischer Planeten erinnert. Einige haben eine Zusammensetzung, die sehr an Basalt irdischer Vulkane erinnert.

Bei einigen Meteoriten scheint die Zusammensetzung aber eher mit derjenigen von Mond und Mars übereinzustimmen. Nach der sorgfältigen Analyse solcher Meteorite sind wir davon überzeugt, dass sie tatsächlich früher Bestandteile des Mondes oder des Mars waren.

Zu c.)

Alle Asteroiden bestehen aus Gestein und Metall. Ab einem Sonnenabstand von drei AE aber waren die Temperaturen niedrig genug, sodass Kohlenstoffverbindungen auskondensieren konnten. Daher müssen sich die kohlenstoffreichen primitiven Steinmeteorite in der Region gebildet haben, die wir heute als die Außenbereiche des Asteroidengürtels bezeichnen, die primitiven Steinmeteorite hingegen eher in dessen Innenbereich.

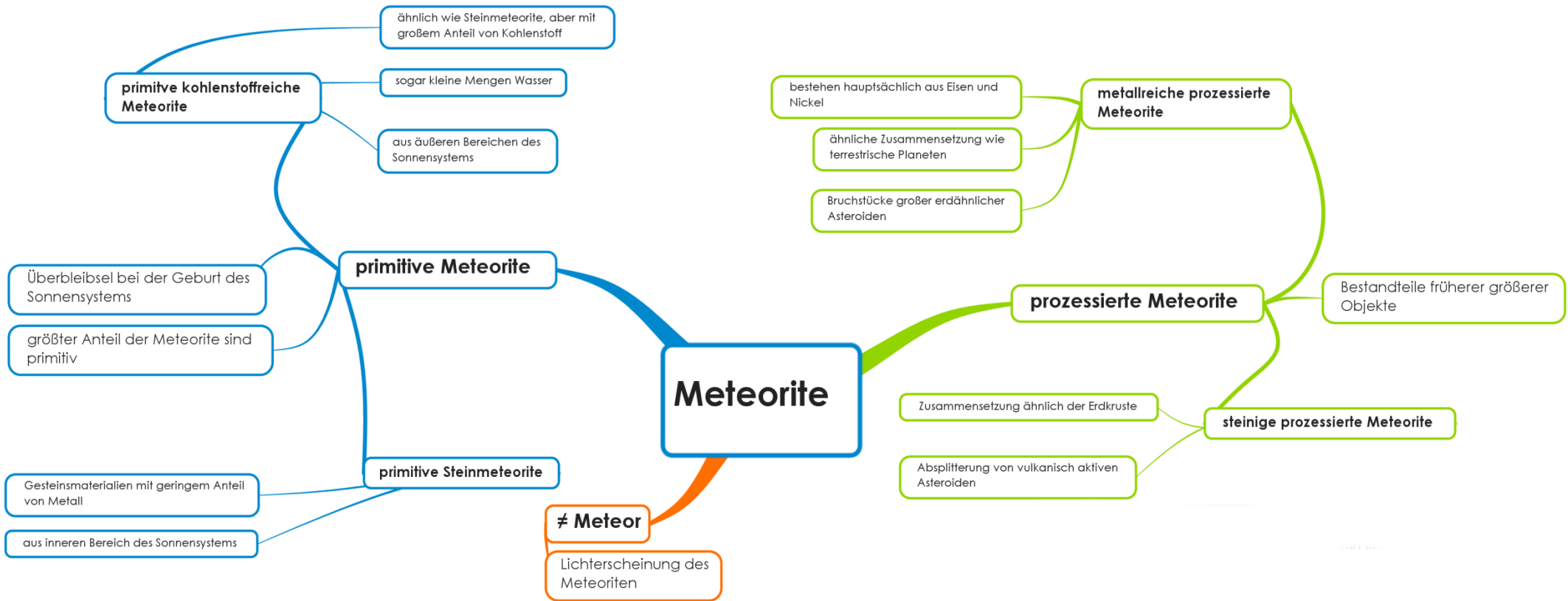
Zu d.)

Ihre Zusammensetzungen ähneln denen des Kerns, des Mantels und der Kruste terrestrischer Planeten. Daher müssen sie Fragmente größerer Asteroiden sein, in denen *Differentiation* aufgetreten ist.

Die steinigen prozessierten Meteorite ähneln in ihrer Zusammensetzung dem vulkanischen Gestein der Erde so sehr, dass sie durch Lavaflüsse entstanden sein müssen. Wir schließen daraus, dass diese Meteorite im Wesentlichen von den Oberflächen von Asteroiden, die früher einmal aktiven Vulkanismus aufgewiesen hatten, abgesplittert sein müssen, möglicherweise bei Kollisionen mit kleineren Asteroiden.

Metallreiche prozessierte Meteorite treten weniger häufig auf. Ihre Zusammensetzung ähnelt denen von Planetenkernen, was darauf hindeutet, dass es sich um Bruchstücke größerer Asteroiden handelt, die bei Kollisionen zertrümmert wurden. Dadurch haben diese Himmelskörper nicht nur die Chance verloren, zu einem Planeten anzuwachsen, sondern haben auch eine große Zahl an Trümmerstücken für Kollisionen mit anderen Asteroiden und Planeten – auch mit der Erde – geliefert.

Mögliche MindMap



Lösungen für die Präsentationen der Doppelstunde „Kosmische Objekte“ – „Kometen“

- a. Wie sind Meteorite aufgebaut?
- b. Aus welchen Teilen setzt sich die Leuchterscheinung zusammen?
- c. Welche Schweife gibt es?
- d. Was sind Meteorschauer und wann kann man diese beobachten?
- e. Aus welchen Regionen des Sonnensystems stammen Kometen?

Zu a.)

