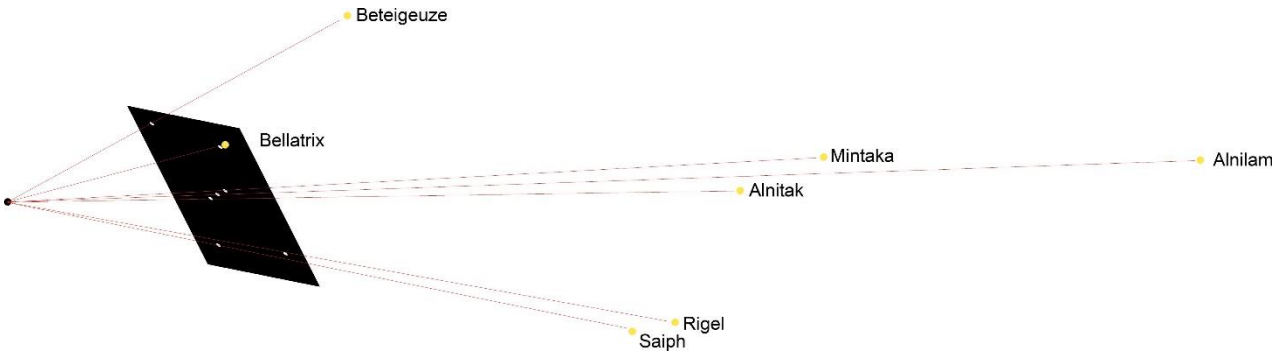
Landeshauptstadt Hannover

Hannover

Schulbiologiezentrum



19.92

Zum Greifen nah?

Die Entfernung der Sterne messen und berechnen

2016

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Schulbiologiezentrum Hannover

Titel: Zum Greifen nah?
Die Entfernung der Sterne messen und berechnen

Titelbild: Ingo Mennerich

Arbeitshilfe 19.92

Verfasser: Ingo Mennerich

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info

Inhalt

Relativ nah und doch unvorstellbar weit entfernt? 1

Wie tief im All könnte man unsere Sonne noch sehen? 3

Wie weit scheint das Licht unserer Sonne ins All hinaus? 4

Wie hell wäre unsere Sonne in der Nähe des Sirius? 6

In welcher Distanz könnte ein "Alien" unsere Sonne gerade noch erkennen? 6

Die "Größenklasse" (Magnituden) der Sterne 7

"Referenzsterne" für die Helligkeitsklassen 0 - 6 8

Wie viele Sterne kann man am Himmel sehen? 8

In welcher Distanz ist die Sonne gerade noch mit bloßem Auge zu sehen? 10

Die Trigonometrische Methode: Entfernungsbestimmung durch die Parallaxe 12

Rechnen mit der Parallaxenformel 15

Entfernungsbestimmung mit Hilfe der Spektralanalyse 16

Arbeitsblatt:
Strahlungskurven und Wellenlängen maximaler Emission bei verschiedenen Oberflächentemperaturen 20

Leuchtkraftklassen der Sterne 21

Spektralklasse / –typ und absolute Helligkeit eines Sterns (Tabelle) 24

Praktische Entfernungsbestimmung nach Spektralklasse, -typ und Helligkeit 25

Orion ist nur bei uns zu sehen… 26

Aufgabenbeispiele und Lösungen: Entfernungsbestimmung Spica und Tau Ceti 27

Verwandte Aufgaben und Lösungen 27

Relativ nah und doch unvorstellbar weit entfernt?

Wer in mondloser Winternacht und fernab von menschgemachten Lichtquellen eine lange „Sternenwanderung“ am Strand unternimmt wird den Himmel im wahrsten Sinne mit ganz anderen, nämlich dunkeladaptierten Augen sehen: Unsere nach einiger Zeit geweiteten Pupillen zeigen uns ein, für lichthungrige Stadtmenschen ungewohntes und vielleicht verwirrendes Sternengewimmel. In besonders klaren Nächten kann der Himmel so räumlich erscheinen, dass man meinen könnte, in ihn hineinfallen zu müssen.

Wir schauen tatsächlich in ein dreidimensionales All. Wenn wir aber glauben, es räumlich zu sehen ist das eine Illusion, die auf der unbewussten und falschen Annahme beruht, dass uns helle Sterne näher sind als schwache.

Das ist unsere Erfahrung, die wir aus der Beobachtung irdischer Objekten ziehen. Wir lernen, im Dunkeln die Distanz eines auf uns zufahrenden Autos anhand der Helligkeit, Größe und Distanz der beiden Frontscheinwerfer abzuschätzen. Und wir sind vielleicht sogar der Lage, größere und kleinere, schnellere und langsame Fahrzeuge zu unterscheiden.

Nachts am Strand ins Dunkle wandernd werden die den Blick auf die Sterne störenden Lichter der Stadt immer weiter zusammenrücken und immer schwächer werden. Winkelabstände und Helligkeit der „irdischen Sterne“ stehen in einer Beziehung zur Entfernung, die man grob einschätzen oder durch Messung berechnen kann.

Am Tage können wir, am Strand wandernd, mehr oder weniger gut die Entfernungen durch die scheinbare Größe der vor uns laufenden Menschen beurteilen weil wir wissen, wie groß Menschen tatsächlich sind.

Sterne, auch die uns relativ nahen, sind anders: Auch in den stärksten Teleskopen bleiben sie alle gleich große, winzige Lichtpunkte die uns nicht verraten wie groß und wie hell sie wirklich sind. Damit sagt ihre Helligkeit auch nichts über ihre Entfernung aus. Ein großer, heller und sehr weit entfernter Stern kann uns viel schwächer erscheinen als ein relativ schwach leuchtender „Nachbar“.

Sterne scheinen Jahr für Jahr zur gleichen Zeit an derselben Stelle zu stehen. Reist man in entfernte Länder verändern sich die Positionen der Sterne nicht. Man nennt die Sterne daher „Fixsterne“– im Gegensatz zu den „Wandelsternen“, den Planeten. Sie sind seit Jahrtausenden Bestandteile scheinbar unveränderlicher „Sternbilder“, mythischer Gestalten wie dem Skorpion oder dem Himmelsjäger Orion. Astronomen können mit Hilfe subtiler Beobachtungsmethoden feststellen, dass sich die „Fixsterne“ mit großer Geschwindigkeit („ganz fix“) durch das All bewegen. Sirius, der nächste und hellste, bei uns sichtbare Stern rast mit über 27000 km/h auf uns zu, oder wir auf ihn. Trotzdem bleibt er, selbst in starken Teleskopen, ein nicht wachsender und an derselben Stelle verharrender Punkt.

Der Himmel scheint, von blinkenden Flugzeugen, Satelliten und vereinzelten Sternschnuppen einmal abgesehen, ein sich langsam um eine Achse zu drehende Kuppel mit an ihm aufgehängten Lichtern zu sein.

Die Astrologie (nicht zu verwechseln mit der Astronomie!) spricht zwölf dieser Sternbilder, den „Sternzeichen“ auf die Menschen und ihre Zukunft wirkende Kräfte zu. Aber gehören die Sterne, die diese Sternzeichen bilden, überhaupt zusammen?

Die Wahrheit ist, und für die Astrologie müsste das eigentlich sehr schmerzlich sein, „Fische“, „Waage“, „Stier“ oder „Jungfrau“ sind nur Illusionen. Die Sterne aus denen diese „Sternzeichen“ bestehen, haben in

Wirklichkeit keinen räumlichen Bezug zueinander, sind also keine „Individuen“. Sie liegen nur perspektivisch beieinander. Im Titelbild und weiter unten ist das exemplarisch für den „Orion“ dargestellt.

Aber woher weiß man eigentlich, wie weit die Sterne entfernt und wie groß sie sind?

Die Positionen relativ naher Objekte lassen sich durch Triangulation, d.h. durch das Messen von Winkeln und die Konstruktion von Dreiecken bestimmen. Auch die Vermessung des Sonnensystems gelingt noch mit den Mitteln der Geometrie (vergleiche unsere Unterrichtshilfen „Wie weit ist es bis zum Mond?“ oder „Die Vermessung des Sonnensystems“).

Die Möglichkeiten der Trigonometrie enden dort, wo die Messfehler die Nähe der Messwerte erreichen. Diese Grenze ist viel weiter entfernt als wir uns vorstellen können und liegt dennoch in Bezug auf das dahinter liegende unendliche (?) All in unmittelbarer Nachbarschaft.

Eine Schülerin hat gehört, dass ein Stern mit dem Namen Beteigeuze irgendwann (demnächst) explodieren könnte. Was können wir ihr dazu sagen? Sind wir in Gefahr, wenn das passieren sollte? Wir können das mögliche Ereignis nicht vorhersagen oder in irgendeiner Weise beeinflussen oder abwenden. Aber wir können die Masse des Sterns , seine Entfernung bestimmen und möglichen Wirkungen auf unsere Erde bestimmen, dass wir

Beteigeuze ist ein heller ($0{,}45^m$) und rötlich leuchtender, die linke „Schulter“ des Himmelsjägers „Orion“ bildender, recht instabiler „Superriese“. Er ist so groß, dass die Sonne und die Umlaufbahnen von Merkur, Venus, Erde und Mars bequem darin Platz hätten (Woher weiß man das?). Beteigeuze ist am Winterhimmel nicht zu übersehen und wer von der Möglichkeit einer „Explosion“ dieses Sterns gehört hat, wird seinen Blick vielleicht häufiger darauf richten…

Die naheliegenden Fragen: Warum explodiert ein Stern? Tun sie das alle? Wie weit ist Beteigeuze von uns entfernt? Wie groß ist dieser Stern? Wie stark wäre eine solche Explosion? Welche Folgen hätte es für uns wenn er explodiert? Wann würden wir es merken, wenn es jetzt (!) geschähe? Kann es schon passiert sein? Welche Möglichkeiten der Vorhersage gibt es?

Mit klugen und ausgefeilten Untersuchungsmethoden haben Astrophysiker herausgefunden, dass sich Beteigeuze mit fast 21 Kilometern pro Sekunde von uns entfernt. Aber reicht das?

Zur Beruhigung: Beteigeuze ist 131 Parsec von uns entfernt (…und woher weiß man das?). Ein Parsec entspricht etwa 30 Billionen Kilometern. Das Licht durcheilt diese Strecke in etwas mehr als drei Jahren. Wenn Beteigeuze sich jetzt (!) in eine Supernova verwandelt würden die dann (noch?) lebenden Erdbewohner das erst in 427 Jahren erleben. Aber wie groß ist die Fehlerquote bei der Entfernungs-bestimmung?

Könnte es aber nicht auch sein, dass das bereits vor 426, 412 oder 402 Jahren passiert ist?

Dann könnte der bei der „Sternenwanderung“ noch so ruhige Nachthimmel bald zum Anlass weltweiter und vielleicht schockierender „Breaking News“ werden…

Ist Beteigeuze ein naher (und gefährlicher) „Nachbar“ oder weit genug entfernt?

Mit dieser Unterrichtshilfe setzen wir eine Reihe fort, in der wir uns mit einigen möglichen schulischen Ansätzen der Entfernungsbestimmung innerhalb und jetzt außerhalb des Sonnensystems beschäftigt haben.

