

Alexander Staidl

AstroSkript

Eine Einführung in die Astronomie

Teil 1: Ein erster Überblick

1. Auflage
12. Februar 2008
(Korrigiert am 05. Januar 2009)

Korrigierte Version

Vor einem knappen Jahr wurde die erste Auflage des AstroSkript Teil 1 veröffentlicht. Viele aufmerksame Leser haben Fehlerverzeichnisse erstellt und dem Autor zugesendet. All diesen Lesern sei gedankt - ihr Engagement schlägt sich in der vorliegenden, korrigierten Version des AstroSkripts nieder. Besonderer Dank geht dabei an Herrn Armin Moritz und Herrn Christian Weis.

Auch für die vorliegende Version des ersten Teils des AstroSkripts sollen sich die Leser ermutigt fühlen, dem Autor Kritiken und Anregungen zuzusenden. Kontaktdaten befinden sich am Ende des Skripts.

Alexander Staidl

Sinn, den 05. Januar 2009

Vorwort

Die Astronomie gehört zu den ältesten Wissenschaften der Welt. Kaum eine Kultur der Vergangenheit konnte sich der vom funkelnden Sternenhimmel ausgehenden Faszination entziehen, und so fanden viele Himmelsbeobachtungen Einzug in Mythen, Bräuche, Religionen, Zeit- und Kalenderrechnungen.

Bis heute hat die Wirkung astronomischer Objekte auf den Menschen nicht nachgelassen - im Gegenteil: Durch die mediale Präsenz von Themen aus der Astronomie und durch die Verfügbarkeit von Fotografien astronomischer Motive sind astronomische Fragestellungen fester Bestandteil des gesellschaftlichen Diskurses. Um jedermann eine Teilnahme an dem Diskurs zu ermöglichen, ist die Existenz *frei* verfügbarer Literatur, welche die zur kritischen Auseinandersetzung mit dem Thema notwendigen Kenntnisse vermittelt, unabdingbar.

Dem Wort »frei« kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu. Der Nutzen eines Werkes für die Gesellschaft ist genau dann maximal, wenn jedes Mitglied der Gesellschaft, unabhängig von dessen sozialer Situation, im gleichen Maße Zugriff auf das Werk hat. Eine Realisierung dieses Idealzustandes ist sicherlich aufgrund der Komplexität sozialer Zusammenhänge schwierig bis unmöglich. Sie kann jedoch durch die weitestgehende Absenkung von Verfügbarkeits- und Kostenbarrieren begünstigt werden.

Von diesen Gedanken geleitet entstand das vorliegende Buch. Es handelt sich hier um den ersten veröffentlichten Teil der AstroSkript-Reihe und beinhaltet *einen Überblick* über Theorie und Praxis der Astronomie:

Im ersten Kapitel geht es um unser Sonnensystem, die darin enthaltenen Himmelskörper sowie dessen Umgebung im Universum. Das Wissen, welches über unser Sonnensystem existiert, ist bis zur Gegenwart derart angewachsen, dass es Bände füllen könnte. Da eine intensive Behandlung den Rahmen dieses Kapitels sprengen würde, wird nur eine Auswahl der wichtigsten Informationen und Zusammenhänge berücksichtigt. Der gesamte Text ist mit Hinweisen gespickt, die zur Beobachtung zugehöriger Objekte anregen sollen. Charakteristische Planeteneigenschaften werden jeweils in tabellarischer Form zusammengefasst.

Das zweite Kapitel ist ein Kapitel der Praxis und beinhaltet das für Himmelsbeobachtungen wichtige Wissen über Sternkarten, Teleskope und virtuelle Planetarien. Das Planetarium *Cartes du Ciel* wird in einem eigenen Abschnitt behandelt. Eine Version des Programms ist der gebundenen Fassung dieses Buch beigelegt und kann zur Vorbereitung von Beobachtungsabenden genutzt werden. Am Ende des zweiten Kapitels befindet sich ein umfangreiches Tabellenwerk über Sternbilder, besonders lohnenswerte Beobachtungsobjekte und besondere Himmelsereignisse wie Finsternisse und Sternschnuppenregen.

Sterne, deren Eigenschaften, Entstehung und Entwicklung stehen im Mittelpunkt des dritten und letzten Kapitels. Auch populäre und in den Medien häufig anzutreffende Themen wie Schwarze Löcher, Neutronensterne und Supernova-Explosionen werden hier auf solider Basis erklärt. Abgeschlossen wird das Kapi-

tel mit einem Abschnitt über Doppelsterne und sogenannte Veränderliche.

Mit dem vorliegenden Buch und der AstroSkript-Reihe möchte der Verfasser einen Beitrag zur freien Bildung leisten. Zur Absenkung der Verfügbarkeits- und Kostenbarriere lässt sich das Werk unter dem Link

www.promathika.lazarusforum.de/astroskript1.pdf

im Internet kostenfrei herunterladen. Desweiteren ist es jedem gestattet, das gesamte Buch oder Auszüge daraus zu kopieren, zu vervielfältigen und Dritten verfügbar zu machen. Aufgrund der Rechte der verwendeten Abbildungen muss dabei der angehängte Lizenztext beachtet werden.

Den folgenden Personen sei herzlich gedankt:

- Finn Henseleit, der einen Artikel über Okulare für Kapitel 2 schrieb und bei fachlichen Fragen weiter half.
- Johannes Müller vom Deutschen Lazarusforum (www.lazarusforum.de), der die elektronische Fassung des Buches auf seinem Server hostet.
- Manfred Müller und Wolfgang Ransburg für die Zurverfügungstellung hochwertiger Illustrationen und Abbildungen.
- Arthur Schmidt, Martina Klimpke-Junker, Christian Weis, Swen Heinig und Gerd Gühne sowie den Mitgliedern der Astronomie-AG des Johanneum Gymnasium Herborn Muharrem Akin, Christian Eichmann, Genadij Etus, Jan Koch, Lars Köhler, Constantin Ospald, Sebastian Pfeiffer, Johannes Sedlaezek und Dominik Steinmetz für die unzähligen Korrekturen und Verbesserungsvorschläge.

Schließlich sei noch die Hoffnung ausgesprochen, dass dieses Werk dazu in der Lage ist, Interesse für die Astronomie zu wecken und zu Himmelsbeobachtungen anzuregen.

Sinn im Februar 2008

Alexander Staidl
(Der Verfasser)

Inhaltsverzeichnis

1 Planeten, Sterne, Galaxien.....	8
1.1 Das Sonnensystem.....	8
Exzentrizität.....	9
Draufsicht und seitliche Ansicht.....	9
Inklination.....	10
Rotationsachse/Drehachse.....	11
Jahr und Tag.....	11
Astronomische Einheit (AE).....	11
Erklärung des Tabelleninhalts:.....	12
1.1.1 Die Sonne.....	13
Beispiel: Eine Volumenbetrachtung.....	14
1.1.2 Der Merkur.....	14
1.1.3 Die Venus.....	15
1.1.4 Die Erde.....	17
Die Jahreszeiten.....	17
Der innere Aufbau der Erde.....	18
Das Magnetfeld der Erde.....	19
Unser Mond.....	21
1.1.5 Der Mars.....	23
1.1.6 Der Jupiter.....	24
1.1.7 Der Saturn.....	25
1.1.8 Der Uranus.....	26
1.1.9 Der Neptun.....	27
1.1.10 Der Pluto.....	28
1.2 Die Umgebung des Sonnensystems.....	28
Der große Attraktor.....	31
1.3 Weitere Bestandteile und Ereignisse des Sonnensystems.....	32
1.3.1 Asteroiden und der Asteroidengürtel.....	32
1.3.2 Kometen.....	33
1.3.3 Mondfinsternisse.....	34
1.3.4 Sonnenfinsternisse.....	35
2 Beobachtung astronomischer Objekte.....	36
2.1 Orientierung am Nachthimmel.....	36
2.1.1 Sternbilder.....	36
2.1.2 Sternkarten, Rektaszension und Deklination.....	37
2.1.3 Sternbilder als Orientierungshilfen.....	38
2.2 Wichtige Begriffe.....	39
Zenit.....	39
Ekliptik.....	39
Tierkreis.....	40
Elongation.....	40
Quadratur.....	40
Opposition und Konjunktion.....	40
Scheinbare und absolute Helligkeit.....	41
Virtuelle Planetarien.....	43
Universalzeit (UT), Mitteleuropäische Zeit (MEZ), Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ).....	45
2.3 Teleskope.....	45

2.3.1 Funktionsweise eines Linsenteleskops.....	46
Bikonvexlinsen im Strahlenmodell.....	46
Abbildungen mit Bikonvexlinsen.....	49
Funktionsweise eines Linsenteleskops.....	50
Die Winkelvergrößerung eines Teleskops.....	54
Das Öffnungsverhältnis eines Teleskops.....	55
Lichtsammelvermögen eines Teleskops.....	55
2.3.2 Linsenteleskope - Refraktoren.....	56
2.3.3 Spiegelteleskope - Reflektoren.....	57
2.3.4 Das Newton-Teleskop.....	57
Newton: Vor- und Nachteile.....	57
2.3.5 Schmidt-Cassegrain Teleskop.....	58
Schmidt-Cassegrain: Vor- und Nachteile.....	59
2.3.6 Maksutov-Cassegrain Teleskop.....	59
Maksutov-Cassegrain: Vor- und Nachteile.....	59
2.3.7 Teleskopmontierungen.....	60
Azimutale Montierung.....	60
Parallaktische Montierung.....	61
2.3.8 Das Okular.....	61
2.3.9 Spektroskopie.....	62
Spektralzerlegung.....	62
Spektralklassen.....	63
2.4 Cartes du Ciel (CDC) - ein virtuelles Planetarium.....	64
2.4.1 Installation von Cartes du Ciel.....	64
2.4.2 Konfiguration von Cartes du Ciel.....	65
2.4.3 Handhabung und Besonderheiten von Cartes du Ciel.....	66
2.5 Tabellen.....	67
2.5.1 Liste der Sternbilder.....	67
2.5.2 Der Messier Katalog.....	69
2.5.3 Liste der Meteorströme.....	73
2.5.4 Mondfinsternisse 2007 - 2020	74
2.5.5 Sonnenfinsternisse 2007 - 2021.....	74

3 Sterne: Von der Geburt bis zum Tod.....75

3.1 Physikalische Vorbemerkungen.....	75
3.1.1 Die vier Grundkräfte.....	75
Die Gravitationskraft:.....	75
Die elektrischen und magnetischen Kräfte (= elektromagnetische Wechselwirkungen).....	76
Die starke Kernkraft.....	77
Die schwache Kernkraft.....	77
Die vier Grundkräfte im Vergleich.....	77
3.1.2 Vorbemerkungen zur Thermodynamik.....	78
Wärmetransport.....	79
3.2 Die Entstehung von Sternen.....	80
3.2.1 Musterexemplare.....	84
3.2.2 Kernfusion und die Entwicklung zum stabilen Stern.....	86
Das Wasserstoffbrennen.....	86
3.3 Die weitere Entwicklung eines Sterns.....	88
Sterne mit geringer Masse (0,08 bis 0,26 Sonnenmassen).....	88
Sterne mit mittlerer Masse (0,26 - 2,5 Sonnenmassen).....	88
Sterne mit großer Masse (>2,5 Sonnenmassen).....	91










3.3.1 Schwarze Löcher.....	94
3.4 Besondere Sterne und Sternsysteme.....	97
3.4.1 Doppel- und Mehrfachsternsysteme.....	97
Optische Doppelsterne:.....	97
Physische Doppelsternsysteme:.....	97
3.4.2 Veränderliche Sterne.....	98
Optische Veränderliche:.....	98
Physische Veränderliche:.....	100
4 Lizenzen und Bildquellen.....	105
4.1 Verwendete Abbildungen und deren Lizenzen.....	105
4.2 Lizenz des AstroSkripts.....	111

1 Planeten, Sterne, Galaxien

1.1 Das Sonnensystem

Unser Sonnensystem besteht aus einem Zentralstern, der Sonne, insgesamt acht Planeten, einschließlich deren Monde, sowie unzähligen Asteroiden und Kometen.

Der Reihe nach - von der Sonne aus - lauten die Planeten:

Name	Merkur	Venus	Erde	Mars	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun	(Pluto)
Symbol									

Die zugehörigen Symbole dienen der schnellen Identifizierung der Planeten auf *Sternkarten*.

Die Reihenfolge der Planeten kann man sich mit folgender Eselsbrücke leicht merken:

"Mein Vater Erklärt Mir Jeden Samstag Unsere Neun (Planeten)"

Vor dem Jahr 2006 bezeichnete man **9** Himmelskörper des Sonnensystems als Planet: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun *und* Pluto. Im Jahr 2003 wurde ein Felsbrocken mit einem beachtlichen Durchmesser von 1700 km in 90-facher Erdentfernung (von der Sonne) gesichtet, und schon bald breiteten sich Gerüchte aus, ein "zehnter Planet" sei entdeckt: *Sedna*.

In den Jahren darauf wurden weitere solche große Felsbrocken gefunden, die alle etwa die Größe von Pluto haben, und die Sonne im erheblichen Abstand umkreisen. Da man all diese Felsbrocken nicht zu den Planeten hinzu zählen wollte, wurden Stimmen laut, den Begriff „Planet“ neu zu definieren.

Am 24. August 2006 wurde daraufhin der Begriff „Zwergplanet“ für Objekte wie Sedna eingeführt. Auch Pluto zählt mit der neuen Definition nicht mehr zu den Planeten, sondern ebenfalls zu den Zwergplaneten. Wir werden ihn in diesem Text aus historischen Gründen weiterhin wie einen richtigen Planeten behandeln.

In der folgenden Abbildung 1 werden die Planeten des Sonnensystems zusammen mit der Sonne und einigen Zwergplaneten maßstabsgetreu nebeneinander dargestellt. Im Vergleich zum Jupiter - oder gar zur Sonne - handelt es sich bei unserem Heimatplaneten Erde offenbar nur um einen Punkt im Sonnensystem.



Abbildung 1: Sonne mit den 8 Planeten des Sonnensystems - maßstabsgetreu in der Größe

Die Planeten bewegen sich wegen der anziehenden Wirkung der *Schwerkraft* (=Gravitation) auf elliptischen Umlaufbahnen um die Sonne. Die Umlaufbahnen aller Planeten des Sonnensystems liegen ungefähr in einer Ebene. Auch die Sonne und die Erde befinden sich in dieser Ebene.

Das Sonnensystem bietet für Astronomie-Einsteiger eine Fundgrube an Objekten, die eine Beobachtung lohnenswert machen:

Bis auf wenige Ausnahmen lassen sich fast alle Planeten des Sonnensystems schon mit einfachen Mitteln beobachten. Besonders beeindruckende Himmelskörper sind Mars, Jupiter und Saturn, welche zudem leicht aufzufinden sind und sogar mit kleineren Teleskopen beobachtet werden können. Daneben gibt es unzählige Asteroiden und Kometen, deren Bahnen man verfolgen und aufzeichnen kann. Die Sonne selbst darf nur mit spezieller Ausrüstung beobachtet werden, sonst droht Erblindungsgefahr!

Im Folgenden werden die Planeten des Sonnensystems vorgestellt. Hierzu müssen zuvor noch einige Begriffe geklärt werden.

Exzentrizität

Wie bereits erwähnt, bewegen sich die Planeten auf festen, elliptischen Bahnen um die Sonne (vgl. Skizze). Die Abweichung der Bahn eines Planeten von einer Kreisbahn nennt man **Exzentrizität**. Je kleiner die Exzentrizität eines Planeten ist, desto mehr ähnelt seine Umlaufbahn einem Kreis.

In den beiden rechten Darstellungen (Abb. 2) sind die Umlaufbahnen eines Planeten um das gelbe Zentralgestirn dargestellt. In diesem Fall hat, leicht sichtbar, die Bahn des oberen Planeten eine größere Exzentrizität als die Bahn des unteren.

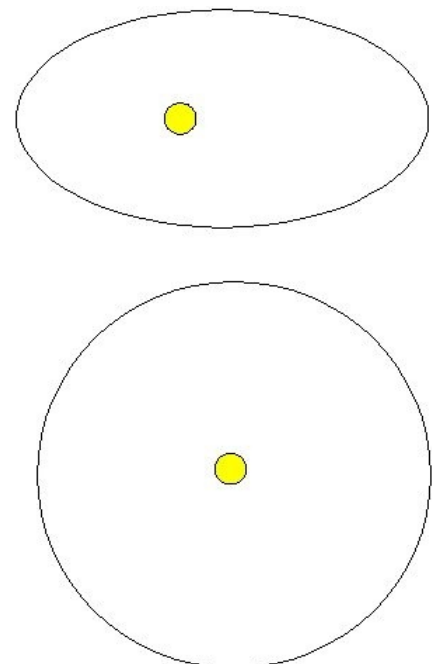


Abbildung 2: Die obere Bahn hat eine größere Exzentrizität als die Untere.

Man sieht insbesondere beim oberen Bild, dass der Abstand zum Zentralgestirn variiert. Daher wird im Folgenden immer nur der **mittlere Abstand** zum Planeten angegeben.

Draufsicht und seitliche Ansicht

Die beiden Planetenbahnen im vorigen Bild sind in der **Draufsicht** gezeichnet. In dieser Ansicht blicken wir direkt von oben auf die Bahnebene des Planeten.

Wichtig ist außerdem die **seitliche Ansicht**: In Abbildung 3 ist die obere Bahn

von Abb. 2 in der seitlichen Ansicht dargestellt:



Abbildung 3: Seitliche Ansicht auf eine elliptische Planetenbahn

Aus dieser Skizze ist leicht erkennbar, dass der Abstand eines Planeten mit elliptischer Bahn zum Zentralstern variiert: Der maximale Abstand links ist kleiner als der maximale Abstand rechts.

In der Draufsicht sieht man deutlich die elliptische Form der Bahn. In der Seitenansicht ist dies anders: Würde man einen Planeten von der Seitenansicht aus beobachten, so würde er scheinbar um den Stern pendeln.

In der **Praxis** lässt sich dieses Pendeln sehr gut anhand der Jupitermonde beobachten: Die vier hellsten Monde des Jupiters lassen sich mit einem kleinen Teleskop oder einem guten Fernglas beobachten. Da man aber von der Erde aus nur seitlich auf die Bahnebene der Monde sehen kann, scheinen diese um Jupiter herum "hin und her" zu pendeln.

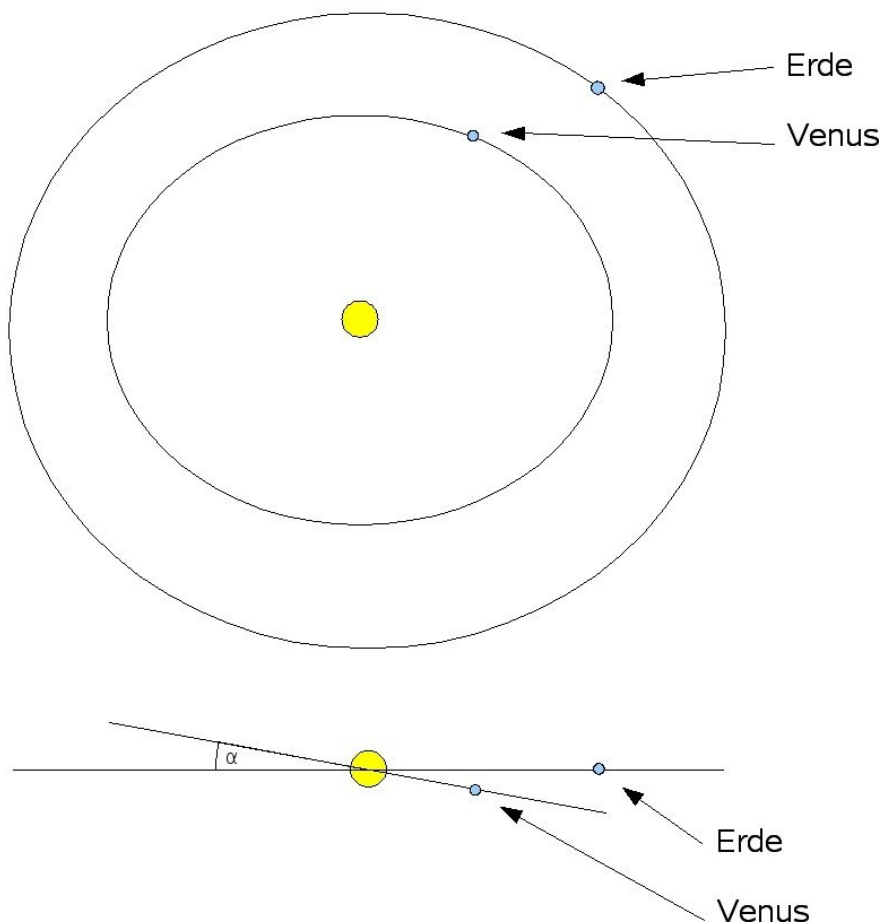


Abbildung 4: Zur Definition der Inklination

Neigungswinkel zwischen den Bahnebenen von Erde und Venus. Er wird hier α genannt.

Im Fall von Erde und Venus ist der Winkel $\alpha = 3,4^\circ$. Diesen Winkel zwischen der Bahnebene eines Planeten und der Bahnebene der Erde nennt man **Inklination**. Die Inklination der Bahnebene der Venus ist also relativ klein. Im Vergleich dazu beträgt der Winkel zwischen der Bahnebene des Pluto und der der Erde $17,2^\circ$. Die geringste Inklination hat die Bahnebene des Uranus mit $0,8^\circ$.

Inklination

In allen soeben veranschaulichten Darstellungen kreist ein einziger Planet um einen Stern. In der Regel - und insbesondere in unserem Sonnensystem - gibt es aber mehrere Planeten, die um das Zentralgestirn kreisen. In der nun folgenden Darstellung sind die Planetenbahnen von Erde von Venus dargestellt: Einmal in der Sicht auf die Erdbahnebene (Draufsicht), dann in der seitlichen Sicht.

Offenbar bewegen sich Erde und Venus nicht in exakt der selben Ebene:

Erst die seitliche Ansicht offenbart den

Rotationsachse/Drehachse

Die genauen Werte für die einzelnen Planeten sind in den später folgenden Tabellen angegeben.

Für den Begriff *Rotationsachse* (oder *Drehachse*) sowie dessen Neigung ist in der nächsten Zeichnung ein Planet und seine Bahnebene in der Seitenansicht vergrößert dargestellt. Der Zentralstern befindet sich außerhalb der Zeichnung.

Planeten umkreisen nicht nur die Sonne, sondern drehen sich auch um ihre eigene Achse (vgl. Abbildung 5). Diese Achse nennt man *Rotationsachse* oder auch *Drehachse*.

Die gestrichelte Linie steht senkrecht auf der Bahnebene und geht durch den Mittelpunkt des Planeten. Der zwischen der gestrichelten Linie und der Rotationsachse eingezeichnete Winkel β gibt die Neigung der Rotationsachse an. Sie beträgt bei der Erde $23,5^\circ$.

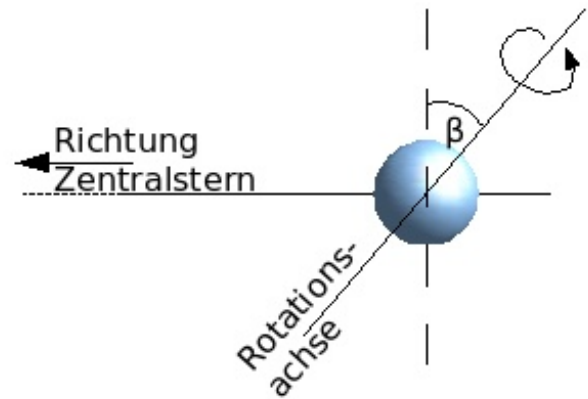


Abbildung 5: Rotationsachse und dessen Neigungswinkel zur Senkrechten der Erdbahnebene

Jahr und Tag

Ein Jahr ist die Zeit, die der Planet Erde benötigt, um seine Bahn einmal zu durchlaufen. Im Laufe eines Jahres dreht sich die Erde um die Sonne; nach einem Jahr befindet sich die Erde auf ihrer Bahn an der gleichen Stelle wie vor diesem einen Jahr.

Wir betrachten nun die Rotation eines Planeten, zum Beispiel der Erde, um die eigene Achse anhand des folgenden Bildes:

Während sich der Planet um seine eigene Achse dreht, bewegt er sich auf der Bahn um die Sonne ein Stück weiter. Das Bild zeigt drei verschiedene Zeitpunkte des Planeten auf seiner Bahn.

Die Zeit, die ein Planet benötigt, um sich einmal vollständig um seine Achse zu drehen nennt man **Sternentag** (1-->2).

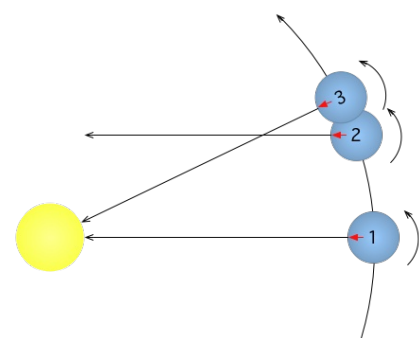


Abbildung 6: Illustration: Sonnentag (1-->3) und Sternentag (1-->2)

Aufgrund seiner Bahnbewegung ist in 2 nicht mehr exakt die gleiche Seite des Planeten der Sonne zugewandt wie in 1. Die Zeitdauer, die der Planet benötigt damit wieder die gleiche Hälfte der Sonne zugewandt ist, nennt man **Sonnentag** (1-->3).

Ein Tag auf der Erde, wie er im Sprachgebrauch üblich ist, ist ein Sonnentag. Er dauert länger als ein Sternentag.

Astronomische Einheit (AE)

Man bezeichnet die mittlere Entfernung von der Erde bis zur Sonne als Astronomische Einheit. Dies ist ein gängiges Längenmaß innerhalb des Sonnensys-

tems.

Die Astronomische Einheit wird mit AE abgekürzt.

1 AE = 149 597 870 691 m

Beispiel:

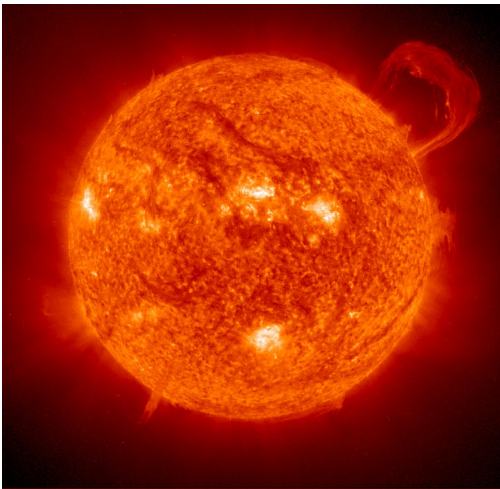
Der Asteroid Sedna befindet derzeit sich in 90-facher Entfernung Erde-Sonne. Er ist also 90 AE von uns entfernt.

Erklärung des Tabelleninhalts:

Im Folgenden werden die Himmelskörper unseres Sonnensystems kurz vorgestellt. Die wichtigsten Daten werden in Form einer Tabelle festgehalten. Die einzelnen Zeilen haben die folgende Bedeutung:

Durchmesser	Durchmesser des Planeten
mittl. Abstand	Mittlerer Abstand zur Sonne
Exzentrizität	Abweichung der Umlaufbahn um die Sonne von der Kreisbahn
Inklination	Winkel zwischen der Bahnebene des Planeten und der Bahnebene der Erde
Umlaufdauer	Dauer, bis der Planet einmal die Sonne umkreist hat.
Orbitalgeschwindigkeit	Mittlere Geschwindigkeit, mit der sich der Planet relativ zur Sonne bewegt.
Rotationsperiode	Ein Sterntag
Neigung der Drehachse	Winkel zwischen der Drehachse des Planeten und der Senkrechten zur Bahnebene.
Masse	Die Masse des Planeten
Dichte	Die Dichte (Masse pro Volumen) des Planeten.
Temperatur	Durchschnittstemperatur an der Planetenoberfläche

1.1.1 Die Sonne



Durchmesser	1,39 Mio. km
mittl. Abstand	-
Exzentrizität	-
Inklination	-
Umlaufdauer	-
Orbitalgeschwindigkeit	-
Rotationsperiode	27-31 Tage
Neigung der Drehachse	0°
Masse	$1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Dichte	1,408 g/cm ³
Temperatur	5700°C Oberfläche

Die Sonne ist ein mittelgroßer Stern und sitzt im Zentrum unseres Sonnensystems. Alles Leben auf unserer Erde und viele Vorgänge im Sonnensystem hängen ab von der Energie, die sie abstrahlt.

Die in ihr ablaufenden Prozesse (wir werden sie im Abschnitt 3.2 näher behandeln) sorgen für eine permanente Umwandlung von Masse in Strahlungsenergie. Die Energiemengen sind derart gigantisch, dass die gesamte Oberfläche der Sonne übersät ist von Materieausbrüchen.

Dadurch entstehen sogenannte *Protuberanzen*: Materie wird mehrere hunderttausend Kilometer in das Weltall geschleudert und gelangt aufgrund starker Magnetfelder im hohen Bogen auf die Sonnenoberfläche zurück (vgl. Foto).

Ein Teil der Materie wird mit solcher Wucht in das All befördert, dass sie nie mehr zur Sonne zurückkehrt. Auf diese Weise verliert die Sonne pro Sekunde etwa eine Millionen Tonnen ihrer Masse. Die nicht mehr zurückkehrende Materie nennt man *Sonnenwind*, da sie mit Geschwindigkeiten von 400 bis 900 Kilometern pro Sekunde von der Sonne weg durch das Sonnensystem fegt. Es handelt sich bei dieser Materie um Elektronen, Protonen und Heliumatomkerne.

Ein Mensch würde den Kontakt mit Sonnenwind nicht überleben. Wie weiter unten geschildert, ist die Erdoberfläche durch das Magnetfeld der Erde vor dem Sonnenwind geschützt.

Häufig wird der Funkkontakt zu Satelliten durch den Sonnenwind gestört. In zwei Fällen sorgte sogar ein besonders starker Materieausbruch auf der Sonne indirekt für einen Ausfall des Stromnetzes der USA.

Besonders romantische Erscheinungen, die vom Sonnenwind ausgelöst wird, sind Polarlichter.

Die Masse der Sonne setzt sich aus 73,5% Wasserstoff, 25% Helium und einen geringen Teil schwererer Elemente zusammen. Ihre Oberflächentemperatur beträgt rund 5700°C.

Beispiel: Eine Volumenbetrachtung

Sowohl Erde als auch Sonne haben annähernd kugelförmige Gestalt. Also lassen sich deren Volumina leicht aus deren Durchmesser berechnen.

$$R_E = \frac{1}{2} \cdot 12756 \text{ km} = 6378 \text{ km} \Rightarrow V_E = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_E^3 \approx 1,09 \cdot 10^{12} \text{ km}^3$$

$$R_S = \frac{1}{2} \cdot 1400000 \text{ km} = 700000 \text{ km} \Rightarrow V_S = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_S^3 \approx 1,44 \cdot 10^{18} \text{ km}^3$$

Wir rechnen jetzt aus, wie oft das Erdvolumen in das Sonnenvolumen passt:

$$N = \frac{V_S}{V_E} = \frac{1,44 \cdot 10^{18} \text{ km}^3}{1,09 \cdot 10^{12} \text{ km}^3} \approx 1321101$$

Also passt das Erdvolumen etwa 1,3 Millionen mal in das Sonnenvolumen.

1.1.2 Der Merkur



Abbildung 7: Der Merkur

Merkur ist der innerste Planet des Sonnensystems. Auf Fotos ähnelt der Planet unseren Mond: Aufgrund der fehlenden Atmosphäre schlugen in der Vergangenheit sämtliche Gesteinsbrocken ungebremsst auf ihn ein und verursachten eine ausgeprägte Kraterwelt.

Wegen der geringen Masse des Merkur sowie aufgrund seiner Nähe zur Sonne und des damit verbundenen starken Sonnenwindes kann der Planet keine Atmosphäre halten. Eine solche würde durch den Sonnenwind regelrecht weggefedt werden.

Auf der von der Sonne beschienenen Seite steigt die Oberflächentemperatur auf über 430°C an, während sie auf der Nachtseite auf -

180°C abfällt. Grund für diese große Temperaturdifferenz ist zum einen die fehlende Atmosphäre, wodurch die Wärme ungehindert in das Universum "abstrahlt". Zum anderen liegt dies an seiner langen Rotationsperiode: Der "Merkur-Tag" dauert rund 60 Erdentage.

Der Merkur steht durch seine Nähe zur Sonne unter einem besonders starken Einfluss ihrer Gravitation. Diese hat seine Eigendrehung im Laufe der Jahrmilliarden abgebremst. Die gravitativ bedingten Kräfte, der hierfür verantwortlich sind, nennen sich *Gezeitenkräfte*.

Durchmesser	4879 Kilometer
mittl. Abstand	57,9 Mio
Exzentrizität	0,2056
Inklination	7,0°
Umlaufdauer	87,97 Tage
Orbitalgeschwindigkeit	47,8 km/s
Rotationsperiode	58,65 Tage
Neigung der Drehachse	0,01°
Masse	$3,3 \cdot 10^{23} \text{ kg}$
Dichte	5,43 g/cm ³
Temperatur	-180 bis 430°C
Anzahl der Monde	0

Merkur gehört zu den vier *inneren Planeten*: Merkur, Venus, Erde und Mars. Die inneren Planeten unterscheiden sich insbesondere durch ihre große Dichte von den äußeren Planeten (Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun). Man nennt die inneren Planeten entsprechend ihrer Beschaffenheit häufig Gesteinsplaneten, die äußeren Planeten nennt man dagegen Gasplaneten.



Abbildung 8: Größenvergleich zwischen Merkur und Erde (maßstabsgerecht)

Der Größenunterschied zwischen Merkur und Erde wird besonders im direkten Vergleich sichtbar (vgl. Abb. 8).

Der Durchmesser der Erde ist etwa zweieinhalb mal so groß wie der des Merkur.

1.1.3 Die Venus



Abbildung 9: Die Venus

Durchmesser	12104 km
mittl. Abstand	108,2 Mio. km
Exzentrizität	0,0068
Inklination	3,4°
Umlaufdauer	224,7 Tage
Orbitalgeschwindigkeit	35,0 km/s
Rotationsperiode	243,1 Tage
Neigung der Drehachse	177,4°
Masse	$4,87 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Dichte	5,24 g/cm ³
Temperatur	470°C
Anzahl der Monde	0

Die Venus ist der innere Nachbarplanet der Erde. Sie ist nur etwas kleiner als die Erde und hat eine ähnliche Dichte, was für einen vergleichbaren inneren Aufbau des Planeten spricht. Zudem besitzt die Venus eine dichte, wolkenbehängene Atmosphäre. Kein Wunder also, dass man Mitte des 20. Jahrhunderts die Venus für einen außerordentlich fruchtbaren Planeten gehalten hat. Doch man hatte sich verschätzt:

Der auf der Venus herrschende Atmosphärendruck ist 90 mal so groß wie der Druck auf der Erde. Die ersten Sonden (Venera 5, Venera 6; 1969) waren dafür nicht ausgelegt; ihre Instrumente hielten dem hohen Druck nicht stand. Erst Venera 7 gelang im Dezember 1970 eine erfolgreiche Landung auf dem Planeten. Nach rund zwei Stunden gab sie den Geist auf, da der Niederschlag, der auf der Venus aus hochkonzentrierter Schwefelsäure besteht, die Sonde zerstörte.

Die Venusatmosphäre besteht zu 96% aus Kohlendioxid. Die hohe Temperatur auf der Venusoberfläche kommt durch den dadurch verursachten Treibhauseffekt zustande.

Rechts befindet sich eine Radar-Aufnahme der NASA-Magellan-Mission. Sie zeigt einen zum Zeitpunkt der Aufnahme einen aktiven, 5 Kilometer breiten Vulkan. Die durch den Ausbruch entstandene Wolke ist etwa 35 Kilometer lang und 10 Kilometer breit.

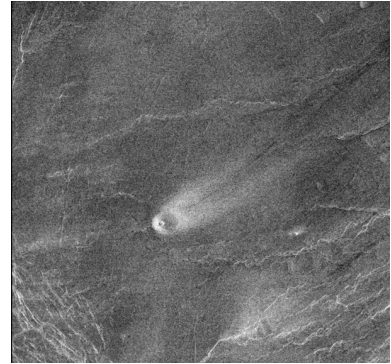


Abbildung 10: Vulkan auf der Venusoberfläche

Im Volksmund ist die Venus auch unter dem Namen *Morgenstern* oder auch *Abendstern* bekannt. Die Bezeichnung ist irreführend, da es sich bei der Venus um keinen Stern handelt.

Die Venus ist aber, genauso wie der Merkur, tatsächlich nur am frühen Morgen oder am späten Abend beobachtbar. Nie jedoch kann man sie zu Mitternacht sehen. Dies hat den folgenden Grund:

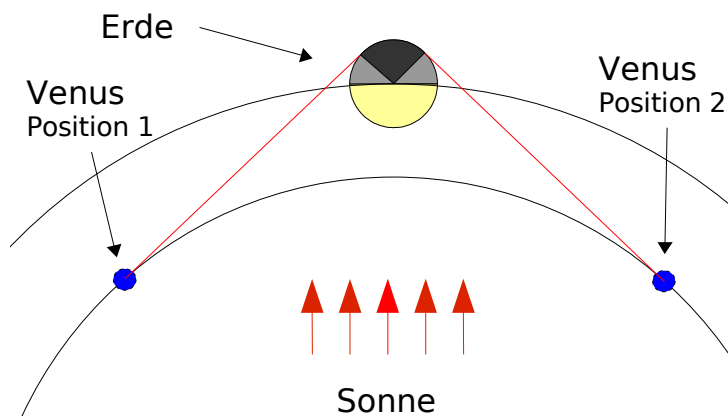


Abbildung 11: Venus als Abendstern(1) und als Morgenstern(2)

Wie man in der Illustration (Abb. 11) sieht, befindet sich die Venus niemals "hinter" dem Planet Erde. Daher ist sie auch nie um Mitternacht sichtbar.

Die Venus lässt sich nur von dem grau markierten Bereich der Erde aus beobachten. Dabei sieht man sie in Position 1 als Morgenstern, in Position 2 als Abendstern.

sieht man ihn um die Sonne "pendeln", da wir Venus schauen.

Beobachtet man den Planet von der Erde aus über einen längeren Zeitraum hinweg, so seitlich auf die Bahnebene der

1.1.4 Die Erde



Abbildung 12: Die Erde

Die Erde ist (von der Sonne aus) der dritte Planet des Sonnensystems. Zudem ist sie der einzige Planet, auf dem sich nach heutiger Kenntnis intelligente Lebensformen gebildet haben.

Die Erdatmosphäre besteht zu 78% aus Stickstoff, 21% Sauerstoff sowie aus geringen Anteilen anderer Gase. Darunter auch die Gase Kohlendioxid und Methan, welche zum sogenannten *natürlichen Treibhauseffekt* beitragen: Sie reflektieren Teile der von der Erde ausgehenden Wärmestrahlung und sorgen auf diese Weise für eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur um schätzungsweise 30°C.

Der Neigungswinkel der Rotationsachse beträgt 23,5°. Nord- und Südpol sind durch diese Achse festgelegt: Sie markieren die gedachten Schnittpunkte von Rotationsachse und Erdoberfläche.

Die Erde dreht sich einmal in etwa 365,25 Tagen um die Sonne. Diesen Zeitraum nennen wir *ein Jahr*. Unser Kalender zählt jedoch nur 365 Tage pro Jahr, also rund 0,25 zu wenig. Dies wird dadurch ausgeglichen, dass alle vier Jahre ein zusätzlicher Tag dazugezählt wird. Das entsprechende Jahr hat dann 366 Tage und wird *Schaltjahr* genannt.

Die Jahreszeiten

In einem Jahr bewegt sich die Erde einmal um die Sonne. Dabei zeigt die Rotationsachse der Erde jedoch stets in die selbe Richtung. Die Illustration in Abbildung 14 zeigt die Erde aus der seitlichen Sicht in zwei verschiedenen Stellungen:

Durchmesser	12756 km
mittl. Abstand	149,6 Mio. km
Exzentrizität	0,00167
Inklination	0°
Umlaufdauer	365,256 Tage
Orbitalgeschwindigkeit	29,8 km/s
Rotationsperiode	23h 56 min
Neigung der Drehachse	23,5°
Masse	$6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Dichte	5,515 g/cm ³
Temperatur	16°C
Anzahl der Monde	1

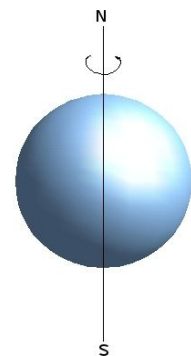


Abbildung 13:
Nord (N) und
Süd (S)

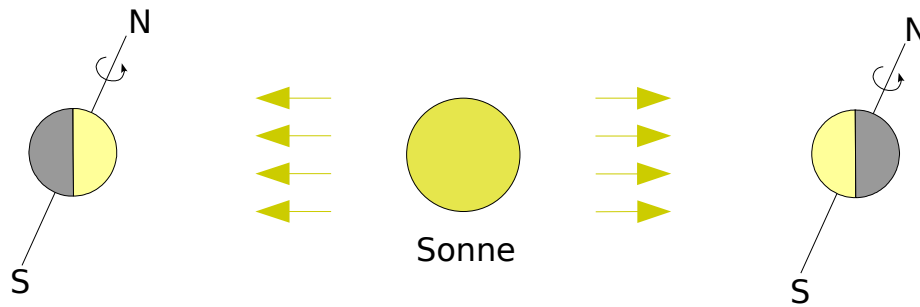


Abbildung 14: Die Erde im Sommer (links) und im Winter (rechts)

links ist deutlich zu sehen, dass der Nordpol der Sonne stärker zugewandt ist, als der Südpol. Folglich ist es auf der Nordhalbkugel zu diesem Zeitpunkt wärmer als auf der Südhalbkugel. So entsteht der Sommer.

Rechts zeigt die Erde ein halbes Jahr später: Sie hat eine halbe Umdrehung um die Sonne gemacht und befindet sich jetzt auf der anderen Seite. Die Rotationsachse hat ihre Richtung jedoch beibehalten: Folglich wird, wie in der Abbildung sichtbar, die südliche Halbkugel stärker von der Sonne bestrahlt als die Nördliche. Im Norden ist jetzt Winter.

Genau genommen ändert sich jeweils der Winkel der Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche. Bei spitzerem Winkel zwischen Sonneneinstrahlung und Erdoberfläche trifft dabei die gleiche Strahlungsleistung auf eine größere Fläche – pro Flächeneinheit fällt also weniger Strahlungsleistung ein. Dadurch verringert sich die Temperatur in dem betreffenden Gebiet auf der Erdoberfläche.

Der innere Aufbau der Erde

Im Laufe des 20. Jahrhunderts haben Geophysiker durch die Beobachtung der von Erdbeben ausgelösten Druckwellen sehr genau den inneren Aufbau des Planeten bestimmt:

Die durch Erdbeben zustandekommenden Druck- und Scherwellen pflanzen sich nämlich durch die gesamte Erde hindurch fort und werden von den Wissenschaftlern durch auf dem ganzen Erdball verteilte Messstationen registriert.