Kometen sind im Wesentlichen Brocken aus Eis, vermischt mit Gesteinsstaub und einigen komplexeren Chemikalien. Sie werden deshalb oft als „schmutzige Schneebälle“ bezeichnet.

Kometenspektren zeigen ausnahmslos Emissionslinien von Wasserstoffverbindungen, darunter auch Wasser. Auch Emissionslinien von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid – Gase, die nur in den kältesten und entferntesten Gebieten des solaren Urnebels kondensieren konnten – sind beobachtet worden. Kometenspektren weisen darüber hinaus auf viele komplexe Moleküle hin, darunter einige organische Moleküle.

Zu b.)

In großer Entfernung von der Sonne ist der Komet vollständig gefroren. Bei Annäherung an die Sonne beginnt er Gas und Staub zu verlieren, hat aber immer noch einen zentralen Eisblock, den wir als **Kern** des Kometen bezeichnen. Ein Teil des entweichenden Gases zieht Staubteilchen vom Kern ab, sodass dieses Gas und der Staub eine ausgedehnte staubhaltige Atmosphäre erzeugen, die als **Koma** bezeichnet wird. Die Koma ist viel größer als der Kern, den sie umgibt. Während sich der Komet weiter in das innere Sonnensystem hineinbewegt, wächst die Koma weiter an und schließlich bildet sich als Erweiterung der Koma der Schweif.

Zu c.)

Kometen haben üblicherweise zwei sichtbare Schweife; der eine besteht aus ionisiertem Gas, dem Plasma, der andere enthält Staub. Der **Plasmaschweif** besteht aus Gas, das aus der Koma entweicht. Ultraviolettes Licht der Sonne ionisiert das Gas und der Sonnenwind trägt es in direkter Linie von der Sonne fort. Daher zeigt der Plasmaschweif immer direkt von der Sonne weg. Der **Staubschweif** besteht aus staubgroßen Teilchen, die aus der Koma entweichen. Sie werden nicht vom Sonnenwind wegeweht, sondern vom viel schwächeren Druck des Sonnenlichts (dem *Strahlungsdruck*) in die Richtung von der Sonne weggedrückt.

Neben dem Plasma und dem Staub trägt das aus den Kometen entweichende Gas auch sandkorn- bis kieselsteingroßes Gestein mit sich. Diese Teilchen sind zu groß, als das sie von Sonnenwind oder Sonnenlicht beeinflusst werden konnten; daher treiben sie nur allmählich weg und breiten sich entlang der Umlaufbahn aus. Diese Teilchen bilden im Wesentlichen einen dritten, unsichtbaren Schweif, der dem Kometen auf seiner Umlaufbahn folgt. Dies sind auch die Teilchen, die für die meisten Meteore und Meteoritenschauer verantwortlich sind. (Meteoroiden).

Zu d.)

Noch mehr Kometenstaub tritt während eines Meteorschauers in die Erdatmosphäre ein. Die „dritten Schweife“ aus herausgelösten Teilchen sind hauptsächlich entlang der Umlaufbahnen der Kometen konzentriert. Meteorschauer treten daher auf, wenn die Erde die Bahn eines Kometen durchquert. Weil die Erde die Umlaufbahn eines bestimmten Kometen jedes Jahr zur selben Zeit durchquert, treten Meteorschauer jedes Jahr zur selben Zeit auf. Beispiele dafür sind z.B. die Perseiden im August oder Leoniden im November.

Zu e.)

Wie bereits erwähnt stammen Kometen aus dem äußeren Sonnensystem, aber wir können das noch genauer festlegen. Ihre Umlaufbahnen zeigen, dass sie aus einem Gebiet weit außerhalb der Umlaufbahnen der Planeten stammen – manchmal sogar aus einer Entfernung, die fast einem Viertel der Entfernung zum nächsten Stern entspricht. Diese Kometen stürzen aus einer riesigen sphärischen Region des Weltraums in Richtung Sonne, welche die Wissenschaftler als **Oort'sche Wolke** bezeichnen (Jan Hendrik Oort, 1900 – 1992).

Eine kleinere Anzahl von Kometen zeigt eine andere Verteilung der Umlaufbahnen. Sie umkreisen die Sonne in derselben Ebene und Richtung wie die Planeten und bewegen sich auf elliptischen Umlaufbahnen, die sie bis auf etwa in die doppelte Neptunentfernung tragen. Diese Kometen entstammen einem Ring, der als **Kuiper-Gürtel** bezeichnet wird (Gerard Peter Kuiper, 1905 – 1973).

Lösungen für die Präsentationen der Doppelstunde „Kosmische Objekte“ – „Zwergplaneten und Exoplaneten“

- a. Wie sind Planeten und Zwergplaneten definiert?
- b. Welche Eigenschaften unterscheiden Pluto von den übrigen Planeten?
- c. Wie entdeckt man extrasolare Planeten?
- d. Was kann man von extrasolaren Planeten lernen?
- e. Welche Voraussetzungen braucht ein Planet für die Entstehung von Leben?
- f. Was ist Gliese 581g?

Zu a.)

(1) Ein „Planet“ [1] ist ein Himmelskörper, der (a) sich auf einer Bahn um die Sonne befindet, (b) über ausreichend Masse verfügt, so dass er durch seine Eigengravitation die starren Kräfte besiegt und so ein hydrostatisches Gleichgewicht (eine annähernd runde Form) annimmt und der (c) die Nachbarschaft auf seiner Umlaufbahn gereinigt hat.

(2) Ein „Zwergplanet“ ist ein Himmelskörper, der sich (a) auf einer Bahn um die Sonne befindet, (b) über ausreichend Masse verfügt, so dass er durch seine Eigengravitation die starren Kräfte besiegt und so ein hydrostatisches Gleichgewicht (eine annähernd runde Form [2]) annimmt und der (c) die Nachbarschaft auf seiner Umlaufbahn noch nicht gereinigt hat und der (d) kein Mond ist.

