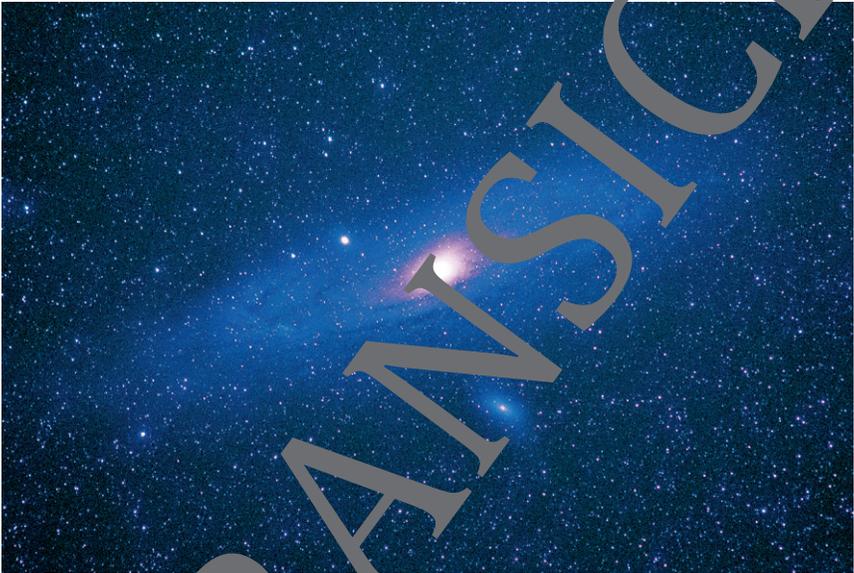


Astronomische Entfernungsbestimmungen II – außerhalb unseres Sonnensystems

Carlo Vöst



© Tony Rowell/Corbis Documentary

Aufbauend auf dem bereits erschienenen Beitrag „Astronomische Entfernungsbestimmungen I – Sonnensystem“ werden für Ihre Klasse Methoden vorgestellt, um Entfernungen zu Objekten außerhalb unseres Sonnensystems zu bestimmen. Dabei wird auf die wichtigsten und zuverlässigsten Verfahren eingegangen. Außerdem finden Sie in diesem Beitrag eine Reihe von differenzierten Aufgaben, mit denen Ihre Lernenden das erworbene Wissen einüben können. Eine Klassenarbeit rundet das Material ab.

Astronomische Entfernungsbestimmungen II – außerhalb unseres Sonnensystems

Oberstufe (weiterführend)

Carlo Vöst

Hinweise	1
M1 Die jährliche trigonometrische Parallaxe	2
M2 Entfernungsbestimmung über die Helligkeit der Sterne	3
M3 Entfernungsbestimmung von Galaxien	9
M4 Aufgaben	15
M5 Klassenarbeit	18
Lösungen	20

Die Schülerinnen und Schüler lernen:

welche Methoden notwendig sind, um Entfernungen zu Objekten zu bestimmen, die außerhalb unseres Sonnensystems liegen, abhängig davon, um welche Distanzen es sich handelt. Ihre Klasse lernt den trigonometrischen Ansatz, eine Möglichkeit über die Helligkeit der Sterne, eine über Cepheiden-Veränderliche, über Supernovae und mittels der Rotverschiebung kennen. Insbesondere bekommen Ihre Lernenden einen Einblick, bis zu welchen Distanzen die Methoden jeweils angewandt werden können und welche Ungenauigkeiten eventuell auftreten.

Hinweise

Lernvoraussetzungen

Die Lernenden haben bereits gute Kenntnisse über den Aufbau des Universums sowie über die Entfernungsbestimmung über die jährliche Parallaxe. Sie beherrschen mathematische Grundlagen wie Grad- und Bogenmaß eines Winkels und Grundlagen der Trigonometrie. Die Lernenden können die Begriffe scheinbare und absolute Helligkeit von Sternen einordnen. Sie kennen Cepheiden-Veränderliche und Supernovae und wissen, was der Dopplereffekt aussagt. Ihre Klasse hat einen sicheren Umgang mit dem Taschenrechner, auch bei der Bearbeitung komplexer Terme.

Methodisch-didaktische Anmerkungen

Die Materialien **M1**, **M2** und **M3** bestehen aus einem theoretischen Überblick über gängige Messmethoden zur Entfernungsbestimmung und passende Beispiele. Sie können gut im Rahmen einer Lerntheke, dem Austausch in Expertengruppen oder als Hilfestellung zur Bearbeitung der Aufgaben dienen. Material **M4** fasst viele, differenzierte Aufgaben, die alle gängigen Messmethoden abdecken und gut zum Festigen des erlernten Inhalte dienen. Die Klassenarbeit (**M5**) rundet das Material ab und dient als Lernerfolgskontrolle.