Anfangs glaubte man, die Erde sei ein riesiger, massiver, fester Körper. Doch die Messungen der Wissenschaftler brachten erstaunliche Tatsachen ans Tageslicht:

Man stellte fest, dass sich durch den Erdkörper hindurch fast ausschließlich Druckwellen ausbreiten können – also nur Wellen, deren Amplituden in Ausbreitungsrichtung zeigen. Scherwellen hingegen (also Wellen, deren Amplituden senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stehen) werden sehr stark abgeschwächt. Das sind typische Eigenschaften einer Flüssigkeit. Folglich sind große Teile des Erdinneren flüssig.

Zerfallende radioaktive Stoffe sorgen für eine ungeheure Hitze, die das Erdinnere im flüssigen Zustand halten. Die zerfallenden radioaktiven Elemente befinden sich zum großen Teil in der Nähe des Erdmittelpunktes, da sie bei der Entstehung der Erde wegen ihrer großen Dichte zum Erdmittelpunkt hin abgesunken sind.

Die Flüssigkeit im Zentrum der Erde wird durch die beim Zerfall freigesetzte Energie erhitzt. Dabei dehnt sich die Flüssigkeit etwas aus, wodurch sich ihre

Dichte verringert und sie daraufhin in die äußeren Bereiche des Erdkerns aufsteigt, um dort ihre Wärme an die Umgebung abzugeben. Hier bei kühlt sie ab, wodurch ihre Dichte wieder zunimmt. In Folge dessen sinkt die abgekühlte Flüssigkeit wieder nach unten. Der Kreislauf kann von neuem beginnen.

Die hierbei auftretenden Flüssigkeitsströme nennt man *Konvektionsströme*. Sie sind nach heutiger Auffassung Hauptursache des Erdmagnetfeldes.

Das gleiche Prinzip der Konvektion steckt übrigens hinter den beliebten "Lava-Lampen", die überall im Handel erhältlich sind. Nur dass hier die Wärme nicht durch radioaktiven Zerfall entsteht, sondern durch eine sich erhitzende Glühbirne.

Weiter hat man beobachtet, dass die Druckwellen, welche sich nach einem Beben durch das Erdinnere hindurch fortpflanzen, an einem ganz zentralen Bereich im Innern der Erde gespiegelt werden. Daraus schloss man, dass es noch einen kleinen und festen Kern geben muss, an dem die Wellen reflektiert werden.

Insgesamt ergibt sich folgendes Bild:

Wir dringen dabei von der Erdoberfläche immer tiefer bis hin zum Mittelpunkt der Erde vor.

0 - 40 km:

Erdkruste aus Gestein und Elementen geringer Dichte wie Aluminium, Kalzium.

40 - 2900 km:

Erdmantel aus Magnesium-Eisen-Silikat. Mit zunehmender Tiefe aufgrund der größer werdenden Hitze zunehmend plastisch (verformbar).

2900 - 5100 km:

Äußerer Kern, flüssig. Bestehend hauptsächlich aus Eisen und Nickel.

5100 - 6371 km:

Innerer Kern, fest. Gleiche Zusammensetzung wie äußerer Kern

Innerer und äußerer Kern bestehen aus dem gleichen Material. Der Grund, weshalb der äußere flüssig und der innere plötzlich fest ist, liegt an dem mit wachsender Tiefe steigendem Druck. Dieser wird in einer Tiefe von etwa 5100 km so groß, dass sich die Materie trotz hoher Temperaturen verfestigt.

Schema: Erdaufbau

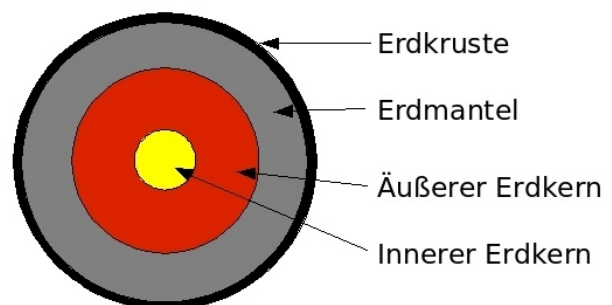


Abbildung 15: Erdaufbau

Alle vulkanischen und tektonischen Aktivitäten der Erde (wie etwa die Kontinentalbewegung) lassen sich durch das flüssige Erdinnere erklären.

Bei Vulkanausbrüchen tritt ein Teil des flüssigen Erdinneren an die Erdoberfläche. Die Kontinentalbewegung kann man verstehen, wenn man sich vorstellt, dass die Erdkruste im Grunde auf dem flüssigen äußeren Kern der Erde schwimmt. Dabei verschieben sich die Kontinentalplatten gegeneinander.

Das Magnetfeld der Erde

Die Erde wird vollständig von einem relativ konstanten Magnetfeld umgeben.

Der *magnetische Südpol* befindet sich dabei in der Nähe des Nordpols, der *magnetische Nordpol* wiederum in der Nähe des Südpols. Diese Eigenschaft wurde schon vor Jahrhunderten, insbesondere in der Seefahrt, zur Orientierung benutzt: Kompassnadeln richten sich entlang des Erdmagnetfeldes aus. Und sogar einige Zugvögel haben ein Organ zur Orientierung am Magnetfeld.

Das Magnetfeld der Erde erfüllt noch einen anderen sinnvollen Zweck:

Wie eingangs erwähnt, gehen von der Sonne in alle Richtungen Teilchen aus, die mit enorm hoher Geschwindigkeit durch das Sonnensystem fegen. Kein höher entwickeltes Lebewesen könnte auf der Erde existieren, wenn dieser *Sonnenwind* ungehindert bis zur Erdoberfläche gelangen würde.

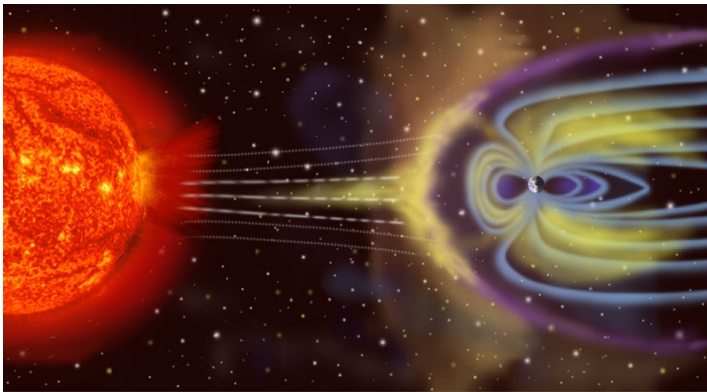


Abbildung 16: NASA-Illustration: Das Magnetfeld der Erde

Zum Glück aber sind die Teilchen nicht elektrisch neutral. Geladene Teilchen (wie Elektronen, Ionen, Atomkerne,...) werden nämlich bei der Bewegung durch ein Magnetfeld seitlich abgelenkt.

Dies geschieht auch mit dem Sonnenwind: Das Magnetfeld der Erde wirkt wie ein Schutzschild und bewirkt, dass der Sonnenwind nicht bis auf die Erdoberfläche dringt, sondern seitlich weggedrückt

wird. Dadurch entsteht eine Verformung des Magnetfeldes, wie sie in der NASA-Illustration dargestellt ist.

Die Ursache des Erdmagnetfeldes ist noch nicht vollständig geklärt. Heute nimmt man an, dass Konvektionsströme im Erdinneren in Verbindung mit der Erdrotation zu großen elektrischen Strömen im flüssigen Eisenkern der Erde führt, von denen dann das Erdmagnetfeld herrührt.

Durch Messungen an erstarrtem Magma fand man heraus, dass das Erdmagnetfeld im Mittel alle 250000 Jahre zusammenbricht und sich anschließend (nach einer Pause von einigen hundert Jahren) mit umgedrehter Polung wieder aufbaut. Die letzte Umpolung dieser Art fand vor 730000 Jahren statt, und die Wissenschaftler gehen davon aus, dass die nächste Umpolung in den nächsten eineinhalb bis zweitausend Jahren stattfindet. So nahm das Magnetfeld in den letzten 200 Jahren bereits um 10% ab. Doch welche Konsequenzen hätte ein Verschwinden des Erdmagnetfeldes für die Menschen? Würde die Erde unbewohnbar werden?

Neuere Simulationen der Erdatmosphäre zeigen, dass ein Verschwinden des Erdmagnetfeldes und damit das Auftreffen des Sonnenwindes auf die äußeren Atmosphärenschichten der Erde ein "eigenes" Magnetfeld in unserer Atmosphäre erzeugt, welches annähernd die Stärke unseres jetzigen Erdmagnetfeldes besitzt und ein tieferes Eindringen in die Erdatmosphäre verhindert. Qualitativ lässt sich das wie folgt erklären:

Sonnenwind besteht hauptsächlich, wie oben erwähnt, aus positiv geladenen Protonen und Heliumkernen sowie aus negativ geladenen freien Elektronen. Nun haben Protonen und Heliumkerne eine wesentlich größere Masse als die Elektronen. Beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre hat das den Effekt, dass die negativ geladenen Elektronen wesentlich stärker von der Atmosphäre zurück-

gehalten werden als die trägen positiven Ladungsträger. Die Folge ist: Die positiven Ladungsträger dringen auf Antrieb tiefer in die Erdatmosphäre ein als die negativen, wodurch ein Strom an positiven Ladungen entsteht. Dieser wiederum erzeugt ein schützendes Magnetfeld.

Dieser Effekt wurde bereits an der Venusatmosphäre beobachtet: Die Venus hat, im Gegensatz zur Erde, kein eigenes Magnetfeld. Auf der sonnenzugewandten Seite entsteht jedoch durch eben beschriebene Vorgänge tatsächlich ein Magnetfeld, durch das ein tieferes Eindringen des Sonnenwindes in die Atmosphäre der Venus verhindert wird.

Unser Mond

Der Mond ist das einzige Objekt am Nachthimmel, auf dem ohne zusätzliche Hilfsmittel Strukturen wahrgenommen werden können. Er ist zugleich der erste Himmelskörper außerhalb der Erde, der von Menschen betreten wurde.

Der Mond zeigt im 29-tägigem Rythmus seine sogenannten Mondphasen. Ihr Zustandekommen ist in Abbildung 17 anhand von vier eingezeichneten Mondphasen illustriert.

Durchmesser	3476 km
mittl. Abstand zur Erde	384401 km
Exzentrizität	0,0549
Inklination	5,145°
Umlaufdauer um die Erde	27,322 Tage
Orbitalgeschwindigkeit	1,03 km/s
Rotationsperiode	27,322 Tag
Neigung der Drehachse	1,3°
Masse	$7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
Dichte	$3,345 \text{ g/cm}^3$
Temperatur	-130° bis +120°C

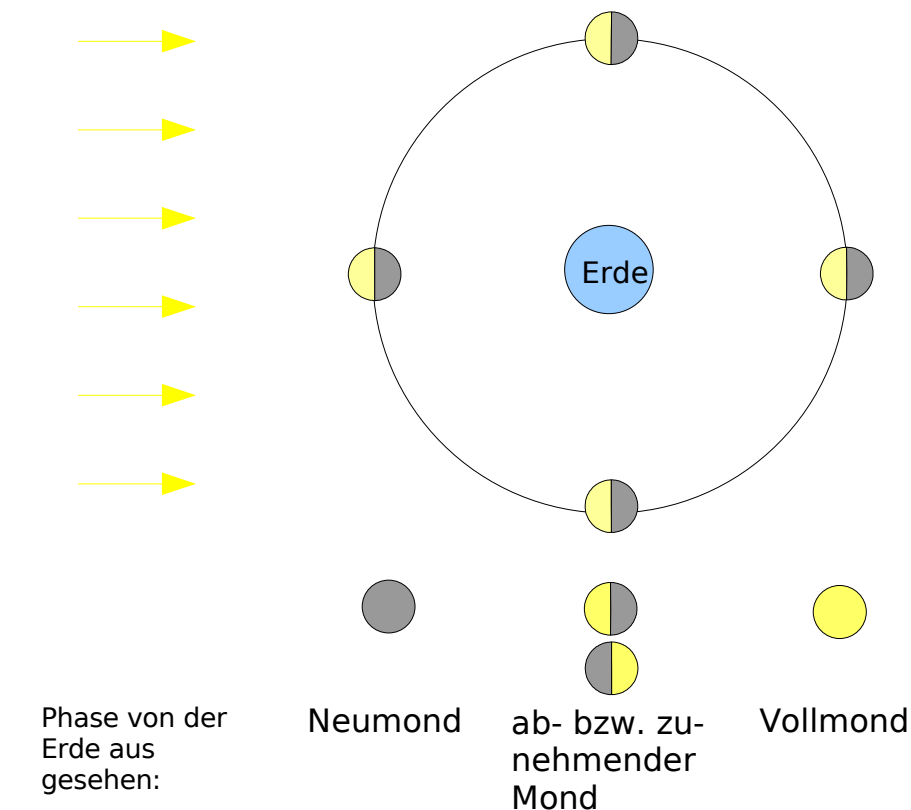


Abbildung 17: Mondphasen

Tipp: Der Vollmond eignet sich nicht für Beobachtungen mit einem Fernglas oder Teleskop. Bei Halbmond lassen sich jedoch bereits Kraterstrukturen und Schattenwürfe von Erhebungen auf dem Mond sichtbar machen.

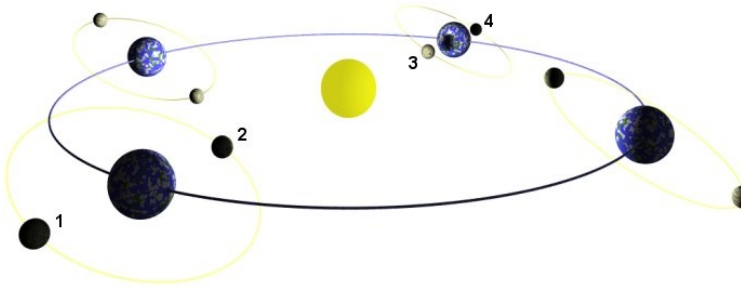


Abbildung 18: Zustandekommen von Mond- und Sonnenfinsternissen

In seltenen Fällen, wenn der Mond exakt zwischen Erde und Sonne steht, wirft er seinen Schatten auf Teile der Erde. Dieses Ereignis nennt man *Sonnenfinsternis*. Umgekehrt kann der Mond auch in den Erdschatten eintreten. Ein solches Ereignis wird *Mondfinsternis* genannt. Die beiden Ereignisse sind in Abbildung 18 dargestellt.

Hier wird deutlich, dass aufgrund des Neigungswinkels der Mondbahn zur Erdbahn nicht jeder Neumond eine Sonnenfinsternis bedeutet und der Vollmond nicht immer mit einer Mondfinsternis einhergeht.

Mondfinsternisse sind nur in Position 1 und 4, Sonnenfinsternisse in Position 2 und 3 möglich: In diesen Situationen liegen Sonne, Erde und Mond in einer Linie.

Die Entstehung des Mondes ist bis heute ungeklärt. Durch das im Rahmen der Apollo-Mission zur Erde gebrachte Mondgestein und dessen eingehenden Untersuchung auf der Erde stellte man gewisse Ähnlichkeiten bezüglich des Mondgesteins und des Gesteins der Erdkruste fest. Seitdem hat sich unter vielen Wissenschaftlern folgendes Entstehungsszenario durchgesetzt:



Abbildung 19: Der Mond

Vor etwa 4,5 Milliarden Jahren soll ein Marsgroßer Planet die Erde gestriffen haben. Zu diesem Zeitpunkt war die Erde noch flüssig. Aus den bei dieser Berührung entstandenen Trümmern soll sich dann der Mond gebildet haben.

Diese Theorie ist alles andere als unumstritten. Der marsgroße Planet, der die Erde gestriffen haben soll, wurde noch nicht gefunden.

1.1.5 Der Mars



Abbildung 20: Der Mars

Der Mars ist der nach der Erde am besten erforschte Planet des Sonnensystems. Das hat zwei einfache Gründe: In den 60ern und 70ern wurde das Interesse an dem Planeten durch den Gedanken beflügelt,

dass auf ihm außerirdische Lebensformen existieren oder zumindest existiert haben könnten. Genauer: Es wurden Strukturen auf der Marsoberfläche beobachtet, die darauf hinweisen, dass es auf Mars einmal größere Mengen Wasser (und damit eine der Grundlage biologischen Lebens) gegeben haben muss.

Daraufhin startete die NASA zunächst 1965 die Sonde Mariner 4, die die Zusammensetzung der Atmosphäre bestimmte, dann elf Jahre später die beiden Viking-Sonden, die Bodenproben auf verschiedenste Arten und Weisen auf biologische Aktivität untersuchten. Als kein Hinweis auf Leben gefunden wurde, geriet der Mars zunächst in Vergessenheit.

Das Interesse am Mars lebte erst in den 90er Jahren wieder auf, als er durch die Vorstellung einer menschlichen Besiedelung erneut in den Blickpunkt rückte. Denn nachdem man feststellte, dass die Venus für Menschen unbewohnbar ist, der Merkur zu nah und alle anderen Planeten zu fern von der Sonne sind, schien der Mars als aussichtsreichster Kandidat für ein solches Unternehmen. So gab es seit 1992 rund ein dutzend Marsmissionen, die vor allem weitere Details im Bereich der Erkundung der Oberfläche, der tieferen Gesteinsschichten und des Klimas in der Marsatmosphäre erforschten.

Das rechte Bild zeigt eine Panoramaaufnahme der Pathfinder-Mission.

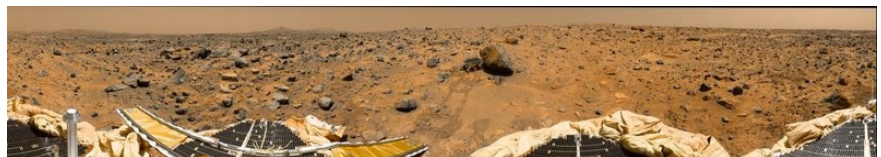


Abbildung 21: Panoramaaufnahme der Pathfinder-Mission

Sowohl in der NASA als auch in der europäischen ESA gibt es Bemühungen, in einem staatenübergreifenden Projekt bis zum Jahr 2030 die erste bemannte Marsmission zu starten.

Auffällig ist die rötliche Färbung des Marsgesteins. Ein Großteil der Marsoberfläche besteht nämlich aus Eisenoxid - also Rost. Seine Atmosphäre ist sehr dünn und besteht aus 97% Kohlendioxid und rund 3% Stickstoff.

Häufig kommt es in der Marsatmosphäre zu Stürmen, die den ganzen Planeten umfassen. Dabei wird soviel Staub aufgewirbelt, dass man zeitweise von der

Durchmesser	6794 km
mittl. Abstand	227,9 Mio. km
Exzentrizität	0,0934
Inklination	1,85°
Umlaufdauer	686,98 Tage
Orbitalgeschwindigkeit	24,1 km/s
Rotationsperiode	1,03 Tage
Neigung der Drehachse	25,19°
Masse	$6,42 \cdot 10^{23} \text{ kg}$
Dichte	3,93 g/cm ³
Durchschnittstemperatur	-60°C
Anzahl der Monde	2

Erde aus kaum noch die Strukturen der Marsoberfläche sehen kann. Solche Stürme dauern oft Wochen an.

Zu den von der Erde aus sichtbaren Strukturen zählen die Polkappen des Mars, die, wie auch auf obigem Foto, häufig von einer Schicht gefrorenen Kohlendioxids (Trockeneis) bedeckt sind.

In der Nacht zeigt sich der Mars als ein helles, rot leuchtendes Objekt. Eine genauere Beobachtung des Planeten Mars lohnt sich vor allem mit besseren Teleskopen. Seine beiden kleinen Monde lassen sich aufgrund ihrer geringen Größe nicht beobachten.

Mit einem besseren Teleskop (ab 8 Zoll) kann man bereits Marsstrukturen sowie die Polkappen des Mars erkennen. Wenn man Glück hat, kann man dabei einen der eben erwähnten Stürme miterleben, bei denen die ganze Oberfläche des Planeten durch eine riesige Staubwolke über Wochen hinweg vernebelt wird.

1.1.6 Der Jupiter



Abbildung 22: Der Jupiter

Der Jupiter ist der größte Planet unseres Sonnensystems. Jupiter gehört zu den Gasplaneten: Seine Atmosphäre macht einen Großteil seines Volumens aus. Jupiter besteht aus einem inneren, relativ kleinen Kern aus Gestein, einer großen darüber liegenden Schicht metallischen Wasserstoffs, gefolgt von einer Schicht flüssigen Wasserstoffs und einer dicken Atmosphärenschicht, hauptsächlich bestehend aus Wasserstoff (89,8%) und Helium (10,2%).

Auf Jupiter toben heftige Stürme mit Windgeschwindigkeiten von über 400 km/h, die mehrere Jahrhunderte andauern können. Am bekanntesten ist der sogenannte "Große Rote Fleck" (vgl. Abb. 23), ein Wirbelsturm, der schon vor 350 Jahren beobachtet wurde und den man mit einem guten Fernrohr von der Erde aus sehen kann.

Bereits mit einem guten Fernglas oder einem kleineren Teleskop lassen sich die vier größten Jupitermonde hervorragend beobachten: Die sogenannten *galileischen Monde* Io, Europa, Ganymed und Callisto. Sie sind nach ihrem Entdecker Galileo Galilei (1564 - 1642) benannt.

Durchmesser	142984 km
mittl. Abstand	778,6 Mio. km
Exzentrizität	0,0484
Inklination	1,3°
Umlaufdauer	11,86 Jahre
Orbitalgeschwindigkeit	13,1 km/s
Rotationsperiode	0,41 Tage
Neigung der Drehachse	3,13°
Masse	$1,9 \cdot 10^{27} \text{ kg}$
Dichte	1,326 g/cm ³
Anzahl der Monde	63



Abbildung 23:
Der Große Rote
Fleck

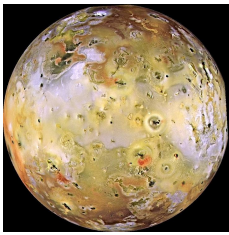


Abbildung 24: Jupitermond Io

Abbildung 24 zeigt den Mond Io. Auf ihm herrscht starke vulkanische Aktivität. Er ist der innerste Jupitermond und wird durch die Gezeitenkräfte des Jupiters so stark geknetet, dass sich sein Inneres verflüssigt

Europa (Abb. 25), der zweitinnerste Jupitermond, ist dagegen von einer dicken Eisschicht überzogen. Die NASA nimmt an, dass sich darunter auch flüssiges Wasser befindet, in dem Leben entstanden sein könnte.

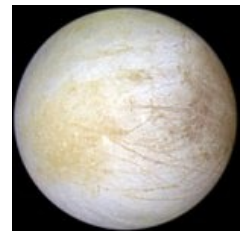


Abbildung 25: Jupitermond Europa



Abbildung 26: Polarlichter auf dem Jupiter

Die sehr schwach ausgeprägten *Ringe* des Jupiter sind von der Erde aus nicht sichtbar. Sie bestehen aus sehr kleinen Staubpartikeln, die sich aufgrund der Gravitation und innerer Reibung spiralförmig auf Jupiter zubewegen, während durch die Einschläge kleinerer Meteorite auf den Jupitermonden laufend neue Staubpartikel aufgewirbelt werden.

Jupiter besitzt ein ausgedehntes Magnetfeld, und so kommt es, ähnlich wie auf der Erde, zu *Polarlichtern*. Abbildung 26 zeigt eine solche vom Hubble-Space-Telescope aufgenommene Erscheinung.

Genauso wie bei der Erde, liegen auch beim Jupiter die magnetischen Pole auf der Rotationsachse des Planeten, was möglicherweise auf einen ähnlichen Entstehungsmechanismus des Magnetfeldes schließen lässt.

1.1.7 Der Saturn

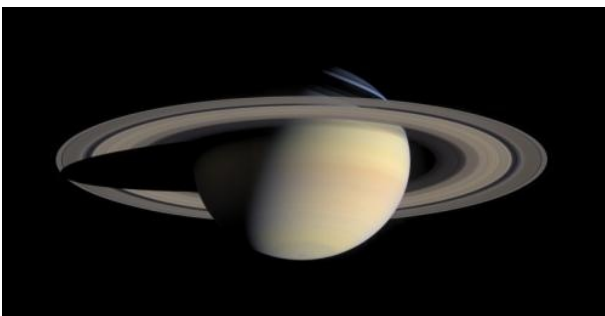


Abbildung 27: Der Saturn

Der Saturn gehört ohne Zweifel zu den eindrucksvollsten Planeten des Sonnensystems: Sein Ringsystem weckte schon seit Jahrhunderten das Interesse der Astronomen. Auf Detailaufnahmen erkennt man, dass sein Ring im Grunde aus vielen Einzelringen besteht. Am

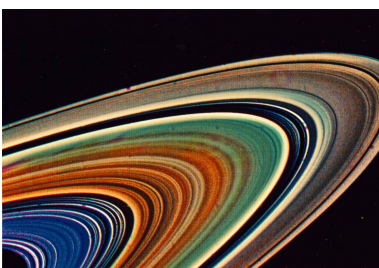


Abbildung 28: Das Ringsystem des Saturns

auffälligsten ist die sogenannte *Cassiniteilung*, die man auch auf der obigen Abbildung 27 erkennt. Die Sonde, die das Foto aufnahm, flog auf ihrer Reise durch diese Teilung hindurch. Sie bekam den treffenden Namen Cassini-Huygens-Sonde. Abbildung 28 zeigt eine Aufnahme der Saturnringe mit stark überhöhten Farbwerten.

Durchmesser	120536 km
mittl. Abstand	1434 Mio. km
Exzentrizität	0,0542
Inklination	2,5°
Umlaufdauer	29,46 Jahre
Orbitalgeschwindigkeit	9,64 km/s
Rotationsperiode	0,43 Tage
Neigung der Drehachse	26,7°
Masse	$5,7 \cdot 10^{26} \text{ kg}$
Dichte	0,69 g/cm ³
Anzahl der Monde	60

Bis heute ist die Entstehung der Ringe nicht vollständig geklärt. Nach einer verbreiteten Theorie hat sich ein Himmelskörper (etwa ein kleiner Mond) dem Saturn zu sehr genähert und wurde durch die Gezeitenkräfte der Gravitation in winzige Stücke zerissen. Die Partikel sollen sich demnach als Scheibe um den Saturn formiert haben. Tatsächlich sind die Ringe nur sehr dünn mit Materie besetzt. Sie bestehen aus kleineren Brocken festen Aggregatzustands. Die Lücken zwischen ihnen sind Folgen des gravitativen Einflusses der Saturnmonde.

Die Ringe lassen sich sehr gut mit einem Teleskop von der Erde aus beobachten. Im dreißigjährigem Rhythmus wechseln sie ihre scheinbare Gestalt. Man sieht sie mal als "Strich", wenn man von der Erde aus seitlich auf die Ringebene schaut, sieben Jahre später dann ellipsenförmig, da sich der Blickwinkel auf die Ringebene nun geändert hat. Die Saturnmonde können dagegen, aufgrund der großen Entfernung des Saturns zur Erde, nur größere Teleskope auflösen.

Obwohl man es dem Planeten nicht ansieht, geht es auf dem Saturn noch stürmischer zu als auf Jupiter. Im Bereich des Äquators wurden von den Voyager-Missionen Windgeschwindigkeiten von 1500 km/h gemessen. Saturn hat ähnliche Wolkenstrukturen wie Jupiter. Nur sind diese von einer dichten Hüllen kondensierten Gases umgeben. Dadurch sind sie von der Erde aus nicht sichtbar. Eine weitere Gemeinsamkeit zwischen Saturn und Jupiter ist das ebenfalls starke Magnetfeld. Durch spezielle Farbfilter hindurch kann man auch hier Polarlichter beobachten.

Saturn dreht sich etwa einmal alle elf Stunden um die eigene Achse. Die aus diesem Grund vorhandenen Zentrifugalkräfte verursachen eine starke Abplattung des Planeten - d.h. sein Äquatordurchmesser ist größer als sein Poldurchmesser. Eine solche Abplattung findet man bei jedem Planeten des Sonnensystems. Bei Jupiter und Saturn ist sie jedoch so stark, dass man sie in einem mittelgroßen Teleskop (5-7 Zoll) bereits sehen kann.

1.1.8 Der Uranus



Abbildung 29: Der Uranus

Während die bisher beschriebenen Planeten bereits im Altertum bekannt waren, wurde Uranus aufgrund seiner relativ geringen Helligkeit erst 1781 entdeckt.

Der Uranus zählt, wie Jupiter und Saturn auch, zu den Gasplaneten. Er besteht zu 82,5% aus Wasserstoff, 15,2% aus Helium und zu 2,3% aus Methan. In den

Durchmesser	51118 km
mittl. Abstand	2872 Mio. km
Exzentrizität	0,0472
Inklination	0,8°
Umlaufdauer	84,01 Jahre
Orbitalgeschwindigkeit	6,81 km/s
Rotationsperiode	0,71 Tage
Neigung der Drehachse	97,8°
Masse	$8,7 \cdot 10^{25} \text{ kg}$
Dichte	1,3 g/cm ³
Anzahl der Monde	27

äußeren Bereichen des Planeten existieren diese Elemente gasförmig. Im Innern haben diese Elemente aufgrund des hohen Atmosphärendrucks einen flüssigen Aggregatzustand.

Auffällig ist die Rotationsachse (Drehachse) des Uranus. Im Gegensatz zu allen anderen Planeten liegt sie mit $97,7^\circ$ fast innerhalb der Bahnebene des Planeten. Die Ursache für diese Neigung ist noch nicht vollständig geklärt. Man vermutet eine Kollision mit einem anderen großen Planeten während der Entstehungszeit.

Die Beobachtung des Uranus gestaltet sich für Einsteiger in die Astronomie sicherlich schwierig. Unter guten Bedingungen ist er gerade noch so mit bloßem Auge zu sehen. Eine Voraussetzung ist eine genaue Kenntnis der aktuellen Position des Planeten, da er sonst leicht mit einem leuchtschwachen Stern verwechselt werden kann. Wie man in der Abbildung 29 sieht, hat der Uranus so gut wie keine Wolkenstrukturen, was ihn für Teleskopbeobachtungen relativ uninteressant erscheinen lässt. Die Monde lassen sich nur mit großen Teleskopen beobachten.

1.1.9 Der Neptun

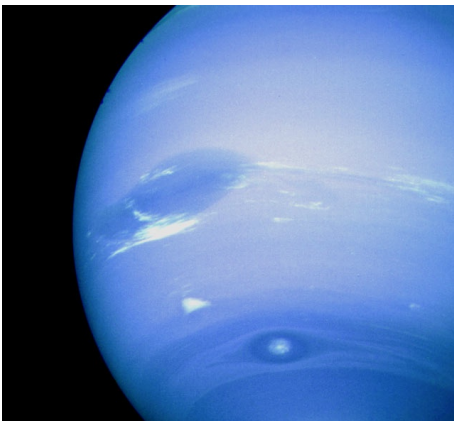


Abbildung 30: Der Neptun

Neptun hat am nächtlichen Himmel eine so schwache Helligkeit, dass man ihn mit bloßem Auge nicht sehen kann. Daher wundert es nicht, dass er erst 1846 auf interessante Weise entdeckt wurde: Man entdeckte bei dem seit 1781 bekannten Planeten

Uranus eine Abweichung seiner Bahn von der theoretisch berechneten Position. Daraufhin vermutete man einen weiter außen liegenden Planeten, der den Uranus durch seine Gravitation leicht ablenkt. Aus der Ablenkung ließ sich die ungefähre Position dieses weiter außen liegenden Planeten berechnen. Anschließend Teleskopbeobachtungen führten schließlich zur Entdeckung des achten Planeten des Sonnensystems.

Neptuns Atmosphäre besteht hauptsächlich aus Wasserstoff. Die blaue Färbung erhält der Planet durch einen geringen Methananteil. Im Gegensatz zu Uranus sind auf Neptun Wolkenstrukturen zu sehen. Bei dem auch auf Abbildung 30 zu erkennenden dunklen Fleck handelt es sich - ähnlich wie im Fall des großen roten Fleckes auf Jupiter - um einen Wirbelsturm mit Windgeschwindigkeiten um 130 km/h.

Durchmesser	49528 km
mittl. Abstand	4495 Mio. km
Exzentrizität	0,0113
Inklination	$1,8^\circ$
Umlaufdauer	164,8 Jahre
Orbitalgeschwindigkeit	5,43 km/s
Rotationsperiode	0,76 Tage
Neigung der Drehachse	$28,3^\circ$
Masse	10^{26} kg
Dichte	$1,64 \text{ g/cm}^3$
Anzahl der Monde	13

Zur Beobachtung von Neptun ist ein Teleskop sowie die Kenntnis der genauen Lage unabdingbar. Die Wolkenstrukturen lassen sich nur mit sehr großen Teleskopen auflösen.

1.1.10 Der Pluto



Abbildung 31: Pluto und Charon

Abbildung 31 zeigt Pluto zusammen mit seinem hellsten Mond Charon.

Pluto wurde, ähnlich wie Neptun, über Bahnstörungen der bekannten Planeten nach 25-jähriger Suche im Jahr 1930 gefunden. Bis zum Jahr 2006 galt er als neunter Planet des Sonnensystems. Am 24. August 2006 wurde ihm von der Internationalen Astronomischen Union sein Planetenstatus aberkannt. Die korrekte Bezeichnung lautet nun "Zwergplanet".

Pluto zeichnet sich durch eine stark elliptische Bahn aus, die zudem stark gegen die Erdbahnebene geneigt ist. Da der Pluto auf seiner Bahn an zwei Punkten die Bahn des Neptun kreuzt liegt die Vermutung nahe, dass es sich ursprünglich bei Pluto um einen Mond des Neptun handelte, der sich vom Neptun entfernt hat.

Pluto hat keine Atmosphäre - er besteht zu etwa 70% aus Gestein und zu 30% aus Wassereis.

Zur Beobachtung im Rahmen der Hobby-Astronomie eignet sich Pluto nicht - er ist viel zu lichtschwach. Selbst mit den größten Teleskopen der Welt ist eine Struktur der Oberfläche von Pluto kaum zu erkennen.

Durchmesser	2390 km
mittl. Abstand	5906 Mio. km
Exzentrizität	0,2488
Inklination	17,2°
Umlaufdauer	247,7 Jahre
Orbitalgeschwindigkeit	4,74 km/s
Rotationsperiode	6,39 Tage
Neigung der Drehachse	122,53°
Masse	$1,3 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
Dichte	1,8 g/cm ³
Anzahl der Monde	3

1.2 Die Umgebung des Sonnensystems

Der nächste Stern ist mit 4,223 Lichtjahren Entfernung zum Sonnensystem Proxima Centauri; Innerhalb der nächsten 10 Lichtjahren befinden sich ein knappes dutzend Sterne.

Das Sonnensystem sitzt in den äußeren Bereichen eines Spiralarms einer rund 120 Milliarden Sterne großen Galaxie, die wir *Milchstraßensystem* oder abkürzend **Milchstraße** bezeichnen. Man kann sich

Name	Entfernung
Proxima Centauri	4,223 LJ
Alpha Centauri	4,395 LJ
Barnard's Stern	5,941 LJ
Sirius	8,601 LJ

die Milchstraße als ein scheibenförmiges Gebilde vorstellen mit einem Durchmesser von etwa 100000 Lichtjahren und einer Dicke von rund 3000 Lichtjahren.

Unser Sonnensystem dreht sich innerhalb des Spiralarms einmal in etwa 230 Millionen Jahren um das etwa 26000 Lichtjahre entfernte Zentrum der Milchstraße. Dort wird ein sehr massereiches Schwarzes Loch vermutet, von dem wir uns glücklicherweise in sicherer Entfernung befinden.

Die nähere Umgebung der Milchstraße:

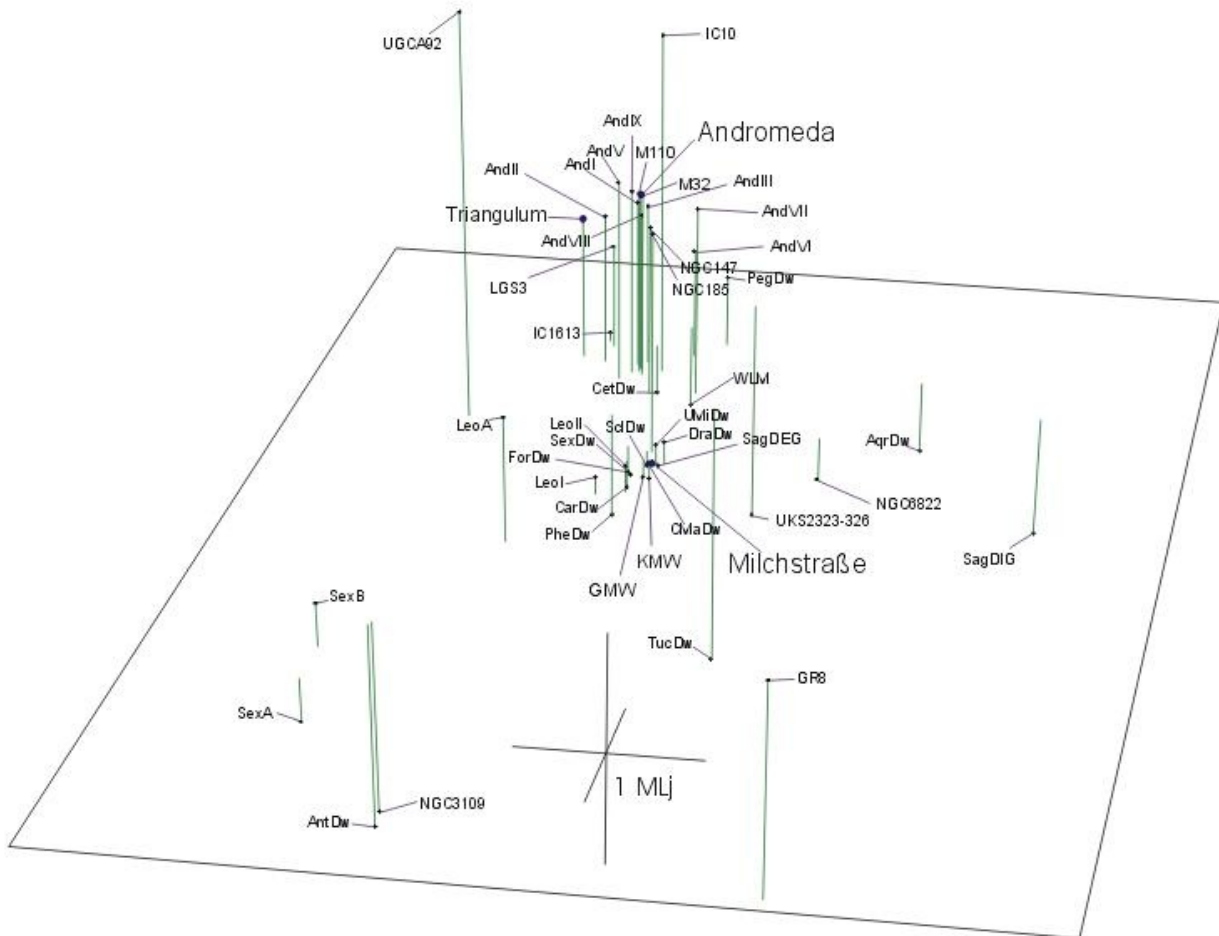


Abbildung 32: Dreidimensionale Darstellung der lokalen Gruppe

Die Milchstraße gehört zur sogenannten **lokalen Gruppe**: Das ist ein *Galaxienhaufen*, also eine Ansammlung von gravitativ gebundenen Galaxien, unter denen die Milchstraße von der Masse und von der Ausdehnung her die zweitgrößte ist. Sie wird nur noch übertroffen von der Andromeda-Galaxie.

Das obige Bild stellt alle Galaxien der lokalen Gruppe dreidimensional dar: In der eingezeichneten Ebene liegt die Milchstraße. Die senkrechten Striche drücken die Entfernungen der Nachbargalaxien zur Ebene aus.

Die als CMaDw bezeichnete *Canis-Major-Zwerggalaxie* ist die nächste Nachbargalaxie der Milchstraße. Sie ist eine sehr kleine Galaxie in einer Entfernung von nur 42000 Lichtjahren vom Milchstraßenzentrum und wird gerade von der Milchstraße einverleibt.

Die Andromedagalaxie ist mit 200000 Lichtjahren Scheibendurchmesser größer als die Milchstraße. Sie ist 2,3 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Neuere Be-

obachtungen haben ergeben, dass dieser Abstand schrumpft; und so besteht die Möglichkeit, dass es in ferner Zukunft zu einem Zusammenstoß von Milchstraße und Andromedagalaxie kommt.

Die Andromedagalaxie ist die einzige Galaxie außerhalb der Milchstraße, die man mit bloßem Auge am Nachthimmel beobachten kann. Mit einem Fernglas oder Teleskop sieht man sie als ausgebreitetes nebelartiges Gebilde.

Dass es sich bei der Andromedagalaxie um eine Galaxie handelt, weiß man erst seit Anfang des 20. Jahrhunderts durch die sogenannte Cepheiden-Methode (eine Methode der Entfernungsbestimmung), die zu dieser Zeit entwickelt wurde. Davor dachte man, bei der Andromedagalaxie handelt es sich um einen *Nebel* (d.h. eine größere Staub- und Gasansammlung) in der Milchstraße. Daher wird die Galaxie bis heute häufig irreführend *Andromedanebel* genannt.

Die lokale Gruppe besteht aus rund 40 Galaxien. Sie gehört zu dem sogenannten **Virgo-Superhaufen**. Ein *Superhaufen* ist eine Ansammlung von Galaxienhaufen, die gravitativ miteinander wechselwirken. Der Virgo-Superhaufen hat einen Durchmesser von etwa 200 Millionen Lichtjahren. In ihm sind über 100 Galaxienhaufen enthalten.

Galaxienhaufen	Entfernung (Mio. LJ)	Anzahl der Galaxien
Virgo	70	2500
Pegasus	220	100
Perseus	310	500
Coma Berenice	350	1000
Herkules	350	75
Ursa Major	880	300

Im Zentrum des Virgo-Superhaufens liegt der Virgo-Galaxienhaufen - mit über 2500 Mitgliedern - ein wesentlich größerer Galaxienhaufen als die lokale Gruppe.

Neben dem Virgo-Superhaufen gibt es natürlich eine Reihe anderer Superhaufen. Geht man dann zu noch größeren Strukturen über, so gelangt man an die Grenzen des (mit heutigen Mitteln) beobachtbaren: Die sogenannten **Großraumstrukturen**.

In einem groß angelegten internationale Projekt (Sloan Digital Sky Survey) wurde über die sogenannte Rotverschiebung die Entfernung von mehr als einer Milliarde Galaxien gemessen.

Das Ergebnis dieser Messung wird in Abbildung 33 gezeigt: Jeder einzelne dargestellte Punkt entspricht einer Galaxie. Da Dunkelwolken innerhalb unserer Milchstraße teilweise die Sicht versperren, gibt es in der Abbildung zwei weiße, keilförmig-unbedruckte Bereiche.