Zu b.)

Wir wissen von Anfang an, dass seine 248 Jahre dauernde Umlaufbahn viel elliptischer und viel stärker gegen die Ekliptik geneigt ist als die jedes anderen Planeten. Pluto ist bisweilen näher an der Sonne als Neptun. Er ist viel kleiner als die terrestrischen Planeten und seine eisreiche Zusammensetzung passt weder zu den terrestrischen noch zu den jovianischen Planeten.

Zu c.)

Im Wesentlichen gibt es zwei Methoden, mit denen extrasolare Planeten entdeckt werden können:

- 1) Direkt: Bilder oder Spektren der Planeten selbst sind direkte Hinweise auf deren Existenz.
- 2) Indirekt: Genaue Messungen von Sterneneigenschaften (etwa ihre Positionen, Helligkeiten oder Spektren) können die Anwesenheit eines Planeten in einer Umlaufbahn enthüllen.

Zu d.)

Zunächst geben uns die Eigenschaften der einzelnen Planeten selbst eine Gelegenheit mehr über die Spannweite der möglichen Planeten zu erfahren. Untersuchungen extrasolarer Planeten könnten uns zeigen, ob die beiden Planetenkategorien (terrestrisch und jovianisch) die einzigen sind oder ob es noch weitere gibt, die in unserem Sonnensystem nicht vorkommen.

Zum anderen kann eine Untersuchung der Anordnungen anderer Planetensysteme etwas darüber aussagen, ob der Aufbau unseres Sonnensystems typisch oder ungewöhnlich ist und ob die Nebularhypothese die Entstehung unseres Sonnensystems wirklich so einfach erklären kann, wie wir das angenommen haben.

Zu e.)

Es gibt nur drei Grundbedingungen für das Leben als solches:

- 1) eine Quelle von Nährstoffen (Elemente und Moleküle) zum Aufbau der Zellen,
- 2) Energie, um die Aktivitäten des Lebens zu ermöglichen, egal, ob sie durch das Sonnenlicht, chemische Reaktionen oder durch die Erdwärme selbst geliefert wird,
- 3) flüssiges Wasser.

Die erste Bedingung an einen Stern, auf dessen Planeten es Leben geben könnte, ist sein Alter. Er muss alt genug sein, damit das Leben überhaupt entstehen konnte. Als zweite Voraussetzung muss der Planet eine stabile Umlaufbahn um den Stern einnehmen können. Eine dritte Bedingung für die Wahrscheinlichkeit einen bewohnbaren Planeten zu finden, ist die Größe der *habitablen Zone* des Sterns – der Region um den Stern, in der ein terrestrischer Planet der richtigen Größe eine Oberflächentemperatur aufweist, die flüssiges Wasser und damit Leben ermöglicht.

Zu f)

Jetzt haben Wissenschaftler einen Planeten um Gliese 581 entdeckt, den sie für erdähnlicher halten als alle anderen bislang entdeckten. Um den 20 Lichtjahre entfernten Stern Gliese 581 kreisen gleich sechs Planeten. Einer zieht seine Bahn in der bewohnbaren Zone des Sterns und ist der bislang erdähnlichste Planet, den die Astronomen aufgespürt haben. Auf der Oberfläche des erdähnlichen Planeten könnte es flüssiges Wasser und damit vielleicht auch Leben geben, so die Wissenschaftler.

Der Planet Gliese 581g hat etwa die dreifache Masse und den 1,2- bis 1,4-fachen Durchmesser der Erde. Trotzdem könnten auf dem Planeten und in den Übergangszonen lebensfreundliche Bedingungen herrschen. Da rote Zwergsterne wesentlich länger eine stabile Strahlungsumgebung bieten als sonnenähnliche Sterne, hätten Lebensformen dort sogar mehr Zeit, um sich zu entwickeln.

Lösungen für die Präsentationen der Doppelstunde „Kosmische Objekte“ – „terrestrische Planeten“

- a. Woher stammt der Mythos der Marsmenschen?
- b. Wie ist die Geologie des Mars aufgebaut?
- c. Welche Eigenschaften hat die Atmosphäre der Venus?
- d. Wie sieht die Oberfläche des Mondes aus?
- e. Wie ist die Oberfläche des Merkurs beschaffen?
- f. Überlegen Sie, warum der Mond keine Atmosphäre aufbauen konnte.

Zu a)

In einem 1784 gehaltenen Vortrag sprach William Herschel mit Bestimmtheit über die „Bewohner“ des Mars. Ein Jahrhundert später erregten die hypothetischen Marsianer erneut Aufmerksamkeit. 1879 hatte der italienische Astronom Giovanni Schiaparelli berichtet, er habe mit seinem Teleskop ein Netz feiner Linien auf dem Mars erkennen können. Er bezeichnete diese Linien als *canali*, das italienische Wort für „Graben“, es wurde jedoch häufig mit „Kanal“ übersetzt. Fasziniert von diesem scheinbaren Hinweis auf intelligentes Leben ... veröffentlichte Lowell detaillierte Karten der Marskanäle und das erste von drei Büchern, in denen er behauptete, die Kanäle wären das Werk einer hoch entwickelten Zivilisation. Er argumentierte, dass Mars einer nachteiligen Klimaveränderung zum Opfer gefallen sei und die Kanäle gebaut worden wären, um Wasser von den Polen zu den durstigen Städten in den anderen Teilen des Planeten zu transportieren. Lowells Werke setzten zügellose Spekulationen über Marsianer in Gang und inspirierte Science-Fiction-Geschichten wie H.G.Wells „Krieg der Welten“ (1898 veröffentlicht).