Wir sind uns bewusst, dass diese „Unterrichtshilfe“ keine curricularen Bezüge hat. Die Astronomie und die Astrophysik haben keinen Platz mehr in der Schule. Das ist insofern paradox, als das aus unseren Schulen viele kluge Köpfe hervorgegangen sind die entscheidend zu unserem heutigen Weltbild beigetragen haben. Da aber die von den Kultusministerien abgesegneten, vieles vereinfachende und Abschlüsse bequemer machende schulische Richtlinien eine deutlich geringere Lebenserwartung haben werden als das den „Krümel“ Erde umgebende All würden wir denjenigen Lehrerinnen und Lehrern, die sich, mögliche pädagogische Resträume nutzend, aus Leidenschaft und Überzeugung der Schulastronomie widmen möchten, gerne ein paar Anregungen und etwas Basismaterial liefern.

1 parsec =3,086*10^{13}km

Beteigeuze: 131 parsec*3,086*10^{13}km = 4,04*10^{15}km

1 Lichtjahr = 9,46*10^{12}km

$$\mathrm{d}_{Beteigeuze} = \left(\frac{4{,}04 * 10^{15}\mathrm{km}}{9{,}46 * 10^{12}\mathrm{km}}\right) = 427 \text{ Lichtjahre}$$

Wie tief im All könnte man unsere Sonne noch sehen?

Die Sonne ist mit rund 150 Millionen Kilometern Distanz etwa fast 400mal so weit entfernt wie der Mond. 150 Millionen Kilometer, das entspricht 3750 Erdumrundungen. Auch in dieser Entfernung ist die noch so hell, dass das durch die Augenlinse auf die Netzhaut fokussierte Licht die im Brennpunkt liegenden Sehzellen stark erhitzen und irreparabel schädigen würde. Daher gilt: **Schaue niemals mit ungeschützten Augen in die Sonne!**

Wir wissen, dass das Sonnenlicht die Grundlage des Lebens auf der Erde ist. Die Erde hat gerade die richtige Distanz zur Sonne. Auf der uns benachbarten, der Sonne näheren Venus ist es zu heiß, das wenige Wasser dort ist gasförmig. Auf dem Mars ist es zu kalt, Wasser gibt es, wenn überhaupt, nur in fester Form. Durch das auf die Erde treffende Maß an Sonnenstrahlung ist für das Leben notwendige Wasser in erster Linie flüssig bei Temperaturen, bei denen z.B. Proteine nicht koagulieren. Nur so entstand die, in ihrer Zusammensetzung mit dem Leben rückgekoppelte und größere Schwankungen dämpfende Erdatmosphäre.

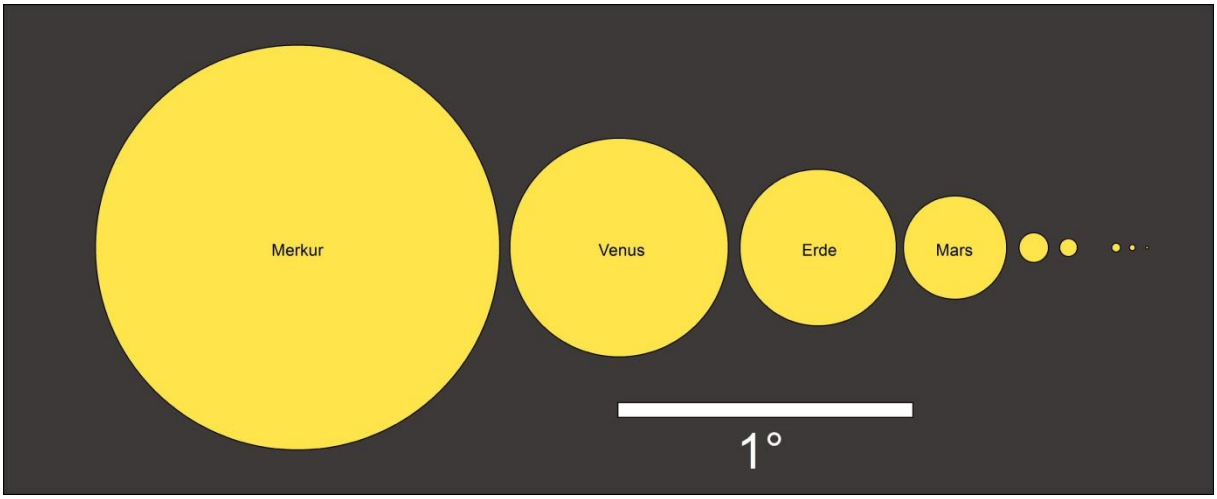
Auf den äußeren Planeten Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun wäre Leben in der Form wie wir es kennen nicht möglich. Auf ihnen wird die Sonne mit zunehmendem Abstand immer kleiner, weniger hell und ihre auf die Planeten fallende Strahlungsleistung geringer.

Auf dem "Planetenpfad" im Schulbiologiezentrum kann man sich die Größenverhältnisse im Sonnensystem selbst "erwandern". Die Sonne ist ein Golfball und der Pluto ist ein fast 200 m entfernter Stecknadelkopf. Wer sich mit "Lichtgeschwindigkeit" fortbewegen möchte, muss pro Minute zwei Fußlängen abschreiten. Die Reise von der Sonne zur Erde dauert dann rund acht Minuten. Dabei wird die Sonne immer kleiner: Auf der Erde erscheint sie so groß wie der Mond (≈ 0,5°).

Das Bild das wir uns heute vom Sonnensystem machen, die Größe und Abstände der Sonne und Planeten, ist das Ergebnis langjähriger Beobachtungen, Messungen und Berechnungen. Dabei standen zunächst die Kepler-Gesetze und die Geometrie (Triangulation) im Vordergrund. In neuerer Zeit ist die Vermessung durch Radar und die nähere Untersuchung durch Raumsonden hinzugekommen.

Scheinbare Größe der Sonne auf den Planeten des Sonnensystems

Planet	Distanz Mill. km	Lichtlaufzeit	**"Größe"**	Golfball (43mm) in … Metern Entfernung
Merkur	58	3,2min	**1,37°**	1,8
Venus	108	6,0min	**0,74°**	3,3
Erde	150	8,3min	**0,53°**	4,6
Mars	228	12,7min	**0,35°**	7,1
Jupiter	778	43,2min	**0,10°**	24,1
Saturn	1434	1h 19,7min	**0,06°**	44,4
Uranus	2872	2h 39,6min	**0,03°**	88,8
Neptun	4495	4h 09,7min	**0,02°**	139,1
Pluto	5906	5h 28,1min	**0,01°**	182,7



Je weiter wir uns im Sonnensystem von der Sonne entfernen, desto "kleiner" wird sie. Irgendwann ist sie nur noch ein Stern und bleibt auch in den stärksten Teleskopen nur ein leuchtender Punkt.

Wie weit scheint das Licht unserer Sonne ins All hinaus?

In welcher Distanz könnte ein Mensch oder ein mit menschlichen Augen ausgestatteter Alien die Sonne gerade noch erkennen?

Zur Beantwortung dieser Frage brauchen wir zwei Werte:

- Die Helligkeit der Sonne auf der Erde
- Die Mindesthelligkeit, auf die unsere Augen gerade noch ansprechen.

Die auf der Erde messbare Helligkeit beträgt $1{,}6 \cdot 10^9$ cd/m² ((Wikipedia "Leuchtdichte").

Die hier als Helligkeit bezeichnete Leuchtdichte wird in Candela pro Quadratmeter angegeben.

1 cd/m^2 entspricht (vereinfacht formuliert) dem Licht, das eine Kerze auf eine 1 Meter entfernte, 1 Quadratmeter große Fläche fallen lässt.

Die Leuchtdichte der Sonne ist mehr als eine Milliarde Mal so groß und liegt im Gigacandela-Bereich.

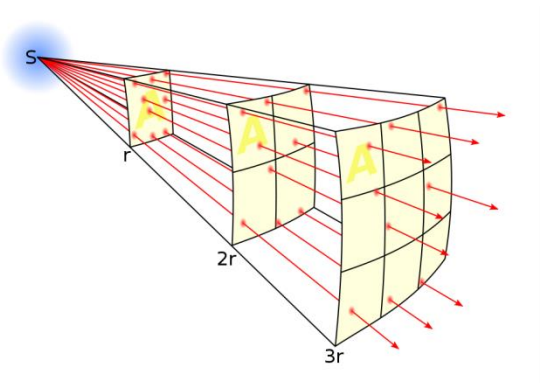
Außerhalb der das Licht teilweise absorbierenden Atmosphäre wurden $1{,}88 * 10^9$ cd/m² gemessen.

"The average luminance of the Sun is about 1.88 giga candela per square metre, but as viewed through Earth's atmosphere, this is lowered to about 1.44 Gcd/m^2"
(Wikipedia "Sun")

Maximale Empfindlichkeit unserer Augen in der Dunkelheit (Nacht- oder skotopisches Sehen)

"Der skotopische Bereich reicht von der Wahrnehmungsschwelle bei einer Leuchtdichte von etwa $3 \cdot 10^{-6}$ cd/m^2 bis etwa 0,003 bis 0,03 cd/m^2, …"
(Wikipedia: "Photopisches und skotopisches Sehen")

Leuchtet eine punktförmige Lichtquelle gleichmäßig in einen dreidimensionalen Raum hinein verteilt sich ihre Intensität auf konzentrisch um den Strahler gedachte Kugeloberflächen. Ihre Flächen wachsen im quadratischen Verhältnis zum Radius.



Wikipedia
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/28/Inverse_square_law.svg/1000px-Inverse_square_law.svg.png

Im Abstand 1r zur Strahlungsquelle wird die Fläche A durchleuchtet, bei 2r die vierfache und bei 3r die neunfache dieser Fläche.
Das auf die Flächen A treffende Licht wird also um den Faktor

$$L_v = \frac{1}{r^2}$$

schwächer (Abstands-Gesetz)

Ein in der Astronomie übliches Entfernungsmaß ist das Lichtjahr: In einem Jahr legt das Licht bei einer Geschwindigkeit von 300000 km/s eine Strecke von 9,461 Billionen ($9{,}461 * 10^{12}$) km zurück. Unterteilt man die riesigen Distanzen im All in Lichtjahre, sind die Zahlen etwas leichter zu handhaben.

Umrechnung von Kilometern zu Lichtjahren und umgekehrt

$$\mathrm{d}_{\mathrm{Lichtjahre}} = \frac{\mathrm{d}_{km}}{9{,}461 * 10^{12}\ \mathrm{km}}$$

$$\mathrm{d}_{\mathrm{km}} = \mathrm{d}_{\mathrm{Lichtjahre}} * 9{,}461 * 10^{12}\ \mathrm{km}$$

Beispiel: Der helle Stern Sirius ist 8,6 Lichtjahre und damit rund 81 Billionen Kilometer entfernt:

$$\mathrm{d}_{\mathrm{km}} = 8{,}6\ \mathrm{Lj} * 9{,}461 * 10^{12}\ \mathrm{km} = 8{,}136 * 10^{13}\mathrm{km}$$

Wie hell wäre unsere Sonne in der Nähe des Sirius?

- In der Nähe der Erde, ist die Sonne $1{,}88*10^9$ cd/m² hell.
- Die Entfernung Sonne - Erde beträgt $1{,}496*10^8$ km (= 1 Astronomische Einheit, AE).
- Die Distanz Sonne (Erde) - Sirius ist $8{,}136*10^{13}$ km

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{AE}} = \frac{8{,}136 * 10^{13}\mathrm{km}}{1{,}496 * 10^{8}\mathrm{km}} = 543881\mathrm{AE}$$

Der Sirius ist also mehr als eine halbe Million Mal so weit von uns entfernt wie die Sonne

Aus dem Abstandsgesetz $L_v = \frac{1}{r^2}$ folgt

$$\frac{1{,}88 * 10^{9}\mathrm{cd/m^2}}{543881\mathrm{AE}^2} = 0{,}006356\ \mathrm{cd/m^2}$$

Mit 6 mcd/m^2 wäre die Sonne mit unseren Augen also auch noch in 8,6 Lichtjahren noch sichtbar.

In welcher Distanz könnte ein mit unseren Augen ausgestatteter "Alien" unsere Sonne gerade noch erkennen?

Geht man von der minimalen Wahrnehmungsschwelle 3 µcd/m² (s.o.) aus wäre das Ergebnis

$$\mathrm{d_{AE}} = \sqrt{\frac{1{,}88 * 10^{9}\mathrm{cd/m^2}}{0{,}000003\ \mathrm{cd/m^2}}} = 25033311\mathrm{AE}$$

$$\mathrm{d} = 25033311\mathrm{AE} * 1{,}496 * 10^{8}\mathrm{km} = 3{,}745 * 10^{15}\mathrm{km}$$

In Lichtjahren ausgedrückt

$$\mathrm{d_{Lichtjahre}} = \frac{3{,}745 * 10^{15}\mathrm{km}}{9{,}461 * 10^{12}\ \mathrm{km}} \approx 396\ \mathrm{Lj}$$

Nehmen wir mal an, um einen der Sterne des "Großen Wagens" kreise ein erdähnlicher Planet mit erdähnlichen Wesen. Würden sie unsere Sonne in ihren Sternkatalogen aufführen?

Dazu müsste man wissen…

- Wie weit ist der Stern im "Großen Wagen" von uns entfernt?
- Und vielleicht: Woher weiß man das eigentlich?
- Wie hell ist die Sonne?
- Wie hell ist sie in der Nähe des Sterns im "Großen Wagen"?
- Und vielleicht: Wie findet man das heraus?

Die "Größenklasse" (Magnituden) der Sterne

Der in der Astronomie oft benutzte Terminus der "Größenklasse" ist ein irreführender Begriff, denn hiermit ist nicht die "Größe", also der von der Entfernung abhängige Sehwinkel eines Objekts gemeint, sondern dessen Helligkeit. Daher ist es besser, statt von „Größenklassen“ von "scheinbarer Helligkeit" oder "Magnitude" zu sprechen.

Schon im Altertum (Babylonien, Griechenland) teilten Astronomen die Sterne in 6 ("Größen-")Klassen ein:

- Die hellsten wurden der „Größenklasse "0" zugeordnet.
- Die gerade noch mit bloßem Auge zu erkennenden schwächsten Sterne erhielten die "6".

Modernere Abstufungen (Pogson, 1850) orientieren sich an der scheinbaren Helligkeit des Sterns Wega im Sternbild Leier und sind logarithmisch aufgebaut. Wega ist 0,0 mag hell. Hellere Himmelskörper tragen ein negatives, dunklere ein positives Vorzeichen.

Die scheinbare Helligkeit der Sonne ist (auf der Erde) $-26{,}74^{m}$.

Die Helligkeitsklassen stehen in einem logarithmischen Verhältnis zueinander.

- Sterne der Helligkeitsklasse $+1^{m}$ sind um den Faktor $\sqrt[5]{100}$ = 2,512 heller als Sterne der Helligkeitsklasse $+2^{m}$.
- Ein Stern mit der Helligkeit +5 ist ein $1/100$ mal so hell wie ein Stern mit +1.

$$\frac{\text{Helligkeit (m)}}{\text{Helligkeit (m + 1)}} = \sqrt[5]{100} = 10^{0{,}4} \approx 2{,}512$$

$\sqrt[5]{100} = 2{,}512$	$100^{\left(\frac{1}{5}\right)} = 2{,}512$	$100^{0{,}2} = 2{,}512$	$10^{0{,}4} = 2{,}512$	$10^{\left(\frac{1}{2{,}5}\right)} = 2{,}512$

Mit bloßem Auge sind in sternenklarer und sonst lichtarmer Nacht noch Objekte bis $+6^{m}$ bis $+7^{m}$ zu erkennen.

Der Helligkeitsunterschied zwischen der Sonne und der Wega von $26{,}7^{m}$ bedeutet:
Die Sonne erscheint uns etwa 48 Milliarden Mal heller als die Wega.

Wega 0, 0^{m}

Sonne - $26{,}7^{m}$

$$\mathrm{m}_{Sonne} - \mathrm{m}_{Wega} = (-26{,}7^{\mathrm{m}}) - (0^{\mathrm{m}}) = 26{,}7^{\mathrm{m}}$$

Helligkeitsunterschied$_{\text{(Wega, Sonne)}}$

$$= 10^{0{,}4\mathrm{m}} = 10^{0{,}4*26{,}7^{\mathrm{m}}} \approx 4{,}79 * 10^{10}$$

"Referenzsterne" für die Helligkeitsklassen 0 - 6

Mit *) bezeichnete Sterne mit sind in Mitteleuropa zirkumpolar, d.h. jahreszeitenunabhängig jede Nacht zu sehen.

Magnitude ("Größenklasse")	Helligkeit in Bezug auf die Magnitude 0 ("Wega") in %	Beispiele
6	0,4	75 UMa* (+6,07), Großer Bär
5	1	78 UMa* (+4,99), Großer Bär
4	3	Alcor (Begleitstern des Mizar), Großer Bär
3,5		Achird* (+3,46), Cassiopeia Alula Borealis* (+3,49), Großer Bär
3	6	Pherkad* (+3,00), Kleiner Bär, Tania australis* (+3,04), Großer Bär
2,5		Phecda* (+2,44), Großer Bär
2	16	Polarstern* (+1,98), Kochab* (+2,05), Kleiner Bär Saiph (+2.04), Orion
1,5		Adhara (+1,50), Großer Hund Castor (+1,57), Zwillinge
1	40	Pollux (+1,16), Zwillinge Spica (+0,98), Jungfrau
0,5		Beteigeuze (+0,50), Orion
0	100	Wega (+0,03), Leier, Capella (+0,08), Fuhrmann Rigel (+0,18),Orion
-1,5		Sirius (-1,46), Großer Hund

Wie viele Sterne kann man am Himmel sehen?

Scheinbare Helligkeit (mag)	Helligkeit in Bezug auf Wega	Anzahl der Sterne
−1.0	2,5	1
0.0	1	4
1.0	0,4	15
2.0	0,16	48
3.0	0,063	171
4.0	0,025	513
5.0	0,01	1 602
6.0	0,004	4 800
6.5	0,0025	9 096
7.0	0,0016	14 000
8.0	0,00063	42 000
9.0	0,00025	121 000
10.0	0,0001	340 000

Mit dem bloßen nachtadaptierten Auge sind Sterne bis zur 6. Größenklasse zu erkennen.
Die „Grenzgröße“ bei Ferngläsern und Teleskopen richtet sich nach dem Objektivdurchmesser: Je größer die „Eintrittspupille“ desto mehr Sterne sind zu sehen. Eine Verdoppelung der Öffnung führt zu einer Vervierfachung des Lichteinfalls.

Die empirische Formel dazu lautet

$$m_{grenz} = 7 + 5*\log(d)$$

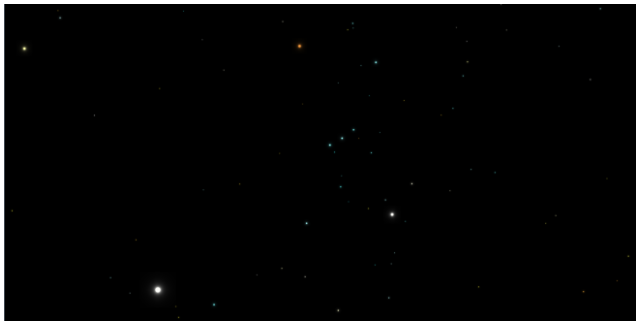
mit d in cm.

Ein Fernglas 10x40 erreicht eine Grenzgröße von 10^m, ein Spiegelteleskop mit d = 116 mm zeigt noch Sterne der 12. Größenklasse.

Im Folgenden ist der gleiche Himmelsausschnitt bei unterschiedlichen Sichtverhältnissen dargestellt.

Der Blick ist auf das Sternbild Orion und den Stern Sirius gerichtet die den winterlichen südlichen Abendhimmel dominieren.

Sterne bis zur Magnitude +3 (Große Städte)



Sterne bis zur Magnitude +4

Sterne bis zur Magnitude +5

Sterne bis zur Magnitude +6

Sterne bis zur Magnitude +7 (Hochgebirge, Wüste)

Die Bilder finden Sie als PowerPoint-Präsentation auf unserer Webseite www.schulbiologiezentrum.info ("Unsere Sternenseite")

In welcher Distanz ist die Sonne gerade noch mit bloßem Auge zu sehen?

(In welcher Distanz ist die Sonne ein Stern der 6. Größenklasse?)

Methode 1:

Hier wird die in der Entfernung Sonne - Erde (= 1 Astronomischen Einheit, AE) gemessene Scheinbare Helligkeit der Sonne zugrunde gelegt und die ausgewählte scheinbare Helligkeit in Vielfachen einer AE ausgedrückt. Da die Entfernung Sonne - Erde bekannt ist, lässt sich diese Distanz in Kilometern oder in Lichtjahren umrechnen.