Zusatzmaterialien

Sie finden alle Abbildungen und Grafiken auch zum Download.



M1 Die jährliche trigonometrische Parallaxe

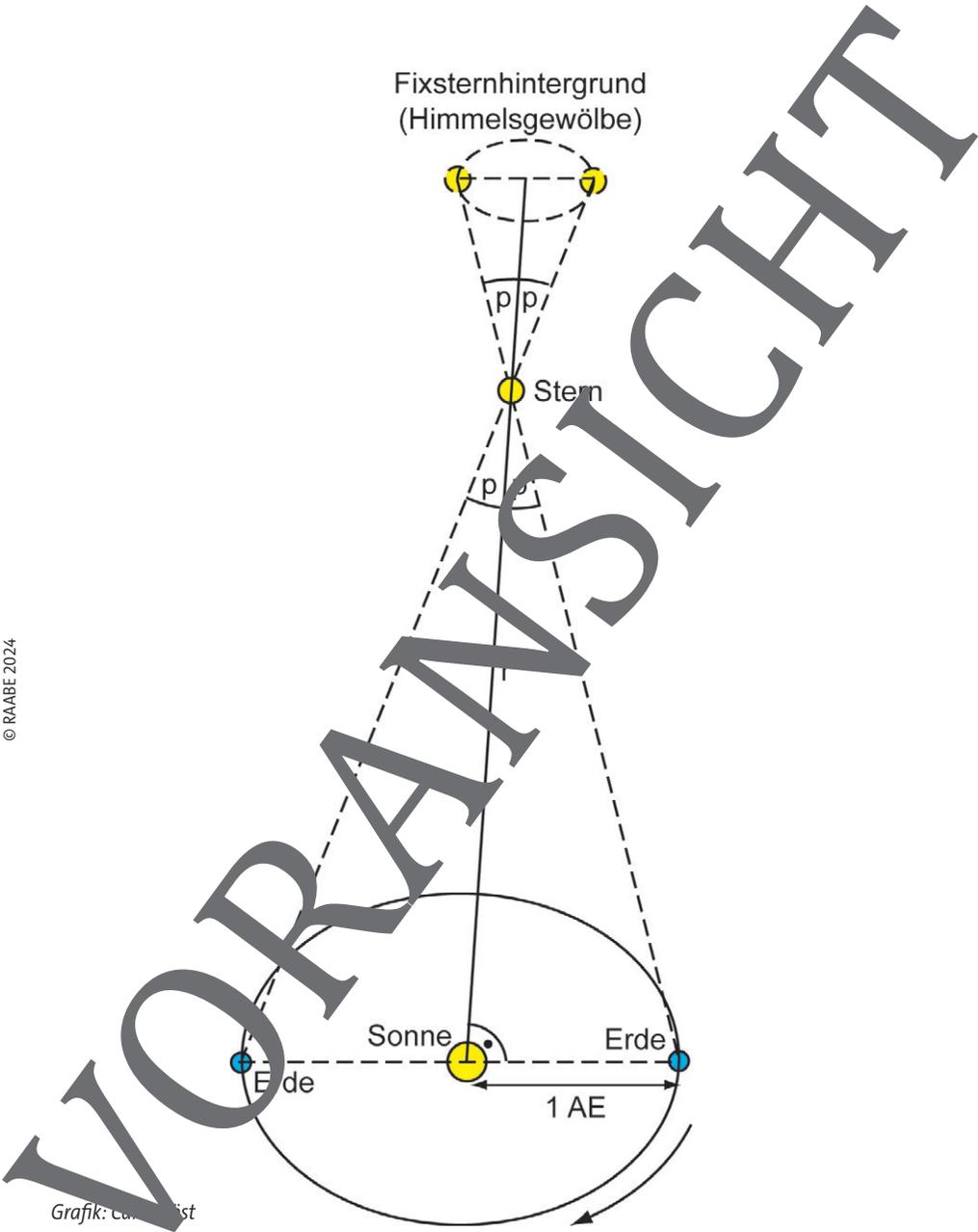
Wie bereits im ersten Teil des Beitrags zur astronomischen Entfernungsbestimmung erklärt, funktioniert die Methode über die Messung der jährlichen Parallaxe mit einfachen Teleskopen gut bis zu einem Abstand von 100 pc, das entspricht einem Abstand von etwa 300 ly. Diese Abstandsbegrenzung liegt vor allem an der turbulenten Lufthülle der Erde. Das heißt, dass sich für Parallaxenwerte kleiner als $0,01''$ (0,01 Bogenminuten) die Entfernung nicht mehr gut bestimmen lässt.

Von 46 Sternen, die in einer Entfernung von bis zu 100 ly liegen, kann man also über die jährliche trigonometrische Parallaxe die Entfernung gut bestimmen. Zur Erinnerung: Man bezeichnet den Winkel, unter dem von einem Stern aus der Erdbahnradius erscheint, als jährliche trigonometrische Parallaxe p . Es gilt dann für die Entfernung r :

$$r = \frac{1 \text{ AE}}{p} \quad (p \text{ in Bogenmaß}).$$

Unter Verwendung moderner Teleskope (Weltraumteleskope) bekommt man sogar noch bis ca. 1000 pc, also 3000 ly messbare Werte.

Wenn man allerdings daran denkt, dass unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, einen Durchmesser von 100 000 ly hat, sieht man schon, dass diese Methode sich auf relativ wenige Sterne beschränkt.



© RAABE 2024

Grafik: Carl... ist

M2 Entfernungsbestimmung über die Helligkeit der Sterne

Die Entfernung vieler Sterne lässt sich über den Vergleich der scheinbaren Helligkeit m eines Sterns mit seiner absoluten Helligkeit M bestimmen. Da bei weit entfernten Objekten die (scheinbare) Helligkeit m gut gemessen werden kann, reicht diese Methode bis zu mehreren 100 Millionen Lichtjahren.

Die scheinbare Helligkeit m

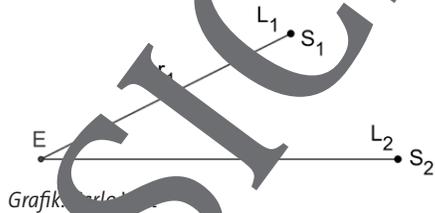
Die scheinbare Helligkeit eines Sternes gibt an, wie hell ein Beobachter auf der Erde diesen Stern wahrnimmt. Sie hängt also von einer Sinnesempfindung, einem Reiz im Auge ab. Diese beobachtete Helligkeit eines Sterns hängt ab von

- der tatsächlichen Gesamtstrahlungslleistung des Sterns (Leuchtkraft L),
- der Entfernung r des Sterns,

deshalb ist die beobachtete Helligkeit die scheinbare Helligkeit. Das heißt, ein weit entfernter Stern kann aufgrund seiner großen Leuchtkraft heller erscheinen als ein Stern, der näher zu uns liegt, aber lichtschwächer ist. Zum Beispiel Sirius, eigentlich ein Doppelsternsystem im Sternbild „Großer Hund“. Er ist etwa doppelt so weit entfernt wie der erdnächste Stern Alpha Centauri im Sternbild des Zentauren am Südhimmel), trotzdem ist er der hellste Stern am Nachthimmel (doppelt so hell wie der zweithellste Stern Canopus im Sternbild Kreuz des Schiffes am Südhimmel) und besitzt somit eine größere scheinbare Helligkeit (Alpha Centauri ist nur der dritthellste).

Dies liegt daran, dass Sirius eine viel größere Leuchtkraft besitzt. Wenn man die beiden Sterne auf dieselbe Entfernung bringen würde, wäre Sirius fast 17-mal heller als Alpha Centauri. Seit Hipparch von Nicaea (lebte von ca. 190 v. Chr. bis ca. 120 v. Chr. auf Rhodos) verwendet man als Bezeichnung und Skaleneinheit für die scheinbare Helligkeit die Begriffe Größe oder magnitudo, abgekürzt mit mag oder m .

Hipparch unterschied 6 Helligkeitsklassen, und zwar von 1 („sehr hell“; z. B. Sirius, Wega, Vega) bis 6 („gerade noch sichtbar“; z. B. 61 Cygni im Sternbild Schwan oder der Planet Uranus). Achtung: Je größer die Zahl, umso geringer die Helligkeit. An dieser Helligkeits-



Grafik: arlo

skala, die auf Hipparch zurückgeht, hat die moderne Astronomie festgehalten, sie ist auf beiden Seiten hin erweitert. Die übliche Schreibweise, um die relative Helligkeit anzugeben, ist z. B. für den Stern Prokyon: $2,64^m$ für 2,64 mag.

Folgende Tabelle gibt für einige Himmelskörper die relative (scheinbare) Helligkeit an:

Himmelskörper	relative Helligkeit
Sonne	-27^m
Vollmond	-13^m
Halbmond	-11^m
Sirius	$-1,46^m$
Arktur	$-0,3^m$
Wega	$0,03^m$
Capella	$0,1^m$
Rigel	$0,1^m$
Beteigeuze	$0,5^m$
Aldebaran	$0,8^m$
Deneb	$1,25^m$
Polarstern	$2,07^m$
Delta Centauri	$2,58^m$

Die schwächsten, gerade noch mit Teleskopen von der Erde aus sichtbaren Sterne haben Helligkeiten bis 25^m . Mit dem besten Teleskop, das die Erde auf einer Umlaufbahn umrundet, erkennen wir sogar Sterne bis 70^m .

Ferner ist wichtig zu wissen, dass ein Stern mit 1 mag definitionsgemäß $\sqrt[5]{100} \approx 2,512$ mal heller ist als ein Stern mit 2 mag. Das heißt, 5 mag Differenz entspricht einem Faktor von 100.

Die absolute Helligkeit M

Um die Sterne untereinander hinsichtlich ihrer tatsächlichen Helligkeit bzw. ihrer Leuchtkraft unterscheiden zu können, stellt man sich vor, dass alle Sterne eine Entfernung von 10 Parsec von der Erde hätten, und gibt ihre (relative) Helligkeit dort an, man spricht dann von der absoluten Helligkeit M .

Entfernungsbestimmung über m und M

Wir berechnen die absolute Helligkeit M mithilfe der Umrechnungsformel

$$M = m + 5 - 5 \cdot \lg(r),$$

wobei m die relative Helligkeit und r der Abstand in Parsec (pc) ist.

Zwischen scheinbarer und absoluter Helligkeit besteht folgender Zusammenhang:

$$m - M = -5 + 5 \cdot \lg(r),$$

man bezeichnet den Term $m - M$ als Entfernungsmodul.

Folgerungen für die Entfernung r eines Sternes:

$$m - M > 0 \Leftrightarrow r > 10 \text{ pc};$$

$$m - M = 0 \Leftrightarrow r = 10 \text{ pc};$$

$$m - M < 0 \Leftrightarrow r < 10 \text{ pc};$$

$m - M = -5 + 5 \cdot \lg(r) \Rightarrow 5 \cdot \lg(r) = m - M + 5 \Leftrightarrow r = 10^{0,2(m - M + 5)}$ pc
zur Berechnung der Entfernung r eines Sterns können wir also

$$r = 10^{0,2(m - M + 5)} \text{ pc}$$

verwenden.

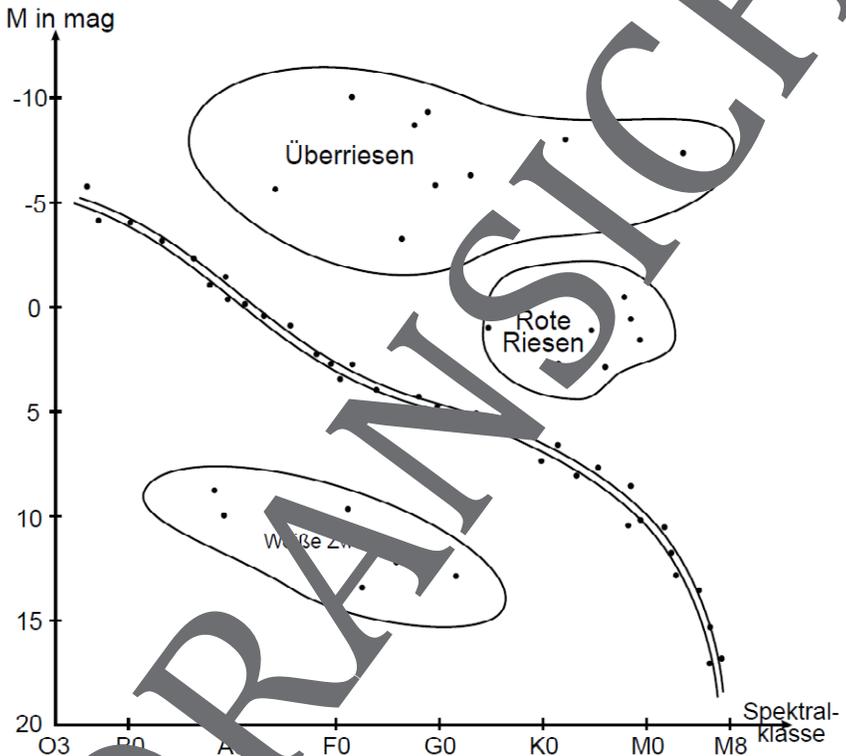
Beispiel: Der Stern Wega im Sternbild Leier hat eine scheinbare Helligkeit von 0,03 mag und eine absolute Helligkeit von 0,49 mag, also besitzt er eine Entfernung von $r = 10^{0,2(0,03 - 0,49 + 5)}$ pc = 8,1 pc (weil die Werte von scheinbarer und absoluter Helligkeit ähnlich sind, liegt dieser Wert in der Nähe von 10 pc).