Zu b)

Neben den Polkappen ist das auffälligste Merkmal, dass es derart dramatische Geländeunterschiede zwischen den verschiedenen Regionen des Mars gibt. Ein Großteil der südlichen Hemisphäre ist hoch gelegen und von vielen großen Einschlagskratern übersät. Im Gegensatz dazu zeigt die nördliche Ebene sehr wenige Krater und liegt überwiegend unter dem mittleren Oberflächenniveau des Mars. Die Unterschiede der Kraterhäufigkeit sagen uns, dass die südlichen Hochländer eine ältere Oberfläche haben als die nördlichen Ebenen, deren frühere Krater durch geologische Prozesse abgetragen worden sein müssen.

Genaueren Untersuchungen zufolge war Vulkanismus der wichtigste Prozess, durch den alte Krater auf dem Mars abgetragen wurden, obwohl auch Tektonik und Erosion eine Rolle gespielt haben. Tiefer greifende Hinweise auf den marsianischen Vulkanismus zeigen verschiedene, hoch aufgetürmte Schildvulkane. Einer von ihnen, der Olympus Mons, ist der höchste bekannte Vulkan des Sonnensystems. Sein Gipfel erhebt sich über 26 Kilometer über das mittlere marsianische Höhenniveau.

Mars weist auch Merkmale der Tektonik auf, allerdings nicht in einem globalen Maßstab wie bei der Plattentektonik der Erde. Die Valles Marineris erstrecken sich am Äquator über beinahe ein Fünftel des Planetenumfangs. Ihre Länge entspricht der Breite des nordamerikanischen Kontinents, sie sind fast viermal tiefer als der Grand Canyon. Teile des Canyons sind auf beiden Seiten von hohen Klippen umgeben.

Zu c)

- Hohe Temperatur
- Hoher Druck
- Die Venusatmosphäre besteht fast vollständig aus Kohlendioxid (CO_2).
- Es gibt so gut wie keinen (reinen) Sauerstoff (O_2).
- Die Dichte beträgt ein Zehntel der Dichte von Wasser
- dichte Atmosphäre
- langsame Rotation der Venus (die 243 Erdtage dauert), daher gibt es nur einen sehr schwachen Coriolis-Effekt.
- Die höchsten Windgeschwindigkeiten betragen etwa sechs Kilometer pro Stunde.
- Es gibt keinen Regen.
- Oberflächentemperatur überall gleich
- Nachts ist es genauso glühend heiß wie am Tag
- keine Jahreszeiten
- Temperaturen bleiben also das ganze Jahr über gleich.

Zu d)

Das auffälligste Merkmal sind die zahlreichen Krater, die belegen, dass auf dem Mond die Entstehung von Einschlagskratern der mit Abstand wichtigste geologische Prozess war. Die geringe Größe erklärt auch das Fehlen einer nennenswerten Atmosphäre und damit der Erosion. Die Schwerkraft ist zu gering, um Gas über längere Zeiträume festzuhalten. Da auch der Vulkanismus fehlt, findet keine Ausgasung statt, welche die in der Vergangenheit verlorenen Gase ersetzen könnte. Gleichwohl zeigt die genauere Untersuchung einige Merkmale auf Mond und Merkur, die vulkanischen Ursprungs sind. Also müssen diese Himmelskörper in der Vergangenheit geologische Aktivität gezeigt haben. Die hellen, dicht mit Kratern übersäten Regionen des Mondes sind die Hochländer. Die flachen, dunklen Gebieten sind die Maria des Mondes.

Während des schweren Bombardements wurde die gesamte Oberfläche des Mondes mit Kratern bedeckt. Die Lava trat erst einige hundert Millionen Jahre später aus, als der Zerfall der radioaktiven Elemente im Mondinneren genügend Wärme aufgebaut hatte. Diese Wärme baute sich im Verlauf der frühen Geschichte des Mondes allmählich auf, bis das Material des Mantels vor drei bis vier Millionen Jahren schmelzen konnte. Das geschmolzene Gestein konnte dann durch die Spalten in der Lithosphäre aufsteigen und die größten Einschlagskrater mit Lava überfluten. Ihre dunkle Farbe haben sie von dem dichten, eisenreichen Gestein (Basalt), das als geschmolzene Lava aus dem lunaren Mantel emporgequollen ist.

Zu e)

Auf dem Merkur sind fast überall Einschlagskrater zu sehen, was auf eine alte Oberfläche hindeutet. Demnach muss geschmolzene Lava einen Teil der Krater überflutet haben, die sich auf dem Merkur während der Phase des schweren Bombardements gebildet hatten. Wie beim Mond sind diese Lavaflüsse erst eingetreten, als sich durch den radioaktiven Zerfall genug Hitze angesammelt hatte, um Teile des Mantels zu schmelzen.

Die überraschendsten Geländemerkmale auf Merkur sind die vielen Steilhänge – sie sind Hinweise auf eine frühere Tektonik, die sich von allem unterscheidet, was wir auf irgendeinem anderen der

terrestrischen Planeten gefunden haben. Die Steilhänge des Merkurs steigen drei oder mehrere Kilometer senkrecht in die Höhe und ziehen sich hunderte Kilometer weit über die Oberfläche. Sie haben sich vermutlich gebildet, als tektonische Kräfte die Kruste stellenweise komprimiert haben, wodurch die Kruste wie Stanniolpapier (Alufolie) zerknittert wurde.

