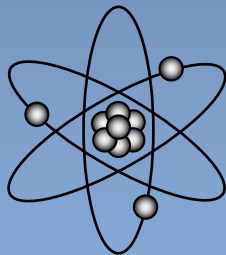




# PHYSIK MIT ASTROPHYSIK



## UNTERRICHTSHILFEN MIT UMSETZUNGSBEISPIELEN

DANIELA BEDNARSKI  
STEPHAN EDINGER  
SVEN HANSSEN  
ENRICO MALZ

*Grafiken: Sven Hanssen*

Dieses Werk ist unter einem **Creative Commons 3.0 Deutschland Lizenzvertrag** lizenziert:

- Namensnennung
- Keine kommerzielle Nutzung
- Weitergabe unter gleichen Bedingungen

Um die Lizenz anzusehen, gehen Sie bitte zu <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de> oder schicken Sie einen Brief an Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California 94105, USA.

Sven Hanssen – E-Mail: [Sven.Hanssen@zsl-rsgd.de](mailto:Sven.Hanssen@zsl-rsgd.de) – September 2020





## Inhaltsverzeichnis

<b>Überblick .....</b>	<b>3</b>
<b>3.5.4 Wellen .....</b>	<b>6</b>
Dopplereffekt .....	6
Gravitationswellen.....	6
<b>3.5.5 Wellenoptik und 3.5.6 Atom- und Kernphysik.....</b>	<b>9</b>
Struktur der Materie .....	9
Bohr'sche Frequenzbedingung .....	9
Linienpektren von Atomen und Molekülen: Die Balmerlinien beim Wasserstoffatom .....	11
Spektralanalyse .....	12
Kernfusion.....	13
<b>3.5.7 Astrophysik .....</b>	<b>14</b>
Die kosmische Hintergrundstrahlung.....	14
Hubble-Lemaître-Relation und die Expansion des Universums .....	15
Kosmologie .....	17
Galaxien als zusammengesetzte Systeme .....	20
Dunkle Materie.....	22
Sternentwicklung.....	25
Hauptreihenstadium.....	29
Endstadien der Sterne .....	32
Extrasolare Planeten.....	37



## Überblick

Die Astronomie ist eine der ältesten Wissenschaften - seit jeher hat ein Blick an den Nachthimmel die Menschen fasziniert. Auch in den Schulen hat die Astronomie einen festen Platz gefunden, im Land Baden-Württemberg neben Elementen in den Fächern NwT und vor allem IMP hauptsächlich im zweistündigen Wahlfach Astronomie und im dreistündigen Basisfach Physik mit Schwerpunkt Astrophysik. Die vorliegenden Informationen und Materialien fassen die Arbeit der Zentralen Projektgruppe (ZPG) zum **Basisfach mit Schwerpunkt Astrophysik** zusammen und richten sich an alle Kolleginnen und Kollegen, die gerne astronomische Themen unterrichten wollen: Durch die hierin enthaltenen Informationen zur Thematik und den dargestellten Unterrichtsgang ist dieser Text als Motivation und als Hilfe gedacht: Motivierten „Neulingen“ auf dem spannenden Gebiet der Astronomie soll damit der Einstieg ermöglicht werden und auch „alte Hasen“ finden hier auf den Bildungsplan 2016 zugeschnittenes Material. Im Hintergrundtext befinden sich neben möglichen Tafelanschrieben auch Verweise auf Arbeitsblätter samt Lösungen und Präsentationen.

Das Wahlfach Astronomie folgt einer anderen Struktur und hält die Inhalte möglichst disjunkt: Von „klein“ zu groß, von der Erde und dem Sonnensystem über die Sterne hin zu den großräumigen Strukturen des Universums. Die Materialien für das Wahlfach Astronomie sind ebenfalls von der ZPG Astronomie bereitgestellt.

Im Bildungsplan 2016 unterscheidet sich das dreistündige Basisfach Physik mit Schwerpunkt Astrophysik (3.5) deutlich vom Basisfach mit Schwerpunkt Quantenmechanik (3.4). Diese Unterschiede werden nicht erst ab der Quantenmechanik deutlich, sondern von Beginn an (vgl. auch nachstehende Tabelle). Das Ziel der Bildungsplankommission war es, für die zwei zusätzlichen Themenfelder Atom- und Kernphysik und Astrophysik genügend Raum zu schaffen, damit alle Bildungsplaninhalte in einem realistischen Zeitplan unterrichtet werden können. Begriffe wie Kondensator und Spule und entsprechend auch die Größen Kapazität und Induktivität kommen in diesem Kurs nicht vor. Folgerichtig wurde das Kapitel zu elektromagnetischen Schwingungen zugunsten der neuen Themen komplett gestrichen. Dafür wurde das Kapitel Wellen um den für die Astrophysik wichtigen Dopplereffekt und die Gravitationswellen erweitert. Insbesondere der Themenkomplex elektromagnetische Wellen bedarf einer anderen Behandlung, wenn den Schülern der Schwingkreis nicht vertraut ist. Die Materialien der ZPG sind geeignet, um diese Veränderungen des „klassischen Verlaufs“ im Unterricht abzubilden.

Das neue Themenfeld Atom- und Kernphysik wurde eingebaut, um einerseits etwas mehr moderne Physik in den Bildungsplan zu bringen, andererseits aber die physikalischen Grundlagen für die Astrophysik zu legen. Die Astrophysik ist im Bildungsplan in ihrer Reihenfolge ungewohnt und stellt den traditionellen Unterrichtsgang auf den Kopf. Diese Themenreihenfolge ist nicht verbindlich, wurde aber mit der Absicht gewählt, den Kosmos als Laboratorium aufzufassen, auf das man seine Instrumente richten kann. Ausgehend von den Wellen und der Wellenoptik ist es naheliegend, das Weltall nach Spuren elektromagnetischer Wellen, auch abseits des sichtbaren Lichts, zu untersuchen. Arno Penzias und Robert Woodrow Wilson hatten dies zwar nicht beabsichtigt, aber genau auf diesem Wege die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckt. So beginnt die Astrophysik in diesem Unterrichtsgang „im ganz Großen“, mit dem Universum, seiner Entwicklung und den darin enthaltenen Galaxien. Erst danach folgen die Sterne als Bestandteile der Galaxien, deren Entwicklung, ihre Planeten und letztlich das Leben, das sich auf diesen entwickeln konnte.



Auf das Basisfach Physik mit Schwerpunkt Astrophysik wird hier so eingegangen, dass man problemfrei den Schwerpunkt auf Astrophysik legen kann und alle Inhalte, die diesen Kurs vom quantenphysikalischen Kurs unterscheiden, abgedeckt sind. Es sind Unterrichtshilfen, kein vollständiger Unterrichtsgang für den gesamten Kurs! Kapitel 3.5.7 (ab S. 13) kann aber so wie hier dargestellt chronologisch behandelt werden.

Viele Kapitel der beiden möglichen Schwerpunkte sind inhaltlich gleich, auf die in diesen Unterrichtshilfen auch nicht eingegangen wird und die noch geeignet eingebaut werden müssen. Die unten folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Schwerpunktthemen.

Die in den folgenden Unterrichtshilfen **bereitgestellten Inhalte sind rot hervorgehoben**, werden nicht chronologisch, aber alle behandelt, die Nummern stehen bei den Inhalten.

SP Quantenphysik 3.4	SP Astrophysik 3.5
<b>3.4.1</b>	<b>3.5.1</b>
<b>Denk- und Arbeitsweisen der Physik (und Astrophysik)</b>	
Unverändert: (1) Empirische Überprüfbarkeit	
- (2) Modelle in der Physik (3) ← hier	(2) Astronomie als Beobachtungswissenschaft → hier in (3) ... und Astrophysik (4) Bedeutung von Naturkonstanten + Lichtg. (5) Astronomische Objekte mithilfe physikalischer Größen beschreiben
<b>3.4.2.1</b>	<b>3.5.2.1</b>
<b>Elektrische und magnetische Felder</b>	
Unverändert: (1) Struktur el. u. magn. Felder; (2) $E = F/q$ ; (3) $F = I \cdot B \cdot s$	
(4) Kondensator $C = Q/U$ , $E = U/d$ , ... (5) Spule (6) Felder vergleichen (magn., el., grav.)	- - → hier in (4)
<b>3.4.2.2</b>	<b>3.5.2.2</b>
<b>Elektrodynamik</b>	
Unverändert: (1) Lorentzkraft; (2) $U_{\text{ind}} = - n \cdot d\phi/dt$	
(3) Selbstinduktion $U_{\text{ind}} = - L \cdot dl/dt$ (4) techn. Anwendung (Generator,...) (5) Maxwell	- → hier in (3) → hier in (4)
<b>3.4.3</b>	<b>3.5.3</b>
<b>Schwingungen</b>	
Unverändert: (1) $s$ , $T$ , $f$ , $\omega$ ; (2) $s(t)$ , $v(t)$ , $a(t)$ ; (3) Beispiele für $F = - D \cdot s$ ; (4) Federpendel	
(5) Elektromagnetischer Schwingkreis (6) el.magn. Schwingung ↔ mech. Schw.	- -



3.4.4	3.5.4
<b>Wellen</b>	
Unverändert: (1) $\lambda$ , $c = \lambda \cdot f$ Transversalwelle; (6) elektromagnetisches Spektrum	
(2) (...) in Alltagssituationen erkennen (3) eindim. Wellen beschreiben (Knoten,...) (4) Gangunterschied (5) Huygens: Brechung, Reflexion - -	dieser Teil gestrichen - hier in (3) hier in (4) <b>(5) Doppler-Effekt, auch optisch</b> <b>(7) Vergleich el.magn.- mit Gravitationswellen</b>
3.4.5	3.5.5
<b>Wellenoptik</b>	
Unverändert: (1) Licht als Welle; (2) Beugung; (3) Interferenz; (4) Lage Maxima	
(5) (...) am DS und Gitter (6) Interferenz im Alltag	(5) (...) am Gitter <b>(6) Spektren versch. Lichtq. exp. untersuchen</b>
3.4.6 Quantenphysik	3.5.6 Atom- und Kernphysik
∴ (5) ← hier (6) ← hier - - - -	<b>(1) Struktur der Materie</b> (2) Lichtelektrischer Effekt, Planck (3) $E = h \cdot f$ , $p = h/\lambda$ <b>(4) Emissions- / Absorptionsspektren</b> <b>(5) Linienspektren v. Atomen → E-Niveaus</b> <b>(6) Informationen aus Spektren über Stern- / Planetenatmosphären</b> <b>(7) Kernfusion</b>
	3.5.7 Astrophysik
- - - - - - -	<b>(1) Entwicklung des Universums (Kosmologisches Standardmodell)</b> <b>(2) Galaxien</b> <b>(3) Hubble-Relation</b> <b>(4) Sternentstehung Vor- Hauptreihenstadium</b> <b>(5) Hauptreihenstadium</b> <b>(6) Nach- Hauptreihenstadium (W. Zwerg,...)</b> <b>(7) Detektion extrasolarer Planeten</b> <b>(8) Spektralanalyse Planetenatmosphären</b>

**Viel Freude beim Unterrichten wünschen**

**DANIELA BEDNARSKI, STEPHAN EDINGER, SVEN HANSSEN, ENRICO MALZ**



## 3.5.4 Wellen

### Dopplereffekt

(zu 3.5.4 (5))

#### Materialien:

Präsentation: 01\_pma\_ppt\_dopplereffekt.pptx

#### Unterricht (2 Stunden):

Im Kapitel Wellen ist im Astrophysikkurs der Doppler-Effekt explizit hinzugekommen, den man ansonsten vielleicht schon als Zusatz im Basisfach Quantenmechanik oder im Leistungsfach unterrichtet hat. Dabei wird der Effekt wie üblich über die Akustik eingeführt, hat aber insbesondere den optischen bzw. longitudinalen Doppler-Effekt als Ziel, da dieser in 3.5.7 (3) Hubble-Relation und (8) Exoplaneten benötigt wird.

Das Thema wird hier lehrerzentriert vorgestellt. Als Experiment eignet sich z.B. das Schwingen einer hochfrequenten Stimmgabel, alternativ auch für einen stärkeren Effekt ein horizontales Kreisen dieser an einer Schnur, oder andere bekannte Experimente wie die Doppler-Rakete.

In der Präsentationsdatei wird auf den Folien 2 und 4 eine Veranschaulichung für die Spezialfälle bewegte Quelle, ruhender Beobachter und bewegter Beobachter, ruhende Quelle gegeben. Die jeweils im Anschluss gezeigte Herleitung der Frequenzgleichungen auf den Folien 3 und 5 kann auch an der Tafel entwickelt werden. Alternativ ließe sich dies auch in eine Gruppenarbeitsphase zur Selbsterarbeitung geben, allerdings dürfte dies im Basiskurs wegen des geringeren mathematischen Niveaus bei den allermeisten Kursen sehr zäh werden. Gestufte Hilfen scheinen hier dringend geboten.

In der letzten Folie dieser Datei wird ein kurzer Überblick über den optischen Doppler-Effekt gegeben. Die dazugehörige Gleichung kann an dieser Stelle nicht hergeleitet werden, da die spezielle Relativitätstheorie nicht bekannt ist. Anhand der Gleichung sollte mit den Schülern aber besprochen werden, dass der Effekt bei normalen Geschwindigkeiten im Bereich einiger km/s sehr klein und damit schwer zu messen ist. Die Sonne wird für eine Kamera auf einer Raumsonde nicht plötzlich rot oder blau, wenn diese von ihr weg bzw. auf sie zu fliegt, da der Quotient  $v/c$  sehr klein ist.

Im Anschluss bietet sich noch eine Übungsphase in diesem Kontext an. Von der Verschiebung von Spektrallinien ist hier aber noch abzusehen, da die notwendigen Voraussetzungen dafür erst in 3.5.6 und 3.5.7 geschaffen werden.

### Gravitationswellen

(zu 3.5.4 (7))

#### Materialien:

Simulation: [https://phet.colorado.edu/sims/radiating-charge/radiating-charge\\_de.html](https://phet.colorado.edu/sims/radiating-charge/radiating-charge_de.html)

Programm: <http://www.mabo-physik.de/gravitationswellen.html>

Programm: <https://www.laserlabs.org/spacetimequest.php>



## Unterricht (2 bis 3 Stunden):

Der Bildungsplan stellt hier einen Vergleich zwischen den elektromagnetischen Wellen und den Gravitationswellen in den Mittelpunkt. Elektromagnetische Wellen wurden qualitativ in diesem Kapitel schon behandelt. Hier geht es also zunächst darum, den Begriff der Gravitationswelle den Schülern näherzubringen, um anschließend Vergleiche anzustellen. Dabei werden in diesem Unterrichtsgang auch die Detektoren eine zentrale Rolle spielen.

Da in diesem Kurs im Vergleich zum Schwerpunkt Quantenmechanik die Elektrodynamik stark gekürzt und die elektromagnetischen Schwingungen überhaupt nicht vorgesehen sind, wird man die Erzeugung elektromagnetischer Wellen anders besprechen müssen als es bislang, ausgehend vom Schwingkreis, üblich ist. Die Schüler haben im Abschnitt 3.5.2 den Feldbegriff kennengelernt. Bei elektrischen Quellenfeldern die Feldlinien von den positiven zu den negativen Ladungen. Betrachtet man eine positive und eine negative Ladung, die sich nicht bewegen, erhält man ein statisches elektrisches Feld. Drehen sich diese Ladungen periodisch umeinander, verändert sich auch das Feld periodisch. Diese Veränderung wandert mit Lichtgeschwindigkeit nach außen. Es entsteht eine Wellenbewegung.

Die Ausbreitung einer solchen Veränderung im elektrischen Feld kann man mithilfe der im Material verlinkten Simulation veranschaulichen. Dabei kann man die positive Ladung entweder mit der Maus selbst bewegen, oder eine der vorgegebenen Bewegungen nutzen. Insbesondere die Kreisbewegung erlaubt den relevanten Vergleich mit den Gravitationswellen. In der Simulation wird der Verlauf der elektrischen Feldlinien dargestellt, die sich durch die Ortsveränderung der felderzeugenden Ladung zeitlich verändern.