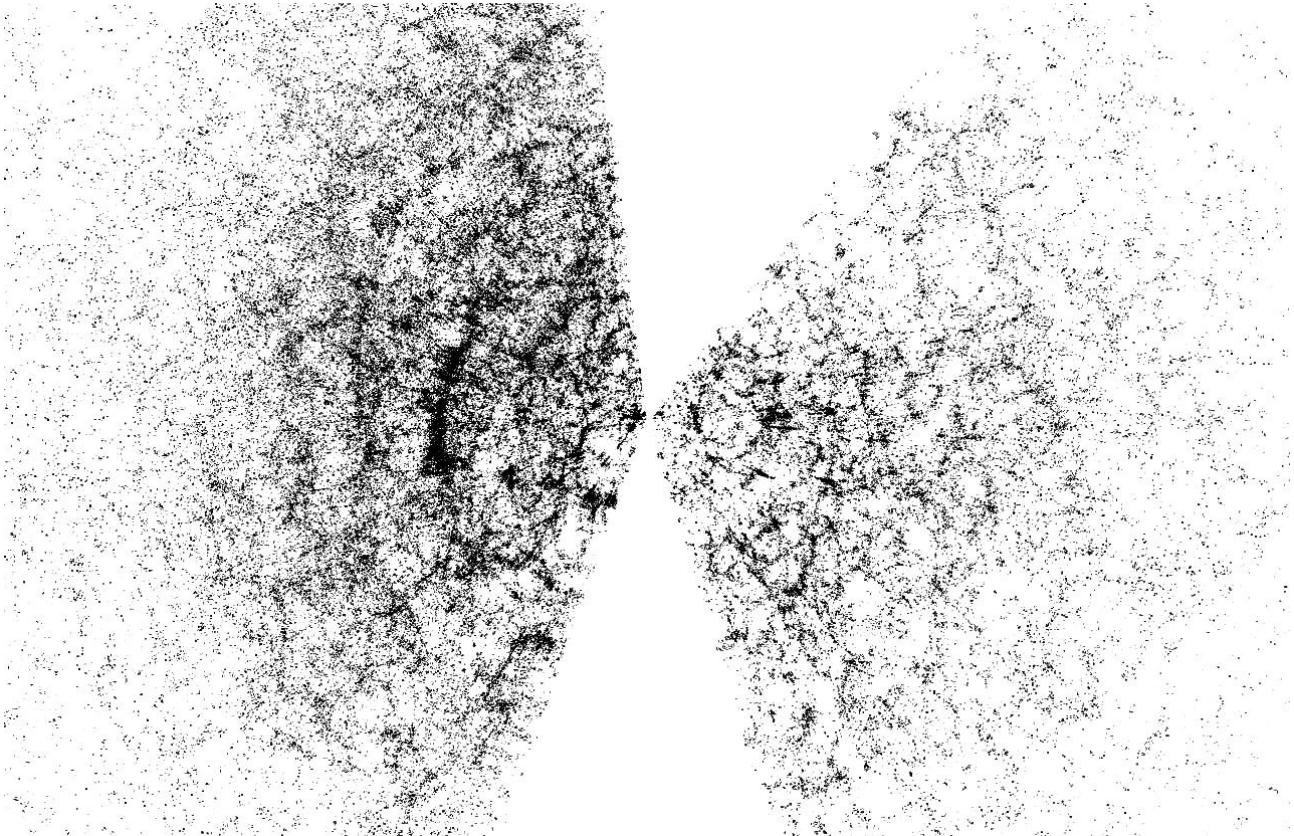


Abbildung 33: Großraumstrukturen in Universum

Man kann das Bild als eine Art Landkarte unserer Umgebung im Weltall interpretieren. Die Erde befindet sich im Zentrum - dort, wo sich die beiden Flügel zuspitzen. Die Strukturen um das Zentrum herum entsprechen der Verteilung der Galaxien im Weltraum. Je weiter ein Punkt in der obigen Abbildung vom Zentrum entfernt liegt, desto weiter ist die jeweilige Galaxie von der Erde entfernt. Die Abbildung zeigt einen 1,3 x 2 Milliarden Lichtjahre großen Ausschnitt unserer Umgebung.

Deutlich zu erkennen sind Knoten, die in einem filamentartigen Netzwerk eingespannt sind. Tatsächlich entspricht jeder Knoten auf der Landkarte einem Galaxiensuperhaufen in Wirklichkeit. Die Filamente sind Strukturen, auf denen die Galaxien im Laufe der Zeit zu den Knotenpunkten hinfließen. Zwischen den Knoten und Filamenten befinden sich große Leerräume, sogenannte *Voids*, in denen sich kaum Galaxien aufhalten.

Dadurch, dass die Landkarte aus zwei Flügeln besteht, ist sie unvollständig: Die Bereiche außerhalb der beiden Flügel sind unbekannt. Sie lassen sich nicht beobachten, da Objekte innerhalb der Milchstraße die Sicht versperren.

Ab einer gewissen Entfernung können unsere astronomischen Instrumente nur noch die lichtstärksten Galaxien registrieren. Daher nimmt die Zahl der in der Ferne beobachtbaren Galaxien ab. Das ist der Grund, weshalb die Flügel in Abbildung 33 am Rand sichtbar verblassen.

Der große Attraktor

Der große Attraktor ist die größte bekannte Massenansammlung im Universum. 1990 wurde beobachtet, dass sich der Coma-Haufen, der Virgo-Superhaufen,

der noch größere Hydra-Centaurus-Superhaufen sowie die sogenannte *Große Mauer* (die von der Ausdehnung her größte bisher entdeckte Großraumstruktur) auf einen Bereich zubewegen, den wir aufgrund von Sicht-hindernissen (die sich in unserer Galaxie befinden) nicht beobachten können. Diesen Bereich nennt man den *großen Attraktor*.

Da der große Attraktor sämtliche ohnehin schon große Objekte zu sich zieht, muss er eine gigantische Masse besitzen. Schätzungen gehen von zehn Billiar-den Sonnenmassen aus.

1.3 Weitere Bestandteile und Ereignisse des Sonnensys-tems

In diesem Abschnitt werden Zusammenhänge angesprochen, die den Umfang der obigen kurzen Vorstellung des Sonnensystems gesprengt hätten, die aber dennoch eine so große Relevanz besitzen, dass sie in einer Einführung in die Astronomie nicht fehlen dürfen.

1.3.1 Asteroiden und der Asteroidengürtel

Als Asteroid (auch Planetoid oder Kleinplanet genannt) werden Metall- und Ge-steinsbrocken im Sonnensystem mit einem Durchmesser von einigen wenigen Zentimetern bis zu einigen hundert Kilometern bezeich-net, die sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne bewe-gen.

Abbildung 34 zeigt ein Foto von *Eros*, einem 33 km lan-gen Vertreter der Asteroiden.



Abbildung 34: Asteroid
Eros

Asteroiden gibt es sehr viele im Sonnensystem - man schätzt die Anzahl auf einige Millionen. Wenn ein solcher Asteroid die Erdbahn kreuzt und schließlich auf der Erde einschlägt, spricht man von einem Meteorit. Kleinere Brocken verglühen dabei in der Atmosphäre. Größere können dagegen für Menschen gefährlich werden. Man vermutet, dass die Dinosaurier durch die Folgen eines Zusammenstoßes eines sehr großen Asteroiden mit der Erde vor 65 Mio. Jahren ausgelöscht wur-den.

Betrachtet man das Sonnensystem in der Draufsicht und trägt man die Position der 400000 Asteroiden ein, deren Position bekannt ist, gelangt man zu folgen-dem Bild:

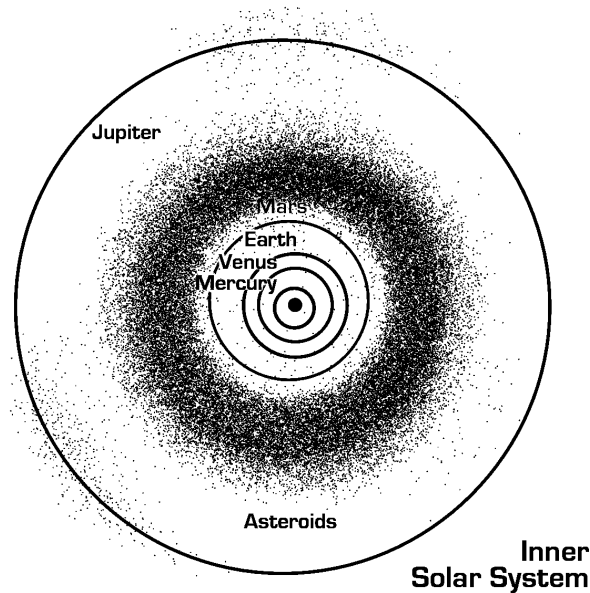


Abbildung 35: Der Asteroidengürtel

Man sieht die deutliche Ansammlung der Asteroiden in einem Ring zwischen Mars und Jupiter. Die Positionen bilden eine gürtelähnliche Struktur - daher spricht man hier vom **Asteroidengürtel**.

Der Asteroidengürtel befindet sich also zwischen den Bahnen der Planeten Mars und Jupiter. Hinter den Bahnen von Neptun und Pluto befindet sich eine weitere gürtelförmige Ansammlung von Metall-, Gesteins- und Eisbrocken, dem sogenannten **Kuipergürtel**.

1.3.2 Kometen

Bei Kometen handelt es sich um Brocken, hauptsächlich aus gefrorenem Wasser, gefrorenem Kohlendioxid und anderen "Gasen" im festen Zustand sowie Staubpartikeln bestehend, die sich auf stark elliptischen bis parabelförmigen Bahnen um die Sonne bewegen. Ihren Ursprung haben sie in sehr weit von der Sonne entfernten Bereichen, in denen es sehr kalt ist.

Den festen Bestandteil eines Kometen nennt man **Kometenkern**. Nähert sich ein Komet auf seiner Bahn der Sonne, so wird sein Kern durch die von der Sonne ausgesandte Strahlung erhitzt. Durch die Hitze verdampft ein Teil des an der Oberfläche des Kometenkerns befindlichen gefrorenen Wassers und Kohlendioxids. Das Gas bildet um den Kometen herum eine diffuse, neblige Hülle, das sogenannte **Koma**. Durch die von der Sonne ausgehenden Strahlung sowie durch den von ihr ausgehenden Sonnenwind werden Teile dieser Gas- und Staubhülle in die Richtung des Sonnenwindes weggeblasen und bilden so den **Schweif** des Kometen.

Eine Betrachtung des obigen Fotos zeigt, dass sich genau genommen zwei Schweife ausbilden: Ein bläulicher und ein grau-weißer Schweif. Bei dem bläulichen Schweif (*Gas- oder Plasmaschweif*) handelt es sich um Gasteilchen, bei dem weißen Schweif um überwiegend Staubeilchen (*Staubschweif*). Die Gas-



Abbildung 36: Komet Hale-Bopp am 11. März 1997

teilchen werden aufgrund ihrer geringen Trägheit stärker vom Sonnenwind abgelenkt als die Staubteilchen. Dadurch kommt es zur Trennung von Gas und Staub sowie zur Ausbildung von Gas- und Staubschweif.

Der Ursprung von Kometen ist noch nicht vollständig geklärt. Der Physiker Jan Hendrik Oort (1900 - 1992) vermutete, dass es im weiten Abstand um das Sonnensystem herum eine große schalenförmige Ansammlung kometenkernähnlicher Brocken gibt. Demnach stoßen diese Objekte zusammen, wodurch der ein oder andere Brocken in Richtung Sonnensystem abgelenkt wird und uns als Komet erscheint. Die postulierte schalenförmige Ansammlung nennt man **Oort-sche Wolke**. Mittlerweile geht man davon aus, dass eine solche Oortsche Wolke tatsächlich existiert.

1.3.3 Mondfinsternisse

Bei einer Mondfinsternis tritt der Mond in den Erdschatten ein. Dabei vermindert sich für ein paar Stunden seine Helligkeit am nächtlichen Himmel.

Wir wollen nun den Schatten, den die Erde wirft, etwas genauer untersuchen. Dazu betrachten wir vor allem vier Lichtstrahlen (1-4), die von der Sonne ausgehen und die Erde gerade so an den Rändern passieren (vgl. Abb. 37):

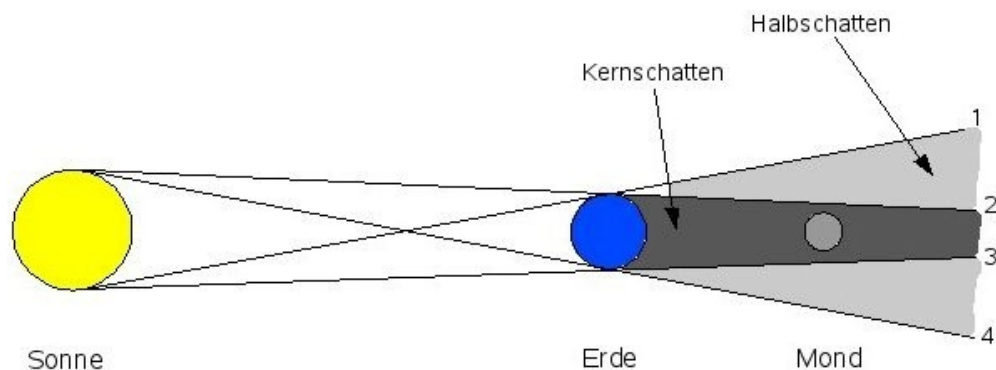


Abbildung 37: Mondfinsternis

Wie man in der Abbildung erkennt, werden die Strahlen 1 und 3 von dem untersten Punkt der Sonne ausgestrahlt. Die Strahlen 2 und 4 stammen beide von dem obersten Punkt der Sonne in der Zeichnung.

Da das Licht, das vom untersten Punkt der Sonne ausgesandt wird, zwischen den Strahlen 1 und 3 auf die Erde prallt, kann es nicht hinter die Erde gelangen. Zwischen den Strahlen 1 und 3 hinter der Erde kommt also kein Licht vom untersten Punkt der Sonne.

Mit gleichen Argumenten gelangt vom obersten Punkt der Sonne kein Licht hinter die Erde zwischen den Strahlen 2 und 4.

Folgerungen:

Zwischen Strahl 1 und Strahl 2 kommt vom untersten Punkt der Sonne kein Licht hinter die Erde; vom obersten Punkt aber schon. Mit anderen Worten: Zwischen Strahl 1 und Strahl 2 gelangt nur das Licht von Teilen der Sonne hinter die Erde, von anderen Teilen nicht.

Genauso zwischen den Strahlen 3 und 4.

Wir sagen: In den Bereichen zwischen den Strahlen 1 und 2 bzw. 3 und 4 wirft die Erde einen **Halbschatten** (= *Penumbra*).

Zwischen den Strahlen 2 und 3 gelangt weder vom obersten noch vom untersten Punkt der Sonne Licht hinter die Erde. Offenbar gelangt in diesen Bereich von keinem Punkt der Sonne das Licht.

Wir sagen: In dem Bereich zwischen den Strahlen 2 und 3 wirft die Erde einen **Kernschatten** (= *Umbra*).

Zur besseren Differenzierung unterscheiden wir nun zwischen drei Arten von Mondfinsternissen:

- Penumbrale Finsternisse, bei denen der Mond ausschließlich durch den Halbschatten (Penumbra) der Erde wandert. Solche Mondfinsternisse sind mit dem menschlichen Auge kaum wahrnehmbar.
- Umbrale Finsternisse, bei denen der Mond auf seiner Bahn den Kernschatten (Umbra) streift.
- Totale Finsternisse, bei denen die Bahn des Mondes so durch den Kernschatten verläuft, dass er völlig darin verschwindet. Der Mond erscheint hier stark verfinstert, in einer rötlich-braunen Färbung. Das Licht, welches den Mond in diesem Farbton erscheinen lässt, wird von der Sonne durch die Erdatmosphäre auf den Mond gelenkt.

1.3.4 Sonnenfinsternisse

Bei Sonnenfinsternissen wird ein Teil der Erde vom Mondschatten getroffen. Hier eine Illustration:

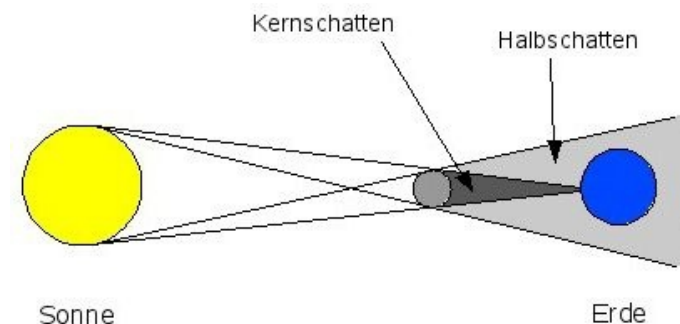


Abbildung 38: Sonnenfinsternis

Bei einer Sonnenfinsternis trifft der Kernschatten des Mondes nur einen kleinen Teil der Erde, da er (wie dargestellt) spitz zuläuft. In diesem kleinen Gebiet auf der Erde erfahren die Menschen eine **totale Sonnenfinsternis**, bei der sich der Himmel am helllichten Tage für wenige Minuten verfinstert.

In Bereichen des Halbschattens ist die durch die teilweise Bedeckung der Sonne herrührende Verfinsternis nicht wahrnehmbar. Jedoch kann man hier bei einer Sonnenbeobachtung den Mond vor der Sonne vorbeiziehen sehen. Man nennt dieses Ereignis eine **partielle Sonnenfinsternis**.

An dieser Stelle wird noch einmal darauf hingewiesen, dass Sonnenbeobachtungen ohne spezielle Ausrüstung zur Erblindung führen können.

2 Beobachtung astronomischer Objekte

2.1 Orientierung am Nachthimmel

2.1.1 Sternbilder

Bei astronomischen Objekten wie Sternen, Galaxien, planetarischen Nebeln, u.s.w. handelt es sich häufig um weit ausgedehnte Objekte, die sich im dreidimensionalen Raum befinden. Zwischen den von der Erde aus sichtbaren Objekten erstrecken sich große Entfernungen, wie wir sie aus unserer Erfahrung auf der Erde nicht kennen. Der Mensch verfügt über keine Sinnesorgane, die bei solch großen Distanzen noch eine Tiefenwirkung (d.h. einen dreidimensionalen Eindruck) hervorrufen. Daher können wir die Entfernungen der Sterne und anderer Himmelskörper nicht ohne Hilfsmittel abschätzen. Für uns erscheint der Sternenhimmel eher zweidimensional.

In Wirklichkeit bewegen sich die astronomischen Objekte durch den Raum. Objekte außerhalb des Sonnensystems sind jedoch derart weit von uns entfernt, dass wir deren Bewegung nicht wahrnehmen können. So scheinen sich die Sterne am Nachthimmel für uns Menschen nicht relativ zueinander zu bewegen - nur mit äußerst feiner Messtechnik und teilweise auf indirektem Weg kann man die Bewegung nachweisen. Praktisch sehen wir im Laufe unseres Lebens keine Änderungen der Sternpositionen am Nachthimmel - abgesehen von der durch die Rotation der Erde hervorgerufenen Drehung.

Die Anordnung (*Konstellation*) der Sterne am Himmel, und damit deren Positionen relativ zueinander, scheint für uns erhalten zu bleiben. Besonders markante Anordnungen von Sternen nennen wir **Sternbilder**; es handelt sich dabei also um Sternanordnungen, die sich im besonderen Maß von den übrigen Sternen abheben.



Abbildung 39: Sternbild Löwe von Johannes Hevel im Jahr 1690

Die Ursprünge der Sternbilder reichen zum Teil bis ins antike Griechenland zurück. Die Babylonier fühlten sich durch verschiedene Anordnungen der Sterne an Tiere erinnert. So entstanden Sternbilder wie etwa der große Bär, die Fische oder das Sternbild Schlange. Später sahen die Griechen in vielen Anordnungen ihre Mythologie wiedergegeben und benannten bestimmte Sternbilder etwa nach ihren Göttern. Zwischen 1600 und 1800 wurden weitere Sternbilder eingeführt und

1922 erst wurden sie endgültig festgelegt.

Abbildung 39 zeigt, wie sich Johannes Hevel im Jahr 1690 das Raubtier Löwe in den Sternen verewigt vorstellte.

Das Sternbild Löwe gehört zu den ältesten Sternbildern. Vermutlich sahen bereits die alten Ägypter in dieser Sternanordnung einen Löwen.

Zum Auffinden von Sternbildern sind solche hintermalten Sternkarten, wie in Abbildung 39 gezeigt, zu unübersichtlich. Die moderneren Darstellungen sind dafür weniger imposant:

Die Abbildung 40 zeigt das Sternbild Löwe in moderner Darstellung. Die Hauptsterne des Sternbildes sind dabei durch Linien miteinander verbunden, um ein Erkennen der Anordnung der Hauptsterne zu erleichtern. Hellster Stern des Sternbildes Löwe ist der Stern *alpha Leonis*, der auch *Regulus* genannt wird.

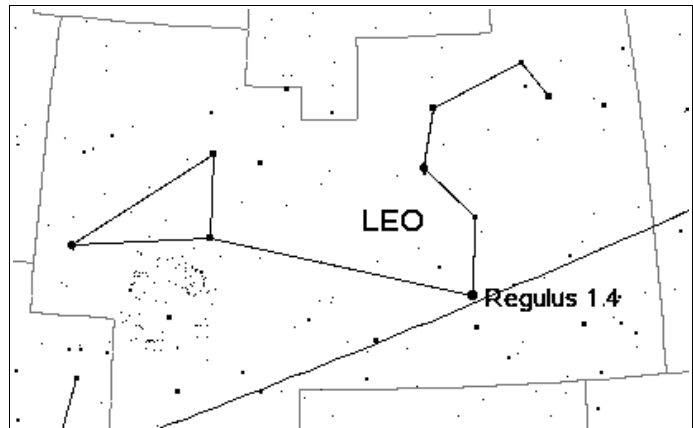


Abbildung 40: Sternbild Löwe im virtuellen Planetarium um KStars

Sternbilder dienten lange Zeit zur Orientierung der Seefahrer. Sie halfen abzuschätzen, auf welchem Breitengrad des Erdballs sie sich befinden.

Ein Sternbild ist umgeben von seinen Sternbildgrenzen. Alle Sterne, Nebel, Sternhaufen und Galaxien innerhalb dieser Grenzen gehören zu dem entsprechenden Bild. Auf dem obigen Ausschnitt erkennt man Teile der Sternbildgrenzen des Löwen als kantige Linien um das Sternbild herum.

Eine Liste aller Sternbilder befindet sich im Abschnitt 2.5.1.

Alle Sterne sind durch ihren Namen eindeutig einem Sternbild zugeordnet. So gehört z.B. der Stern *alpha centauri* zum Sternbild *centaurus*. Für die hellsten Sterne eines Sternbildes werden zur Bezeichnung griechische Buchstaben verwendet. *In der Regel* sind die Buchstaben nach Helligkeit vergeben: So ist *alpha centauri* beispielsweise der hellste Stern des genannten Sternbildes.

2.1.2 Sternkarten, Rektaszension und Deklination

Wir haben uns eben überlegt: Weil die Entfernungen im Weltraum - und damit die Entfernung der Erde zu den anderen Himmelskörpern - sehr groß sind, scheinen am Nachthimmel Sterne, Galaxien und viele andere Objekte ihre Positionen relativ zueinander beizubehalten. Daher wirken die Sternbilder unveränderlich mit der Zeit. Die meisten Veränderungen vollziehen sich so langsam, dass sie von einem Menschen im Laufe seines Lebens nicht ohne empfindliche Messapparatur festgestellt werden können.

Nur aufgrund der Eigenrotation der Erde und der Drehung der Erde um die Sonne, scheinen sich die Sternanordnungen im Laufe einer Nacht (bzw. im Laufe eines Jahres) von Osten in Richtung Westen zu bewegen. Das liegt aber daran, dass sich der Beobachter mit der Erde bewegt, und nicht die Sternanordnungen um den Beobachter.

Weil sich die Anordnung der Sterne (und anderer Objekte) praktisch nicht verändert, sehen wir sie als feststehend an. Aus diesem Grund könnten wir eine Art "Landkarte" erstellen, in der alle Objekte eingezeichnet sind. Sozusagen eine Landkarte astronomischer Objekte, mit dessen Hilfe wir uns am Nachthimmel orientieren könnten.

Solche Landkarten gibt es tatsächlich. Wir werden sie künftig **Sternkarten** nennen. In Sternkarten finden wir also die Anordnung der Sterne wieder, die wir auch am Nachthimmel beobachten können.

Damit wir den Sternen auf der Sternkarte eine eindeutige *Position* zuordnen können, benötigen wir so etwas wie ein Koordinatensystem für die Sternkarte. Das Koordinatengitter wird gewöhnlich wie folgt gebildet:

Richtet man seinen Blick in südliche Richtung, und gibt die Sternkarte den Ausschnitt des Sternhimmels wieder, den man gerade betrachtet, wird die Karte zum einen in Gitterlinien unterteilt, die von nördlicher in südliche Richtung verlaufen. Die zu den Gitterlinien gehörende Koordinatenachse nennt man **Rektaszension**. Zum anderen wird die Karte in Gitterlinien unterteilt, die von östlicher in westliche Richtung zeigen. Die zugehörige Koordinatenachse nennt man **Deklination**. Die Unterteilung der Sternkarte in Rektaszension und Deklination kann man sich ähnlich wie die Unterteilung einer geographischen Landkarte in Längen- und Breitengrade vorstellen.

Die Deklination ist, genauso wie der Breitengrad einer Landkarte, im Gradmaß aufgeteilt (-90° bis 90°). Die Rektaszension ist jedoch in sogenannte Stundenwinkel aufgeteilt, d.h. von 0h bis 24h. Dies mag zunächst merkwürdig klingen - es wird sich bei einer Himmelsbeobachtung jedoch als nützlich erweisen, denn der Sternenhimmel scheint sich aufgrund der Erdrotation in einer Stunde um eine Rektaszension von 1h weiterzudrehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Eine Sternkarte gibt einen Ausschnitt des Sternenhimmels in gedruckter Form wieder. Sternkarten sind unterteilt in Rektaszension und Deklination. Jeder Punkt ist durch die Angabe dieser *Koordinaten* (Rektaszension, Deklination) eindeutig bestimmt.

In Sternkarten ist ein Ausschnitt des Nachthimmels so wiedergegeben, wie man ihn zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort tatsächlich auffindet. Auf einer Sternkarte ist also die Anordnung der Sterne, so wie man sie tatsächlich von der Erde aus sieht, schwarz auf weiß gedruckt.

Vor einem astronomischen Beobachtungsabend kann sich ein Astronom durch Sternkarten auf seine geplanten Beobachtung vorbereiten. Während einer Beobachtung kann er sich anhand dieser Karten orientieren, indem er die Sternanordnungen auf der Sternkarte mit den Anordnungen der Sterne am Nachthimmel vergleicht.

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von Computerprogrammen, die Sternkarten "erzeugen" können. Wir werden auf solche *virtuelle Planetarien* später zu sprechen kommen.

2.1.3 Sternbilder als Orientierungshilfen

Sternbilder eignen sich, wegen ihrer einprägsamen Gestalt und ihren meist relativ hellen Hauptsternen, zum Aufsuchen beliebiger astronomischer Objekte.

Das Prinzip ist einfach:

Mit Hilfe einer Sternkarte versucht man sich die Position des Objektes relativ zu besonders leicht aufzufindenden Sternbildern zu merken. Hat man am Nachthimmel das entsprechende Sternbild dann gefunden, gelangt man durch die gemerkte Relativposition auch schnell zum gewünschten Objekt. Am besten verdeutlichen wir die Methode anhand zweier Beispiele:

Der Polarstern gehört nicht zu den auffallend hellen Sternen. Daher fällt es vielen Menschen schwer, ihn am Nachthimmel auf Anhieb ausfindig zu machen. Kennt man das Sternbild Ursa Major (auch Großer Bär oder großer Wagen genannt), findet man leicht zum Polarstern, indem man die hintere Achse des Wagens fünffach verlängert.

Der Sternkartenausschnitt in Abbildung 41 zeigt die Sternbilder Ursa Major und Ursa Minor. Die eingezeichnete rote Linie stellt die Verlängerung der hinteren Achse des großen Wagens dar und führt ganz in die Nähe des Polarsterns.

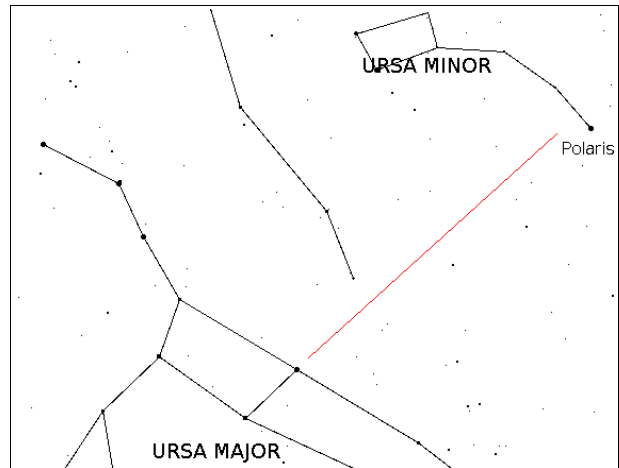


Abbildung 41: Auffinden des Polarsterns über den "großen Wagen" (Ursa Major)

Die Andromedagalaxie gehört zu den wenigen Galaxien, die wir mit bloßem Auge wahrnehmen können. Sie ist allerdings so lichtschwach, dass sie einem nicht gerade ins Auge springt. Man kann sie aber über das Sternbild Cassiopeia leicht finden:

Die Sternanordnung Cassiopeia bildet zwei Dreiecke. Das spitzere der beiden Dreiecke zeigt relativ genau auf den gut sichtbaren Stern μ Andromedae, welcher sich ganz in der Nähe von der Andromedagalaxie befindet.

2.2 Wichtige Begriffe

Zenit

Zur groben Beschreibung der Lage astronomischer Objekte am Nachthimmel greift man häufig auf die vier Himmelsrichtungen *Norden, Süden, Westen, Osten* zurück. Es gibt jedoch Bereiche, die sich nicht durch die vier Himmelsrichtungen beschreiben lassen: Wenn sich ein Objekt etwa direkt über dem Beobachter befindet, trifft keine der Himmelsrichtungen zu. Hierfür gibt es die Richtungsangabe *Zenit*. Der **Zenit** ist der Scheitelpunkt des Himmels, also der "höchste" Punkt am Nachthimmel.

Das Gegenstück zum Zenit - also der nicht sichtbare Punkt des Nachthimmels direkt unter dem Beobachter - nennt sich *Nadir*.

Ekliptik

Wir stellen uns nun die Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne vor. Wenn

man während des Umlaufes von der Erde aus auf die Sonne blickt, so scheint die Sonne vor dem Sternenhintergrund zu wandern: Beispielsweise steht die Erde nach einem halben Jahr genau auf der anderen Seite der Sonne. Das heißt, von der Erde aus gesehen sieht man die Sonne dann vor einem anderen Sternenhintergrund; nämlich vor dem Sternenhintergrund, den man vor diesem halben Jahr noch bestens sehen konnte.

Man kann den Weg, den die Sonne vor dem Sternenhintergrund zurücklegt, auf eine Sternkarte einzeichnen. Da sich die Bahnebene der Erde nicht ändert, wandert die Sonne im Laufe eines jeden Jahres auf der selben Linie vor dem Sternenhintergrund. Diese Linie, die man auf Sternkarten einzeichnen kann (und die oft schon eingezeichnet ist), nennen wir **Ekliptik**.

Da die *Inklination* der meisten Planeten (d.h. der Winkel zwischen Planeten- und Erdbahnebene) nur gering ist, scheinen auch sie sich entlang der Ekliptik zu bewegen - jedenfalls bis auf kleinere Abweichungen.

Genauer: Die Planeten bewegen sich innerhalb des sogenannten:

Tierkreis

Der Tierkreis bezeichnet eine etwa 20° breite Zone entlang der Ekliptik. Viele der Sternbilder innerhalb des Tierkreises tragen die Bezeichnungen von Tieren (Löwe, Krebs, Stier,...) - daher der Name.

Elongation

Unter der Elongation eines Planeten versteht man den Winkel zwischen der Verbindungsgerade Erde-Sonne und der Verbindungsgerade Erde-Planet.

Als praxisrelevante Regel kann man sich merken: *Je größer dieser Winkel ist, desto besser lässt sich der entsprechende Planet am Nachthimmel beobachten.*

Quadratur

Befindet sich ein Planet in Quadratur zur Sonne, so beträgt seine Elongation 90° .

Opposition und Konjunktion

Nun gibt es noch einige Begriffe, die die Positionen von Planeten relativ zur Erde beschreiben. Man sagt, ein äußerer Planet befindet sich in **Opposition**, wenn seine Elongation maximal wird. In der Draufsicht der Bahnebenen lässt sich in dieser Situation eine Gerade Sonne-Erde-Planet durch die Himmelskörper hindurch zeichnen (vgl. Abbildung 42).

Ein Planet, dessen Bahn außerhalb der Erdbahn verläuft, befindet sich in **Konjunktion**, wenn er sich (von der Erde aus gesehen) hinter der Sonne befindet.

Für innere Planeten verwendet man die Begriffe **obere** und **untere Konjunktion** entsprechend der Illustration in Abbildung 42:

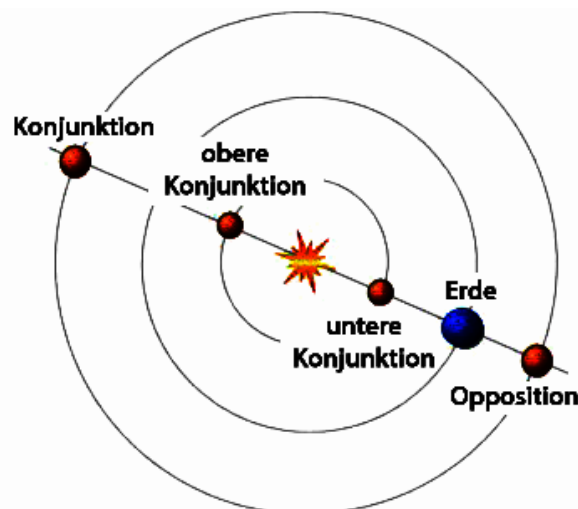


Abbildung 42: Illustration: Konjunktion und Opposition

Scheinbare und absolute Helligkeit

Blicken wir nachts zum Sternenhimmel hinauf, so leuchten die Sterne und Planeten in den verschiedensten Farben und Helligkeiten. Die Helligkeit von Sternen, wie wir sie von der Erde aus wahrnehmen, nennt man die **scheinbare Helligkeit**. Auf das "scheinbar" gehen wir gleich genauer ein.

Hipparchos suchte 150 vor Christus nach einer Möglichkeit, die *scheinbare Helligkeit* von Sternen anzugeben. Dazu teilte er die Sterne nach ihrer scheinbaren Helligkeit in sechs **Größen-** bzw. **Helligkeitsklassen** ein. Mit Größenklasse 1 bezeichnete er die hellsten Sterne, mit Größenklasse 6 die kaum noch wahrnehmbaren.

Im 19. Jahrhundert wurde diese Skala zur heutigen Form erweitert und verfeinert:

Zum einen gibt es Objekte, die heller sind als Größenklasse 1 (bestes Beispiel: Die Sonne). Um solche helle Objekte sinnvoll einer Größenklasse zuordnen zu können, musste die Skala nach unten (d.h. ins Negative) erweitert werden. Zum anderen gibt es Objekte, die so dunkel sind, dass man sie mit bloßem Auge nicht sieht. Solche Objekte sind zum Teil wesentlich dunkler als Größenklasse 6, weswegen die Skala auch in diese Richtung erweitert werden musste. Als detailliertere Beschreibungen der scheinbaren Helligkeit von Objekten notwendig wurden, als dies durch die bisherige Einteilung möglich war, wurden die bisherigen Größenklassen nocheinmal unterteilt - heute sind alle rationalen Zahlen erlaubt. Schließlich wurde die scheinbare Helligkeit des Sterns Wega im Sternbild Leier mit 0,0 mag festgelegt und die Helligkeiten der anderen Sterne daran orientiert. Der Größenklasse 6 werden weiterhin die scheinbaren Helligkeiten der Objekte zugeordnet, die das menschliche Auge bei perfekten Bedingungen ohne Hilfsmittel gerade so noch wahrnehmen kann.

Die scheinbare Helligkeit ist eine einheitslose Zahl. Um zu kennzeichnen, dass es sich bei dieser Zahl um eine Helligkeitsangabe handelt, schreibt man hinter einer solchen Zahl das Zeichen "mag" (für *magnitudines* = *Größe*).

Das hellste Objekt am Himmel ist die Sonne, mit einer scheinbaren Helligkeit von -26,8 mag. Als hellster Planet tritt die Venus in Erscheinung, mit maximal -4,4 mag, als hellster Stern der Sirius mit -1,4 mag. Entgegen der weit verbreite-

ten Meinung ist der Polarstern *nicht* der hellste Stern des Nachthimmels, er hat lediglich eine scheinbare Helligkeit von 2 mag.

Wichtig: Je kleiner die Größenklasse, desto heller der Stern. Umgekehrt, je größer die Größenklasse, desto dunkler der Stern.

Die Sterne, die wir am Nachthimmel beobachten, sind offenbar unterschiedlich hell. Dabei dürfen wir aber nicht vergessen, dass sie von der Erde auch unterschiedlich weit entfernt sind. So kann ein weit entfernter Stern mit großer Leuchtkraft von der Erde aus viel dunkler erscheinen als ein sehr naher Stern mit kleiner Leuchtkraft. Deshalb sagt man zu der von der Erde aus gesehenen Helligkeit auch **scheinbare** Helligkeit.

Um die Sterne wirklich "gerecht" nach ihrer eigentlichen Leuchtkraft zu bewerten wäre es notwendig, ihre Helligkeit von ein und der selben Entfernung aus zu bewerten. Solche Helligkeitswerte können häufig berechnet werden: Man berechnet, wie hell der jeweilige Stern in einer Entfernung von 32,6 Lichtjahren erscheinen würde. Die so berechnete Helligkeit wird **absolute Helligkeit** genannt. Dadurch wird eine gewisse Vergleichbarkeit geschaffen.

Beispiel: Der Polarstern gehört mit einer scheinbaren Helligkeit von 2 mag zwar nicht zu den hellsten Sternen am Nachthimmel - seine absolute Helligkeit von -4,6 mag ist jedoch im Vergleich zu anderen Sternen groß und offenbart, dass der Grund für sein "dunkles" Erscheinen am Nachthimmel in seiner Entfernung zur Erde zu suchen ist.

Objekt	scheinbare Helligkeit	absolute Helligkeit
Sonne (Stern)	- 26,8 mag	4,8 mag
Mond	- 12,5 mag	-
Venus (Planet)	- 4,4 mag	-
Sirius (Stern)	- 1,4 mag	1,4 mag
Alpha Centauri A (Stern)	- 0,3 mag	4,4 mag
Wega (Stern)	0,0 mag (def.)	0,6 mag
Polarstern (Stern)	2,0 mag	-4,6 mag
Pluto (Planet)	14,0 mag	-

Information zum Auge des Menschen

Auf der Netzhaut des Auges sitzen Zellen, die das einfallende Licht in elektrische Signale verwandeln und an das Gehirn weiterleiten. Wir besitzen zwei verschiedene Arten von Zellen, sogenannte Stäbchen- und Zäpfchenzellen: Die Stäbchenzellen sind zwar sehr lichtempfindlich, können aber keine Farbe wahrnehmen. Die Zäpfchenzellen hingegen sind relativ lichtunempfindlich, reagieren dafür aber auch auf Farbreize. Bei heller Umgebung werden die Signale der Stäbchen durch die Signale der Zäpfchen überlagert; bei dunkler Umgebung stumpfen die "farbigen" Signale der Zäpfchen ab und die der Stäbchen bleiben übrig.

Die Folge für astronomische Beobachtungen:

Die allermeisten Objekte, die wir mit einfachen Mitteln beobachten können, werden wir nur schwarzweiß wahrnehmen können.

Unsere Farbsinneszellen (Zäpfchen) sind für die meisten Objekte zu lichtunempfindlich, um Signale an das Gehirn weitergeben zu können.

Scharfes Sehen verdanken wir dem sogenannten *gelben Fleck* in unserem Auge. In diesem gelben Fleck sitzen die Farbsinneszellen (Zäpfchen) besonders dicht. Andererseits gibt es hier leider kaum Stäbchenzellen. Die Folge: Der Bereich des Sichtfeldes, bei dem wir tagsüber das scharfe Sehen gewohnt sind, kann besonders lichtschwache Objekte überhaupt nicht wahrnehmen. In der Astronomie beobachtet man jedoch sehr häufig lichtschwache Objekte. Daher folgender

Tipp: *Bei der Beobachtung besonders lichtschwacher Objekte nicht direkt auf dieses Objekt schauen, sondern etwas seitlich versetzt (indirektes Sehen).*

Denn dann trifft das Licht nicht mehr auf den gelben Fleck der Netzhaut, sondern auf einen Bereich, der dichter mit den lichtempfindlichen Stäbchenzellen besiedelt ist.

Virtuelle Planetarien

Virtuelle Planetarien sind Programme, die den von der Erde aus sichtbaren Sternenhimmel zu einem beliebigen Zeitpunkt realistisch darstellen können. Plant man eine astronomische Beobachtung, so kann man sich am Computer anzeigen lassen, wie der Nachthimmel aussieht - und sich entsprechend auf den Beobachtungsabend vorbereiten.

Häufig verwendete Programme sind **Guide**, **RedShift**, **Stellarium** und das weiter unten detailliert vorgestellte **Cartes du Ciel**. Alle vier Programme erfreuen sich eines großen Funktionsumfangs und haben eine relativ selbsterklärende Benutzeroberfläche. Bei Cartes du Ciel und Stellarium handelt es sich zudem um Programme, die OpenSource sind. Das bedeutet, dass die beiden Programme kostenlos im Internet verfügbar sind und beliebig an Dritte weitergegeben werden dürfen.

Ich möchte an dieser Stelle anhand des Programms Guide (Version 6) die darstellenden Eigenschaften eines virtuellen Planetariums vorstellen. Diese Eigenschaften lassen sich problemlos auf RedShift, Cartes du Ciel und andere Programme übertragen.