Zu f)

Die Gasmenge, die eine Atmosphäre durch thermisches Entweichen verliert, hängt von der Geschwindigkeit der Gasteilchen ab. Im Allgemeinen sind die Geschwindigkeiten der Teilchen einer bestimmten Art über einen breiten Wertebereich verteilt. Abb. 1 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung (Maxwell-Boltzmann) der Natriumatome bei einer Tagestemperatur von 400K. Das Maximum der Verteilung ist die wahrscheinlichste thermische Temperatur und ist als $v = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ definiert. Man erkennt, dass nach rechts die Anzahl der Atome mit der entsprechenden Geschwindigkeit gegen Null geht, dennoch gibt es statistisch gesehen immer noch Teilchen, die diese Geschwindigkeit annehmen. Ist jetzt z.B. für den Mond die Fluchtgeschwindigkeit $2,4 \frac{km}{s}$, so können wir für die Stoffe Natrium und Wasserstoff die mittleren thermischen Geschwindigkeiten von $0,5 \frac{km}{s}$ und $2,6 \frac{km}{s}$ berechnen. Man sieht in der Graphik, dass für Natrium der Großteil der Gasteilchen nicht schneller als die Fluchtgeschwindigkeit ist, für Wasserstoff jedoch schon. Somit kann der Mond z.B. keine Wasserstoffatmosphäre bilden.⁷²

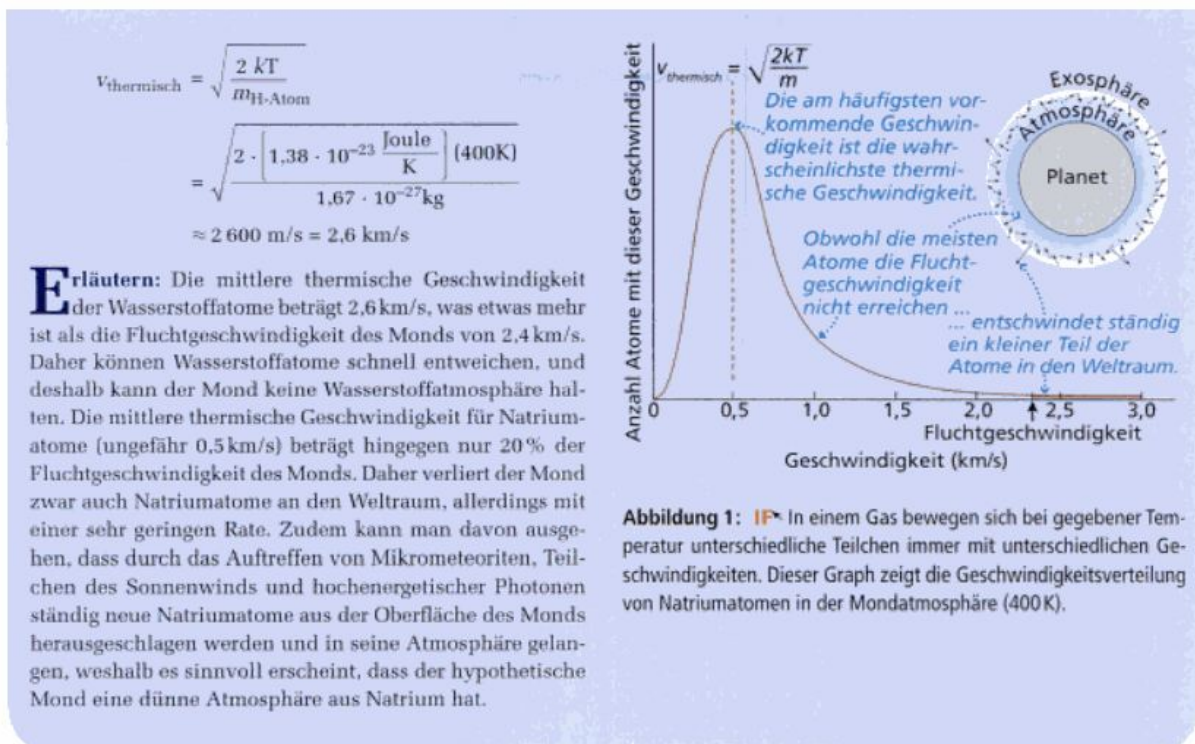


Abb. 1 Diagramm der Geschwindigkeitsverteilung

⁷² [Bennett] S. 432f

4.8 Stunde mit Teleskop

Bei dem in dem Abschnitt behandelten Thema handelt es sich nicht um eine ausgearbeitete Unterrichtseinheit. Hier sollen sich lediglich Anregungen für eine mögliche Erweiterung des herkömmlichen Unterrichtes finden. Im Vordergrund steht dabei die Nutzung entweder eines schuleigenen Teleskopes oder eines einer öffentlichen Einrichtung (Sternwarte, Observatorium, etc.). Dabei können die Schüler dieses für Beobachtungen und kurze Messungen nutzen.

Ein sehr gutes Beispiel dafür ist das Observatorium mit einem hochwertigen 12“-Teleskop des Friedrich-Koenig-Gymnasiums⁷³. Dieses wurde am 18.12.2009 zum Abschluss des Internationalen Jahrs der Astronomie eingeweiht und dient Schülern und Studenten zu wissenschaftlichen astronomischen Beobachtungen. Ebenso ist der Lehrstuhl der Astronomie der Universität Würzburg (Prof. Dr. Karl Mannheim und Dr. Dominik Elsässer) eng in den Betrieb der Sternwarte eingebunden.⁷⁴ Im aktuellen Projekt „Helligkeitsschwankungen aktiver Galaxiekern“⁷⁵ werden periodische Helligkeitsschwankungen gemessen, um so Massen und Abstände binärer schwarzer Löcher zu bestimmen. Weiterhin haben die Schüler u.a. die Möglichkeit, mit Daten der MAGIC-Teleskope auf La Palma die Gammastrahlung von Blazaren⁷⁶ zu messen und eine Verbindung zur aktuellen Forschung herzustellen.

Motivation

Die Ursprünge der Astronomie lagen in der Beobachtung der Bewegungen der Sterne und der Planeten, wobei man davon ausging, dass die Erde als Mittelpunkt des Universums in Ruhe ist und alle Himmelskörper sich um diese drehen. In der Antike entstanden in vielen Hochkulturen präzise Beobachtungen, nach denen die Menschen ihr Leben richteten.