## Möglicher Tafelanschrieb:

### Entstehung elektromagnetischer Wellen

Verändert sich die Verteilung von elektrischen Ladungen, so verändert sich auch das elektrische Feld. Diese Veränderung kann sich höchstens mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit ausbreiten und kommt daher erst verzögert an weiter entfernten Orten an. Kreisen Ladungen umeinander, erzeugt dies eine periodische Welle im elektrischen Feld. Da bewegte Ladungen einen Strom darstellen, ist damit auch ein periodisch wechselndes Magnetfeld verbunden. Beide breiten sich gemeinsam als Welle aus.

Als didaktische Reduktion wird hier darauf verzichtet, auf die Aussagen der Maxwell-Gleichungen einzugehen. Diese Vertiefungsmöglichkeit besteht natürlich, da in 3.5.2 (4) diese angesprochen werden.

Bei Gravitationsfeldern tritt das gleiche Phänomen auf. Das Umkreisen zweier Massen führt zu einer periodischen Veränderung des Gravitationsfeldes, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. In der vorgeschlagenen Simulation kann man dies anhand zweier Massen simulieren, die sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen kann man sich genauso vorstellen, nur dass das Gummituch bei einer Ladung nach oben und nicht nach unten gebogen würde.



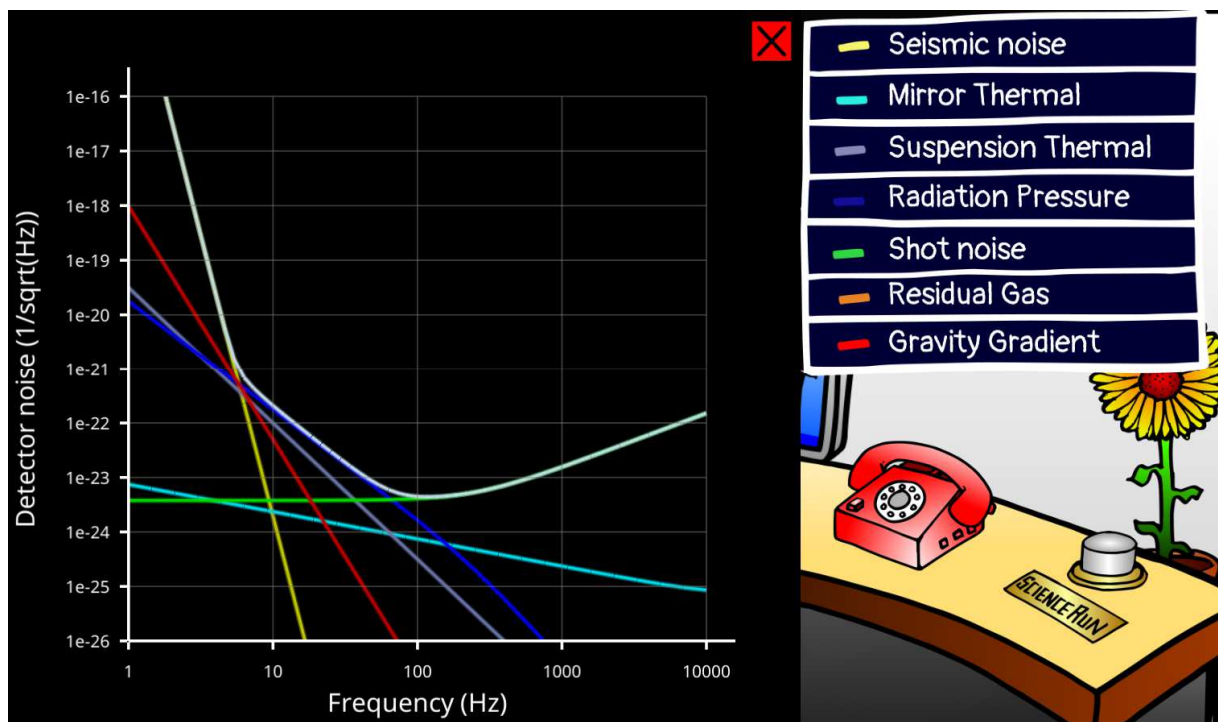


Möglicher Tafelanschrieb:

## Entstehung von Gravitationswellen

Werden Massen beschleunigt, z.B. weil sie sich umeinander bewegen, verändert sich das Gravitationsfeld periodisch. Wie im Fall der elektromagnetischen Wellen breitet sich diese Veränderung mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit aus und kommt erst verzögert an weiter entfernten Orten an. In Gravitationswellendetektoren können wir heutzutage diese Wellen nachweisen.

Im Folgenden könnte man auf diese Detektoren eingehen, sofern die Zeit dafür zur Verfügung steht. Über den Bildungsplan geht dies allerdings hinaus. Das folgende Vorgehen erlaubt u.a., direkt eine Brücke zurück zu den mechanischen Schwingungen zu schlagen, da für die präzise Messung vor allem das Entkoppeln von irdischen Schwingungen eine ganz entscheidende Rolle spielt. Um einen Überblick über die verschiedenen Störquellen zu erlangen, wird hier ein spielerischer Ansatz gewählt. Beim Spiel Space Time Quest kann man einen Gravitationswellendetektor selbst bauen. Das Spiel bildet dabei die verschiedenen Rauschquellen ab:



Screenshot aus Space Time Quest von Laser Labs

Um einen möglichst empfindlichen Detektor zu konstruieren, muss man durch diverse Einstellungen das Rauschen so klein wie möglich halten, ohne ein gegebenes Budget zu überschreiten. Auf einige Quellen werden die Schüler selbst auch in einem Vorgespräch kommen, andere wie das Schrotrauschen, also der Impulsübertrag auf den Spiegel durch das Auftreffen der einzelnen Photonen überraschen sie vielleicht. Je nach Interesse des Kurses kann man diese Einflussfaktoren genauer besprechen. Das seismische Rauschen könnte man sogar in einem Praktikum vertiefen, indem die Schüler das Verhalten vertikal gekoppelter Feder- oder Fadenpendel testen, um hochfrequentes Rauschen zu dämpfen, was eine ganz wesentliche Quelle des Detektorrauschens darstellt.





Empfehlenswerte Links zum Thema:

[Gravitationswellen auf Einstein online](https://www.einstein-online.info/category/einstein-fuer-einsteiger/gravitationswellen-einstein-fuer-einsteiger/)

<https://www.einstein-online.info/category/einstein-fuer-einsteiger/gravitationswellen-einstein-fuer-einsteiger/>

[Vertiefung zu Gravitationswellen auf Einstein online](https://www.einstein-online.info/spotlights/gravWellen/)

<https://www.einstein-online.info/spotlights/gravWellen/>

[Gravitationswellen visualisiert](https://www.youtube.com/watch?v=AXgljRvI_Tg)

[https://www.youtube.com/watch?v=AXgljRvI\\_Tg](https://www.youtube.com/watch?v=AXgljRvI_Tg)

[LIGO Caltech Educational Resources](https://www.ligo.caltech.edu/page/educational-resources)

<https://www.ligo.caltech.edu/page/educational-resources>

## 3.5.5 Wellenoptik und 3.5.6 Atom- und Kernphysik

### Struktur der Materie

(zu 3.5.6 (1))

Die Inhalte zur Struktur der Materie und Aufbau des Atoms sind Inhalte auch von Physik und Chemie in Klasse 9. Es sollte gut überlegt sein, wie viel Zeit man hierauf noch verwendet. Auch sind Absprachen mit den Kolleginnen und Kollegen aus Physik und Chemie sinnvoll.

### Bohr'sche Frequenzbedingung

(zu 3.5.6 (4) und 3.5.6 (5))

#### Materialien:

Franck-Hertz-Experiment

Arbeitsblatt: 01\_pma\_ab\_franck\_hertz.docx

#### Unterrichtsverlauf (2 Stunden):

Bereits Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) und Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) beschäftigten sich mit der Spektralanalyse und stellten 1859 fest, dass nur das Licht ganz bestimmter Wellenlängen von Atomen absorbiert werden kann. Diese für eine Atomsorte spezifischen Wellenlängen nennt man Absorptions- bzw. Emissionsspektrum des Atoms. Da das Absorptions- bzw. Emissionsspektrum für jedes Atom charakteristisch ist, kann man daraus bestimmen, welches chemische Element die Strahlung absorbiert bzw. emittiert hat. In der Astrophysik kann man mit dieser Methode z.B. die chemische Zusammensetzung der Sternatmosphären bestimmen.

Um die Entstehung von Spektren und die darauf aufbauende Spektralanalyse besser verstehen zu können, sind einige Kenntnisse aus der Atomphysik notwendig. Hierzu lohnt es sich, die Frage, wie Atome auf Stöße von Elektronen reagieren, anhand des Experiments von J. Franck und G. Hertz (Nobelpreis 1925) zu untersuchen. Vorausgehend sollte man eine kurze Wiederholung der Kenntnisse über die Atomphysik aus dem Chemie- und Physikunterricht der Mittelstufe einplanen.

Bei der Durchführung des Franck-Hertz-Experiments ist zu berücksichtigen, dass meist eine Vorheizzeit von bis zu 15 Minuten eingeplant werden muss, bevor Messungen vorgenommen werden können. Diese Zeit kann man nutzen, um mit den SuS den Aufbau des Experiments detailliert zu besprechen, da er leider häufig als „Black Box“ realisiert ist. Dazu und für den weiteren Ablauf des Experiments sowie dessen Interpretation kann das Arbeitsblatt 01\_pma\_ab\_franck\_hertz verwendet werden.



Auf das Vorzeichen der Energie wird hier zunächst bewusst noch nicht eingegangen, das kann man anhand des Wasserstoff-Atoms leichter motivieren.

Im Anschluss daran kann man nun die Spektrallinien des Wasserstoff-Atoms im UV (Lymanserie) erarbeiten.

Die Doppelpfeile zeigen: Führt man einem H-Atom im Grundzustand  $n = 1$  Energie zu, so springt es von dort aus in Zustände mit Quantenzahl  $n > 1$  und der Energie  $E_n$ . Es wird angeregt. Bei Rücksprung  $E_n \rightarrow E_1$  gibt es ein Lichtquant  $\Delta E = E_n - E_1$  mit der Frequenz  $f = \frac{\Delta E}{h}$  ab. So entstehen die Linien der Lyman-Serie.

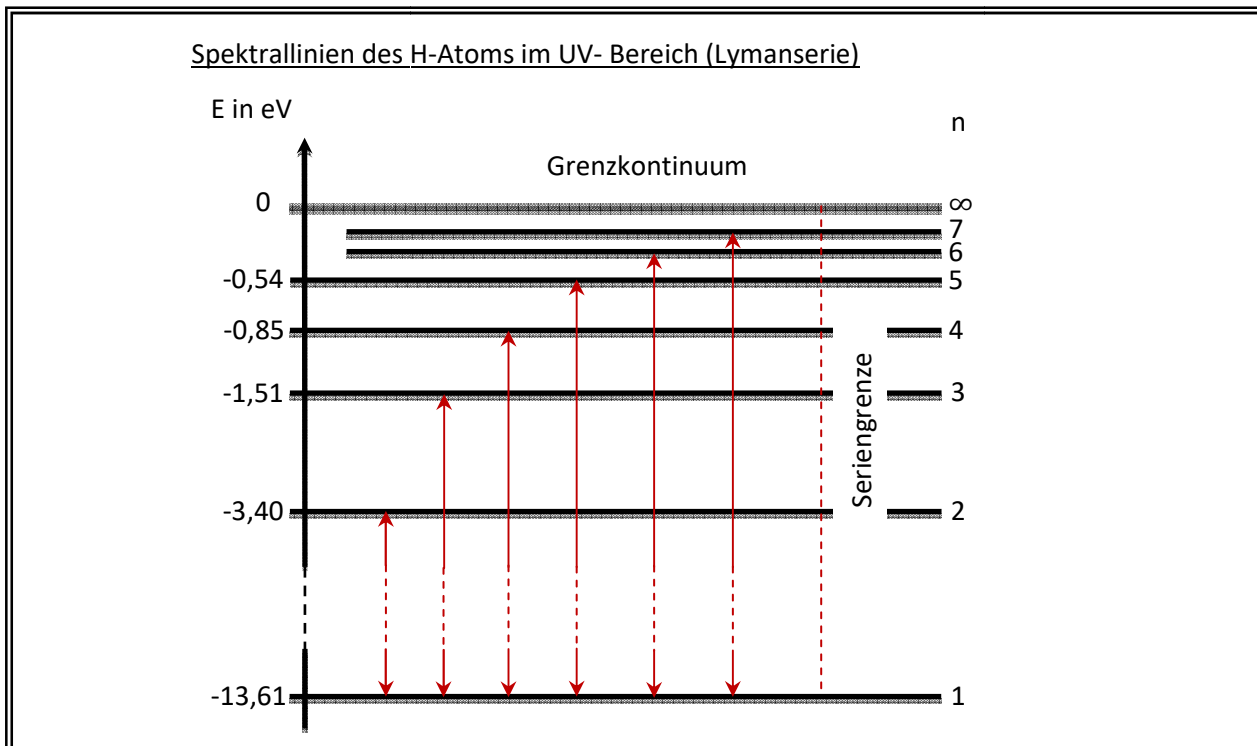
Außerhalb des H-Atoms bewegt sich das Elektron frei, die Energie ist nicht quantisiert. Sie kann beliebig dicht liegende, positive Werte annehmen. Diese bilden das Grenzkontinuum  $E > 0$ . Quantensprünge von dort zu den diskreten Energieniveaus  $E < 0$  erzeugen den kontinuierlichen Teil des Emissionsspektrums des H-Atoms.

Die Energiewerte ermittelt man mit

$$E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Da bei gebundenen Systemen das Nullniveau für die potenzielle Energie im Unendlichen liegt, ergibt sich in der Formel ein negatives Vorzeichen für die Energiewerte. D.h. wenn sich das Elektron dem Kern annähert, wird Energie frei, entfernt man hingegen das Elektron vom Kern, muss Energie aufgewendet werden.

Möglicher Tafelanschrieb:



Grafik: Daniela Bednarski



## Linienpektren von Atomen und Molekülen: Die Balmerlinien beim Wasserstoffatom

(zu 3.5.5 (6), 3.5.6 (4) und 3.5.6 (5))

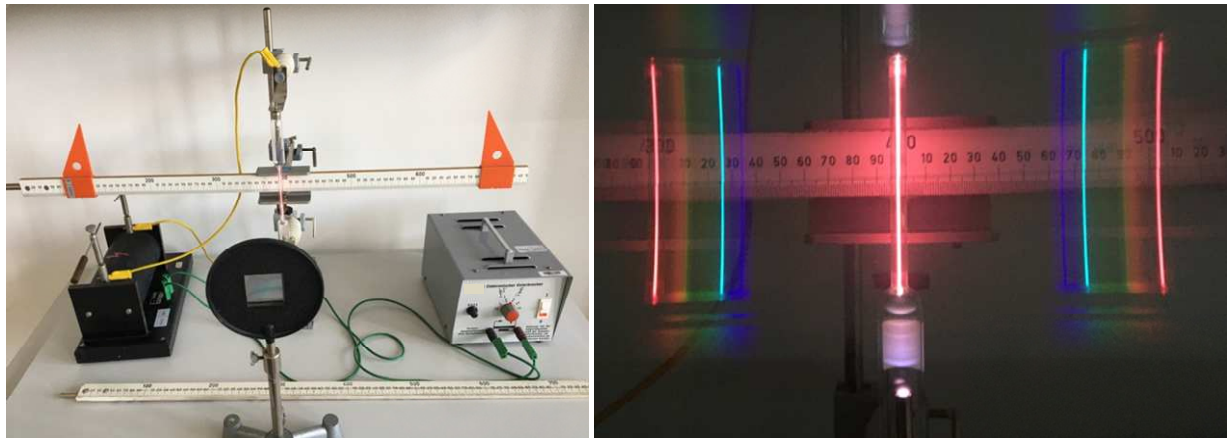
### Materialien:

Experiment zur Bestimmung der Balmerlinien von Wasserstoff (siehe Fotos)

Arbeitsblatt: 02\_pma\_aufgaben\_wasserstoffspektrum.docx

### Unterricht (2 Stunden):

1885 fand der Schweizer Mathematiklehrer Johann Jakob Balmer (1825-1898) ohne Theorie, lediglich durch Kombination der Messwerte, dass die Linien eines Emissionslinienspektrums einem einfachen Gesetz gehorchen. Bisher hatte man in den Spektrallinien keine Gesetzmäßigkeiten gefunden, so dass Balmer mit seiner Entdeckung großes Aufsehen erregte. Seine Formel wurde später durch Erwin Schrödinger theoretisch bestätigt und verallgemeinert.



