

Der mehrfache Sonnenuntergang

In Bezug auf den SuW-Beitrag „Ein Planet in einem Vierfach-Sternsystem entdeckt“ / Blick in die Forschung (SuW 1/2013)

Wolfgang Wieser

Johannes Kepler veröffentlichte die nach ihm benannten Gesetze in den Jahren 1609 und 1619, die die Bewegungen der Planeten im Sonnensystem beschreiben. Erst das Wechselwirkungsgesetz, von Isaac Newton im Jahr 1687 formuliert, fordert, dass sich sowohl die Planeten als auch die Sonne um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Aus der genauen Beobachtung der Bewegung der Sonne lassen sich somit Rückschlüsse auf das Planetensystem ziehen.

Um Planeten um fremde Sonnen zu entdecken, wird genau diese Bewegung des Sterns um einen gemeinsamen Schwerpunkt gesucht. Dazu wird die zeitliche Veränderung der Radialgeschwindigkeit über die Verschiebung der Spektrallinien des Sterns gemessen. Liegt die Bahnebene des/der Planeten günstig, so dass es zu zeitweiligen Bedeckungen des Sterns durch den/die Planeten (Transits) kommt, kann man über den Verfinsterungsverlauf sogar Aussagen über die Beschaffenheit des Planetensystems machen.

Seit 2009 beobachtet der Satellit Kepler mit einem 0,95-m-Teleskop einen festen Himmelsausschnitt mit über 160000 Sternen. Mit einem sehr empfindlichen Photometer werden Helligkeitsschwankungen der Himmelskörper registriert. Ein großer Teil der Auswertung der ca. 50 GByte pro Monat erfolgt automatisch. Planetentransits in Mehrfach-Sternsystemen lassen sich automatisch nur schwer detektieren. Um diese Daten zeitsparend zu analysieren, werden sie vom Planet Hunters citizen science project (kurz: Planet Hunters) ins Internet gestellt, wo sie mit einer speziellen Software von jedem analysiert werden können. Nach der Entdeckung des Planeten PH1 in einem Doppelsternsystem durch den Planet Hunter Robert Gagliano gelang es einem Team von Wissenschaftlern um Megan Schwamb nachzuweisen, dass es sich hierbei sogar um ein Vierfach-Sternsystem handelt.

Im vorliegenden Material werden Anleitungen gegeben, wie man Datenmaterial über Mehrfach-Sternsysteme für Schüler bzw. mit Schülern veranschaulichen und visualisieren kann. Mit dem Computer/Taschenrechner werden wichtige Bahnelemente aus den Beobachtungsdaten extrahiert und mit Hilfe von interaktiven Applets ein Modell des Sternsystems erstellt.



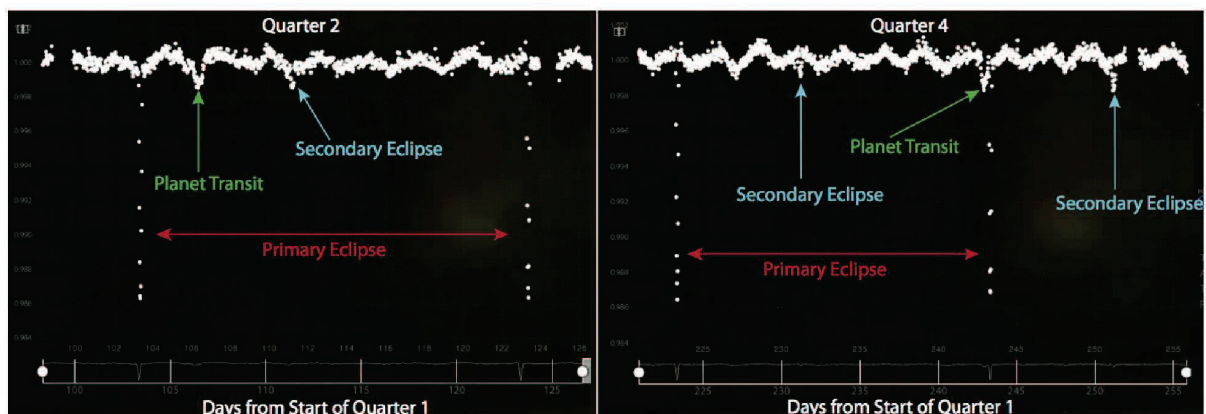
Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	Mechanik	Schwerpunkt, Relativbewegung, Geschwindigkeitsmessung, Dopplereffekt
Astronomie	Planeten	Keplergesetze, Umlaufzeiten, scheinbarer Durchmesser, Exoplaneten
Fächer- verknüpfung	Astronomie - Mathematik Astronomie - Informatik Astronomie - Kunst	Ellipsen, dynamische Geometrieprogramme, Applets, Fotomontage
Lehre allgemein	Kompetenzen (Fachwissen, Erkenntnisgewinnung), Unterrichtsmittel	Formeln anwenden, Ellipsen konstruieren, Methoden übertragen, dynamische Geometrie, Bildverarbeitung

Der mehrfache Sonnenuntergang

Astronomische Ausgangslage

Seit 2009 beobachtet der Satellit Kepler mit einem 0,95-m-Teleskop einen festen Himmelsausschnitt zwischen den Sternbildern Schwan und Leier. Dabei überwacht er nahezu ununterbrochen über 160000 Sterne. Mit einem sehr empfindlichen Photometer werden Helligkeitsschwankungen der Himmelskörper registriert, die von einem Transit eines Exoplaneten stammen könnten. Dabei kommt eine Anordnung von 42 CCD-Chips mit je 2200×1024 Pixeln zum Einsatz. Während der noch andauernden Mission wurden bisher mehr als 2300 mögliche Planeten und nahezu 2200 bedeckungsveränderliche Doppelsterne entdeckt. Ein großer Teil der Auswertung der ca. 50 GByte pro Monat erfolgt automatisch.

Planetentransits in Mehrfach-Sternsystemen lassen sich automatisch nur schwer detektieren. Um diese Daten zeitsparend zu analysieren, werden sie vom Planet Hunters citizen science project (kurz: Planet Hunters) ins Internet gestellt, wo sie mit einer speziellen Software von jedem analysiert werden können. Die Planet Hunters Webseite (<http://www.planethunters.org/>) zeichnet sich nicht nur dadurch aus, dass mit ihr die Untersuchung von Kepler-Daten an Hand von Lichtkurven möglich ist, sondern, dass auch ein reger Informations- und Erfahrungsaustausch der Teilnehmer im „Planet Hunters Talk“ stattfindet.

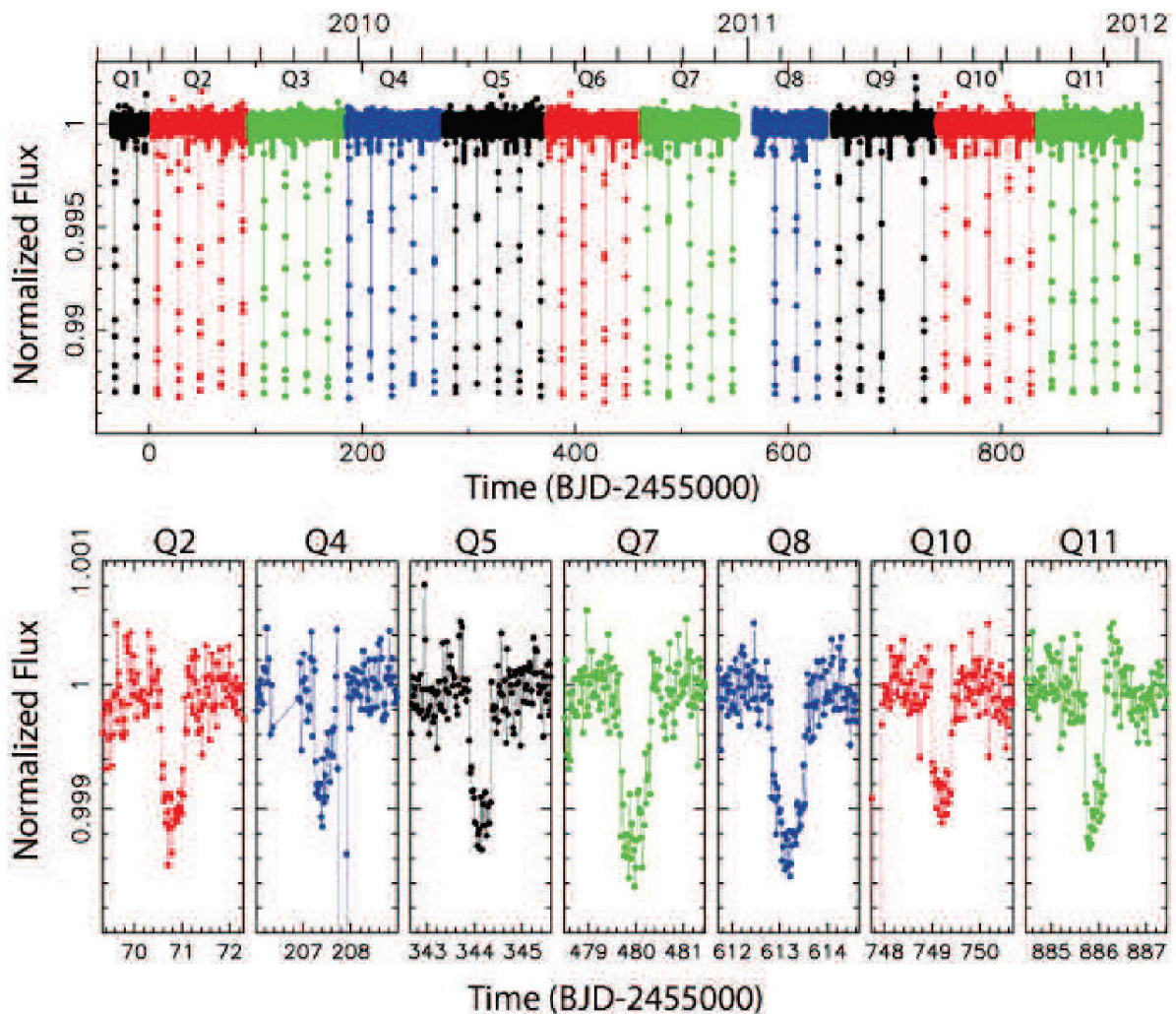


Ein Planeten-Transit neben den gegenseitigen Bedeckungen der beiden anderen Sterne (Primary Eclipse, Secondary Eclipse) im System KIC 4862625. So erscheint die Lichtkurve einem Teilnehmer bei Planet Hunters auf dem Webseiten-Interface. (Quelle: Schwamb et al. 2012)

Im Fall des Doppelsternsystems KIC 4862625 gelang es dem Planet Hunter Robert Gagliano am 2. März 2012, zwei Transits aus den Kepler-Daten zu extrahieren und im Planet Hunters Talk zu veröffentlichen. Am 3. März untersuchte Kian Jek weitere Daten dieses Sternsystems und entdeckte einen zusätzlichen Transit in ähnlichem zeitlichem Abstand und mit ähnlicher Struktur in der Lichtkurve wie zuvor Robert Gagliano. Auch Kian Jek diskutierte diese Entdeckung im Talk und teilte dem Planet Hunters Science Team die mögliche Entdeckung eines Planeten in einem Binärsystem mit. Die Entdeckung von Planeten in Mehrfach-Sternsystemen ist für Astronomen deswegen so interessant, da mit ihnen die gängigen Theorien der Planetenentstehung und –entwicklung unter den extremen dynamischen Bedingungen in einem System, in dem mehrere Sterne die Bahn des Planeten beeinflussen, getestet werden können. Diese sagen aus, dass Planeten in Doppelsternsystemen nicht dort entstanden sind, wo man sie mit Kepler entdeckt hat, sondern, dass sie weiter entfernt gebildet werden und in Richtung des gemeinsamen Schwerpunkts gewandert sind. Man erwartet daher die Mehrzahl von Objekten in Abständen von weniger als 1 AU und nahezu keine in Abständen jenseits von 10 AU. Ebenso zeigen Simulationen, dass die Planeten um Doppelsterne leichter als eine Jupitermasse sein sollten, da sie ansonsten aus dem System geschleudert werden.

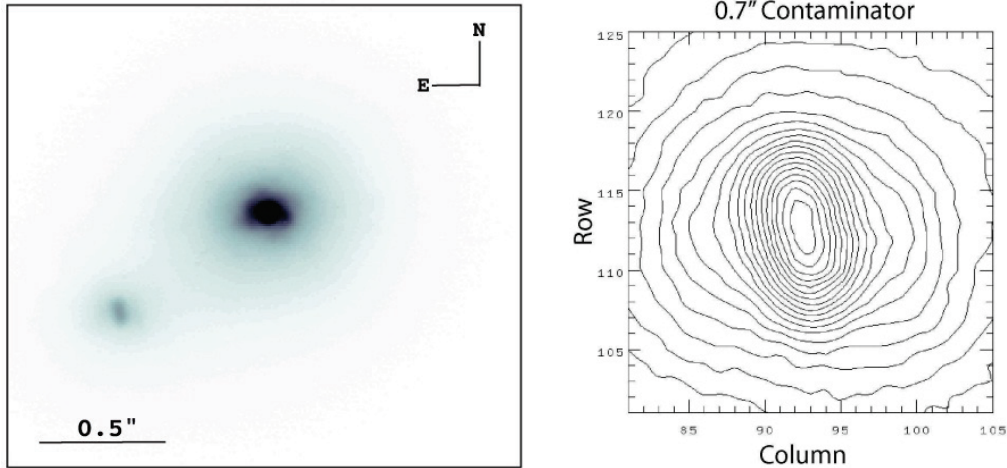
Nach der Entdeckung eines Planeten im System KIC 4862625 untersuchte ein Team um die Wissenschaftlerin Megan Schwamb dieses System genauer:

Aus der normalisierten Lichtkurve konnten sie eine Umlaufdauer von 20 Tagen der zwei Sterne um sich selbst bestimmen. Die numerische Exzentrizität ihrer Bahn beträgt 0,24. Das Sternsystem, das vom Planeten PH1 umkreist wird besteht aus einem massereichen, hellen Stern Aa und einem weniger massereichen, weniger hellen Stern Ab. Aus der Konstanz der Umlaufzeit schließen die Autoren, dass der Planet eine zu geringe Masse aufweist, um die Sternbahnen signifikant zu beeinflussen. Die Lichtkurve zeigt nur den Planetentransit vor Stern Aa. Es konnten keine Transits vor Stern Ab identifiziert werden. Eine genaue Analyse der Planetentransits ergab einen Sternradius (Stern Aa) von 0,804 Sonnenradien und einen Planetenradius von 2,8 Erdmassen.



Die normalisierte Kepler Lichtkurve von KIC 4862625 (oben) mit den Planetentransits (unten).
(Quelle: Schwamb et al. 2012)

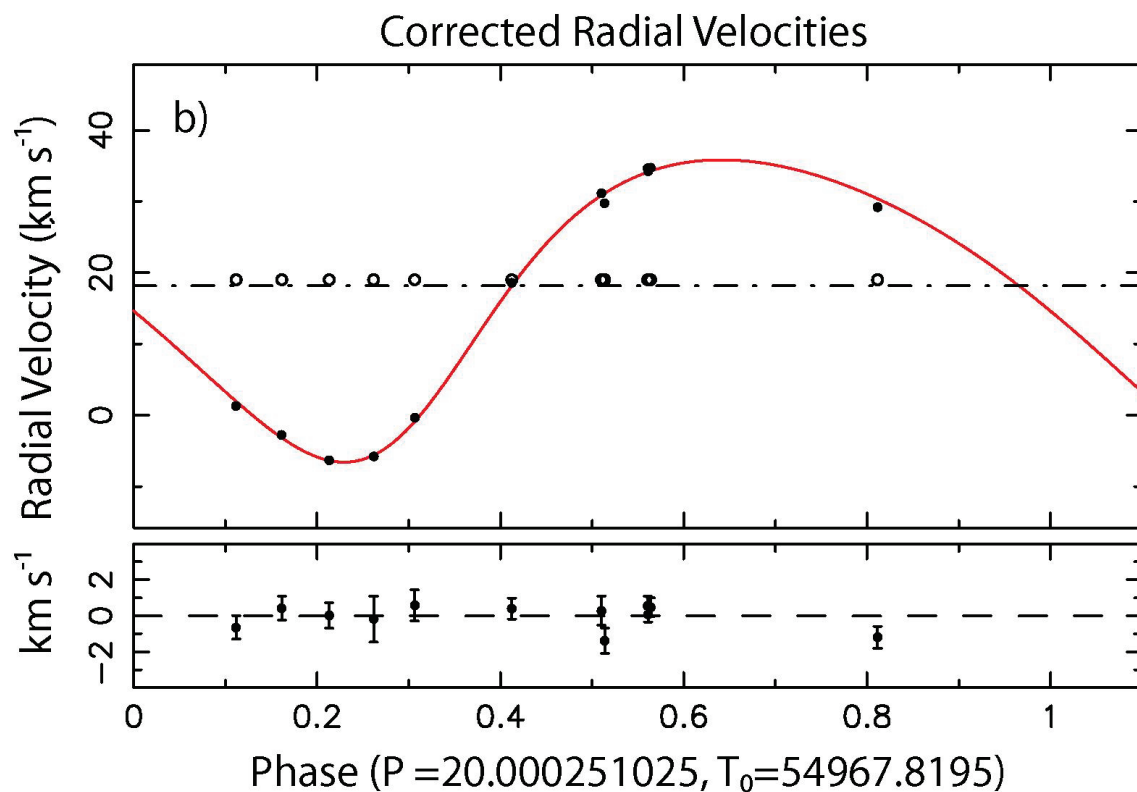
In einer Entfernung von 0,7 Bogensekunden südöstlich von KIC 4862625 befindet sich eine elongierte Quelle, die die gleiche systemische Geschwindigkeit wie das Doppelsternsystem aufweist. Dies spricht dafür, dass diese Quelle zum Doppelsternsystem gehört und gravitativ an dieses gebunden ist. Die Form der Quelle deutet auf ein Doppelsternsystem hin, was aus KIC 4862625 ein Vierfachsternsystem macht, dessen zwei Binärsysteme etwa um 1000 AU getrennt sind.



Die elongierte Quelle im Südosten von KIC 48626625 (links) kann nicht vollständig in zwei Sterne aufgelöst werden (rechts). (Quelle: Schwamb et al. 2012)

Die beiden Sterne des 0,7"-Begleiter müssen weniger als 0,04" voneinander entfernt sein, was für eine Separation von maximal 40 AU spricht.

Neben den Bedeckungsdaten spielen Informationen über die Radialgeschwindigkeiten eine große Rolle zur Charakterisierung des Mehrfach-Sternsystems. Dazu wurden hochaufgelöste Spektren mit dem Keck I Teleskop auf Hawaii aufgenommen. Leider war die Qualität nicht ausreichend um die Masse von PH1 zu ermitteln. Außerdem ist Stern Ab zu lichtschwach um in den Spektren zu erscheinen. Es konnten somit nur die zeitlich veränderliche Radialgeschwindigkeit von Stern Aa und die im Zeitintervall der Messung konstante Radialgeschwindigkeit des 0,7"-Begleiters gemessen werden:



Die Radialgeschwindigkeit von Stern Aa (Punkte) und des 0,7"-Begleiters (Kreise). (Quelle: Schwamb et al. 2012)

Mit den Daten aus den Lichtkurven und Radialgeschwindigkeitsmessungen wurde ein photometrisch-dynamisches Modell gestartet und die Parameter des Vierfach-Sternsystems mit Planet so optimiert, dass die synthetischen Lichtkurven und Radialgeschwindigkeiten möglichst gut mit den gemessenen übereinstimmen. Zusätzlich wurden die Eigenschaften der Sterne mit Hilfe von Sternentwicklungsmodellen basierend auf den beobachteten Spektren und des vermutlichen Alters des Systems von etwa 2 Mrd. Jahren ermittelt.

Zusammenfassung

	Masse	Radius	Temperatur	Typ	Große Halbachse	Numerische Exzentrizität	Umlauf- dauer
Stern Aa	1,384 M_{\odot}	1,759 R_{\odot}	6407 K	F-Zwerg	0,1744 AU	0,2117	20,0002 d
Stern Ab	0,386 M_{\odot}	0,422 R_{\odot}	3561 K	M-Zwerg			
Planet PH1	<170 M_{\oplus}	6,18 R_{\oplus}			0,634 AU	0,0539	138 d
0,7"-Begleiter Stern Ba	0,99 M_{\odot}			G2	1000 AU		
0,7"-Begleiter Stern Bb	0,51 M_{\odot}			M2			

Aufgabe 1: Zeichne mit dem dynamischen Geometrieprogramm GeoGebra die wahre absolute Bahn des Doppelsternsystems Stern Aa und Stern Ab.

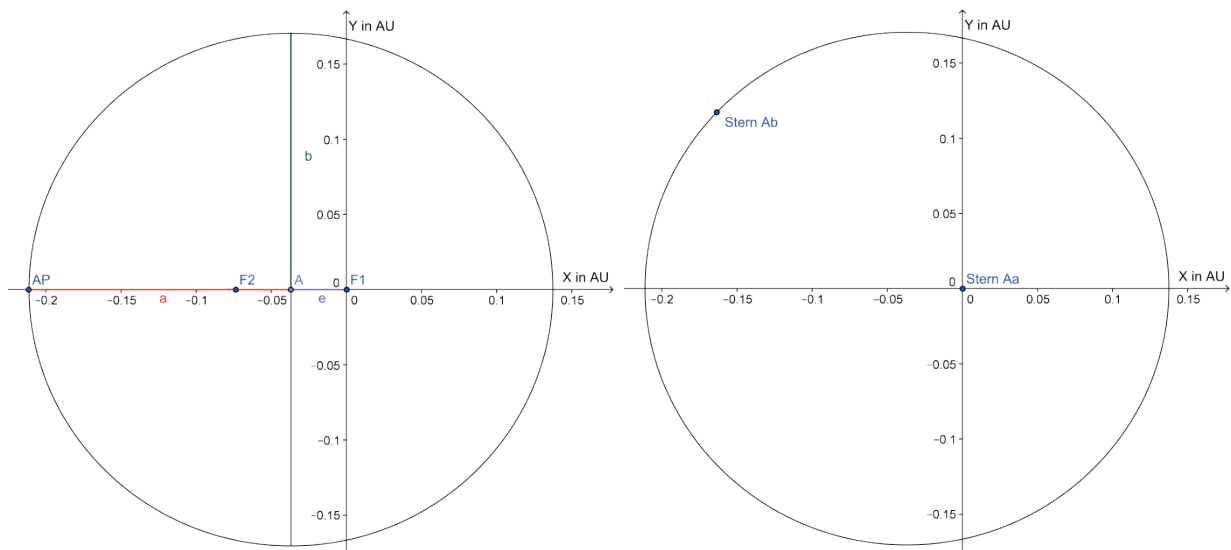
Angaben:

$$\begin{aligned} M_{Aa} &= 1,384 M_{\odot} \\ M_{Ab} &= 0,386 M_{\odot} \\ a_A &= 0,1744 \pm 0,0031 \text{ AU} \\ \varepsilon &= 0,2117 \pm 0,0051 \end{aligned}$$

Vom Doppelsternsystem Aa und Ab sind die Massen sowie die große Halbachse und die numerische Exzentrizität der wahren relativen Bahn angegeben, die aus einer Simulation der Lichtkurven abgeleitet wurden.

In dieser Ellipse befindet sich ein Stern ortsfest im Brennpunkt der Ellipse, auf der sich der andere Stern bewegt. Der gemeinsame Schwerpunkt bewegt sich ebenso. Um diese Ellipse mit Hilfe von GeoGebra darzustellen, sind die Koordinaten beider Brennpunkte und eines Punkts auf der Ellipse z.B. des Aphels notwendig. Setzt man einen Brennpunkt F1 in den Koordinatenursprung (0;0), so liegt der andere Brennpunkt F2 bei $(-2e;0)$ bzw. $(-2a\varepsilon; 0)$ und das Aphel AP bei $(-e-a;0)$ bzw. $(-a(\varepsilon + 1); 0)$:

$$F1(0; 0); F2(-0,07384; 0); PA(-0,2113; 0)$$



Tatsächlich umkreisen beide Sterne den gemeinsamen Schwerpunkt (CMS), der gleichzeitig Fixpunkt beider Ellipsen ist. Während der eine Stern im Aphel steht, steht der andere ebenso im Aphel, gleiches gilt für das Perihel. Die gegenseitigen Abstände der Perihels und der Aphels vom gemeinsamen Schwerpunkt sind nicht beliebig. Wie auf einer Wippe, die im Schwerpunkt unterstützt ist, muss der schwerere Stern näher am Drehpunkt (Schwerpunkt) sitzen als der leichtere Stern. Es gilt:

$$\begin{aligned} M_{Aa} \cdot r_{Aa,Perihel} &= M_{Ab} \cdot r_{Ab,Perihel} \\ r_{Aa,Perihel} &= \frac{M_{Ab}}{M_{Aa}} \cdot r_{Ab,Perihel} \\ a_{Aa} - e &= \frac{M_{Ab}}{M_{Aa}} \cdot (a_{Ab} - e) \\ a_{Aa}(1 - \varepsilon) &= \frac{M_{Ab}}{M_{Aa}} \cdot a_{Ab}(1 - \varepsilon) \\ a_{Aa} &= \frac{M_{Ab}}{M_{Aa}} \cdot a_{Ab} \end{aligned}$$

Daneben ist bekannt, dass sie im Aphel am weitesten separiert sind:

$$\begin{aligned}d_{max} &= \overline{r_{Aa,Aphel}^{CMS}} + \overline{r_{Ab,Aphel}^{CMS}} \\d_{max} &= a_{Aa} + e + a_{Ab} + e \\d_{max} &= a_{Aa}(1 + \varepsilon) + a_{Ab}(1 + \varepsilon) \\a(1 + \varepsilon) &= a_{Aa}(1 + \varepsilon) + a_{Ab}(1 + \varepsilon) \\a &= a_{Aa} + a_{Ab}\end{aligned}$$

Zusammen ergibt sich:

$$\begin{aligned}\frac{M_{Ab}}{M_{Aa}} \cdot a_{Ab} + a_{Ab} &= a \\ \left(\frac{M_{Ab}}{M_{Aa}} + 1\right) \cdot a_{Ab} &= a \\ a_{Ab} &= a / \left(\frac{M_{Ab}}{M_{Aa}} + 1\right) \\ a_{Ab} &= \frac{0,1744 \text{ AU}}{(0,2794 + 1)} = 0,1363 \text{ AU}\end{aligned}$$

Beziehungsweise:

$$\begin{aligned}a_{Aa} &= a / \left(\frac{M_{Aa}}{M_{Ab}} + 1\right) \\ a_{Aa} &= \frac{0,1744 \text{ AU}}{(3,579 + 1)} = 0,03809 \text{ AU}\end{aligned}$$

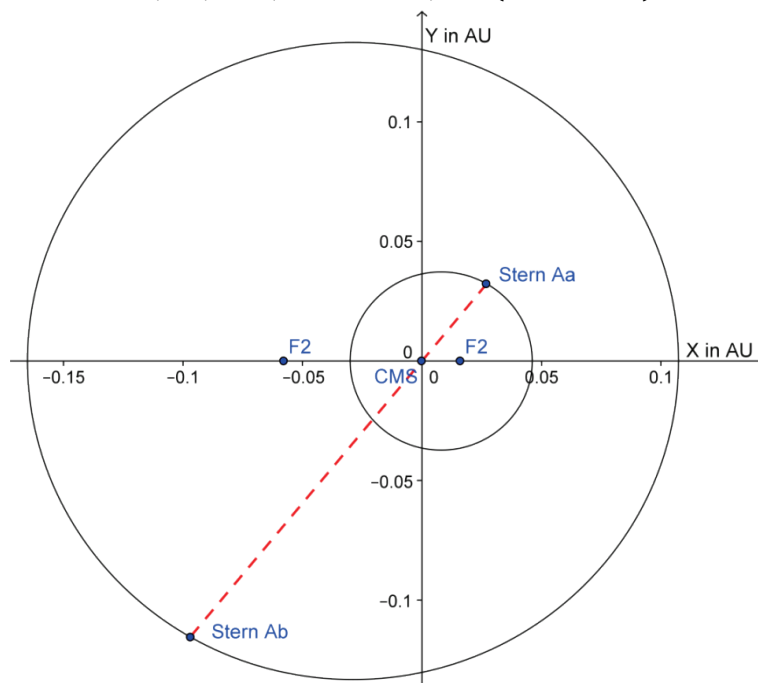
Zeichnen der Ellipsen:

Stern Aa: Brennpunkt F1 entspricht dem CMS im Koordinatenursprung (0;0). Der andere Brennpunkt F2 liegt dann bei (2e;0) bzw. (2a_{Aa}ε; 0) und das Aphel AP bei (e+a_{Aa};0) bzw. (a_{Aa}(ε + 1); 0):

$$F1(0; 0); F2(0,01613; 0); AP(0,04615; 0)$$

Stern Ab: Brennpunkt F1 entspricht dem CMS im Koordinatenursprung (0;0). Der andere Brennpunkt F2 liegt dann bei (-2e;0) bzw. (-2a_{Ab}ε; 0) und das Aphel AP bei (-e-a_{Ab};0) bzw. (-a_{Ab}(ε + 1); 0):

$$F1(0; 0); F2(-0,05771; 0); AP(-0,1651; 0)$$



Aufgabe 2: Zeichne in das Diagramm von Aufgabe 1 die Bahn des Planeten PH1 ein.

Angaben:

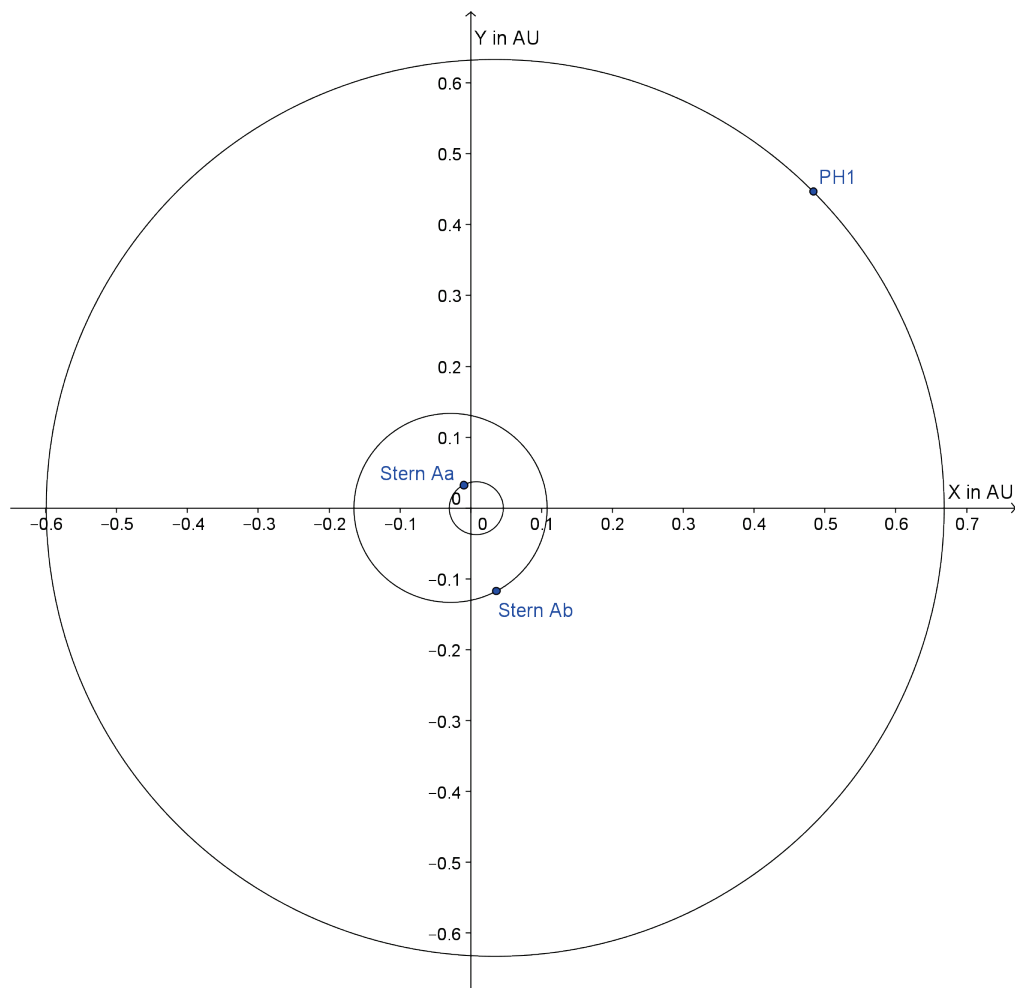
$$a_p = 0,634 \pm 0,011 \text{ AU}$$

$$\varepsilon_p = 0,0539 \pm 0,0081$$

Der Planet PH1 mit der Masse $M_p < 170 M_{Erde}$ umkreist die beiden Sterne ohne deren Bahn merklich zu stören. Man kann davon ausgehen, dass er von einem Zentralkörper der Masse $M_{Aa} + M_{Ab}$ im CMS auf der Ellipsenbahn mit oben angegebenen Bahnparametern gehalten wird. Die Koordinaten der drei Punkte, die die Ellipse in GeoGebra bestimmen, lauten:

F1 (0,0), F2 (2e;0) bzw. $(2a_p\varepsilon; 0)$ und AP bei $(e+a_p;0)$ bzw. $(a_p(\varepsilon + 1); 0)$:

$$F1(0; 0); F2(0,0684; 0); AP(0,668; 0)$$



Aufgabe 3: Berechne die Umlaufdauern sowie die minimalen und maximalen Bahngeschwindigkeiten der Binärsystemkomponenten.

Um die Geschwindigkeiten der Sterne zu bestimmen wird das Doppelsternsystem in zwei Systeme zerlegt, in dem sich der Stern Aa bzw. Ab jeweils um einen fiktiven Stern dreht, der im bisherigen CMS steht. Wenn sich der Stern Ab auf der gleichen Bahn wie im bisherigen Doppelsternsystem bewegen soll, muss der fiktive Stern im CMS die gleiche Kraft auf ihn ausüben wie der Stern Aa im Doppelsternsystem. Befindet sich Stern Ab und somit auch Stern Aa im Aphel, gilt:

$$\begin{aligned}
 F_{Ab-CMS} &= F_{Ab-Aa} \\
 G \frac{M_{Ab} \cdot M_{CMS}}{(a_{Ab} + e)^2} &= G \frac{M_{Ab} \cdot M_{Aa}}{(a_{Ab} + e + a_{Aa} + e)^2} \\
 \frac{M_{CMS}}{[a_{Ab}(1 + \varepsilon)]^2} &= \frac{M_{Aa}}{[a_{Ab}(1 + \varepsilon) + a_{Aa}(1 + \varepsilon)]^2} \\
 \frac{M_{CMS}}{a_{Ab}^2(1 + \varepsilon)^2} &= \frac{M_{Aa}}{(a_{Ab} + a_{Aa})^2(1 + \varepsilon)^2} \\
 \frac{M_{CMS}}{a_{Ab}^2} &= \frac{M_{Aa}}{a^2} \\
 M_{CMS} &= \frac{a_{Ab}^2}{a^2} \cdot M_{Aa} \\
 M_{CMS} &= \frac{(0,1363 \text{ AU})^2}{(0,1744 \text{ AU})^2} \cdot 1,384 M_{\odot} = 0,8453 M_{\odot}
 \end{aligned}$$

Bewegt sich ein Stern Ab mit $0,386 M_{\odot}$ um einen fixen Zentralkörper CMS mit $0,8453 M_{\odot}$ auf einer elliptischen Bahn mit $a_{Ab} = 0,1363 \text{ AU}$ so benötigt er für einen Umlauf die Zeit T:

$$\begin{aligned}
 \frac{T^2}{a_{Ab}^3} &= \frac{4\pi^2}{G \cdot M_{CMS}} \\
 T &= \sqrt{\frac{4\pi^2 a_{Ab}^3}{G \cdot M_{CMS}}} = 19,99 \text{ Tage}
 \end{aligned}$$

In einen Punkt auf der Ellipse im Abstand r vom Zentralkörper CMS hat der Stern Ab die Geschwindigkeit v:

$$v = \sqrt{G \cdot M_{CMS} \cdot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a_{Ab}} \right)}$$

Im Perihel gilt: $r = a_{Ab} - e = a_{Ab}(1 - \varepsilon)$ und damit:

$$v_{Ab,Perihel} = \sqrt{G \cdot M_{CMS} \cdot \left(\frac{2}{a_{Ab}(1 - \varepsilon)} - \frac{1}{a_{Ab}} \right)} = 91,97 \text{ km/s}$$

Im Aphel gilt: $r = a_{Ab} + e = a_{Ab}(1 + \varepsilon)$ und damit:

$$v_{Ab,Aphel} = \sqrt{G \cdot M_{CMS} \cdot \left(\frac{2}{a_{Ab}(1 + \varepsilon)} - \frac{1}{a_{Ab}} \right)} = 59,83 \text{ km/s}$$

Die gleichen Überlegungen können für den Stern Aa angestellt werden, dessen CMS-Partner allerdings eine andere Masse besitzen muss:

$$M_{CMS} = \frac{a_{Aa}^2}{a^2} \cdot M_{Ab}$$

$$M_{CMS} = \frac{(0,03809 \text{ AU})^2}{(0,1744 \text{ AU})^2} \cdot 0,386 M_{\odot} = 0,0184 M_{\odot}$$

In diesem System benötigt Stern Aa wie erwartet gleich lange für einen Umlauf wie Stern Ab:

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 a_{Aa}^3}{G \cdot M_{CMS}}} = 20,0 \text{ Tage}$$

Seine Geschwindigkeiten ergeben sich zu:

$$v_{Aa,Perihel} = \sqrt{G \cdot M_{CMS} \cdot \left(\frac{2}{a_{Aa}(1-\varepsilon)} - \frac{1}{a_{Aa}} \right)} = 25,7 \text{ km/s}$$

$$v_{Aa,Aphel} = \sqrt{G \cdot M_{CMS} \cdot \left(\frac{2}{a_{Aa}(1+\varepsilon)} - \frac{1}{a_{Aa}} \right)} = 16,7 \text{ km/s}$$

Der Planet PH1 umkreist die beiden Sterne ohne deren Bahn merklich zu stören. Man kann davon ausgehen, dass er von einem Zentralkörper der Masse $M_{Aa} + M_{Ab}$ im CMS auf der Ellipsenbahn gehalten wird. Seine Umlaufszeit und Geschwindigkeiten lassen sich berechnen:

$$T_P = \sqrt{\frac{4\pi^2 a_P^3}{G \cdot (M_{Aa} + M_{Ab})}} = 139 \text{ Tage}$$

$$v_{P,Perihel} = \sqrt{G \cdot (M_{Aa} + M_{Ab}) \cdot \left(\frac{2}{a_P(1-\varepsilon)} - \frac{1}{a_P} \right)} = 52,5 \text{ km/s}$$

$$v_{P,Aphel} = \sqrt{G \cdot (M_{Aa} + M_{Ab}) \cdot \left(\frac{2}{a_P(1+\varepsilon)} - \frac{1}{a_P} \right)} = 47,2 \text{ km/s}$$

Aufgabe 4: Simuliere die Bahnen der Zentralsterne und des Planeten mit Hilfe des Programms „3D-Planetarium“.

Aus der Lösung von Aufgabe 3 lassen sich die Anfangsbedingungen der Simulation zusammenfassen:

Objekt	Masse in M_{\odot}	x-Position in AU	y-Position in AU	x-Geschwindigkeit in km/s	y-Geschwindigkeit in km/s
Stern Aa	1,384	0,04615	0	0	16,7
Stern Ab	0,386	-0,1651	0	0	-59,83
Planet PH1	0,000511	0,668	0	0	47,2

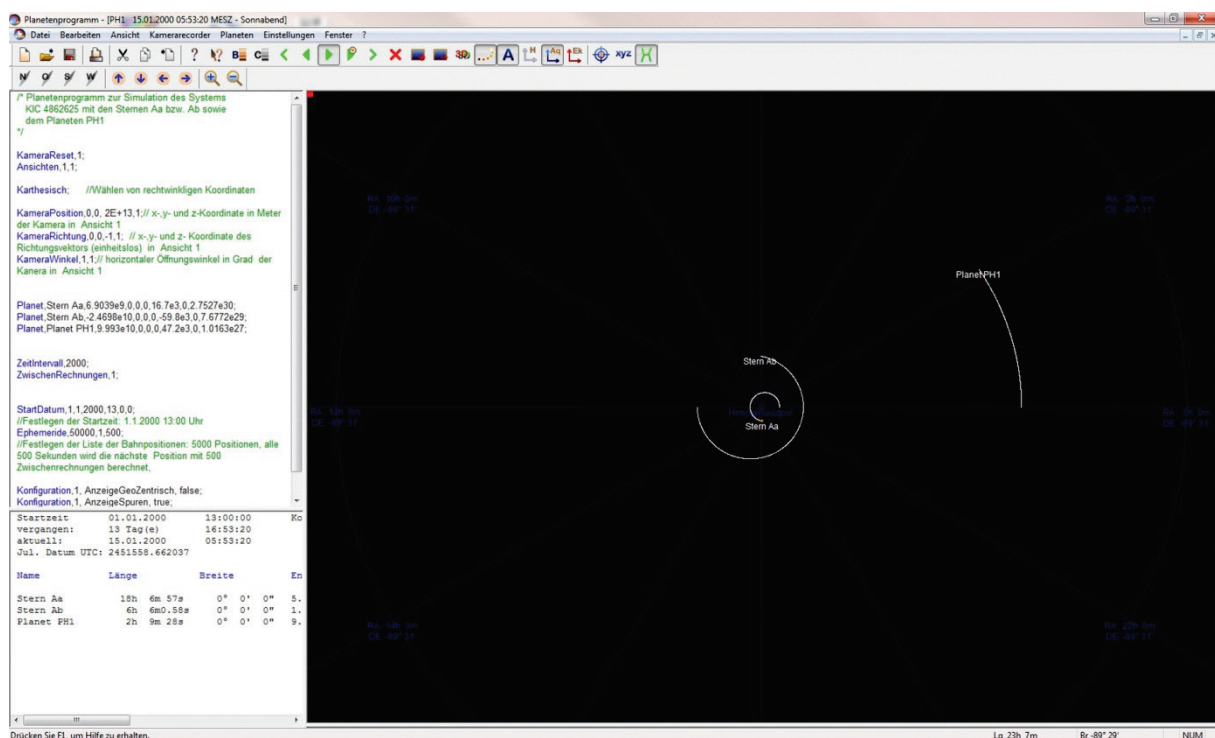
Mit diesen Daten lässt sich dieses Mehrkörpersystem mit einem Programm wie „3D-Planetarium“ (<http://www.planetenprogramm.de/>) simulieren. Dieses Planetenprogramm ist in der Testversion kostenlos und löst allgemeine Dreikörperprobleme numerisch.

Das File „PH1.pla“ enthält die notwendigen Informationen für die Simulation und muss in den Ordner kopiert werden, in dem sich nach der Installation auch die Anwendung Planetenprogramm befindet. Dies ist meist in C:/ProgramFiles(x86)/Planetenprogramm der Fall. In diesem Ordner finden sie auch eine Anleitung des Programms als HTML-Datei.

Nach dem Starten des Programms wird über Datei-Öffnen das „PH1.pla“-File eingelesen und mit dem Play-Button die Simulation gestartet. Über die Maus ist eine Steuerung des Himmelsausschnitts möglich. Man erkennt, dass der Planet eine stabile Kepler-Ellipse beschreibt, als wenn im Brennpunkt der Ellipse ein einziger Massenpunkt läge.

Da das andere, gravitativ an die Sterne Aa und Ab gebundene Doppelsternsystem ca. 100 AU vom Massenschwerpunkt entfernt liegt, wurde es in dieser Simulation nicht berücksichtigt. Im notwendigen Ausschnitt wären die Ellipsen von Aa, Ab und PH1 nicht mehr zu erkennen. Die Möglichkeiten dieses Programms lassen den Schülerinnen und Schülern großen Freiraum um eigenständig die Simulationen zu perfektionieren.

Screenshot:

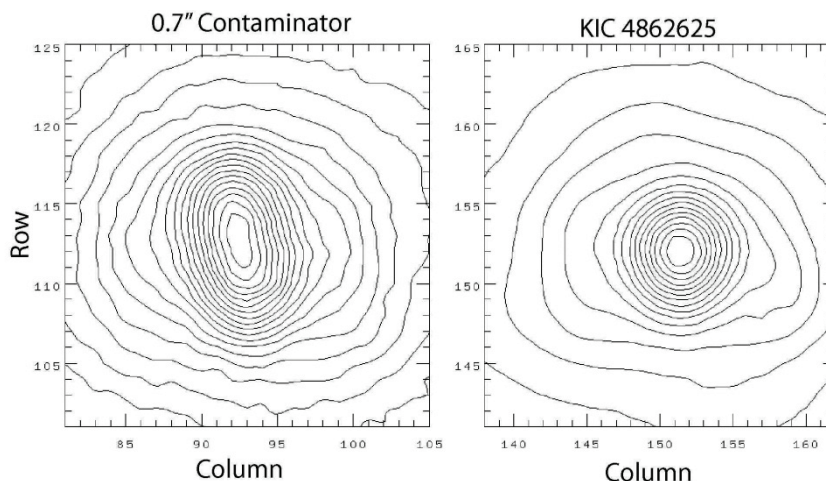


Aufgabe 5: Welche Auflösung müsste ein Teleskop auf der Erde erreichen um die einzelnen Komponenten zu trennen?

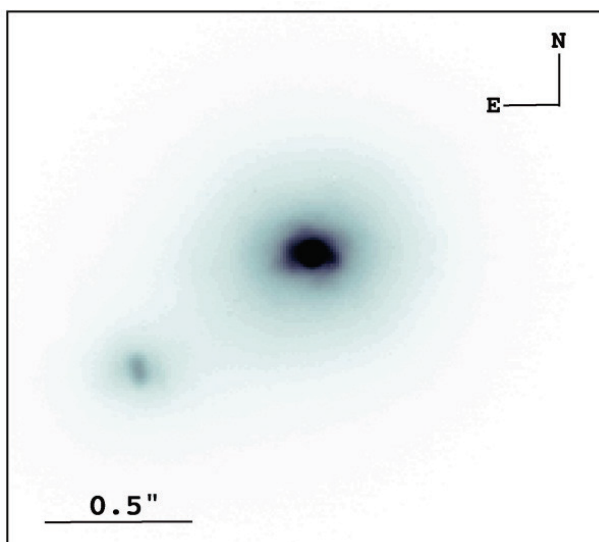
Notwendiges Auflösungsvermögen eines Teleskops, das die einzelnen Komponenten trennen kann:
Bei einer Entfernung d des Mehrfachsystems von 1500 pc zur Erde lassen sich folgende Winkelabstände von Objekten im Abstand a berechnen ($\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{a}{2d}$):

Objekte	Max. lineare Distanz in AU	Winkelabstand
Stern Aa – Stern Ab	0,2113	$1,410 \cdot 10^{-4}'' = 0,1410 \text{ mas}$
Planet PH1 – CMS	0,668	$4,459 \cdot 10^{-4}'' = 0,4459 \text{ mas}$
Stern Ba – Stern Bb	60	$0,04005'' = 40,05 \text{ mas}$
Binärsystem B – Binärsystem A	1000	$0,667''$

Die Separation zwischen Stern Aa und Ab (KIC 4862625) lässt sich nicht beobachten, während sich die zwischen Stern Ba und Bb (0,7'' Contaminator) als Elongation im Contourplot des Binärsystems, aufgenommen mit dem Keck II Teleskop, zeigt:



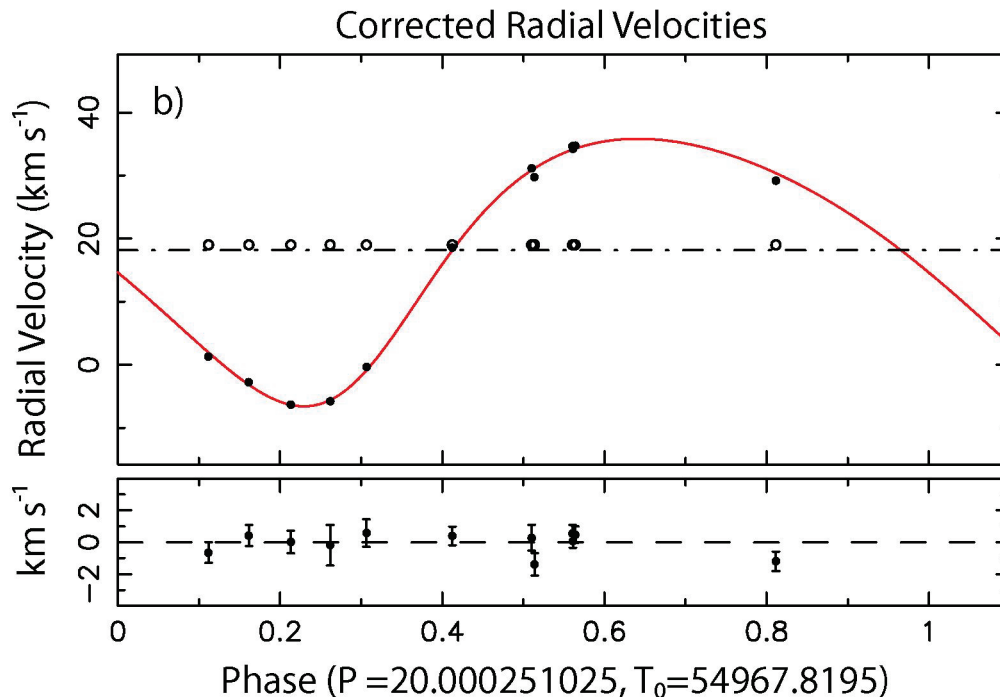
Das Sternsystem Ba und Bb (links) als elongierte Quelle, während die Sterne des zentralen Binärsystems (KIC 4862625) nicht aufgelöst werden können (rechts). (Quelle: Schwamb et al. 2012)



Der Winkelabstand zwischen beiden Binärsystemen lässt sich mit Hilfe einer Aufnahme mit dem Nahinfrarot-Detektor NIRC2 und adaptiver Optik am Keck II Teleskop auf Hawaii verifizieren (Schwamb et al. 2012):

Aufgabe 6: Untersuche die gemessenen Radialgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Blickwinkeln.

Das innere Binärsystem mit dem Planeten lässt sich optisch nicht auflösen. Es können aber hochaufgelöste Spektren nach Dopplerverschiebungen von Spektrallinien untersucht werden.

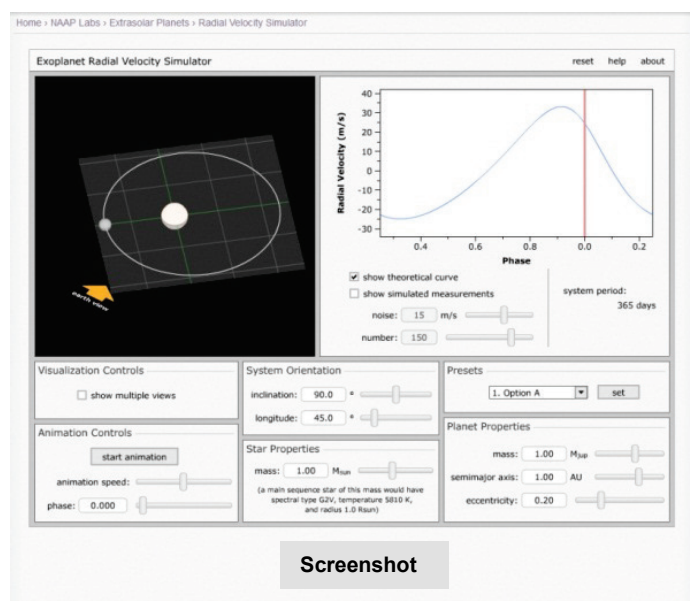


Die Radialgeschwindigkeit von Stern Aa (Punkte) und des 0,7''-Begleiters (Kreise). (Quelle: Schwamb et al. 2012)

Die Komponente Ab ist allerdings zu schwach, als dass ihre Radialgeschwindigkeit aus den Spektren ermittelt werden kann. Für den Stern Aa lässt sich allerdings die Geschwindigkeit um den gemeinsamen Massenschwerpunkt aus der Dopplerverschiebung bestimmen. Die berechneten Geschwindigkeiten liegen zwischen 25,7 km/s im Aphel und 16,7 km/s im Perihel. Der Geschwindigkeitsunterschied beträgt demnach 42,4 km/s. Die durch Dopplerverschiebung gemessenen Radialgeschwindigkeiten liegen zwischen -6,3 km/s und 34,7 km/s, überstreichen also 41 km/s.

Der Unterschied zwischen berechneten und beobachteten Absolutwerten liegt in der Lage der Sternbahn zum Beobachter.

Um diesen Einfluss zu untersuchen ruft man ein Applet der Universität von Nebraska-Lincoln (<http://astro.unl.edu/naap/esp/animations/radialVelocitySimulator.html>) auf und untersucht die Änderung der Radialgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Beobachtungsorts. Leider liegen die für die Simulation notwendigen Werte außerhalb des Definitionsbereichs der Simulation, so dass man nur ein ähnliches System simulieren kann.

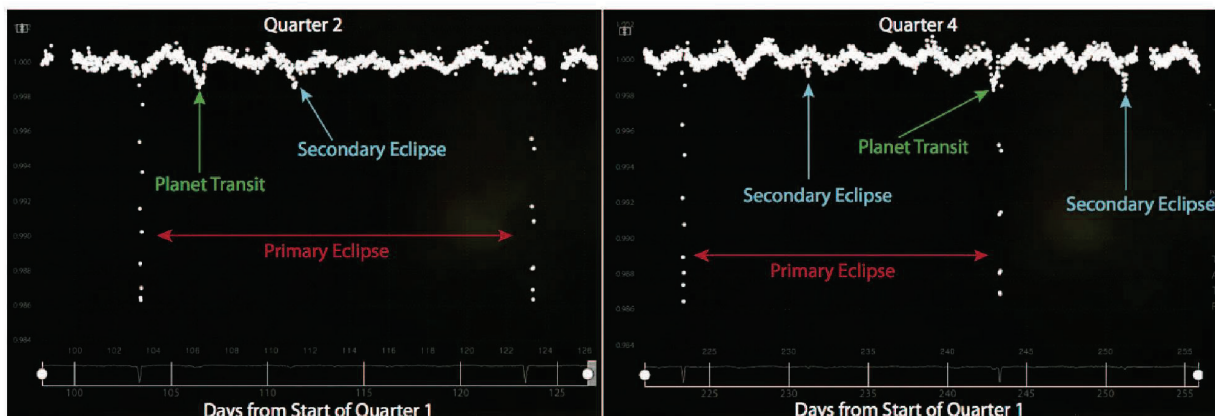


Aufgabe 7: Vergleiche die gemessene Lichtkurve mit einer synthetischen Lichtkurve.

Die gewonnenen Daten können in eine Simulation der Lichtkurve zumindest des inneren Doppelsternsystems eingebracht werden. Ein komfortables Applet stellt die Universität von Nebraska-Lincoln zur Verfügung (<http://astro.unl.edu/naap/ebs/animations/ebs.html>). Es werden die Massen, Radien und Temperaturen der beiden Sterne sowie die große Halbachse und die Exzentrizität ihrer gemeinsamen Bahn benötigt:

	Stern Aa	Stern Ab
Masse	1,348 M_{\odot}	0,386 M_{\odot}
Radius	1,759 R_{\odot}	0,422 R_{\odot}
Temperatur	6407 K	3561 K
Große Halbachse	0,1744 AU = 37,47 R_{\odot}	
Exzentrizität	0,2117	

Original Lichtkurve:



Home > NAAP Labs > Eclipsing Binary Stars > Eclipsing Binary Simulator

Eclipsing Binary Simulator reset help about

perspective from earth

system period: 20.4 days

System Orientation

longitude: 150.0°

inclination: 89.00°

Animation and Visualization Controls

start animation

phase: 0.70

lock on perspective from earth

show orbital paths

show HR diagram

Normalized Visual Flux

Phase

show lightcurve

Presets

- select a preset -

reset parameters to match

Star 1 Properties

mass: 1.3 M_{\odot}

radius: 1.8 R_{\odot}

temperature: 6410 K

Star 2 Properties

mass: 0.39 M_{\odot}

radius: 0.42 R_{\odot}

temperature: 3560 K

System Properties

separation: 37.47 R_{\odot}

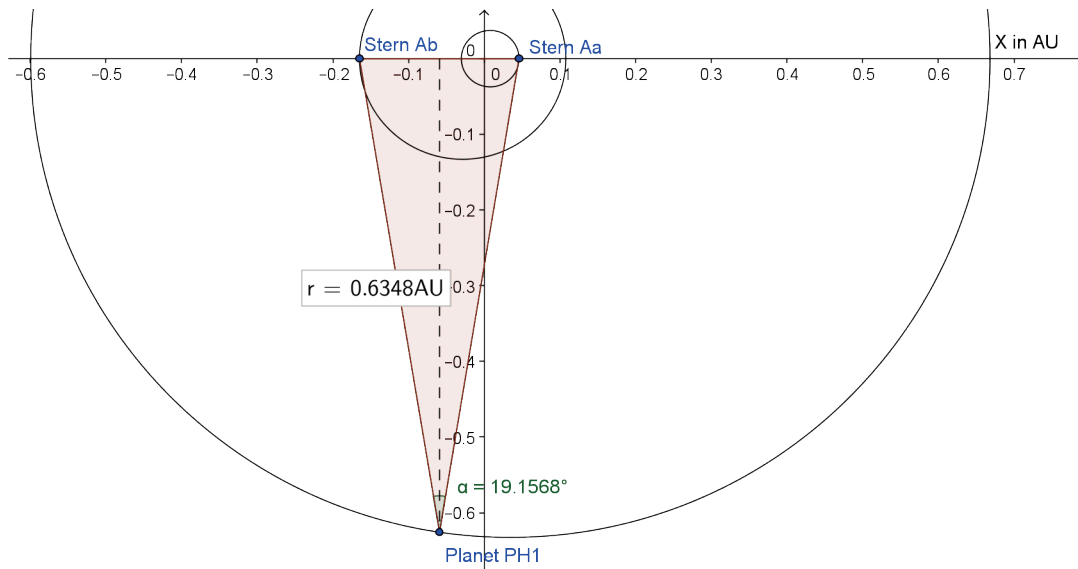
eccentricity: 0.21

Screenshot

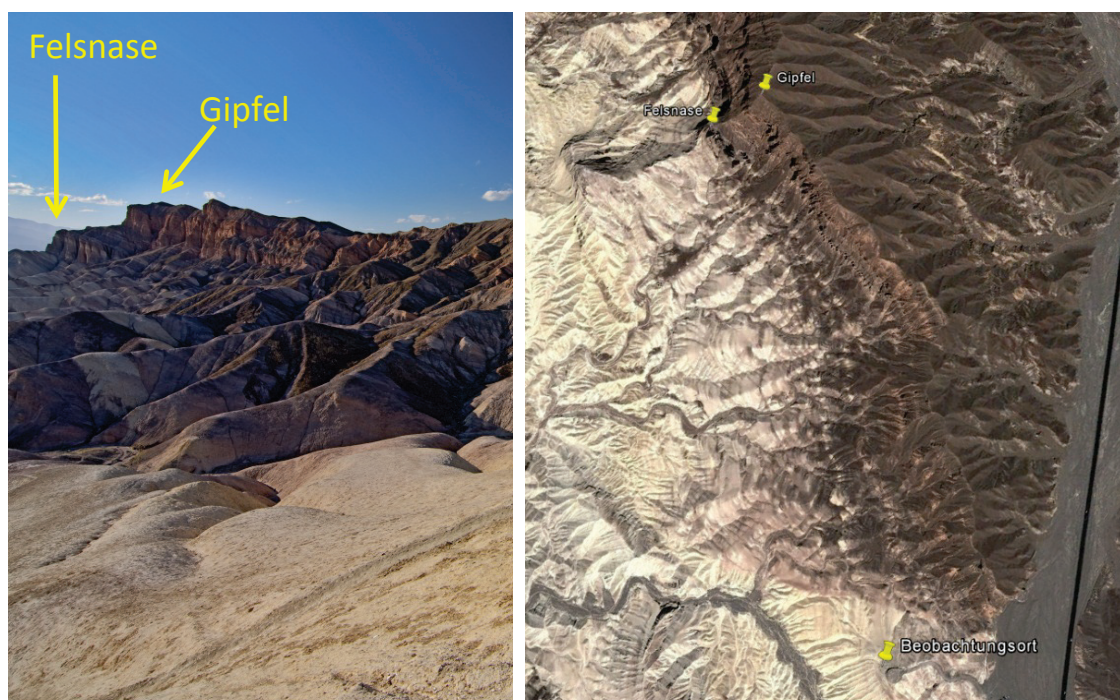
Simulation der Lichtkurve im zentralen Binärsystem. Es ist nur die Primärverfinsterung zu sehen, da die Sekundärverfinsterung zu schwach ist

Aufgabe 8: Erstelle eine Fotomontage um den Blick von PH1 auf die inneren Sonnen zu simulieren.

Von PH1 aus hat man einen Blick auf zwei sehr nahe und zwei weit entfernte Sonnen. Die nahen Sonnen können maximal 0,1744 AU auseinander stehen. In diesem Fall ist PH1 0,6348 AU von beiden entfernt und sieht sie unter einem Winkel von $19,16^\circ$.



Aus der Entfernung von 0,6348 AU hat Stern Aa einen scheinbaren Durchmesser von $1,48^\circ$, Stern Ab einen von $0,355^\circ$. Um eine Fotomontage eines Landschaftsbilds mit den beiden Sonnen herzustellen, muss auf dem Hintergrundbild eine Struktur ausgemacht werden, die einen ähnlichen scheinbaren Durchmesser aufweist. Dazu ist die Kenntnis der Entfernung vom Beobachtungspunkt zu dieser Struktur und ihrer Ausdehnung notwendig. Mit Hilfe von Google Earth lassen sich beide Größen bestimmen und so die scheinbare Größe der Struktur ermitteln.



Aufnahme einer Landschaft im Death Valley (links) und die entsprechenden Landmarken auf einer Karte (rechts) aus der die scheinbare Größe der Struktur ermittelt werden kann.

In diesem Fall liegen zwischen Gipfel und Felsnase 130 m, wobei der Gipfel vom Beobachtungsort 1,28 km entfernt liegt. Die Punkte auf dem Foto haben somit einen Winkelabstand von $5,79^\circ$ die auf der Aufnahme einer Ausdehnung von 350 Pixeln entsprechen.

Auf dem linken Foto hätte der Stern Aa also einen Durchmesser von 89 Pixel, Stern Ab einen von 21 Pixeln, während der Abstand beider Sterne 1158 Pixel beträgt.

Um die Farbe der Sonnen realistisch zu gestalten, wird die Temperatur nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz in eine Wellenlänge umgewandelt:

Stern Aa mit 6407 K strahlt am intensivsten Licht der Wellenlänge 452 nm, Stern Ab mit 3561 K Licht der Wellenlänge 814 nm ab. Mit Hilfe des Bruton-Algorithmus lassen sich diese Wellenlängen in RGB-Werte umrechnen: 452 nm entsprechen (0, 144, 1), 814 nm entsprechen (157, 0, 0) (z.B. <http://www.olos.de/~ukern/publ/tex/pdf/dtk200504.pdf>). Mit diesen Informationen lassen sich mit einem Malprogramm entsprechend große und entsprechend gefärbte Kugeln in das Bild setzen, die die beiden Sonnen darstellen sollen.