Die Beobachtung der Planeten mittels optischer Instrumente begann mit Galileo Galilei (1564 – 1642), als er das von ihm erfundene Teleskop auf Jupiter richtete und dessen Monde entdeckte.

Die Schüler sollen nun ebenfalls mittels eines modernen Teleskops die Planeten beobachten und einfache Messungen vornehmen.

Die Unterrichtsstunde hängt sehr von mehreren Faktoren ab:

- a) Das Auflösungsvermögen des Teleskops, d.h. wie viele Details auf den Himmelskörpern wie Mars, Venus oder Jupiter zu sehen sind.
- b) Die vorhandene Zeit, die zum Beobachten zur Verfügung steht: Haben Schüler nur eine einmalige Gelegenheit, Himmelskörper zu beobachten oder sind sogar Messungen mittels Aufnahmegeräten wie CCD-Kameras über einen längeren Zeitraum möglich.

⁷³ Naturwissenschaftlich-technologisches, Sprachliches, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliches Gymnasium-Friedrichstraße 22 - 97082 Würzburg

⁷⁴ [FKG1] 27.07.2012

⁷⁵ [FKG2] 27.07.2012

⁷⁶ blazing quasi stellar objects

- c) Die Jahreszeit, d.h. welche Objekte sind zu der entsprechenden Jahreszeit am Nachthimmel zu sehen.

Die vorhergegangenen Stunden lieferten einen Überblick über das Sonnensystem, jedoch waren sie lediglich auf „theoretischer“ Basis, d.h. es wurden selbst keine Messungen oder Versuche durchgeführt. Somit stehen die Schüler oftmals vor der Frage „Was habe ich mit Planeten zu tun?“, wenn sie nicht gerade an Astrologie glauben. Das Aufzeigen von Bildern erzeugt auch nicht den gleichen Effekt wie eigene Beobachtungen. Daher kann der Blick durch das Teleskop und das eigene Erkennen der Planeten einen viel intensiveren Bezug und eine größere Faszination zum Thema „Sonnensystem“ herstellen als jegliche Bilder oder Animationen.

Richt-, Grob- und Feinziele

Da zu dieser Unterrichtseinheit keine inhaltlichen Lernziele angegeben sind, soll nur aufgelistet werden, welche Ziele verfolgt werden könnten:

- Bei Langzeitbeobachtungen lernen Schüler neben wissenschaftlichem Arbeiten (Beobachten, Messen, Auswerten) auch die Handhabung von Teleskopen und deren vielfältige Einsatzmöglichkeiten kennen.
- Bei kurzzeitigen Beobachtungen lassen sich z.B. Mondkalender aus der Beobachtung des Mondes erstellen oder die Umlaufzeiten der Jupitermonde messen.
- Bei einmaligen Beobachtungen erhalten Schüler einen Blick auf die Himmelskörper, die bisher nur theoretisch behandelt wurden.

Die nicht-inhaltlichen Lernziele sind:

- Umgang mit wissenschaftlichen Geräten wie Teleskop
- Messungen selbstständig planen und ausführen
- Ausdauer bei Messungen, da astronomische Körper sich langsam bewegen (z.B. Umlaufzeiten)
- Auswerten und Beurteilung von gemessenen Daten
→ wissenschaftliches Arbeiten

Lernvoraussetzung

Zu den Lernvoraussetzungen gehören, je nachdem, welches Thema man behandelt, das Wissen der vorangegangenen Stunden, geometrische Grundkenntnisse und die Fähigkeit, Daten aufzunehmen, auszuwerten und auch zu bewerten.

Unterrichtsverlauf

Es lassen sich verschiedene Beobachtungen machen:

- Mondphasen: Man kann mittels Beobachtung der Mondphasen einen Mondkalender erstellen.
- Mondoberfläche: Man sucht auf einer Mondkarte die verschiedenen Meere oder die Landestellen der Apollo-Missionen.
- Mondfinsternisse: Beim Durchgang des Sonnenschattens über die Mondoberfläche erkennt man, dass der Erdschatten nicht eine scharfe, sondern eine unscharfe Begrenzung aufweist. Dies liegt an der Erdatmosphäre. Ebenso ist die Mondfinsternis durch die Atmosphäre länger als berechnet.
- Sonnenfinsternis: Es ist selten, eine totale Sonnenfinsternis in Mitteleuropa zu erleben. Die nächste findet erst im Jahr 2081 statt. Ringförmige Sonnenfinsternisse sind häufiger, sodass sich eventuell sogar eine Möglichkeit der Beobachtung ergibt.
- Venustransit: Eine der seltensten Phänomene ist der Venustransit. Der letzte fand am 5./6. Juni 2012 statt, der nächste erst wieder im Jahre 2117.
- Planetenbeobachtung: Merkur, Venus, Mars, Jupiter, Saturn
- Messung der Umlaufzeiten der Jupitermonde (Io und Europa haben Umlaufzeiten von knapp 4 Tagen, d.h. in einer klaren 12-Stunden-Winternacht kann man bereits große Änderungen der Position feststellen.
- Beobachtung der Marsschleife

Unterrichtsmaterial

Da diese Stunde nach Vorstellung des Lehrers und der Schüler und in Abhängigkeit der technischen Möglichkeiten gestaltet werden kann, sind hier keine konkreten Unterrichtsmaterialien angegeben. Jedoch werden einige Bücher und interessante Links aufgeführt, die Anregung für die Gestaltung einer oder mehrere Unterrichtseinheiten bieten.