Bilder: Daniela Bednarski

Möglicher Tafelanschrieb:

### Die Balmerreihe im sichtbaren Bereich

J.J. Balmer fand 1885 folgende Formel für die sichtbaren Spektrallinien des Wasserstoff-Atoms:

$$f = R \cdot \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$R = 3,2898 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$  (Rydberg – Konstante)

$n = 2$  für die Balmerreihe

$m = \text{Startniveau}$

Nun diskutiert man die Entstehung dieser Linien und kann das Energieniveau-Schema der vergangenen Stunde wiederholen und die Balmer-Linien darin ergänzen. Ebenso kann man auf die Paschen-Serie im IR und weitere Serien eingehen.



Die Balmer-Serie des H-Atoms kann man experimentell sehr gut anhand der 4 sichtbaren Linien bestätigen und mit den SuS einen möglichen Aufbau planen und die Messungen durchführen.

Möglicher Tafelanschrieb mit Beispiel-Messwerten:

## Experimentelle Überprüfung der Balmer-Formel

Man beobachtet durch ein optisches Gitter die Kapillare einer mit H<sub>2</sub> gefüllten Spektralröhre. Dort dissoziiert Strom H<sub>2</sub>-Moleküle in H-Atome. Diese werden von stoßenden Elektronen zum Leuchten angeregt. Rechts und links der Kapillare sieht man auf den Maßstab projizierte Balmerlinien.

Berechnung der Wellenlänge der Linien:

$$\tan \alpha = \frac{d}{a} \quad \text{und} \quad \lambda = g \cdot \sin \alpha \quad (k=1)$$

Abstand der Kapillare vom Gitter  $a = 0,71\text{m}$

Gitterkonstante  $g = 1,754 \cdot 10^{-6}\text{m}$

$d$ : Abstand zum 0. Maximum

Farbe	Startniveau	$f_{\text{ber}}$ in $10^{15}\text{Hz}$	$\lambda_{\text{ber}}$ in $10^{-9}\text{m}$	$d$ in m	$\lambda_{\text{exp}}$ in $10^{-9}\text{m}$	Abweichung in %
rot	$m=3$	4,57	657	0,2875	658,3	0,20
blaugrün	$m=4$	6,17	487	0,2060	488,7	0,35
blau	$m=5$	6,91	434	0,1821	435,8	0,41
violett	$m=6$	7,31	411	0,1721	413,2	0,54

Zur Übung können die SuS nun das Arbeitsblatt 02\_pma\_aufgaben\_wasserstoffspektrum bearbeiten.

## **Spektralanalyse**

(zu 3.5.5 (6), 3.5.6 (6) und 3.5.7 (9))

### Materialien:

Präsentation: 02\_pma\_ppt\_spektroskopie.pptx

### Unterricht (2 bis 4 Stunden):

Um den Zusammenhang zur Astrophysik herzustellen, sollte man nun über die Anwendungsmöglichkeiten der Spektralanalyse sprechen. Möchte man dazu nicht allzu viel Zeit aufwenden, kann man das mit Präsentation 01\_pma\_spektroskopie in einer Stunde erledigen. Alternativ eignet sich hierfür jedoch auch das Material aus dem Wahlfach Astronomie (3.1.3, Kapitel 3 „Spektralanalyse“) verwendet werden. Der zeitliche Aufwand hierfür beträgt 2 Stunden, dafür können die SuS mit Hilfe des Programms *Vireo* selbst Spektralanalysen durchführen.



## Zur Präsentation 02 pma ppt spektroskopie:

Um ein Spektrum zu erhalten, zerlegt man das Licht eines Himmelsobjekts entsprechend seiner Farben, so wie das Sonnenlicht beim Durchgang durch einen Regentropfen einen Regenbogen bildet. Die physikalische Größe, mit der man die Farbe angibt, ist die Wellenlänge  $\lambda$  des Lichts, wobei das menschliche Auge Licht zwischen 380 nm und 780 nm wahrnehmen kann.

Untersucht man, wie viel Licht bei welcher Wellenlänge den Detektor eines Teleskops erreicht, kann man viel über die Lichtquelle erfahren.

Ein Stern emittiert in etwa ein kontinuierliches Spektrum, d.h. das von ihm ausgesandte Licht enthält alle Farben. Misst man, bei welcher Wellenlänge das meiste Licht ausgesendet wird, kann man direkt die mittlere Oberflächentemperatur des Sterns berechnen. Diesen Zusammenhang liefert das Wien'sche Verschiebungsgesetz, welches im Labor auf der Erde untersucht und auf Sterne angewandt werden kann. Auf diese Weise kann man die Oberflächentemperatur von Sternen bestimmen.

Bringt man ein Gas durch äußere Anregung zum Leuchten, so sendet es ein Linienspektrum aus. Bei welcher Wellenlänge die Linien erscheinen, hängt vom chemischen Element bzw. Molekül ab. Das Gas kann nur bei den Wellenlängen Licht absorbieren, bei denen es auch Licht emittieren kann. Tritt also das kontinuierliche Licht der Sternphotosphäre durch die Atmosphäre des Sterns, so wird ein Teil des Lichts dort absorbiert. Man sieht dunkle Linien im Sternspektrum. Die Lage dieser dunklen Linien (= Fraunhoferlinien) entspricht der Lage der Emissionslinien der jeweiligen Elemente. Dadurch können Astronomen herausfinden, welche Elemente oder Moleküle in Sternatmosphären vorkommen. Das Element Helium wurde sogar erst durch die Analyse des Sonnenspektrums entdeckt und war bis dahin auf der Erde unbekannt.

Bei der astronomischen Beobachtung zeigen sich solche Effekte häufig. Beispielsweise kann Licht von interstellaren Gas- und Molekülwolken absorbiert werden, man erhält dunkle Absorptionslinien, anhand derer man auf die Zusammensetzung der Gaswolken schließen kann. Das Licht kann allerdings auch polarisiert oder fast völlig verschluckt werden (Dunkelwolken). Man macht sich die Absorption durch Gaswolken bei der Untersuchung der Eigenschaften von Planetenatmosphären zunutze. Man kann so beispielsweise anhand der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und der Temperatur Hinweise auf das Vorhandensein von Leben gewinnen. Auch die Erdatmosphäre verändert das Licht der Sterne durch Aberration und Refraktion. Die Extinktion durch Aerosole und Luftbewegungen in der in der Atmosphäre (Szintillation) beeinflussen zusätzlich den Beobachtungsprozess.

In der Astronomie benutzt man auch zur Erforschung von Sternen häufig deren Absorptionsspektren. Anhand dieser Spektren klassifiziert man Sterne in bestimmte Spektralklassen. Die Sterne gleicher Spektralklasse ähneln sich hinsichtlich Temperatur, Farbe, Alter, etc. (Vergleiche hierzu die Materialien für das Wahlfach Astronomie, Kap. 3.1.3).

## **Kernfusion**

(zu 3.5.6 (7))

Die Kernfusion wird ausführlich auf Seite 30 im Rahmen des Hauptreihenstadiums und der Sonne behandelt.



## 3.5.7 Astrophysik

Der Bildungsplan ist im Abschnitt 3.5.7 insofern ungewöhnlich aufgebaut, als dass er nicht der traditionellen Reihenfolge in der Astronomie „vom Kleinen zum Großen“ folgt. Die Grundintention hierbei war, ausgehend von den Erkenntnissen aus 3.5.4 und 3.5.5 ein Weltbild zu finden, welches zu den experimentellen Daten wie der kosmische Hintergrundstrahlung passt, bevor man sich die einzelnen Komponenten des Kosmos vom Großen zum Kleinen untersucht. Abschnitt 3.5.7 lässt sich alternativ in der üblichen Reihenfolge unterrichten. So oder so soll der Schwerpunkt hier deutlich mehr auf den physikalischen Prozessen liegen als im Wahlfach.

### Die kosmische Hintergrundstrahlung

(zu 3.5.7 (1))

#### Materialien:

Präsentation: 03\_pma\_ppt\_hintergrundstrahlung.pptx

Programme: M. Borchardt: [http://www.mabo-physik.de/plancksche\\_strahlungskurve.html](http://www.mabo-physik.de/plancksche_strahlungskurve.html)

#### Unterricht (1 bis 2 Stunden):

Im Astronomieunterricht steht die Beobachtung im sichtbaren Spektralbereich üblicherweise am Anfang. Ausgehend von den elektromagnetischen Wellen (3.5.4 (6)) kann im Astrophysik-Kurs aber auch ein anderer Zugang gewählt werden. Ein historisch bedeutsamer Moment war die zufällige Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung von Penzias und Wilson im Jahre 1964. Diese Strahlung wurde zwar schon aus der kosmischen Strahlung (Regerer) und theoretischen Überlegungen zum Urknall (Gamow) vorhergesagt, aber die Entdeckung war von Penzias und Wilson nicht beabsichtigt. Anhand von 03\_pma\_ppt\_hintergrundstrahlung.pptx kann man einige Eindrücke davon vermitteln und die Konsequenzen daraus erläutern. Sollte aus 3.5.6 das Wien'sche Verschiebungsgesetz bekannt sein, lässt sich auch vermitteln, wie man aus der Strahlungsleistung bei verschiedenen Wellenlängen auf die Temperatur von 2,728 K schließen kann. Mithilfe der oben verlinkten, kleinen Programme kann man zudem die Planck'sche Strahlungskurve visualisieren (planck.exe) und über einen simulierten Fit auf die Strahlungstemperatur der Hintergrundstrahlung schließen (cmb.exe).

Möglicher Tafelanschrieb:

#### Die kosmische Hintergrundstrahlung

Aus dem gesamten Weltall empfängt man bei einer Wellenlänge von ca. 1 mm bis 1 cm bzw. einer Frequenz ca. 30-300 GHz elektromagnetische Strahlung, die aus allen Richtungen gleich stark ist. Sie entspricht einer Wärmestrahlung, die von einem 3 K kalten Körper emittiert würde.

Diese Strahlung wird als kosmische Hintergrundstrahlung bezeichnet. Sie wurde mithilfe von Satelliten wie COBE, WMAP oder Planck sehr genau vermessen. Das Universum scheint in alle Richtungen die gleiche Temperatur zu haben. Dies ist ein Hinweis darauf, dass auch weit entfernte Regionen zu einem frühen Zeitpunkt miteinander in Kontakt standen, das Universum also womöglich viel kleiner gewesen sein müsste als es heute ist.

Für diese Vermutung findet man im nächsten Abschnitt bei der Bestimmung der Radialgeschwindigkeiten der Galaxien ein weiteres Indiz.





Empfehlenswerte Links:

[Faszination Astronomie Online: Spurensuche in der Restwärme des Urknalls](https://www.youtube.com/watch?v=mcJRjbcRjd0)

<https://www.youtube.com/watch?v=mcJRjbcRjd0>

(auch für eine Unterrichtsstunde geeignet. Dauer: 41:25)

## **Hubble-Lemaître-Relation und die Expansion des Universums**

(zu 3.5.7 (1) und 3.5.7 (3))

### Materialien:

Die VIREO-Übung „The Hubble Redshift-Distance-Relation“ einmal selbst durchführen, Arbeitsblatt 03\_pma\_ab\_Hubble.docx, Excel-Dokument 03\_pma\_ab\_hubble.xlsx in den Tauschordner legen. Eine Videoanleitung (Hubble-Relation.mp4) ist vorhanden.

### Notwendiges Vorwissen der Schüler:

Die Rot- bzw. Blauverschiebung einer Spektrallinie als Messgröße für die Radialgeschwindigkeit sollte den Schülern aus 3.5.4 (5) noch bekannt sein.

### Unterricht (3 Stunden):

In diesem Themenfeld sollen die Schüler, ausgehend von selbstgewonnen Messdaten der Radialgeschwindigkeit der Galaxien, auf die Expansion des Universums schließen. Das Ziel ist, den Gedankengang von den Messwerten zur Schlussfolgerung so nachvollziehbar wie möglich zu gestalten. Dabei sollen die Schüler den größten Weg zur Erkenntnis möglichst selbst gehen können. Der Begriff der Galaxie wird in diesem Unterrichtsgang zunächst als Arbeitsbegriff für Objekte verwendet, die als abgeschlossen betrachtet werden und nicht miteinander in Austausch stehen. Erst im Anschluss werden diese näher beleuchtet.

Am Anfang stehen die Messwerte zur Rotverschiebung der Galaxien. Hier bietet es sich wieder an, VIREO zu benutzen. Das Modul „The Hubble Redshift-Distance-Relation“ erlaubt es, die Spektren von dreizehn voreingestellten Galaxien zu vermessen. Darüber hinaus kann man auch eigene Galaxien ansteuern, deren Koordinaten man sich z.B. via Wikipedia verschaffen kann.

Das Ergebnis der Messung ist die Rotverschiebung der Galaxien, aus der man deren Radialgeschwindigkeit direkt berechnen kann. In allen Fällen erhält man tatsächlich eine Rotverschiebung, nicht eine Blauverschiebung, d.h. alle untersuchten Galaxien bewegen sich von uns weg. Für das Hubble-Diagramm benötigt man nun „nur noch“ die Entfernung der Galaxien. Verwendet man moderne Daten, erhält man mithilfe der experimentell gefundenen Rotverschiebungen bzw. Radialgeschwindigkeiten einen zeitgemäßen Wert für die Hubble-Konstante.

An dieser Stelle werden die Entfernungen zu den Galaxien als unbekannter Wert angegeben, da man sich in diesem Kurs mit keiner Methode der Entfernungsbestimmung auseinandersetzt. Sollte Zeit dafür bestehen, kann man in den ZPG-Materialien des Wahlfaches Astronomie sowohl im Abschnitt Sterne und ihre Planeten (01\_sup\_ab\_entfernungsbestimmung) sowie im Abschnitt Struktur des Universums (02\_sdu\_ab\_cepheidenmethode) passendes Unterrichtsmaterial finden.



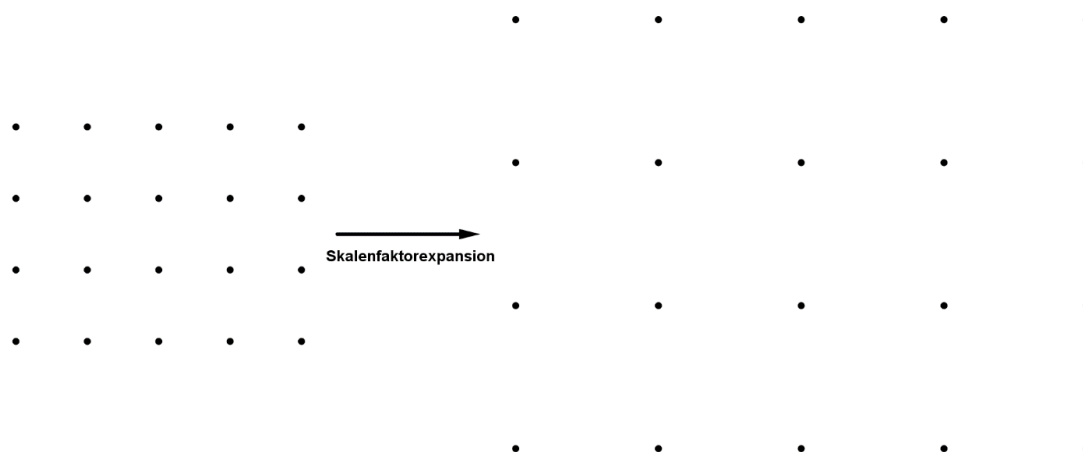


Die Datei 04\_pma\_tausch\_hubble.xlsx enthält die Grundlage für die gesamte Auswertung. Je nachdem, wie viel eigenständiges Arbeiten mit einem Tabellenkalkulationsprogramm man den Schülern zutraut, kann man Teile der vorbereiteten Auswertung löschen. Bei maximalem Komfort müssten die Schüler nur die Spalten B und C (gemessene Wellenlänge und Laborwellenlänge) eigenständig befüllen. Abgesehen von Spalte F (Abstände) kann der Rest schadlos gelöscht werden, erfordert dann aber mehr Zeit und Können seitens der Schüler.

Nachdem nun die Erkenntnis gewonnen – angesichts des Vorwissens der Schüler vielleicht eher bestätigt – wurde, dass sich die meisten Galaxien von uns weg bewegen, muss im nächsten Schritt der Grund dafür gefunden werden. Da es sich historisch stets als falsch erwiesen hatte, uns ins Zentrum der Welt zu stellen, müssen wir eine Erklärung finden, die für jeden Beobachter in jeder Galaxie das Ergebnis liefert, dass sich alle Galaxien von uns weg bewegen.

Wie im Wahlfach Astronomie bietet es sich auch hier an, die Situation einmal nachzustellen. Die Schüler werden z.B. in einem ausgefüllten Rechteck aufgestellt, sodass jeder Schüler vom Nachbarn eine Entfernung von einem Meter hat. Im nächsten (Zeit-)Schritt sollen sich alle Entfernungen verdoppeln, d.h. die Entfernung zu jedem Nachbar beträgt dann zwei Meter. Nun kann man die Schüler zum Beispiel wie folgt befragen:

1. Wie weit war dein nächster Nachbar  $x$  vorher von dir entfernt, wie weit ist er es jetzt?  
A: Erst 1 m, dann 2 m
2. Mit welcher Geschwindigkeit hat er sich also von dir weg bewegt? A: 1 m / Zeiteinheit
3. Wie weit war dein übernächster Nachbar vorher von dir entfernt, wie weit ist er es jetzt? A: Erst 2 m, dann 4 m
4. Mit welcher Geschwindigkeit hat er sich also von dir weg bewegt? A: 2 m / Zeiteinheit



Diese Aussage gilt für jeden Schüler. Jeder beobachtet also, dass sich doppelt (dreifach usw.) so weit entfernte Schüler doppelt (dreifach usw.) so schnell von einem weg bewegen. Diese Skalenfaktorexpansion, also das Vervielfachen aller Längen mit dem gleichen Faktor, erklärt auf natürliche Weise dieses mysteriöse Ergebnis, dass sich alle Galaxien von uns weg bewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie von uns entfernt sind.



Möglicher Tafelanschrieb:

## Die Hubble-Lemaître-Beziehung

Die Auswertung der Radialgeschwindigkeitsdaten von Galaxien führt zu dem Ergebnis, dass sich alle untersuchten Galaxien von uns wegzubewegen scheinen. Da wir kein besonderer Beobachter im Universum sein sollten, würde dies bedeuten, dass sich alle Galaxien voneinander wegbewegen. Dieses Verhalten ergibt sich natürliche Art und Weise, wenn man davon ausgeht, dass der Raum zwischen den Galaxien größer wird. So wie sich in einem aufgehenden Rosinenbrötchen alle Rosinen voneinander wegbewegen, entfernen sich auch (fast) alle Galaxien voneinander.

Aus den Messwerten folgt sogar ein proportionaler Zusammenhang:  $v = H_0 \cdot r$ , wobei  $H_0$  als Hubble-Parameter oder manchmal auch Hubble-Konstante bezeichnet wird. Sein Wert beträgt zwischen 68 und 74 km/s pro Megaparsec.

Videoempfehlung:

[M. Pössel: Das Universum expandiert - aber was heißt das?](https://www.youtube.com/watch?v=9mGdDuR5xTI&list=PLIVHa_QX2TZTSdfg64x6oXQjaGef9dfw9&index=51)

[https://www.youtube.com/watch?v=9mGdDuR5xTI&list=PLIVHa\\_QX2TZTSdfg64x6oXQjaGef9dfw9&index=51](https://www.youtube.com/watch?v=9mGdDuR5xTI&list=PLIVHa_QX2TZTSdfg64x6oXQjaGef9dfw9&index=51)

## **Kosmologie**

(zu 3.5.7 (1) und 3.5.7 (3))

Materialien:

Präsentation: 04\_pma\_ppt\_kosmologie.pptx

Videoempfehlung (s.u.).

Notwendiges Vorwissen der Schüler:

Das Wien'sche Verschiebungsgesetz sollte aus 3.5.6 bekannt sein.

Unterricht (2 Stunden):

Nachdem in den Stunden zur Hubble-Relation die Gedankengänge nachvollzogen wurden, die zur Expansionshypothese des Universums führten, kann dieser Gedanke nun zeitlich zurück und auch nach vorne entwickelt werden. Wenn das Universum expandiert, war es früher also kleiner als jetzt. Doch wie weit kann dies zurückgerechnet werden? Auf Basis welcher Gleichungen und welcher Messwerte? Ist die zukünftige Entwicklung genauso berechenbar? Dies sind Fragen, die im Unterricht von den Schülern gestellt werden können. Ein Einstieg könnten die Videoempfehlungen zum Thema Urknall oder der kosmischen Hintergrundstrahlung sein, die in dieser Doppelstunde diskutiert und erweitert werden. Eine mathematische Beschreibung wird auch in diesem Kurs nicht das Ziel sein.

Da die Schüler in diesem Bereich oft etwas Vorwissen mitbringen, kommt man schnell auf den Urknall, also die Vermutung, dass das Universum mit einem singulären Ereignis begann. Wer auf dem Arbeitsblatt zur Hubble-Beziehung auch Zusatz 3 bearbeitet hat, wird schon den Zeitpunkt des Beginns ungefähr bestimmt haben, die Hubble-Zeit  $1 / H_0$ . Der Literaturwert für das Alter des Universums ist 13,8 Milliarden Jahre, u.a. da die Annahme der zeitlich konstanten Expansion nicht korrekt ist.



Die Schüler sollen im Folgenden eine Vorstellung von der Frühphase des Universums entwickeln und dabei insbesondere die Erkenntnis gewinnen, dass das Universum früher heiß war, so heiß, dass sich Atome noch gar nicht gebildet haben. Aus 3.5.6 kennen die Schüler schon das Wien'sche Verschiebungsgesetz. Daraus lässt sich direkt zeigen, wie sich die Temperatur der Photonen in Abhängigkeit vom Skalenfaktor ändert.

Möglicher Tafelanschrieb:

## Kosmologie

Das Universum expandiert. Denkt man diesen Prozess rückwärts, begann es vor etwa 13,8 Mrd. Jahren in einem Punkt in einem Ereignis, das man Urknall nennt. Denkt man diesen Prozess vorwärts, so wird der Abstand zwischen den Galaxien mit der Zeit immer größer. Man kann sich vorstellen, dass, großräumig betrachtet, alle Strecken im Universum mit einer Zahl, dem Skalenfaktor, multipliziert werden, der mit der Zeit immer größer wird.

Diese Skalenfaktorexpansion beeinflusst auch die Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Da das Wien'sche Verschiebungsgesetz für alle Zeiten gilt, kann daraus ein Zusammenhang zwischen Skalenfaktor und Strahlungstemperatur gewonnen werden:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,898 \text{ mm} \cdot K$$

$$\lambda_{max} \cdot \frac{a}{a} \cdot T = 2,898 \text{ mm} \cdot K$$

$$(\lambda_{max} \cdot a) \cdot \left(\frac{T}{a}\right) = 2,898 \text{ mm} \cdot K$$

Dabei entspricht das Produkt  $\lambda_{max} \cdot a$  der Wellenlänge der Photonen, die in der Vergangenheit, also bei einem Skalenfaktor kleiner eins, kleiner war, und  $\frac{T}{a}$  ist die Temperatur in der Vergangenheit, die in der Frühphase des Universums, also für  $a \rightarrow 0$ , beliebig groß war.

Rechnet man diesen Prozess rückwärts, dann kommt man zu einer Phase, in der das Gas nicht in atomarer Form vorlag, sondern ionisiert war. Da ein dichtes Plasma undurchsichtig ist, konnte Licht im Universum erst große Distanzen zurücklegen, als sich atomarer Wasserstoff bildete, zwischen 220000 und 340000 Jahre nach dem Urknall. Dieses erste Licht erreicht uns noch heute als Hintergrundstrahlung. In der Datei 04\_pma\_ppt\_kosmologie sind geeignete Bilder hinterlegt, um den Schülern im Gespräch diese frühe Phase des Universums näherzubringen.

Der Weg von der Bildung der ersten Atome zu der Entstehung von Galaxien ist auch heute noch nicht im Detail geklärt. Nach der Rekombination sinkt die Temperatur des Gases durch die Expansion des Universums stärker als die der Hintergrundstrahlung. Für die Struktur- bildung benötigt man in den kosmologischen Simulationen aber auch noch Dunkle Materie, die mit der Hintergrundstrahlung überhaupt nicht wechselwirkt. Diese Komponente des Universums kann man hier schon einmal ansprechen. Im Kapitel über Dunkle Materie wird den Schülern plausibel gemacht, wie man auf die verrückt anmutende Idee kommt, dass das Universum vor allem aus Materie besteht, für die sich noch kein direkter experimenteller Nachweis finden ließ. Alternativ könnte man das in diesem Abschnitt noch Folgende auch erst besprechen, wenn man alle notwendigen Komponenten des kosmologischen Standard- modells hier besprochen hat. Auf die Dunkle Energie wird hier mangels wissenschaftlicher Erkenntnisse nicht eingegangen.



Fortsetzung Tafelanschrieb:

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist eine nahezu isotrope, kontinuierliche Strahlung, d.h. sie ist in alle Richtungen nahezu identisch und kam durch die Temperatur des Gases im frühen Universum zustande. Es gibt nur sehr kleine Schwankungen, in deren Mustern sich aber Informationen über unser Universum verstecken. So kann man aus der Hintergrundstrahlung unter der Annahme Dunkler Materie den Energieanteil der Dunklen Materie relativ zur normalen Materie bestimmen. Auch kann man die globale Krümmung des Universums bestimmen, die nach aktuellen Erkenntnissen nahezu oder exakt null ist. Laut der Daten beträgt die Größe des beobachtbaren Universums aktuell ca. 14,3 Milliarden Parsec bzw. 46,6 Milliarden Lichtjahre.

Hiernach ist für die Schüler erfahrungsgemäß der Blick in die Zukunft sehr interessant. Die Datei 04\_pma\_ppt\_kosmologie enthält Grafiken, die bei der Beschreibung helfen können. Wichtig ist hier klarzustellen, dass die zukünftige Entwicklung einerseits mit der uns bekannten Physik vollständig beschrieben werden kann, andererseits aber die Qualität dieser Beschreibung von Größen wie dem Energieinhalt des Universums zur heutigen Zeit abhängen, der nicht genau bekannt ist. Das beliebte  $\Lambda$ CDM-Modell, kurz für ein Modell mit kalter, dunkler Materie und Dunkler Energie, auch als kosmologisches Standardmodell bezeichnet, geht von 4,5 % baryonischer Materie, 26,4 % Dunkler Materie und 69,1 % Dunkler Energie aus, basierend auf den Daten des Planck-Satelliten. Allerdings stehen die Daten der Planck-Kollaboration, insbesondere bzgl. des Hubble-Parameters, in statistisch signifikantem Widerspruch zu „lokalen“ Messungen über Standardkerzen wie Cepheiden und Typ-Ia-Supernovae.

Fortsetzung Tafelanschrieb:

Die zukünftige Entwicklung des Universums lässt sich mithilfe physikalischer Gleichungen basierend auf aktuellen Messwerten vorhersagen. Die Expansion des Universums beschleunigt sich, wodurch mit der Zeit der Abstand zwischen den Galaxien immer schneller größer werden wird. In (auch astronomisch gesehen) ferner Zukunft wird sich der Nachthimmel so verändert haben, dass sich Galaxien nicht mehr beobachten lassen.

Hinweis: Es mag verführerisch erscheinen, aus der aus 3.5.6 bekannten Bindungsenergie des Wasserstoffatoms die Temperatur bei der Rekombination aus  $k_B \cdot T$  zu folgern. Dies liefert aber einen falschen Wert. Die Rekombination fand bei einer thermischen Energie des Photonengases von ca. 0,3 eV statt. Da es etwa 1,5 Mrd. mal so viele Photonen wie Baryonen im Universum gibt, sind bei 13,6 eV noch zu viele hochenergetische Photonen in der Planck-Verteilung, die ein Wasserstoffatom wieder zerstören können.

Videoempfehlungen:

**M. Bartelmann: Woher wissen wir, dass es einen Urknall gab?**

[https://www.youtube.com/watch?v=kEUiWfEU8Jw&list=PLIVHa\\_QX2TZTSdfg64x6oXQjaGef9dfw9&index=3](https://www.youtube.com/watch?v=kEUiWfEU8Jw&list=PLIVHa_QX2TZTSdfg64x6oXQjaGef9dfw9&index=3)

**J. Gaßner: Expandierende Raumzeit und Dunkle Energie**

<https://www.youtube.com/watch?v=kjWbusZQaC0>

**Faszination Astronomie Online: Spurensuche in der Restwärme des Urknalls**

<https://www.youtube.com/watch?v=mcJRjbcRjd0>



## Galaxien als zusammengesetzte Systeme

(zu 3.5.7 (2))

### Materialien:

[Hochaufgelöstes Bild der Andromedagalaxie](#)

<https://www.spacetelescope.org/images/heic1502a/>

[Selbiges Bild, zoombar im Browser](#)

<https://www.spacetelescope.org/images/heic1502a/zoomable/>

[Milchstraße, zoombar im Browser](#)

<https://www.eso.org/public/images/eso1242a/zoomable/>

Präsentation: 05\_pma\_ppt\_galaxien.pptx

### Notwendiges Vorwissen der Schüler:

Keines.

### Unterricht (1 bis 2 Stunden):

Nachdem man sich mit den großen Skalen im Kosmos auseinandergesetzt hat, folgt nun der Blick auf die kleineren Strukturen, nämlich die Galaxien. Diese Stunden sind vor allem beschreibender Natur. Mithilfe beeindruckender Bilder können wir der Natur der Galaxien und ihrer Komponenten auf die Spur kommen.

Der Ausgangspunkt ist die Andromedagalaxie oder M31, die sich als Nachbargalaxie der Milchstraße besonders gut beobachten lässt. Die Milchstraße selbst bietet sich zunächst nicht an, um Galaxien zu untersuchen, da wir sie als Teil dieser Galaxie nicht in ihrer Gänze beobachten können. Dorthin kommen wir aber natürlich noch zurück.

Im Material sind Bilder der Andromedagalaxie verlinkt. Entweder lädt man diese in hoher Auflösung vorher herunter und zoomt mithilfe eines Bildbetrachtungsprogramms, oder wählt den Link für den Browser. Man sieht zunächst einen Ausschnitt der Andromedagalaxie. Zum Vergleich könnte man z.B. mithilfe von Stellarium die gesamte Andromedagalaxie beobachten. In dieses hochaufgelöste Bild kann man nun schrittweise hineinzoomen. Dabei werden, je nachdem wo man dies tut, verschiedene Dinge sichtbar: Bereits ohne Zoom sind einzelne Sterne sichtbar. Diese gehören nicht zu Andromeda, sondern zur Milchstraße. Es sind deutlich nähere Feldsterne, die wie ein Vorhang vor uns liegen, während wir uns für das weit entfernte Objekt interessieren. Vergrößert man immer weiter, erhält das Bild eine gewisse Körnigkeit. Wenn man stark vergrößert hat, sieht man viele blaue, gelbe und orange Punkte. Dies sind tatsächlich die einzelnen Sterne der Galaxie. Jeder einzelne Punkt ist ein Stern, wie auch unsere Sonne einer ist. Hat man einen Bereich links unten im Bild ausgewählt, sind die Punkte fast ausnahmslos von gelber oder oranger Farbe, während man in den Außenbereichen der Galaxie auch viele weiß und bläulich scheinende Punkte sieht. Weiter außen gibt es auch deutliche Unterschiede bzgl. der Sterndichte: In den im Gesamtbild dunkler erscheinenden Gebieten ist die Dichte der sichtbaren Sterne deutlich kleiner. Dies ist nur ein scheinbarer Effekt, da Dunkelwolken das Licht der Sterne dahinter absorbieren.

Möglicher Tafelanschrieb:

### Galaxien als zusammengesetzte Systeme

Galaxien wie die Andromedagalaxie bestehen vor allem aus vielen Milliarden Sternen. In einigen Bereichen lassen sich auch ausgedehnte Gaswolken erkennen, die von den Sternen zum Leuchten angeregt werden, oder die das Licht der Sterne reflektieren. Zudem gibt es sogenannte Dunkelwolken, die das Licht der dahinter liegenden Sterne absorbieren. Gas- und Dunkelwolken sind Teil dieser Galaxien und werden als interstellare Materie bezeichnet.



Um nicht den Eindruck zu erwecken, dass alle Galaxien wie die Andromedagalaxie aussehen, können nun mithilfe der Präsentation 05\_pma\_ppt\_galaxien weitere Bilder von Galaxien gezeigt werden, in denen auch andere Spiralgalaxien, aber auch elliptische und irreguläre Galaxien vorkommen. Dabei werden morphologische Unterschiede deutlich, die die Schüler benennen können: Bei elliptischen Galaxien ist keine innere Struktur zu erkennen, außer der Abnahme der Sterndichte von innen nach außen. Spiralgalaxien sind dagegen sehr reich an Strukturen wie den bläulichen, von Dunkelwolken durchsetzten Spiralarme, dem gelb-orangen Bulge, und haben eine klare Anordnung der Sterne in einer relativ flachen Scheibe.

Fortsetzung Tafelanschrieb:

Galaxien lassen sich in drei verschiedene Gruppen einteilen:

**Irreguläre Galaxien:** Diese haben kein erkennbar reguläres Muster

**Elliptische Galaxien:** Dies sind kugelförmige Galaxien, manchmal auch etwas in die Länge gezogen, deren Helligkeit von innen nach außen stark abnimmt. Es gibt nur kaum innere Struktur. Sie erscheinen in der Farbaufnahme gelb bis rötlich.

**Spiralgalaxien:** Die Sterne in Spiralgalaxien sind in einer flachen Scheibe angeordnet, sodass sie von der Kante betrachtet ganz anders aussehen als von oben. Die Scheibe ist stark strukturiert. Es gibt rot leuchtende Nebel sowie Bänder blauer Sterne mit dunklen Bereichen dazwischen, die man Spiralarme nennt.

Auf den Zusammenhang zwischen der Farbe und dem mittleren Alter der Sternpopulation kann an dieser Stelle im Unterricht nicht eingegangen werden, da man sich mit Sternentwicklung noch nicht beschäftigt hat.

Statt der vorgeschlagenen Präsentation bietet sich auch ein Aufsuchen der Objekte in Stellarium an. Die Schüler könnten die Galaxien entweder anhand geeigneter Suchbegriffe oder frei herumzoomend selbst entdecken.

Diese herausgearbeiteten morphologischen Merkmale lassen sich nun auf unseren Sternhimmel anwenden. Entweder mithilfe von Stellarium oder einer Website wie im Material verlinkt, die ein zoombares Bild der Milchstraße liefert, kann man Strukturen wie die Dunkelwolken und die roten HII-Regionen in der Milchstraße wiederfinden. Dies zusammen mit der hohen Sterndichte entlang eines Bandes am Himmel und den blauen Sternen wie im Gürtel des Orions sind ein plausibler Beleg dafür, dass die Milchstraße eine Spiralgalaxie ist. Der Ort der Sonne in der Milchstraße und ihre Bewegung ums Zentrum können mitgeteilt werden.

Weiterer Tafelanschrieb:

Die Milchstraße ist eine Spiralgalaxie. Sie besteht aus der dünnen Scheibe, die von Sternentstehungsgebieten – den Spiralarmen – durchsetzt ist. In der Mitte befindet sich die zentrale Verdickung, auch Bulge genannt. Die Sonne befindet sich 8kpc vom galaktischen Zentrum entfernt im Orionarm, einem recht staubfreien Bereich. Sie bewegt sich mit ca. 260km/s durch die Milchstraße und benötigt für einen Umlauf etwa 220 Millionen Jahre.

Videoempfehlung:

[Haus der Astronomie: Sterne in der Andromedagalaxie](https://www.youtube.com/watch?v=hAta7Ozdms)

<https://www.youtube.com/watch?v=hAta7Ozdms>





## Dunkle Materie

(zu 3.5.7 (2))

### Materialien:

Arbeitsblatt: 05\_pma\_ab\_galaxienrotationskurve.docx

Mit den Programmen aus 06\_software: galaxrot\_1.exe und galaxrot\_2b.exe selbst arbeiten.

Links\_DM.txt; Videoempfehlungen s.u.

### Notwendiges Vorwissen der Schüler:

Die Schüler müssen auf die Kreisbewegung einschließlich der Zentripetalkraft zurückgreifen können. Zudem sollten sie noch den Doppler-Effekt aus 3.5.4 kennen.

### Unterricht (3 Stunden):

Eine GFS, vorzugsweise von einem guten Schüler, ist durchaus geeignet und durchaus auch seitens der Schüler beliebt, um in dieses Thema überblicksartig einzusteigen. Erfahrungsgemäß ist dies eine gute Grundlage, ersetzt aber beim Verständnis dieser komplexen Thematik nicht den nachfolgenden Unterrichtsgang, während dem es auch schadlos zu Dopplungen mit der GFS kommen kann. Dem Verständnis des Themas ist dies zuträglich.

Um das Problem der Dunklen Materie zu verstehen, müssen die Schüler zunächst eine Vermutung darüber aufstellen, nach welcher Gesetzmäßigkeit sich die Sterne in einer Spiralgalaxie bewegen sollten. Ein Rückgriff auf das bekannte Sonnensystem ist hier hilfreich.

Die Schüler sollen erklären, wie sich im Sonnensystem die Geschwindigkeiten der Planeten in Abhängigkeit von der Entfernung der Sonne verändern. Dafür greifen sie auf die Gravitationskraft zurück, die hier als Zentripetalkraft wirkt. Wir bleiben hier wie üblich in der Näherung durch Kreisbahnen.

Möglicher Tafelanschrieb:

### Dunkle Materie

Im Sonnensystem hängt die Bahngeschwindigkeit der Planeten von der Masse  $m_S$  der Sonne und dem Abstand  $r$  des Planeten zur Sonne ab.

$$G \cdot \frac{m_P \cdot m_S}{r^2} = \frac{m_P \cdot v^2}{r}$$
$$v = \sqrt{\frac{G \cdot m_S}{r}}$$

Die Geschwindigkeit nimmt also mit zunehmender Entfernung ab. Es ist  $v \sim \sqrt{\frac{1}{r}}$ .

In einer Spiralgalaxie ist im Gegensatz zum Sonnensystem nicht nahezu die gesamte Masse an einer Stelle konzentriert. Dass diese Annahme im obigen Anschrieb steckt, sollte mit den Schülern erst einmal besprochen werden. Die Zentralmasse, im Sonnensystem die Masse der Sonne, nimmt in einer Spiralgalaxie mit zunehmender Entfernung vom galaktischen Zentrum immer weiter zu, da sich immer mehr Sterne innerhalb der betrachteten Bahn ums Zentrum befinden. Daher ist die Masse auch eine Funktion des Radius. Im Sonnensystem ist dies natürlich ebenfalls so, nur sind die Planetenmassen zu klein, um einen nennenswerten Einfluss zu haben.





Qualitativ könnten die Schüler vermuten, dass mit zunehmender Masse auch die Bahngeschwindigkeit ansteigt. Wichtig ist aber vor allem zu erkennen, dass, wenn man Bahnen am Rand einer Spiralgalaxie betrachtet, aufgrund der geringeren Sterndichte kaum noch Masse hinkommen sollte. Daher hat man dort wieder eine vergleichbare Situation wie im Sonnensystem.

Fortsetzung Tafelanschrieb:

In einer Spiralgalaxie ist nicht die gesamte Masse im Zentrum konzentriert, sondern in den Sternen verteilt. Je größer der betrachtete Bahnradius ist, desto mehr Masse befindet sich innerhalb der Bahn. Die Masse steigt weiter an, bis neue Sterne kaum noch etwas beitragen. Für Bahnen am Rande einer Spiralgalaxie erwartet man daher wieder einen Abfall der Bahngeschwindigkeit, genauso wie im Sonnensystem.

Nun ist es an der Zeit, auf die Messwerte zu blicken. Dies kann man entweder lehrerzentriert demonstrieren, oder die Schüler selbst entdecken lassen. In beiden Fällen verwendet man die Programme *galaxrot\_1.exe* und *galaxrot\_2b.exe*, siehe 6\_software. Ein Arbeitsblatt für die Schüler findet sich unter 05\_pma\_ab\_rotationskurve. Die weiteren Tafelanschriebe gehen von der lehrerzentrierten Form aus. Bei der schülerzentrierten Variante notieren sich die Schüler ihre Erkenntnisse auf dem Arbeitsblatt. Die Zeitplanung geht von der schülerzentrierten Variante aus.

Anhand des ersten Programms wird das Messprinzip erläutert. Das Radioteleskop empfängt je nach Orientierung die 21 cm-Strahlung des neutralen Wasserstoffs der Galaxie. Den Beobachtungsort in der Galaxie kann man verschieben und sieht im Fenster auf der rechten Seite, wie sich die Frequenz der 21 cm-Strahlung aufgrund des Dopplereffekts verändert. Die Rotationsgeschwindigkeit wird im Programm direkt angezeigt. Sie zeigt vom Zentrum der Galaxie ausgehend den erwarteten Anstieg, bleibt dann aber auch am sichtbaren Rand der Galaxie weiterhin konstant. Dies ist ein klarer Widerspruch zur Erwartung. Über den Info-Knopf können die Schüler weitere Details der Messung erfahren.

Dieses Messverfahren untersucht die Bewegung des Gases in der Galaxie. Eine Untersuchung der Sternengeschwindigkeiten über die Radialgeschwindigkeit liefert für die Sterne das gleiche Ergebnis.

Fortsetzung Tafelanschrieb:

In einer Spiralgalaxie steigt die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne vom Zentrum aus an, fällt dann aber nicht wie erwartet ab, sondern verharrt auf einem konstanten Wert. Dies bedeutet, dass die Gravitationskraft auf die Sterne nach außen hin unerwartet groß wird.

Der Grund hierfür ist Gegenstand aktueller Forschung und keineswegs abschließend geklärt. Daher soll den Schülern verschiedene Erklärungsansätze geliefert werden. Im Unterrichtsgespräch kann schnell thematisiert werden, dass sich z.B. in der Galaxie Materie befindet, die man nicht sieht, weil sie kein oder so wenig Licht ausstrahlt oder streut, dass man sie noch nicht nachweisen kann. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass das Newton'sche Gravitationsgesetz zur Berechnung der Sternengeschwindigkeiten unzulänglich ist.



Dunkle Materie ist ein einfaches Modell, welches die Abweichung erklären kann. Zudem ist es das Modell, welches die Schüler am ehesten als Vorwissen mitbringen. Mithilfe des Programms *galaxrot\_2b.exe* können entweder die Schüler selbständig oder die Lehrkraft zentral die Rotationsgeschwindigkeiten der Galaxie NGC3198 mithilfe von zunächst nur normaler Materie und anschließend unter Hinzunahme Dunkler Materie simulieren. Es wird schnell klar, dass der Innenbereich zwar mithilfe normaler Materie richtig abgebildet werden kann, die Außenbereiche aber ohne Dunkle Materie nicht zu beschreiben sind. Zudem bekommen die Schüler ein Gefühl dafür, wie man mithilfe von Parameteranpassung das Verhältnis von normaler zu Dunkler Materie finden kann.

Fortsetzung Tafelanschrieb:

Das Modell der Dunklen Materie liefert eine mögliche Erklärung dafür. Sie ist eine noch nicht experimentell nachgewiesene Materieform, die nicht mit Licht und nur sehr schwach oder gar nicht mit normaler Materie wechselwirkt. Sie macht sich daher vor allem durch die Gravitation bemerkbar. In einer Spiralgalaxie müsste sie etwa 80% der gesamten Masse ausmachen, um das beobachtete Rotationsprofil zu erklären.

Für die Dunkle Materie gibt es in der Elementarteilchenphysik zwar Kandidaten, aber keine überzeugenden experimentellen Nachweise. Im Lehrervortrag kann ein Überblick gegeben werden. Die Datei Links\_DM.txt umfasst einige Links zum aktuellen Forschungsstand für diejenigen, die einen tiefen Einblick in das Thema wünschen. Bemerkenswert sind hier sowohl die signifikanten jahreszeitlichen Schwankungen der DAMA/LIBRA-Kooperation, als auch die Nullresultate der XENON-Experimente, die im Widerspruch zueinander stehen.

Abschließend kann man auf die zweite, naheliegende Option eingehen, das Problem der flachen Rotationskurven aufzulösen: die Modifikation des Gravitationsgesetzes. Der bekannteste Ansatz ist MODifiedNewtonian Dynamics (MOND). Diese nicht-relativistische Theorie braucht dafür im Unterricht nicht in Formeln dargestellt werden. Erwähnenswert ist aber, dass aus ihr direkt die Tully-Fisher-Relation, also der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit der Sterne und Leuchtkraft der gesamten Spiralgalaxie ( $L \sim v^3$  bei 400 nm), als Vorhersage folgt. Dieser Zusammenhang ist aus Sicht des Modells der Dunklen Materie nicht zu erwarten, da bis auf Gravitation sich Dunkle Materie und normale Materie unabhängig voneinander verhalten und daher in Galaxien beide Materieformen in unterschiedlichen Anteilen vorkommen könnten und sollten.

Fortsetzung Tafelanschrieb:

Für die Existenz Dunkler Materie gibt es noch keinen überzeugenden experimentellen Nachweis. Zudem ist sie nicht die einzige Möglichkeit, das Rotationsprofil einer Spiralgalaxie zu erklären. Die Abweichung des Rotationsprofils von der Erwartung kann auch darauf hindeuten, dass das Gravitationsgesetz modifiziert werden muss. Aber auch dieser Erklärungsansatz kann noch nicht alle Messergebnisse, die mit der Dunklen Materie in Verbindung gebracht werden, vollständig erklären.

Weitere Messergebnisse sind die Geschwindigkeiten der Galaxien in Galaxienclustern, die Massenbestimmung von Galaxienclustern mithilfe von Gravitationslinsen und die Höhe des zweiten und dritten Peaks im Spektrum der kosmologischen Hintergrundstrahlung. Darauf kann man zum Teil eingehen, insbesondere falls die Schüler von den Exoplaneten her schon die Gravitationslinsen kennen. Die Hintergrundstrahlung kennen die Schüler hier aber noch nicht.

Videoempfehlung: [J. Gaßner: Dunkle Materie](https://www.youtube.com/watch?v=e3AcrT8aSto) <https://www.youtube.com/watch?v=e3AcrT8aSto>



## Sternentwicklung

(zu 3.5.7 (4) und 3.5.7 (5))

### Materialien:

Arbeitsblätter:

06\_pma\_ab\_jeans\_kriterium.docx

ggf.: 07\_pma\_ab\_jeans\_kriterium\_herleitung.docx

Präsentation:

06\_pma\_ppt\_sternentstehung

### [Computersimulation Sternentstehung](#)

<https://www.eso.org/public/germany/videos/eso1815c/>

### Unterricht (4 Stunden):

An der grundsätzlichen Sternentwicklung und deren Beschreibung ändert sich nichts im Vergleich zu den Inhalten aus IMP 9, im Wahlfach Astronomie wird hier zusätzlich auf den Verlauf im Hertzsprung-Russel-Diagramm (HRD) eingegangen, was im Physikkurs mit Vertiefung Astronomie nicht verlangt wird.

Ich gehe hier zu anderen (physikalischeren) Details über, die wiederum den Rahmen im Fach IMP oder dem Wahlfach Astronomie sprengen würden, aber im Sinne des Bildungsplans für den Physikkurs mit Schwerpunkt Astronomie ist.

Die ersten Folien der Präsentation 06\_pma\_ppt\_sternentstehung zeigen das Band unserer Milchstraße. Schüler die IMP hatten und / oder Astronomie gewählt haben, sehen diese zwei Folien gegebenenfalls ein zweites oder drittes Mal. Dies sei hiermit ein enormer Beitrag zur Nachhaltigkeit... ☺

Die riesigen Gas- und Staubwolken, die die Sterne verdecken, sind die Geburtsstätten neuer Sterne.

Der Hauptbestandteil dieser Wolken ist Wasserstoff, CO ist das zweithäufigste Molekül nach Wasserstoff, es ist aber mit höchstens einem Promille enthalten. Dunkel sind sie aufgrund des Staubes aus Silikaten und Graphit, der das Licht absorbiert.

Möglicher Tafelanschrieb:

#### Entstehung der Sterne

„Baumaterial“: Gas und Staubwolken (Bsp.: „Säulen der Schöpfung“ (Adlernebel))

Bestandteile: Zumeist H, H<sub>2</sub>; im Promillebereich: C, O, CO, Silikate, Graphit u.v.m.

Solche Nebel können leuchten, wenn ein Stern in ihrer Nähe steht. Wird das Licht eines Sterns an den Staubteilchen gestreut, so sieht man einen bläulichen, sogenannten Reflexionsnebel (z.B. IC 349: Barnards Meropenebel in den Plejaden). Wird allerdings vom UV-Licht eines heißen Sterns (Spektralklassen O, B, A) der Wasserstoff im Nebel ionisiert, so kommt es bei der Rekombination zu einem rötlichen Leuchten, man spricht dann von einem Emissionsnebel (z.B. IC 4703 Adlernebel oder M42: Orionnebel) (Folien 4 und 5).

Fortsetzung Tafelanschrieb:

Reflexionsnebel:	Streuung von Sternlicht: Nebel erscheint bläulich
Emissionsnebel:	Absorption von UV-Licht: Wasserstoff ionisiert → Rekombination: Rötliches Leuchten



Übertrifft die Gravitation nur ein wenig die Druckkräfte, können solche Wolken instabil werden und kontrahieren. Am besten funktioniert das in sogenannten Riesen-Molekülwolken (GMC – giant molecular cloud). In diesen liegt Wasserstoff in molekularer Form vor, sie sind kühler und dichter als Wolken mit atomarer Materie und kontrahieren eher.

Ein Beispiel sind die „Säulen der Schöpfung“ im 7000 Lj entfernten Adlernebel im Sternbild Schlange (Folie 6).

Damit eine solche Wolke kontrahieren kann, muss die Gravitationsenergie betragsmäßig größer als die kinetische Energie der Teilchen der Wolke sein, die eine Temperatur von wenigen Kelvin hat.

Die Gravitationsenergie bezeichnet die potentielle Energie  $E_{pot}$ , die bei der Kontraktion von Himmelskörpern frei wird.

Eine Näherung der Bedingung ist ohne Kenntnis der kalorischen Zustandsgleichung und der Gravitationsenergie einer Kugel nicht herleitbar, daher wird sie hier nur genannt.

Es ist dies das sogenannte Jeans-Kriterium nach James Jeans: Englischer Astronom, Physiker und Mathematiker (Folien 7 und 8).

Eine Herleitung findet sich in: 07\_pma\_ab\_jeans\_kriterium\_herleitung

Möglicher Tafelanschrieb:

Damit Sterne entstehen, muss eine Gas- und Staubwolke kontrahieren.

Hierfür muss die Gravitationsenergie die kinetische Energie der Gasteilchen überwiegen.

Ansatz:

Teilchen mit der Masse  $m$  bewegen sich um die Gaswolke der Masse  $M$  auf einer Kreisbahn:

$$F_Z = F_G$$

Kollaps, wenn

$$F_Z < F_G$$

$$m \frac{v^2}{r} < \frac{GMm}{r^2} \quad | \cdot r$$

Also (energetisch):

$$2 E_{kin} < -E_{pot}$$

Dies führt letztlich zum

Jeans-Kriterium (J. Jeans; 1877 – 1946)

Eine Wolke kollabiert, wenn ihre Masse die Jeans-Masse  $M_J$  überschreitet:

$$\left\| M_J = 5,46 \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( \frac{k \cdot T}{G \cdot m} \right)^3} \right\| \quad (\text{Jeans-Kriterium})$$

( $\rho$ : Dichte der Wolke,  $k$ : Boltzmann-Konstante ( $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T$ : absolute Temperatur,  $G$ : Gravitationskonstante,  $m$ : Masse des einzelnen Gasmoleküls)

Die Gaswolken bestehen in erster Linie aus Wasserstoffmolekülen. Für beispielhafte Werte kann man mit dem Arbeitsblatt 06\_pma\_ab\_jeans\_kriterium die Masse eines Gasnebels abschätzen, bei der dieser kontrahiert: Mit diesen Zahlen berechnet man hier Werte von ca. 43 Sonnenmassen ( $M_\odot = 1,9889 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ), vgl. zugehörige Lösung.



Solche Sterne mit diesen enormen Massen sind allerdings nicht die Regel, eine solche Wolke muss für masseärmere Sterne in Fragmente zerfallen.

Nach dem Jeans-Kriterium können solche Fragmente mit wenig Masse, geringer Dichte und hohen Temperaturen aber nicht kollabieren, also muss die Wolke gekühlt werden (Folie 9).

Gerade die in erster Linie vorkommenden Wasserstoffmoleküle taugen zur Kühlung aber gar nicht: Der geringste Anregungszustand, der Rotationszustand  $J = 1$ , bräuchte Temperaturen weit über 100 K, um erreicht werden zu können. Das ist weit mehr als bei jedem anderen einfachen Molekül und liegt insbesondere an der geringen Masse der Wasserstoffmoleküle. Außerdem ist  $H_2$  ein homonukleares Molekül, was bedeutet, dass es keinerlei elektrisches Dipolmoment hat, damit kann es auch keine Emission  $J = 1 \rightarrow 0$  geben. Der nächsthöhere Übergang  $J = 2 \rightarrow 0$  (Quadrupol) liegt dann sowieso jenseits von gut und böse (511 K).

Eine Voraussetzung für die Kühlung wären zum Beispiel Magnetfelder, an denen sich Elektronen spiralförmig entlang bewegen. Dabei senden die Elektronen Synchrotronstrahlung aus.

Durch den inversen Compton-Effekt kann Energie umgewandelt werden. Dabei übertragen die Elektronen kinetische Energie auf die Photonen, deren Frequenz bzw. Energie dadurch größer wird.

In beiden Fällen wird thermische Energie in Strahlung umgewandelt und so der Wolke entzogen, die Strahlung verlässt die Wolke.

Ein wichtiger Kühlmechanismus ist auch die Stoßanregung:

Beispielsweise arbeitet der vorhandene Sauerstoff aber insbesondere der in kleinen Mengen vorhandene Kohlenstoff (ionisiert: CII) als Kühlmechanismus. Die kinetische Energie wird von einem Elektron in der Atomhülle aufgenommen. Diese Energie wird durch Abgabe eines Photons wieder frei, das die Wolke als ferninfrarote Strahlung (FIR) oder als noch langwelligere Strahlung verlassen kann (s. Kasten „Aufschrieb“).

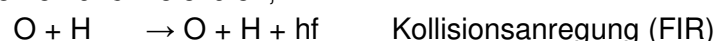
Durch diese Prozesse kann die Wolke auf ein paar hundert Kelvin abkühlen, aber das genügt immer noch nicht für einen Kollaps, da die Massen zu gering sind.

Bei Dichten von  $10^4$  Teilchen pro  $cm^3$  sind Kohlenmonoxid, Wasser, Aminosäuren und der Staub (Graphit, Silikate) durch niederenergetische Stoßanregungen in bestimmte Schwingungs- und Rotationsbewegungen für die anschließende Abstrahlung zuständig, die Wolke kann im Idealfall auf 10 K abkühlen. Bei typischen Wolkendichten von  $10^{-20}$   $kg/m^3$  reicht die Masse der Wolke in der Regel für den Kollaps aus.

Fortsetzung Tafelanschrieb (Skizzen können aus Folie 9 hinzukommen):

Fortsetzung des Kollaps nur durch Kühlung möglich (Massen zu gering für Jeans-K.):  
Abstrahlung durch:

- Kreisbahnen von Elektronen in Magnetfeldern  $\rightarrow$  Synchrotronstrahlung
- Inverser Compton-Effekt
- Stöße von Atomen und Molekülen, z.B.:



(hf: Energie eines Photons (Lichtteilchen))







## Hauptreihenstadium

(zu 3.5.6 (7) und 3.5.7 (6))

### Materialien:

Arbeitsblätter:

08\_pma\_ab\_die\_sonne.docx

09\_pma\_ab\_fusionsprozesse.docx

ggf. 10\_pma\_ab\_massendefekt.docx

Präsentationen:

07\_pma\_ppt\_hauptreihenstadium.pptx

08\_pma\_ppt\_die\_sonne.pptx

### Unterricht (4 Stunden):

Ob die Kontraktion letztlich zu einem Erfolg bei der Sternbildung führt, zeigen die Folien aus der Präsentation 07\_pma\_ppt\_hauptreihenstadium:

In einem Bereich von  $0,0018 M_{\odot}$  (13 Jupitermassen) bis  $0,075 M_{\odot}$  (75 Jupitermassen) entsteht ein sogenannter Brauner Zwerg (Folie 3). Ab 1 Mio. K kann Deuteriumfusion stattfinden. Schwerer Wasserstoff fusioniert dann mit Wasserstoff zu Helium-3. Der Wärmetransport erfolgt ausschließlich über Konvektion.

Zum Aufbau eines hydrostatischen Gleichgewichts, muss die Kerntemperatur bei größerer Masse höher sein. Der Gasdruck (kinetische Energie der Gasteilchen) und der Strahlungsdruck müssen dem Gravitationsdruck standhalten.

Je größer die Masse des Sterns, desto höher ist auch seine Kerntemperatur und damit die Brennraten, was zu verkürzten Lebensdauern führt. Dies reicht von Sternen mit 0,3 Sonnenmassen, die bis zu 100 Milliarden Jahre alt werden können, bis hin zu Sternen mit über 100 Sonnenmassen, die nur wenige Millionen Jahre alt werden (Folie 5 bis 7).

Möglicher Tafelanschrieb:

Fragmente mit weniger als  $0,08 M_{\odot}$ :

Keine Wasserstofffusion (ggf. ab 1 Mio. K Deuteriumfusion) → Brauner Zwerg, Wärmetransport rein konvektiv

Obergrenze für Sternmassen ist nicht sicher:

Hauptreihensterne zwischen  $150 M_{\odot}$  und  $200 M_{\odot}$  entdeckt.

Beispiele im Tarantelnebel (Gr. Magellansche Wolke).

Hinsichtlich des Wärmetransports unterscheiden sich Sterne je nach Masse:

Sterne mit Massen  $< 0,5 M_{\odot}$  sind vollkonvektiv (s. o.), Sterne zwischen  $0,5 M_{\odot}$  und  $1,5 M_{\odot}$  haben eine Strahlungszone im Innern und eine konvektive Außenzone, massereiche Sterne  $> 1,5 M_{\odot}$  haben einen konvektiven Kern und eine äußere Strahlungszone (Folie 8).

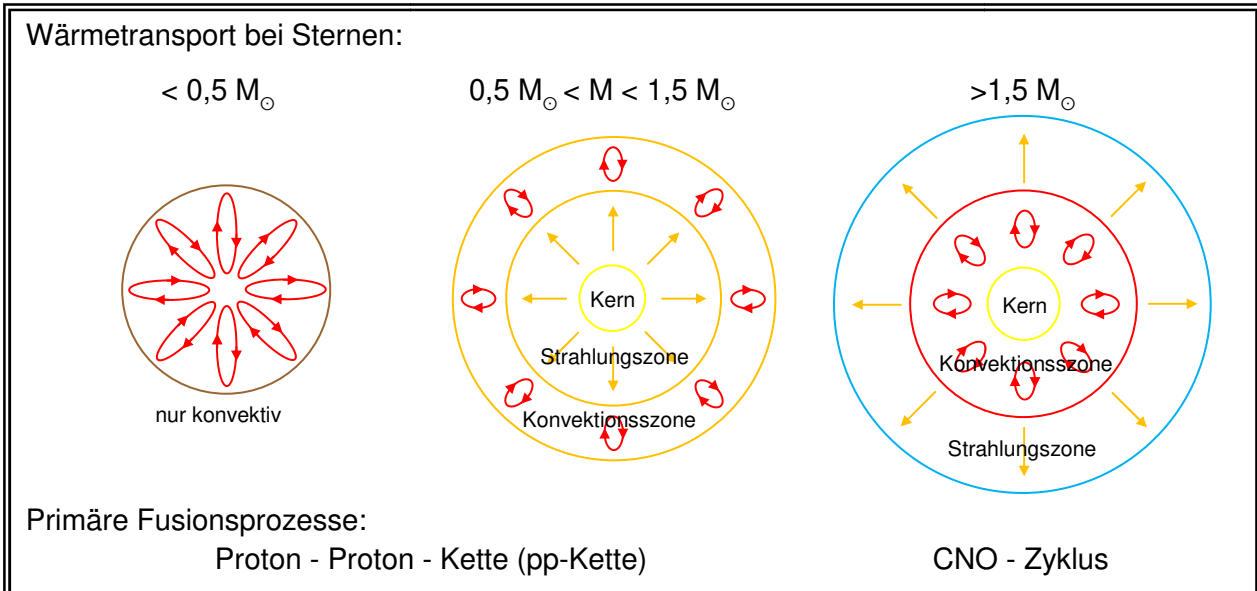
Je undurchsichtiger die Materie im Stern ist (steigende Opazität), desto geringer ist das Vermögen, die Energie durch Strahlung zu transportieren. In massereichen Sternen ist die Opazität aufgrund der hohen Dichte im Zentrum enorm → Konvektion.





Der bei solchen Sternen vorherrschende Fusionsprozess (CNO-Zyklus, auch Bethe-Weizsäcker-Zyklus genannt) ist auf der Kopiervorlage 09\_pma\_ab\_fusionsprozesse als Zusatzinformation (und **nicht** zum Auswendiglernen) dargestellt. Er wurde unabhängig voneinander von den Physikern Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker entdeckt. In einem Zyklus werden 25,03 MeV frei.

Möglicher Tafelanschrieb:



Grafiken: Sven Hanssen

Die Sonne kann mit einigen Daten, ihrer inneren Struktur und dem Hauptfusionsprozess (H→He) mit der Präsentation 08\_pma\_ppt\_die\_sonne vorgestellt werden. Auf Sonnenflecken, Protuberanzen Oberflächenstrukturen wird hier nicht eingegangen, das würde den Rahmen sprengen und ist auch nicht als Thema angedacht (auch wenn es schön und hochinteressant ist).

Auf Folie 2 erkennt man, dass die Sonne 99,8 % der Gesamtmasse des Sonnensystems beinhaltet. Nett ist es dann den Schülern mitzuteilen, dass die Masse von Jupiter noch 0,2 % ausmacht und der „Rest“ die anderen Planeten (und wir) sind...

Es ist nicht notwendig, dass alle Daten von den Schülern notiert werden, ich stelle das in der Regel bis auf einige verbindliche Dinge frei:

Möglicher Tafelanschrieb (**oder** Kopie: 08\_pma\_ab\_die\_sonne)

## Die Sonne:

99,8 % der Masse des Sonnensystems (Rest: Jupiter 0,2 %)

$$M_{\odot} = 300\,000 M_{\text{Erde}} (= 1,9889 \cdot 10^{30} \text{ kg})$$

$$R_{\odot} = 109 R_{\text{Erde}}$$

Temperatur: Oberfläche: 5800 K; Kern: 15,6 Mio. K

Zusammensetzung: H: 75%, He: 25 %, andere Elemente 0,1%

Dichten: Ø:  $\rho_{\odot} = 1,41 \text{ g/cm}^3$ ; Zentrum:  $134 \text{ g/cm}^3$  (vgl. Gold:  $\rho = 19 \text{ g/cm}^3$ )

Alter: 4,2 Mrd. a

Abstand Erde-Sonne: 150 Mio. km = 1 AE (Astronomische Einheit)



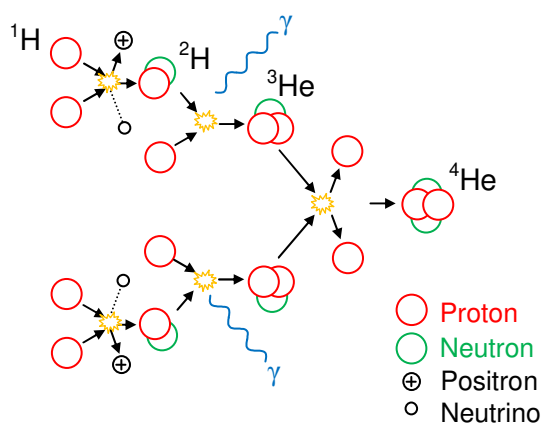
Wenn man die Kopie nicht macht und Folie 3 noch nicht gezeigt hat, kann man die Schüler auch einen Kreis mit einem Radius von 5,4 cm (Sonne) zeichnen lassen. Die Erde ist dann ein Bleistiftspitze mit einem Durchmesser von 1mm, das wirkt auch nett (...Jupiter: Ø 1cm).

Der Inhalt von Folie 4 steht schon als Aufschrieb zum Thema Wärmetransport im Heft (s.o.).

Im Kern fusionieren Wasserstoffkerne (Protonen) zu Heliumkernen. Der Prozess ist von Folie 5 bis 8 simuliert.

Möglicher Tafelanschrieb (**oder** Kopie: 09\_pma\_ab\_fusionsprozesse):  
(17 rote, 7 grüne, 3 Neutrino- und 3 Positronkreise (inklusive Legende) ☺)

## Fusionsprozess im Sonnenkern (pp - Kette):

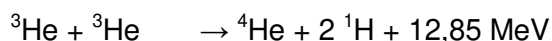
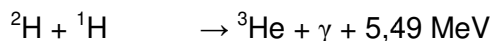
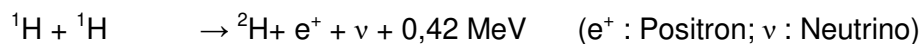


Hierbei werden 24,7 MeV in Form von kinetischer Energie der Teilchen und als Strahlungsenergie frei.

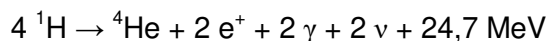
Grafik: Sven Hanssen

**Oder** (ohne Kreise):

## Fusionsprozess im Sonnenkern:



Insgesamt also:



Die frei werdende Energie ist kinetische Energie der Teilchen und Strahlungsenergie.

Anmerkung: Die **Reaktionsketten** sind alle **nur zum Nachschlagen** und **nicht** zum Auswendiglernen gedacht!

Mit dem Arbeitsblatt 10\_pma\_ab\_massendefekt kann man die enormen Massenverluste durch das Energie-Masse Äquivalent berechnen und aber auch feststellen, dass die Sonne das insgesamt wenig interessiert.

In der Strahlungszone wird die Energie durch Photonen weitertransportiert. Diese werden innerhalb weniger Kernabstände wieder absorbiert und erneut abgestrahlt oder werden in diesen Bereichen nur abgelenkt.

Die anschließende Konvektionszone (20% des Sonnenradius) gibt die Energie durch Strömungen weiter. Da die Strahlungsleistung mit abnehmender Temperatur schwächer wird (Stefan-Boltzmann-Gesetz:  $L = A \cdot \sigma \cdot T^4$ ), wird diese schließlich gleich groß wie die Wärmeenergie des solaren Gases. Nun können Konvektionsprozesse stattfinden.



Das Gas wird durch die nach oben dringende Strahlung erwärmt und dehnt sich aus. Es steigt an die Oberfläche und gibt die absorbierte Energie frei. Das nun kühlere Gas sinkt wieder ab (Konvektion).

Für den ihnen aufgezwungenen Zickzackkurs benötigen Photonen vom Kern bis an die Oberfläche nach neueren Modellrechnungen zwischen 10 000 Jahren und 170 000 Jahren (Folie 9).

## Endstadien der Sterne

(zu 3.5.7 (7))

### Materialien:

Arbeitsblätter:

11\_pma\_ab\_endstadien\_von\_sternen.docx

12\_pma\_ab\_schwarzschildradius.docx

Präsentation:

09\_pma\_ppt\_endstadien\_von\_sternen.pptx

### Unterricht (4 Stunden):

Wie sich ein Stern nach seinem Hauptreihenstadium verhält, hängt von seiner Masse ab. Sterne mit  $0,75 M_{\odot}$  bis  $8 M_{\odot}$  werden zu weißen Zwergen, Sterne mit  $8 M_{\odot}$  bis  $25 M_{\odot}$  zu Neutronensternen und Sterne mit Massen über  $25 M_{\odot}$  zu Schwarzen Löchern.

Für die folgende Sequenz kann die Präsentation 09\_pma\_ppt\_endstadien\_von\_sternen unterstützend eingesetzt werden:

### **Sterne mit $0,75 M_{\odot}$ bis $8 M_{\odot}$ :**

Ist bei Sternen zwischen  $0,75 M_{\odot}$  und  $8 M_{\odot}$  der Wasserstoffvorrat im Kern erschöpft, überwiegt der Gravitationsdruck. Der Kern, der nun überwiegend aus Helium besteht, schrumpft. Um den Kern findet Wasserstofffusion statt, das sogenannte Schalenbrennen. Das hier entstehende Helium füttert den Kern zusätzlich. Dessen Dichte und Temperatur nimmt zu (Folie 2).

Nun kommen quantenmechanische Aspekte hinzu:

Fermionen (z.B. Elektronen, Protonen und Neutronen) können nur bestimmte Quantenzustände besetzen, aber jeder Quantenzustand kann nur von einem Fermion besetzt werden. Dies erzeugt den sogenannten Fermi-Druck, der der Gravitation entgegenwirkt (das ist letztlich das, was Festkörpern ihre Stabilität verleiht). In dieser stark komprimierten Materie gelten die Gesetzmäßigkeiten der klassischen Physik bezüglich Druck, Temperatur und Volumen nicht mehr. Man spricht dann von entarteter Materie.

Durch die Schrumpfung des Kerns und dessen Temperaturerhöhung steigt die Fusionsrate in der Wasserstoffschale, wobei deren Temperatur zunimmt und sie sich (wie die äußeren nichtfusionierenden Schalen auch) stark ausdehnt. Die gesamte Energie geht nun durch eine sehr viel größere Oberfläche, diese ist hierdurch kühler und wirkt optisch rot. Es entsteht zunächst ein Roter Riese (Folie 3).

Anmerkung: Ein solcher Stern durchläuft noch eine Zwischenphase als Roter Unterriese, dies behalten wir aber den Schülern für ihr Studium vor...



Bei diesem Prozess verliert der Stern 10 bis 20 Prozent seiner Masse aus den Außenbereichen, die aufgrund der dort geringeren Gravitation durch die Strahlung weggeblasen wird.

Der Rote Riese hat etwa den 100-fachen Radius im Vergleich zum Hauptreihenstadium.

Möglicher Tafelanschrieb:

## Endstadien der Sterne:

### 1. Sterne mit $0,75 M_{\odot}$ bis $8 M_{\odot}$

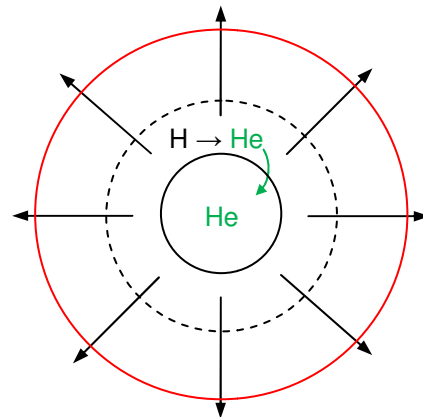
H-Vorrat im Kern verbraucht: He im Kern

Gasdruck < Gravitationsdruck → Kern schrumpft

Fusion von H zu He um den Kern (Schalenbrennen)

Kern: He aus Schale reichert sich zusätzlich an.  
 Druck und Temperatur nehmen zu.  
 Entartung: Keine Volumenzunahme trotz steigender Temperatur (Quanteneffekt).

→ „Fermi-Druck“



Schalenbrennen nimmt aufgrund der Kerntemperatur zu → Stern bläht sich auf:

Energie geht durch größere Oberfläche – kühler, also: rot → **Roter Riese**

Bis zu 20 % der Sternmasse wird weggeblasen.

Grafik: Sven Hanssen

Der Heliumkern (nicht die entartete Materie) kontrahiert weiter, Dichte und Temperatur nehmen in der entarteten Materie weiter zu. Bei etwa 100 Mio. Kelvin setzt das Heliumbrennen im Kern explosionsartig ein, man spricht von einem Heliumblitz oder Helium-Flash. Drei Heliumkerne werden zu Kohlenstoff und Sauerstoff fusioniert. Die Energie von  $10^{11}$  Sonnenleuchtkräften wird von der Sternhülle absorbiert. Dies geschieht innerhalb weniger Sekunden. Die Temperatur ist nun so hoch, dass die Entartung der Materie aufgehoben wird (Folie 4). Etwa 100 Millionen Jahre köchelt der Stern dann recht ruhig das Helium vor sich hin, wobei sich im Kern Kohlenstoff und Sauerstoff anreichern. Die Wasserstoffschale liefert der Heliumschale um den Kern weiteres Helium nach.

Fortsetzung Tafelanschrieb:

He-Kern kontrahiert weiter → Temperaturzunahme

Schalenbrennen **liefert dem Kern He nach**.

→ bei 100 Mio. K: **He-Flash** (schlagartige He-Fusion in C)

→ Energie ( $10^{11} L_{\odot}$ ) wird vollständig im Stern absorbiert

Die Temperatur im Kern erreicht aber nicht die notwendige Temperatur, um Kohlenstoff zu fusionieren. Der Gravitationsdruck lässt dann den Kern trotz Fermi-Drucks kontrahieren, was zu einer Verstärkung der Helium- und Wasserstofffusion in den Schalen führt.

Aufgrund des Gravitationsdrucks steigen die Temperaturen in den Schalen, der Sternradius nimmt gewaltig zu, der Stern verliert 20 bis 30 Prozent seiner Masse.



Geht nun der Heliumvorrat zur Neige, kontrahiert der Stern wieder, die Temperatur im Innern nimmt dabei wieder zu, Wasserstoff fusioniert wieder zu Helium... - der Stern wird wieder größer. Er ist ein sogenannter Veränderlicher geworden. Dieser Zyklus wiederholt sich in den nächsten 10 000 bis 100 000 Jahren viele Male. Ein Vertreter dieser Gattung ist Beteigeuze im Orion (Folie 5).

Mit jedem Zyklus stößt der Stern Materie ab, harte UV-Strahlung regt die abgestoßene Materie zum Leuchten an, es entsteht letztlich ein Planetarischer Nebel. Der Name ist historisch bedingt und irreführend: Planetarische Nebel haben nichts mit Planeten zu tun, sondern sehen ihnen nur im Teleskop ähnlich (Folien 6 und 7).

In den folgenden wenigen zehntausend Jahren hat der Stern seinen Kernbrennstoff verbraucht, es bleibt ein hochdichter, heißer, kohlenstoff- und sauerstoffhaltiger Kern zurück: Ein Weißer Zwerg. Radius von ein paar tausend Kilometern, Dichte in der Größenordnung von  $10^6 \text{ g/cm}^3$ . Dieser kühlt mit der Zeit aus, wird rötlich und dann unsichtbar (Folie 8).

Fortsetzung Tafelanschrieb:

Temperatur im Kern für C-Fusion zu gering  
 He-Kern kontrahiert weiter → Temperaturzunahme  
 → Fusionsrate in den Schalen steigt  
 → Radius nimmt zu (**Roter Überriese**) → Massenverlust 20 bis 30 %  
 → He-Fusion nimmt ab, Stern schrumpft → He-Fusion nimmt zu, Stern dehnt sich aus...  
 → „**Veränderlicher**“ (vgl. Algol im Perseus)

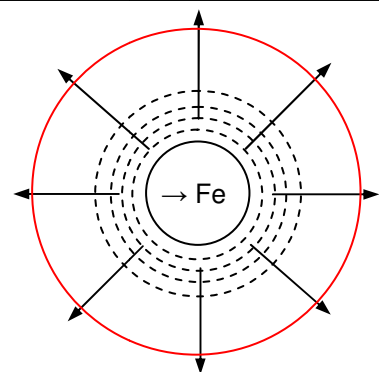
Massenabstoß wird von UV-Strahlung zum Leuchten angeregt: „**Planetarischer Nebel**“  
 Kernbrennstoff verbraucht (~10 000 a):  
 Rest: Weißer Zwerg:  $R \sim 1000 \text{ km}$ ,  $\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3$  (= 1 t/cm<sup>3</sup>)

**Sterne mit  $8 M_{\odot}$  bis  $25 M_{\odot}$**  können durch ihre gewaltige Masse bei der Kontraktion die Gravitationsenergie in thermische Energie so umwandeln, dass das Schalenbrennen entfacht wird, ohne dass der Kern entartet. Sie bauen das Schalenbrennen im Laufe ihrer Entwicklung immer weiter aus. Sie fusionieren im letzten Stadium (Dauer: Ein paar Wochen) in Schalen von außen nach innen Wasserstoff zu Helium, Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff, C, O zu N und Mg, N zu O und Mg, O zu Si, Si zu Fe. Sie werden hierbei zu Roten Überriesen (Folien 9 und 10).

Anmerkung: Hier geht es immer nur um die Fusion von Atomkernen und nicht um Atome.

Möglicher Tafelanschrieb:

2. Sterne mit  $8 M_{\odot}$  bis  $25 M_{\odot}$   
Schalenbrennen im letzten Stadium  
 (Dauer: ca. 3 Wochen- je nach Sternmasse)  
 Von außen nach innen:  
 H → He      He → C, O  
 C → N, Mg    N → O, Mg  
 O → Si      Si → Fe  
 → **Roter Überriese**



Grafik: Sven Hanssen



Überschreitet die Kernmasse die sogenannte Chandrasekhar-Grenze, so kollabiert der Kern innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde.