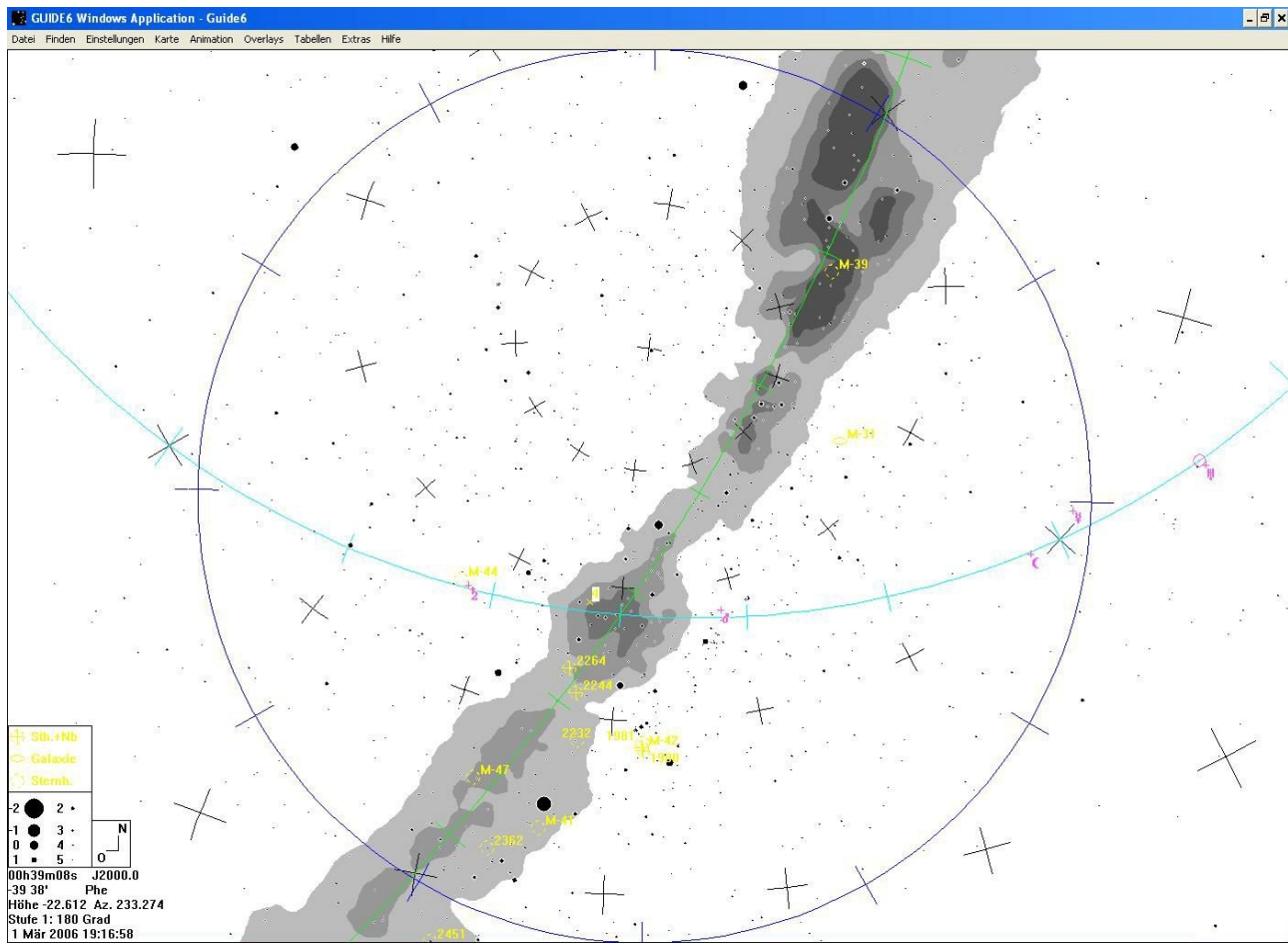


Abbildung 43: Das virtuelle Planetarium Guide 6.0

In Abbildung 43 sieht man ein Bildschirmfoto des genannten Programms. Im normalen Betrieb werden die Sterne weiß und der Hintergrund schwarz gezeichnet; um Druckerschwärze zu sparen, habe ich den Inhalt invertiert. Das Bild zeigt einen Ausschnitt des Himmels, wie man ihn am 1. März 2006 um 19:16 sehen würde. Es handelt sich hierbei also um eine Sternkarte, die vom Programm erstellt wird.

Bei einer nächtlichen Beobachtung können wir die astronomischen Objekte nur dann sehen, wenn sie oberhalb des Horizonts liegen. Der große Kreis im obigen Bildschirmfoto markiert diesen Horizont: Sichtbar sind nur Objekte innerhalb des Kreises.

Links unten befindet sich auf dem Foto die Legende. Unterschiedlich helle Sterne werden durch das Programm entsprechend ihrer Helligkeit größer oder kleiner gezeichnet. Damit man die Helligkeit eines Sterns schnell abschätzen kann, ordnet die mittlere Legende den Größen einen Zahlenwert zu. Dieser Zahlenwert entspricht der eben kennengelernten scheinbaren Helligkeit. Rechts neben der Helligkeits-Legende befindet sich die Anzeige der Himmelsrichtung (O=Osten, N=Norden).

Sternkarten virtueller Planetarien benutzt man, in dem man sich ein ausgedrucktes Exemplar einer solchen Sternkarte über den Kopf hält, und das Papier so ausrichtet, dass die auf der Sternkarte markierte Himmelsrichtung mit der tatsächlichen Himmelsrichtung übereinstimmt. In dieser Stellung stimmen dann auch die Positionen der Objekte auf der Karte mit den Positionen in der Realität überein.

Im Bild befindet sich des Weiteren eine Datumsanzeige und eine Angabe zur

Position des Mauszeigers auf der Sternkarte (Deklination, Rektaszension).

Die Linie, die geschwungen von links nach rechts verläuft, stellt die *Ekliptik* dar.

Virtuelle Planetarien unterstützen, neben der Möglichkeit zum Erstellen von Sternkarten, eine ganze Reihe weiterer nützlicher Funktionen. Neben umfangreichen Suchfunktionen sind hier Funktionen zum Erstellen von Ereigniskalender und Finsternistabellen, zur Anzeige detaillierter Objektinformationen Standard. Manche Programme verfügen über besondere Bonbons, etwa über ein Astronomie-Lexikon oder über die Möglichkeit, die Sternkarten mit Fotos zu hinterlegen.

Bevor man eine Beobachtung startet, müssen nach der Installation eines virtuellen Planetariums nun nur noch zwei grundlegende Einstellungen vorgenommen werden:

1. Längen- und Breitengrad des Beobachtungsortes müssen eingegeben werden. Dabei kann zusätzlich die Höhe des Ortes über dem Meeresspiegel in die Berechnung miteinbezogen werden.

2. Datum und Zeit müssen eingestellt werden.
Wichtig: MESZ und MEZ unterscheiden!

Herborn:

50° 41' N (Breitengrad)

08° 19' O (Längengrad)

Diese Daten sind für den ganzen Lahn-Dill-Kreis eine gute Näherung.

Herborn befindet sich 287 Meter über NN.

Universalzeit (UT), Mitteleuropäische Zeit (MEZ), Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ)

Die Welt ist in Zeitzonen unterteilt, um die Uhrzeit den jeweiligen Helligkeitsverhältnissen anzupassen. UT nennt man die Ortszeit des durch Greenwich (England) führenden Nullmeridians.

In Deutschland laufen die Uhren im Winter nach der mitteleuropäischen Zeit (MEZ), im Sommer nach der mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ). Die Zeitzonen stehen in folgender Relation zueinander:

$MEZ = UT + 1 \text{ Stunde}$

$MESZ = UT + 2 \text{ Stunden} = MEZ + 1 \text{ Stunde.}$

2.3 Teleskope

Bei Beobachtungen von der Erde aus erscheinen viele astronomische Objekte sehr klein und lichtschwach. Die meisten unter ihnen sind daher mit dem bloßen Auge nicht sichtbar. Daher benötigen wir Hilfsmittel, mit denen wir solche Objekte auflösen können. Diese Hilfsmittel sind in der Praxis Teleskope:

Teleskope vergrößern das astronomische Objekt und lassen es heller erscheinen. Dabei tritt das Licht des Objekts über eine große Fläche in das Teleskop ein, wird gebündelt und gelangt über die kleine Fläche der Pupille in das Auge.

Dieser Abschnitt soll die Funktionsweise von Teleskopen verständlich machen und einen Überblick über die Bandbreite der unterschiedlichen Teleskop-Bauarten geben.

Für all diejenigen, die an Teleskopbeobachtungen und somit an der Anschaffung von eigenen Teleskopen interessiert sind, soll dieser Abschnitt Ratschläge geben und über die Vor- und Nachteile der einzelnen Bauarten informieren. Danach wird noch einmal auf wichtige Bestandteile von Teleskopen sowie auf qualitative Unterschiede hinsichtlich Okularen und Teleskopmontierungen eingegangen.

2.3.1 Funktionsweise eines Linsenteleskops

Dieser Unterabschnitt soll es dem Leser ermöglichen, die vergrößernden Eigenschaften von Teleskopen und Fernrohren zu verstehen. Wir beschränken uns dabei auf Teleskope, die ihre vergrößernden Eigenschaften zweier sogenannter Bikonvexlinsen verdanken. Bevor wir uns dem Aufbau und die Funktionsweise von solchen Teleskopen genauer ansehen, müssen wir uns daher zunächst den Eigenschaften von Bikonvexlinsen zuwenden.

Bikonvexlinsen im Strahlenmodell

Linsen sind in unserem Fall lichtdurchlässige Glaskörper, die den Weg des durch sie hindurchgehenden Lichtes gezielt verändern. Der Begriff *konvex* ist dem Lateinischen entlehnt und bedeutet "gewölbt". *Bikonvexlinsen* sind - wie ihr Name schon sagt - beidseitig gewölbte Glaskörper, mit denen sich Lichtwege verändern lassen. Bekannt sind Bikonvexlinsen vor allem aufgrund ihres Einsatzes in Leselupen.

Zur genaueren Untersuchung der Eigenschaften von Linsen benötigen wir noch zwei wichtige Begriffe. In Abbildung 44 ist hierfür eine solche Bikonvexlinse im seitlichen Querschnitt gezeigt.

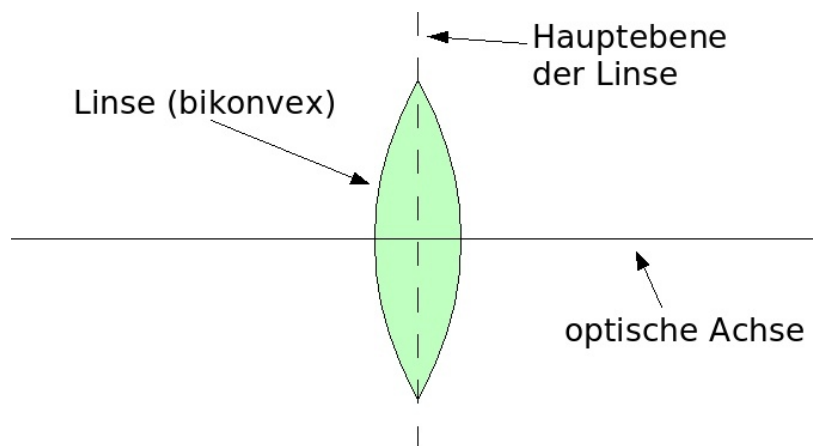


Abbildung 44: Begriffsdefinitionen an einer Bikonvexlinse

Die **Hauptebene** einer Bikonvexlinse befindet sich genau zwischen ihren beiden Wölbungen. Sie ist im obigen Querschnitt als gestrichelte Linie dargestellt. Senkrecht zur Hauptebene und durch den Mittelpunkt einer Linse läuft, wie in der Abbildung ebenfalls dargestellt, die sogenannte **optische Achse**.

Ziel ist es nun, den Einfluss einer Bikonvexlinse auf den Weg des Lichtes, welches durch sie hindurch verläuft, in einem einfachen Modell zu beschreiben. Für die genauen Vorgänge innerhalb der Linse interessieren wir uns nicht - uns kommt es hier vielmehr darauf an zu beschreiben, wie der Lichtweg durch die Linse verändert wird.

Zur genauen Untersuchung des Lichtweges sind sehr enge **Lichtbündel**, etwa wie sie von einem Laser erzeugt werden, besonders hilfreich, da sich hier der Lichtweg direkt verfolgen lässt: In einem Experiment lässt man mehrere schmale Lichtbündel durch die Linse hindurchscheinen und beobachtet die Änderung des Lichtweges hinter der Linse.

Im Anschluss an das Experiment kann man den Lichtweg in die obige Querschnittszeichnung durch Pfeile, die die jeweilige Richtung des jeweiligen Lichtbündels wiedergeben, eintragen. Die Pfeile nennen wir **Lichtstrahlen**. Lichtstrahlen geben also die Ausbreitungsrichtung von Licht wieder. Hier ein Beispiel:

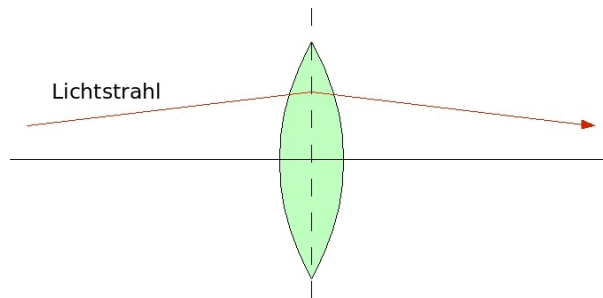


Abbildung 45: Beispielhafter Verlauf eines Lichtstrahls durch eine Bikonvexlinse

Der Lichtstrahl (rot) fällt von links auf die Linse ein, und wird von ihr in die eingezeichnete Richtung abgelenkt. Wie bereits oben erwähnt, behandeln wir nicht die genauen Vorgänge innerhalb der Linse. Daher zeichnen wir die Änderung der Richtung des Lichtstrahls, die in Wirklichkeit beim Eintritt in und beim Austritt aus der Linse geschieht, an der Hauptebene der Linse ein. Deshalb hat der in obiger Abbildung eingezeichnete Lichtstrahl an der Hauptebene (gestrichelte Linie) einen Knick. Das gibt zwar die Vorgänge innerhalb der Linse nicht korrekt wieder - doch die für uns wichtige, von außen feststellbare Richtungsänderung des Lichtstrahls wird durch diese Vereinfachung trotzdem korrekt erfasst.

Bei den gerade vorgestellten Vereinfachungsgedanken handelt es sich um eine Modellvorstellung, die die Wirklichkeit für unsere Ansprüche genau genug beschreibt. Die Modellvorstellung nennt man in der Physik **Strahlenmodell**. Dabei haben wir auch schon eine Grenze ausfindig gemacht, auf die man das Strahlenmodell in obiger Form nicht anwenden kann: Auf das Innere einer Linse. Denn unsere gemachten Vereinfachungen sind zu grob, um über das Innere eine Aussage machen zu können.

Durch gezielte Experimente kann man feststellen, dass es sogenannte *Ausgezeichnete Lichtstrahlen* gibt, deren Richtungsänderungen durch eine Bikonvexlinse genau vorhergesagt werden können. Von solchen Ausgezeichneten Lichtstrahlen gibt es drei Typen, die nun vorgestellt werden:

- Lichtstrahlen, die *parallel zur optischen Achse* auf die Linse treffen, schneiden sich hinter der Linse in einem Punkt, der auf der optischen Achse liegt:

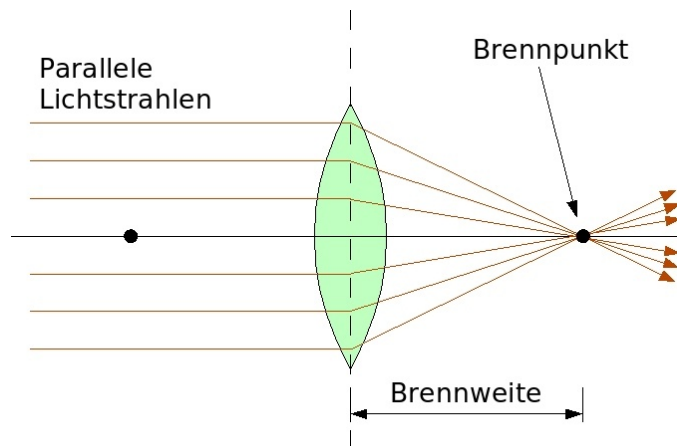


Abbildung 46: Parallel einlaufende Lichtstrahlen treffen sich hinter der Linse in einem Punkt - dem Brennpunkt

Der genannte Punkt wird **Brennpunkt** der Linse genannt. In obiger Abbildung lässt man die Lichtstrahlen von links aus auf die Linse treffen. Zum gleichen Ergebnis kommt man natürlich, wenn man die Lichtstrahlen von rechts aus auf die Linse treffen lässt - nur, dass der Brennpunkt dann auf der linken Seite liegt (er ist in der Abbildung angedeutet). Eine Linse hat also streng genommen zwei Brennpunkte - und zwar einen auf jeder Seite der optischen Achse.

Die Abstände der beiden Brennpunkte zur Linse sind gleich groß. Man nennt sie **Brennweite**. Genauer: Die *Brennweite* gibt den Abstand des Mittelpunktes der Linse zu den beiden Brennpunkten an. Für die einzelne Linse ist die Brennweite eine unveränderliche, feste Größe. Jedoch haben in der Regel unterschiedliche Linsen auch unterschiedliche Brennweiten.

Jede Linse hat also ihre eigene, feste Brennweite. Diese Tatsache wird uns später von großem Nutzen sein.

- Lichtstrahlen, die durch einen der Brennpunkte verlaufen, bevor sie auf die Linse treffen, sind hinter der Linse parallel zur optischen Achse.

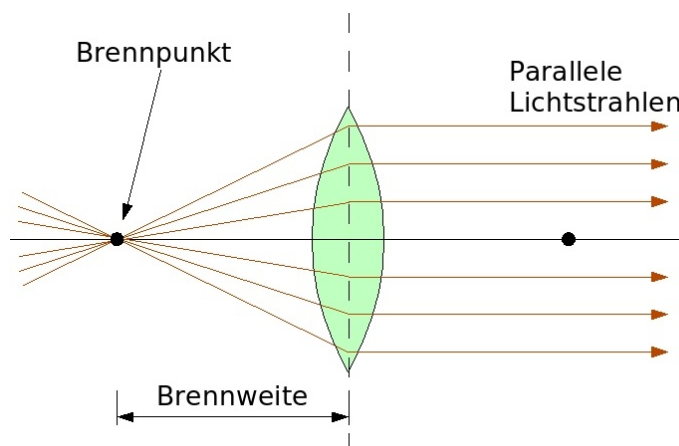


Abbildung 47: Durch den Brennpunkt gehende Lichtstrahlen verlaufen hinter der Linse parallel

Hierbei handelt es sich um einen ähnlichen Fall wie unter Punkt 1, nur, dass die Richtung der Lichtstrahlen umgekehrt wurde.

- Lichtstrahlen, die durch den Mittelpunkt einer Linse verlaufen, erfahren keine Richtungsänderung.

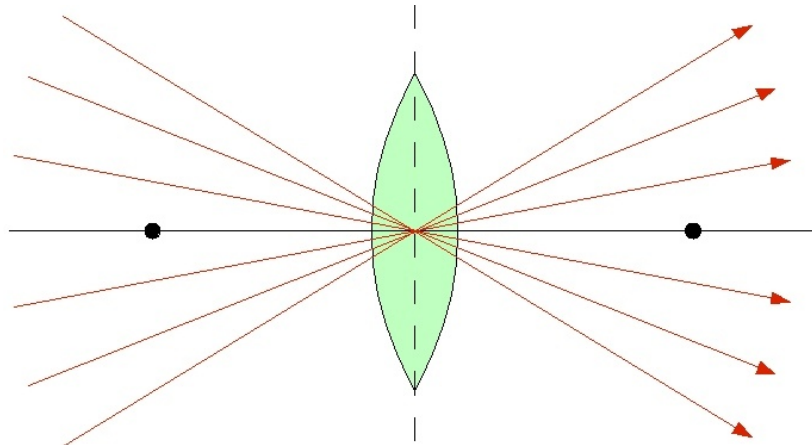


Abbildung 48: Lichtstrahlen gehen ungebrochen durch den Mittelpunkt einer Linse

Das Gleiche gilt natürlich auch für Strahlen, die entlang der optischen Achse verlaufen, denn die optische Achse geht in dem hier behandelten Fall durch den Mittelpunkt der Linse.

Nun haben wir schon wichtige Eigenschaften der Bikonvexlinsen kennen gelernt. In den nächsten Unterabschnitten kommen wir nun zu einigen Anwendungen - darunter das Linsenteleskop (Refraktor).

Abbildungen mit Bikonvexlinsen

In der folgenden Abbildung 49 betrachten wir ein beliebiges Objekt (z.B. eine Kerze), welches symbolisch durch einen dicken Pfeil dargestellt wird. Dabei verfolgen wir drei von der Spitze des Objektes ausgehende Lichtstrahlen (rot), von denen wir den weiteren Verlauf hinter der Linse kennen: Den drei von der Objektspitze ausgehenden *ausgezeichneten Lichtstrahlen*.

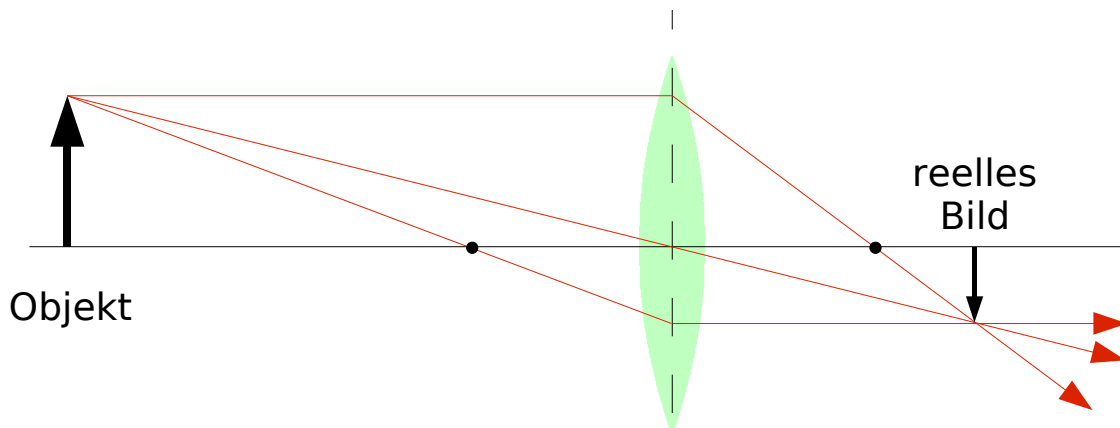


Abbildung 49: Eine Linse kann ein Objekt scharf abbilden (reelles Bild)

Offenbar ist der obere Lichtstrahl parallel zur optischen Achse - er wird also von der Linse so abgelenkt, dass er durch den rechten Brennpunkt verläuft. Der mittlere Lichtstrahl geht durch den Mittelpunkt der Linse und erfährt daher keine Ablenkung. Der untere Lichtstrahl kreuzt den linken Brennpunkt - wir wissen also, dass er hinter der Linse parallel zur optischen Achse ist.

Was wir durch die obige Konstruktion geometrisch feststellen ist, dass alle drei Lichtstrahlen, die von einem einzigen Punkt des Objektes (der Spitze) ausgehen, sich hinter der Linse in einem einzigen Punkt wieder treffen. Wenn man für alle anderen Punkte des Objektes eine ähnliche Konstruktion anfertigt (worauf wir aus Platzgründen verzichten), stellt man fest, dass sich auch die von al-

len anderen Punkten ausgehenden Lichtstrahlen hinter der Linse wieder treffen. (Und zwar im gleichen Abstand zur Linse)

Die Vermutung liegt nahe: Würden wir an die Stelle hinter der Linse, an der die Lichtstrahlen wieder zusammenlaufen, ein weißes Blatt Papier befestigen, so würden die dort zusammentreffenden Lichtstrahlen das Blatt Papier "anstrahlen". Und so würde jeder Punkt des Objektes auf das Blatt Papier abgebildet. Führt man ein entsprechendes Experiment mit einer Lupe, einem beliebigen hellen Objekt und einem Blatt Papier durch, so wird die Vermutung bestätigt.

Dort, wo die Lichtstrahlen wieder zusammenlaufen entsteht ein sogenanntes *reelles Bild* von dem Objekt, welches sich vor der Linse befindet. Das Blatt Papier, auf dem das Objekt abgebildet wird, entspricht der sogenannten *Bildebene*.

Dieser Effekt der Abbildung wird bei Fotoapparaten ausgenutzt. Hier befindet sich, anstelle des Blattes Papier, die Fotoplatte (bzw. der Film oder in Digitalkameras ein CCD-Chip).

Funktionsweise eines Linsenteleskops

In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns mit der Funktionsweise eines Teleskops, welches in dieser Form als erstes von Johannes Kepler (1571-1630) für Himmelsbeobachtungen benutzt wurde. Die wichtigsten optischen Bestandteile, aus denen es besteht, sind zwei Linsen: Eine Objektivlinse mit großer, und eine Okularlinse mit kleiner Brennweite, wie es die folgende Abbildung 50 zeigt:

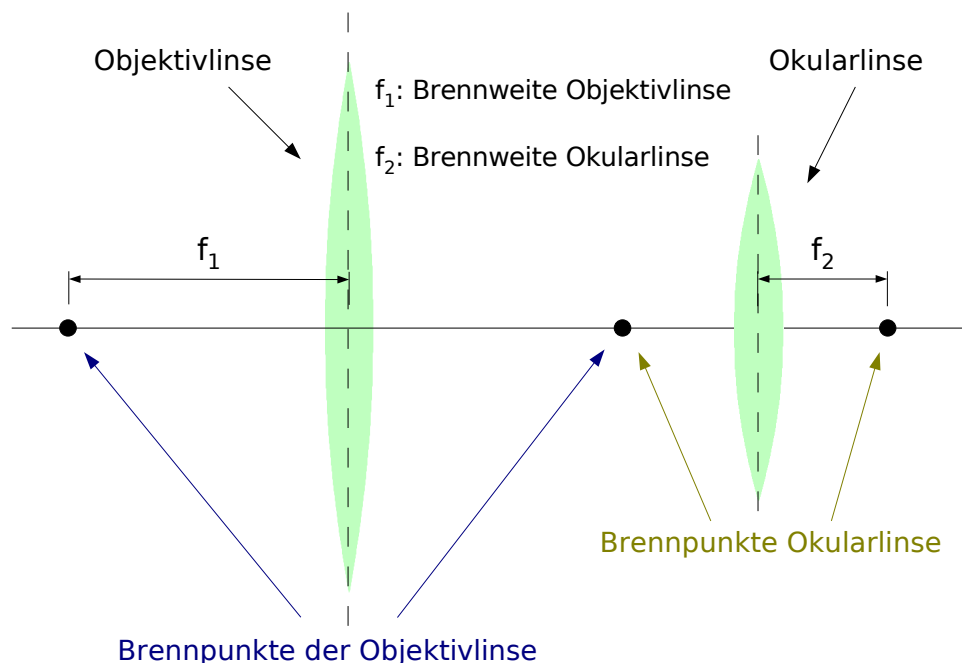


Abbildung 50: Begriffsdefinitionen an einem Linsenteleskop

Die beiden Linsen werden so entlang einer optischen Achse aufgereiht, dass sich der rechte Brennpunkt der Objektivlinse an der selben Stelle auf der optischen Achse befindet, wie der linke Brennpunkt der Okularlinse (vgl. Abb. 50). Die Brennweite der Objektivlinse nennen wir für den gesamten restlichen Abschnitt f_1 , die Brennweite der Okularlinse entsprechend f_2 .

Natürlich besteht ein solches Linsenteleskop nicht nur aus Linsen, sondern auch aus Halterungen, dem "Rohr" (Tubus), und vieles mehr. Da die optischen,

vergrößernden Eigenschaften eines Linsenteleskops jedoch nicht davon abhängen, lassen wir diese Bestandteile auch in den kommenden Abbildungen weg.

Man benutzt das Teleskop, indem man durch die Okularlinse schaut, und die optische Achse auf das zu beobachtende Objekt richtet. Das Licht des Objektes passiert also als erstes die Objektivlinse, bevor es anschließend über die Okularlinse in das Auge des Beobachters fällt.

Astronomische Objekte sind in der Regel sehr weit vom Beobachter (auf der Erde) entfernt. Aufgrund dieser großen Entfernung kommen die vom astronomischen Objekt ausgehenden Lichtstrahlen nahezu parallel zueinander beim Beobachter an. Der Weg zweier ausgezeichneten Lichtstrahlen, die von einem weit entfernten Stern ausgehen und schräg auf das Teleskop treffen, ist in der folgenden Abbildung eingezeichnet. Als Teleskop verwenden wir die gerade eben kennengelernte Anordnung von Linsen:

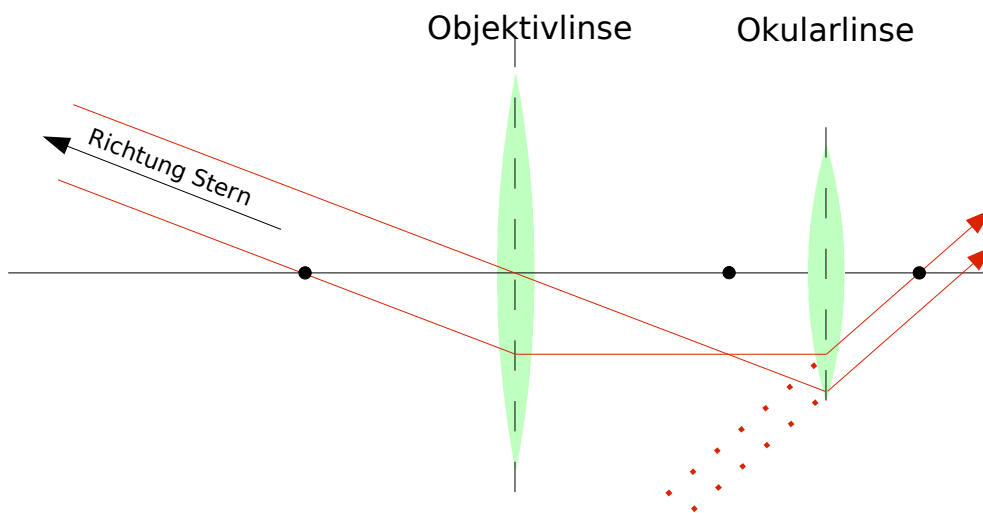


Abbildung 51: Verlauf zweier ausgezeichneten Lichtstrahlen durch das Teleskop

Was passiert nun genau in unserem Teleskop?

Im Unterabschnitt "Abbildungen mit Bikonvexlinsen" haben wir gesehen, dass ein Objekt hinter einer Linse an der Stelle abgebildet wird, an der die ausgezeichneten Lichtstrahlen sich kreuzen. In obiger Abbildung kreuzen sich die beiden dargestellten ausgezeichneten Lichtstrahlen des Sterns hinter der Objektivlinse, und zwar im Abstand des rechten Brennpunktes. Und tatsächlich zeigen Experimente: Hält man bei einer wie oben aufgebauten Anordnung ein Blatt Papier an der Stelle des rechten Brennpunktes der Objektivlinse in den Lichtweg, so wird der Stern darauf scharf abgebildet. Das bedeutet: Die Bildebene der Objektivlinse liegt für den Stern an der Stelle ihres rechten Brennpunktes. Die *Okularlinse* "macht" nun nichts anderes, als das in dieser Bildebene entstehende Bild nochmals zu vergrößern.

Hinter der Okularlinse sitzt in der Regel der Beobachter mit seinem Auge. Für ihn scheint das Licht des Sterns aus der Richtung der gepunkteten Linien unterhalb der optischen Achse zu kommen. Tatsächlich kommt das Licht in der Zeichnung aber von Oberhalb der optischen Achse. Durch ein Teleskop erscheint der Sternenhimmel also seitenvertauscht (oben ist unten und links ist rechts), was für Anfänger die nächtliche Beobachtung zunächst ein wenig erschwert.

Als nächstes werden wir, mit Hilfe der bisher gelernten Erkenntnisse, den "Ver-

größerungsfaktor" eines Teleskops ausrechnen. Dieser Faktor wird in den Fachbüchern **Winkelvergrößerung** genannt. Die Herleitung erfolgt anhand eines anschaulichen Beispiels:

Wir nehmen an, ein Astronom beobachtet Jupiter durch sein Teleskop. Dafür richtet er die Optische Achse auf den untersten Punkt von Jupiter. In der folgenden Abbildung ist die Situation gezeichnet. Zur Vereinfachung betrachten wir wieder nur zwei ausgezeichnete Lichtstrahlen: Einer, der vom untersten Punkt Jupiters ausgeht und entlang der optischen Achse verläuft. Da er mit der optischen Achse durch die Mittelpunkte der beiden Linsen geht, wird er durch sie nicht abgelenkt. Der andere Lichtstrahl, den wir betrachten, geht vom obersten sichtbaren Punkt Jupiters aus, und verläuft durch den linken Brennpunkt der Objektivlinse.

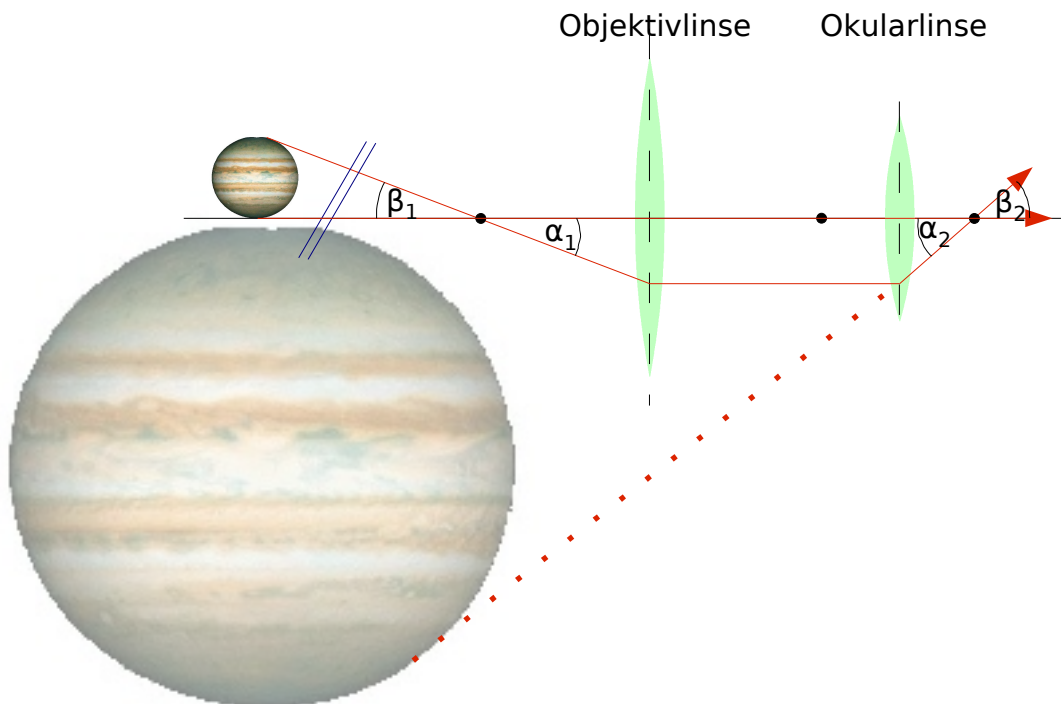


Abbildung 52: Veranschaulichung der Vergrößernden Eigenschaften eines Linsenteleskops

Die beiden ausgezeichneten Strahlen sind in der obigen Darstellung, nach den unter "Bikonvexlinsen im Strahlenmodell" kennen gelernten Gesetzen, eingezeichnet. Die blauen Querstriche auf der linken Seite sollen andeuten, dass zwischen dem Teleskop und dem Planeten Jupiter eine größere Distanz liegt, als eingezeichnet.

Schaut ein Beobachter durch die rechte Okularlinse auf den Jupiter und ist sein Auge dabei hinter dem rechten Brennpunkt, so scheint für ihn der eingezeichnete Lichtstrahl aus der Richtung der optischen Achse zu kommen, der andere aus der Richtung der gepunkteten Linie. Da der Lichtstrahl entlang der optischen Achse in Abbildung 52 vom untersten Punkt des Jupiters und der Lichtstrahl, der von der gepunkteten Linie zu kommen scheint vom obersten Punkt des Jupiters ausgeht, kommt es zu der in der Abbildung gezeigten Vergrößerung. Die Vergrößerung kommt deshalb zustande, weil der von der Erde aus sichtbare Winkel β_1 zwischen den vom untersten und obersten Punkt Jupiters ausgehenden Lichtstrahlen durch das Teleskop zum Winkel β_2 vergrößert wird. Man spricht daher bei der Vergrößerung durch ein Teleskop von einer *Winkelvergrößerung*.

Um die Winkelvergrößerung, also den Vergrößerungsfaktor, wirklich ausrechnen zu können, müssen wir mit Kenntnissen aus der Mathematik vorgehen. Dazu betrachten wir noch einmal die obige Abbildung:

Der Winkel β_1 ist der Winkel zwischen den beiden ausgezeichneten Lichtstrahlen am linken Brennpunkt der Objektivlinse. Er gibt also den Winkel zwischen dem obersten und untersten Punkt Jupiters an, bevor Jupiter durch das Teleskop vergrößert wird. Wir nehmen den Winkel β_1 daher als Maß für die "Größe" Jupiters, wenn man ihn nicht durch ein Teleskop hindurch betrachtet. Der Winkel α_1 ist der Scheitelwinkel zu β_1 und ist daher genauso groß, also $\alpha_1 = \beta_1$.

Dagegen ist nun β_2 der Winkel zwischen den beiden Strahlen, nachdem die Strahlen das Teleskop passiert haben. Wenn der Beobachter also durch das Teleskop hindurch schaut, ist für ihn β_2 der Winkel zwischen den obersten und untersten Punkt Jupiters. Damit ist β_2 ein Maß für die "Größe" Jupiters, wenn man ihn durch das Teleskop hindurch anschaut. Da α_2 hier ein Scheitelwinkel von β_2 ist, gilt auch hier: $\alpha_2 = \beta_2$.

Da nun β_1 ein Maß für die Größe von Jupiter ohne, und β_2 ein Maß für die Größe Jupiters mit Teleskop ist, ist der Vergrößerungsfaktor

$$V = \frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} . \quad (1)$$

Unser Ziel wird es nun sein, die Winkelvergrößerung über die Brennweiten der beiden Linsen des Teleskops auszudrücken. Dazu müssen wir überlegen, inwiefern α_1 und α_2 von den Brennweiten abhängen. Die folgende Abbildung wird dazu hilfreich sein. Sie zeigt denselben Strahlengang, wie die obige Abbildung, nur mit einigen zusätzlichen Hilfsbezeichnungen:

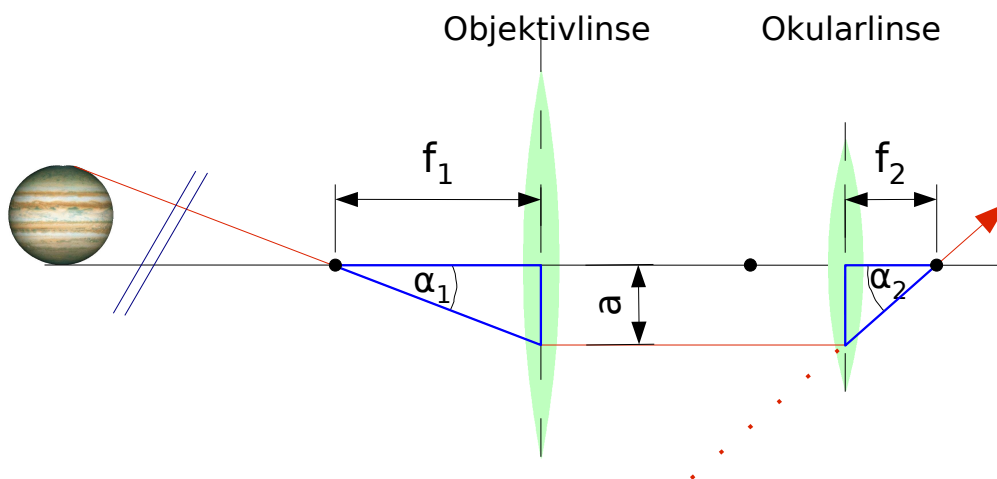


Abbildung 53: Zur Berechnung der Winkelvergrößerung

In der Abbildung sind zwei Dreiecke im Strahlengang blau markiert. Auf diese Dreiecke wenden wir jetzt die Definition des Tangens an und erhalten:

$$1.: \quad \tan(\alpha_1) = \frac{a}{f_1}$$

$$2.: \quad \tan(\alpha_2) = \frac{a}{f_2}$$

Aus der Mathematik ist bekannt: Für sehr kleine Winkel gilt $\tan(\alpha_1) \approx \alpha_1$ und $\tan(\alpha_2) \approx \alpha_2$ (für Winkel im Bogenmaß). In der Zeichnung sind die Winkel zwar (aus Gründen der Übersicht) groß dargestellt. In Wirklichkeit kommen sie aber tatsächlich in den Größenbereich, in dem diese Näherung gilt. Damit folgt für die beiden Gleichungen:

$$1.: \alpha_1 \approx \tan(\alpha_1) = \frac{a}{f_1} \quad (\text{für kleine } \alpha_1)$$

$$2.: \alpha_2 \approx \tan(\alpha_2) = \frac{a}{f_2} \quad (\text{für kleine } \alpha_2)$$

Mit Hilfe dieser beiden Gleichungen ersetzen wir nun α_1 und α_2 aus Gleichung (1), und erhalten die Winkelvergrößerung eines Teleskops in Abhängigkeit zur Brennweite von Objektiv- und Okularlinse.

$$V = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\left(\frac{a}{f_2}\right)}{\left(\frac{a}{f_1}\right)} = \frac{f_1}{f_2}$$

Das fassen wir noch einmal zusammen:

Die Winkelvergrößerung eines Teleskops

Es sei f_1 die Brennweite der Objektivlinse (bei Reflektoren: die Brennweite des Hauptspiegels) und f_2 die Brennweite der Okularlinse des Teleskops. Dann ergibt sich für die sogenannte Winkelvergrößerung V :

$$V = \frac{f_1}{f_2}$$

Dies ist der Vergrößerungsfaktor, mit dem astronomische Objekte durch ein Teleskop hindurch gesehen werden können.

Wichtige Folgerung:

Je größer die Brennweite der Objektivlinse und je kleiner die Brennweite der Okularlinse ist, desto stärker ist die Vergrößerung. Weil stets die gleiche "Menge" Licht über das Objektiv eingefangen wird, und sich dieses Licht bei stärkerer Vergrößerung auf eine größere Fläche (der Netzhaut) verteilt, gilt außerdem: *Je stärker die Vergrößerung, desto Lichtschwächer wird das Objekt durch das Teleskop hindurch wahrgenommen.*

Eine zu große Wahl der Vergrößerung verschlechtert die Qualität des Bildes, da Abbildungsfehler (etwa durch Linsenfehler) mitverstärkt werden. Dadurch wird das Bild mit wachsender Vergrößerung zusehends unscharf. Es gibt eine Faustregel für die *maximal sinnvolle Vergrößerung*: Die **maximal sinnvolle Vergrößerung eines Teleskops** liegt etwa bei dem doppelten Öffnungsdurchmesser in Millimeter. Dabei ist der Öffnungsdurchmesser bei einem Linsenteleskop gleich dem Durchmesser der Objektivlinse, bei einem Spiegelteleskop gleich dem Durchmesser des Hauptspiegels.

Beispiel: Ein Teleskop hat einen Objektivlinsendurchmesser von 100 mm; dann beträgt für dieses Teleskop die maximal sinnvolle Vergrößerung: 200-fach.