Himmelskörper	relative Helligkeit	Entfernung	absolute Helligkeit
Sonne	-27 ^m	4,85 · 10 ⁻⁶ pc	4,9
Vollmond	-12 ^m	1,25 · 10 ⁻⁸ pc	17,8
Halbmond	-11 ^m	1,25 · 10 ⁻⁸ pc	32,0
Sirius	-1,46 ^m	2,7 pc	1,38
Arktur	-0,31 ^m	11,2 pc	-0,56
Wega	0,03 ^m	8,1 pc	0,49
Capella	0,1 ^m	14,0 pc	-0,63
Rigel	0,1 ^m	270,0 pc	-7,01
Boteigeuze	0,42 ^m	180,0 pc	-5,86
Aldebaran	0,8 ^m	21,0 pc	-0,81
Deneb	1,25 ^m	500,0 pc	-7,24
Polarstern	1,97 ^m	137,2 pc	-3,72
Bote Centauri	2,58 ^m	130 pc	-2,99

Unter all diesen Sternen wäre also Deneb (im Sternbild Schwan, der zusammen mit Vega und Altair das sogenannte Sommerdreieck bildet) absolut gesehen der hellste. Er ist allerdings am weitesten entfernt und erscheint uns somit als nicht besonders hell. Das Problem ist also bei dieser Methode, wie man die absolute Helligkeit eines Sterns bestimmen kann.

Wenn man Spektren von Sternen mit hochauflösenden Spektrographen untersucht, zeigt sich, dass die Spektren von feinen dunklen Absorptionslinien durchzogen sind. Von Stern zu Stern unterscheiden sich diese erheblich in Anzahl, Lage und Intensität. Nach diesen spektralen Eigenschaften werden die Sterne in Spektralklassen eingeteilt. Man benennt die einzelnen Klassen mit großen Buchstaben, deren Abfolge (O, B, A, F, G, K, M, (R, N) historisch bedingt ist. (Merksatz als „Eselsbrücke“: *Oh Be A Fine Girl Kiss Me Right Now.*) Außerdem gibt es eine feinere Unterteilung jeder Spektralklasse in 10 „Unterklassen“: mit fallender Temperatur von 0 bis 9.

Der Däne Ejnar Hertzsprung und der Amerikaner Henry Norris Russell entwickelten in den Jahren 1911 bis 1913 das Hertzsprung-Russell-Diagramm, indem sie die bekannten und vermessenen Sterne entsprechend ihrer Spektralklasse und ihrer absoluten Helligkeit in ein Diagramm eintrugen:



Grafik: Carlo Vöst

Kennt man also den Sterntyp und seine Spektralklasse (die von Farbe und Temperatur abhängt), so erhält man aus diesem Diagramm leicht seine absolute Helligkeit.

Mehr Materialien für Ihren Unterricht mit RAAbits Online

Unterricht abwechslungsreicher, aktueller sowie nach Lehrplan gestalten – und dabei Zeit sparen.
Fertig ausgearbeitet für über 20 verschiedene Fächer, von der Grundschule bis zum Abitur: Mit RAAbits Online stehen redaktionell geprüfte, hochwertige Materialien zur Verfügung, die sofort einsetz- und editierbar sind.

- ✓ Zugriff auf bis zu **400 Unterrichtseinheiten** pro Fach
- ✓ Didaktisch-methodisch und **fachlich geprüfte Unterrichtseinheiten**
- ✓ Materialien als **PDF oder Word** herunterladen und individuell anpassen
- ✓ Interaktive und multimediale Lerneinheiten
- ✓ Fortlaufend **neues Material** zu aktuellen Themen



Testen Sie RAAbits Online
14 Tage lang kostenlos!

www.raabits.de