(Anmerkung: Die Chandrasekhar-Grenze wird bei Kohlenstoff-Sauerstoffkernen bei  $1,44 M_{\odot}$ , bei Eisenkernen bereits bei  $1,2 M_{\odot}$  erreicht).

Der Fermi-Druck kann dem Gravitationsdruck nicht mehr standhalten, die Elektronen reagieren mit den Protonen im Kern, es entstehen Neutronen. Die äußeren Hüllen des Sterns folgen dem Kollaps mit hoher Geschwindigkeit, bis die Neutronen schlagartig entarten. Der Gegendruck verhindert ein weiteres Zusammenstürzen. Die auftreffende Materie wird zurückgeschleudert, die freiwerdende Energie stößt die Hülle des Überriesen in einer gewaltigen Explosion, einer Supernova, ab (Folien 11 bis 13). Hierbei entstehen in endothermen Fusionsprozessen Stoffe des Periodensystems mit größeren Ordnungszahlen als Eisen - alles Elemente, die bei uns vorkommen:

Unser Sonnensystem muss aus den Überresten einer Supernova entstanden sein!

Zurück bleibt ein sogenannter Neutronenstern (Folie 14).

Fortsetzung Tafelanschrieb:

Kernmasse  $> 1,2 M_{\odot}$  („Chandrasekhar-Grenze“ bei Eisenkernen):

Fermi-Druck  $<$  Gravitationsdruck:



→ Neutronenkern → schrumpft → entartet

→ herunterfallende Schichten werden schlagartig abgebremst und zurückgeschleudert

→ **Supernova**

→ Hierbei entstehen endotherme Produkte:

Stoffe mit größeren Ordnungszahlen als Eisen

→ Unser Sonnensystem ist ein Produkt einer Supernova!

Rest: Neutronenstern:  $R \sim 10 \text{ km}$ ,  $\rho \sim 10^{14} \text{ g/cm}^3$  ( $= 10^8 \text{ t/cm}^3$ )

Grafik: Sven Hanssen

## Sterne $> 25 M_{\odot}$ :

Wenn aufgrund noch größerer Masse (Modellrechnungen gehen hierbei von Kernmassen von etwa 3,2 Sonnenmassen aus) sogar der Neutronendruck kollabiert, führt dies zu einem Schwarzen Loch. Zu einem Schwarzen Loch gehört kein Oberflächenradius, sondern der Schwarzschildradius ( $r_s$ ) bzw. der Ereignishorizont: Folien 15 und 16.

Möglicher Tafelanschrieb:

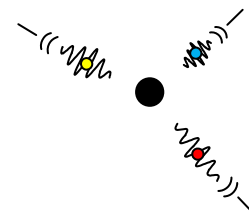
### 3. Sterne $> 25 M_{\odot}$

Kernmasse  $> 3 M_{\odot}$

Fermi-Druck der Neutronen kollabiert

Kontraktion geht weiter → Schwarzschild-Radius wird erreicht:

Licht kann den Bereich nicht mehr verlassen → **Schwarzes Loch**



Grafik: Sven Hanssen





Zur Berechnung der Schwarzschildradien von Sonne und Erde dient das Arbeitsblatt 12\_pma\_ab\_schwarzschildradius. Hier kann man sich auch die Bedeutung des Schwarzschildradius klarmachen (s. 12\_pma\_ab\_schwarzschildradius\_loesung).

Auf der Kopiervorlage 11\_pma\_ab\_endstadien\_von\_sternen (S. 2) sind die beiden Varianten Neutronenstern und Schwarzes Loch zusammengefasst.

Ein Klassiker unter den **stellaren Schwarzen Löchern** ist Cygnus X-1 im Sternbild Schwan (Folie 33):

1972 von dem US-amerikanischen Astronomen Tom Bolton entdeckt, ist es das erste nachgewiesene Schwarze Loch überhaupt.

Cyg X-1 ist eine starke Röntgenquelle und ein „Doppelstern-“ System mit einem O9-Stern und einem extrem kompakten Objekt, das aufgrund seiner Masse kein Neutronenstern sein kann.

Das Schwarze Loch zieht Masse des Begleitsterns zu sich und bildet eine Akkretionsscheibe. Diese erhitzt sich enorm ( $\sim 1$  Mio. Grad) und gibt dadurch Röntgenstrahlung ab.

Bei sogenannten **supermassereichen Schwarzen Löchern** ist die Entstehungsgeschichte derzeit noch unklar:

Entweder entstehen sie durch schwere stellare Löcher, die bei der Verschmelzung von Galaxien immer mehr Masse gewinnen, oder aber durch den direkten Kollaps riesiger Gaswolken.

Hierzu gehören die folgenden beiden Beispiele:

- Das Zentrum unserer Milchstraße: Sagittarius A\* (Sgr A\*) im Sternbild Schütze:  
Ereignishorizont:  $r_S \approx 1,2 \cdot 10^7 \text{ km} = 0,08 \text{ AE}$ ;  
Masse:  $4,1 \cdot 10^6 M_\odot$
- Das erste Bild eines Schwarzen Lochs: Zentrum von M 87 im Sternbild Jungfrau (man sieht den Ereignishorizont!):  
Ereignishorizont:  $r_S \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ km} = 100 \text{ AE}$ ;  
Masse:  $6,5 \cdot 10^9 M_\odot$

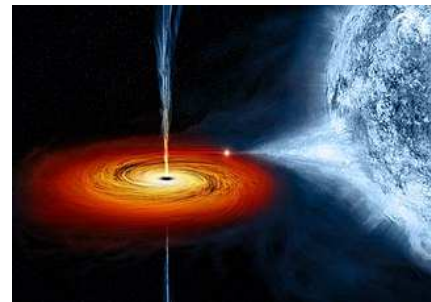
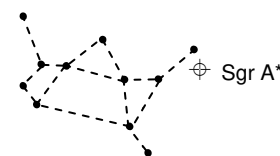


Abbildung 1: NASA/CXC/M.Weiss  
Gemeinfrei  
(Künstlerische Darst.)



Grafik: Sven Hanssen



Abbildung 2: CC-BY 4.0 Event  
Horizon Telescope



## Extrasolare Planeten

(zu 3.5.7 (8))

### Materialien:

Arbeitsblätter:

13\_pma\_ab\_aufgaben\_exoplaneten.docx

14\_pma\_ab\_steckbriefe\_exoplaneten.docx

15\_pma\_ab\_musterparameter\_exoplaneten.docx

Programm: rg\_kurven\_s.exe

### Unterricht (2 Stunden):

Mit dem Programm „Exoplaneten – Radialgeschwindigkeitsmethode – Kurvenanpassung“ können die Schülerinnen und Schüler erforschen, wie sich verschiedene Parameter der Umlaufbahnen von Exoplaneten auf deren Beobachtbarkeit von der Erde aus auswirken. Dieses Programm darf hier mit freundlicher Genehmigung seines Autors, Hr. Matthias Borchardt, verwendet werden – VIELEN DANK dafür! Eine Installation ist nicht erforderlich, der Dateiname lautet rg\_kurven\_s.exe. Die physikalische Grundlage der folgenden Überlegungen ist, dass das Licht, das ein Exoplanet aussendet, uns blauverschoben erscheint, wenn der Exoplanet sich auf uns zu bewegt und rotverschoben, wenn der Exoplanet sich von uns wegbewegt. Im erstgenannten Fall wird die Radialgeschwindigkeitskomponente per Konvention positiv gerechnet, im zweitgenannten Fall negativ. Konkret lässt sich mit dem Programm nun untersuchen, wie sich die folgenden vier frei wählbaren Bahnparameter auf den zeitlichen Verlauf der Radialgeschwindigkeit während eines Umlaufs auswirken:

- a) Umlaufdauer [in T]
- b) Planetenmasse [in Jupitermassen]
- c) Numerische Exzentrizität [skalar]
- d) Periastronwinkel [in Grad]

### zu c)

Die numerische Exzentrizität ist größer oder gleich 0, aber kleiner 1. Je größer sie ist, desto stärker weicht die Ellipse vom Kreis ab; ein Kreis ist eine Ellipse, bei der die numerische Exzentrizität den Wert 0 hat. Nähere Informationen hierzu finden Sie in den ZPG-Materialien des Wahlfaches Astronomie im Abschnitt „Unser Sonnensystem - 6. Die Kepler'schen Gesetze“ auf dem Arbeitsblatt 09\_us\_ab\_geometrie\_ellipse.

### zu d)

Der Periastronwinkel gibt die Lage des sonnennächsten Punktes der Planetenbahn (Perihel) im Bezug zur Verbindungslinie Erde-Zentralstern an.

Es empfiehlt sich, die Fragen auf dem Arbeitsblatt 13\_pma\_ab\_aufgaben\_exoplaneten in zwei Blöcken bearbeiten zu lassen:



- \*) Die Fragen 1 bis 5 bilden einen einleitenden Block und können ohne das Programm bearbeitet werden. Sie dienen daher einer Einstimmung in diese Thematik.
- \*\*\*) Die Fragen 6 und 7 bilden einen vertiefenden Block und können nur mithilfe des Programms bearbeitet werden.

Öffnet man das Programm, so erscheint zunächst der folgende Infotext, dessen Inhalt im Wesentlichen allerdings schon auf dem Arbeitsblatt behandelt wurde.

**Kurvenanpassung bei der Radialgeschwindigkeitsmethode**

Die Bewegung von Exoplanet und Zentralstern um den gemeinsamen Schwerpunkt führt aufgrund des Dopplereffekts zu einer Verschiebung der Spektrallinien im Spektrum des Sterns. Dadurch lassen sich die Radialgeschwindigkeiten des Sterns (Geschwindigkeitskomponente in Richtung des Beobachters) bestimmen. Die Theorie der Bahnbewegungen in einem Zweikörpersystem ergibt für die Radialgeschwindigkeiten des Sterns in Abhängigkeit von der Zeit die Formel:

$$v_r(\varphi(t)) = -\frac{2\pi \cdot a \cdot m \cdot \sin(i)}{T \cdot (M+m) \cdot \sqrt{1-e^2}} \cdot (\cos(\varphi(t)+\omega) + e \cdot \cos(\omega))$$

wobei a (große Halbachse der Planetenbahn) mithilfe des dritten Keplersgesetzes durch  $a = (G \cdot (m + M) \cdot T^2 / 4\pi^2)^{1/3}$  darstellbar ist. Der Parameter i (Inklination) gibt die Neigung der Planetenbahn (bzgl. des Beobachters) an, e ist ihre Exzentrizität,  $\omega$  der Periastronwinkel (Drehung der Ellipse zum Beobachter), T die Umlaufzeit, m und M die Massen der beiden Himmelskörper. Der Winkel  $\varphi$  beschreibt die Lage des Planeten auf der Ellipsenbahn. Die zeitliche Entwicklung dieses Winkels wird von der Differentialgleichung  $\dot{\varphi}(t) = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{(1+e \cdot \cos(\varphi(t)))^2}{(\sqrt{1-e^2})^3}$  dargestellt, die sich numerisch lösen lässt.

Das **Computerprogramm** berechnet und zeichnet die Geschwindigkeitskurve gemäß der zuvor beschriebenen Formeln, wobei die Umlaufzeit T, die Masse m des Planeten, die Exzentrizität e und der Periastronwinkel  $\omega$  als frei wählbare Parameter variiert werden können. Durch geschickte Wahl dieser Parameter lässt sich die Geschwindigkeitskurve an die realen Daten der Messungen bei den ausgewählten Exoplaneten anpassen. Die Güte der Anpassung wird über die Methode der aufsummierten Abweichungsquadrate sichtbar, wobei die Messfehler  $\sigma$  wie folgt in die Berechnung eingehen:  $\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Y_{i, \text{Theorie}} - Y_{i, \text{Messung}}}{\sigma_i} \right)^2$ .

Die im Programm verwendeten und dargestellten Messwerte der Radialgeschwindigkeiten stammen aus Internetquellen und wurden von den Translationsgeschwindigkeiten befreit und außerdem „phasengefaltet“ (so verschoben, dass die Werte in einer Umlaufperiode liegen). Die ersten acht jupiterähnlichen Exoplaneten sind alle Transitplaneten, d.h. die Inklinationen i ihrer Bahnellipsen und damit die entsprechenden Werte für sin(i) sind bekannt, so dass die durch Kurvenanpassung gefundenen Planetenmassen im Rahmen der Messgenauigkeit richtige Werte darstellen. Dies gilt auch für den erdähnlichen Planeten LHS1140b. Dagegen handelt es sich bei den übrigen vier erdähnlichen Exoplaneten nicht um Transitplaneten – ihre Bahnneigungen sind nicht bekannt und somit lassen sich ihre Massen nur durch  $m \cdot \sin(i)$  ausdrücken (Mindestmassen).

Matthias Bochardt, 2012 / 2014 / 2016 / 2019

**zum Programm**

Bild:  
Screenshot aus dem Programm „Exoplaneten – Radialgeschwindigkeitsmethode – Kurvenanpassung“

Klickt man auf die Schaltfläche „zum Programm“, so kommt man zu der eigentlichen Arbeitsoberfläche des Programms. Der folgende Screenshot zeigt eine Situation, in der der Exoplanet Kepler 5b untersucht wird.

**Steuerung**

- Kurve → aus
- Kurve → dünn
- Kurve → fett

**Zwischenspeicher**

- Diagramm
- Oberfläche

**Exoplaneten**

- Jupiterähnlich**
  - Kepler 5b
  - HD 17156 b
  - XO-3b
  - Corot-10b
  - HAT-P-14b
  - HAT-P-2b
  - HD 80606
  - Corot-9b
- Erdähnlich**
  - Proxima C-b
  - Gliese 581 c
  - HD 85112 b
  - Gliese 686 b
  - LHS 1140 b
  - keine Daten

**Daten**

**Parameter**

- Umlaufzeit T (Tage):
- Planetenmasse (M<sub>Jupiter</sub>):
- Exzentrizität:
- Periastronwinkel (Grad):
- Obst.-Zeit:

**Ergebnisse**

- Summe der Abweichungsquadrate:
- große Halbachse (in AU):
- Geschwindigkeitsamplitude (m/s):

Bild:  
Screenshot aus dem Programm „Exoplaneten – Radialgeschwindigkeitsmethode – Kurvenanpassung“



## Schaltfläche „Daten“

Durch Klicken auf die Schaltfläche „Daten“ erhält man Informationen über den Exoplaneten, diese Informationen finden sich aber auch gesammelt und erweitert auf dem Arbeitsblatt 14\_pma\_ab\_steckbriefe\_exoplaneten zusammengefasst.

## Schaltfläche „Parameter“

Hier lassen sich die vier eingangs erwähnten Parameter variieren. Mit dem unteren Regler „Offset-Zeit“ lässt sich die rote Kurve horizontal verschieben.

## **Grundprinzip des Programms:**

**Die rote Kurve ergibt sich aus den eingegebenen Parametern, die blauen Punkte stellen die realen Messwerte dar. Das Ziel ist es, die rote Kurve möglichst gut an die blauen Messwerte anzupassen.**

## Schaltfläche „Ergebnisse“

Hier lässt sich zum einen ablesen, welche große Halbachse (gemessen in Astronomischen Einheiten) und welche Geschwindigkeitsamplitude (gemessen in Metern pro Sekunde) sich für den betrachteten Exoplaneten bei den ausgewählten Parametern ergeben. Die Anzeige „Summe der Abweichungsquadrate“ gibt darüber hinaus aber auch an, wie gut die gewählten Parameter die tatsächliche Planetenbahn beschreiben. Hier gilt:

**Je kleiner die Summe der Abweichungsquadrate, desto besser die Wahl der Parameter.**

Auf dem Arbeitsblatt 15\_pma\_ab\_musterparameter\_exoplaneten finden Sie für jeden der Exoplaneten Daten für eine gute Wahl dieser Parameter mit einer möglichst geringen Summe der Abweichungsquadrate.