- Zimmermann, Otto – Astronomisches Praktikum – Spektrum Akademischer Verlag , 6. Auflage, Heidelberg, Berlin 2003
- Kirchner, E.; Girwidz, R.; Häußler, P.; Physikdidaktik – Theorie und Praxis; Springer-Verlag Berlin, Heidelberg; Zweite Auflage 2009, Kapitel 14
- Diverse Stern- bzw. Planetenführer
- <http://www.schoollab.dlr.de/> (01.09.2012)

5 Zusammenfassung

Die hier vorliegenden Unterrichtsstunden geben dem Lehrer die Möglichkeit, Schülern auf vielfältige Weise die Astronomie und vor allem das Sonnensystem nahezubringen. Dabei wurde insbesondere auf den Einsatz unterschiedlichster Methoden eingegangen. So kamen bei den Unterrichtsstunden beispielsweise Präsentationen, Arbeitsblätter mit Lückentext, MindMaps, Quizfragen und Tabukarten zum Einsatz. Es wurden verschiedene Medien wie Videos, Landkarten, Computer und Internet, Graphiken und Arbeitsblätter bei mehreren Stunden verwendet. Die Schüler arbeiten sowohl in Einzel-, als auch in Gruppenarbeit oder als ganze Klasse zusammen an einem Thema. Sie müssen sich unter anderem in schwere Sachverhalte einarbeiten, Graphiken und Daten auswerten, Hypothesen aufstellen und bewerten, Herleitungen von Formeln verstehen und diese beim Lösen von Aufgaben anwenden können, in Gruppen Sachtexte analysieren und diese vor der Klasse präsentieren. Sie sollen wissenschaftliches Arbeiten lernen.

Dadurch erfahren Schüler auf verschiedene Art und Weise, dass das Sonnensystem ein Ort von vielfältigen Objekten ist, die alle ihre Rolle im Laufe der Geschichte gespielt und dazu beigetragen haben, dass das Sonnensystem so aussieht, wie wir es heute kennen.

Subjektiv gesehen sind die Unterrichtsstunden unter dem zeitlichen Aspekt nicht einfach durchzuführen, da im Schulalltag nicht immer die vollen 45 Minuten zur Verfügung stehen. Daher ist eventuell eine vor- oder nachbereitende Hausaufgabe des Stoffes empfehlenswert. Eine Kürzung des Inhaltes würde jedoch den Schülern viele spannende Aspekte im Sonnensystem vorenthalten. Ebenso hängt das Gelingen von der Begeisterung der Schüler für das Fach und ihrer Mitarbeit ab.

6 Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist es nicht möglich Aussagen über die praktische Durchführung der vorliegenden Unterrichtsstunden zu machen. Es ist daher geplant im Rahmen der Zulassungsarbeit die Unterrichtsstunden zu evaluieren, um diese dann anhand der Ergebnisse zu korrigieren und zu verbessern.

Der bisherige Plan sieht vor engagierten Lehrern im Bezirk Unterfranken die Unterrichtsstunden zukommen zu lassen. Diese werden nach eigenem Einschätzen zumindest einen Teil dieser Stunden halten und danach ein Feedback geben. Ebenso soll die Meinung der Schüler mittels Fragebogen über die Konzeption, d.h. den Inhalt, den logischen Aufbau, die anschauliche Darstellung, den Anspruch und die Methodenvielfalt erfragt werden.

7 Danksagung

- Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich immer bedingungslos unterstützt haben.
- Die vorliegende Bachelorarbeit entstand am Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik der Universität Würzburg unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Thomas Trefzger. Ihm danke ich für die Möglichkeit an seinem Lehrstuhl unter sehr guten Bedingungen arbeiten zu dürfen.
- Ebenso bedanke ich mich recht herzlich bei Dr. Stephan Lück für die Unterstützung und Beratung.
- Für eine ausgesprochen angenehme Arbeitsatmosphäre und ein kollegiales Arbeitsklima möchte ich mich schließlich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls bedanken. Ohne sie hätte die Arbeit nur halb so viel Spaß gemacht.

8 Literaturverzeichnis

- **[Astronews]** Artikel über Exoplaneten von Gliese581:
<http://www.astronews.com/news/artikel/2010/09/1009-040.shtml> (17.08.2012)
- **[Bennett]** Bennett, Jeffrey et.al.; Astronomie: Die kosmische Perspektive; Pearson Studium; 5. Auflage;
- **[Comins]** Comins, Neil F.; Astronomie – Eine Entdeckungsreise zu Sternen, Galaxien und was sonst noch im Kosmos ist; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2011
- **[FKG1]** Internetauftritt der Sternwarte des Friedrich-Koenig-Gymnasiums:
<http://labor.fkg-wuerzburg.de/?p=Sternwarte> (20.08.2012)
- **[FKG2]** Aktuelles Forschungsgebiet der Sternwarte des Friedrich-Koenig-Gymnasiums:
<http://labor.fkg-wuerzburg.de/?p=Sternwarte/Helligkeitsschwankungen%20aktiver%20Galaxienkerne> (20.08.2012)
- **[IAU]** Internetauftritt der IAU, Definition des Begriffes „Planet“:
http://www.iau.org/public_press/news/detail/iau0603/ (12.08.2012)
- **[IYU]** Internetauftritt des Internationalen Jahres der Astronomie 2009:
<http://www.astronomy2009.de/> (23.08.2012)
- **[Hand]** Grundlagen der Astrophysik – Handreichung für den Unterricht der gymnasialen Oberstufe; Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München, Brigg Pädagogik Verlag GmbH, Augsburg 2009
- **[Kirchner]** Kirchner, E.; Girwidz, R.; Häußler, P.; Physikdidaktik – Theorie und Praxis; Springer-Verlag Berlin, Heidelberg; Zweite Auflage 2009
- **[LP Phy12]** Lehrplan Physik Jahrgangsstufe 12:
<http://www.isb.bayern.de/isb/index.aspx?MNav=0&QNav=11&TNav=0&INav=0&Fach=16&VTyp=6> (16.08.2012)
- **[LP Phy10]** Lehrplan Physik Jahrgangsstufe 10:
<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26439> (16.08.2012)
- **[LP Geo5]** Lehrplan Geographie Jahrgangsstufe 5:
<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26335> (16.08.2012)
- **[LP Ev5]** Lehrplan Evangelische Religionslehre Jahrgangsstufe 5:
<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26327> (16.08.2012)
- **[LP M10]** Lehrplan Mathematik Jahrgangsstufe 10:
<http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26221> (16.08.2012)
- **[Meyer]** Meyer, Hilbert – Was ist guter Unterricht? – Cornelson Verlag Skriptor, Berlin 2004
- **[PidS]** Praxis der Naturwissenschaften – Physik der der Schule – Astronomie – Heft 2/58 * März 2009 - Aulis Verlag Deubner – Köln und Leipzig
- **[Stand]** Bildungsstandards für Physik (S. 184 ff):
http://www.bildung-staerkt-menschen.de/service/downloads/Bildungsstandards/Gym/Gym_Ph_bs.pdf (28.08.2012)
- **[TBBT]** The Big Bang Theory:
http://www.cbs.com/shows/big_bang_theory/ (23.08.2012)
- **[WIS0409]** Bahnen niedriger Energie (S. 30ff):
<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/bahnen-niedriger-energie/1050254> (14.08.2012)
- **[WIS0312]** Swing-by-Manöver – Ein Thema für die Schule (S. 22)
<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/swing-by-manoever-ein-thema-fuer-die-schule/1050265> (14.08.2012)
- **[Zimmermann]** Zimmermann, Otto – Astronomisches Praktikum – Spektrum Akademischer Verlag , 6. Auflage, Heidelberg, Berlin 2003