- Gemessene Helligkeit der Sonne (m_1) = $-26{,}74^m$
- Ausgewählte Helligkeit der Sonne (m_2) = $+6{,}0^m$

1 AE = 149,6 Millionen km ($1{,}496 * 10^8$ km)

$m_1 - m_2 = -26{,}74^m - (+6^m) = 32{,}74^m$

Formel abgeleitet aus dem astronomischen Entfernungsmodul:

Rechnung:

$$\mathrm{m_1 - m_2 = 5 * log\left(\frac{1\ AE}{d}\right)}$$

$$\mathrm{(m_1 - m_2) = 5 * log1AE - 5 * logd}$$

$$\mathrm{5 * logd = 5 * log1AE - (m_1 - m_2)}$$

$$\mathrm{logd = \frac{5 * log1AE}{5} - \frac{(m_1 - m_2)}{5}}$$

$$\mathrm{logd = log1AE - \frac{(m_1 - m_2)}{5}}$$

$$d = 10^{\left(\mathrm{log1AE} - \frac{(m_1 - m_2)}{5}\right)}$$

Lösung:

$$-32{,}74 = 5 * \log\left(\frac{1\ \mathrm{AE}}{\mathrm{d}}\right)$$

$$-32{,}74 = 5 * \log\left(\frac{1{,}496 * 10^8\ \mathrm{km}}{\mathrm{d}}\right)$$

$$-32{,}74 = 5 * \log 1{,}496 * 10^8\ \mathrm{km} - 5 * \log \mathrm{d}$$

$$\log \mathrm{d} = \frac{5 * \log 1{,}496 * 10^8\ \mathrm{km} + 32{,}74}{5}$$

$$logd = log1{,}496 * 10^8\ \mathrm{km} + \frac{32{,}74}{5}$$

$$\log \mathrm{d} = \log 1{,}496 * 10^8\ \mathrm{km} + 6{,}548$$

$$\log \mathrm{d} = 14{,}7229$$

$$\mathrm{d} = 10^{14{,}7229}$$

$$\mathrm{d} = 5{,}28323 * 10^{14}\mathrm{km}$$

1 Lichtjahr = 9,461 Billionen km ($9{,}461*10^{12}$ km)

$$d_{\text{Lichtjahre}} = \frac{5{,}28323 * 10^{14}\text{km}}{9{,}461 * 10^{12}\ \text{km}}$$

$$d_{\text{Lichtjahre}} = 55{,}84\ \text{Lichtjahre}$$

Ergebnis:

In etwa 56 Lichtjahren Entfernung wäre die Sonne gerade noch mit bloßem Auge zu erkennen.

Wie hell wäre unsere Sonne in dieser Entfernung?

Beobachtung aus einem Abstand von 56 Lichtjahren ($5{,}28323 * 10^{14}$km):

$$5{,}28323 * 10^{14}\text{km}$$

$$\frac{d}{AE} = \frac{5{,}28323 * 10^{14}\text{km}}{1{,}496 * 10^{8}\text{km}} = 3531571$$

$$\frac{1{,}88 * 10^{9}\text{cd/m}^2}{3531571\text{AE}^2} = 0{,}000150738\ \text{cd/m}^2$$

Im Abstand von etwa 56 Lichtjahren beträgt die Leuchtdichte (Luminanz) L_v der Sonne nur noch 0,15 mcd/m^2 oder 150 µcd/m^2.

Methode 2:

Eine andere Methode gründet sich auf die "absolute Helligkeit" (M) eines Sterns. Sie wird aus der scheinbaren Helligkeit des Sterns (auf der Erde) und seiner Entfernung errechnet. Die Absolute Helligkeit ist ein auf eine gemeinsame Entfernung bezogenes Maß und ermöglicht den Vergleich der Sterne untereinander. Als einheitliche Distanz wurden 32,6 Lichtjahre oder 10 parsec ("Parallaxensekunde") festgelegt. Das ist die Entfernung bei der der Abstand Erde - Sonne (1 AE) unter dem Sehwinkel von 10 Bogensekunden erscheint. 1 parsec sind daher 3,26 Lichtjahre oder $3{,}086*10^{13}$km.

Aus der absoluten Helligkeit lassen sich die Distanzen errechnen bei denen der Stern ausgewählte Helligkeitswerte erreicht.

Die Absolute Helligkeit M der Sonne beträgt $+4{,}83^m$. Das heißt, im Abstand von 32,6 Lichtjahren (= 10 parsec) erscheint sie nur noch als Stern 4. "Größenklasse" und wäre nur noch unter guten Sichtbedingungen zu erkennen.

Berechnung der Absoluten Helligkeit M der Sonne aus der auf der Erde gemessenen Scheinbaren Helligkeit m

$$m_1 - m_2 = 5 * \log\left(\frac{1\ \text{AE}}{d}\right)$$

$$-m_2 = 5 * \log\left(\frac{1\ \text{AE}}{d}\right) - m_1 \mid * -1$$

$$m_2 = m_1 - 5 * \log\left(\frac{1\ \text{AE}}{d}\right)$$

m_{Sonne}= - $26{,}74^m$
1 AE = $1{,}496*10^8$ km
d = $3{,}086*10^{14}$km (=10 parsec)

$$m_2 = (-26{,}74^m) - 5 * \log\left(\frac{1{,}496 * 10^8 km}{3{,}086 * 10^{14} km}\right)$$

$$m_2 = (-26{,}74^m) - (-31{,}57^m) = +4{,}83^m$$

Die Distanz d in der die Sonne die Scheinbare Helligkeit $+6^m$ erreicht berechnen wir mit dem "Entfernungsmodul"

$$m - M = 5 * \log(d) - 5$$

Aufgelöst nach log(d)

$$\frac{m - M}{5} + 1 = \log(d)$$

aufgelöst nach d

$$d = 10^{(\frac{m-M}{5}+1)}$$

Mit M = $+4{,}8^M$ wird die scheinbare Helligkeit m = $+6^m$ danach in einer Distanz von 17,38 parsec erreicht.

$$d = 10^{(\frac{6-4{,}8}{5}+1)}$$

$$d = 10^{(\frac{1{,}2}{5}+1)}$$

$$d = 10^{(1{,}24)}$$

$$d = 17{,}38 parsec$$

erreicht

1 parsec =$3{,}086*10^{13}$km

Damit ist r = 17,38parsecc*$3{,}086*10^{13}$km = $53{,}6*10^{13}$km

$$d = \left(\frac{53{,}6 * 10^{13} km}{9{,}46 * 10^{12} km}\right) = 56{,}7 \text{ Lichtjahre}$$

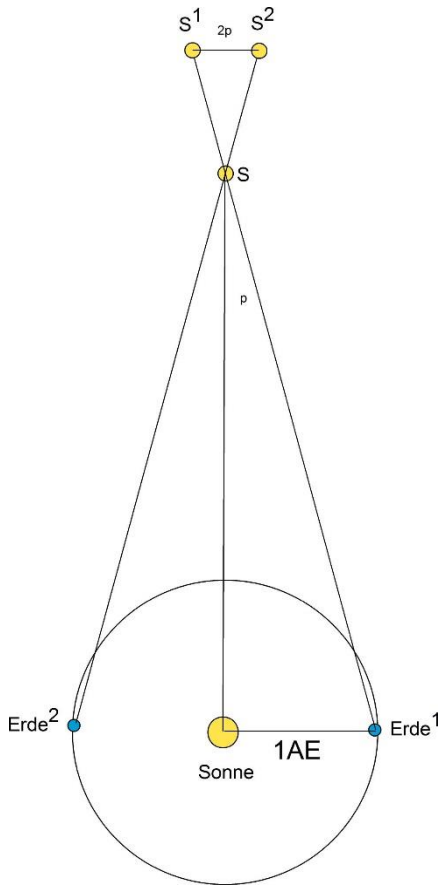
Die Trigonometrische Methode: Entfernungsbestimmung durch die Parallaxe

Der hellste in Mitteleuropa sichtbare Stern ist der Sirius im Sternbild Großer Hund.

Am Winterhimmel ist er unterhalb des gleichfalls auffälligen Orions nicht zu übersehen.

Fotografiert man ihn mit einem starken Teleskop und einer sehr (!) guten Kamera im Herbst und dann ein halbes Jahr später im Frühjahr kann man eine leichte Pendelbewegung vor dem Hintergrund anderer Sterne feststellen.

Dieses scheinbare Kippeln um einen gedachten Mittelpunkt entsteht durch die Bewegung der Erde um die Sonne.



Die Erde bewegt sich im Laufe eines Jahres einmal um die Sonne.

Die Sonne ist durchschnittlich 1 Astronomische Einheit von der Erde entfernt.

Die Positionen „Erde^1“ und „Erde^2“ liegen ein halbes Jahr und 2AE auseinander.

Der Stern „S“ erscheint aus den beiden Perspektiven um den Winkel 2p vor dem Sternenhintergrund verschoben und erscheint als S^1 und S^2.

Die Strecke Sonne – Erde und die Distanz Sonne – Stern bilden ein rechtwinkliges Dreieck

Aus dem Parallaxenwinkel p (=2p/2) und der Kathete 1AE lässt sich die Entfernung Sonne – Stern oder Erde – Stern berechnen.

Die erste Messung einer Sternparallaxe gelang Friedrich BESSEL im Jahre 1832 mit dem Stern 61 im Sternbild Schwan. Der Wert p beträgt nur 0,32 Bogensekunden (≈1/7200 eines Grades. Der Vollmond ist etwa ½ Grad „groß“)

„Der springende Daumen“

Strecke deinen Arm mit nach oben gerichtetem Daumen weit vor dir aus und betrachte– zunächst mit beiden Augen - einen hinter dem Daumen liegenden Gegenstand.
Schließe dann abwechselnd das eine und dann das andere Auge.

Der Daumen scheint vor seinem Hintergrund hin und her zu springen.

Ändere die Distanz zwischen Auge und Daumen!

Suche verschiedene mehr oder weniger weit entfernte Hintergrundobjekte aus!

Welche Beziehungen erkennst du zwischen den Distanzen und den „Sprungweiten“ des Daumens?

Formuliere diese Beziehungen als „Je…desto“-Sätze!

Diese halbjährliche Pendelbewegung des Sirius beträgt nur 0,758 Bogensekunden.

1 Bogensekunde (1´´) ist der 60ste Teil einer Bogenminute (1´) und der 3600ste Teil eines Grades (1°).

$$0{,}758'' = \frac{1^\circ}{3600} * 0{,}758 = 0{,}000210556^\circ$$

Der halbe Winkel (α) und die bekannte mittlere Entfernung Sonne – Erde sind Teile eines rechtwinkligen Dreiecks. Der Winkel wird als Parallaxenwinkel bezeichnet.

Die Gegenkathete zum Winkel α ist 1 Astronomische Einheit (AE) groß.

1 AE (mittlere Entfernung Sonne- Erde): 149,6 Millionen km ($1{,}496*10^8$ km)

Die Ankathete entspricht der zu berechnenden Distanz Sonne – Sirius.

Das Längenverhältnis zwischen Gegenkathete zu Ankathete ist gleich dem Tangens des Winkels α.

Daraus folgt:

$$\frac{1\mathrm{AE}}{\mathrm{d}} = \tan\alpha$$

$$d = \frac{1\mathrm{AE}}{\tan\alpha}$$

In welcher Distanz erscheint eine 1 cm große Murmel unter dem Parallaxenwinkel des Sirius (0,379´´)?

0,379´´ = 0,000105277°

$$\mathrm{d} = \frac{0{,}01\ \mathrm{m}}{\tan 0{,}000105277°}$$

$$\mathrm{d} = 5442{,}4\ \mathrm{m}$$

Entfernung des Sirius:

Parallaxenwinkel 0,379´´ (Bogensekunden)

$$0{,}379'' = \frac{1^\circ}{3600} * 0{,}379 = 0{,}000105277°$$

Tangens des Parallaxenwinkels

$$\tan 0{,}000105277° = 0{,}000001837$$

$$\mathrm{d} = \frac{1\mathrm{AE}}{\tan\alpha}$$

$$\mathrm{d} = \frac{1{,}496 * 10^8\mathrm{km}}{0{,}000001837}$$

$$\mathrm{d} = 8{,}143712575 * 10^{13}\mathrm{km}$$

1 Lichtjahr = 9,461 Billionen km ($9{,}461*10^{12}$ km)

$$\mathrm{d}_{\mathrm{Lichtjahre}} = \frac{8{,}143712575 * 10^{13}\mathrm{km}}{9{,}461 * 10^{12}\ \mathrm{km}}$$

$$\mathrm{d}_{\mathrm{Lichtjahre}} = 8{,}6\ \mathrm{Lichtjahre}$$

Damit ist Sirius etwa 81 Billionen Kilometer oder 8,6 Lichtjahre von uns entfernt.

Rechnen mit der Parallaxenformel

In welcher Distanz erscheint der Abstand Sonne – Erde (1AE = 149,6*106 km) unter einem Winkel von 1 Bogensekunde (1° = 3600´´)? Diese Entfernung wird Parallaxensekunde (pc = parsec) genannt und ist neben dem Lichtjahr (1 pc = 3,26 Lj)ein wichtiges astronomisches Entfernungsmaß.

$$1\ \mathrm{pc} = \frac{1\mathrm{AE}}{\tan 1''}$$

$$1'' = \frac{1°}{3600} = 0{,}00027778°$$

$$1\ \mathrm{pc} = \frac{149{,}6 * 10^6\ \mathrm{km}}{\tan 0{,}00027778°} = 3{,}086 * 10^{13}\ \mathrm{km}$$

Daraus folgt:

$$\mathrm{d\ (in\ parsec)} = \frac{1}{\mathrm{p(in\ Bogensekunden)}}$$

und

$$\mathrm{d\ (in\ Lichtjahren)} = 3{,}26 * \frac{1}{\mathrm{p(in\ Bogensekunden)}}$$

Sirius mit p = 0,379´´ ist demnach $\frac{1}{0{,}379''} =$ 2,639pc = 8,14*10^{13}km oder $3{,}26 * \frac{1}{0{,}379''}$ = 8,6 Lj entfernt.

Mit zunehmender Entfernung werden die Parallaxen der Sterne immer kleiner und die Messung mit erdgebundenen Mitteln immer unsicherer. Die Grenze liegt bei etwa 300 Lichtjahren.

Astronomen ist es aber gelungen, die mit den Methoden der Trigonometrie bestimmten Entfernungen relativ naher Sterne mit ihrer scheinbaren Helligkeit und spektralen Eigenschaften zu koppeln. Aus der jeweiligen scheinbaren Helligkeit (m) lässt sich bei bekannter Distanz die absolute Helligkeit (M) in der Standardentfernung 10 pc berechnen.

So kann die auf der Erde registrierte scheinbare Helligkeit (m) und der Spektraltyp eines Sterns einer absoluten Helligkeit (M) zugeordnet werden. Mit m und M kann mit Hilfe des Entfernungsmoduls die Distanz berechnet werden.

Mit den Daten aus der folgenden Tabelle können die Entfernungen der Sterne nach mehreren Methoden berechnet werden:

- Mit der Parallaxenformel $d(pc) = \frac{1}{p('')}$
- Mit Hilfe des Spektraltyps und der Absoluten Helligkeit unter Verwendung des oben genannten Entfernungsmoduls $\mathrm{d} = 10^{(\frac{\mathrm{m-M}}{5}+1)}$

Stern		Parallaxe	Spektraltyp	Scheinbare Helligkeit (m)	Absolute Helligkeit (M)
α Bootis	Arktur	0,08885´´		-0,05	-0,31
α Lyrae	Wega	0,12893´´	A0V (var)	+0,03	+0,58
α Aurigae	Capella	0,07729´´	M1	+0,08	-0,48
β Orionis	Rigel	0,00422´´	B8Ia	+0,18	-6,69
α Canis Minoris	Procyon	0,28593´´	F5IV-V	+0,40	+2,68

Für den hellen Stern Rigel im Orion erhält man mit der Parallaxenformel eine Distanz von $\frac{1}{0{,}00422''}$ = 237 pc oder $3{,}26 * \frac{1}{0{,}00422''}$ =773 Lj. Mit dem Entfernungsmodul $\mathrm{d} = 10^{(\frac{\mathrm{m-M}}{5}+1)} = 10^{(\frac{0{,}18-(-6{,}69)}{5}+1)}$

berechnet beträgt der Abstand 236,6 pc.

Der Spektraltyp B8Ia (siehe unten) entspricht (siehe Tabelle unten) der Absoluten Helligkeit – 7,1.

Daraus folgt $10^{(\frac{0{,}18-(-7{,}1)}{5}+1)}$ = 285,8 pc.

Der Wert laut „Redshift“ ist 236,967 pc. (772,5 Lj oder $7{,}31*10^{15}$ km).

Entfernungsbestimmung mit Hilfe der Spektralanalyse

Bereits mit einem einfachen, auf den (auch den bewölkten!) Himmel gerichteten Handspektroskop kann man feststellen, auf welche Elemente das Sonnenlicht auf dem Weg zu uns trifft: Das von dunkelrot über alle Regenbogenfarben hinweg bis zum violett reichende Spektrum des Sonnenlichts wird von einer Vielzahl feiner Linien durchzogen.

Sie sind, anders als man zunächst vermuten könnte, kein Gerätefehler und kein Reklamationsgrund, diese Linien sind auch unter tausend anderen Spektroskopen identisch..

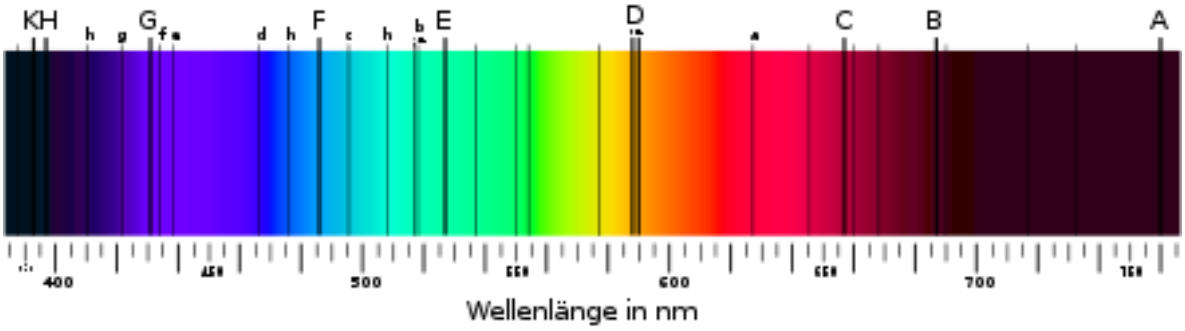
Es sind die Absorptionsbanden bestimmter, durch die Strahlungsenergie der Sonne in ihrer unmittelbaren Umgebung oder in der Erdatmosphäre ionisierter Elemente.

Die Spektroskopie und das genaue Studium dieser Linien verrieten den Wissenschaftlern, aus welchen Elementen die Sonne besteht und wie unser wie auch alle anderen Sterne „funktionieren“.

So treten im Spektrum aller Sterne Wasserstoff- und Heliumlinien auf. Ohne dass jemals ein Physiker eine Probe auf der Sonne gezogen hätte konnte man daraus schließen, dass die Sonne Wasserstoff zu Helium „verbrennt“ und den bei dieser Kernfusion auftretenden Massenverlust gemäß der Einstein´schen Formel $E = m \times c^2$ in Strahlung (unter anderem Licht und Wärme) verwandelt.

Ionisation: Das heißt, ein normalerweise nach außen elektrisch neutrales Element absorbiert Strahlung einer bestimmten Wellenlänge. Im neutralen Zustand enthält das Atom im Kern genauso viele positiv geladene Protonen wie negativ geladene Elektronen in der Hülle. Wenn die bei der Absorption aufgenommene Strahlung die passende Wellenlänge hat und ihre Energie groß genug ist, reißt sie ein oder mehrere Elektronen aus dem Atom heraus. Das Atom ist jetzt ionisiert und erhält einen positiven Ladungsüberschuss. Die zur Ionisation notwendige Energie wird passenderweise Ionisationsenergie genannt.

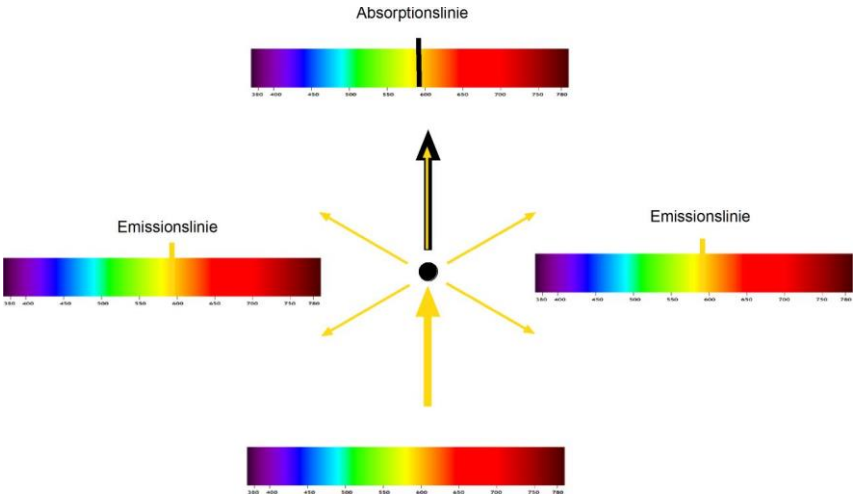
Die absorbierte Strahlung fehlt im Spektrum, d.h. bei der entsprechenden Wellenlänge erscheint ein dunkler Streifen. Die Wellenlängen der als nach ihrem Entdecker „Fraunhofer-Linien“ genannten und mit Buchstaben bezeichneten Absorptionsbanden lassen sich bestimmten Elementen zuordnen.



Fraunhofer-Linie	Element	Wellenlänge Nm (gerundet)	Fraunhofer-Linie	Element	Wellenlänge Nm (gerundet)
A	O_2	759	F	H β	486
B	O_2	687	G	Fe, Ca	431
C	H α	656	H	Ca^+	397
$D_{(1,2)}$	Na	589	K	Ca^+	393
$E_{(2)}$	Fe	527			

Eine der auffälligsten Banden im Sonnenspektrum ist die eng beieinander liegende Doppellinie D_1 und D_2 des Natriums. Die Strahlung bei den dazugehörigen Wellenlängen liefert genau den Energiebetrag der notwendig ist, um das Element zu ionisieren.

Fällt das angeregte Elektron auf seinen „Platz“ zurück wird die absorbierte Strahlung wieder abgegeben. Natriumsalz (z.B. Natriumchlorid) leuchtet hellorange, wenn es in der rauschenden farblosen Flamme eines Gasbrenners erhitzt wird. Im Dunkeln ist dann im Spektroskop eine hellorange Emissionslinie vor schwarzem Hintergrund zu sehen.

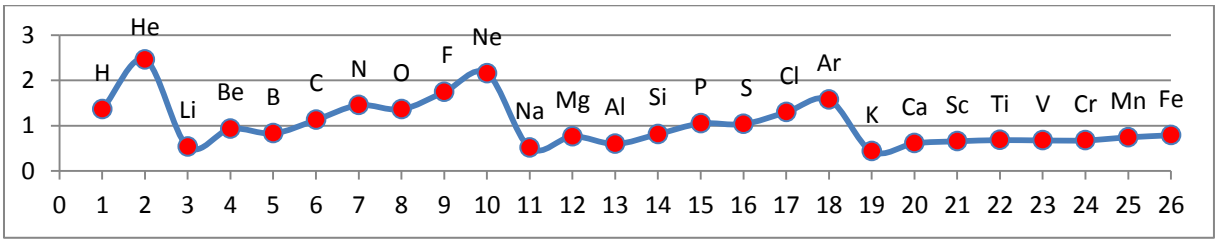


Wird ein Atom durch Strahlung einer passenden Wellenlänge (hier „Orange“) angeregt bzw. ionisiert erscheint in Strahlungsrichtung hinter dem Atom eine dunkle Absorptionslinie.
Die beim Zurückfallen in den „Normalzustand“ auftretende Strahlung verteilt sich in alle Richtungen des Raums.

Die Absorptionslinie entspricht dem Nettoverlust der Energie in Strahlungsrichtung.

Die zum Herausschlagen von Elektronen notwendige Ionisationsenergie ist abhängig von der Position des Atoms im Periodensystem. In der untenstehenden Grafik zeigt die Energie, die notwendig ist um das Atom zu ionisieren gegen die Ordnungszahl aufgetragen.

Ionisationsenergie in MJ/mol (Wasserstoff bis Eisen)



Mit steigender Ordnungszahl sinkt die Ionisationsenergie, wobei sie zu Beginn jeder Periode am geringsten und bei den jeweiligen Edelgasen am höchsten ist.

Atome am Beginn jeder Periode besitzen in der äußersten Schale nur 1 Elektron. Die zum Herausschlagen dieses (Valenz)Elektrons notwenige Energie ist geringer als bei den in der jeweiligen Periode nachfolgenden Elementen. In jeder Periode wächst mit steigender Ordnungszahl die Zahl der Elektronen in der Außenschale und die notwendige Ionisationsenergie wird größer.

Die Edelgase am Ende jeder Periode zeigen die stabilste Elektronenkonfiguration: Alle Schalen sind vollständig besetzt und die Ionisationsenergie in dieser Periode erreicht ihr Maximum um mit Beginn der nächsten Periode auf ein deutlich tieferes Niveau herunterzuspringen.

Mit steigender Ordnungszahl werden die Atome größer und der Abstand zwischen dem positiv geladenen Kern und den negativ geladenen Elektronen wächst. Der Einfluss des Kerns auf die Elektronen der Außenschale wird von Periode zu Periode geringer, womit die Ionisationsenergie abnimmt.

Das heißt in Bezug auf die Sterne:

- In der Hülle heißer Sterne werden vor allem Elemente ionisiert die eine hohe Ionisationsenergie benötigen. Das führt vor allem zu Absorptionsbanden von H und He.

- In der Hülle kühlerer Sterne werden vor allem Elemente ionisiert die eine geringere Ionisationsenergie benötigen. Das führt vor allem zu Absorptionsbanden von Elementen mittlerer bis hoher Ordnungszahl, z.B. den Metallen Natrium und Calcium.

Trägt man die Strahlungsenergie eines Sterns gegen die Wellenlängen auf kann man auf seine Oberflächentemperatur schließen. Je heißer der Stern, desto höher ist der Strahlungsanteil im kurzwelligen, blauen bis violetten Bereich. Im Spektrum relativ kühler Sterne dominieren langwellige rote Anteile.

Eine wesentlich feinere Typisierung der Sterne entsteht, wenn die Stärke der Absorptionsbanden in ihrem Spektrum relativ zueinander erfasst wird.
So wird nach Möglichkeit jedem Stern ein Spektraltyp zugeordnet:

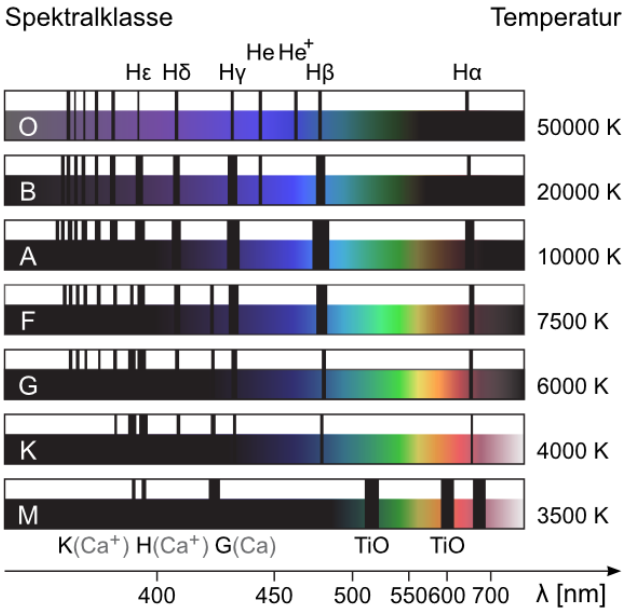
Der Spektraltyp eines Sterns setzt sich zusammen aus der Spektralklasse und der Leuchtkraftklasse.

Die Sonne gehört zum Spektraltyp G2V, zusammengesetzt aus der Spektralklasse G(2) und der Leuchtkraftklasse V (römisch 5). Sie ist damit ein gelber Stern und ein "Zwerg" der Hauptsternreihe.

Astrophysiker unterteilen 7 Spektralklassen O, B, A, F, G, K, M jeweils untergliedert in Stufen von 0 - 9

Spektralklassen

Klasse	O	B	A	F	G	K	M
Beispiel	Mintaka	Rigel, Spica	Wega, Sirius, Altair	Procyon, Polarstern	Sonne	Arktur, Aldebaran	Beteigeuze, Antares
Farbe	blau	blauweiß	weiß	gelbweiß	gelb	orange	Rotorange
← Temperatur →							



Quelle: Universität Göttingen

Spektralklassen, Temperaturen und typische Spektren:

Je heißer der Stern, desto stärker die kurzwelligen (violett-blauen) und desto schwächer die langwelligen (roten) Spektralanteile.

Je heißer der Stern, desto stärker der Anteil von Absorptionslinien im kurzwelligen Bereich.

Je kühler der Stern, desto hervortretender die Absorptionslinien im langwelligen Teil des sichtbaren Spektrums.

ARBEITSBLATT

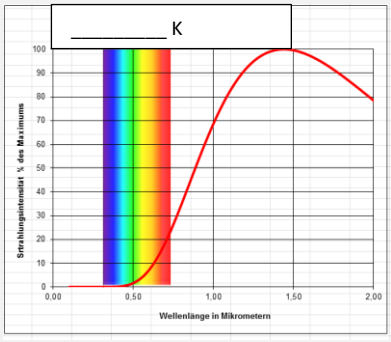
Strahlungskurven und Wellenlängen maximaler Emission bei verschiedenen Oberflächentemperaturen

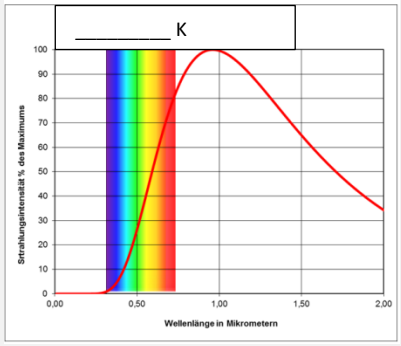
Berechnen Sie nach dem WIENschen Verschiebungsgesetz die Wellenlängen (λ) der Emissionsmaxima von Objekte mit Temperaturen von zwischen 2000 Kelvin (Glühlampe) und 20000 Kelvin (Oberflächentemperatur des Sterns Beteigeuze)
Ordnen Sie den Objekten jeweils eine typische Strahlungskurve zu

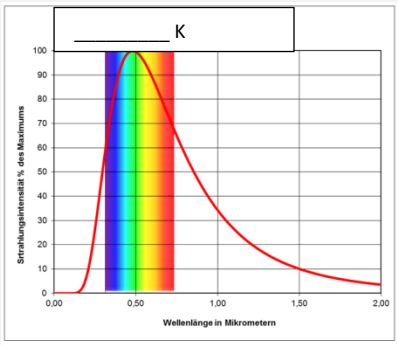
WIENsches Verschiebungsgesetz:

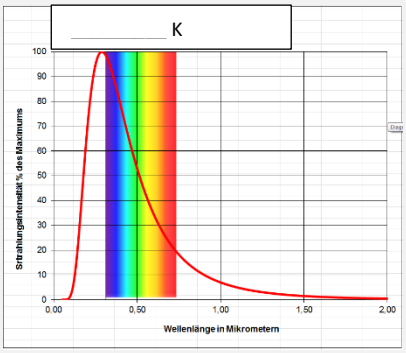
$$\lambda_{\max} = \frac{2897{,}8\,\mu\mathrm{m}\cdot\mathrm{K}}{T}$$

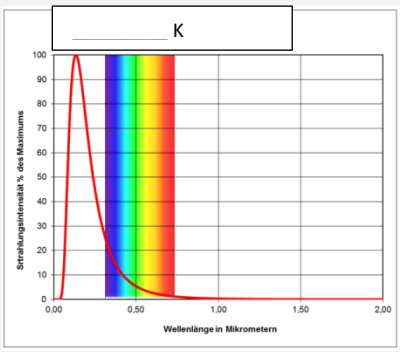
→ vereinfacht: $\lambda_{\max\,(\mu m)}$ = 2897,8 / T (Kelvin) (0 K = - 273,15°C)







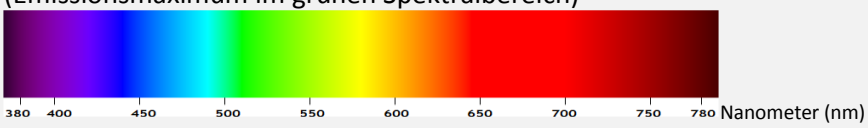




Tragen Sie jeweils oben links eine für die Strahlungskurve passende Temperatur (K) ein!

Bei welcher Wellenlänge liegt Ihr eigenes Strahlungsmaximum?

Berechnen Sie mit dem WIENschen Verschiebungsgesetz die Oberflächentemperatur der Sonne (Emissionsmaximum im grünen Spektralbereich)



Diskutieren Sie die Frage:

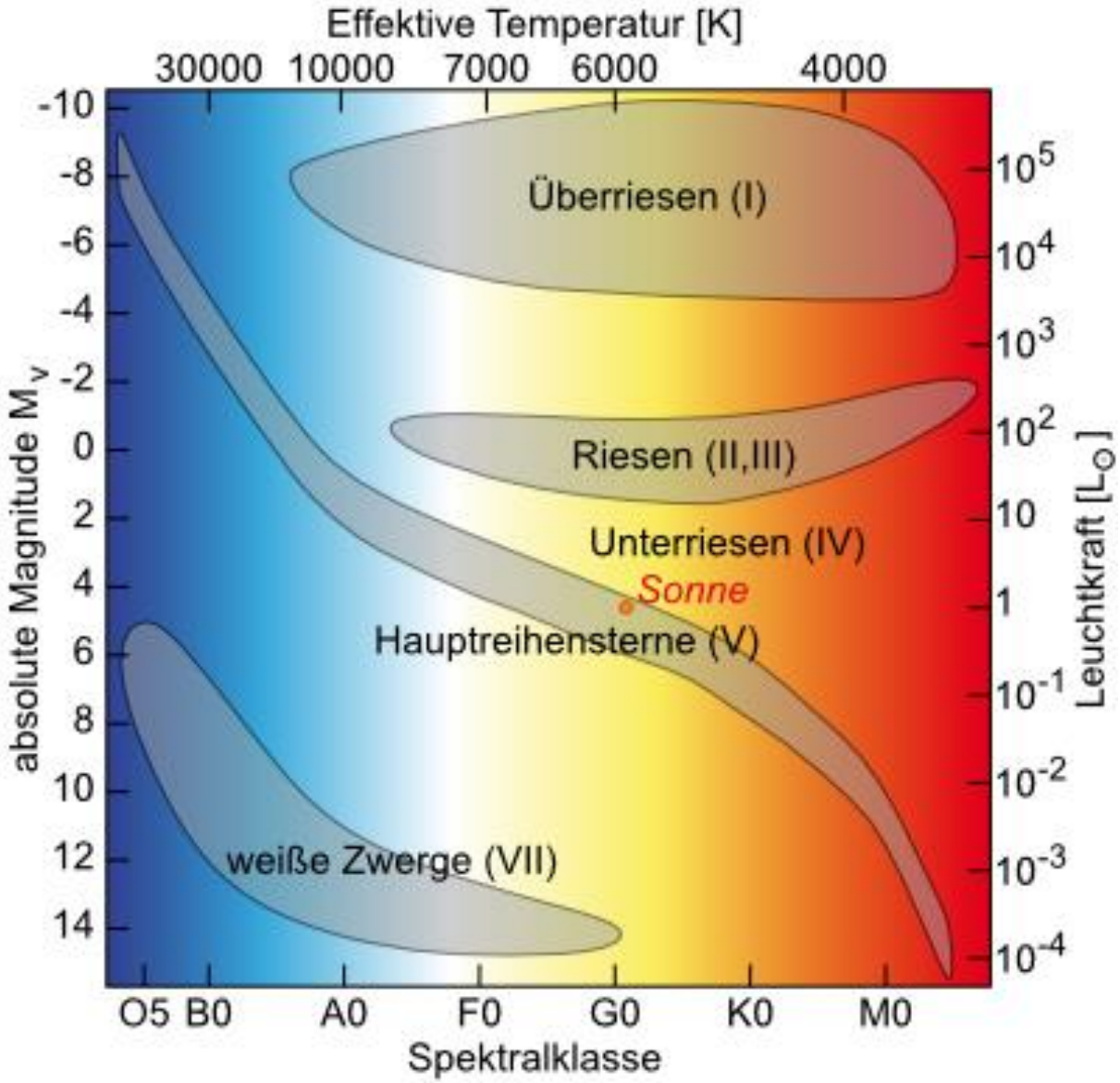
- Warum sehen wir nur Licht im Wellenlängenbereich 380 - 780 nm?
- Wie erklären Sie, dass Chlorophyll a und b ihre Absorptionsmaxima in diesem Bereich haben?
- Was folgern Sie für das Leben auf einem den Stern Beteigeuze, 2400 K) kreisenden Planeten?
- Können Sie sich Leben auf einem um den Stern Bellatrix (22000 k) kreisenden Planeten vorstellen?
- Woher kennt man die Oberflächentemperaturen von Sternen?

Leuchtkraftklassen der Sterne

V	IV	III	II	I b	I ab	I a	I a-0
Zwerge (Hauptsternreihe)	Unterriesen	Riesen	Helle Riesen	Überriesen			Hyperriesen

Unterzwerge (VI) und weiße Zwerge (VII) sind hier nicht berücksichtigt

Aus der Leuchtkraftklasse und den spektralen Eigenschaften entstand das nach ihren Erfindern benannte Herzsprung-Russel- Diagramm (HR-Diagramm)



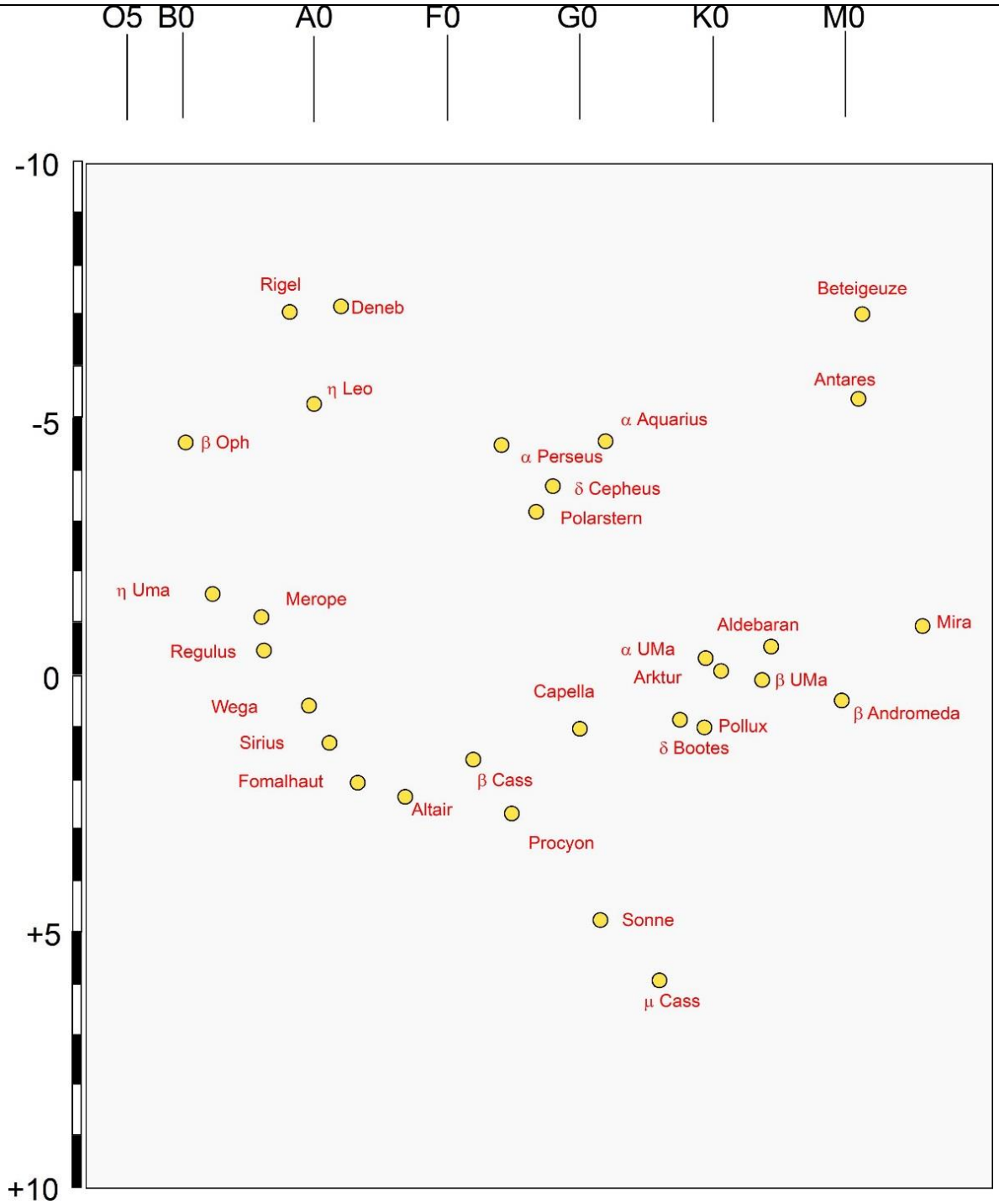
Quelle: https://lp.uni-goettingen.de/get/image/6148

ARBEITSBLATT

Suche "Deinen" Stern aus dem Diagramm heraus, lies die Spektralklasse und die Absolute Helligkeit ab.

Berechne die Distanz aus der scheinbaren und der absoluten Helligkeit.

Stern	Scheinbare Helligkeit	Absolute Helligkeit	Entfernung
Aldebaran	+0,85		
Altair	+0,77		
Antares	+0,96		
Arktur	-0,04		
Beteigeuze	+0,50		
Capella	+0,08		
Deneb	+1,25		
Fomalhaut	+1,16		
Merope			
Mira	+6,47		
Polarstern	+1,97		
Pollux	+1,14		
Procyon	+0,38		
Regulus	+1,35		
Rigel	+0,18		
Sirius	-1,46		
Wega	+0,03		
α Aquarius	+2,95		
α Perseus	+1,81		
α UMa	+1,70		
β Andromeda	+2,07		
β Cassiopeia	+2,28		
β Ophiuchus	+2,54		
β UMa	+2,07		
δ Bootes	+3,45		
δ Cepheus	+3,48–4,37		
η Leo	+3,49		
η UMa	+1,85		
μ Cass	+5,16		



Vereinfachtes „Herzsprung-Russel-Diagramm“:
Beziehung zwischen Absoluter Helligkeit und Spektraltyp

Beispiel Pollux (Sternbild Zwillinge):
Absolute Helligkeit $+1^{M}$
Scheinbare Helligkeit $+1{,}14^{m}$
Grundlage
http://www.bernd-leitenberger.de/spektralklassen.shtml

Spektralklasse / –typ und absolute Helligkeit eines Sterns (Tabelle)

Sp		M							
		V	IV	III	II	I b	I ab	I a	I a-0
O	3	-6.0	-	-	-	-	-	-6.8	-
	4	-5.9	-6.1	-6.5	-	-	-	-6.8	-
	5	-5.7	-6.0	-6.4	-	-	-	-6.8	-
	6	-5.5	-5.8	-6.1	-	-	-6.5	-6.8	-
	7	-5.2	-5.5	-5.9	-6.0	-6.3	-6.5	-6.8	-
	8	-4.9	-5.4	-5.8	-6.0	-6.2	-6.5	-6.8	-
	9	-4.5	-5.2	-5.6	-5.9	-6.2	-6.5	-6.8	-
B	0	-4.0	-4.7	-5.1	-5.7	-6.1	-6.4	-6.9	-8.2
	1	-3.2	-3.8	-4.4	-5.4	-5.9	-6.4	-6.9	-8.3
	2	-2.45	-3.1	-3.9	-4.8	-5.7	-6.4	-6.9	-8.3
	3	-1.6	-2.4	-3.0	-4.5	-5.5	-6.3	-7.0	-8.3
	5	-1.2	-1.7	-2.2	-4.0	-5.4	-6.2	-7.0	-8.4
	7	-0.6	-1.1	-1.5	-3.5	-5.3	-6.2	-7.1	-8.4
	8	-0.25	-0.7	-1.2	-3.1	-5.2	-6.2	-7.1	-8.5
	9	+0.2	-0.9	-0.6	-	-5.2	-6.2	-7.1	-8.5
A	0	+0.65	+0.3	+0.0	-3.0	-5.2	-6.3	-7.1	-8.5
	1	+1.0	+0.7	+0.2	-3.0	-5.2	-6.4	-7.2	-8.5
	2	+1.3	+1.0	+0.3	-2.9	-5.2	-6.5	-7.2	-8.6
	3	+1.5	+1.2	+0.5	-2.8	-5.2	-6.5	-7.2	-8.7
	5	+1.95	+1.3	+0.7	-2.8	-5.1	-6.6	-7.4	-8.8
	7	+2.2	+1.7	+1.1	-2.7	-5.1	-	-7.7	-8.9
	8	+2.4	+2.0	+1.2	-2.6	-5.1	-	-7.8	-8.9
F	0	+2.7	+2.2	+1.5	-2.5	-5.1	-6.6	-8.0	-9.0
	2	+3.6	+2.4	+1.7	-2.4	-5.1	-6.6	-8.0	-9.0
	5	+3.5	+2.5	+1.6	-2.3	-5.1	-6.6	-8.0	-9.0
	8	+4.0	+2.8	-	-2.3	-5.1	-6.5	-8.0	-9.0
G	0	+4.4	+3.0	+1.0	-2.3	-5.0	-6.4	-8.0	-8.9
	2	+4.7	+3.0	+0.9	-2.3	-5.0	-6.3	-8.0	-8.8
	5	+5.1	+3.1	+0.9	-2.3	-4.6	-6.2	-7.9	-8.6
	8	+5.5	+3.1	+0.8	-2.3	-4.4	-6.1	-7.8	-8.5
K	0	+5.9	+3.1	+0.7	-2.3	-4.3	-6.0	-7.7	-8.5
	1	+6.15	+3.1	+0.6	-2.3	-4.3	-6.0	-7.6	-
	2	+6.4	-	+0.5	-2.3	-4.3	-5.9	-7.6	-
	3	+6.65	-	+0.3	-2.3	-4.3	-5.9	-7.5	-
	4	+7.0	-	+0.0	-2.3	-4.3	-5.8	-7.5	-
	5	+7.35	-	-0.2	-2.3	-4.4	-5.8	-7.5	-
	7	+8.1	-	-0.3	-2.3	-4.4	-5.7	-7.4	-
M	0	+8.8	-	-0.4	-2.5	-4.5	-5.6	-7.0	-8.0
	1	+9.3	-	-0.5	-2.5	-4.6	-5.6	-7.0	-8.0
	2	+9.9	-	-0.6	-2.6	-4.7	-5.6	-6.9	-8.0
	3	+10.4	-	-0.6	-2.6	-4.8	-5.6	-6.9	-8.0
	4	+11.3	-	-0.5	-2.6	-4.8	-5.6	-6.8	-8.0
	5	+12.3	-	-0.3	-	-4.8	-5.6	-6.8	-8.0

Die Absoluthelligkeiten der Sterne im MK-System, (Aus: Schmidt-Kaler, Landolf-Börnstein, Neue Serie, Astronomy and Astrophysics, Vol. 2 b, Berlin, Springer 1982, Seite 18)

Übernommen aus G.D. Roth, Handbuch für Sternfreunde, Band 2, Beobachtung und Praxis, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1989, Tabelle 30

Praktische Entfernungsbestimmung nach Spektralklasse, -typ und Helligkeit

Die im Internet und astronomischen Tabellen nachzuschlagenden Spektraldaten eines Sterns lassen sich absoluten Helligkeiten zuordnen. Man weiß also, wie hell ein bestimmter Stern in einer Standardentfernung von 32,6 Lichtjahren ist. Aus der auf der Erde gemessenen Scheinbaren Helligkeit kann man die Entfernung des Sterns berechnen.

Beispiel: Pollux (Zwillinge)

Spektralklasse K0IIIb

Daraus abgeleitet M = +0,7^{M} (für K0III)

Scheinbare Helligkeit m = +1,16^{m}

Entfernung:

$$\text{logd} = \text{log10parsec} - \frac{(m - M)}{5}$$

$$d = 10^{\left(\text{log10parsec} - \frac{(m-M)}{5}\right)}$$

$$\text{logd} = \text{log}3{,}086 * 10^{14} km - \frac{((+1{,}16) - (+0{,}7))}{5}$$

$$\text{logd} = \text{log}3{,}086 * 10^{14} km - 0{,}092$$

$$\text{logd} = 14{,}3974$$

$$d = 10^{14{,}3974}$$

$$d = 2{,}5 * 10^{14} km$$

$$\text{d}_{\text{Lichtjahre}} = \frac{2{,}5 * 10^{14}\text{km}}{9{,}461 * 10^{12}\ \text{km}}$$

$$\text{d}_{\text{Lichtjahre}} = 26{,}4\ \text{Lichtjahre}$$

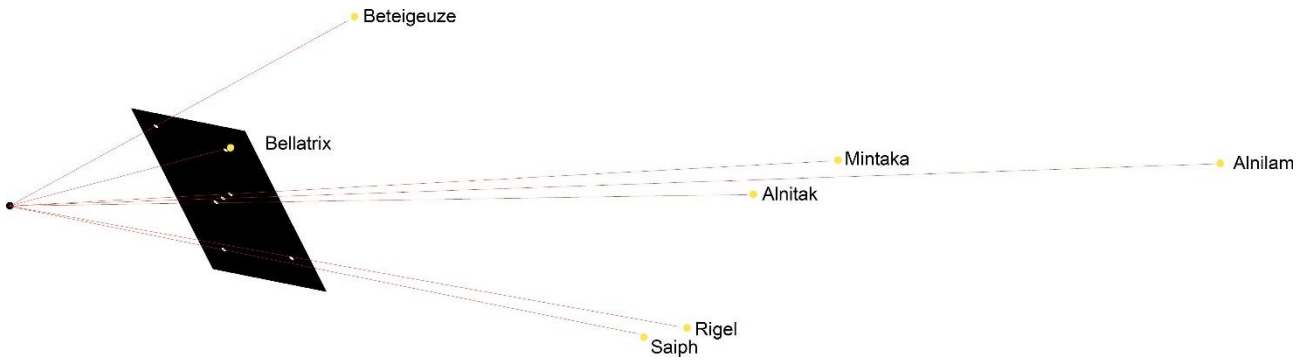
Neuere Angabe: m = +1,08^{m}

Tatsächliche Entfernung: 33,8 Lj

Orion ist nur bei uns zu sehen…

Orion, der wie alle Sternbilder aus einer Anzahl von an einer scheinbaren „Himmelskugel“ verteilten Lichtpunkten zu bestehen scheint entpuppt sich bei näherer Untersuchung der sehr unterschiedlichen Entfernungen als eine perspektivische Täuschung die nur aus unserer Sicht Bestand hat. Ein Beobachter in einem weit entfernten Sonnensystem würde dieses „Sternbild“ in ganz anderer Form sehen.

Stern	Sternbild	Scheinbare Helligkeit	Spektraltyp	Absolute Helligkeit (nach Spektralklasse)	Absolute Helligkeit (nach Redshift)	d (pc)	Typ
Rigel	β Orionis	+0,18 mag	B8Ia	$-7{,}1^{M}$	$-6{,}693^{M}$	237	Superriese
Beteigeuze	α Orionis	+0,45 mag	M2Ib	$-4{,}7^{M}$	$-5{,}137^{M}$	131	Superriese
Bellatrix	γ Orionis	+1,64 mag	B2III	$-3{,}9^{M}$	$-2{,}721^{M}$	75	Hauptreihenstern
Saiph	κ Orionis	+2,07 mag	B0.5I	$-6{,}4^{M}$	$-4{,}654^{M}$	221	Hauptreihenstern
Alnitak	Zet ori	+1,74 mag	unbekannt	-	$-5{,}255^{M}$	251	????
Alnilam	Eps ori	+1,69 mag	B0Ia	$-6{,}9^{M}$	$-6{,}382^{M}$	412	Superriese
Mintaka	δ Orionis	+2,25	unbekannt	-	$-4{,}993^{M}$	281	????



Gäbe es einen bewohnbaren Planeten im „Sonnensystem“ des mit etwa 4 Lichtjahren Entfernung der Erde nächstgelegenen Sterns α Centauri würde unsere Sonne ein Stern im Sternbild Cassiopeia sein…

Menschen die an die Kraft von „Sternzeichen“ glauben mögen einmal die räumliche Konfiguration dieser „Sternbilder“ untersuchen! Die Distanzen der am „Löwen“, „Steinbock“ oder „Wassermann“ beteiligten Sterne lassen sich im Internet nachschlagen und damit kann man leicht dreidimensionale Modelle der „Sternbilder“ konstruieren.

Aufgabenbeispiele und Lösungen: Entfernungsbestimmung Spica und Tau Ceti

(Aufgabenbeispiel der ESA, sci.esa.int)

1 - Spica

- Apparent magnitude, m = 0.98
- Spectral type is B1
- From H-R diagram this indicates an absolute magnitude, M, in the range: -3.2 to -5.0

$D = 10^{(m-M+5)/5}$

$M = -3.2,\ D = 10^{(0.98 - (-3.2) + 5)/5} = \underline{68.54\ pc}$

$M = -5.0,\ D = 10^{(0.98 - (-5.0) + 5)/5} = \underline{157.05\ pc}$

The Hipparcos measurements give d = 80.38 pc

2 - Tau Ceti

- Apparent magnitude, m = 3.49
- Spectral type is G2
- From H-R diagram this indicates an absolute magnitude, M, in the range: +5.0 to +6.5

$D = 10^{(m-M+5)/5}$

$M = +5.0,\ D = 10^{(3.49 - 5.0 + 5)/5} = \underline{5.00\ pc}$

$M = +6.5,\ D = 10^{(3.49 - 6.5 + 5)/5} = \underline{2.50\ pc}$

The Hipparcos measurements give d = 3.64 pc

Verwandte Aufgaben und Lösungen

Wie hell ist die Sonne in der Nähe des Jupiters?

Abstand Sonne - Jupiter: 5.2 AE

$$\frac{1.88 * 10^9 cd/m^2}{5.2AE^2} = 69526627\ cd/m^2$$

$\approx 70 * 10^6\ cd/m^2$

In welchem Abstand wäre die Sonne so hell wie eine Kerze (1 cd)?

$$\mathrm{xAE} = \sqrt{\frac{1.88 * 10^9 \mathrm{cd/m^2}}{1\ \mathrm{cd/m^2}}} = 43359\mathrm{AE}$$

$$\mathrm{d} = 43359\mathrm{AE} * 1.496 * 10^8 = 6.49 * 10^{12}\mathrm{km}$$

$$\mathrm{d_{Lichtjahre}} = \frac{6.49 * 10^{12}\mathrm{km}}{9.461 * 10^{12}\ \mathrm{km}} = 0.686\ \mathrm{Lichtjahre}$$

In welchem Abstand würde man eine Kerze gerade noch erkennen können?

Geht man vom höchsten Empfindlichkeitswert der Wahrnehmung 3 µcd/m² aus wäre das Ergebnis

$$d = \sqrt{\frac{1cd/m^2}{0.000003\ cd/m^2}} = 577.4m$$