Das Öffnungsverhältnis eines Teleskops

Unter dem Öffnungsverhältnis versteht man das Verhältnis Brennweite (der Objektivlinse bzw. des Hauptspiegels) geteilt durch Öffnungsdurchmesser. Bei den im Handel erhältlichen Teleskopen ist das Öffnungsverhältnis immer in der Form "f / Öffnungsverhältnis" angegeben. Beispiel: Öffnungsverhältnis = 4 --> "f / 4"

Die Bedeutung des Öffnungsverhältnisses:

- Je größer das Öffnungsverhältnis, desto besser die Bildqualität. Es verringert sich der Einfluss optischer Fehler (Koma, Astigmatismus,...) bei größerem Verhältnis.
- Je kleiner das Öffnungsverhältnis, desto kompakter ist das Teleskop gebaut.

Bei der Verwendung von Okularlinsen der gleichen Brennweite eignen sich Teleskope mit großem Öffnungsverhältnis besonders für Planetenbeobachtungen, Teleskope mit kleinem Öffnungsverhältnis besonders für die Beobachtung lichtschwacher Objekte wie Nebel und Galaxien.

Lichtsammelvermögen eines Teleskops

In diesem Unterabschnitt schätzen wir ab, um welchen Faktor L ein Teleskop bei gegebener Vergrößerung V die Helligkeit eines astronomischen Objektes verstärkt. Überlegung:

Wenn das gesamte Licht, dass über die Fläche der Öffnung des Teleskops (F_T) einfällt, auf die Fläche der Pupille des Auges (F_A) "gebündelt" wird, so müsste man einfach prüfen, um welchen Faktor die Fläche der Öffnung des Teleskops größer ist als die Pupillenfläche. Hier wäre also $L = F_T / F_A$.

Diese Formel gilt für eine einfache Vergrößerung. Wenn man das beobachtete Objekt nun V-fach vergrößert, so schwächt sich das Licht um den Faktor V ab. Daraus erhalten wir die entgültige Formel:

$$L = \frac{F_T}{F_A \cdot V}$$

Dies ist der Faktor, mit dem das einfallende Licht verstärkt wird. Der Durchmesser der Pupille kann bei Dunkelheit zu 6 mm angenommen werden. Man beachte:

- Bei den Spiegelteleskopen muss man für F_T die Fläche des Fangspiegels abziehen, da er im Strahlengang des über die Öffnung einfallenden Lichtes sitzt und lichtundurchlässig ist.
- Bei Linsenteleskopen kommt es zu Verlusten beim Durchlaufen des Lichts durch die Linsen. Bei Spiegelteleskopen kommt es zu Verlusten beim Spiegeln des Lichtes. Die Verluste hängen von der Qualität der verwendeten Optik ab und gehen in die obige Rechnung nicht ein.

2.3.2 Linsenteleskope - Refraktoren¹

Linsenteleskope, wie wir sie im vorangegangenen Abschnitt genauer untersucht haben, nennt man in der Fachsprache meist **Refraktor**.

Refraktoren bestehen aus mindestens zwei Konvexlinsen: Einer **Objektivlinse**, welche das Sternenlicht einfängt, und einer **Okularlinse**, an die der Beobachter sein Auge hält, um durch das Teleskop zu schauen. Wie gesagt: Refraktoren bestehen mindestens aus zwei Linsen. Häufig werden weitere Korrekturlinsen eingebaut, die entweder die Qualität des Bildes verbessern, oder aber den durch das Teleskop sichtbaren Ausschnitt des Sternenhimmels vergrößern (das sogenannte *Sichtfeld*).

Die folgende Abbildung zeigt einen Schnitt durch einen Refraktor. Auf der rechten Seite des Teleskops wurde vor dem Okular ein Umlenkspiegel montiert, der das Beobachten hoch stehender astronomischer Objekte (etwa im Bereich des Zenit) erleichtert.

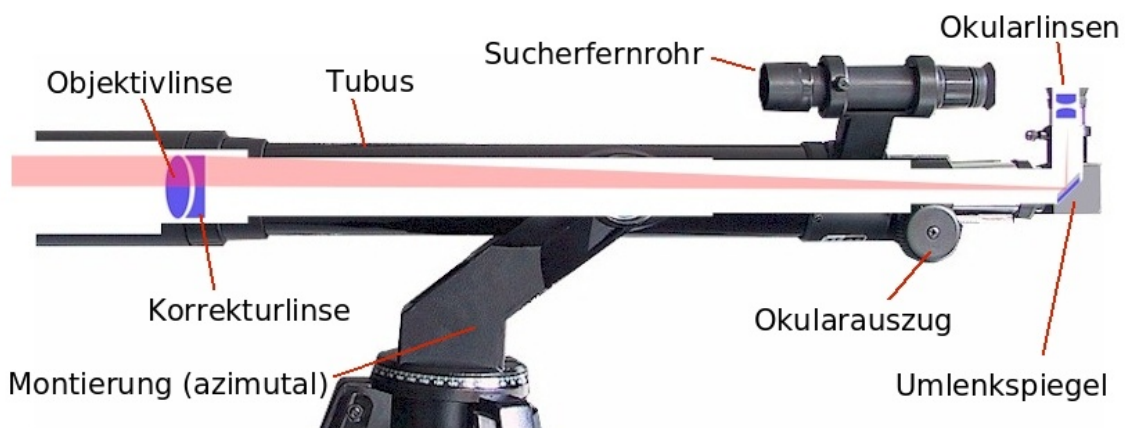


Abbildung 54: Linsenteleskop mit Umlenkspiegel. Mit freundlicher Genehmigung von Manfred Müller.

Refraktor: Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Robust und relativ unempfindlich gegenüber Erschütterungen. Nachjustierung in den meisten Fällen nicht notwendig (und auch nur bei teuren Exemplaren möglich).

Nachteile:

- Chromatische Abberation: Durch die Linsen wird das einfallende Licht spektral aufgespalten. Die unterschiedlichen Spektralfarben haben daher verschiedene Brennpunkte. Folge: Es treten Farbverzerrungen auf.
- Hohe Kosten: Gute Linsenteleskope sind schwer herzustellen und daher teuer.
- Hohes Gewicht bei schweren Linsen.

Hauptargument für die meisten Einsteiger, sich kein Linsenteleskop zuzulegen, ist der hohe Preis für ein gutes Exemplar. Immer wieder werden Linsenteleskope in Discounter zu Minimalstpreisen angeboten. Von solchen Billigangeboten wird abgeraten. Meist hat man mit solchen Geräten aufgrund mangelnder Quali-

¹ Für die folgenden Teleskopquerschnitte danke ich Herrn Manfred Müller (www.mueller-manching.de) recht herzlich. Er stellt die Abbildungen für dieses AstroSkript zur Verfügung.

tät mehr Ärger als Freude.

In teuren Exemplaren wird die chromatische Abberation durch Zusatzlinsen weitgehend ausgeglichen.

2.3.3 Spiegelteleskope - Reflektoren

Spiegelteleskope verwenden statt einer Objektivlinse einen großen Spiegel, der aufgrund seiner Wölbung das einfallende Licht in einem Brennpunkt bündelt, und der somit bei einem Spiegelteleskop die gleiche Aufgabe erfüllt wie die Objektivlinse bei einem Linsenteleskop. Dieser Spiegel wird meist *Hauptspiegel* genannt; er ist der größte Spiegel im Teleskop.

Unter den Reflektoren gibt es sehr unterschiedliche Bauformen. Die drei Wichtigsten werden nun vorgestellt:

2.3.4 Das Newton-Teleskop

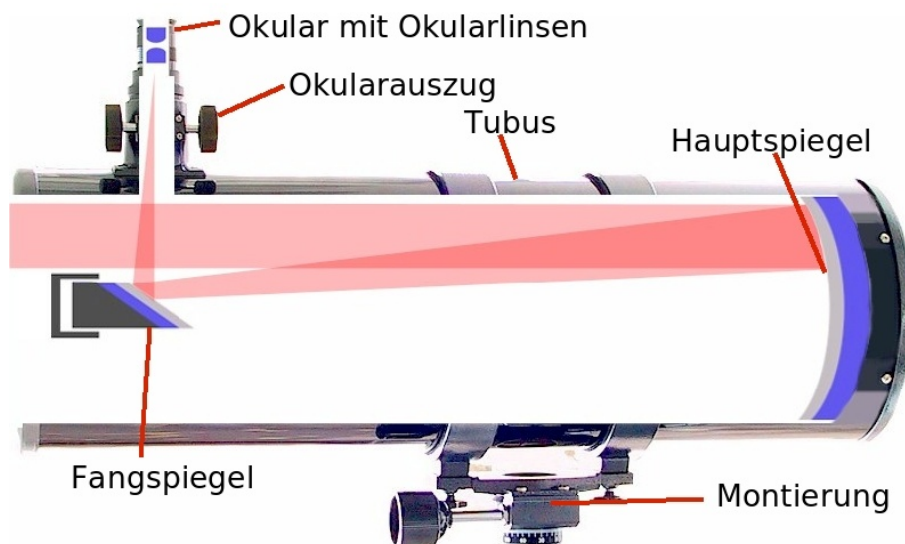


Abbildung 55: Newton-Teleskop. Mit freundlicher Genehmigung von Manfred Müller

Die von Isaac Newton (1643-1727) entwickelte Bauform lenkt das vom Hauptspiegel zurückgeworfene Licht über einen um 45° geneigten Fangspiegel in eine seitliche Öffnung, in der das Okular steckt.

Bei Teleskopen dieser Bauform beobachtet man folglich die astronomischen Objekte durch eine seitliche Öffnung hindurch.

Newton: Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Geringes Gewicht: Keine schwere Objektivlinse
- Preisgünstig in der Herstellung. Große Öffnungen sind schon zu relativ kleinen Preisen zu haben.

Nachteile:

- Erschütterungsempfindlich: Der Hauptspiegel muss gelegentlich nachjus-

tiert werden (siehe unten).

- Koma: Insbesondere schlecht justierte Newton-Teleskope weisen Koma-Effekte auf. Das bedeutet, dass Objekte in bestimmten Bereichen des Sichtfeldes nicht mehr scharf dargestellt werden.
- Unbequeme Beobachungsposition: Die Beobachtung durch die seitliche Öffnung kann in ungünstigen Fällen sehr unbequem sein.
- Die Teleskope sind weniger kompakt als die meisten anderen Spiegelteleskopmodelle und daher - je nach Brennweite - recht sperrig.

Voraussetzung für ein scharfes Bild ist, dass der Brennpunkt des Hauptspiegels an der richtigen Stelle vor dem Okular in der seitlichen Öffnung liegt. Daher muss das Teleskop nach dem Kauf zunächst eingestellt werden. Dies geschieht über drei Schrauben, die jeweils hinter dem Hauptspiegel nach außen führen.

Über diese drei Schrauben lässt sich die Position des Brennpunktes an die richtige Stelle verschieben. Eine Justage benötigt Übung und Fingerspitzengefühl. Eine Überspannung der Schrauben kann den Hauptspiegel zerstören. Wer sich nicht sicher ist, sollte sein Teleskop vom Fachmann einstellen lassen.

Der größte Nachteil dieser Bauart besteht nun darin, dass der Hauptspiegel bei Erschütterungen verrutschen kann. In Folge dessen muss das Teleskop erneut justiert werden. Bei einem nicht justierten Teleskop verhindert eine stark ausgeprägte Koma das Scharfstellen astronomischer Objekte. Bei justierten Teleskopen ist die Koma nur sehr schwach ausgebildet.

Dennoch ist die Newton-Bauart zum Einstieg die wohl geeignetste. Eine richtige Justierung vorausgesetzt, erhält man durch kaum eine andere Bauart für so wenig Geld ein akzeptables Beobachtungsergebnis.

2.3.5 Schmidt-Cassegrain Teleskop

In einem Newton gelangt das Licht des Hauptspiegels durch eine seitliche Öffnung nach draußen. Bei einem Schmidt-Cassegrain wirft der Fangspiegel das Licht des Hauptspiegels zurück, und es gelangt durch ein Loch im Hauptspiegel hindurch zum Okular. Die seitliche Abbildung zeigt den Gang eines Lichtbündels durch das Teleskop. Vor dem Okular befindet sich hier noch ein 45°-Umlenkspiegel. Dadurch können hoch über dem Horizont stehende Objekte leicht beobachtet werden.

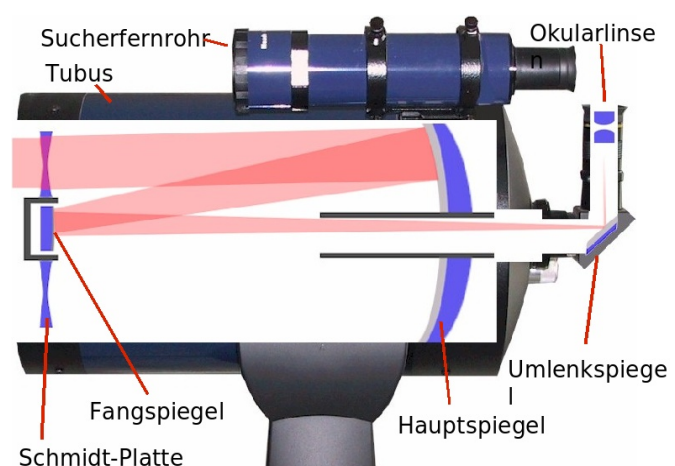


Abbildung 56: Schmidt-Cassegrain. Mit freundlicher Genehmigung von Manfred Müller

Der Fangspiegel des Teleskops wird auf einer dünnen Scheibe befestigt: Die sogenannte Schmidt-Platte korrigiert beim Durchlaufen des einfallenden Lichtes die optischen Fehler des Systems weitgehend.

Dadurch, dass das Licht des Hauptspiegels vom Fangspiegel zurückgeworfen wird, ist diese Bauform besonders kompakt:

Refraktoren und Newton-Teleskope haben vom Ausmaß her mindestens die Länge der Brennweite der Objektivlinse bzw. des Hauptspiegels. Bei einem Teleskop vom Typ Schmidt-Cassegrain wird, durch das Zurückwerfen des Lichtes, die Länge des Teleskops "zweimal" benutzt. Dadurch sind Schmidt-Cassegrains etwa halb so lang wie die Brennweite des Hauptspiegels.

Schmidt-Cassegrain: Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Kompakte Bauweise
- Kaum optische Fehler dank Schmidt-Platte
- Kaum Wartungsaufwand: Keine Nachjustierung notwendig. Außerdem kann durch die Schmidt-Scheibe kein Staub in das Gehäuseinnere kommen.

Nachteile:

- Teuer.

Eine Nachjustierung entfällt nicht bei allen Modellen. Der Preis von guten Schmidt-Cassegrain-Teleskopen liegt im vierstelligen Bereich.

2.3.6 Maksutov-Cassegrain Teleskop

Teleskope vom Typ Maksutov-Cassegrain sind ähnlich aufgebaut, wie Schmidt-Cassegrain-Teleskope. Es gibt nur zwei wesentliche Unterschiede:

An Stelle einer Schmidt-Platte findet man bei Maksutov-Cassegrain-Teleskopen eine sogenannte *Meniskuslinse*. Durch die Meniskuslinse werden optische Fehler schon beim Einfall des Lichtes behoben.

Der Fangspiegel sitzt direkt hinter der Meniskuslinse. Manchmal ist er einfach nur auf die Linse aufgedampft.

Der Strahlengang bei einem Maksutov-Cassegrain gleicht dem Strahlengang eines Schmidt-Cassegrains. Die Meniskuslinse ist noch leistungsfähiger als die Schmidt-Platte; die Qualität der Optik ist unübertroffen.

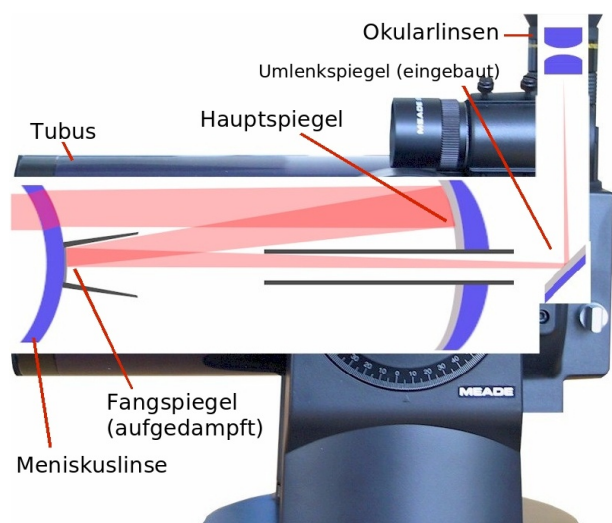


Abbildung 57: Maksutov-Cassegrain. Mit freundlicher Genehmigung von Manfred Müller

Maksutov-Cassegrain: Vor- und Nachteile

Vorteile:

- Sehr hohe Qualität der Optik
- Kaum Wartungsaufwand: Nachjustierung bei den meisten Modellen nicht notwendig. Außerdem kann durch die Meniskuslinse kein Staub ins Innere eindringen.

- Kompakte Bauform

Nachteile:

- Teuer
- Hohes Gewicht wegen Meniskuslinse

Aufgrund der schweren Meniskuslinse ist die Herstellung großer Öffnung bei dieser Bauform unmöglich.

2.3.7 Teleskopmontierungen²

Eine gute Montierung ist ebenso wichtig wie die Qualität des restlichen Teleskops. Nur eine stabile, robuste und gut verarbeitete Montierung garantiert in Verbindung mit einem gutem Teleskop eine lohnenswerte Beobachtung. Deshalb wird diesem Thema ein eigener Unterabschnitt gewidmet. Man unterscheidet zwischen zwei Arten von Montierungen:

Azimutale Montierung

Mittels einer azimutalen Montierung lässt sich die Richtung, in die das Teleskop zeigt, durch zwei Achsen verstellen: Eine senkrechte und eine waagerechte Achse.

Der Hauptvorteil einer azimutalen Montierung liegt in der einfachen Handhabung. Man kann nämlich die Achsen auf ein Objekt richten, ohne vorher überlegen zu müssen, wie man dazu die Achsen verstellen muss.

Dennoch ist dem Einsteiger von einer azimutalen Montierung abzuraten: Der Nachthimmel dreht sich aufgrund der Erdrotation. Das dadurch bedingte "Wandern" astronomischer Objekte am Nachthimmel wird durch die Vergrößerung eines Teleskops derart verstärkt, dass man das Teleskop *nachführen* muss, um das Objekt im Visier zu halten. Die Nachführung ist bei azimutaler Montierung sehr schwer, da sich die Objekte am Himmel eben nicht entlang einer waagrechten bzw. senkrechten Linie bewegen. So müssen stets zwei Achsen nachgeführt werden. Dadurch wird die Nachführung zum einen kompliziert, zum anderen macht dies Astrofotografien unmöglich.

Die *parallaktische Montierung* behebt das Problem; sie ist so konstruiert, dass nur eine Achse nachgeführt werden muss. Doch dazu später mehr.

Einer der Hauptvertreter azimutaler Montierung ist die sogenannte Montierung nach *Dobson* (1915 - ?). Dabei handelt es sich um eine spezielle azimutale Aufhängung von Newton-Teleskopen. Teleskope, die mit einer Dobsonmontierung aufgehängt sind, nennt man allgemein **Dobson**.

Ein Dobson ist ein Newton-Teleskop, das an der Achse seines Gleichgewichtspunktes befestigt ist und auf einen Drehteller



Abbildung 58: Teleskop mit azimutaler Montierung. Mit freundlicher Genehmigung von Wolfgang Ransburg



Abbildung 59: Dobson-Teleskop. Mit freundlicher Genehmigung von Wolfgang Ransburg

² Ein Dank an Herrn Wolfgang Ransburg (www.teleskop-service.de) für die Fotos dieses Abschnittes, die er für das AstroSkript zur Verfügung stellte.

steht (vgl. Abbildung 59).

Dobsonmontierungen erfreuen sich großer Beliebtheit: Zum einen sind sowohl das Newton-Teleskop als auch die Montierung selbst günstig herzustellen. Zum anderen ist die Dobsonmontierung eine sehr stabile Montierung, die sowohl eine große Öffnung, als auch eine große Brennweite des Teleskops zulässt, ohne dass der Aufbau des Teleskops allzu kompliziert ist.

In der Summe sind Dobsons sehr leistungsstarke Teleskope, die man sehr kostengünstig erwerben kann. Und das macht die Dobsonmontierung unter vielen Astronomen beliebt.

Da sich eine manuelle Nachführung aufgrund der azimutalen Montierung und der fehlenden Feinnachführung als sehr schwierig herausstellt, sind Dobsonmontierungen vor allem mit einer automatischen Nachführung (GOTO-System) zu empfehlen, bei der die Nachführung über elektronische Schaltkreise geregelt wird.

Parallaktische Montierung

In diesem Fall wird das Teleskop derart montiert, dass die Nachführung des Teleskops bei der Beobachtung von astronomischen Objekten über eine einzige Achse geschehen kann. Die Vorteile einer solchen Montierung liegen zum einen in der dadurch einfach gewordenen Nachführung; zum anderen in der Möglichkeit zur Astrofotografie.

Auch bei der parallaktischen Montierung existieren zwei Drehachsen. Über die eine Achse lässt sich die Richtung des Teleskop bezüglich der *Rektaszension*, über die andere Achse bezüglich der *Deklination* verstellen.

Dazu muss die Achse für die Rektaszension vor der Beobachtung auf den Polarstern ausgerichtet werden. Dies erreicht man bei den meisten Modellen durch einen verstellbaren Höhenwinkel.

Bei dem Erwerb einer parallaktischen Montierung sollte darauf geachtet werden, dass bei Bedarf ein Nachführmotor eingebaut werden kann. Manuelles Nachführen ist mit einem solchen Motor nicht mehr nötig. Für professionelle Astrofotografie ist die Benutzung eines Nachführmotors unabdingbar.



Abbildung 60: Teleskop mit parallaktischer Montierung. Mit freundlicher Genehmigung von Wolfgang Ransburg

2.3.8 Das Okular³

Ein Okular ist das Teil an einem Teleskop, durch das man mit dem Auge (lat. *oculus*) hindurchschaut. Es sitzt im sogenannten **Okularauszug**, der je nach Teleskopart hinten (z.B. bei Refraktoren, Cassegrain...) oder seitlich (z.B. beim Newton-Teleskop) angebracht ist. Für eine erfolgreiche Beobachtung ist die Wahl des richtigen Okulars von großer Bedeutung. Nach einigen Beobachtungs-

³ Für den Beitrag "Das Okular" danke ich Finn Henseleit, der ihn für das AstroSkript zur Verfügung stellte.

abenden bekommt man ein Gefühl dafür, welches Okular für welchen Zweck am besten geeignet ist. Dabei ist eine gute Auswahl von Vorteil.

Bei der Wahl ist die **Okularbrennweite** von besonderem Interesse, denn sie entscheidet darüber, wie stark das Bild vergrößert wird.

Darüber hinaus differenziert man zwischen einigen Okulartypen, die sich in ihrer Bauweise unterscheiden und dadurch verschiedene Abbildungseigenschaften besitzen. Den meisten Einstiegteleskopen (z.B. dem Aldi-Teleskop) werden sogenannte **Huygens-Okulare** beigelegt. Sie sind aus nur zwei Linsen aufgebaut und daher sehr preiswert. Das **Kellner-Okular** verfügt noch über eine weitere Linse zur Farbkorrektur. Als Standardokular in der etwas fortgeschritteneren Amateurastronomie gilt jedoch das **orthoskopische-** aber auch das **Plössl-Okular**. Vierlinsig aufgebaut, verfügen sie über hervorragende Abbildungseigenschaften und einen geringen **Farbfehler**. Zur Königsklasse gehören die **Erfle-** und **Naglerokulare**. Sie werden aufgrund ihres hohen **Bildfeldes** besonders gerne zur Beobachtung von großflächigen Nebeln herangezogen. Diese **Weitwinkelokulare** mit einem aufwändigen Linsensystem haben aber auch ihren Preis.

Auf den Okularen ist meist vor der Okularbrennweite ein Buchstabe zu finden, der den Okulartyp verrät. Bei Huygens-Okularen steht dort ein H, bei Plössl-Okularen ein P usw. (siehe Bild rechts).

Der Standarddurchmesser eines Okulars beträgt **1 ¼ Zoll** (ca. 32mm). Es gibt auch 2 Zoll Okulare (ca. 51mm). Diese benötigen aber einen entsprechend großen Okularauszug und sind erheblich teurer. Für das Auge aber sind sie ein Genuss!



Abbildung 61: Huygens-Okular. Mit freundlicher Genehmigung von Finn Henseleit

Praxistipp: Wenn man mit dem Teleskop ein Objekt sucht und es nur schwer „ins Okular bekommt“, obwohl der Sucher gut eingestellt ist (ganz wichtig!) wählt man am besten ein Übersichtsokular, d.h. ein Okular mit großer Brennweite, welches das Bild nur gering vergrößert. Ist das Objekt erst mal gefunden kann man sich immer noch „ranzoomen“.

2.3.9 Spektroskopie

Die Spektroskopie - auch Spektralanalyse genannt - ist eine ganz zentrale Methode in der Astronomie. Da für ein tiefes Verständnis der Spektralanalyse Detailkenntnisse aus der Physik benötigt werden, wird in diesem Kapitel nur sehr kurz auf das Thema eingegangen.

Die Spektralanalyse ist unter anderem von zentraler Bedeutung hinsichtlich der Bestimmung des Alters und der Temperatur von Sternen, der Zusammensetzung von Sternen und Nebeln, der Klassifikation von Mehrfachsternsystemen und letztlich der Entfernungsbestimmung weit entfernter Objekte. Kurz: Die Spektroskopie ist ein unabkömmlicher Bestandteil der modernen Astronomie.

Spektralzerlegung

Licht, das in unser Auge einfällt, besteht meistens nicht bloß aus einer Farbe

(rot, blau,...), sondern aus einem Mix mehrerer Farben. Durch sogenannte *Spektroskope* kann man das Licht jedoch in seine Bestandteile zerlegen. Man erhält ein sogenanntes *Spektrum*. In Abbildung 62 sind die Spektren einiger Sterne zu sehen:

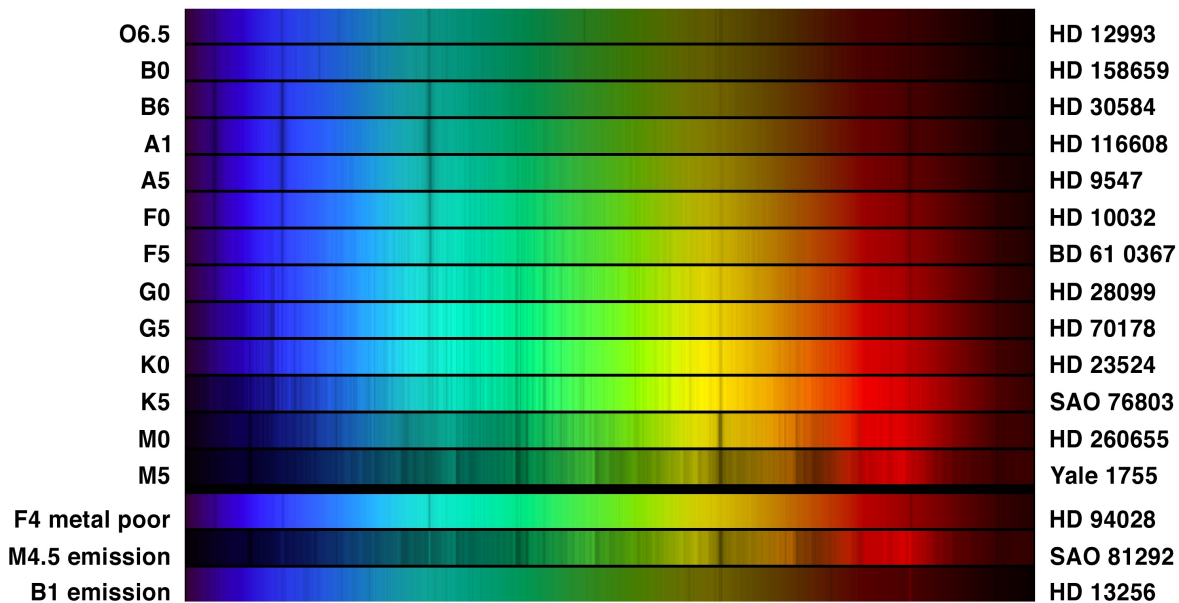


Abbildung 62: Spektren verschiedener Sterne

Hier wurde das Licht der jeweiligen Sterne einer *Spektralzerlegung* unterzogen. Jede Stelle des dabei entstehenden Bandes repräsentiert eine andere "Farbe" (genauer: Wellenlänge), aus der das von dem Stern abgestrahlte Licht besteht. Durch die Untersuchung der Lücken (*Spektrallinien*) der Bänder lässt sich die Zusammensetzung der Sterne feststellen.

In Abbildung 62 befindet sich rechts neben dem jeweiligen Spektrum die Bezeichnung des zugehörigen Sterns. Auf der linken Seite befindet sich die zugehörige Spektralklasse, die folgend genauer behandelt wird:

Spektralklassen

In der Astronomie werden die Sterne entsprechend ihrer Farbe (und ihres damit zusammenhängenden Spektrums) in *Spektralklassen* eingeteilt.

Man unterscheidet hier die folgenden Klassen:

Klasse	Farbe	Temperatur in Kelvin	Auftreten von Spektrallinien folgender Stoffe:	Beispielstern
O	blau	30 000 - 50 000	Ionisiertes Helium	δ Ori
B	blau-weiß	10 000 - 28 000	Neutrales Helium, Wasserstoff	β Ori, α Vir
A	weiß	7 500 - 9 750	Wasserstoff, Calcium	α Lyr, α CMa
F	weiß-gelb	6 000 - 7 350	Calcium, Metallspuren	α CMi, α Car
G	gelb	5 000 - 6 900	Calcium, Eisen und andere Metalle	α Aur, Sonne
K	orange	3 500 - 4 850	Metalle	α Boo, α Tau
M	rot-orange	2 000 - 3 350	Titanoxid	α Ori, α Sco

Klasse	Farbe	Temperatur in Kelvin	Auftreten von Spektrallinien folgender Stoffe:	Beispielstern
Unterklassen				
R	rot-orange	3 500 - 5 400	Cyan, Kohlenmonoxid, Kohlenstoff	
S	rot-orange	2 000 - 3 500	Zinkoxid	
N	rot	1 900 - 3 500	Kohlenstoff	

Für die wichtigsten Spektralklassen sind in der Tabelle helle Beispielsterne angefügt, die man ohne optische Hilfsmittel leicht sehen kann.

Die Spektralklassen kann man sich über die folgende Eselsbrücke leicht merken:

Oh Be A Fine Girl, Kiss Me (Right Now)

Zur genaueren Klassifizierung wird jede Spektralklasse in Unterklassen (0 bis 9) aufgeteilt. In der obigen Abbildung 62 stehen links neben den Spektren der Sterne die zugehörigen Spektralklassen, samt Unterklassen.

2.4 Cartes du Ciel (CDC) - ein virtuelles Planetarium

CDC ist ein ausgesprochen leistungsstarkes virtuelles Planetarium zur Darstellung des nächtlichen Himmels. Umfangreiche Suchfunktionen und Einstellungsmöglichkeiten erleichtern die Vorbereitung von Beobachtungsabenden, die Möglichkeit zum Hinzuladen von Sternen- und DeepSky-Katalogen sowie zum Erstellen von Ereigniskalender runden das Programm ab.

CDC wird unter einer freien Lizenz entwickelt. Im Rahmen der GPLv2 darf das Programm also vervielfältigt und weitergegeben werden. Den gebundenen Exemplaren dieses Buches liegt eine CD mit Cartes du Ciel (Version 3.0.1.4) bei. Diese CD darf ebenfalls beliebig an Dritte weitergegeben und kopiert werden. Alternativ kann das Programm auch unter der folgenden Adresse

<http://www.ap-i.net/skychart/>

frei aus dem Internet heruntergeladen werden.

Um den Einstieg in das Programm zu erleichtern folgen nun einige Abschnitte, die die Installation, Konfiguration und Bedienung des Programms betreffen.

2.4.1 Installation von Cartes du Ciel

Cartes du Ciel wird in der freien, Delphi-ähnlichen Entwicklungsumgebung Lazarus

www.lazarus.freepascal.org

geschrieben, welche Plattformunabhängigkeit garantiert. Daher ist CDC unter sämtlichen Betriebssystemen lauffähig. Auf der CD befinden sich die zur Installation notwendigen Dateien für die Systeme Linux, Windows und MacOSX.

1. Das Hauptprogramm installieren

Zur Installation des Hauptprogrammes wechseln Sie über einen Dateibrowser in das Verzeichnis "CDC" auf der CD. Die Installationsdatei befindet sich dann - je nach verwendetem System - im Unterverzeichnis "Linux", "MacOSX" oder "Windows".

Im Fall von Linux und MacOSX müssen Sie die entsprechende im Unterverzeichnis vorhandene Datei mit dem von Ihnen benutzten Programm zur Paketverwaltung öffnen und anschließend installieren.

Im Fall von Windows muss auf die im Unterverzeichnis vorhandene Datei doppelt geklickt werden, um die Installationsroutinen zu starten.

2. Die zusätzlichen Kataloge und Erweiterungen installieren:

Die Zusatzkataloge zu CDC befinden sich im Verzeichnis "CDC" und Unterverzeichnis "Kataloge". Die Kataloge können in ein beliebiges Verzeichnis auf der Festplatte entpackt werden. Im folgenden Abschnitt zur Konfiguration von Cartes du Ciel wird gezeigt, wie man die Kataloge in das Programm einbindet.

2.4.2 Konfiguration von Cartes du Ciel

Das Programm besitzt eine zentrale Konfigurationsmaske, in der alle Programmeinstellungen erledigt werden können. Diese Konfigurationsmaske lässt sich über das Menü "Einstellungen" --> "Programm konfigurieren" erreichen. Die verschiedenen Einstellungen lassen sich durch das Auswahlménü auf der linken Seite des Konfigurationsfensters auswählen. Im Folgenden werden nur die Einstellungen erwähnt, die vor der Nutzung des Programms getätigt werden sollten.

1. Datum und Uhrzeit

Unter "1- Datum/Uhrzeit" --> "1- Datum/Uhrzeit" lässt sich einstellen, für welchen Tag und welche Uhrzeit die Positionen der astronomischen Objekte am Himmel berechnet und dargestellt werden sollen. Durch Aktivierung des Häkchens "Systemzeit nutzen" wird der Sternenhimmel zur aktuellen Zeit dargestellt.

2. Beobachtungsort

Damit der Sternenhimmel für den gewünschten Ort dargestellt wird, lässt sich dieser über das Menü "2- Beobachtungsort" --> "1- Beobachtungsort" einstellen. Dies geschieht entweder über eine Liste von Städten, die dem Programm bekannt sind, oder durch Klick auf eine Landkarte für die ungefähre Position, oder aber direkt durch Eingabe von Längen- und Breitengrad des Beobachtungsortes. Für Herborn gelten die Koordinaten:

Herborn:

Breitengrad: 50 Grad, 41 Min. (Norden)

Längengrad: 8 Grad, 19 Min. (Osten)

3. Katalogeinstellungen

Zusatzkataloge lassen sich im Menü "4- Kataloge" --> "CdC Sterne", "CdC

Deep Sky" durch Aktivierung der jeweiligen Häkchen hinzuschalten. Voraussetzung ist, dass unter "Dateipfad" der Pfad des Verzeichnisses, in dem der entsprechende Katalog enthalten ist, angegeben wird.

4. Äquatoriales Koordinatengitter

Einsteigern wird die folgende Einstellung empfohlen:

Unter "3- Karte, Koordinaten" --> "1- Karte, Koordinaten" sollte "Azimutale Koordinate" markiert sein.

Unter "6- Anzeige" --> "5- Linien" sollte "Äquat. Koordinatengitter" markiert und "Koordinatengitter anzeigen" sollte hingegen nicht markiert sein.

5. Sprache einstellen

In der Regel erkennt Cartes du Ciel die Spracheinstellungen des Betriebssystems und passt die eigenen Einstellungen entsprechend an. Sollte dennoch eine andere Sprache gewünscht sein, lässt sich diese im Menü "8- System" --> "4- Sprache" auswählen.

2.4.3 Handhabung und Besonderheiten von Cartes du Ciel

1. Suche von Objekten

Cartes du Ciel verfügt über eine hervorragende Suchmaske, welche die Suchfunktionen vieler kommerzieller virtueller Planetarien in den Schatten stellt und ein schnelles Auffinden der gewünschten Objekte ermöglicht. Um sie zu öffnen reicht ein Klick auf das Fernglas in der oberen Icon-Leiste.

Wichtiger Hinweis: Gefunden werden nur Objekte aus den in den Katalogeinstellungen aktivierten Katalogen.

2. Navigation

Der gezeigte Himmelsausschnitt lässt sich entweder über die Icon-Leiste oder über die Tastatur (mit +, -) vergrößern bzw. verkleinern. Praktischerweise lässt sich alternativ mit der Maus ein Rechteck aufziehen, welches nach einem Klick in das Rechteck auf die Breite des Bildschirms vergrößert wird.

Als sehr praktisch können sich auch die Einträge der Menüs "Karte --> Gesichtsfeld" und "Karte --> Horizont beobachten" erweisen. Die entsprechenden Funktionen werden auch über die rechte Icon-Leiste aktiviert. Einen Überblick über den gesamten Himmel erreicht man z.B. durch einen Klick auf das Icon "Gesamten Himmel anzeigen" und anschließend auf "Süden".

3. Informationen zu einem Objekt anzeigen

Möchte man mehr über ein bestimmtes Objekt erfahren, etwa die Spektralklasse eines Sterns, die Ausdehnung eines Nebels, die Periodendauer eines Veränderlichen oder die Helligkeit und den Zeitpunkt der Kulmination eines Planeten, so reicht ein Rechtsklick auf das entsprechende Objekt mit anschließendem Linksklick auf den ersten Eintrag des sich öffnenden Menüs.

Angezeigt werden - neben den von CDC errechneten Informationen - auch Informationen aus den in den Programmeinstellungen aktivierten Katalogen.

4. Astronomischer Kalender

Cartes du Ciel ist in der Lage, einen Kalender mit besonderen astronomischen Ereignissen (etwa Sonnen- und Mondfinsternisse) und Ephemeriden zu erstellen. Dazu reicht ein Klick auf "Datei --> Kalender".

5. Weitere Besonderheiten

Bestimmte Einstellungen verlangen eine gewisse Einarbeitung in Cartes du Ciel - daher wird hier nicht auf alle Möglichkeiten, die das Programm bietet eingegangen. Erwähnt seien jedoch noch die folgenden Funktionen:

- Cartes du Ciel kann elektronische Teleskopsteuerungen ansprechen - das Teleskop wird so auf das gewünschte Objekt gelenkt.
- Galaxien und Nebel werden in der Standardausführung von Cartes du Ciel durch transluzente Felder markiert. Es besteht die Möglichkeit, an dieser Stelle Fotos von dem entsprechenden Objekt zu hinterlegen.
- Cartes du Ciel kann über das Internet aktuelle Informationen über Asteroidenbahnen abrufen und in den Sternkarten darstellen.
- Mit Cartes du Ciel kann man den Sternenhimmel über einen beliebigen Zeitraum hinweg simulieren. So lässt sich u.a. die bekannte Marsschleife illustrieren.

2.5 Tabellen

2.5.1 Liste der Sternbilder

Abk.	lateinischer Name	deutscher Name	Abk.	lateinischer Name	deutscher Name
And	Andromeda	Andromeda	Lac	Lacerta	Eidechse
Ant	Antlia	Luftpumpe	Leo	Leo	Löwe
Aps	Apus	Paradiesvogel	LMi	Leo Minor	Kleiner Löwe
Aqr	Aquarius	Wassermann	Lep	Lepus	Hase
Aql	Aquila	Adler	Lib	Libra	Waage
Ara	Ara	Altar	Lup	Lupus	Wolf
Ari	Aries	Widder	Lyn	Lynx	Luchs
Aur	Auriga	Fuhrmann	Lyr	Lyra	Leier
Boo	Bootes	Bärenhüter	Men	Mensa	Tafelberg
Cae	Caelum	Grabstichel	Mic	Microscopium	Mikroskop

Abk.	lateinischer Name	deutscher Name	Abk.	lateinischer Name	deutscher Name
Cam	Camelopardalis	Giraffe	Mon	Monoceros	Einhorn
Cnc	Cancer	Krebs	Mus	Musca	Fliege
CVn	Canes Venativi	Jagthunde	Nor	Norma	Winkelmaß
CMa	Canis Major	Großer Hund	Oct	Octans	Oktant
CMi	Canis Minor	Kleiner Hund	Oph	Ophiuchus	Schlangenträger
Cap	Capricornus	Steinbock	Ori	Orion	Himmelsjäger
Car	Carina	Kiel des Schiffes	Pav	Pavo	Pfau
Cas	Cassiopeia	Kassiopeia	Peg	Pegasus	Pegasus
Cen	Centaurus	Kentaur	Per	Perseus	Perseus
Cep	Cepheus	Cepheus	Phe	Phoenix	Phoenix
Cet	Cetus	Walfisch	Pic	Pictor	Maler
Cha	Chamaelon	Chamaelon	PsA	Piscis Austrinus	Südlicher Fisch
Cir	Circinus	Zirkel	Psc	Pisces	Fische
Col	Columba	Taube	Pup	Puppis	Hinterteil des Schiffes
Com	Coma Berenices	Haar der Berenike	Pyx	Pyxis	Schiffskompass
CrA	Corona Australis	Südliche Krone	Ret	Reticulum	Netz
CrB	Corona Borealis	Nördliche Krone	Sge	Sagitta	Pfeil
Crv	Corvus	Rabe	Sgr	Sagittarius	Schütze
Crt	Crater	Becher	Sco	Scorpius	Skorpion
Cru	Crux	Kreuz	Scl	Sculptor	Bildhauer
Cyg	Cygnus	Schwan	Sct	Scutum	Schild
Del	Delphinus	Delphin	Ser	Serpens	Schlange
Dor	Dorado	Schwertfisch	Sex	Sextans	Sextand
Dra	Draco	Drache	Tau	Taurus	Stier
Equ	Equuleus	Pferdchen	Tel	Telescopium	Teleskop
Eri	Eridanus	Fluss Eridanus	TrA	Triangulum Australe	Südliches Dreieck
For	Fornax	Chemischer Ofen	Tri	Triangulum	Dreieck
Gem	Gemini	Zwillige	Tuc	Tucana	Tukan
Gru	Grus	Kranich	UMa	Ursa Major	Großer Bär
Her	Hercules	Herkules	UMi	Ursa Minor	Kleiner Bär
Hor	Horologium	Pendeluhr	Vel	Vela	Segel des Schiffes
Hya	Hydra	Nördliche Wasser-schlange	Vir	Virgo	Jungfrau
Hyi	Hydrus	Südliche Wasser-schlange	Vol	Volans	Fliegender Fisch
Ind	Indus	Indier	Vul	Vulpecula	Fuchs

2.5.2 Der Messier Katalog

Der Messier Katalog stammt von dem französischen Astronom Charles Messier (1730-1817) und umfasst 110 astronomische Objekte. Messier suchte nach Kometen, indem er systematisch den Nachthimmel absuchte. Dabei entdeckte er einige Objekte, die für ihn zwar kometenähnlich aussahen, allerdings keine Eigenbewegung aufwiesen. Sie mussten sich also an einem Ort außerhalb des Sonnensystems befinden.

Um sie nicht mit den tatsächlichen Kometen zu verwechseln, fertigte Messier zusammen mit seinem Kollegen Pierre Mechain (1744-1804) eine Liste an, in der sie diese Objekte nach und nach eintrugen. So entstand der Messier Katalog, der sich unter Hobbyastronomen bis heute großer Beliebtheit erfreut.

Der Messier Katalog enthält Galaxien, Sternhaufen und Nebel großer Helligkeit. Die meisten dort verzeichneten Objekte sind bereits mit kleinen Teleskopen sichtbar, teilweise sieht man sie schon in einem einfachen Fernglas.

In virtuellen Planetarien (wie Cartes du Ciel) oder Sternkarten sind die Messier-Objekte meist mit ihrem Kürzel gekennzeichnet. Dieses besteht aus einem "M" und der Nummer des zugehörigen Objektes im Katalog.

Der New General Catalog (NGC)

Der NGC wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts von verschiedenen Astronomen zusammengestellt und umfasst rund 8000 Galaxien, Sternhaufen und intergalaktische Nebeln. Die meisten NGC-Objekte lassen sich gut mit mittelgroßen (mind. 8 Zoll) Teleskopen beobachten. Einsteiger sollten jedoch mit dem Messier Katalog anfangen, insbesondere wenn sie nur über "lichtschwache" Instrumente verfügen.

Nr.	Name	Sternbild	Mag	Objektyp	Entfernung Lj	NGC-Nr.
M1	Krebsnebel	Tau	8,4	Supernova-Überrest	6 300	1952
M2		Aqr	6,4	Kugelsternhaufen	36 000	7089
M3		CVn	6,3	Kugelsternhaufen	31 000	5272
M4		Sco	6,5	Kugelsternhaufen	7 000	6121
M5		Ser	6,1	Kugelsternhaufen	23 000	5904
M6	Schmetterlingshaufen	Sco	5,5	Offener Sternhaufen	2 000	6405
M7		Sco	3,3	Offener Sternhaufen	1 000	6475
M8	Lagunennebel	Sgr	5,1	Emissionsnebel	6 500	6523
M9		Oph	8,0	Kugelsternhaufen	26 000	6333
M10		Oph	6,7	Kugelsternhaufen	13 000	6254
M11	Wildentenhaufen	Sct	6,8	Offener Sternhaufen	6 000	6705
M12		Oph	6,6	Kugelsternhaufen	18 000	6218
M13		Her	5,9	Kugelsternhaufen	22 000	6205
M14		Oph	8,0	Kugelsternhaufen	27 000	6402
M15		Peg	6,4	Kugelsternhaufen	33 000	7078

Nr.	Name	Sternbild	Mag	Objekttyp	Entfernung Lj	NGC- Nr.
M16	Adlernebel	Ser	6,6	Emissionsnebel	7 000	6611
M17	Omeganebel	Sgr	7,5	Emissionsnebel	5 000	6618
M18		Sgr	7,2	Offener Sternhaufen	6 000	6613
M19		Oph	6,9	Kugelsternhaufen	27 000	6273
M20	Trifidnebel	Sgr	8,5	Emissionsnebel	2 200	6514
M21		Sgr	6,5	Offener Sternhaufen	3 000	6531
M22		Sgr	5,6	Kugelsternhaufen	10 000	6656
M23		Sgr	5,9	Offener Sternhaufen	4 500	6494
M24		Sgr	4,6	Milchstraßenab- schnitt	10 000	-
M25		Sgr	6,2	Offener Sternhaufen	2 000	-
M26		Sct	9,3	Offener Sternhaufen	5 000	6694
M27	Hantelnebel	Vul	7,6	Planetarischer Nebel	1 250	6853
M28		Sgr	7,6	Kugelsternhaufen	18 000	6626
M29		Cyg	8,0	Offener Sternhaufen	7 200	6913
M30		Cap	7,7	Kugelsternhaufen	25 000	7099
M31	Andromedagalaxie	And	3,5	Spiralgalaxie	2,3 Mio.	224
M32		And	8,2	elliptische Galaxie	2,2 Mio.	221
M33	Dreiecksnebel	Tri	5,8	Spiralgalaxie	2,3 Mio.	598
M34		Per	5,8	Offener Sternhaufen	1 400	1039
M35		Gem	5,6	Offener Sternhaufen	2 800	2168
M36		Aur	6,5	Offener Sternhaufen	4 100	1960
M37		Aur	6,2	Offener Sternhaufen	4 600	2099
M38		Aur	7,0	Offener Sternhaufen	4 200	1912
M39		Cyg	5,3	Offener Sternhaufen	300	7092
M40		UMa	8,9	Doppelstern		-
M41		CMa	5,0	Offener Sternhaufen	2 400	2287
M42	Orionnebel	Ori	4,0	Emissionsnebel	1 600	1976
M43		Ori	9,0	Emissionsnebel	1 600	1982
M44	Krippe	Cnc	3,9	Offener Sternhaufen	500	2632
M45	Plejaden	Tau	1,6	Offener Sternhaufen	400	-
M46		Pup	6,6	Offener Sternhaufen	5 400	2437
M47		Pup	5,0	Offener Sternhaufen	1 600	2422
M48		Hya	6,0	Offener Sternhaufen	1 500	2548
M49		Vir	8,5	elliptische Galaxie	60 Mio	4472
M50		Mon	6,3	Offener Sternhaufen	3000	2323
M51	Whirlpool-Galaxie	CVn	8,4	Spiralgalaxie	37 Mi	5194
M52		Cas	8,2	Offener Sternhaufen	7 000	7654
M53		Com	7,8	Kugelsternhaufen	56 000	5024
M54		Sgr	7,8	Kugelsternhaufen	83 000	6715
M55		Sgr	6,2	Kugelsternhaufen	17 000	6809

Nr.	Name	Sternbild	Mag	Objekttyp	Entfernung Lj	NGC- Nr.
M56		Lyr	8,7	Kugelsternhaufen	32 000	6779
M57	Ringnebel	Lyr	9,0	planetarischer Nebel	4 100	6720
M58		Vir	9,9	Spiralgalaxie	60 Mio	4579
M59		Vir	10,0	Spiralgalaxie	60 Mio	4621
M60		Vir	9,0	elliptische Galaxie	60 Mio	4649
M61		Vir	9,6	Spiralgalaxie	60 Mio	4303
M62		Oph	6,6	Kugelsternhaufen	22 000	6266
M63		CVn	8,9	Spiralgalaxie	37 Mio	5055
M64	Black Eye Galaxie	Com	8,5	Spiralgalaxie	12 Mio	4826
M65		Leo	9,4	Spiralgalaxie	35 Mio	3623
M66		Leo	9,0	Spiralgalaxie	35 Mo	3627
M67		Cnc	6,1	Offener Sternhaufen	2 250	2682
M68		Hya	8,2	Kugelsternhaufen	32 000	4590
M69		Sgr	8,0	Kugelsternhaufen	25 000	6637
M70		Sgr	8,1	Kugelsternhaufen	28 000	6681
M71		Sge	7,6	Kugelsternhaufen	12 000	6838
M72		Aqr	9,3	Kugelsternhaufen	53 000	6981
M73		Aqr	9,1	Asterismus		6994
M74		Psc	9,3	Spiralgalaxie	35 Mio	628
M75		Sgr	8,6	Kugelsternhaufen	58 000	6864
M76	Kleiner Hantelnebel	Per	11,4	planetarischer Nebel	3 400	650/651
M77		Cet	8,9	Spiralgalaxie	60 Mio	1068
M78		Ori	8,3	Reflexionsnebel	1 600	2068
M79		Lep	7,5	Kugelsternhaufen	40 000	1904
M80		Sco	7,5	Kugelsternhaufen	30 000	6093
M81		UMa	7,0	Spiralgalaxie	11 Mio	3031
M82		UMa	8,4	irreguläre Galaxie	11 Mio	3034
M83		Hya	7,6	Spiralgalaxie	20 Mio	5236
M84		Vir	9,4	elliptische Galaxie	60 Mio	4374
M85		Com	9,3	elliptische Galaxie	60 Mio	4382
M86		Vir	9,2	elliptische Galaxie	60 Mio	4406
M87	Virgo A Galaxie	Vir	8,7	elliptische Galaxie	60 Mio	4486
M88		Com	9,5	Spiralgalaxie	60 Mio	4501
M89		Vir	10,3	elliptische Galaxie	60 Mio	4552
M90		Vir	9,6	Spiralgalaxie	60 Mio	4569
M91		Com	9,5	Spiralgalaxie	60 Mio	4548
M92		Her	6,4	Kugelsternhaufen	26 000	6341
M93		Pup	6,5	offener Sternhaufen	4 500	2447
M94		CVn	8,3	Spiralgalaxie	14,5 Mio	4736
M95		Leo	9,8	Spiralgalaxie	38 Mio	3351

Nr.	Name	Sternbild	Mag	Objekttyp	Entfernung Lj	NGC-Nr.
M96		Leo	9,3	Spiralgalaxie	38 Mio	3368
M97	Eulennebel	UMa	11,1	planetarischer Nebel	2 600	3587
M98		Com	10,2	Spiralgalaxie	60 Mio	4192
M99		Com	9,9	Spiralgalaxie	60 Mio	4254
M100		Com	9,4	Spiralgalaxie	60 Mio	4321
M101		UMa	7,9	Spiralgalaxie	24 Mio	5457
M102		UMa	10,5	Galaxie	40 Mio	5866
M103		Cas	6,9	offener Sternhaufen	8 000	581
M104	Sombrero-Galaxie	Vir	8,3	Spiralgalaxie	50 Mio	4594
M105		Leo	9,7	elliptische Galaxie	38 Mio	3379
M106		CVn	8,4	Spiralgalaxie	25 Mio	4258
M107		Oph	9,2	Kugelsternhaufen	20 000	6171
M108		UMa	10,5	Spiralgalaxie	45 Mio	3556
M109		UMa	10,0	Spiralgalaxie	55 Mio	3992
M110		And	9,4	elliptische Galaxie	2,2 Mio	205

Um ein schnelles Auffinden der Messier-Objekte zu garantieren, sind in der folgenden Tabelle die Messier-Objekten den Sternbildern zugeordnet, in denen sie sich befinden:

Abk	Sternbildname	Messier-Objekte
And	Andromeda	M31, M32, M110
Aqu	Wassermann	M2, M72, M73
Aur	Fuhrmann	M36, M37, M38
Cap	Steinbock	M30
Cas	Kassiopeia	M52, M103
Cet	Walfisch	M77
CMa	Großer Hund	M41
Cnc	Krebs	M44, M67
Com	Haar der Berenike	M53, M64 M85, M88, M91, M98, M99, M100
CVn	Jagthunde	M3, M51, M63, M94, M106
Cyg	Schwan	M29, M39
Gem	Zwillinge	M35
Her	Herkules	M13, M92
Hya	Nördliche Wasserschlang	M48, M68, M83
Leo	Löwe	M65, M66, M95, M96, M105
Lep	Hase	M79
Lyr	Leier	M56, M57
Mon	Einhorn	M50
Oph	Schlangenträger	M9, M10, M12, M14, M19, M62, M107
Ori	Orion	M42, M43, M78

Abk	Sternbildname	Messier-Objekte
Peg	Pegasus	M15
Per	Perseus	M34, M76
Psc	Fische	M74
Pup	Hinterteil des Schiffes	M46, M47, M93
Sco	Skorpion	M4, M6, M7, M80
Sct	Schild	M11, M26
Ser	Schlange	M5, M16
Sge	Pfeil	M71
Sgr	Schütze	M8, M17, M18, M20, M21, M22, M23, M24, M25, M28, M54, M55, M69, M70, M75
Tau	Stier	M1, M45
Tri	Dreieck	M33
UMa	Großer Bär	M40, M81, M82, M97, M101, M108, M109
Vir	Jungfrau	M49, M58, M59, M60, M61, M84, M86, M87, M89, M90, M104
Vul	Fuchs	M27

2.5.3 Liste der Meteorströme

In der folgenden Tabelle sind die acht wichtigsten Meteorströme aufgelistet. An den entsprechenden Tagen kann man mindestens 10 Sternschnuppen (Meteore) pro Stunde beobachten. Besonders lohnenswert sind die *Quadrantiden*, *Perseiden*, und *Geminiden*.

Datum	Maximum	Name	ZHR	Rektaszension	Deklination
01.01. bis 05.01.	03. Januar	Quadrantiden	120	15:20 h	+49°
16.04. bis 25.04.	22. April	Lyriden	15	18:04 h	+34°
19.04. bis 28.05.	06. Mai	Eta-Aquariden	66	22:32 h	-01°
12.07. bis 19.08.	28. Juli	Südliche Delta-Aquariden	20	22:36 h	-16°
17.07. bis 24.08.	12. August	Perseiden	100	03:04 h	+58°
02.10. bis 07.11.	21. Oktober	Orioniden	20	06:20 h	+16°
07.12 bis 17.12.	14. Dezember	Geminiden	120	07:28 h	+33°
17.12. bis 26.12.	22. Dezember	Ursiden	10	14:28 h	+76°

Bezeichnungen:

Datum: Zeitraum, in denen der Meteorstrom beobachtet werden kann.

Maximum: Datum, an dem die meisten Meteore beobachtet werden können.

Name: Bezeichnung des jeweiligen Stroms.

ZHR: Maximal pro Stunde beobachtbare Meteore (bis Größenklasse 6,5)

Rektaszension,

Deklination: Position des Punktes am Nachthimmel, von dem der Meteorstrom auszugehen scheint.

2.5.4 Mondfinsternisse 2007 - 2020

[UT = Universalzeit]

Hier nun eine Liste der Mondfinsternisse von 2007-2020. Bei Mondfinsternissen, bei denen in der folgenden Tabelle eine Totalitätszeit angegeben ist, wird der Mond vollständig verfinstert.

	Eintritt in den		Beginn:		Ende:	Austritt aus dem	
Datum	Halbschatten	Kernschatten	Totalität	Maximum	Totalität	Kernschatten	Halbschatten
21.02.08	00:36 UT	01:43 UT	03:00 UT	03:26 UT	03:54 UT	05:11 UT	06:17 UT
16.08.08	18:24 UT	19:35 UT	-	21:10 UT	-	22:46 UT	23:57 UT
31.12.09	17:17 UT	18:50 UT	-	19:22 UT	-	19:57 UT	21:30 UT
26.06.10	08:57 UT	10:16 UT	-	11:38 UT	-	13:02 UT	14:21 UT
21.12.10	05:29 UT	06:32 UT	07:40 UT	08:17 UT	08:55 UT	10:03 UT	11:06 UT
15.05.11	17:24 UT	18:22 UT	19:22 UT	20:12 UT	21:04 UT	22:04 UT	23:02 UT
10.12.11	11:33 UT	12:45 UT	14:05 UT	14:32 UT	15:00 UT	16:20 UT	17:32 UT
04.05.12	08:48 UT	09:59 UT	-	11:03 UT	-	12:09 UT	13:20 UT
25.04.13	18:03 UT	19:48 UT	-	20:07 UT	-	20:29 UT	22:14 UT
15.04.14	04:53 UT	05:58 UT	07:06 UT	07:45 UT	8:27 UT	9:35 UT	10:40 UT
08.10.14	08:15 UT	09:14 UT	10:24 UT	10:54 UT	11:26 UT	12:36 UT	13:35 UT
04.04.15	09:01 UT	10:15 UT	11:49 UT	12:00 UT	12:13 UT	13:47 UT	15:01 UT
28.09.15	00:12 UT	01:07 UT	02:11 UT	02:47 UT	03:25 UT	04:29 UT	05:24 UT
07.08.17	15:50 UT	17:22 UT	-	18:20 UT	-	19:21 UT	20:53 UT
31.01.18	10:51 UT	11:48 UT	12:51 UT	13:30 UT	14:10 UT	15:13 UT	16:10 UT
27.07.18	17:14 UT	18:24 UT	19:30 UT	20:21 UT	21:15 UT	22:21 UT	23:31 UT
21.01.19	02:36 UT	03:34 UT	04:40 UT	05:12 UT	05:46 UT	06:52 UT	07:50 UT
16.07.19	18:43 UT	20:01 UT	-	21:30 UT	-	23:02 UT	00:20 UT

2.5.5 Sonnenfinsternisse 2007 - 2021

Die folgende Liste umfasst alle Sonnenfinsternisse, die zwischen 2007 und 2021 in Deutschland beobachtet werden können.

Datum	Typ	Dauer
01.08.2008	Total, in Deutschland partiell	2 min 27 sec
04.01.2011	Partiell	
20.03.2015	Total, in Deutschland partiell	2 min 47 sec
10.06.2021	Total, in Deutschland partiell	3 min 51 sec

3 Sterne: Von der Geburt bis zum Tod

Wir kommen nun zu einem der in der Öffentlichkeit am meisten diskutierten Themengebiete in der Astronomie.

Bei Sternen handelt es sich um riesige Materieansammlungen, in denen die Elemente, aus denen sie aufgebaut sind, gezwungen werden, sich unter Abgabe gewaltiger Energiemengen in andere (schwerere) Elemente umzuwandeln. In diesem Kapitel verfolgen wir den Lebensweg dieser Sterne, von der Geburt aus einer dunklen Staub- und Gaswolke heraus angefangen, bis hin zu dem gewaltsamen Tod, der nicht selten in der Form eines Schwarzen Loches endet.

Dabei ist im Rahmen dieses Buches nur ein sehr grobes Verständnis der Vorgänge möglich. Für eine quantitative Abhandlung werden genauere Kenntnisse aus der Thermodynamik, Hydrodynamik, Elektrodynamik, Quantentheorie, allgemeiner Relativitätstheorie, etc. benötigt. In diesem Kapitel wird versucht, die Vorgänge derart vereinfacht zu schildern, dass sie mit geringen physikalischen Vorkenntnissen verstanden werden können.

3.1 Physikalische Vorbemerkungen

Um das Verständnis der kommenden Abschnitte zu erleichtern (oder gar erst zu ermöglichen), wird ein physikalischer Einschub notwendig. Dieser kann gestrost übersprungen werden, wenn der Leser Grundkenntnisse über den Bereich der Wärmelehre, sowie über die vier Grundkräfte besitzt.

3.1.1 Die vier Grundkräfte

In der Physik versucht man, zu einem möglichst tiefgehenden Verständnis der uns umgebenden materiellen Welt zu gelangen. Dabei präsentiert sich unsere Welt in großer Vielfalt. Hier kommen unweigerlich Fragen auf, Fragen aus der eigenen Erfahrung oder aus Beobachtungen im Rahmen großangelegter Experimente: Warum kommt ein Stabhochspringer wieder zur Erde zurück, obwohl er sich doch von ihr abstößt? Warum fällt ein Mensch nicht durch den Stuhl hindurch, auf dem er sitzt? Was hält ihn zurück? Warum sind Atomkerne bis zu einer gewissen Größe stabil?

Die ganze Vielfalt der Welt sowie alle bisher gemachten materiellen Beobachtungen und Erfahrungen lassen sich auf nur vier (!) Grundkräfte zurückführen: Die sogenannten *Elementaren Wechselwirkungen*. Unser gesamtes bisheriges Bild von der materiellen Welt um uns herum baut auf diese Grundkräfte auf. Die Kräfte im Einzelnen:

Die Gravitationskraft:

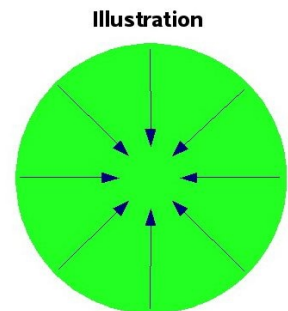
Beobachtungen innerhalb der Astronomie sowie Laborexperimente lassen nur einen Schluss zu:

Massen ziehen sich gegenseitig an. Diese Anziehungskraft nennt man Gravitati-

onskraft oder auch gravitative Wechselwirkung. Sie bewirkt, dass die Planeten um die Sonne kreisen, Monde wiederum um ihre Planeten und: sie bewirkt, dass wir Menschen auf der Erde gehalten werden.

Der Stabhochspringer aus der obigen Frage fällt also aufgrund der gravitativen Anziehungskraft zwischen der Erde und ihm auf die Erde zurück.

Nun ist die Erde sehr massereich (ca. $6 \cdot 10^{21}$ Tonnen). Die Bereiche im Innern der Erde ziehen sich aufgrund der Gravitation "gegenseitig" an. Daher herrscht im Erdinnern ein großer Druck, der sogenannte *Gravitationsdruck* (vgl. Abbildung 63). Weshalb aber fällt die Erde dann nicht einfach in sich zusammen? Welche Kraft wirkt der Gravitation entgegen? - Hier die Antwort:



Gravitationsdruck in der Erde
Abbildung 63: Illustration des Gravitationsdruckes

Die elektrischen und magnetischen Kräfte (= elektromagnetische Wechselwirkungen)

In der Natur gibt es positive und negative elektrische Ladungen. Wie viele Experimente zeigen, stoßen sich gleichnamige Ladungen gegenseitig ab; unterschiedliche Ladungen ziehen sich dagegen an (*elektrostatische Kräfte*). Man findet außerdem Magnete mit magnetischem Nord- und Südpol, für die ebenfalls gilt: Gleichnamige Pole stoßen sich ab, unterschiedliche ziehen sich an (*magnetostatische Kräfte*).

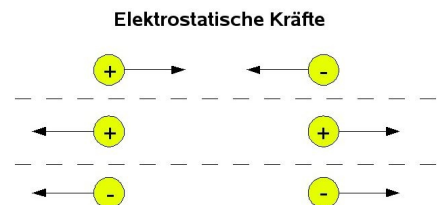


Abbildung 64: Elektrostatische Anziehungs- und Abstoßungskräfte

Die hier wirkenden Kräfte beruhen auf der elektromagnetischen Grundkraft.

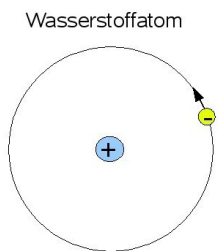


Abbildung 65:
Aufbau eines Wasserstoffatoms

In der Schule lernt man das *Bohrsche Atommodell*: Danach bestehen Atome aus negativ geladenen Elektronen, die auf fest definierten Bahnen um den positiv geladenen Atomkern kreisen. Aufgrund der Anziehungskräfte zwischen den positiv geladenen Protonen des Kerns und den negativ geladenen Elektronen, wird das Elektron auf eine Kreisbahn um den Kern gezwungen. Beantworten wir nun die Frage: "Warum fällt ein Mensch nicht durch den Stuhl, auf dem er sitzt?"

Alles auf und in der Erde besteht aus Atomen. Menschen, Stühle, u.s.w. sind inbegriffen. Wenn ein Mensch auf einem Stuhl sitzt, nähern sich offenbar die Atome seiner Hose den Atomen des Stuhls bis auf einen gewissen Abstand an. Nach dem Bohrschen Atommodell sitzen die negativen Ladungen in den Außenbereichen der Atome. Wenn sich die Atome der Hose und des Stuhls nun sehr nahe kommen, kommen sich insbesondere die Elektronen der Atomhüllen sehr nahe. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, woraus folgt: Die Abstoßungskraft der Elektronen verhindert, dass der Mensch durch den Stuhl hindurch fällt.

Der Bezug zur Astronomie: Der einzige Grund, weshalb die Erde nicht einfach in sich zusammenfällt, liegt in der Abstoßungskraft der Elektronen zwischen den Atomen, aus denen die Erde aufgebaut ist. Die auf das Erdinnere lastende Kraft der Gravitation wird durch die elektrischen Abstoßungskräfte der Atome der Erde vollständig kompensiert.

Nun bestehen Atomkerne aus positiv geladenen Protonen und neutral geladenen Neutronen. Sofort kommt die Frage auf: Weshalb stoßen sich die Protonen im Kern nicht ab, obwohl sie gleichnamig geladen sind? Warum sind also Kerne stabil? - Die Antwort auf diese Fragen gibt die dritte Grundkraft, die im Folgenden vorgestellt wird:

Die starke Kernkraft

Die starke Kernkraft ist sehr viel stärker als die elektromagnetische Kraft. Sie ist auf den Kern eines Atoms beschränkt, hat also nur eine sehr geringe Reichweite und wirkt anziehend. Die anziehende Wirkung verhindert ein gegenseitiges Abstoßen der Protonen im Kern, welches auf die elektrostatischen Abstoßungskräfte zurückzuführen wäre.

Die vierte Grundkraft hat in den kommenden Abschnitten nur wenig Bedeutung. Daher hier nur der Vollständigkeit halber:

Die schwache Kernkraft

Die schwache Kernkraft wirkt nur auf sehr kurzen Distanzen. Sie spielt unter anderem beim radioaktiven Zerfall eine Rolle. Wir werden sie hier nicht näher betrachten.

Die vier Grundkräfte im Vergleich

In der folgenden Tabelle sind die Grundkräfte entsprechend ihrer Stärke geordnet. Die "Stärke" der Gravitationskraft wird dabei mit 1 normiert.

Grundkraft	Relative Stärke	Reichweite
Gravitationskraft	1	unendlich
Schwache Kernkraft	10^{26}	$<10^{-15}$ Meter
Elektromagnetische Kraft	10^{39}	unendlich
Starke Kernkraft	10^{41}	10^{-15} Meter

Die Gravitationskraft ist die (mit Abstand) schwächste aller Kräfte. Um so erstaunlicher ist es, dass ausgerechnet die Gravitation den Zusammenhalt des Universums verantwortet. Nur aufgrund der Gravitation bleiben Planeten auf ihren Bahnen um ihren Zentralstern; nur aufgrund der Gravitation bilden sich Galaxien, Galaxienhaufen und Großraumstrukturen.

Nach den modernen Anschauungen der *allgemeinen Relativitätstheorie* entstanden im Universum sogar der Raum und die Zeit erst durch die Gravitation. Weitere Folgerungen aus der Relativitätstheorie werden wir jedoch spätestens im Unterabschnitt über Schwarze Löcher kennen lernen.

Doch warum ist es ausgerechnet die Gravitation, die eine so entscheidende Rolle in der Entwicklung unseres Universums einnimmt? Schließlich ist jede der anderen Grundkräfte um viele Größenordnungen stärker!

Diese Frage lässt sich erstaunlich einfach beantworten: Die starke Kernkraft besitzt eine Reichweite von nur 10^{-15} Metern. Das mehrere Milliarden Lichtjahre

große Universum lässt sich über so kurze Distanzen nicht zusammenhalten. Das gleiche Argument spricht auch gegen die schwache Kernkraft. Die Reichweite der Gravitation ist dagegen unendlich.

Für die elektromagnetischen Kräfte gibt es offenbar andere Gründe, denn sie haben den gleichen Wirkungsradius (=Reichweite) wie die Gravitation.

Wie eben geschildert, befinden sich bei Atomen die negativen Ladungen in den äußeren Bereichen der Atome. Bei der Annäherung zweier Atome kommen sich diese Bereiche besonders nahe und stoßen sich ab. Befindet sich eine größere Distanz zwischen den beiden Atomen, so ändert sich die Situation grundlegend: Wenn man Atome aus größerer Entfernung betrachtet, fällt der Abstand zwischen Atomkern und -hülle nicht mehr ins Gewicht: Da sich in der Regel gleich viele negativ geladene Elektronen in der Atomhülle befinden wie positiv geladene Protonen im Kern, erscheinen Atome ab einem gewissen Abstand elektrisch neutral. Das heißt, ab einer gewissen Distanz wirken zwischen zwei Atomen keine merklichen elektromagnetischen Kräfte mehr. Diese Distanz liegt bei etwa 10^{-9} Metern.

Da das Weltall nach der heutigen Kenntnis elektrisch neutral ist, besitzen die elektromagnetischen Kräfte keinen Angriffspunkt, an dem sie wirken können.

Somit verbleibt die Gravitation, die als einzige in der Lage ist, auf große Entfernungen im Universum zu wirken.

3.1.2 Vorbemerkungen zur Thermodynamik

Im Fach Physik lernt man in der Mittelstufe die folgenden Kenntnisse:

Makroskopische Kenntnisse:

1. Wenn ein Gas in einem *gleichbleibenden Volumen* (z.B. in einem geschlossenen Behälter) erwärmt wird, so erhöht sich der Gasdruck in dem Behälter. Wenn es abgekühlt wird, verringert sich der Druck entsprechend.
2. Wenn ein Gas bei *variablem Volumen* und gleichbleibendem Druck erwärmt wird, so vergrößert sich das Volumen. Anders ausgedrückt: Ein Gas dehnt sich bei Erwärmung aus.
Da sich bei diesem Vorgang die gleiche Menge Gas auf ein größeres Volumen verteilt, verringert sich die Dichte des Gases bei Erwärmung.
3. Presst man ein Gas zusammen (d.h. man verkleinert das zur Verfügung stehende Volumen), so erhöht sich der Druck und die Temperatur des Gases.

Mikroskopische Kenntnisse:

4. Gas besteht aus kleinsten Teilchen (Atome, Moleküle,...). Wir beschränken uns an dieser Stelle auf Gas, welches aus einzelnen Atomen besteht (z.B. Heliumgas).
5. Die Atome eines atomaren Gases haben untereinander keine festen Bindungen. Vereinfacht kann man sich die Atome eines Gases als kugelförmige Gebilde vorstellen, die in größeren Abständen durch den Raum fliegen, immer wieder aneinanderstoßen und dabei wie Billard-Kugeln voneinander abprallen.

6. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Atome durch den Raum bewegen, hängt von der Temperatur des Gases ab. Je höher die Temperatur, desto größer die Geschwindigkeit der Atome. Je niedriger die Temperatur ist, desto langsamer sind die Atome.

Wärmetransport

Wärme kann auf drei verschiedene Weisen transportiert werden.

1. Wärmetransport durch Wärmeleitung:

Wärme kann durch *Wärmeleiter* abtransportiert werden. Dabei wird die Wärmeenergie durch ungeordnete Teilchenstöße auf die Nachbarpartikel übertragen. Gute Wärmeleiter sind beispielsweise Metalle. Erwärmt man das eine Ende einer Metallstange, so wird die Wärme mit der Zeit zum anderen Ende geleitet.

Beispiel aus dem Alltag: Bei einer Pfanne auf der Herdplatte wird die untere Seite der Pfanne durch die Platte erhitzt. Durch Wärmeleitung gelangt die Wärme zu der Seite, auf der das Essen erhitzt wird.

In der Astronomie spielt die Wärmeleitung nur eine untergeordnete Rolle.

Die Voraussetzung für den Wärmetransport durch Wärmeleitung ist der Kontakt mit einem Wärmeleiter.

2. Wärmetransport durch Konvektion:

Ein warmer Gegenstand auf der Erde kann durch Wärmekonvektion abgekühlt werden, wenn er von einem Gas oder einer Flüssigkeit umgeben ist: Das Gas wird um den Körper herum erwärmt. Weil es wärmer wird, dehnt es sich aus und verringert dabei seine Dichte. Da sich nur das Gas in unmittelbarer Nähe zum Gegenstand erwärmt und dort die Dichte verringert, steigt es aufgrund des *Archimedischen Prinzips* nach oben: Es wird vom dichteren, kälteren Gas der Umgebung verdrängt. Dieses kalte Gas wird wiederum erwärmt und steigt anschließend nach oben, u.s.w.. Während dieses Prozesses wird der Gegenstand abgekühlt: Die Wärme wird von dem aufsteigenden Gas weggetragen.

Beispiel aus dem Alltag: Ein Heizkörper, der durch Wärmekonvektion einen Raum aufheizt.

Beispiel aus der Astronomie: Wärmekonvektion im Erdinnern, die maßgeblich an der Entstehung des Erdmagnetfeldes beteiligt ist.

Der Abtransport von Wärme durch Konvektion kann nur stattfinden, wenn der warme Gegenstand von einem Gas (bzw. einer Flüssigkeit) umgeben ist, das eine niedrigere Temperatur besitzt als der zu kühlende Gegenstand.

3. Wärmetransport durch Wärmestrahlung:

Warme Objekte (feste Gegenstände, Flüssigkeiten, Gase) strahlen immer Wärme in Form von Wärmestrahlung (= *Infrarotstrahlung*) ab. Das heißt, dass ein warmer Gegenstand auch dann abgekühlt werden kann, wenn er weder von einem wärmeleitenden Material, noch von einem Gas oder ei-

ner Flüssigkeit umgeben ist.

Beispiel aus dem Alltag: Wärmestrahler

Beispiel aus der Astronomie: Zwischen Sonne und Erde befindet sich keine Materie, über die die Wärme der Sonne durch Konvektion oder Wärmeleitung zur Erde gelangen könnte. Die gesamte Wärme, die wir von der Sonne erhalten, gelangt durch Wärmestrahlung zu uns.

3.2 Die Entstehung von Sternen

Die Entstehung von Sternen dauert mehrere Millionen Jahre. Daher ist es unmöglich, die Entstehung eines bestimmten Sternes durch Beobachtung mitzuverfolgen. Unter der großen Anzahl der von der Erde aus beobachtbaren Sterne finden sich aber aus jeder Lebensphase Musterexemplare, durch die die Astronomen den Lebensweg der Sterne rekonstruieren können. So kann beispielsweise die Anfangsphase der Sternentstehung an einigen Exemplaren im *Orionnebel* und das Endstadium der Entstehung an den *Plejaden* in Form von Momentaufnahmen nachvollzogen werden.

Sterne entstehen aus riesigen Gas- und Staubwolken, die hauptsächlich aus Wasserstoffmolekülen H_2 bestehen und sich im interstellaren Raum befinden.

Auf dem rechten Foto sind die Dunkelwolken des Adlernebels M16 zu sehen. Es handelt sich um ein aktives Sternentstehungsgebiet. Um die Entstehung qualitativ zu verstehen, wenden wir unsere physikalischen Kenntnisse auf eine solche Wolke an:

Die kleinsten Teilchen (Staubteilchen, Wasserstoffmoleküle) in der Wolke haben alle eine Masse. Da sich Massen aufgrund der Gravitation gegenseitig anziehen, ziehen sich auch die Moleküle der Gaswolke an. Dadurch entsteht ein zum Zentrum der Wolke gerichteter *Gravitationsdruck*, der sie zum Kontrahieren veranlasst.

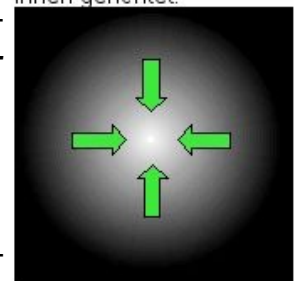
Die Sternentstehung verläuft in mehreren Stadien:

1. *Kontraktion* bedeutet, dass sich das Volumen der Wolke verringert, ihre Masse jedoch gleich bleibt. Mikroskopisch nähern sich die Gas- und Staubteilchen immer weiter an. Aufgrund der immer kleiner werdenden Abstände zwischen den Teilchen ziehen sie sich auch immer stärker gravitativ an. Das heißt, während der gesamten Kontraktionsphase erhöht sich der Gravitationsdruck immer weiter. Der Grund, weshalb die Wolke nicht einfach in sich zusammenfällt, liegt daran, dass der steigende Druck eine Temperaturerhöhung verur-



Abbildung 66: Sternentstehungsgebiet M16

Gravitationsdruck, nach innen gerichtet:



Gasdruck, nach außen gerichtet:

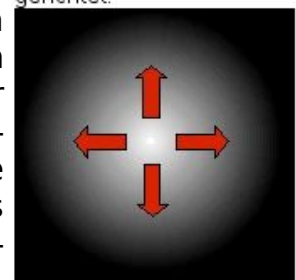


Abbildung 67: Gravitationsdruck vs. Gasdruck

sacht. Bei einer Temperaturerhöhung steigt aber auch der nach außen gerichtete Gasdruck, der dem Gravitationsdruck entgegenwirkt (vgl. Abbildung 67).

Jedoch wird mit der Zeit die Wärmeenergie im Innern des Sterns durch *Wärmestrahlung* nach außen abgeführt, wodurch sich der Gasdruck mit der Zeit verringert und die Wolke weiter kontrahiert.

- Die Wolke schrumpft. Dadurch rücken nicht nur die Gasteilchen, sondern auch die Staubteilchen in der Wolke immer näher zusammen. Die Wolke wird durch diesen Vorgang immer "undurchsichtiger" (=optisch dichter). Daher wird es mit der fortlaufenden Kontraktion für die Wärmestrahlung immer schwieriger, nach außen zu gelangen.

Weil nach einiger Zeit kaum Wärmeenergie mehr nach außen transportiert werden kann, erhöht sich die Temperatur des Zentrums der Wolke erheblich. Aufgrund der steigenden Temperatur erhöht sich der Gasdruck im gleichen Maße.

Wie eben erwähnt, wirkt der Gasdruck dem Gravitationsdruck entgegen. Aufgrund der Temperaturerhöhung steigt der Gasdruck so stark an, dass sich Gravitations- und Gasdruck kompensieren (d.h. ausgleichen). Die Wolke erreicht einen ersten stabilen Punkt.

Ab einem solchen Stadium nennen wir die Wolke **Protostern**.

- Während die Temperatur vor allem in den inneren Bereichen des Protosterns hoch ist, ist sie und der mit ihr in Verbindung stehende Gasdruck in den äußeren Bereichen der Wolke noch niedrig, und so gelangt immer mehr Materie aus den Außenbereichen in das Zentrum des Protosterns.

Bei diesem Vorgang regnen auch die Staubteilchen nach und nach auf das Zentrum ab: Die optische Dichte dieser Außenbereiche verringert sich. Dadurch kann die Wärmestrahlung diese Schichten wieder durchdringen und die Wärmeenergie aus dem Zentrum (durch die Wärmestrahlung) abtransportiert werden. Der Gasdruck im Innern lässt nach und der Protostern kontrahiert weiter.

- Temperatur und Gasdruck erhöhen sich während des fortlaufenden Kontraktionsprozesses immer weiter. Die Moleküle des Gases werden aufgrund der steigenden Temperatur immer schneller. Irgendwann ist die Bewegungsenergie der Moleküle so groß, dass die Wasserstoffmoleküle bei Zusammenstößen *dissoziieren*. Das heißt, die beiden H-Atome des Wasserstoffmoleküls H_2 verlassen ihre Molekülbindung; sie trennen sich. Dieser Vorgang verschlingt Wärmeenergie: Temperatur und Gasdruck fallen weiter.

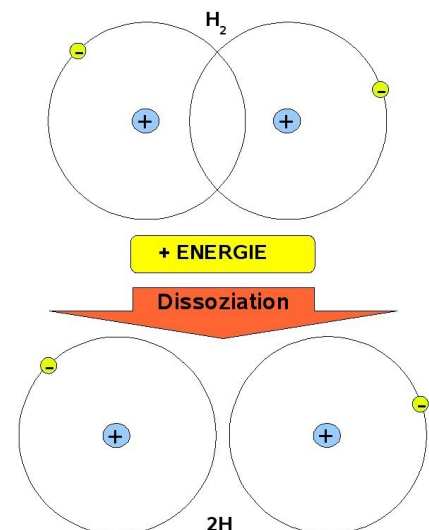


Abbildung 68: Dissoziation von Wasserstoffmolekülen

5. Wenn alle Moleküle dissoziiert sind, endet die dadurch bedingte Kontraktion. Die Wärmeenergie wird nur noch über die Oberfläche des Protosterns abgestrahlt. Da sich der Protostern inzwischen weiter zusammengezogen hat, ist dadurch seine Oberfläche kleiner geworden. Über eine kleinere Oberfläche wird bei gleicher Temperatur weniger Wärme abgestrahlt als über eine größere Oberfläche. Zudem fällt immer mehr Materie aus den Außenbereichen in das Zentrum des Protosterns. In Folge dessen erhöhen sich Temperatur und Druck sehr stark.
6. Und zwar so starkt, dass die Atome des Zentrums des Protosterns aufbrechen: Sie werden nach und nach vollständig *ionisiert*. Das heißt, es existieren keine Atome mehr im eigentlichen Sinne; Elektronen und Atomkerne sind getrennt und bewegen sich auf getrennten Wegen durch den Protostern. Wasserstoffatome spalten sich auf in Elektronen und Protonen. Dieses Gas aus Atomkernen und Elektronen nennt man ein **Plasma**. Der *Plasmazustand* ist neben den Zuständen *fest*, *flüssig* und *gasförmig* ein vierter *Aggregatzustand* in der Physik.

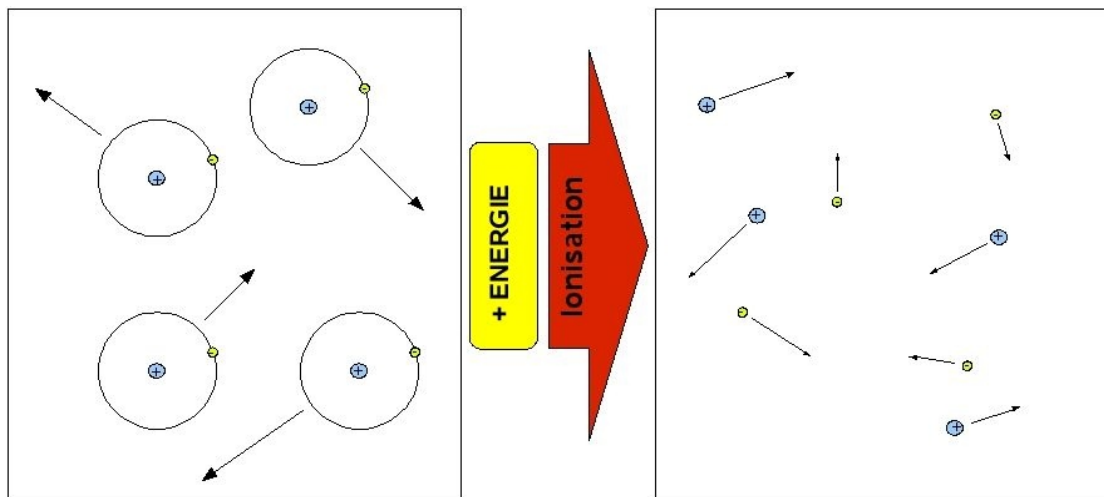


Abbildung 69: Ionisation von Wasserstoffatomen

Für die Ionisation wird wieder viel Energie benötigt. Die Wärmeenergie nimmt ab, der Gasdruck fällt und der Protostern schrumpft.

Man sollte meinen, dass sich die negativ geladenen Elektronen und die positiv geladenen Atomkerne des Plasmas gegenseitig anziehen und daher zusammenfallen müssten. Aus quantenmechanischen Gründen passiert dies nicht. Auf die Quantentheorie möchte ich jedoch nicht genauer eingehen; sie wird in der Mittelstufe nicht behandelt und würde daher den Rahmen dieses Textes sprengen.

Irgendwann ist ein Großteil des Gases ionisiert. Die Temperatur im Zentrum beträgt jetzt 10^5 ° Celsius. Aufgrund des hohen Gravitationsdruckes schrumpft der Protostern weiter.

7. Wenn die Masse und der damit verbundene Gravitationsdruck des Protosterns groß genug ist, erreicht sein Zentrum eine kritische Temperatur, die bei etwa 10^7 ° Celsius liegt:

Mikroskopisch betrachtet besteht das Innere eines solchen Protosterns

aus Elektronen und Atomkernen. Mit steigender Temperatur bewegen diese sich immer schneller.

Die Atomkerne sind beim "gewöhnlichen" Wasserstoff positiv geladene Protonen. Nun wissen wir zum einen, dass sich die Protonen aufgrund ihrer positiven Ladung gegenseitig abstoßen. Zum anderen wissen wir, dass, wenn sich die Protonen nahe genug kommen, die hundertfach stärkere *starke Kernkraft* anziehend wirkt. Also ziehen sich zwei Protonen ab einem genügend kleinen Abstand an.

Nun bewegen sich einige der Protonen ab der oben genannten Temperatur derart schnell durch das Zentrum des Protosterns, dass sie sich bei Zusammenstößen so stark annähern, dass die elektrostatische Abstoßungskraft überwunden wird und die starke, anziehende Kernkraft greift.

Zwei Protonen verbinden sich, sie *fusionieren*. Diesen Vorgang nennt man **Kernfusion**. Wir gehen später genauer auf den Vorgang ein.

8. Wir haben im Stadium 4 der Sternentstehung gesehen, dass es Energie kostet, zwei gebundene Teilchen voneinander zu trennen. Bei der Kernfusion *verbinden* sich zwei Teilchen miteinander. Dabei wird Energie frei. Diese freiwerdende Energie sorgt für eine Temperaturerhöhung im Innern des Protosterns. Dadurch erhöht sich der Gasdruck so stark, dass er sich mit dem Gravitationsdruck die Waage hält. Der Vorgang der Kontraktion ist damit zunächst beendet. Ein **Stern** ist entstanden.

Bemerkungen:

- Die Sternentstehung bzw. das Durchlaufen obiger Stadien dauert etwa 5 Millionen Jahre.
- Aus einer Gas- und Staubwolke entstehen immer mehrere Sterne gleichzeitig, indem es innerhalb der Wolke mehrere voneinander getrennte Zentren gibt, in denen die obigen Stadien der Sternentstehung durchlaufen werden. Die Wolke kontrahiert also an mehreren Stellen. Dies lässt sich wie folgt erklären:

Da alle Wolken eine Temperatur überhalb des *absoluten Nullpunktes* aufweisen, besteht in jeder Wolke von Grund auf ein nach außen gerichteter Gasdruck. Damit der nach innen gerichtete Gravitationsdruck diesen Gasdruck übersteigt (denn nur dann kontrahiert die Wolke), muss die Wolke eine Mindestmasse von 300 bis 400 Sonnenmassen besitzen. Sie kontrahiert also nur, wenn sie diese Mindestmasse überschreitet - ansonsten reicht der Gravitationsdruck nicht aus. Das ist das sogenannte Jeans-Kriterium.

Nun haben aber alle beobachteten Sterne (bis auf Ausnahmen) eine Masse von 0,05 bis 50 Sonnenmassen. Folglich müssen aus einer Gaswolke, die eine Mindestmasse von 300-400 Sonnenmassen besitzt, gleich mehrere Sterne entstehen: Aus einer Wolke entstehen somit immer sogenannte *Sternhaufen*.

- Bei den Kernfusionsprozessen in einem Stern fusionieren die Protonen des Plasmas nicht auf einem Schlag: Mit der Zentraltemperatur des

Sterns erhöht sich nämlich nur die Durchschnittsgeschwindigkeit der Protonen. Die Protonen fliegen nicht alle mit der gleichen Geschwindigkeit. Kernfusion kommt dadurch zustande, dass nur die oberste Spitze der schnellsten Protonen eine Geschwindigkeit erreicht, mit der die elektrostatischen Abstoßungskräfte überwunden werden können. Daher erstreckt sich der Prozess der Kernfusion meist über einige Milliarden Jahre.

- Nach dem Zünden der Kernfusion entsteht ein Teilchenstrom an geladenen Teilchen, die mit hoher Geschwindigkeit in das All geblasen werden. Dieser Teilchenstrom ist vergleichbar mit dem Sonnenwind unserer Sonne. Er sorgt dafür, dass Überreste der Entstehungswolke, die sich in unmittelbarer Nähe zum Stern befinden und nicht zum Stern selbst gehören, weggeblasen werden.
- Es gibt Protosterne, deren Masse nicht ausreicht, um im Zentrum die zum Zünden der Kernfusion benötigte Temperatur zu erreichen (vgl. Stadium 8). Diese Protosterne kontrahieren immer weiter, während sie stets Wärme abstrahlen, bis quantenmechanische Effekte ein weiteres Schrumpfen verhindern. Die Protosterne kühlen weiter ab, bis sie als kalte Materieansammlung enden, als sogenannte **braune Zwerge**.

3.2.1 Musterexemplare

Wie eingangs erwähnt, kann man den verschiedenen Stadien der Sternentstehung einige Musterexemplare zuordnen.



Abbildung 70: Sternentstehungsgebiet Orionnebel



Abbildung 71: Protosterne im Orionnebel

Bei dem Orionnebel (M42, Abbildung 70) handelt es sich um eine riesige Staub- und Gasansammlung, die von den in ihr entstandenen Sternen angestrahlt wird und daher in prächtigen Farben leuchtet.

Der Orionnebel ist eines der aktivsten Sternentstehungsgebiete in der unmittelbaren Nachbarschaft zur Sonne. In Abbildung 71 sehen wir in einem vergrößerten Ausschnitt des Nebels drei Wolken, die sich etwa in Stadium 2 der Sternentstehung befinden und sich zum Protostern weiterentwickeln.

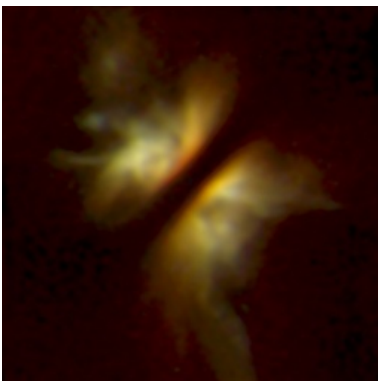


Abbildung 72: Infrarotaufnahme eines Protosterns

Abbildung 72 zeigt die Infrarotaufnahme (=Wärmebildaufnahme) eines sich in Stadium 3-4 befindlichen Protosterns. Die umliegenden Staubschichten regnen langsam auf den Protostern ab. Er ist von einer dichten Staubscheibe (*Akkretionsscheibe*) umgeben; auf dem Foto sehen wir sie als dunklen Balken, da wir von der Erde aus seitlich auf die Scheibe schauen. Solche Scheiben bilden sich bei den meisten Protosternen aus. Sie entsteht aufgrund geringfügiger Rotation der Ausgangswolke und aus den damit verbundenen physikalischen Zusammenhängen der Drehimpulserhaltung.

Wie in den obigen *Bemerkungen* beschrieben, entstehen aus Staub- und Gaswolken immer mehrere Sterne.

Abbildung 73 zeigt eine Vergrößerung des Trifidnebels (M20) im Sternbild Schütze. Bei den beiden „Hörnern“ handelt es sich um Protosterne, die durch den Vorbeiflug an massereichen Sternen innerhalb der Wolke aus dem Sternentstehungsgebiet hinaus katapultiert wurden.

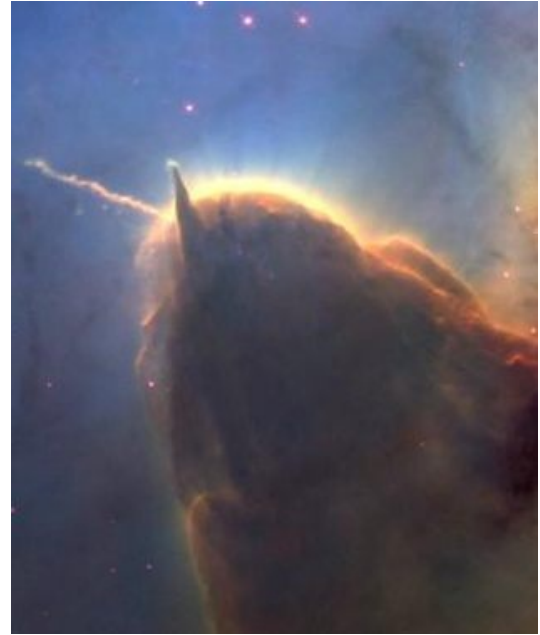


Abbildung 73: Protosterne, die aus ihrem Entstehungsgebiet herausgeschleudert wurden

Die Abbildung 75 zeigt eine Infrarotaufnahme. Hier hat sich die Wolke in zwei Zentren verdichtet: Auf hochauflösenden Fotos sieht man zwei Protosterne, die dort zusammen entstanden sind. Die Protosterne befinden sich etwa in Stadium 5-6. Sie kreisen umeinander und entwickeln sich zu einem Doppelsternsystem.

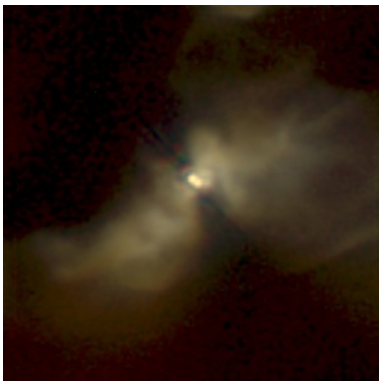


Abbildung 75: Infrarotaufnahme eines entstehenden Doppelsternsystems

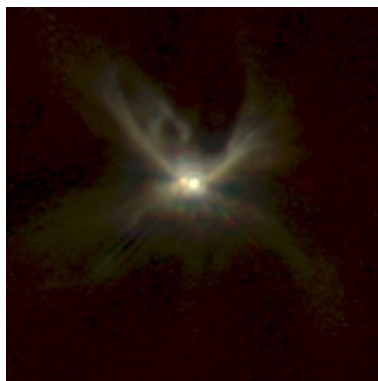


Abbildung 76: Aufnahme im sichtbaren Licht von einem Doppelstern, der seine Entwicklung gerade abgeschlossen hat

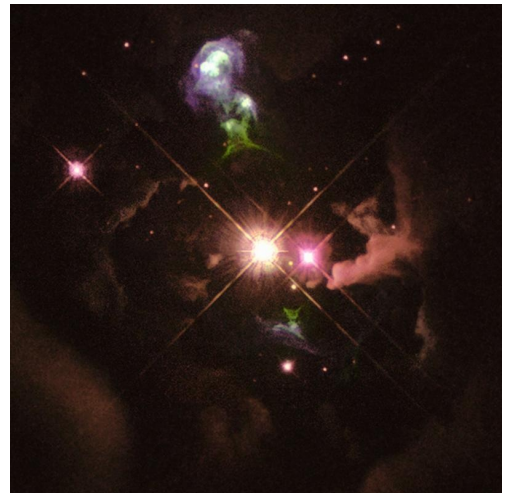


Abbildung 74: Neu entstandener Stern

Abbildung 76 zeigt die Aufnahme eines anderen, weiter entwickelten Doppelsternsystems. Die im sichtbaren Licht fotografierten Sterne haben ihre Entwicklung gerade abgeschlossen. Sie leuchten aufgrund von Kernfusionsprozessen im Innern.

Die Abbildung 74 zeigt einen fertig entwickelten Stern. Der vom Stern kommende Teilchenwind hat große Teile der umgebenen Wolkenstrukturen bereits weggeblasen; zu sehen sind daher nur noch Reste der Wolke, in der auch der Stern entstanden ist.

3.2.2 Kernfusion und die Entwicklung zum stabilen Stern

Die Trennung zweier sich anziehender, verbundener Teilchen benötigt Energie. Dagegen wird Energie freigesetzt, wenn sich zwei anziehende Teilchen verbinden.

Bei der Kernfusion verbinden sich unter hoher Temperatur mehrere Atomkerne miteinander. Sie verschmelzen (*fusionieren*) zu einem größeren und schwereren Kern.

Dabei muss man sowohl die elektrostatischen Kräfte als auch die starke Kernkraft berücksichtigen: Atomkerne sind positiv geladen. Da die elektrostatischen Kräfte eine unendliche Reichweite haben, stoßen sich zwei Atomkerne für beliebig große Abstände ab.

Zwischen Atomkernen wirkt ab einem Abstand von ca. 10^{-15} Metern *zusätzlich* die starke Kernkraft. Die starke Kernkraft ist hundert mal stärker als die elektrostatischen Kräfte und wirkt anziehend. Insgesamt stoßen sich die Atomkerne daher für größere Abstände ab und ziehen sich für Abstände kleiner 10^{-15} Metern an.

Diese 10^{-15} Meter Abstand müssen also unterschritten werden. Erst dann können sich die Kerne aufgrund anziehender Kräfte miteinander verbinden.

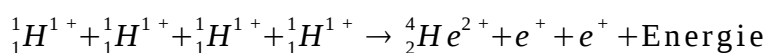
Wegen sehr großer Temperaturen in den Zentren von Sternen, bewegen sich (mikroskopisch betrachtet) die Atomkerne im Plasma sehr schnell. Sie bewegen sich so schnell, dass die schnellsten unter ihnen, bei einem Zusammenprall mit anderen Kernen, die durch die elektrostatischen Kräfte bedingte Abstoßung überwinden, und somit der Abstand zwischen den Kernen den kritischen Abstand von 10^{-15} Metern erreicht, bei dem die starke Kernkraft zu wirken beginnt: Die *beiden* Atomkerne verbinden sich zu *einem* größeren Atomkern. Dabei werden große Energiemengen freigesetzt.

Das Wasserstoffbrennen

Die Gas- und Staubwolken, aus denen junge Sterne entstehen, bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff. Das Plasma eines jungen Sterns besteht also hauptsächlich aus Wasserstoffatomkernen und Elektronen.

In diesem Stadium verschmelzen in dem Stern ausschließlich Wasserstoffkerne miteinander. Diesen Vorgang nennt man *Wasserstoffbrennen*. Es handelt sich hierbei um eine spezielle Form der Kernfusion.

Beim Wasserstoffbrennen verschmelzen über mehrere Stationen vier Wasserstoffkerne ${}^1_1\text{H}^{1+}$ zu einem Heliumkern ${}^4_2\text{He}^{2+}$. Hier die Stationen zusammengefasst:



e^+ bezeichnet ein Positron, das Antimaterieteilchen des Elektrons. In der Illustration (Abb. 77) wird der Vorgang der Kernfusion noch einmal anschaulich dargestellt:

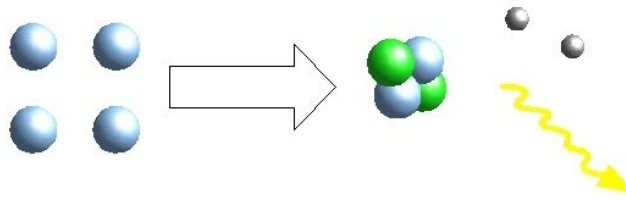
Illustration: Fusion von Wasserstoffkernen

Abbildung 77: Fusion von vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern

Bemerkung: Die Protonen (= Wasserstoffkerne) sind in der Illustration blau, die Neutronen grün und die Positronen grau eingefärbt. Die abgesandte Energie wird durch den welligen Pfeil symbolisiert. In Wirklichkeit besitzen diese Teilchen keine definierbare Farbe; sie dient nur zur besseren Unterscheidbarkeit.

Im obigen Kernfusionsprozess wandeln sich je zwei positiv geladene Protonen in neutrale Neutronen um und geben dabei ihre positive Ladung durch die entstehenden Positronen ab.

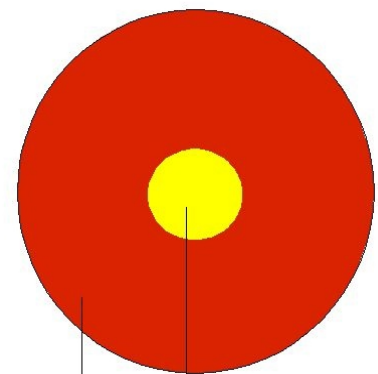
Die Positronen stoßen unmittelbar nach ihrer Entstehung mit Elektronen in ihrer Umgebung zusammen und zerstrahlen. D.h., die beiden Teilchen löschen sich unter Abstrahlung von Energie gegenseitig aus.

Wichtig ist: Durch die bei diesen Fusionsprozessen freiwerdende Energie erlangt der Stern ein physikalisches Gleichgewicht zwischen dem nach innen wirkenden Gravitationsdruck und dem nach außen wirkenden Gasdruck. Dafür muss die Bedingung erfüllt sein, dass im Sterninneren genauso viel Energie durch Kernfusion entsteht, wie über die Oberfläche durch Wärmestrahlung abgestrahlt wird.

Die Phase des Wasserstoffbrennens ist die Phase, in der ein Stern am längsten verweilt. Das Wasserstoffbrennen selbst findet bei einem durchschnittlichen Stern nur in einem Bereich um sein Zentrum herum statt - nur dort erreichen Druck und Temperatur die zum Wasserstoffbrennen erforderliche Größe. In der umliegenden Hülle finden keine Fusionsprozesse statt.

Unsere Sonne befindet sich seit über vier Milliarden Jahren in der Phase des Wasserstoffbrennens.

Aufgrund der Fusionsprozesse gibt es in einem Stern im Laufe seines Lebens immer weniger Wasserstoff und immer mehr Helium. Die Frage, die wir im nächsten Abschnitt beantworten, ist: Was passiert, wenn der Wasserstoffvorrat eines Sterns zuneigeht?

Sternaufbau in der Frühphase

Wasserstoff-Brennzzone

Hülle

Abbildung 78: Sternaufbau Frühphase

3.3 Die weitere Entwicklung eines Sterns

Die weitere Entwicklung eines Sterns hängt ganz entscheidend von seiner Masse ab:

Sterne mit geringer Masse (0,08 bis 0,26 Sonnenmassen)

Weil in Sternen mit geringer Masse (ca. 0,08 bis 0,26 Sonnenmassen) die heißen Kernfusionsprozesse nur in einem sehr engen Bereich um das Zentrum des Sterns ablaufen, entsteht vom Zentrum des Sterns bis zu seiner Oberfläche ein starkes Temperaturgefälle.

Ähnlich wie bei einem Heizkörper in einem Raum, haben wir also ein heißes Zentrum des Sterns und eine kältere Umgebung: Es kommt zu Konvektionsströmungen, die die Wärme nach außen hin abtransportieren.

Tief im Zentrum des Sterns fusionieren vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern. Aufgrund der Konvektionsströme wird das Helium im ganzen Stern verteilt. Genauso gelangen aufgrund dieser Strömungen die Wasserstoffkerne aus der Sternhülle in die zentralen Bereiche, in denen die Kernfusion stattfindet. Auf diese Weise verringert sich der Wasserstoffanteil des Sterns gleichmäßig über sein gesamtes Volumen verteilt - und der Heliumanteil steigt entsprechend.

Nach einiger Zeit ist der Wasserstoffvorrat des Sterns aufgebraucht: Er besteht jetzt vollständig aus Heliumkernen und Elektronen. Für die Kernfusion von Heliumkernen reicht der Druck und die Temperatur in einem kleinen Stern nicht aus.

Mit dem Zuneigegehen des Wasserstoffs erlischt der Stern: Er kühlt ab und schrumpft infolgedessen auf eine Minimalgröße. Zunächst leuchtet er noch als **Weißer Zwerg**. Doch mit der Zeit kühlt er weiter ab, bis er in der Form eines dunklen sogenannten **Schwarzen Zwerges** sein Ende findet⁴.

Sterne mit mittlerer Masse (0,26 - 2,5 Sonnenmassen)

Im Gegensatz zu Sternen kleinerer Masse ist in Sternen mittlerer Masse der Bereich, in dem das Wasserstoffbrennen stattfindet, deutlich ausgedehnter. Jedoch gibt es innerhalb solcher großer Fusionsbereiche keine großen Temperaturschwankungen: Die Temperaturen sind dort überall etwa gleich hoch.

Folglich treten innerhalb der Fusionsbereiche keine oder nur sehr geringe Konvektionsströme auf. Die Ströme führen kaum zu einem Austausch von Materie zwischen dem Fusionsbereich und der umliegenden Hülle des Sterns. Die bei dem Wasserstoffbrennen entstehenden Heliumkerne gelangen nicht aus den zentralen Bereichen heraus, sondern konzentrieren sich dort immer weiter.

Der Anteil der Heliumkerne im Fusionsbereich steigt, während der Anteil der Wasserstoffkerne sinkt. Da es immer weniger Wasserstoffkerne gibt, flauen die Fusionsreaktionen langsam ab. Temperatur und Druck reichen für eine Fusion von Heliumkernen noch nicht aus. Durch das Zuneigegehen der Wasserstoffkerne im Fusionsbereich endet das Wasserstoffbrennen - und das, obwohl um

⁴ *Bemerkung:* Eine Antwort auf die Frage „Weshalb hört der Stern plötzlich auf zu schrumpfen, obwohl der Gravitationsdruck weiter besteht?“ gibt der durch die Unschärferelation bedingte Entartungsdruck der Elektronen. Darauf wird hier jedoch nicht näher eingegangen, da ein tieferes Verständnis der Quantentheorie benötigt wird.

diesen ausgebrannten Fusionsbereich herum noch genügend Wasserstoff existiert. Aufgrund fehlender Konvektion gelangt es nicht in den Fusionsbereich hinein und kann zum Fusionsprozess nichts beitragen.

Wenn in den Fusionsbereichen kein Wasserstoffbrennen mehr stattfindet, entsteht im Innern des Sterns keine neue Wärmeenergie: Der Gasdruck im Stern sinkt. Der Gravitationsdruck nimmt wieder Überhand, und der Stern kontrahiert.

Durch die fortlaufende Kontraktion erhöht sich die Temperatur im Sterninneren nach und nach. Und zwar so weit, bis Druck und Temperatur in den schalenförmigen Bereichen um der ausgebrannten Zone herum eine Größe erreichen, die ausreicht, um die Kernfusion mit den dort noch vorhandenen Wasserstoffkernen in Gang zu setzen. Dieses Stadium nennt man Wasserstoff-Schalenbrennen (vgl. Abbildung 79).

Sternaufbau: Wasserstoff-Schalenbrennen

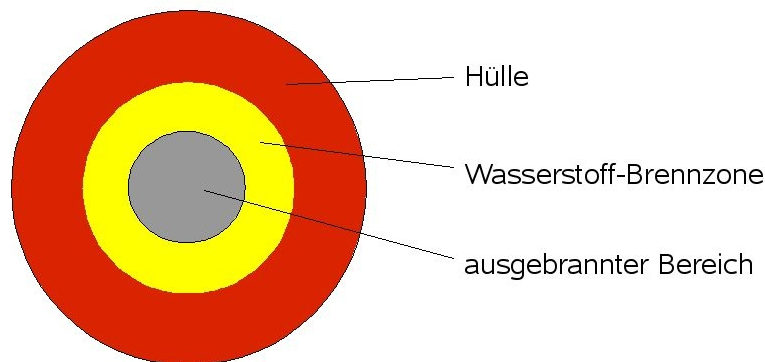


Abbildung 79: Wasserstoff-Schalenbrennen

Beim Wasserstoff-Schalenbrennen werden in der Brennzone Wasserstoffkerne zu Heliumkernen fusioniert. Die Heliumkerne sinken aufgrund ihrer größeren Masse in den ausgebrannten Bereich ab. Dieser vergrößert sich dadurch und die Schale des Wasserstoffbrennens entfernt sich immer weiter vom Zentrum des Sterns.

Mit der Zeit erhöhen sich Druck und Temperatur in den ausgebrannten Helium-Bereichen derart, dass die zur Fusion von Helium-Kernen benötigte Größe erreicht wird. Dabei verbinden sich unter Abgabe großer Energiemengen drei Heliumkerne zu einem Kohlenstoffkern.

Nach Zünden der Helium-Fusionsprozesse entstehen in dem Stern nicht nur in der Wasserstoff-Brennzone, sondern *zusätzlich* auch in den ehemals ausgebrannten Bereichen große Energiemengen. Die Temperatur im Sterninneren steigt, der Gasdruck steigt mit der Temperatur.

Aufgrund des nun viel größeren, nach außen gerichteten Gasdruckes bläht sich der Stern um ein Vielfaches seiner ursprünglichen Größe auf. Er wird zum

Roten Riesen. Auch unsere Sonne wird sich (in ca. 4,5 Mrd Jahren), nachdem der Wasserstoff in ihr zur Neige gegangen sein wird, zu einem Roten Riesen aufblähen. Ihr Radius wird etwa den Radius der Erdbahn erreichen, die Erde wird aufgrund der hohen Tempe-

Sternaufbau: Helium-Schalenbrennen

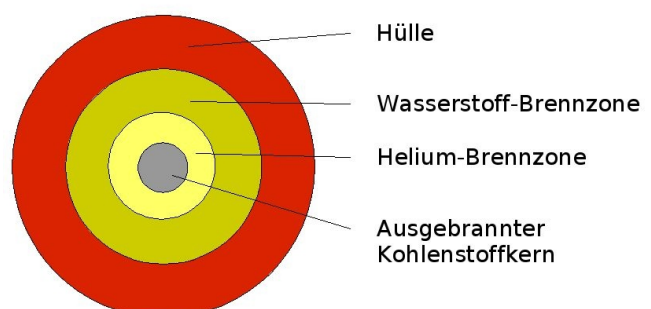


Abbildung 80: Helium-Schalenbrennen

raturen verdampfen. Spätestens hier ist dem menschlichen Leben auf der Erde ein natürliches Ende gesetzt.

Nach einiger Zeit geht das Helium in den zentralen Bereichen des Sterns aus. Zurück bleibt Kohlenstoff, der wegen des zu niedrigen Druckes und der zu niedrigen Temperatur nicht fusioniert. Reicht die Masse des Sterns aus, findet das "Helium-Brennen", ähnlich wie das Wasserstoffbrennen, in einer Schale um den Kohlenstoffbereich des Sterns statt (vgl. Illustration in Abbildung 80). Dies sorgt für eine instabile Konfiguration: Der Kohlenstoffbereich hat eine große Massendichte. Zudem entsteht hier keine neue Wärmeenergie, da im Kohlenstoffbereich keine Fusionsprozesse mehr stattfinden. Gleichzeitig findet jedoch in den Schalen um diesen Bereich herum noch Helium- und Wasserstoffbrennen statt, wodurch die Brennschalen um den ausgebrannten Bereich herum aufgeheizt werden.

Insgesamt kontrahiert der zentrale Kohlenstoff-Bereich, die Brennschalen und die darüber liegenden Hüllen expandieren: Der Stern stößt seine Hülle ab und zurück bleibt ein kohlenstoffreicher Kern des Sterns, in dem jegliche Fusionsprozesse erloschen sind.

Wie bei den Sternen mit geringer Masse kontrahiert dieses Überbleibsel so lange, bis der „Entartungsdruck der Elektronen“ dem Gravitationsdruck die Waage hält:

Den zunächst weiß glühenden "Stern" nennt man - wie eben - **Weißer Zwerg**.

Die durch die abgestoßenen Hüllen gebildeten nebelartigen Objekte, wie etwa den Ringnebel in der Leier, nennt man **Planetarischen Nebel**.

Ringnebel in der Leier

Ein Stern, der seine Hülle vor etwa 20.000 Jahren abgestoßen hat, lässt sich im Sternbild Leier beobachten:

Die in der Abbildung 81 zu sehende ringförmige Struktur war einmal die Hülle des Sterns, der (auf hoch aufgelösten Fotos) im Zentrum des Ringes noch als Weißer Zwerg zu erkennen ist.

Der Zwergstern strahlt noch so hell, dass er die umliegende Hülle zum leuchten anregt. In ihm sind jedoch jegliche Fusionsprozesse erloschen. Im Laufe der Jahrtausende wird er immer dunkler, bis er überhaupt nicht mehr zu sehen ist.

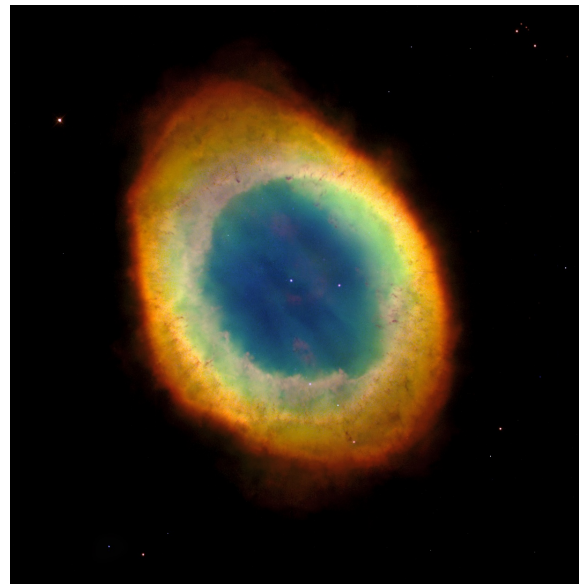


Abbildung 81: Der Planetarische Nebel M57

Die Gashülle breitet sich mit einer Geschwindigkeit von 19 km/s aus. Man kann sie bereits in einem mittelgroßen Teleskop sehen. Im Messierkatalog handelt es sich hier um M57.

Weißer Zwerg: Sirius B

Der von der Erde aus hellste Stern - Sirius A - dreht sich zusammen mit einem Weißen Zwerg um die gemeinsame Achse.

Das nebenstehende NASA-Foto zeigt den hellen Stern Sirius A sowie seinen Begleiter, den Weißen Zwerg Sirius B. Hier existiert jedoch kein Planetarischer Nebel: Die abgestoßene Hülle von Sirius B wurde nach und nach von Sirius A aufgesogen.

Die Masse von Sirius B liegt in der Größenordnung von der der Sonne - der Durchmesser des Zwerges ist jedoch nicht größer als der der Erde.

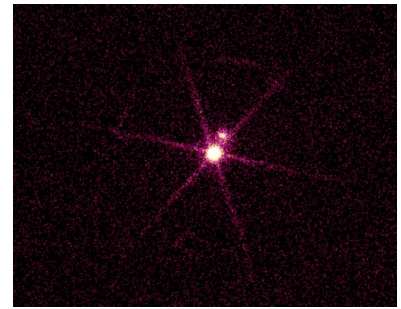


Abbildung 82: Sirius A und B

Sterne mit großer Masse (>2,5 Sonnenmassen)

Die Masse mittelgroßer Sterne und damit der Druck und die Temperatur im Sterninnern reicht nicht aus, um die Kohlenstoff-Fusion zu zünden. Bei massereichen Sternen ab 2,5 Sonnenmassen ist das jedoch der Fall: Kohlenstoffatome fusionieren (unter Abgabe eines Alphateilchens) zu einem Neonatom.

Je nachdem, wie groß die Masse des Sterns ist, setzt sich die Fusionskette⁵ über Sauerstoff, Silizium, u.s.w. bis zum Eisen fort. Nebenprodukte dieser hier sehr stark zusammengefassten Fusionsprozesse sind alle anderen Elemente bis zum Eisen.

Doch beim Eisen hört die Fusionskette auf: Bei der Fusion der oben genannten Elemente entsteht stets mehr Energie, als für die "Anregung" der Fusion benötigt wird. Der Teil der Energie, der nicht zur Anregung weiterer Fusionsprozesse benötigt wird, erhöht die Temperatur des Fusionsbereiches so weit, bis sich der damit zusammenhängende (nach außen gerichtete) Gasdruck mit dem nach innen gerichteten Gravitationsdruck die Waage hält.

Ab dem Eisen wird für die Anregung der Fusion dieser Elemente mehr Energie benötigt, als bei den Fusionsprozessen frei wird. Daher findet ab dem Element Eisen keine Kernfusion mehr statt: Die dazu nötige Energie kann nicht aufgebracht werden (d.h. eine solche Reaktion wäre endotherm).

Alle Elemente, die wir *auf der Erde* kennen, entstanden in den Sternen durch die beschriebenen Fusionsprozesse aus Wasserstoff. Die Materie wurde über Sternexplosionen (mehr dazu im Laufe dieses Kapitels) aus den Sternen hinausgeschleudert. Die Erde ist (zusammen mit dem Rest des Sonnensystems) aus solchen Sternen-Überbleibsel entstanden.

Innerhalb eines sehr massereichen Sterns entwickelt sich im Laufe weniger Millionen Jahre eine so genannte Zwiebelschalenstruktur: Vom Zentrum des Sterns hin zu den Außenbereichen fusionieren immer "leichter" werdende Elemente in den entsprechenden Brennschalen (vgl. Illustration in Abbildung 83).

5 Wegen der zunehmenden Komplexität der Fusionsprozesse wird hier nicht näher auf Details eingegangen.

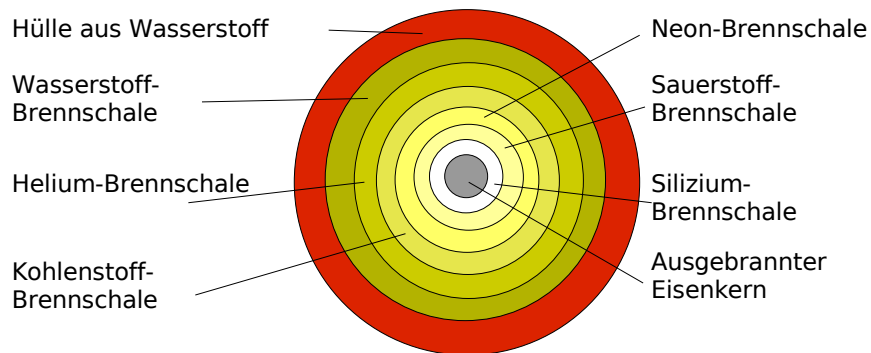
Illustration: Zwiebelschalenstruktur

Abbildung 83: Zwiebelschalenstruktur in der Spätphase massereicher Sterne

In diesem Entwicklungsstadium sind große Teile des Sterns in den Fusionsreaktionen mit einbezogen. Der Stern befindet sich daher im weit aufgeblähtem Zustand. Man nennt in der Astronomie solche sehr weit aufgeblähten Sterne auch **(Rote) Überriesen**.

Je nach Masse des Sterns, kann er auch schon vor dem Siliziumbrennen zum Überriesen anwachsen.

Der Stern Beteigeuze (α Ori) ist ein solcher Roter Überriese. Sein Durchmesser wird auf bis zu 480 000 000 km geschätzt - das ist der über 300-fache Sonnendurchmesser. Mit den besten Teleskopen lässt sich Beteigeuze als einer von wenigen Sternen flächenmäßig auflösen - die meisten anderen Sterne erscheinen in den besten Teleskopen bloß punktförmig. Abbildung 84 zeigt ein Foto vom Hubble-Space-Teleskope. Eingezeichnet ist ein Größenvergleich zwischen dem Durchmesser von Beteigeuze, dem Radius der Erdumlaufbahn sowie der Umlaufbahn des Jupiter.

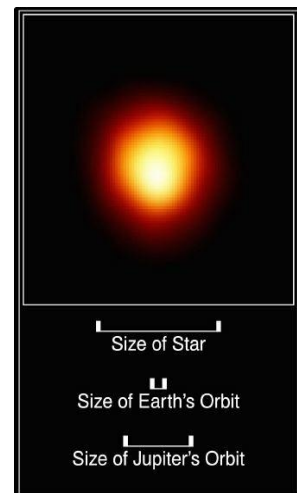


Abbildung 84: Beteigeuze

Aufgrund des hohen Druckes im Sterninnern laufen die Fusionsreaktionen bei massereichen Sternen sehr schnell ab. Bei einem Stern mit 25 Sonnenmassen dauert das Siliziumbrennen beispielsweise nur ein halbes Jahr.

Die unterschiedlichen Brennschalen sorgen für eine instabile Konstellation. So schwanken einige Sterne in ihrem Durchmesser um bis zu 50%. Bei vielen Sternen kommt es zu starken Materieauswürfen.

Hören die Reaktionen in der Silizium-Brennschale auf, erhöht sich der Druck auf den ausgebrannten Eisenkern, bis dort die Elektronen in die Protonen hineingedrückt werden. Bei diesem Vorgang schrumpft dieser ausgebrannte Kern bis auf eine minimale Größe herab. In einem Stern, bei dem der Eisenkern beispielsweise eine Masse von vier Sonnenmassen besitzt, schrumpft dieser auf eine Größe von nur 10 Kilometern Durchmesser. Bei der Materie handelt es sich dann auch nicht mehr um Eisen-Plasma, sondern um Neutronen in der dichtesten Packung.

Das Schrumpfen des ausgebrannten Zentrums des Sterns wird bei dieser Minimalgröße abrupt aufgrund des so genannten Entartungsdrucks der Neutronen gestoppt. Die Sternmaterie, die im Zuge des Schrumpfens auf das Sternzentrum fällt, prallt auf den Neutronen-Kern des Sterns und verursacht dadurch

eine Rückstoßwelle, die sich mit 50.000 km/s radial vom Zentrum weg durch den Stern ausbreitet. Die Rückstoßwelle sorgt lokal für einen großen Druckzuwachs. Dadurch werden die Fusionsreaktionen mit einem Schlag angeheizt: Der Stern sprengt einen großen Teil der dem Zentrum umgebenen Materie ab, er explodiert.

Die dabei frei werdende Energie sorgt für einen sprunghaften Anstieg der Leuchtkraft des Sterns auf den milliardenfachen Wert der ursprünglichen Leuchtkraft. Astronomen bezeichnen dieses Phänomen als **Supernova-Explosion**.

Dabei kann ein auf diese Weise explodierender Stern für kurze Zeit so hell wie eine ganze Galaxie erleuchten:

In Abbildung 85 sehen wir die mehrere dutzend Milliarden Sterne zählende Galaxie NGC 4526. Links unten findet das Leben eines dieser Sterne in Form einer Supernova-Explosion sein Ende.



Abbildung 85: Supernova in NGC 4526

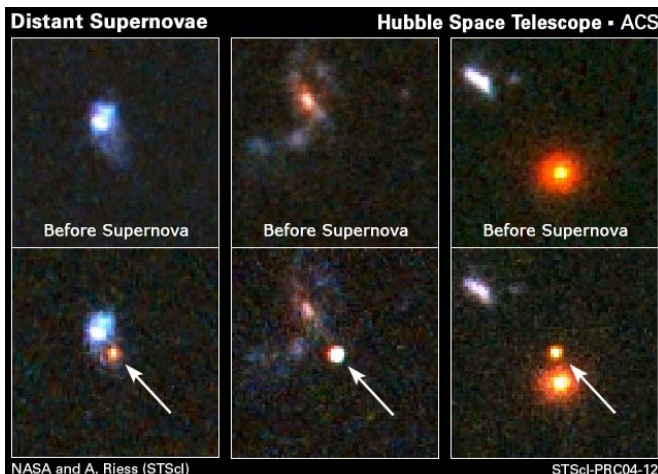


Abbildung 86: Supernovae in verschiedenen Galaxien. Die oberen Fotos zeigen die jeweilige Galaxie vor, die unteren während der Supernova-Explosion eines Sterns.

In Abbildung 86 befinden sich

weitere Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble: Die obere Reihe zeigt drei Galaxien, wie sie in der Regel aussehen. In den unteren Aufnahmen sieht man zusätzlich die Leuchterscheinungen einer Supernova.

Nachdem der Stern einen großen Teil seiner Hülle abgesprengt hat, bleibt der Neutronen-Kern des ursprünglichen Sterns übrig: Dieses Überbleibsel nennt man **Neutronenstern**. Ein Neutronenstern besteht zu einem

großen Teil aus Neutronen und besitzt die gleiche Massendichte wie Atomkerne: 10^{16} kg/m^3 .

Materie, die weder abgesprengt wurde, noch zum Neutronenstern gehört, regnet nach und nach auf den Neutronenstern ab. In einem Neutronenstern wirkt der Entartungsdruck der Neutronen dem Gravitationsdruck entgegen und verhindert so ein weiteres Zusammenfallen der Materie. Ist die Masse der nach der Supernova-Explosion übrig gebliebenen Materie größer als acht Sonnenmassen, überwindet der Gravitationsdruck den Entartungsdruck. Jetzt gibt es keine Kraft mehr, die den gravitativ bedingten Kollaps der Materie noch aufhalten könnte:

Die gesamte vom Stern übrig gebliebene Materie zieht sich - theoretisch - auf einen einzigen Punkt zusammen: Ein **Schwarzes Loch** ist entstanden.

Eta Carinae

Dieses von Hubble aufgenommene Bild zeigt einen etwa 10.000 LJ entfernten Stern. Eta Carinae besitzt eine Masse, die 100 bis 150 mal größer ist als die Masse unserer Sonne. Aufgrund dieser Masse kommt es zu enormen Instabilitäten: So kam es in der Vergangenheit mehrfach zu heftigen Materieauswürfen. Diese verursachten den im Bild sichtbaren Nebel.

Große, unregelmäßige Helligkeitsschwankungen sprechen dafür, dass sich Eta Carinae innerhalb der nächsten 2000 Jahre im Rahmen einer Supernova-Explosion sprengt.

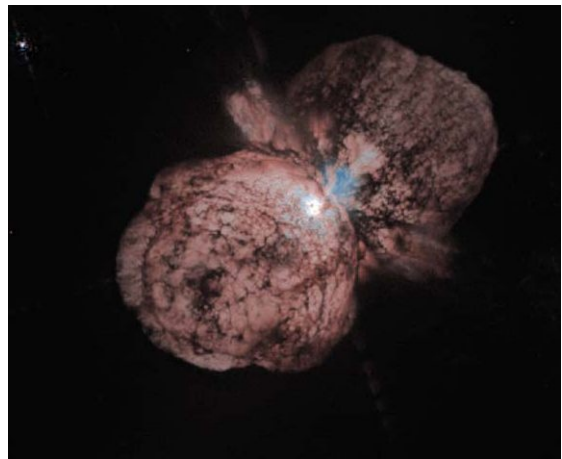


Abbildung 87: Eta Carinae

3.3.1 Schwarze Löcher

Wie eben geschildert, entstehen Schwarze Löcher durch kollabierende, d.h. in sich zusammenfallende Materie. Die Materie zieht sich hier - theoretisch⁶ - auf einen einzigen Punkt zusammen. Diesen Punkt nennt man **Singularität**.

Um Schwarze Löcher vom physikalischen Standpunkt her ausreichend verstehen zu können, benötigt man Kenntnisse aus allen Bereichen der Physik. Darauf können wir hier leider nicht eingehen. Deshalb werden im Folgenden nur Beobachtungen geschildert, die tatsächlich gemacht wurden, und die als Grundlage für ein qualitatives Verständnis von Teilaspekten der Schwarzen Löcher dienen.

Gravitation lenkt das Licht ab.

Dies hat man zum ersten mal am 29. Mai 1919 bei der Beobachtung einer Sonnenfinsternis nachgewiesen: Zwei Sterne, die am Himmel in der Nähe der Sonne beobachtet wurden, veränderten während der Sonnenfinsternis leicht ihre Position.

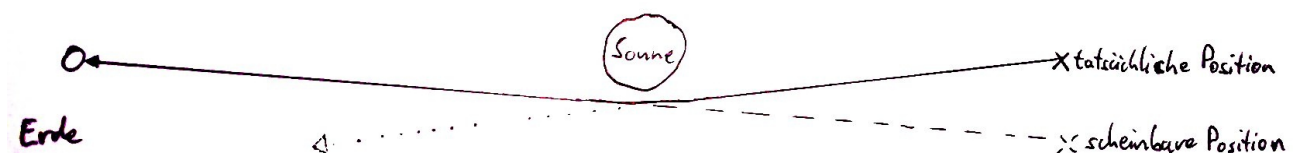


Abbildung 88: Lichtbeugung durch Gravitationseinfluss

In der Skizze in Abbildung 88 wird der Vorgang der Einfachheit halber nur an einem Stern illustriert: Der Weg des Lichtes vom Stern zum Beobachter auf der Erde wird durch den eingezeichneten Lichtstrahl dargestellt. Der gepunktete Strahl gibt den Verlauf des Lichtes wieder, wenn man *keine* Ablenkung annimmt. Tatsächlich aber wird das Licht durch die Sonne abgelenkt:

Für den Beobachter auf der Erde scheint der Weg des Lichtes entlang der ge-

⁶ Hinweis: Die Frage nach der Existenz von Singularitäten ist bis heute umstritten. Genau genommen lassen sich über das Innere eines Schwarzen Loches keine Aussagen machen, da aus einem Schwarzen Loch keine Informationen herausdringen können.

strichelten Linie zu laufen. Also scheint das Licht des Sternes aus einer anderen Richtung zu kommen, als dies tatsächlich der Fall ist. Folglich kommt es zu einer *scheinbaren* Verschiebung der Position des Sterns, wenn der Weg des von ihm ausgesandten Lichtes dicht an der Sonne vorbei verläuft.

Wir halten fest: Große Massen lenken vorbei laufendes Licht aufgrund ihrer Gravitation ab.

Schwarze Löcher sind nun - wie der Name schon sagt - schwarz, bzw. nicht direkt sichtbar. Wie kann man solche Objekte nun finden, wenn man sie nicht sieht?

Man weiß, dass bei Schwarzen Löchern eine große Masse auf einen kleinen Bereich konzentriert ist. Dabei sind, aufgrund der großen Masse, die Gravitationskräfte auf einen Körper in der Nähe eines schwarzen Loches ungeheuerlich. Dementsprechend erwartet man in der Nähe von Schwarzen Löchern eine starke Ablenkung des Lichtes, wenn es dicht an diesen vorbei läuft. Um Schwarze Löcher zu finden, die durch das All wandern, muss man also nach Lichtablenkungen suchen.

1996 wurde die NASA in einem besonders eindrucksvollen Fall fündig (vgl. Abbildung 89):

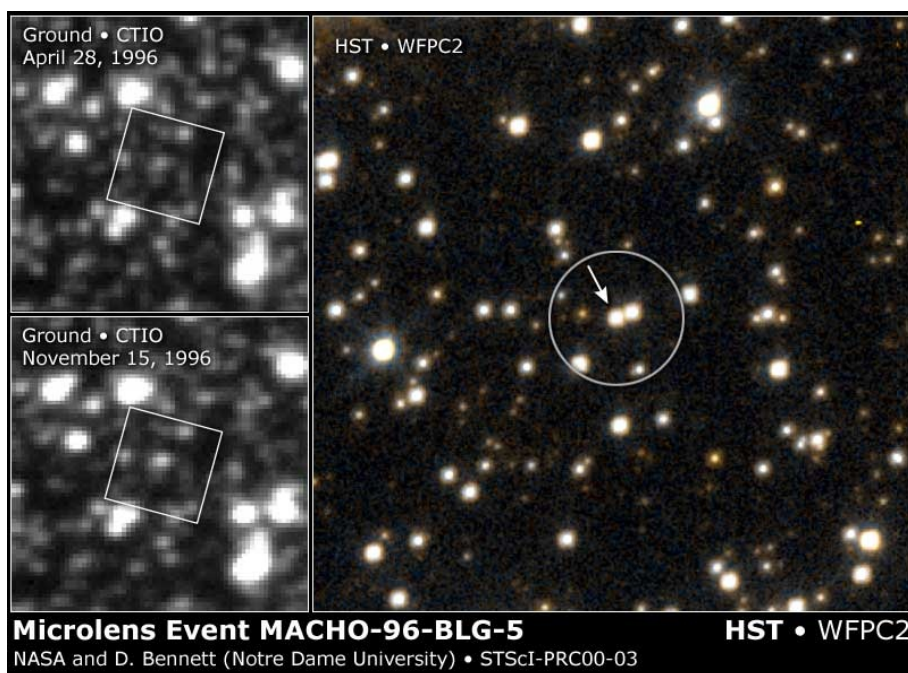


Abbildung 89: Entdeckung eines schwarzen Loches

Die linken Fotos wurden am CTIO in Chile aufgenommen. Dort stellte man in einem Bereich des Sternenhintergrundes an einem Punkt eine deutliche Helligkeitsänderung zwischen den Aufnahmen im April und den Aufnahmen im November des Jahres fest. Daraufhin ließ man den entsprechenden Bereich des Sternenhintergrundes noch einmal genauer durch das Hubble-Teleskop ablichten (vergrößerte rechte Aufnahme).

Auf die Stelle der Helligkeitsänderung zeigt der Pfeil. Man sieht auf den ersten Blick nichts besonderes: Zwei Sterne, die auf dem Foto sehr dicht beisammen stehen. Eine genaue spektrale Analyse des Lichtes der beiden Sterne liefert jedoch ein erstaunliches Ergebnis: Die beiden Sterne, die man sieht, sind in Wirklichkeit ein und derselbe Stern. Doch wie geht das, dass man an zwei verschie-

denen Stellen ein und denselben Stern sieht?

Dies lässt sich durch eine Lichtablenkung an einem sehr massereichen Objekt erklären, welches zudem selbst kein Licht aussendet: Ein Schwarzes Loch.

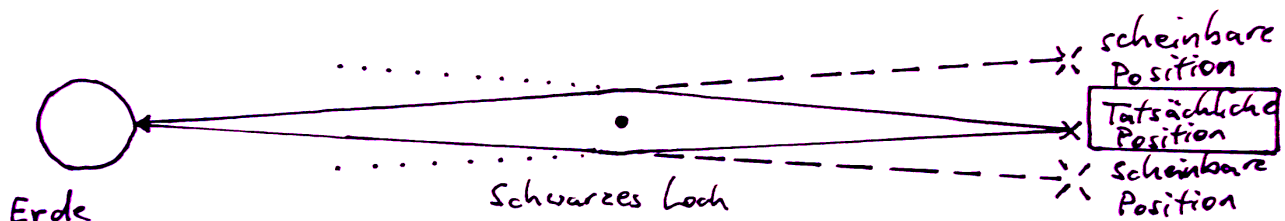


Abbildung 90: Gravitationslinseneffekt durch Lichtbeugung

Das Licht, welches unter normalen Umständen den gepunkteten Verlauf nehmen würde, wird durch das schwarze Loch, welches sich zwischen Erde und Stern schiebt, umgebogen und auf die Erde gelenkt. Von der Erde aus gesehen scheint das Licht entlang der gestrichelten Linie zu kommen und damit von zwei verschiedenen scheinbaren Positionen auszugehen.

Isolierte Schwarze Löcher, wie im obigen Foto, sind nur sehr schwer zu finden. Denn dazu muss das Schwarze Loch direkt zwischen einem Stern und der Erde stehen, was nur äußerst selten und nur für einen beschränkten Zeitraum der Fall ist.

Daher sucht man hauptsächlich Schwarze Löcher in der Gegenwart von Materie: Verschlingt ein Schwarzes Loch (aufgrund der Gravitation) Materie (etwa von einem Stern), so sendet es hochenergetische Röntgenstrahlen aus.

Also sucht man von der Erde aus gezielt nach solchen Röntgenstrahlen-Quellen und untersucht die gefundenen Objekte, ob es sich dabei um Schwarze Löcher handeln kann.

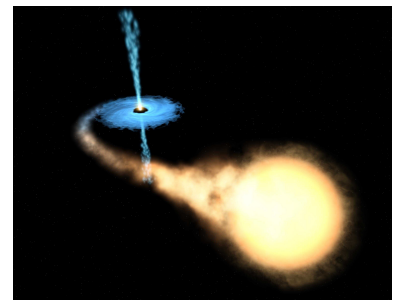


Abbildung 91: Stern in der Nähe eines Schwarzen Loches

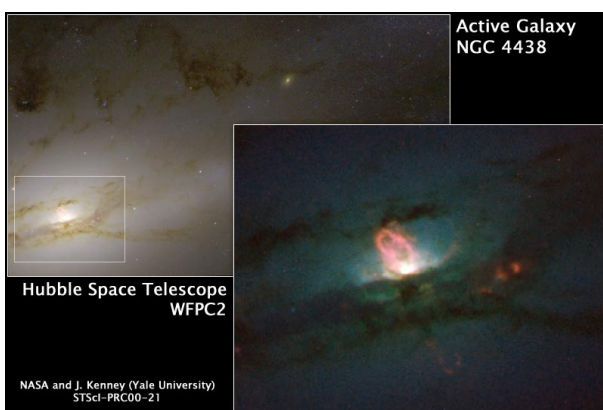


Abbildung 92: Supermassives Schwarzes Loch in NGC 4438

Eine Röntgenquelle befindet sich beispielsweise im Zentrum der Galaxie NGC 4438 (vgl. Abbildung 92). Hier vermutet man ein supermassives Schwarzes Loch.

Auch im Zentrum unserer Galaxie, der Milchstraße, werden Schwarze Löcher vermutet. Leider können wir das Zentrum der Milchstraße nicht direkt einsehen, da Dunkelwolken die Sicht versperren. Über Radio- und Röntgenstrahlen, die diese Wolken durchdringen können, kommt man jedoch zur Kenntnis, dass sich im Zentrum der Milchstraße zehnbis zwanzigtausend Schwarze Löcher aufhalten. Das größte von ihnen wird auf 2,6 bis 4 Millionen Sonnenmassen geschätzt.

Zum Glück sind wir in unserem Sonnensystem rund 26000 Lichtjahre vom Zentrum der Milchstraße entfernt, wir müssen also nichts befürchten.

3.4 Besondere Sterne und Sternsysteme

3.4.1 Doppel- und Mehrfachsternsysteme

Als *Doppelstern* bezeichnet man zwei am Sternenhimmel sehr nahe stehende Sterne. Man unterscheidet zwischen optischen *Doppelsternen* und physischen *Doppelsternsystemen*.

Optische Doppelsterne:

Bei optischen Doppelsternen scheinen die Sterne am Nachthimmel zwar sehr nahe zu stehen, in Wirklichkeit liegen sie jedoch weit voneinander entfernt. Das liegt an der Tatsache, dass wir Menschen keine Tiefenwirkung für den Sternenhimmel empfinden. Daher können zwei Sterne, die zwar von der Erde aus gesehen sehr nahe zueinander stehen, unterschiedlich weit von der Erde (und damit weit von einander) entfernt sein, vgl. Illustration in Abbildung 93 a. Optische Doppelsterne stehen daher in keiner gravitativen Beziehung zueinander.

Physische Doppelsternsysteme:

Die Sterne (= Komponenten) eines physischen Doppelsternsystems liegen dagegen so nahe beieinander, dass sie durch die Gravitationskräfte aneinander gebunden sind (Abbildung 93 b): Sie kreisen umeinander, ähnlich, wie Mond und Erde umeinander kreisen.

Bei physischen Doppelsternen lassen sich leicht gegenseitiger Abstand und Massen der beiden Systemkomponenten bestimmen. Der Einfachheit halber werden künftig physische Doppelsternsysteme nur *Doppelsternsystem* genannt

Illustration: Optischer und physischer Doppelstern

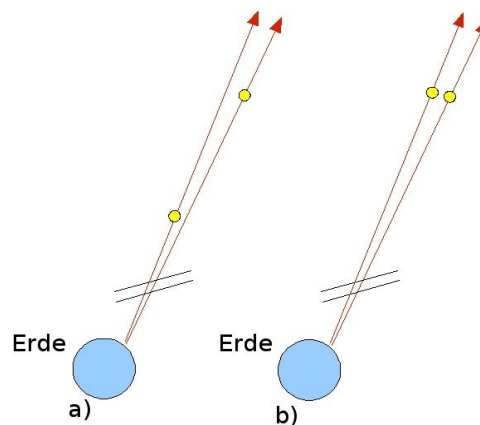


Abbildung 93: Veranschaulichung eines optischen (a) und physischen (b) Doppelsterns.

Ein **Mehrfachsternsystem** nennt man eine Gruppe von Sternen, die gravitativ miteinander wechselwirken. Ein bekanntes, mit bloßem Auge sichtbares Mehrfachsternsystem ist ϵ Lyr. Es handelt sich hierbei um zwei physische Doppelsternsysteme, die wiederum um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen.

Etwa 60 - 80% der Sterne unserer Galaxie sind Teil eines Doppel- oder Mehrfachsternsystems.

In Abbildung 94 sehen wir ein sehr schönes Beispiel eines Doppelsternsystems: Albireo (β Cyg) lässt sich bereits mit einem kleinen Fernglas gut beobachten.

Das System besteht aus einem hellen orange-roten Überriesen und einem jungen, blau leuchtenden Stern.



Abbildung 94: Doppelstern Albireo

3.4.2 Veränderliche Sterne

Beobachtet man detailliert den Sternenhimmel über einen Zeitraum von Stunden, Tagen oder Wochen hinweg, findet man Sterne, die starken Helligkeitsschwankungen unterworfen sind. Sterne, die hell aufleuchten, können nach einiger Zeit derart dunkel geworden sein, dass das menschliche Auge nicht mehr in der Lage ist, sie zu sehen. Anders herum können nach einiger Zeit an Stellen des Nachthimmels Sterne auftauchen, die zuvor kaum sichtbar waren.

Sterne, die ihre Helligkeit in absehbarer Zeit ändern, nennt man **veränderliche Sterne** - oder kurz: *Veränderliche*. Wie bei den Doppelsternen unterscheidet man zwischen zwei großen Gruppen: Den *optischen Veränderlichen* und den *physischen Veränderlichen*.

Optische Veränderliche:

Alle optischen Veränderlichen haben zwei Dinge gemeinsam:

1. Optische Veränderliche sieht man am Nachthimmel als einen einzigen Lichtpunkt. In Wirklichkeit handelt es sich aber um physische Doppelsternsysteme, bei denen die beiden Sterne so dicht beieinander stehen, dass sie mit unseren Mitteln von der Erde aus betrachtet nicht getrennt werden können. Die Tatsache, dass es sich um Doppelsterne handelt, folgt ausschließlich aus spektroskopischen Untersuchungen des Lichtes.
2. Die beiden Sterne kreisen aufgrund der Gravitation umeinander und zwar so, dass wir von der Erde aus seitlich oder leicht seitlich auf die Bahnebene des Doppelsternsystems schauen. Dadurch kommt es bei den meisten optischen Doppelsternen zu gegenseitigen Bedeckungen der Sterne, die die Helligkeitsschwankungen verursachen.

Die Zeit, die für einen Umlauf der Komponenten des Doppelsternsystems benötigt wird, nennt man Periodendauer. Innerhalb einer Periodendauer liegen in der Regel zwei Helligkeitsminima und -maxima.

Man unterscheidet folgende Klassen optischer Veränderlicher:

EA *Bedeckungsveränderliche vom Typ Algol:*

Bei diesem Typ Bedeckungsveränderliche handelt es sich um Doppelsterne, bei denen wir von der Erde aus seitlich auf die Bahnebene unter einem günstigen Winkel schauen, so dass es bei der Rotation der Sterne umeinander zu wechselseitigen Bedeckungen oder Teilbedeckungen der

Sterne kommt:

Wenn beispielsweise zwei gleich große Sterne nebeneinander stehen, wirkt der von der Erde aus gesehene Lichtpunkt heller, als wenn die beiden Sterne hintereinander stehen, da so die Licht abstrahlende, von der Erde aus sichtbare Fläche, nur halb so groß ist.

Da nicht alle Sterne gleich hell leuchten oder gleich groß sind, wird der von der Erde aus sichtbare Effekt noch deutlicher, wenn es sich bei dem einen Stern um einen sehr dunklen, bei dem anderen um einen sehr hellen Stern handelt. Bei der Bedeckung des sehr hellen Sternes durch den sehr dunklen kommt es zum sogenannten Hauptminimum.

Typischer Vertreter: Algol = β Per

maximale scheinbare Helligkeit:	2,12 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	3,39 mag
Periodendauer:	2,87 Tage

Im Mittelalter war man der Auffassung, der Sternenhimmel sei vollkommen und unveränderlich. Bei der Entdeckung der periodischen Veränderungen des Sternes β Per gab man ihm den Namen *Algol*, was soviel heißt wie *Dämonenstern*.

Algol lässt sich mit bloßem Auge Anfang Januar gegen 21 Uhr im Sternbild Perseus beobachten.

EB Bedeckungsveränderliche vom Typ β Lyrae:

Hier kreisen die beiden Sterne derart dicht umeinander, dass sie sich aufgrund der Gezeitenkräfte verformen. Die Sterne des Doppelsternsystems sind hier also nicht mehr kugelförmig, sondern haben eine ellipsoide Form.

Bei diesem Typ kommt es daher, neben einer Veränderung der Helligkeit aufgrund der Bedeckung einer Komponente, zu einem so genannten Rotationslichtwechsel: Die beiden Sterne umkreisen einander. Die Sterne haben eine ellipsoide Form; da die Sterne nun umeinander kreisen, sieht man die Sterne jeweils aus anderen Richtungen. Da sie nun nicht kugelförmig sind, ändert sich die von der Erde aus sichtbare Fläche eines Sterns. Die damit verbundenen Helligkeitsänderungen nennt man Rotationslichtwechsel.

Typischer Vertreter: β Lyr

maximale scheinbare Helligkeit:	3,25 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	4,36 mag
Periodendauer:	12,91 Tage

Bei diesem Doppelsternsystem wurde über eine Spektralanalyse ein Materiefluss von der einen Komponente zur anderen beobachtet. Dies spricht für große räumliche Nähe der beiden Sterne.

β Lyr lässt sich mit bloßem Auge im Juli gegen 22:30 Uhr beobachten.

EW *Bedeckungsveränderliche vom Typ W UMa:*

Die Effekte, die bei diesem Typ zur Veränderung der Helligkeit beitragen, sind dieselben wie bei EB. Nur, dass die Komponenten des Doppelsternsystems so dicht umeinander kreisen, dass sie sich berühren. Es kommt zu einem permanenten Gasaustausch zwischen den Komponenten des Systems. Zudem sind beide Sterne sehr stark ellipsoid geformt.

Die Periodendauern dieser Bedeckungsveränderlichen liegen ausnahmslos unter einem Tag.

Typischer Vertreter: W UMa:

maximale scheinbare Helligkeit:	7,75 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	8,46 mag
Periodendauer:	0,33 Tage

Hierbei handelt es sich um einen relativ schwer auffindbaren Stern. Er ist mit bloßem Auge nicht mehr sichtbar. Dafür kann man ihn in unseren Breiten das ganze Jahr über sehen. Besonders gut jedoch Ende April gegen 22 Uhr.

EII *Doppelsterne mit Rotationslichtwechsel:*

Bei diesen Sternen schauen wir von der Erde aus unter einem Winkel auf das Doppelsternsystem, unter dem sich die einzelnen Komponenten nicht mehr bedecken. Die Sterne stehen hier so nahe, dass sie sich aufgrund der Gezeitenkräfte stark verformen. Dabei kommt es zum Rotationslichtwechsel wie auch unter EB.

Typischer Vertreter: b Per:

maximale scheinbare Helligkeit:	4,52 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	4,68 mag
Periodendauer:	1,53 Tage

b Per kann Ende Dezember / Anfang Januar gegen 21 Uhr mit bloßem Auge, besser jedoch mit einem kleinen Teleskop, beobachtet werden. Die Helligkeitsschwankungen sind jedoch nur so geringfügig, dass sie kaum erkannt werden können.

Zusammenfassend lässt sich über die optisch Veränderlichen sagen, dass es sich hierbei um Sterne handelt, die nicht wirklich ihre Leuchtkraft verändern, sondern deren scheinbare Helligkeit sich aufgrund gegenseitiger Bedeckung zweier Komponenten eines Doppelsternsystems ändert.

Physische Veränderliche:

Die physisch veränderlichen Sterne ändern innerhalb absehbarer Zeitspannen ihre Leuchtkraft. Das heißt, sie werden entweder heller und wieder dunkler, größer und wieder kleiner, bei manchen kommt es auch zu Ausbrüchen und Explosionen.

Die Periodendauer ist hier definiert als die Zeit, die zwischen zwei Helligkeits-

maxima vergeht.

Entsprechend der Eigenschaften der Helligkeitsänderungen der Sterne sowie der angenommenen physikalischen Ursachen für die Veränderung der Helligkeit, teilt man die physisch veränderlichen Sterne in eine Reihe von Klassen ein.

Pulsierend veränderliche Sterne:

1. Langperiodische Cepheiden:

Hierbei handelt es sich um Sterne mit streng-periodischen Schwankungen der Leuchtkraft und mit Periodendauern zwischen 1 und 70 Tagen. Der Helligkeitsunterschied zwischen Minimum und Maximum beträgt 0,1 bis 2 mag.

Begründet liegen die Schwankungen der Leuchtkraft in einer Schicht der Atmosphäre, deren Strahlungs- (und Licht-) durchlässigkeit von der Größe der Oberfläche des Sterns abhängt (dem so genannten Kappa-Mechanismus). Diese Schicht verursacht ein Pulsieren des Sterns: Er wird im Laufe der Zeit nicht nur heller und dunkler, er ändert während einer Periode auch seine Größe um bis zu 20%.

Unter den langperiodischen Cepheiden gibt es zwei Unterklassen.

Cδ *δ-Cep-Cepheiden*

Diese Cepheiden kommen hauptsächlich in der galaktischen Ebene einer Galaxie vor (d.h., sie befinden sich innerhalb der Galaxienscheibe). An ihnen wurde 1912 eine Beziehung zwischen der Periodendauer und der Leuchtkraft der Cepheiden festgestellt: Indem man gezielt Cepheiden in fernen Galaxien sucht und beobachtet, lässt sich über die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung die Entfernung zu diesen Galaxien berechnen.

Typischer Vertreter: δ Cep

maximale scheinbare Helligkeit:	3,48 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	4,37 mag
Periodendauer:	5,37 Tage

Der Stern lässt sich das gesamte Jahr hindurch beobachten. Besonders gut sind die Bedingungen im Oktober gegen 22 Uhr. δ cep ist leicht auffindbar und mit dem bloßem Auge gut beobachtbar.

CW *W-Vir-Cepheiden*

Diese Cepheiden unterscheiden sich von den Cδ durch eine andere Perioden-Leuchtkraft-Beziehung. Außerdem befinden sich die Sterne vom Typ CW hauptsächlich in den sphärischen Halos der Galaxien, d.h. außerhalb der eigentlichen Galaxienscheibe.

Typischer Vertreter: W Vir

maximale scheinbare Helligkeit:	9,46 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	10,75 mag
Periodendauer:	17,27 Tage

Es handelt sich hier um einen schwer auffindbaren, nur mit einem Teleskop beobachtbaren Stern. CW-Sterne sind meist sehr weit von der Erde entfernt. Daher haben sie eine geringe scheinbare Helligkeit.

2. Kurzperiodische Cepheiden: RR Lyrae-Veränderliche

In sehr regelmäßigen Perioden zwischen 0,05 und 1,2 Tagen ändert sich die Leuchtkraft dieser Sterne um ein bis zwei Größenklassen. RR Lyrae-Sterne findet man insbesondere in vielen Kugelsternhaufen.

Man unterscheidet jene RR Lyrae-Veränderliche mit asymmetrischen Lichtkurven (**RRa**) und jene mit symmetrischen, fast sinusförmigen Lichtkurven (**RRc**).

Bei RR Lyrae-Sternen existiert auch eine Perioden-Leuchtkraft-Beziehung, mit der sich Entfernungen bestimmen lassen.

Typische Vertreter:

	RRa	RRc
Bezeichnung:	RR Lyr	SX UMa
maximale scheinbare Helligkeit:	7,06 mag	10,58 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	8,12 mag	11,21 mag
Periodendauer:	0,57 Tage	0,31 Tage

RR Lyr kann man bereits mit einem kleinen Teleskop beobachten. Besonders eignen sich die Monate Juli und August ab 22:30. Der Stern ist allerdings schwer zu finden.

SX UMa ist zwar leichter auffindbar - der Stern strahlt jedoch so schwach, dass er nur durch ein besseres Teleskop gesehen werden kann.

3. Mira-Ceti-Sterne:

Bei den Mira-Ceti-Sternen handelt es sich um sehr langperiodisch veränderliche, stark pulsierende Riesensterne: Der Sternradius kann während einer Periode bis zu 50% zu- bzw. abnehmen. Die scheinbare Helligkeit kann um 2 bis 8 Größenklassen schwanken. Das bedeutet, dass diese Sterne ihre Leuchtkraft von einem Minimum zu einem Maximum ver Hundertfachen können. Von diesem Gesichtspunkt aus gesehen ist diese Klasse veränderlicher Sterne mit Abstand die imposanteste. Grund für diese Schwankungen sind interne Instabilitäten. Den Namen erhält sie von dem ersten entdeckten Mira-Ceti-Stern: Mira.

Typischer Vertreter: Mira = o Cet

maximale scheinbare Helligkeit:	2,00 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	10,10 mag
Periodendauer:	331,96 Tage

Mira ist geschichtlich der erste dokumentierte veränderliche Stern: Als man 1639 erkannte, dass der Stern seine Helligkeit ändert, nannte man ihn Mira (= die "Wundersame"). Mira lässt sich am Besten über einen längeren Zeitraum, angefangen in den Morgenstunden des Monates Juli, bis hin in die Abendstunden des Monates Januar beobachten.

4. Halbregelmäßig Veränderliche

Bei den halbregelmäßig veränderlichen Sternen handelt es sich um Übergiganten oder Riesen, in deren Schwankungen der scheinbaren Helligkeit eine gewisse Periodizität feststellbar ist. Die Periodendauer liegt zwischen 30 und 1000 Tagen, die Schwankungen umfassen ein bis zwei Größenklassen. Man unterscheidet folgende Klassen:

SRa

Hierbei handelt es sich um eine relativ regelmäßige Klasse. Die Periodendauer ist relativ konstant. Trägt man die Helligkeit gegen die Zeit auf, so ähnelt die Helligkeitskurve den Helligkeitskurven der Mira-Ceti-Sterne - nur, dass die Helligkeitsschwankungen wesentlich geringer ausfallen.

SRb

Im Gegensatz zu SRa verhält sich diese Klasse von Sternen nur sehr schwach regelmäßig. Nur mit Mühe ist eine Periodizität erkennbar, unterbrochen von völlig irregulären Helligkeitsschwankungen. Bei diesen Sternen handelt es sich um Riesen, die aufgrund ihrer großen Masse instabile Phasen durchlaufen.

Schließlich gibt es noch die halbregelmäßigen Klassen SRc und SRd, die sich durch ihre Masse (es handelt sich hier ausschließlich um Übergiganten) und Feinheiten im Spektrum von den beiden ersten Gruppen unterscheiden.

Typische Vertreter

	SRa	SRb	SRc	SRd
Bezeichnung:	Z Aqr	RR CrB	RS Cnc	UU Her
maximale scheinbare Helligkeit:	9,5 mag	8,40 mag	6,20 mag	8,5 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	12 mag	10,10 mag	7,70 mag	10,6 mag
Periodendauer:	135,5 Tage	60,80 Tage	120 Tage	80,1 Tage

5. Unregelmäßig Veränderliche

Der Klassen der unregelmäßig Veränderlichen werden alle Sterne zugeordnet, die in ihren Helligkeitsschwankungen keinerlei regelmäßige oder periodische Strukturen aufweisen. Man unterscheidet die unregelmäßig Veränderlichen früher Spektralklasse (**Ib**) und die unregelmäßig Veränderlichen später Spektralklasse (**Ic**).

Typische Vertreter:

	Ib	Ic
Bezeichnung:	CO Cyg	TZ Cas
maximale scheinbare Helligkeit:	9,6 mag	8,86 mag
minimale scheinbare Helligkeit:	10,6 mag	10,5 mag

Bei diesen Veränderlichen macht es keinen Sinn, eine Periodendauer anzugeben, da es keine Periodendauer gibt.

Eruptiv veränderliche Sterne

Eruptiv veränderliche Sterne zeichnen sich durch plötzliche, nicht vorhersagbare Helligkeitsausbrüche (oder -einbrüche) um mehrere Größenklassen aus. Hier unterscheidet man einige Klassen, die im Folgenden kurz erwähnt werden:

1. Novae

Bei den Nova-Veränderlichen handelt es sich um Weiße Zwerge, deren Helligkeit plötzlich um 7 bis 16 Größenklassen ansteigt und nach einigen bis einigen hundert Tagen wieder absinkt. Häufig wird ein Nova-Veränderlicher erst mit einem solchen Ausbruch sichtbar, daher auch der Name: Der Begriff Nova rührt von dem Lateinischen *nova stella* (= neuer Stern) her. Früher dachte man, dass es sich bei dem wegen einer Nova plötzlich sichtbaren Stern um einen neu geborenen Stern handelt. Tatsächlich handelt es sich aber um Weiße Zwerge oder Neutronensterne, in denen (wie oben ausführlich geschildert) sämtliche Fusionsprozesse abgeklungen sind:

Umkreisen sich ein Weißer Zwerg (bzw. ein Neutronenstern) und ein massereicher Stern sehr nahe, kommt es zum Fluss wasserstoffreicher Materie von dem massereichen Stern zum Weißen Zwerg. Dort sammelt sich die wasserstoffreiche Materie, bis Druck und Temperatur für die Fusion des Wasserstoffs ausreichen. Ist dies der Fall, kommt es zu schlagartigen Fusionsreaktionen, die die neu zugeflossene Materie wegsprengen und die von der Erde aus beobachtbaren Leuchterscheinungen hervorrufen.

2. Supernovae

Die von den in den vorhergegangenen Abschnitten behandelte Supernova-Explosion verursachte Helligkeitsänderung gehören (unter anderem) zu dieser Klasse der eruptiv-veränderlichen Sterne. Besonders massereiche Sterne beenden ihr Dasein als Supernova. Dabei steigt ihre Helligkeit um bis zu 20 Größenklassen.

Nach chinesischen Aufzeichnungen wurde im Jahr 1054 im Sternbild Stier ein "neuer" Stern entdeckt, der so hell leuchtete, dass man ihn über 23 Tage lang am helllichten Tage sehen konnte. Heute weiß man, dass es sich bei dem "neuen" Stern um eine Supernova-Explosion handelte. Das Überbleibsel dieser Supernova-Explosion kann heute selbst mit einem kleinen Teleskop beobachtet werden: Der sogenannte Krebsnebel (M1) im Sternbild Stier (siehe Abbildung 95). Bei dem Nebel handelt es sich um die abgesprengte Hülle des Sterns, der 1054 explodierte. Im Innern dieses Nebels wurde ein Neutronenstern nachgewiesen.

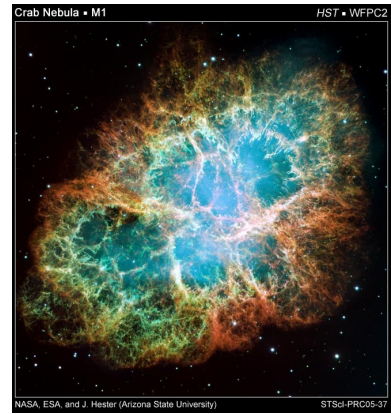


Abbildung 95: Der Krebsnebel (M1)

Soweit die Unterteilung veränderlicher Sterne in Klassen. Abschließend wird noch darauf hingewiesen, dass oben nur eine Auswahl der wichtigsten Klassen veränderlicher Sterne getroffen wurde. Für diejenigen, die sich noch ausführlicher mit diesem interessanten Thema beschäftigen möchten, gibt es im Internet eine vollständige Liste aller Klassen veränderlicher Sterne, zusammen mit detaillierten Beschreibungen:

<http://www.sai.msu.su/groups/cluster/gcvs/gcvs/iii/vartype.txt>

4 Lizenzen und Bildquellen

4.1 Verwendete Abbildungen und deren Lizenzen

Die verwendeten Abbildungen sind der Reihe nach aufgelistet.

Kapitel 1:

- Sonnensystem:
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jpl.nasa.gov/images/policy/index.cfm>
- Planeten-Symbole:
Quelle: http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:<Planetenname>_symbol.ant.png
Urheber: Ant Allan (Wikipedia, en); Lizenz: GFDL
- Illustration Exzentrizität:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Illustration Seitliche Ansicht:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Illustration Inklination:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Illustration Rotationsachse:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Sonnen- und Sternentag:
Quelle: http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Sidereal_day_%28prograde%29.png
Urheber: Gdr (Wikipedia, en); Lizenz: GFDL
- Sonne

Quelle: <http://soho.esac.esa.int/gallery/images/superprom.html>

Urheber: SOHO (ESA & NASA); Lizenz: <http://soho.esac.esa.int/data/summary/copyright.html>

- Merkur:
Urheber: NASA (Mariner 10); Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Größenvergleich Merkur-Erde:
Quelle: http://sse.jpl.nasa.gov/multimedia/display.cfm?IM_ID=179
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Venus
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Venus Vulkan:
Quelle: <http://Fotojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00243>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Venus: Morgenstern/Abendstern:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Erde:
Urheber: NASA (Apollo); Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Illustration Norden/Süden:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Jahreszeiten:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Schema Erdaufbau:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Erdmagnetfeld:
Quelle: <http://sec.gsfc.nasa.gov/popscise.jpg>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Erde_Mond:
Quelle: <http://Fotojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00405>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Mondphasen
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Sonnen- und Mondfinsternis:
Quelle: <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Finsternis.jpg>
Urheber: Ben-Zin (Wikipedia, de); Lizenz: GFDL
- Mars:
Quelle: <http://64.40.104.21/mars/large/07.05.1.HST.mars.lrg.jpg>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Mars Panorama-Aufnahme:
Quelle: <http://Fotojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01466>
Urheber: NASA; Lizenz: Public Domain (Gemeindefrei)
- Jupiter:
Urheber: NASA (Voyager 1); Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Jupiter - GRF:
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Jupiter - MondFotos:
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Saturn:
Quelle: <http://Fotojournal.jpl.nasa.gov/jpeg/PIA06193.jpg>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>

- Saturn - Ringe:
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Uranus:
Quelle: <http://Fotojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01360>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Neptun:
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Pluto:
Quelle: http://nssdc.gsfc.nasa.gov/Foto_gallery/Fotogallery-pluto.html
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Lokale Gruppe:
Quelle: http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:LokaleGruppe_Diagramm_750px.png (invertiert)
Urheber: CWitte (Wikipedia, de); Lizenz: GFDL
- Großraumstrukturen (SDSS):
Quelle: <http://astro.uchicago.edu/cosmus/projects/fog/sloan2.jpg>
Urheber: COSMUS; Lizenz: <http://astro.uchicago.edu/cosmus/home.html>
- Eros:
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- "Inner Solar System":
Quelle: <http://Fotojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA05569>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Komet:
Quelle: <http://www.usno.navy.mil/pao/HBPIX.html>
Urheber: United States Federal Government; Lizenz: public domain
- Mondfinsternis:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Sonnenfinsternis:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL

Kapitel 2:

- Sternbild Löwe 1:
Urheber: Johannes Hevelius; Lizenz: Gemeindefrei (public domain)
- Sternbild Löwe 2:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Illustration zum Aufsuchen des Polarsterns über Ursa Major:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Opposition, Konjunktion:
Urheber: Phrood (Wikipedia, de); Lizenz: Gemeindefrei (public domain)
- Guide 6.0 - BildschirmFoto:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Bikonvexlinse im Strahlenmodell - Bezeichnungen:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Lichtstrahl durch Bikonvexlinse:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Parallele Lichtstrahlen auf Bikonvexlinse:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Lichtstrahlen durch Brennpunkt auf Linse:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Lichtstrahl durch Linsenmittelpunkt:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Linsen-Abbildung:

- Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Funktionsweise Linsenteleskop - Bezeichnungen:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Funktionsweise Linsenteleskop - Sternenlicht:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Funktionsweise Linsenteleskop - Winkelvergrößerung:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Funktionsweise Linsenteleskop - Herleitung der Winkelvergrößerung:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Fraunhofer-Querschnitt:
Quelle: www.mueller-manching.de
Urheber: Manfred Müller; Lizenz: Genehmigung zur Verwendung für dieses AstroSkript;
- Newton-Querschnitt:
Quelle: www.mueller-manching.de
Urheber: Manfred Müller; Lizenz: Genehmigung zur Verwendung für dieses AstroSkript;
- Schmidt-Cassegrain-Querschnitt:
Quelle: www.mueller-manching.de
Urheber: Manfred Müller; Lizenz: Genehmigung zur Verwendung für dieses AstroSkript;
- Maksutov-Cassegrain-Querschnitt:
Quelle: www.mueller-manching.de
Urheber: Manfred Müller; Lizenz: Genehmigung zur Verwendung für dieses AstroSkript;
- Azimutale Montierung:
Quelle: www.teleskop-service.de
Urheber: Wolfgang Ransburg; Lizenz: Genehmigung zur Verwendung für dieses AstroSkript;
- Dobson:
Quelle: www.teleskop-service.de
Urheber: Wolfgang Ransburg; Lizenz: Genehmigung zur Verwendung für dieses AstroSkript;
- Parallaktische Montierung:
Quelle: www.teleskop-service.de
Urheber: Wolfgang Ransburg; Lizenz: Genehmigung zur Verwendung für dieses AstroSkript;
- Okular:
Urheber: Finn Henseleit; Lizenz: Genehmigung zur Verwendung für dieses AstroSkript;
- Sternenspektren:
Quelle: http://www.noao.edu/image_gallery/images/d2/starsl.jpg
Urheber: NOAO; Lizenz: http://www.noao.edu/image_gallery/copy-right.html
- Cartes du Ciel:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Spracheinstellung:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Ort der Sternwarte:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Menü Darstellung:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL

- Menüs "Kataloge und Darstellung":
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Linien:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Suche:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL

Kapitel 3:

- Illustration - Gravitationsdruck:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Illustration - Elektrostatische Kräfte:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Illustration - Wasserstoffatom:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Adlernebel:
Quelle: <http://hubblesite.org/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Gravitationsdruck <-> Gasdruck:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Dissoziation:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Ionisation:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Orionnebel:
Quelle: http://hubblesite.org/gallery/album/entire_collection/pr2006001a/
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Orionnebel - Sternentstehungsgebiet:
Quelle: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Protostern-Stadium 3-4
Quelle: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Trifidnebel:
Quelle:
<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/1999/42/image/a>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Protostern-Infratot:
Quelle: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/star/protostellar-jet/1999/05/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Protostern-Sichtbar:
Quelle: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/star/protostellar-jet/1999/05/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Neuer Stern:
Quelle: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Illustration: Fusion von Wasserstoffkernen:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Sternaufbau Frühphase:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL

- Sternaufbau: Wasserstoff-Schalenbrennen:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Sternaufbau: Helium-Schalenbrennen:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Ringnebel:
Quelle: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1999/01/image/a/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Sirius A + B:
Quelle: http://apod.nasa.gov/apod/image/0010/siriusb_cxo_big.jpg
Urheber: NASA; Lizenz: <http://www.jsc.nasa.gov/policies.html#Guidelines>
- Illustration - Zwiebelschalenstruktur:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Beteigeuze:
Quelle: <http://hubblesite.org>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Supernova in NGC 4526:
Quelle: <http://www.spacetelescope.org/images/html/opo9919i.html>
Urheber: NASA/ESA; Lizenz: <http://www.spacetelescope.org/copyright.html>
- Distant Supernovae:
Quelle: <http://hubblesite.org>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Eta Carinae:
Quelle:
<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/1996/23/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Lichtablenkung Sonne:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Microlens Event:
<http://hubblesite.org>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Schwarzes Loch_Illustration:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Stern-Schwarzes Loch:
Quelle:
<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2002/30/image/a>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- NGC 4438:
Quelle: <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/exotic/black-hole/2000/21/>
Urheber: NASA; Lizenz: <http://hubblesite.org/copyright/>
- Illustration: Optischer und physischer Doppelstern:
Urheber: Alexander Staidl; Lizenz: GFDL
- Albireo:
Quelle: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Albireo.jpg>
Urheber: Jim Spinner (Wikipedia, en); Lizenz: GFDL
- Krebsnebel:
Quelle: <http://www.spacetelescope.org/images/html/heic0515a.html>
Urheber: NASA/ESA; Lizenz: <http://www.spacetelescope.org/copyright.html>

Die Lizenz "GFDL" lässt sich nachlesen unter:
<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>

Bei der Auswahl der Bildquellen wurde sorgfältig darauf geachtet, dass die Bilder eine Lizenz besitzen, welche den Einsatz in diesem Werk erlaubt und welche in Verbindung mit diesem Werk auch frei kopiert und verbreitet werden dürfen.

Sollte bei der Auswahl der Bilder dennoch ein Fehler unterlaufen sein, und sich unter obigen Abbildungen auch Unfreie befinden, bitte ich Sie, mir umgehend Bescheid zu geben, damit diese durch freie ersetzt werden können:

Email: a.staidl@freenet.de

4.2 Lizenz des AstroSkripts

Autor und Urheber des AstroSkripts sowie einiger Abbildungen ist:

Alexander Staidl
Amselweg 13
35764 Sinn

Email: a.staidl@freenet.de

Die folgende Lizenz gilt für das vorliegende Buch (AstroSkript Teil 1). Die Lizenz ist dabei so gehalten, dass eine Weitergabe und Verbreitung des Textes in Verbindung mit den oben genannten Abbildungen rechtmäßig ist.

LIZENZ des AstroSkripts Teil 1 (im Folgenden mit *Werk* bezeichnet)

Urheber: Alexander Staidl
Datum: 12.02.2008

Der Urheber erlaubt das Erstellen von Kopien des gesamten Werkes oder von Auszügen, sowie das Vervielfältigen des Werkes über sämtliche Medien einschließlich des Internets ausschließlich dann, wenn dabei nach den folgenden Punkten gehandelt wird:

1. Für die Kopien/Auszüge/Vervielfältigungen darf maximal so viel Geld verlangt werden, wie für das Anfertigen der Kopien/Auszüge/Vervielfältigungen benötigt wird. Eine darüber hinaus gehende kommerzielle Nutzung des AstroSkripts ist nicht erlaubt.

2. Jeder Auszug, jede Kopie und jede Vervielfältigung steht unter dieser Lizenz und zu jedem Auszug, jeder Kopie und jeder Vervielfältigung muss diese Lizenz beigefügt werden. Des Weiteren müssen

Urheber und Lizenzen der kopierten/vervielfältigten Abbildungen kenntlich in jeder Kopie/Vervielfältigung angegeben werden.

3. Das AstroSkript sowie Ausschnitte daraus dürfen nur unverändert kopiert/vervielfältigt werden.

4. Zu berücksichtigen ist: Die Abbildungen stehen unter sehr verschiedenen Lizenzen, die die Nutzungsbedingungen der jeweiligen Abbildungen regeln. Diese Lizenzen stehen für die jeweilige Abbildung rechtlich über der vorliegenden "Lizenz des AstroSkripts".

5. Abbildungen, die speziell für dieses Werk genehmigt wurden, dürfen auch nur in Verbindung mit diesem verbreitet werden.

Haftungsausschluss: Es besteht keine Garantie auf die Richtigkeit von Angaben innerhalb des vorliegenden Werkes. Für Fehler oder Falschangaben kann der Autor nicht haftbar gemacht werden.

Ende des Lizenztextes