9 Verzeichnis

Liste der verwendeten Programme:

GeoGebra:	http://www.geogebra.org/cms/
Google Earth:	http://www.google.com/earth/index.html
Google Maps:	http://maps.google.de/
Microsoft Office®, speziell Excel:	http://office.microsoft.com/de-de/excel/
Apache OpenOffice™, speziell Calc:	http://www.openoffice.org/de/product/calc.html
Mindmap:	kein spezielles Programm
DynaGeo:	http://www.dynageo.de/

Anhang A: Zusätzliche Referatsthemen:

(Dauer ca. 5-10 Minuten, Partnerarbeit möglich)

0. Thema

hilfreiche Stichworte für Schüler

[inhaltliche Themen]

1. Vulkanismus im Sonnensystem

Was ist Vulkanismus, welche Voraussetzungen braucht man?

Gibt/gab es im Sonnensystem Vulkanismus? In welchen Formen liegt er vor?

[Verbindung zu Geographie, Vulkanismus auf Io und Enceladus, Kryovulkanismus, Bezug zur Entstehung von Leben, ...]

2. Atmosphäre

Warum besitzen manche Planeten eine Atmosphäre? Welche physikalischen Eigenschaften muss dieser Planet haben? Warum braucht die Erde eine Atmosphäre? Bei welchen Ereignissen tritt die Atmosphäre besonders in Erscheinung?

[Aufbau und Bestandteile der Atmosphäre, Vergleich einzelner Planeten, Atmosphäre als Schutzschild der Erde, Polarlichter, Rotfärbung bei Mondfinsternis, Venustransit, Huygens, Leben auf anderen Planeten, ...]

3. Wirbelstürme

Wie entstehen Wirbelstürme? Untersuchen Sie die Entstehung der roten Flecken auf Jupiter.

[Wiederholung Corioliskraft, Beobachtung der Wirbelstürme auf Jupiter, ...]

4. Tage und Jahreszeiten

Wie entstehen Jahreszeiten auf der Erde? Wie wirken sie auf das Klima eines Planeten? Was versteht man unter einem Tag? Welche Planeten haben besonders lange Tage? Wie lange ist ein Tag auf dem Mond?

[Wiederholung von Jahreszeiten, Neigung der Erde, unterschiedliche Definitionen von Tag, Vergleich von Planeten und Monden, ...]

5. Sonnenwinde

Was sind Sonnenwinde? Aus welchen Teilchen bestehen sie? Wie beeinflussen sie die Erde?

[Wiederholung von Teilchen, Auswirkungen auf Erde, Schutz des Erdmagnetfeldes, Polarlichter, Störung von Nachrichtensatelliten, Einfluss auf Schweif von Kometen, ...]

Anhang B: Beschreibung der Begleit-CD

Die Begleit-CD zu der vorliegenden Bachelorarbeit enthält folgende Dateien:

- **Abituraufgaben:**
Aufgaben der vergangenen Jahrgänge im Grund- bzw. Leistungskurs und Q12.
- **Programme:**
 - o Celestia 1.6.1: Anwendungssoftware für aktuelle Bilder bzw. Simulationen von Himmelskörpern.
 - o DynaGeo 3.7: Anwendungssoftware für dynamische Geometrie.
 - o GeoGebra 4.0.38.0: Software zur Erstellung und Berechnung mathematischer Figuren.
 - o Gimp 2.8: kostenloses und freies Bildbearbeitungsprogramm.
 - o Planetarium 12: sehr gutes Programm für die Berechnung der aktuellen Positionen von Himmelskörpern, enthält Himmelskarten und detaillierte Graphiken; persönlicher Favorit.
 - o Stellarium 0.11.3: Anwendungssoftware zur Berechnung der aktuellen Positionen von Sternen und Planeten.
- **Unterrichtsmaterial:**
In einzelnen Ordnern die erstellten und verwendeten Unterrichtsmaterialien der jeweiligen Unterrichtsstunden.
- **Zusatzmaterial:**
Filme bzw. Videos und PDFs von *Wissen in die Schule!* zur Vertiefung des Unterrichtsstoffes. Zwei Videos sind englischsprachig, jedoch sehr aufschlussreich.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keinem anderen Prüfungsamt vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift