

Schattenspiel mit fremden Welten: Exoplaneten-Lichtkurven einfach simulieren

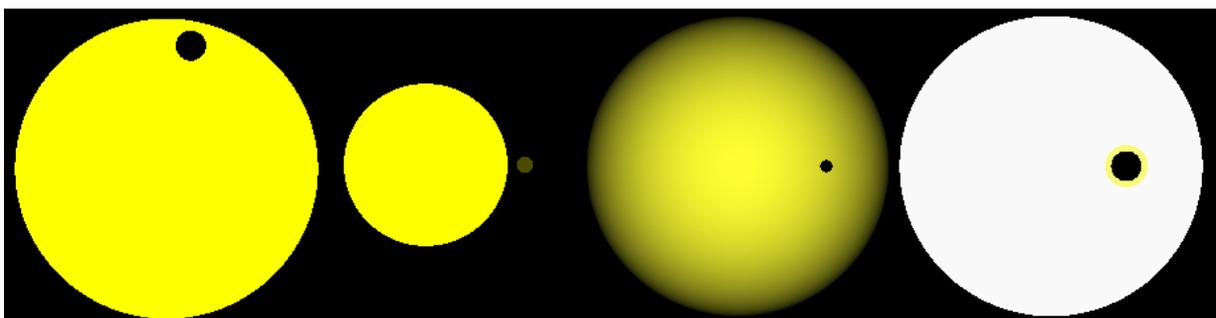
In Bezug auf den Beitrag „Mini-Neptune sind häufig“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 3/2014, Rubrik: Blick in die Forschung: Nachrichten, S. 17

Markus Pössel

Die Suche nach Exoplaneten ist ein astronomisches Thema, das bei Schülern und Schülerinnen auf großes Interesse stößt – nicht zuletzt, weil sich die Astronomen mit den letzten Weltraummissionen wie CoRoT oder Kepler bis hin zum Nachweis erdähnlicher Planeten vorgearbeitet haben und bereits planen, wie sich die Voraussetzungen für Leben und vielleicht sogar Leben selbst auf solch einem Planeten nachweisen lassen könnten. Exoplaneten lassen sich bis auf wenige Ausnahmen allerdings nur indirekt nachweisen. Diejenige Nachweismethode, die sich am einfachsten verstehen lässt, ist die Transitmethode. Sie misst, wie die Helligkeit des Sternensystems um einen Bruchteil abnimmt, wenn sich ein Exoplanet zwischen seinen Stern und einen Beobachter hier auf der Erde schiebt.

Dieser WIS-Beitrag zeigt, wie man mit Hilfe einfacher, aber flexibler Software (Raytracing-Programm plus Auswerteskript) Lichtkurven simuliert, wie sie sich bei Exoplanetentransits ergeben und genutzt werden, um die Existenz und auch einige wichtige Eigenschaften der betreffenden Planeten nachzuweisen. Die Simulation erlaubt es, eine Reihe charakteristischer Situationen nachzustellen und ihre Auswirkungen auf die Lichtkurve zu demonstrieren: Die Inklination des Systems, die Okkultation eines (z.B. im Infraroten) selbst leuchtenden Planeten, Randverdunkelung und, zum Teil für die Astronomen selbst noch Zukunftsmusik, den Nachweis einer Planetenatmosphäre. Die hier beschriebenen Aktivitäten eignen sich für die Projektarbeit, als Ausgangspunkt für Facharbeiten, Teile davon auch für den regulären Unterricht in der Oberstufe. Wissen die Schüler, wie man einfache Programme variiert und anpasst, dann lassen sie sich bereits in der Mittelstufe durchführen.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Sterne, Planeten	Astronomische Arbeitsmethoden , Exoplaneten , Himmelsmechanik , Bedeckungen , Helligkeitsmessungen , Durchmusterungen , Weltraumteleskope
Physik	Optik, Gravitation	Licht/Schatten , Planetenbahnen, Spektroskopie
Fächer- verknüpfung	Astro-Ma, Astro-Inf	Geometrie , einfache skript-basierte Programme , Auswertung von digitalen Bildern
Lehre allgemein	Kompetenzen (Fachwissen und Fachmethoden)	Nutzung von Simulationen , Nutzen von Modellbildungssystemen zur Überprüfung oder zur graphischen Veranschaulichung physikalischer Abhängigkeiten , Aufwandsabschätzungen für Simulationsrechnungen , Erörtern des Gültigkeitsbereichs von Modellen und Gesetzen



Simulationen verschiedener Sorten von Exoplanetentransits, von links nach rechts: Transit bei einem System mit Inklination 70 Grad; Transit mit leuchtendem Planeten (z.B. Infrarot), Transit bei Stern mit (künstlich nachgestellter) Randverdunkelung; Transit von Planeten mit Atmosphäre (im Bild der gelbe Halo um das Planetenscheibchen).

Exoplaneten

Untersuchungen von Exoplaneten – also Planeten, die um andere Sterne kreisen als die Sonne – gehören zu den derzeit spannendsten astronomischen Forschungsthemen. Seit 1995 haben die Astronomen 1074 Exoplaneten nachgewiesen, und die Zahl der Exoplaneten steigt stetig an – die hier genannte Zahl ist vom 23. Januar 2014; aktuelle Zahlen lassen sich bei der Extrasolar Planet Encyclopaedia online abrufen (<http://www.exoplanet.eu>).

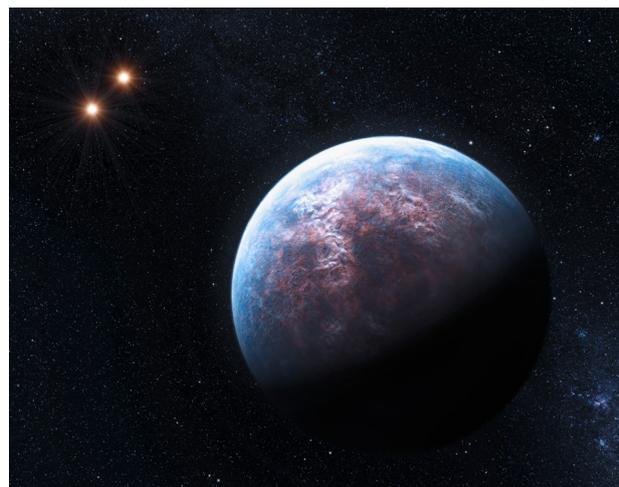
Für die allgemeine Öffentlichkeit und auch für Schüler ist dabei besonders spannend, ob es dort draußen eine zweite Erde gibt, ob auf den anderen Planeten Leben existieren könnte und wenn, wie es sich nachweisen ließe. Das sind in der Tat Forschungsfragen, bei denen die Astronomie in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte erzielt hat – etwa bei der Charakterisierung der Atmosphären solcher Planeten als wichtiges Kriterium für Lebensfreundlichkeit (Kaltenegger 2013).

Für die Astronomen ist besonders spannend, als wie vielfältig sich die neu entdeckten Planeten erwiesen haben (für die Schule z.B. Fischer 2006a). Das lässt wichtige Rückschlüsse darauf zu, wie Planeten allgemein entstehen. Zum einen kann man anhand der nachgewiesenen Planeten direkt Vorhersagen der gängigen Planetenentstehungs-Modelle prüfen – etwa dazu, ob um Sterne mit einem größeren Anteil schwererer chemischer Elemente (im astronomischen Wortsinn: „Metalle“) bevorzugt Planeten entstehen. Andererseits kann man anhand der Planetenentstehungs-Modelle versuchen, die statistische Verteilung der Exoplaneten vorherzusagen (z.B. wie viele Planeten pro Stern? Wie viele jupiterähnliche, neptunähnliche etc. Planeten?).

Solche Vergleiche sind bereits heute in eingeschränkter Form möglich. Sie sind eine wichtige, langfristig vielleicht sogar *die* wichtigste Möglichkeit, zu überprüfen, ob unsere Modelle der Planetenentstehung die richtigen Voraussagen treffen (bei den Fachartikeln als möglicher Einstieg z.B. Mordasini et al. 2012a und 2012b mit Vorhersagen für jupiterähnliche Gasplaneten).

Exoplaneten direkt zu beobachten und auf astronomischen Aufnahmen festzuhalten ist schwierig. Die Planeten werden von ihren Sternen bei weitem überstrahlt, und Aufnahmen gelingen nur mit diversen Tricks – von speziellen Auswerteverfahren bis zu Masken, die in den Strahlengang eingebracht werden, um das Licht des betrachteten Sterns auszublenden (Koronograf) – und selbst dann bislang nur bei weniger hellen Sternen und Planeten mit weiten Umlaufbahnen (z.B. Neuhäuser 2011).

Sobald irgendwo ein Bild zu sehen ist, auf dem ein Exoplanet tatsächlich wie ein Planet mit erkennbaren Oberflächenstrukturen aufscheint, handelt es sich immer um eine künstlerische Darstellung (im Bild rechts: des Planeten GJ 667Cc; Quelle: ESO/L. Calçada unter der Lizenz [CC-BY-3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/)).



Die überwältigende Mehrheit der Nachweise und Untersuchungen von Exoplaneten nutzt indirekte Methoden. Die größte Bedeutung kommt dabei zwei Methoden zu: erstens der Radialgeschwindigkeitsmethode, die ausnutzt, dass ein Stern und sein Planet um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen; die Sternbewegung lässt sich, entsprechende Messgenauigkeit vorausgesetzt, mithilfe des Dopplereffekts nachweisen (z.B. Hatzes & Guenther 2011). Die zweite Methode steht im Zentrum dieses Textes, und ich werde sie entsprechend genauer beschreiben.

Die Transitmethode

Wenn ein Planet aus Sicht eines Beobachters direkt vor seinem Stern vorbeizieht, dann schattet der Planet einen Bruchteil des Lichts des Sterns ab. Innerhalb unseres Sonnensystems gibt es für dieses Phänomen eine Reihe von Beispielen. Das beeindruckendste Beispiel dieser Art für uns Erdbewohner liefert nicht ein Planet, sondern der Erdmond, wenn er sich von der Erde aus vor unsere Sonne schiebt und eine (ganze oder teilweise) Sonnenfinsternis verursacht.

Ein weiteres, ungleich selteneres Beispiel dieser Art waren die Venusdurchgänge 2004 und 2012, bei denen sich das Planetenscheibchen der Venus von der Erde aus gesehen binnen innerhalb von etwas weniger als 7 Stunden vor der Sonne vorbei schob und dort etwa 2,3 Prozent des Sonnenlichts abschattete, das uns normalerweise erreicht (Aufnahme rechts: Daniel Maximilian Swoboda, am 6. Juni 2012 um 6:19 MESZ morgens von Wiener Neustadt aus; das Bild ist in der Public Domain).

Das Beispiel Venustransit zeigt aber bereits, wie wir uns die Situation eines Exoplanetentransits vorstellen müssen – nur dass eben Exoplaneten soweit entfernt sind, dass wir kein direktes Bild des Vorbeiziehens gewinnen können, sondern allein auf Messungen der winzigen Helligkeitsschwankung angewiesen sind wenn das Planetenscheibchen erst vor das Sternscheibchen tritt und später wieder über das Sternscheibchen hinausläuft.



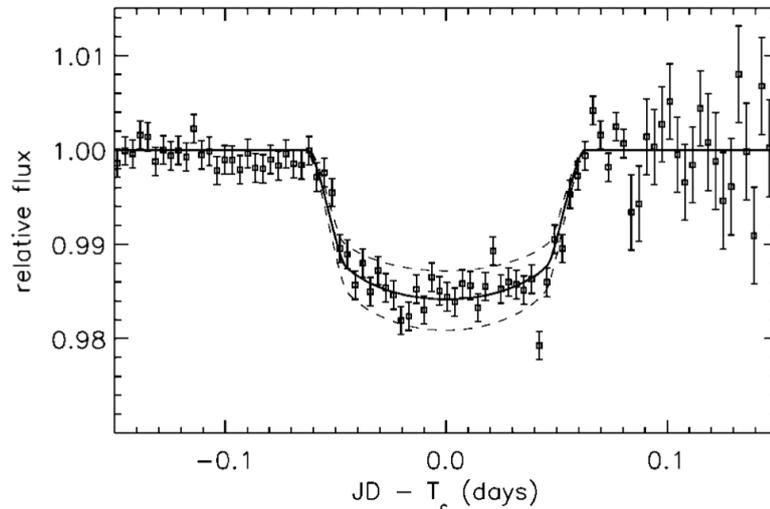
Die wohl früheste Erwähnung der Transitmethode, angewandt auf Planeten um andere Sterne, stammt aus dem Jahre 1952: Ein Artikel des auf Astrospektroskopie spezialisierten russisch-amerikanischen Astronomen Otto Struve mit dem Titel „Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work“ (auf deutsch also etwa „Vorschlag für ein Projekt hochpräziser Radialgeschwindigkeitsmessungen an Sternen“), in dem Struve sowohl die Radialgeschwindigkeitsmethode kurz am Beispiel unseres Sonnensystems durchrechnet als auch die Transitmethode kurz erwähnt (Struve 1952). All das übrigens vor dem Hintergrund einer (heute längst nicht mehr ernstgenommenen) Behauptung eines Nachweises eines Exoplaneten aufgrund von Bahnstörungen im Doppelsternsystem 61 Cygni AB (Strand 1943).

Detailliertere Abschätzungen der Messanforderungen, der Erfolgswahrscheinlichkeiten und der problematischsten Störeinflüsse (stellare Variabilität, also natürliche Helligkeitsschwankungen bei Sternen!) folgten (Huang 1963, Rosenblatt 1971, Borucki & Summers 1984).

Der erste Nachweis eines Exoplanetentransits gelang einerseits Gregory Henry (Tennessee State University) und Kollegen, andererseits Dave Charbonneau (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und National Center for Atmospheric Research) und seinen Kollegen im Jahre 1999 – also rund vier Jahre, nachdem Michael Mayor und sein Team den ersten Exoplaneten um einen normalen Stern mithilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode nachgewiesen hatten.

Beide Nachweise beziehen sich auf denselben Stern, nämlich HD 209458, der der Sonne sehr ähnlich ist. Henry und Kollegen (2000) hatten zunächst mit der Radialgeschwindigkeitsmethode Hinweise darauf erhalten, dass HD 209458 einen Planeten besitzen sollten, und dann bei Nachbeobachtungen Helligkeitsveränderungen festgestellt, die vom Zeitpunkt her gerade einem Transit entsprechen sollten.

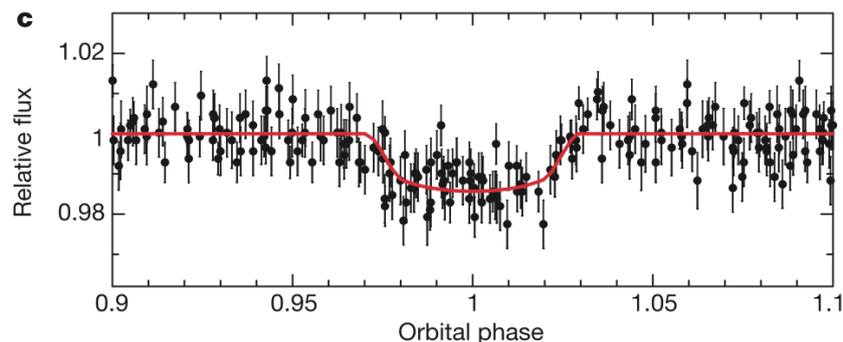
Charbonneau und Kollegen (2000) konnten zwei volle Transits bei HD 209458 nachweisen. Alle 3,53 Tage vermindert sich die Helligkeit des Sterns für etwas mehr als zweieinhalb Stunden um rund 1,6%, wie in der folgenden Lichtkurve dargestellt ist (Abb. 2 ebenda).



Auf der x-Achse ist dabei die Beobachtungszeit in Tagen aufgetragen, bezogen auf die Mitte der Verdunklungsphase. Auf der y-Achse ist die relative Lichtmenge aufgetragen, die das Teleskop pro Zeiteinheit erreicht (Lichtfluss), bezogen auf den Normalzustand außerhalb der Verdunklungsphase. In dieser Abbildung sind die Messpunkte für die beiden Transitbeobachtungen bereits miteinander kombiniert.

Charbonneau und seine Kollegen zogen aus ihren Beobachtungen den Schluss, dass es sich um einen Planeten mit 1,27-mal dem Radius des Jupiter handeln dürfte, dessen Bahn wir fast direkt von der Seite sehen (Inklination 87,1 Grad).

Ein paar Jahre später wurde die erste *Entdeckung* eines neuen Planeten mit der Transitmethode bekanntgegeben – Ergebnis des OGLE-Programms, das ursprünglich systematisch nach winzigen Helligkeitszunahmen aufgrund des sogenannten Mikrogravitationslinseneffekts suchen sollte (zu dieser Methode z.B. Brinkmann 2012), aber ebenso geeignet war, die winzigen Helligkeitsabnahmen bei Exoplanetentransits nachzuweisen (Konacki et al. 2003; hilfreicher Kommentar Brown 2003). Betrachtet man die Lichtkurve des Transits des Planeten OGLE-TR-56 (Abbildung 1c in Konacki et al. 2003), dann sieht man eine ganz ähnliche Form wie bei der vorangehenden Abbildung der Charbonneau-Daten. Die Helligkeitsverminderung beträgt hier 1,2 %; die Streuung der Messpunkte im Vergleich zur Tiefe der Kurve ist hier bereits deutlich stärker ausgeprägt:



Die Transitmethode und die Radialgeschwindigkeitsmethode ergänzen sich (z.B. Rätz 2011). Mit der Transitmethode lässt sich der Radius des Planeten bestimmen, die große Halbachse seine Umlaufbahn und die Neigung seiner Bahnebene relativ zum Beobachter, die Inklination. Als zusätzliche Informationen geht dabei Masse und Radius des Sterns ein, die man anhand des Sternspektrums aus Sternmodellen abschätzen kann. Aus der Radialgeschwindigkeitsmethode erhält man die Masse des Planeten, malgenommen mit dem Sinus der Inklination.

Ist ein Planet mit beiden Methoden nachgewiesen, lassen sich demnach sowohl seine Masse als auch sein Radius abstimmen – und daraus dann weitere Größen wie die mittlere Dichte. Mit der Radialgeschwindigkeitsmethode alleine ließe sich nur eine Untergrenze für die Masse bestimmen (die freilich einen guten Schätzwert für die tatsächliche Masse liefert), aber nicht Radius und Dichte.

Zur Charakterisierung von Exoplaneten – handelt es sich um Gasriesen wie Superjupiter oder kalte Neptune, oder gar um Gesteinsplaneten ähnlich unserer Erde? – sind diese zusätzlichen Informationen entscheidend. Entsprechend wurden seit der Pionierleistung von Charbonneau und Kollegen große Anstrengungen unternommen, weitere Transitplaneten zu finden – sei es durch systematische, wiederholte Durchmusterung kleinerer Himmelsausschnitte, sei es durch die gezielte Nachbeobachtung von Exoplaneten, die bereits vorher durch die Radialgeschwindigkeitsmethode nachgewiesen worden waren.

Dabei kommen zum einen durchaus kleinere irdische Teleskope zum Einsatz – großes Auflösungsvermögen und Lichtsammelvermögen ist bei dieser Art von Helligkeitsmessungen (Photometrie) an vergleichsweise hellen Sternen nicht entscheidend (und tatsächlich wird das Bild bei solchen Messungen gerne etwas defokussiert, um einen größeren Bruchteil der Detektorfläche auszunutzen).



Ein Beispiel für solch ein Transit-Teleskop ist das belgische 60 cm-Spiegelteleskop TRAPPIST (TRANsiting Planets and Planetesimals Telescope) am La Silla-Observatorium der ESO in Chile (oben rechts; Bild: ESO).

Ob sich bei einem Exoplaneten ein Transit nachweisen lässt, ist Glückssache: Die Bahnebene des Planeten muss so gelegen sein, dass wir als Beobachter von der Erde aus ziemlich genau von der Seite darauf schauen. Wer nach solchen Transits sucht, sollte sinnvollerweise hunderttausend Sterne oder mehr ins Visier nehmen – und das immer wieder, denn der Transit zeigt sich ja nur, wenn man zufällig denjenigen Zeitraum erwischt, in dem der Planet vor seinem Stern vorbeizieht. Für die Erde, die schließlich im Laufe eines Jahres die Sonne umläuft, wäre das einmal im Jahr der Fall.

Die zwei erfolgreichsten erdgebundenen Suchprogramme für Transitplaneten benutzen daher gleich eine ganze Reihe kleiner Teleskope mit großem Blickfeld, um möglichst viele Sterne gleichzeitig überwachen zu können. Ein Beispiel zeigt das Bild rechts: die als Achterbatterie zusammengestellten Canon-200mm,f/1.8-Teleskope von SuperWASP South, aufgestellt in Südafrika (Bild: David Anderson/Keele University).



SuperWASP (WASP = Wide-Angle Search for Planets) kann auf knapp 100 planetare Neuentdeckungen zurückblicken (<http://wasp-planets.net>).

HATNet und HATSouth als weiteres Netzwerk kleiner Teleskope kann auf mehr als 50 Entdeckungen verweisen. In Zahlen: HATSouth – an dem von Deutschland aus das Max-Planck-Institut für Astronomie beteiligt ist – verfügt über sechs Montierungen an drei Standorten auf der Südhalbkugel; jede der sechs Montierungen trägt ihrerseits vier Teleskope, deren jedes einen Himmelsausschnitt von 4° mal 4° abbilden kann. So hat HATSouth jeweils 384 Quadratgrad der Himmelskugel im Blick. Die Teleskope sind so verteilt, dass sie ihre Suchfelder das ganze Jahr hinweg unentwegt überwachen können (Bakos et al. 2013).

Allerdings zeigt sich bei besonders exakten photometrischen Messungen vom Boden aus deutlich der störende Einfluss der Erdatmosphäre. Das Funkeln der Sterne – die Verzerrungen und Verschiebungen des Sternenlichts aufgrund von Turbulenzen in der Atmosphäre – führt zu winzigen Helligkeitsschwankungen. Die Helligkeitsveränderungen durch Planetentransits sind aber für sich genommen bereits sehr klein und können im Bereich von Promillebruchteilen oder noch weniger liegen. Bei solch empfindlichen Messungen schränken die Störungen aufgrund der Atmosphäre die erreichbare Genauigkeit durchaus ein.

Diese Einschränkungen betreffen einen hochinteressanten Teilbereich: Von der Erde lassen sich zwar die Transits großer, jupiterähnlicher Planeten eindeutig nachweisen. Aber ohne die atmosphärischen Störungen wären, entsprechend gute Detektoren vorausgesetzt, auch erdähnliche Gesteinsplaneten mit der Transitmethode nachweisbar. Und wo bei der Radialgeschwindigkeitsmethode der Nachweis umso schwieriger ist, je enger der betreffende Planet seinen Heimatstern umkreist, wären dann auch Planeten nachweisbar, die sich so nahe an ihrem Heimatstern befinden, dass auf ihrer Oberfläche flüssiges Wasser existieren könnte (in der sogenannten *habitalen Zone*) – Voraussetzung für Leben, wie wir es kennen (Borucki und Summers 1984). Für die Radialgeschwindigkeitsmethode liegt der Nachweis solcher Planeten auch heute noch jenseits der technischen Möglichkeiten.

Bereits deutlich vor der ersten erfolgreichen Messung eines Exoplanetentransits vom Boden aus liefen daher Vorbereitungen für Weltraumbeobachtungen von Planetentransits. Aus ersten vorbereitenden Workshops ab Mitte der 1980er Jahre gingen letztlich gleich zwei Weltraummissionen hervor, die nach Transitplaneten suchen sollten: Als erstes am Start war die CoRoT-Mission der französischen Weltraumagentur CNES und der ESA mit einem 27-cm-Spiegelteleskop, die Ende 2006 gestartet wurde, im Februar 2007 ihr Beobachtungsprogramm begann und bis Ende 2012 aktiv war (Moutou et al. 2013). Knapp zwei Jahre später, Anfang März 2009, startete der NASA-Satellit Kepler, dessen Kernstück ein 95-cm-Spiegelteleskop ist. (Im Bild rechts wird Kepler gerade auf seinen Flug vorbereitet; Bild: NASA/JPL-Caltech/Ball.) Leider fielen bis Mai 2013 zwei der Schwungräder aus, die eine präzise Ausrichtung des Teleskops ermöglichen. Damit endete das ursprüngliche Beobachtungsprogramm von Kepler früher als geplant. Derzeit (Anfang 2014) werden Pläne geschmiedet, wie Kepler vielleicht auch in seinem jetzigen Zustand noch nach Exoplaneten weitersuchen kann.

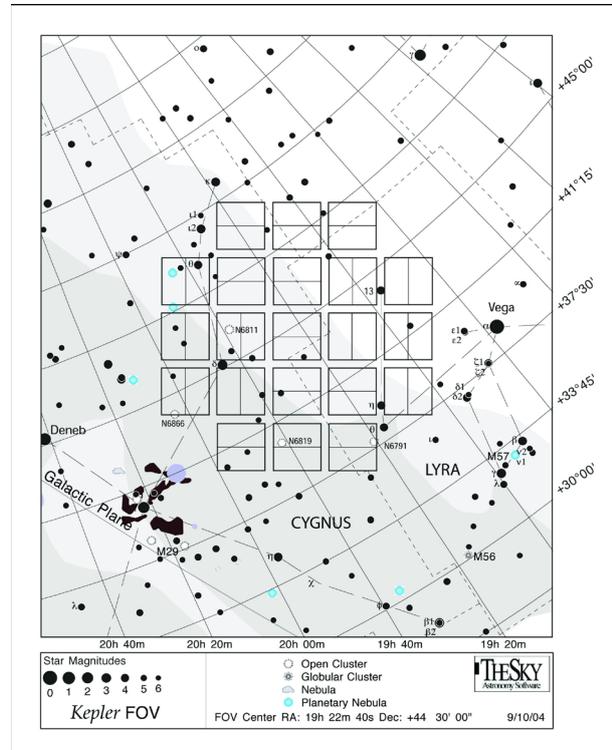


Die Anforderungen an Transitbeobachtungen sind deutlich andere als z.B. diejenigen, an denen sich das Design eines Allround-Weltraumteleskops wie des Hubble Space Telescope orientiert. Wie für die bodengestützten Teleskope gilt auch im Weltraum, dass man für die Suche nach Transitplaneten

tunlichst hunderttausende von Sternen im Blick behalten sollte. CoRoT hatte dementsprechend ein Bildfeld von $1,4^\circ$ mal $1,4^\circ$ für jeden der zwei Detektoren; nach dem Ausfall des einen Detektors im März 2009 immerhin noch ein einziges solches Feld. Zum Vergleich: Bereits das einzelne Feld ist mehr als 600 mal größer als der größte Himmelsausschnitt, der mit dem Weltraumteleskop Hubble auf einmal abgebildet werden kann.

Mit Beobachtungen an drei bis vier verschiedenen Feldern pro Jahr konnte CoRoT letztlich mehr als 160.000 Sterne untersuchen. Immerhin 21 der dabei gefundenen rund 500 Transitkandidaten konnten anschließend durch spektroskopische Nachbeobachtungen mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode sicher als Planeten bestätigt werden.

Das Blickfeld des Kepler-Teleskops hat eine noch rund 60 Mal größere Fläche; das Licht wird von 42 CCD-Chips eingefangen. Kepler beobachtete immer denselben Ausschnitt aus den Sternbildern Leier/Schwan/Drache (siehe Bild recht: NASA/Ames/JPL-Caltech/ Software Bisque) und überwachte dort insgesamt rund 145.000 Sterne. Bis Ende seiner Beobachtungsphase hatte Kepler 134 gesicherte Exoplaneten in insgesamt 76 Sternsystemen gefunden – außerdem weitere mehr als 3000 (noch) nicht bestätigte Planetenkandidaten.



Insgesamt sind bis heute (Exoplanet Encyclopaedia, Stand 25.1.2014, <http://www.exoplanet.eu>) 435 Planeten in 331 Planetensystemen mit Hilfe der Transitmethode nachgewiesen worden. Die Zahl dürfte sich in den kommenden Jahren noch deutlich erhöhen.

Zu den Entdeckungen zählen die ersten Gesteinsplaneten wie CoRoT-7b und Kepler-10b, und inzwischen sogar fünf Planeten, die ihre Heimatsterne in der lebensfreundlichen Zone umkreisen: Gliese 581d, HD 85512b, Gliese 667Cc, Kepler-62e und Kepler-62f (Guenther & Sebastian 2011, Kaltenegger 2013).

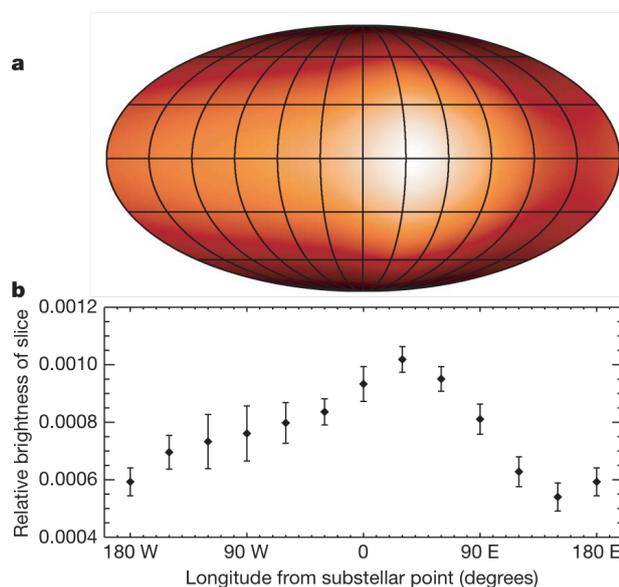
Dort, wo sich der Verlauf der Lichtkurven sehr genau vermessen lässt, ist sogar noch eine weitere Nachweismethode für Exoplaneten möglich. Sind neben dem Transitplaneten noch andere Planeten im Spiel, kommt es zur Schwerkraft-Wechselwirkung zwischen den Planeten; die wiederum kann Abweichungen der Bahn des Transitplaneten von der herkömmlichen Keplerbahn bewirken. Dadurch werden die Transits - bei einer Keplerbahn wären sie streng periodisch - ein kleines bisschen unregelmäßig. Anhand solcher Transit-Zeitvariationen (*transit timing variations*, TTV) kann man die Existenz der störenden weiteren Planeten nachweisen (Agol et al. 2005, Holman und Murray 2005).

Die spannendsten neuen Entwicklungen dürften sich im Zusammenhang mit spektroskopischen Transitmessungen ergeben, der sogenannten Transitspektroskopie. Tritt ein Exoplanet aus Sicht des Beobachters vor seinen Heimatstern, dann wird auch seine Atmosphäre vom dahinterstehenden Stern durchleuchtet. Entsprechende Absorptionslinien – von der Atmosphäre bei ganz bestimmten Wellenlängen absorbiertes Licht - können Aufschluss über die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre geben (Tinetti et al. 2013). Wie sich diese Absorptionslinien während des Transits verschieben, kann es außerdem ermöglicht, über den Dopplereffekt direkt die Geschwindigkeit des Exoplaneten zu bestimmen – und sogar rasche Gasbewegungen in der Exoplanetenatmosphäre nachzuweisen, wie sie bei „Superstürmen“ mit Windgeschwindigkeiten von 3 bis 4 Kilometer pro

Sekunde auftreten können, die man bei Gasplaneten in enger Umlaufbahn („heiße Jupiter“) erwartet. Beide Messungen, sowohl der Exoplanetengeschwindigkeit als auch eines Supersturmes, gelangen erstmals 2010 (Snellen et al. 2010).

Eine weitere interessante Entwicklung sind Untersuchungen, mit denen sich zumindest grobe Oberflächenkarten von Transitplaneten erstellen lassen. Eine erste Methode ist dabei gar nicht auf Transitplaneten beschränkt; sie nutzt schlicht aus, dass uns während eines Planetenumlaufs je nach Phase ein kleinerer oder größerer Teil der Tagseite des Planeten zugewandt ist (analog zu den Mondphasen mit Neumond, Mondsichel, Halbmond, Vollmond etc.). Wie viel Licht uns bei jeder Phase erreicht, hängt vom Phasenwinkel ebenso wie von den Oberflächeneigenschaften des Planeten ab. Ein besonders einfacher Fall ist jener der gebundenen Rotation, wo der Planet seinem Stern immer dieselbe Seite zuwendet (ebenso wie der Erdmond der Erde immer dieselbe Seite zuwendet) und wenn es sich um einen heißen, selbstleuchtenden Planeten handelt (so dass wir, z.B. bei Beobachtungen im Infrarotbereich, das abgestrahlte Licht des Planeten sehen, nicht reflektiertes Sternenlicht).

In diesem Falle lässt sich bei genauer Betrachtung rekonstruieren, wie die Helligkeit der Planetenoberfläche von Längengrad zu Längengrad variiert – das Ergebnis ist so etwas wie eine eindimensionale Oberflächenkarte des Planeten (Cowan und Agol 2008). Auf diese Weise entstand vor einigen Jahren die erste "Temperaturkarte" des heißen Jupiters HD 189733b, die dunklere (kühlere) Regionen und eine hellere (heißere) Zone zeigt (Bild rechts; Knutson et al. 2007). Rekonstruiert ist daran allerdings nur, wie die Helligkeit von Längengrad zu Längengrad variiert (Grafik unten im Bild); für die Breitengrad-Variation wurde eine willkürliche Annahme gemacht (Sinus-Abhängigkeit).



Direkt aus Messungen der Transit-Lichtkurve, genauer: der Eintritts- und Austrittsphase der Okkultation, lassen sich bei hinreichend genauer Messung sogar zweidimensionale Karten erzeugen. Die erste solche Karte wurde 2012 veröffentlicht (Majeau et al. 2012 und de Wit et al. 2012); ich gehe unten im Abschnitt Planetenkarten im Zusammenhang mit den simulierten Lichtkurven etwas näher darauf ein.

Die Transit-Weltraumprojekte der nächsten Generation sind bereits im (je nach Projekt mehr oder weniger fortgeschrittenen) Planungs- und Vorbereitungsstadium: Der schweizerisch-europäische *Characterising Exoplanets Satellite* (CHEOPS) mit einem 30 cm-Teleskop soll 2017 starten und dann Transits von Exoplaneten zwischen 1 und 6 Erdradien nachweisen (Erden, Supererden, Neptune; <http://cheops.unibe.ch/>). Bei der NASA soll der *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS) nach seinem Start im Jahre 2017 mit vier Weitwinkelteleskopen rund 500.000 Sterne auf Planetentransits untersuchen. Das *Exoplanet Characterization Observatory* (EChO; <http://sci.esa.int/echo>), das mit einem speziellen Spektroskop die Atmosphären von Transitplaneten untersuchen soll, konkurriert derzeit mit drei anderen Missionen und PLATO, das mit einer Batterie von 32 Teleskopen neue und insbesondere erdähnliche Exoplaneten aufspüren und untersuchen soll (<http://sci.esa.int/plato>), um einen Starttermin im Jahre 2024. Bei der NASA ist der *Fast Infrared Exoplanet Spectroscopic Survey Explorer* (FINESSE) mit ähnlicher Zielsetzung wie EChO in Planung.

Exoplaneten in der Schule

Exoplaneten sind für Schüler und Schülerinnen eines der spannendsten Themen der Astronomie – und in Gestalt der Suche nach Leben auf anderen Planeten sogar eines der spannendsten wissenschaftlichen Themen überhaupt: In der internationalen Studie ROSE (Relevance of Science Education; Sjøberg & Schreiner 2010) war die Frage „Gibt es außerhalb der Erde Leben?“ unter 106 abgefragten wissenschaftlichen Fragestellungen aus anderen Bereichen der Spitzenreiter bei denjenigen Themen, die sowohl Mädchen als auch Jungen interessieren. Aus Lehrersicht sind Exoplaneten außerdem attraktiv, weil sie - neben anderem Nutzen etwa zur Diskussion des wissenschaftlichen Fortschritts - interessante Beispiele für Standard-Lehrstoff wie 3. Keplersches Gesetz, Schwerpunktsatz und Dopplereffekt bieten (Neuhäuser 2011).

Einen guten Einstieg in das Thema bieten Rechnungen dazu, warum es so schwer ist, Exoplaneten direkt durch das Teleskop aufzunehmen (z.B. Herbstmeier 2011, Aufgabe 5 in Vieser 2013) und wie man abschätzen kann, ob einer der seltenen tatsächlich aufs Bild gebannten Exoplaneten tatsächlich ein zu dem ebenfalls sichtbaren Stern gehöriger Planet ist (Aufg. I in Wallasch 2008).

Auch zur Radialgeschwindigkeitsmethode lassen sich, sobald den Schülern sowohl der Dopplereffekt als auch die Keplerschen Gesetze bekannt sind, einfache Rechnungen durchführen (z.B. Aufgabe II in Wallasch 2008). Diese Rechnungen lassen sich mit allgemeineren Erkundungen zum Thema Schwerpunkt eines Systems und Radialgeschwindigkeit verbinden (z.B. Prather und Slater 2001). Eine weitere interessante Fragestellung lautet dabei: Wie groß sind beim Nachweis mit Radialgeschwindigkeitsmethode oder Transitmethode untersuchten Effekte für unser eigenes Sonnensystem – welche außerirdischen Beobachter können *uns* nachweisen (LoPresto & McKay 2004a)? Auch mithilfe maßgeschneiderter Softwaresimulationen kann man die Schüler erkunden lassen, wie sich Exoplaneten durch Veränderungen des Sternspektrums verraten (McCray 2006-2007).

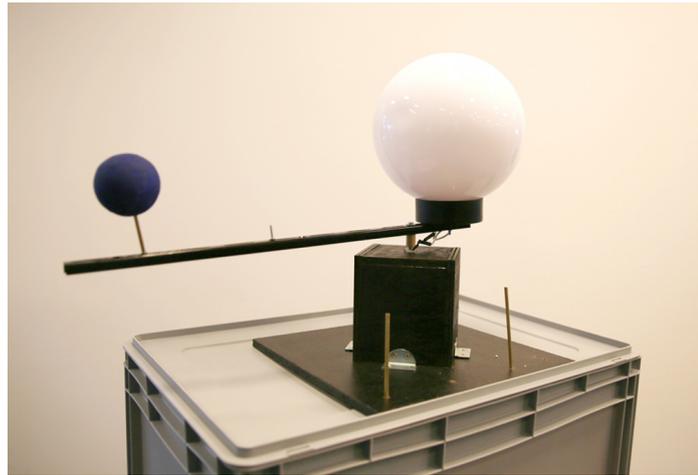
Bei den Modellsystemen bieten sich solche mit derjenigen Form des Dopplereffekts an, die den Schülern aus dem Alltag geläufig ist: akustische Analogsysteme mit kreisender Tonquelle, deren Tonhöhenveränderung mit einem Mikrofon nachgewiesen werden kann (Fischer 2006b, Fischer 2006c).

Nach oben hin sind besonders engagierten und fortgeschrittenen Gruppen keine Grenzen gesetzt. Selbst Software, welche die wichtigsten Werkzeuge der professionellen Analyse von Radialgeschwindigkeitskurven online als Web-Applikation bereitstellt, ist kostenlos verfügbar [<http://www.stefanom.org/systemic-online>].

Ergänzen lassen sich diese und andere Aktivitäten zum Exoplanetennachweis durch allgemeinere Überlegungen zu den Eigenschaften anderer Planetensysteme, zu unterschiedlichen Eigenschaften von Sternen und z.B. auch zum Begriff der habitablen Zone (z.B. Fischer 2006a, Debus 2013, Geffert 2010). Vertiefendes Hintergrundwissen unter anderem zu allen Nachweismethoden bieten die Beiträge in Seager (Hg.) 2010.

Im Gegensatz zur Radialgeschwindigkeitsmethode hat die Transitmethode den Vorteil, dass sie sich gut elementarisieren lässt: Licht und Schatten sind elementare physikalische Schulthemen und lassen sich anschaulich qualitativ umsetzen. Möglichkeiten dazu sind unterschiedlichen Kugel, die vor einer kugelförmigen Lampe vorbeigeführt werden (Debus 2013), unterschiedlich große, nicht leuchtende Styroporkugeln, mit denen sich Doppelsternsysteme (zwei Styroporkugeln), Transit (große weiße Styroporkugel und kleine schwarze) und der Störeffekt Sternflecken (große weiße Styroporkugel mit Fleck) demonstrieren lassen (Herbstmeier 2011). Die Helligkeitsveränderung lässt sich auch als Freihandversuch mit zweidimensionaler Modellsituation auf dem Overheadprojektor zeigen (Fischer 2006).

Will man quantitativ vorgehen und Lichtkurven erstellen, dann gibt es wiederum mehrere Möglichkeiten. Zum einen lassen sich auch bei der Transitmethode einfache Rechnungen durchführen (Rätz 2011; tiefer gehende Informationen in Seager und Mallén-Ornelas 2003).



Transitmodell "Exoplanetium", das am Haus der Astronomie im Rahmen einer Staatsexamensarbeit aus einfachen Bauteilen angefertigt wurde (Rößler 2012)

Außerdem besteht die Möglichkeit, die Situation eines Planetentransits nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ im Modell nachzustellen: mit einer von innen beleuchteten durchscheinenden Kugel für den Stern und einer kleineren undurchsichtigen Kugel als Planet, drehbar auf einer gemeinsamen Haltestange angebracht; die Lichtkurve wird von einem Fotodetektor gemessen (Choopan et al. 2011, Hofschulz 2014).

Die Modelle lassen sich sogar erweitern, um Untersuchungen der Exoplanetenatmosphäre zu simulieren. Dabei wird um das Planeten-Kügelchen eine etwas größere, durchsichtige Kugelschale gelegt (solche Plastik-Kugelschalen sind als Bastelbedarf im Handel), die dann farbig, z.B. blau getönt wird. An der Lichtkurve ist dann ablesbar, dass die blauen Lichtanteile etwas später an Helligkeit verlieren als die roten und grünen - einfaches Beispiel für die Absorption, anhand derer sich eine Planetenatmosphäre während eines Transits verrät (Rößler 2012).

Synthetische Lichtkurven lassen sich außerdem z.B. mit einem maßgeschneiderten Java-Applet simulieren (Aufgabe 7 in Vieser 2013) – die Gruppe *Astronomy Education* an der University of Nebraska-Lincoln stellt dabei sowohl einen Exoplaneten-Transitsimulator als auch, nützlich zum Vergleich, einen Doppelsternsimulator zur Verfügung:

- <http://astro.unl.edu/naap/esp/animations/transitSimulator.html>
- <http://astro.unl.edu/naap/ebs/animations/ebs.html> (Doppelstern)

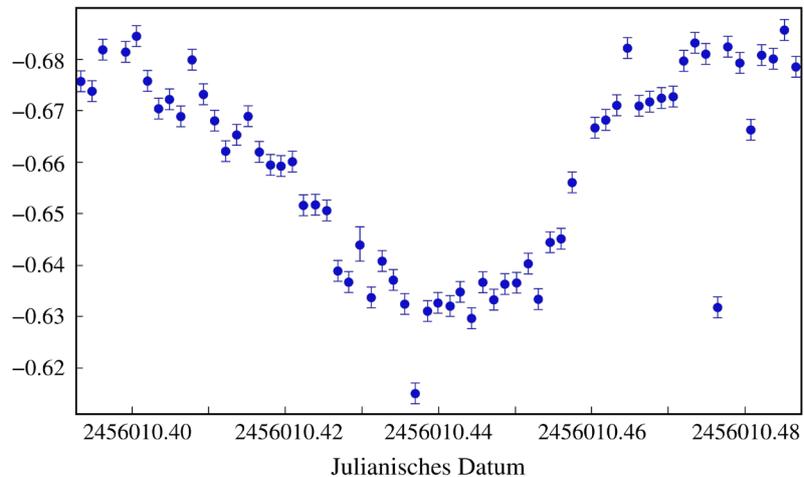
Die Kepler-Mission stellt eine Reihe von einfachen Aufgaben sowie einen interaktiven Simulator zur Verfügung, in dem die Auswertung einer solchen Lichtkurve Schritt für Schritt nachgespielt wird (Gould et al. 2010 und <http://kepler.nasa.gov/education/>)

An nächster Stelle steht die Auswertung von echten Lichtkurvendaten, wie sie an verschiedenen Stellen online via Web-Interface verfügbar sind (dazu gehören zum Beispiel das Kepler-Archiv auf http://archive.stsci.edu/kepler/data_search/search.php oder die *Exoplanet Transit Database* auf <http://var2.astro.cz/ETD/>). Eine einfache quantitative Beschreibung der Geometrie ermöglicht es anhand solcher Lichtkurven, aus der Helligkeitsabnahme, der Transitdauer und der Transitperiode den Radius des Exoplaneten relativ zum Stern und den Bahndurchmesser des Planeten zu bestimmen sowie die Planetenmasse abzuschätzen (George 2011).

Eine Ressource der besonderen Art ist dabei das Projekt PlanetHunters (<http://www.planethunters.org>). Dabei handelt es sich um ein *Citizen Science-Projekt*, also um ein Projekt, in dem Freiwillige per Internet bei der wissenschaftlichen Forschung helfen können. Dieses und andere Projekte sind Teil des Zooniversums (<http://www.zooniverse.org>). Bei PlanetHunters geht es konkret darum, Lichtkurven zu interpretieren, die mit dem Kepler-Satelliten aufgenommen wurden. Darunter sind viele veränderliche Sterne und dann und wann auch Exoplaneten – tatsächlich wurde auf diese Weise bereits einige neue Kandidaten für Transitplaneten entdeckt, die nicht von der

automatischen Auswertung der Kepler-Mission erfasst worden waren. Das Portal bietet außer der Möglichkeit, Lichtkurven zu klassifizieren, ausführliche Hintergrundinformationen sowie ein Diskussionsforum.

Die wohl anspruchsvollste Variante, quantitative Lichtkurven in den Unterricht einzubringen, besteht darin, die Schüler selbst Transit-Lichtkurven bereits bekannter Planeten messen zu lassen. Am Haus der Astronomie ist dies in den letzten Jahren mit dem 50-cm-MPIA-HdA-Teleskop z.B. für eine Facharbeit und bei der Arbeit mit Schülern des Life Science Lab geschehen (Liefke 2013, Bild rechts). In den USA wurden auf diese Weise mit Hilfe von Kleinteleskopen, welche im Micro Observatory am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics zum Einsatz kommen, Lichtkurven für HAT-P-10 und für TrES-3 bestimmt; insgesamt gibt es rund 20 Planetentransits, die für solche Messungen mit Schülern infrage kommen (Gould et al. 2012). Weitere Beispiele und Beschreibung möglicher Auswertungssoftware finden sich in Rätz 2011.



Transitmessung mit Schülern des Heidelberger Life Science Lab an TrES-3 mit dem 50-cm-MPIA-HdA-Teleskop. Auf der y-Achse ist die Helligkeitsdifferenz in Magnituden zwischen dem TrES-3-System und einem Vergleichssterne angegeben (Liefke 2013).

Ein Beispiel besonders intensiver Zusammenarbeit zwischen Schule und Forschung auf hohem Niveau ist das Projekt *PlanetFinders* im Rahmen von MONET / Astronomie und Internet (Projektmanager: Rick Hessman). Dort konnten Schüler mit einem der 1,2-m-MONET-Teleskope Beobachtungen durchführen, die am Ende sogar in der Veröffentlichung zweier Forschungsartikel mündeten. Allerdings betrafen diese Beobachtungen nicht Exoplanetentransits, sondern, etwas anders, die Lichtkurven von Doppelsternsystemen, deren Änderungen mit der Zeit Hinweise auf die Anwesenheit von weiteren Objekten im System - etwa von Planeten - geben können (Backhaus et al. 2012, Beuermann et al. 2012).

Transitkurven mit Raytracing selbst simulieren

Materielle Modelle für Exoplanetentransits haben den Vorteil der direkten Anschauung: Die räumlichen Verhältnisse und das Spiel von Licht und Schatten sind direkt mit unserer Alltagserfahrung erfassbar. Direkte Messungen mit einem Luxmeter können von Hand oder dort, wo ein computergestütztes Experimentiersystem zur Verfügung steht, automatisch protokolliert werden. Jede Messreihe dauert freilich ihre Zeit; auch das eine wertvolle Erfahrung, aber je nach den Rahmenbedingungen ein Nachteil. Das Arbeiten mit echten Daten wiederum hat den Vorteil der Authentizität, aber den Nachteil, dass – wie eben bei den Profis – nur noch indirekt auf die Eigenschaften des Systems geschlossen werden kann, also die direkte Einsicht fehlt, wie sich aus bestimmten Systemeigenschaften bestimmte Formen der Lichtkurve ergeben. Vorgefertigte Applets können den Zusammenhang zwischen Systemzustand und empfangenen Licht anschaulich visualisieren. Allerdings sind solche Applets oder ähnliche maßgeschneiderte Software wiederum eine „black box“ – und haben, wie alle Computerspiele, den weiteren den Nachteil, dass Benutzer nur diejenigen Gestaltungsmöglichkeiten haben, die von den Programmierern vorgesehen wurden.

Die hier vorgestellte Möglichkeit, Transitkurven mithilfe eines Raytracing-Programms selbst zu simulieren, nimmt eine Art Zwischenstellung ein. Raytracing verfolgt den Weg von Lichtstrahlen in einer dreidimensional definierten, virtuellen Szene, und erzeugt so realistisch wirkende Beleuchtungseffekte mit Schattenwurf, Spiegelungen, in komplexeren Fällen z.B. auch Dispersion. Digitale, dreidimensional wirkende Computergrafiken, die mit diesem Verfahren erstellt wurden – von CGI-Spezialeffekten bis zu komplett computergenerierten Filmen und Computerspielen – sind längst Teil der Alltagserfahrung der Schüler. Das hier vorgestellte Programm POV-Ray (<http://www.povray.org/>) erlaubt es, mit vergleichsweise einfachen Kommandos die einem Planetentransit entsprechende Situation (mit Stern und darum kreisendem Planeten) nachzustellen. Im Gegensatz zu einem speziell zur Visualisierung von Transits programmierten Applet ist POV-Ray zu einem guten Teil *keine* black box. All das was bei einem materiellen Modell an Teilen gewählt und arrangiert werden muss, das muss auch im POV-Ray-Skript definiert und platziert werden.

Weiterer Unterschied zu maßgeschneiderten Applets ist, dass die hier beschriebene Transit-Anwendung von den Möglichkeiten, die POV-Ray bietet, nur einen kleinen Bruchteil ausnutzt – und dass POV-Ray flexibel genug ist, um einen Großteil dessen, was besonders engagierten Schülerinnen oder Schülern als Erweiterung oder Variation der hier beschriebenen Transit-Visualisierungen einfallen könnte, auch umzusetzen.

Ist das Prinzip verstanden, dann kann man – insbesondere auf Basis der hier mitgelieferten Beispielskripte – vergleichsweise schnell verschiedene interessante Situationen modellieren und auswerten; deutlich schneller als bei einem materiellen Modell.

Jeroen Bouwman, der sich am Max-Planck-Institut für Astronomie mit Transitmessungen beschäftigt, und ich haben die Transit-Modellierung mit POV-Ray 2011 mit zwei Schülerpraktikanten (im Rahmen des Hector-Seminars) ausprobiert. Die beiden Praktikanten haben sich dabei ähnliche Aufgabenstellungen wie einige der hier vorgestellten weitgehend selbstständig erarbeitet. In der hier vorgestellten dokumentierten Form mit Beispielprogrammen sollte das Verfahren aber noch deutlich breiter einsetzbar sein – zumal das gezielte Variieren der Beispielprogramme (ähnlich lernen auch Wissenschaftler nicht selten neue Software!) setzt keine größeren Vorkenntnisse voraus.

POV-Ray

POV-Ray (kurz für „Persistence Of Vision-Raytracer“) ist ein sogenanntes Rendering-Programm, also Software, die eine virtuell definierte, dreidimensionale Szene in ein Bild umsetzt. Wird für die Modellierung entsprechender Aufwand getrieben, dann lassen sich fotorealistische Bilder erzeugen wie in dem Beispiel rechts. Es stammt von Gilles Tran; dabei wurde zum Erstellen der (teils recht komplexen) Modelle noch weitere Software (Rhino und Cinema 4D) verwendet, bevor mit POV-Ray gerendert wurde (das Bild ist in der Public Domain, über [Wikimedia Commons](#)).



Im einfachsten Falle erhält POV-Ray zur Spezifikationen nichts weiter als ein Skript mit Datei-Endung .pov, eine sogenannte POV-Datei, in der die Objekte der Szene sowie etwaige Lichtquellen und, ganz wichtig, Standort, Blickrichtung und Eigenschaften der Kamera definiert sind, die das Bild virtuell aufnehmen soll. Einfache geometrische Objekte lassen sich in solch einem Skript sehr einfach beschreiben. Um etwa eine blaue Kugel mit Radius 5 im Raumnulldpunkt zu platzieren, ist im Skript nicht mehr als der Text

```
sphere { 0, 5, pigment { color Blue } }  
nötig.
```

Um diese Kugel dann vom Raumnulldpunkt zum Ort $x=12$ zu verschieben, fügen wir den direkten Verschiebebefehl „`translate 12*x`“ hinzu,

```
sphere { 0, 5, pigment { color Blue}
  translate 12*x
}
```

Und um die Kugel anschließend noch um 30 Grad um die z-Achse rotieren zu lassen, reicht das Hinzufügen von „`rotate 30*z`“, also

```
sphere { 0, 5, pigment { color Blue}
  translate 12*x
  rotate 30*z
}
```

Die Rotation bezieht sich dabei wohlgerneht nicht auf eine Achse, die durch den Kugelmittelpunkt geht, sondern um die z-Achse des Koordinatensystems – sie dreht die Kugel also nicht nur, sondern bewegt sie auch in konstantem Abstand zum Nullpunkt durch den Raum. Damit haben wir bereits fast alles zusammen, um ein einfaches Planetensystem zu bauen – wir müssen die Kugel nur noch dazu bringen, sich mit der Zeit, in einer Bilderserie also von Einzelbild zu Einzelbild, weiter zu bewegen.

Solche Animationselemente lassen sich in einer zweiten Datei mit der Endung `.ini` definieren, der INI-Datei. Mit den Angaben und `Initial_Clock=0.0` und `Final_Clock=0.0` können wir definieren, dass eine Standardvariable namens `clock` im Verlauf unserer Animation von 0 bis 1 läuft. Mit `Initial_Frame = 1` und `Final_Frame = 200` sagen wir dem System, dass es unsere Animation in Einzelbildern festhalten soll, die von 1 bis 200 durchnummeriert sind. Damit haben wir eine Zeitentwicklung von 0 bis 1 (Variable `clock`) auf 200 gleichmäßig verteilten Schnapsschüssen, den Einzelbildern, festgehalten.

Für jeden dieser Schnapsschüsse wird die POV-Datei aufgerufen, die unsere Szene beschreibt. Haben wir in dieser Datei irgendwo die Variable `clock` verwendet, dann wird für `clock` der dem Schnapsschuss entsprechende Zeitwert zwischen 0 und 1 eingesetzt.

Geben wir beispielsweise unserer Kugel eine zeitabhängige Rotation um 360 Grad um die z-Achse mit,

```
rotate 360*clock*z
```

dann sehen wir, wenn wir die Einzelbilder hintereinander ablaufen lassen, wie die Kugel einmal ganz um den Raumnulldpunkt umläuft.

Von der Bilderserie zur Lichtkurve

Mit diesen Informationen können wir jetzt eine Bilderserie erstellen, die den Umlauf eines kugelförmigen Planeten um einen zentrale, im Nullpunkt ruhende Kugel zeigt. Aber den Luxus, wie beim Venustransit auf Einzelbildern erkennen zu können, wo vor dem Sternscheibchen sich das Planetenscheibchen gerade befindet, haben wir ja bei Exoplaneten gerade nicht. Auch für unsere Simulation sollten wir die Bilderfolge in eine Lichtkurve umwandeln, für jedes Bild einen Helligkeitswert.

Jeder Pixel des Bildes hat einen Rotwert, der zwischen 0 und 255 liegt, ebenso einen Grünwert und einen Blauwert. Wir definieren die Pixelhelligkeit als die Summe aller dieser Werte, Rotwert plus Grünwert plus Blauwert, $R + G + B$, und die Gesamthelligkeit des Bildes als die Summe aller Pixelhelligkeiten. Die resultierende Zahl trägt zwar keine physikalische Einheit; die für die

Auswertung der Transitkurve nötigen Helligkeitsverhältnisse (um welchen Bruchteil nimmt die Sternhelligkeit ab, wenn sich der Planet davorschiebt?) können wir in diesen Zahlen aber ebenso gut ausdrücken wie in physikalisch gemessenen Strahlungsflüssen.

Bleibt die technische Umsetzung. Ich liefere dazu ein einfaches Programm mit, das in der Sprache *Processing* geschrieben ist (<http://www.processing.org>). Das ist eine Programmiersprache, die vor allem für Grafik-, Animations- und Simulationsanwendungen konzipiert und möglichst einfach gehalten wurde, damit auch Künstler und Designer ohne größere Programmieraffinität damit zurechtkommen. Sie hat den Vorteil, sich Windows, Linux und Mac OS X einfach installieren zu lassen. Die mitgelieferte Datei muss dann einfach in das Programm geladen, einige Textbausteine müssen angepasst und die Datei ausgeführt werden, und schon erhält man eine einfache Textdatei mit den Lichtkurvenwerten, die sich dann z.B. in Excel auswerten lässt. (Wer mehr zu Processing erfahren möchte, kann das auch auf Deutsch tun: <http://www.pixelstorm.ch/processing/>.)

Zur Umsetzung: Ist Processing installiert, wird noch die Datei `make_lightcurve.pde` benötigt. Diese Datei und auch alle Beispieldateien, die im folgenden erwähnt werden (`transit-A.pov`, `transit-A.ini`, `transit-B.pov`, ...), habe ich hier auf dieser Seite zum Herunterladen bereitgestellt:

<http://www.haus-der-astronomie.de/home/poessel/transits2013>

Die Datei wird in einem gleichnamigen Verzeichnis `make_lightcurve` platziert. Dort wird außerdem ein Unterverzeichnis `data` angelegt. In dieses Unterverzeichnis wird die Serie von Bildern abgelegt, für die eine Lichtkurve erstellt werden soll. Die Dateinamen haben dabei die Form „Stammmname plus Nummer plus Dateendung“.

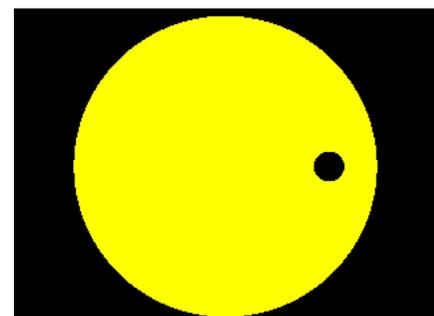
Ein erster Transit – Datei `transit-A.pov`

In diesem und den nachfolgenden Abschnitten werden verschiedene Transitsimulationen unterschiedlicher Komplexität vorgestellt, für die es jeweils auch Beispieldateien gibt. Mit den Schülerinnen und Schülern können entweder die Beispieldateien hergenommen und variiert werden – übrigens ein häufiges Vorgehen, wenn sich Forscher in ihnen neue Software einarbeiten! – oder es kann direkt selbst programmiert werden.

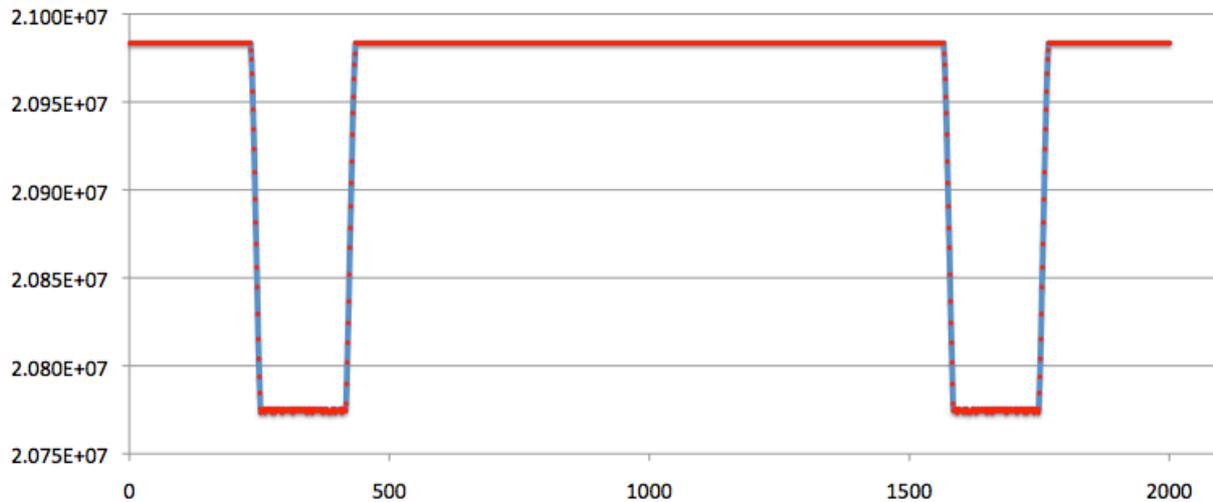
In der einfachsten Transitmodellierung, zu der die Beispieldateien `transit-A.pov` bzw. `transit-A.ini` gehören, kommen keinerlei POV-Ray-Lichtquellen zum Einsatz. Stattdessen bekommt der Stern (eine Kugel mit Radius 5) das Attribut `finish { ambient 1.0}`, das ihn zu einem Objekt macht, dessen Farbe auch ohne explizites Anleuchten sichtbar ist (das Kommando bewirkt, dass das Objekt von diffusem Umgebungslicht mit der Stärke 1.0 angeleuchtet wird).

Die Kamera blickt direkt von der Seite auf Planet und Stern (Inklination 90°). Der Planet läuft mit dem Befehl `rotate 360*1.5*clock*z` um, so dass in der Bilderserie (`clock` läuft dort von 0 bis 1) anderthalb Umläufe abgebildet werden. Die Ausgangsposition des Planeten ist so gewählt, dass die Bildserie zwei aufeinanderfolgende Transits zeigt.

Hier ist ein Beispielbild aus der Simulation zu sehen, bei dem sich die (vergleichsweise große) Planetenscheibe gerade vor der Sternscheibe befindet:



Die mit `make_lightcurve.pde` erzeugte Lichtkurve sieht recht einfach aus:



In rot sind dabei die Datenpunkte eingezeichnet, in blau die Verbindungskurve. Auf der x-Achse sind die Einzelbildnummern aufgetragen, auf der y-Achse die Summe der Pixelhelligkeiten. Erstellt wurde die Graphik mit Microsoft Excel; die weiteren Lichtkurven-Grafiken in diesem Artikel habe ich der Einfachheit halber mit Python (matplotlib bzw. pylab); sie alle ließen sich aber auch in Excel erstellen.

Die Kurve ist im Vergleich zu den echten Lichtkurven sehr eckig. Darauf kommen wir später noch zurück.

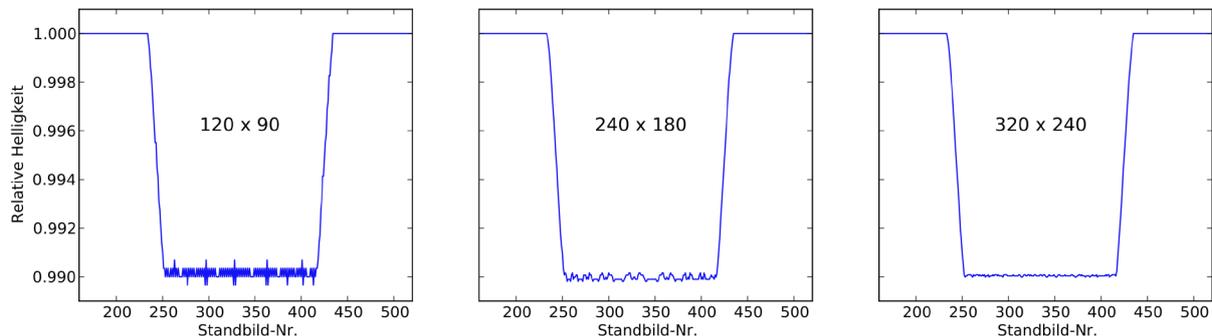
Gerade aufgrund der Einfachheit lassen sich die Parameter des Transits einfach bestimmen: Der Helligkeitsabfall (Helligkeitswert im Minimum) beispielsweise, geteilt durch den Helligkeitswert im Maximum, ergibt in der Tat 0,009965 und damit auf 0,3 Prozent genau das Quadrat des Verhältnisses Planetenradius durch Sternradius (Radiusverhältnis 0,1). Das lässt sich einfach geometrisch verstehen: Die Sternscheibe, die wir sehen hat die Fläche πR_s^2 mit R_s dem Sternradius. Wie in dem Einzelbild zu sehen hat sie für uns eine überall konstante Helligkeit, so dass die Gesamthelligkeit proportional zur Fläche ist. Nehmen wir von der hellen Fläche die Teilfläche πR_p^2 weg, weil sich der Planet mit Radius R_p vor die Sternscheibe geschoben hat und einen Teil der Fläche abschattet, dann nimmt die Gesamthelligkeit um den Bruchteil $(\pi R_p^2)/(\pi R_s^2)$, also $(R_p/R_s)^2$, ab.

Zwischenbemerkung zu Rechenzeit und Datenqualität

Wer bis zu dieser Stelle am Computer mitsimuliert hat, wird gemerkt haben, dass insbesondere die POV-Ray-Rechnung den Prozessor einigermaßen in Anspruch nimmt. Ich habe die hier gezeigten Kurven auf einem nun schon etwas älteren Rechner mit 3,06 GHz Intel Core 2 Duo gerechnet. In der POV-Ray-Standardgröße, 320 Pixel breit und 240 Pixel hoch, dauert das Visualisieren (das Rendern) 7 Minuten und 11 Sekunden.

Die Bildgröße lässt sich in der INI-Datei einstellen (wobei das Seitenverhältnis von 4:3 tunlichst beibehalten werden sollte, wenn man nicht gleichzeitig die Standard-Kamera umdefinieren will). Die Render-Dauer nimmt in etwa mit der Anzahl der gerenderten Pixel ab. Wird die Pixelzahl allerdings zu gering gewählt, dann kommt es beim Vorbeizug des Planeten vor der Sternscheibe – ist der Planet vor der Sternscheibe, dann sollte die Lichtkurve in unserem einfachen Falle ein waagerechter Geradenabschnitt sein – zu Unregelmäßigkeiten: durch die Pixelstruktur und insbesondere durch den Umstand, dass auf das kleine Planetenscheibchen nur vergleichsweise wenige Pixel entfallen, sieht man im Transit-Minimum mehr oder weniger starkes Rauschen.

In der folgenden Abbildung ist dieses Rauschen für drei verschiedene Bildgrößen (120 mal 90 Pixel, 240 mal 180 Pixel und 320 mal 240 Pixel) nachgestellt.



Es empfiehlt sich daher, die Bildgröße nicht allzu klein zu wählen, auch wenn die Berechnung des gesamten Umlaufs dann einiges an Zeit in Anspruch nimmt. Sind die grundlegenden Eigenschaften der Lichtkurve besprochen, bietet es sich an, nachfolgende Simulationen – wie ich es im folgenden auch tue – nur noch auf den eigentlichen Transit beschränken. Es gibt zwei Gründe, den gesamten Umlauf zu verfolgen: Zum einen, wenn man die Umlaufzeit bestimmen möchte – das sollte man einmal tun; es bei den nachfolgenden Transits zu wiederholen, bringt keinen zusätzlichen Lerneffekt. Oder aber, beim Umgang mit echten Daten, wenn man mehrere Messungen des Transits möglichst phasengerecht überlagern möchte um überhaupt ein genaues Bild des Lichtkurvenverlaufs rund um den Transit zu erhalten. In unserer Simulation haben wir den Luxus, den Verlauf auch bei der Beschränkung auf einen einzigen Transit in guter Qualität verfolgen zu können.

Um die POV-Ray-Rechnung auf den Zeitraum rund um den Transit zu beschränken, verwenden wir die Einträge `Subset_Start_Frame` und `Subset_End_Frame` in der INI-Datei. Im Falle von `transit-A` liefert uns

```
Subset_Start_Frame = 160
Subset_End_Frame = 520
```

den interessanten Teilbereich rund um den Transit und benötigt bloß noch 1 Minute 16 Sekunden zum Rendern.

Auswirkungen der Inklination – Datei `transit-B.pov`

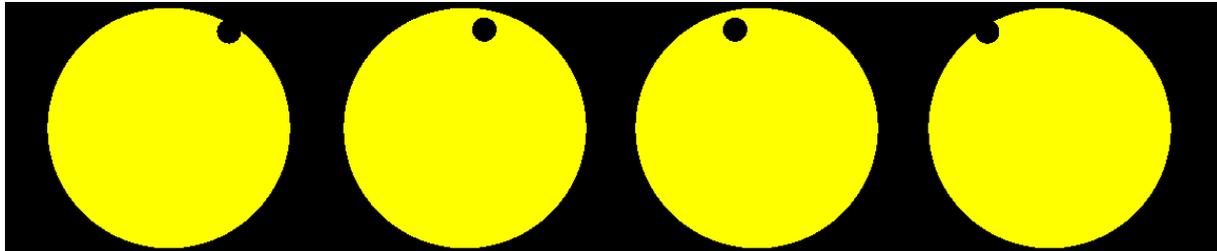
In `transit-A` hatten wir ein System betrachtet, das wir direkt von der Seite sehen. Das ist bereits ein recht typisches Aussehen – ist die Bahnebene zu stark in unsere Richtung geneigt, dann würde das Exoplanetenscheibchen aus unserer Sicht schließlich gar nicht mehr vor dem Sternscheibchen vorbeiziehen. Aber ein wenig Inklination ist auch bei realistischen Exoplanetensystemen möglich, und wir können erkunden, wie sich die Lichtkurve dadurch verändert.

Die Datei `transit-B.pov` unterscheidet sich von `transit_A.pov` dadurch, dass wir Stern und Planet in eine Gruppe zusammengefasst haben: Der Gruppe ist das Schlüsselwort `union` vorangestellt, die Gruppe selbst in geschweifte Klammern eingeschlossen. Wenn wir vor der geschlossenen geschweiften Klammer die Anweisung

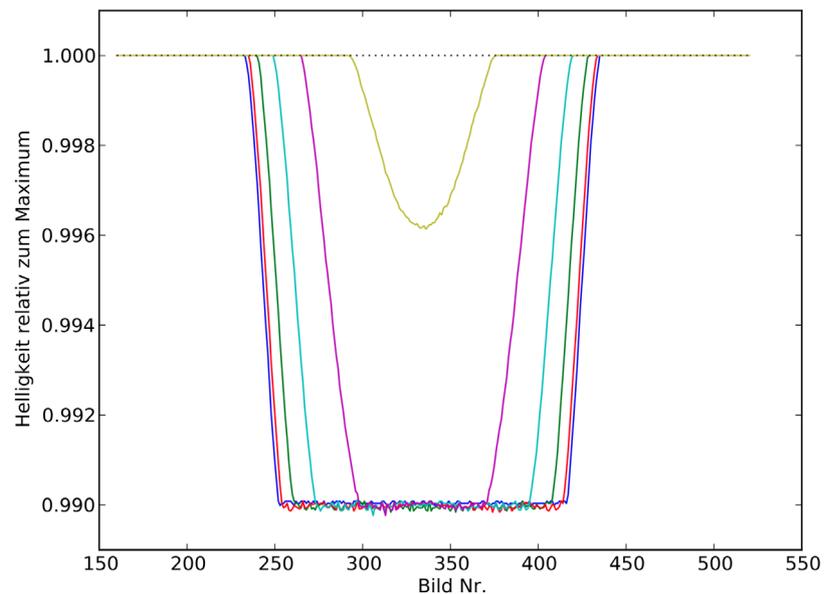
```
rotate 20*z
```

geben, dann ändern wir die Inklination des Systems damit um 20 Grad – anstatt dass die Verbindungslinie von uns als Beobachtern und dem Stern in der Bahnebene des Planeten liegt, ist die Bahnebene jetzt um 20 Grad gegen die Verbindungslinie geneigt. Damit wandert der Planet nicht

mehr zentral vor der Sternscheibe vorbei, sondern – das ist in den simulierten Bildern natürlich direkt zu sehen – etwas nach oben verschoben. Er legt dementsprechend eine kürzere Strecke vor der Sternscheibe zurück, und die Phase, während derer der Planet komplett vor der Sternscheibe steht, verkürzt sich entsprechend. Hier sind Momentaufnahmen aus dem 20-Grad-Transit (Inklination 70 Grad), die das veranschaulichen; der Zeitverlauf ist von links nach rechts:



Die Lichtkurven werden mit abnehmender Inklination entsprechend schmaler. Hier sind die verschiedenen Transitkurven dargestellt; von außen nach innen nimmt der Neigungswinkel jeweils um 5 Grad zu – von 0 Grad (Inklination 90 Grad) bis hin zur Neigung von 25 Grad (Inklination 65), wo sich das Planetenscheibchen gar nicht mehr voll vor das Sternscheibchen schiebt (und die Transitkurve entsprechend flacher ist) und 30 Grad (Inklination 60 Grad, gepunktete Linie), wo es gar nicht mehr zu einem Transit kommt.



Bereits im Vergleich der Kurven wird dabei klar, dass die Abhängigkeit Transitdauer (z.B. Dauer der Minimums-Phase) und Neigungswinkel nichtlinear ist – tatsächlich nimmt die Transitdauer deutlich schneller als linear ab.

An dieser Stelle wird plausibel, dass sich aus den Transitdaten auf den Inklinationenwinkel schließen lässt – zumindest mit einigem an Zusatzinformationen: Wenn man Sternradius und Sternmasse aus den Spektraldaten des Sterns abgeschätzt hat, die Umlaufzeit des Planeten aus der Transitperiode und die Zeit, die der Planet benötigen würde, um bei Neigungswinkel Null am ganzen Sternscheibchen vorbei zu laufen, aus der Umlaufzeit des Planeten sowie seinem Abstand vom Stern (letzterer aus dem 3. Keplerschen Gesetz, eingesetzt werden Sternmasse und Planeten-Umlaufzeit), dann erlaubt der Vergleich mit der hier dargestellten Verkürzung der Transitdauer, auf den Neigungswinkel bzw. die Inklination zu schließen.

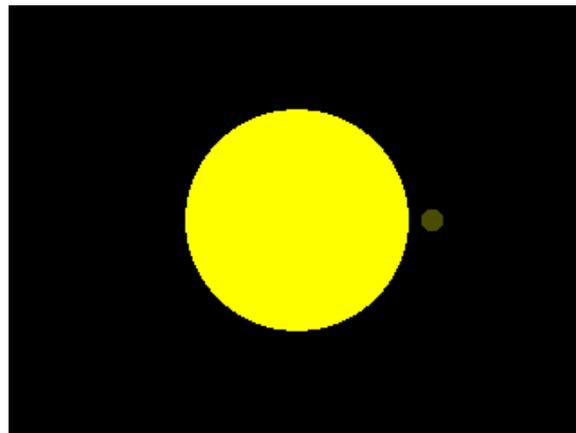
Okkultation – Datei transit-C.pov

Bislang war das Planetenscheibchen in unserer Simulation komplett schwarz – seine einzige Rolle bestand darin, das Sternscheibchen etwas abzuschatten. Jetzt betrachten wir eine Situation, in der der Planet selbst ein wenig leuchtet. Das ist insbesondere bei Beobachtungen im Infrarotbereich und insbesondere bei jüngeren Planeten realistisch, die noch Restwärme aus der Zeit ihrer Entstehung aus der protoplanetaren Gas- und Staubscheibe abstrahlen.

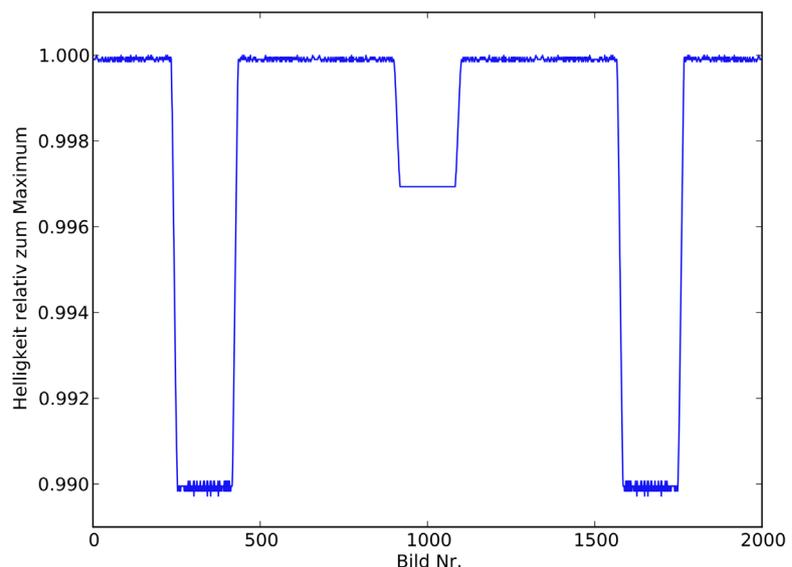
Wir verändern transit-B.pov entsprechend zu transit-B.pov, indem wir den Planeten genau so, wie wir es seit jeher beim Stern getan haben, von fiktivem diffusen Umgebungslicht anleuchten lassen, um eine selbstleuchtende Oberfläche zu simulieren; außerdem geben wir ihm eine, im Vergleich zum Stern freilich eher dunkle, Farbe:

```
pigment { color rgb<0.05,0.05,0> }
finish { ambient 1.0}
```

Um den Planeten immer im Bild zu behalten – auch bei seinem größten scheinbaren Abstand vom Stern – ist in transit-C.pov der Kamera-Blickwinkel (`angle`) etwas größer gewählt als in den vorigen Programmen. Hier ist ein Einzelbild, das den Planeten kurz vor dem Transit zeigt:



Auf diesem Bild ist ein beachtlicher Helligkeitsunterschied zu sehen; tatsächlich ist der Planet aber hier immerhin noch ein Drittel so hell wie sein Stern – ein selbst im Infraroten unrealistisch hoher Wert. Die Lichtkurve zeigt entsprechend ein tieferes Minimum, wenn sich der Planet beim Transit vor den Stern schiebt, und ein in diesem Falle nur ein Drittel so tiefes Minimum, wenn sich der Stern bei der sogenannten *Okkultation* vor den Planeten schiebt, wie in der Abbildung rechts zu sehen ist. Statt Okkultation sagt man auch allgemeiner Bedeckung oder, speziell in einem Transitsystem „sekundärer Transit“ – das Vorbeilaufen des Planeten vor dem Stern ist im Vergleich dazu der „primäre Transit“.

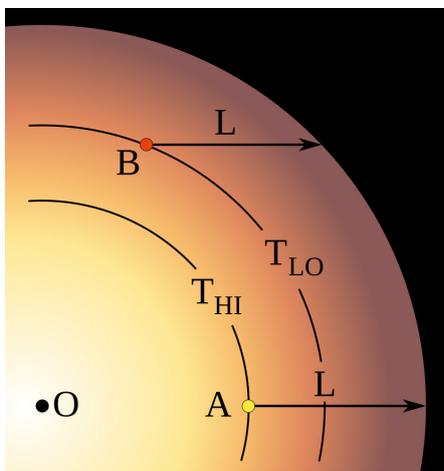


Aus der Geometrie der Umlaufbahn folgt direkt, dass das Okkultations-Minimum mittig zwischen den beiden Transit-Minima liegt, und dass beide gleich lange dauern. Nur wenn sich der Planet an unterschiedlichen Stellen seiner Bahn unterschiedlich schnell bewegt, kann das eine Minimum kürzer dauern als das andere, und kann zwischen den aufeinanderfolgenden Minima unterschiedlich viel Zeit vergehen.

Randverdunkelung – Datei transit-D.pov

Der deutlichste Unterschied zwischen der z.B. bei transit-A.pov simulierten Lichtkurve und den eingangs gezeigten echten Transitkurven ist der Verlauf im Minimum: In unseren bisherigen Simulationen im Wesentlichen (bis auf Pixel-Rauschen) waagrecht, bei echten Transitkurven nach unten hin durchgebogen.

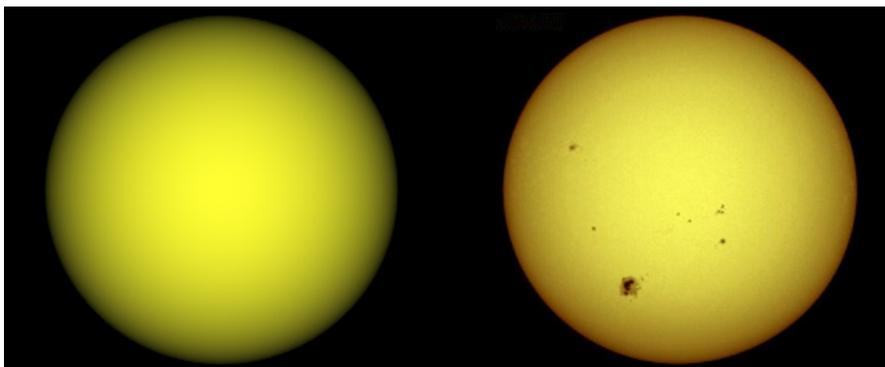
Wie das grob qualitativ zustande kommt, kann man wie folgt verstehen. Bislang ist der Stern in unserem einfachen Modell eine undurchsichtige Kugeloberfläche – zu sehen ist nur die oberste Schicht, und die besitzt eine konstante Flächenhelligkeit. Tatsächlich bestehen Sterne aber aus mehreren teiltransparenten Schichten. In der Photosphäre, also jenem relativ dünnen Teil der Atmosphäre, von dem aus der weitaus größte Teil des Sonnenlichts in den Weltraum abgestrahlt wird, gilt dabei: je tiefer desto heißer, und damit desto leuchtkräftiger. Allerdings absorbieren und streuen all diese Schichten auch Licht; die Folge davon ist, vereinfacht gesagt, dass wir nicht tiefer als eine charakteristische Länge L ins Innere der Photosphäre hineinschauen können.



Ryan Wilson via Wikimedia Commons
(Public Domain-Bild)

Damit werden geometrische Effekte wichtig, denn wie in der (beileibe nicht maßstabsgetreuen und lediglich schematischen) Skizze links zu sehen ist: Ein und dieselbe Einblicktiefe L bringt uns, wenn wir als ferne Beobachter von ganz weit rechts außerhalb des Bildes auf die Sonnenscheibe gucken, in demjenigen Teil, den wir als Zentrum der Sonnenscheibe wahrnehmen zu deutlich größeren Tiefen (Punkt A) mit ihren helleren, heißeren Schichten als in dem, was aus unserer Sicht die Randbereiche sind; dort können wir deutlich weniger tief sehen (Punkt B), bleiben also in den weniger heißen, weniger hellen Bereichen. Aus genau diesem Grunde sehen wir auf entsprechenden Aufnahmen (nie mit bloßem Auge oder gar mit Fernglas oder Fernrohr in die Sonne schauen! Gefahr der Erblindung!) die äußeren Bereiche der Sonnenscheibe dunkler als die zentralen Bereiche.

Diese Effekte in POV-Ray in physikalisch realistischer Weise, also über absorbierende und verschieden helle Medien, nachzubilden, sprengt den Rahmen dieser auf vergleichsweise einfachen POV-Ray-Kommandos aufbauenden Anleitung bei weitem. Im Prinzip verfügt POV-Ray über die Möglichkeit, Volumina mit Medien unterschiedlichen Emissionsgrades zu füllen, die gleichzeitig auch Licht streuen können und mit denen sich die Randverdunkelung nachmodellieren lassen müsste. Wir wählen hier stattdessen ein physikalisch ganz anderes Modell, das aber im Ergebnis einen qualitativ ähnlichen Helligkeitsverlauf erzeugt. Wer in transit-D.pov nachschaut, wird sehen, dass der Kugel dort das Stichwort `hollow` beigefügt worden ist; das im Block `interior` definierte Medium hat eine konstante Leuchtdichte und sendet Licht aus, ohne es zu absorbieren oder zu streuen. Eine Randverdunkelung ergibt sich in dieser (wie gesagt unrealistischen) Situation allein dadurch, dass unser Sichtstrahl dort, wo er an den Rand der Kugel gerät, weniger Volumen durchquert als im Zentrum.

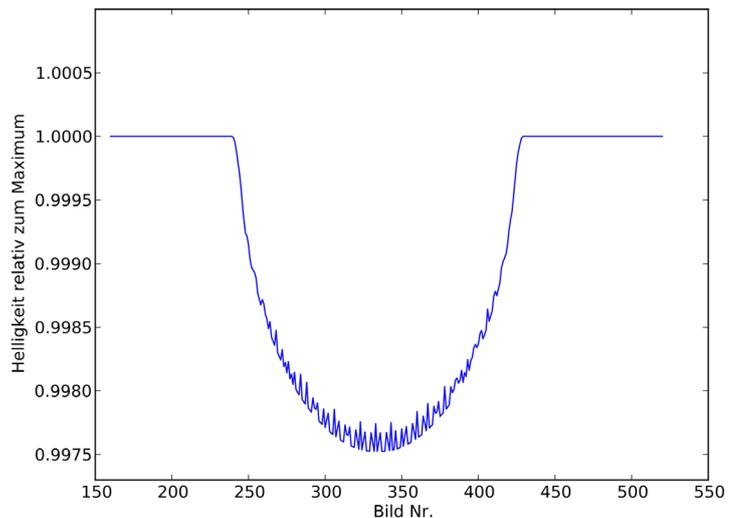


Das Ergebnis ist dem auf Fotos sichtbaren Helligkeitsverlauf nicht unähnlich; hier als gänzlich unqualitativer Vergleich rechts ein (sicherlich bearbeitetes) Foto der Sonne (Quelle: NASA) und links die gerenderte Version des Mediums mit konstanter Leuchtdichte.

Zumindest heuristisch können wir mit diesem Modell nachvollziehen, was passiert, wenn ein Exoplanet vor einer solchen Sternscheibe vorbeizieht, bei der Randverdunkelungseffekte zu sehen sind.

Die Lichtkurve von transit-D.pov (siehe rechts) zeigt, dass diese zusätzliche Eigenschaft tatsächlich das noch fehlende Formelement der Lichtkurve ergibt, nämlich die Wölbung des Transitbereichs nach unten.

Auf diese Weise kann man aus Exoplanetentransits durchaus nicht nur etwas über die Planeten, sondern auch etwas über die Eigenschaften der Sterne lernen, vor denen die Exoplaneten vorbeiziehen.



Atmosphären“spektroskopie“ – Datei transit-E.pov

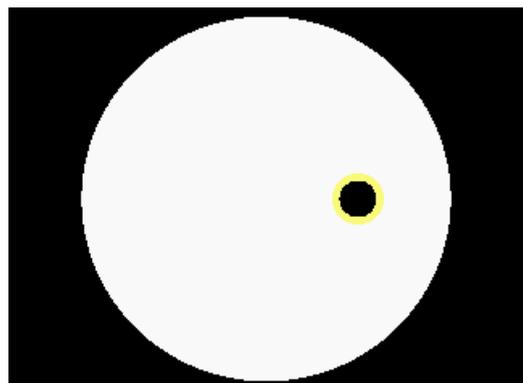
Als nächstes möchte ich ein – wiederum stark vereinfachtes – Modell vorstellen, das einen Vorgeschmack auf jene Messungen gibt, die Astronomen an Exoplanetenatmosphären vornehmen können. Dieses Forschungsgebiet steckt derzeit noch in den Kinderschuhen; insbesondere die oben bereits erwähnten geplanten Weltraummissionen zur besseren Charakterisierung von Transitplaneten sollen das ändern.

In solchen Untersuchungen der Exoplanetenatmosphären liegt der Schlüssel zu deren chemischen Eigenschaften, und damit nicht zuletzt zu der Möglichkeit des Nachweises, ob die Atmosphäre eines Exoplaneten lebensfreundlich ist oder sogar (in Form von ungewöhnlich erhöhtem Sauerstoff- bzw. Ozonanteil) Spuren einfachen Lebens zeigt.

Ausgangspunkt ist einmal mehr die in der Datei transit-B.pov festgehaltene Situation. Zusätzlich umgeben wir den Planeten in der Version transit-E.pov nun aber mit einer sehr einfachen Atmosphäre: einer in Durchsicht gelblichen Kugelschale, übertrieben größer als die Planetenoberfläche (tatsächlich ist z.B. die Erdatmosphäre ja im Vergleich zum Erdradius sehr dünn).

Bei der Pigment-Angabe geben wir dieser Kugelschale die Attribute `filter 0.3 transmit 0.7` mit. Auf diese Weise sagen wir POV-Ray, dass die Kugelschale 30% des Lichts filtern, also für 30% des einfallenden Lichts nur die eigene Farbe durchlassen (und den Rest, den Blauanteil, entsprechend streuen) soll; die anderen 70% können ungefiltert passieren (transmit). Der Einfachheit halber wählen wir diesmal einen weißen Stern, `rgb<1, 1, 1>`, so dass die Farbunterschiede, die wir sehen, tatsächlich alle auf den Transit zurückgehen.

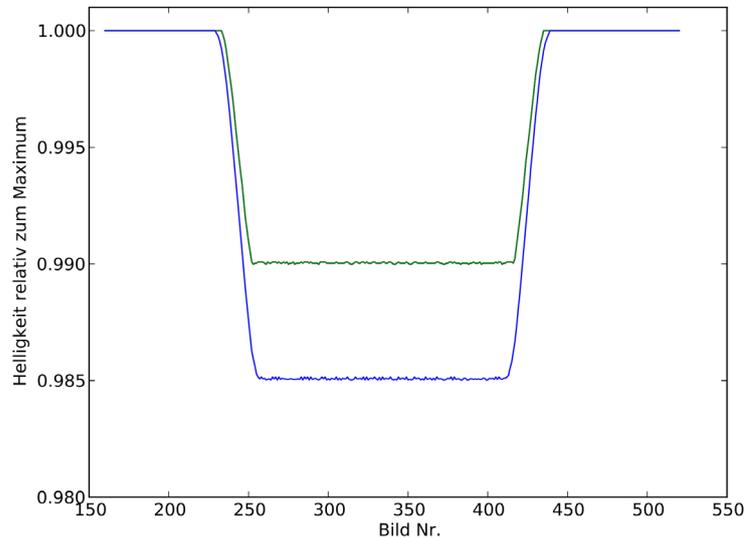
Hier ist der Anblick des Planeten mit seiner (übertrieben großen) Atmosphäre vor der Sternscheibe:



An dieser Stelle machen wir uns eine bislang nicht genutzte Option des Processing-Programms `make_lightcurve.pde` zunutze. In der Datei stehen die Ausdrücke

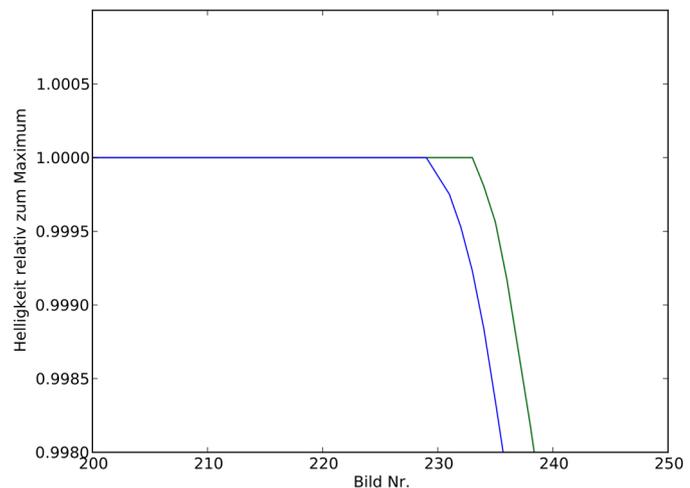
```
boolean getRed = true;
boolean getGreen = true;
boolean getBlue = true;
```

Sind die drei Variablen sämtlich auf `true` gesetzt, dann wird die Pixelhelligkeit, wie oben erwähnt, als Summe des roten, grünen und blauen Wertes (kurz: R+G+B) berechnet. Wenn wir dagegen jeweils nur eine der Variablen auf `true` setzen und die beiden anderen auf `false`, dann können wir nacheinander die Einzel-Lichtkurven für die Farben Rot, Grün und Blau aufstellen. Rechts sind diese Lichtkurven für den Planeten mit Atmosphäre aufgetragen.



Die grüne und rote Lichtkurve fallen dabei zusammen (zu sehen ist nur die grüne); auffällig ist, dass das Minimum der blauen Lichtkurve eben deutlich niedriger liegt als das bei rot und grün. Dadurch verrät sich hier derjenige Bedeckungsanteil – eben die Atmosphäre –, der vornehmlich blau absorbiert, die anderen beiden Farbanteile aber passieren lässt.

Von besonderem Interesse ist der Beginn des Transits, den ich rechts noch einmal vergrößert darstelle. Dabei ist deutlich zu sehen, dass grüne (und, dahinter versteckt, rote) Lichtanteile erst ein wenig später herausgefiltert werden als das blaue Licht. Lässt sich dieser Übergang in den Daten sauber nachvollziehen, dann kann man sogar Aussagen über die Ausdehnung der Atmosphäre treffen! In den wirklichen heutigen Exoplanetenmessungen der Astronomen ist die Genauigkeit noch allerdings nicht hoch genug, als dass es (veröffentlichte) Ergebnisse zu solchen Eintritts-Verzögerungen gäbe.



In Wirklichkeit sind es übrigens nicht die groben Farbtöne, wie wir sie hier unterscheiden, anhand derer Astronomen die Atmosphäreigenschaften aufklären wollen. Stattdessen betrachten die Astronomen viel engere Frequenzbereiche im Spektrum. Der Umstand, dass Planetenatmosphären im Gegensatz zu meinem übertriebenen Beispiel eng an der Planetenoberfläche anliegen, sorgt zudem dafür, dass ihr Einfluss auf die Lichtkurven ungleich kleiner ist als in meinem vereinfachten Beispiel.

Aber das Prinzip ist so, wie hier dargestellt: Die Absorption in diesen Bereichen (Absorptionslinien) in der Exoplaneten-Atmosphäre führt dazu, dass sich die Lichtkurven im Absorptionsbereich und außerhalb davon um ein Winziges unterscheiden. Wer diese Unterschiede nachweisen kann (da hier die Störungen aufgrund der Erdatmosphäre einen empfindlichen Einfluss haben, ist dies bevorzugt

eine Aufgabe für Weltraumteleskope), der kann Aussagen über Absorptionslinien der Exoplanetenatmosphäre und damit über deren chemische Zusammensetzung machen – und befindet sich auf dem besten Wege zum Nachweis der Lebensfreundlichkeit von Exoplaneten, oder gar der Anwesenheit von Leben.

Planetenkarten – Datei transit-F.pov

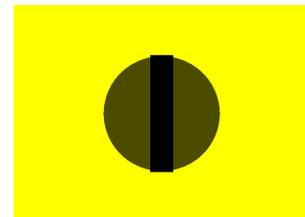
Als letztes möchte ich noch auf Verfahren eingehen, die Teil der aktuellen Forschung sind. Es geht um die oben bereits kurz angesprochene Erstellung von Planetenkarten. Ich gehe hier auf das Verfahren genauer ein, bei dem Detailmessungen an Eintritt und Austritt des Planeten hinter der Sternscheibe genutzt werden, um die Planetenoberfläche zu kartieren.

Die einfachste Situation ist diejenige, in welcher der Planet selbst nachweisbar leuchtet – wie in unserer Simulation im Abschnitt zur Okkultation, wo wir mit dem Skript transit-C.pov gearbeitet haben. Das kann insbesondere für Beobachtungen im Infrarotbereich eine realistische Annahme sein. Es trifft auf alle Fälle auf sogenannte "heiße Jupiter" (*hot Jupiter*) zu, also große Gasplaneten ähnlich dem Jupiter, die ihre Sterne in so geringer Entfernung umkreisen, dass sich die Tagseite des Planeten (und damit auch der Planet insgesamt) stark aufheizt, mit Oberflächentemperaturen von mehr als 1000 Kelvin. Solche heiße Jupiter sollten sich außerdem in gebundener Rotation befinden, also ihrem Stern immer dieselbe Seite zuwenden - das ergibt sich aus Rechnungen zu Gezeiteneffekten des Sterns auf das Gas dieser Planeten. Die gebundene Rotation vereinfacht die Situation noch einmal mehr.

Als erstes modellieren wir eine einfache Struktur auf unseren Planeten. Dazu füge ich dem Planeten einen senkrecht zur Bahnebene verlaufenden schwarzen Gürtel hinzu, erzeugt als Zylinder

```
cylinder { -0.1*x, 0.1*x, 0.51 }
```

Planetenkugel und –zylinder sind mit dem oben bereits einmal erwähnten Befehl `union` zusammen gruppiert, so dass die Umlaufbahn-Rotation auf beide gleichermaßen wirkt. Das Ergebnis ist automatisch eine gebundene Rotation um die y-Achse.

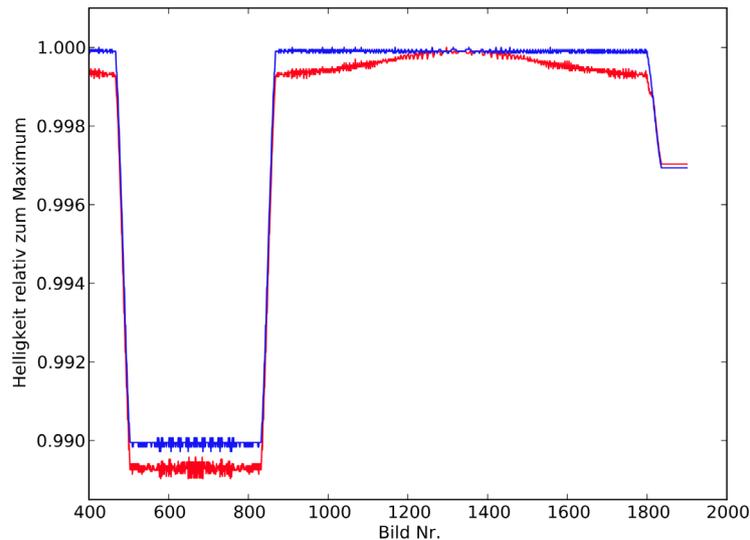


Rechts ist ein Ausschnitt aus einem Rendering des Einzelbildes Nr. 667 zu sehen, das den Planeten direkt vor der Sternscheibe zeigt. Dabei ist der senkrechte schwarze Gürtel, der immer zum Stern hinzeigt, gut zu sehen. Direkt für den Gürtel-Zylinder führen wir noch eine weitere Rotation ein, und zwar um die z-Achse – die entsprechende Rotation ist in der Datei transit-F.pov als solche markiert. Das Ergebnis ist, wiederum im Einzelbild Nr. 667 direkt vor dem Stern, eine Seitwärtsdrehung, hier um 45 Grad (siehe Bild rechts). Diese Drehung werden wir später noch brauchen.



Jetzt wenden wir uns den Lichtkurven zu. Wir vergleichen dabei die Situationen mit schwarzem Gürtel und ohne. (Die Situation ohne schwarzen Gürtel erhalten wir, indem wir die `cylinder`-Zeile und die darunterliegende Zeile in unserem Skript auskommentieren, sprich: `//` an den Zeilenanfang setzen.)

Betrachten wir als erstes den Einfluss der Planetenphase – z.B. ob der Planet direkt vor dem Stern steht und wir den schwarzen Gürtel als senkrechten Strich sehen, oder ob er seine äußerste scheinbare Entfernung vom Stern erreicht hat und wir den Gürtel daher gar nicht auf dem Planetenscheibchen sehen – auf die Gesamthelligkeit. Dazu rendere ich bei einigermaßen guter Auflösung (Bildgröße 320 mal 240 Pixel) den Bahnabschnitt zwischen primärem und sekundärem Transit, Bilder 400 bis 1900. Um die Helligkeit genauer verfolgen zu können, habe ich für transit-F.pov die doppelte Zahl von Einzelbildern (4000) gewählt. Das Ergebnis ist die auf der nächsten Seite gezeigte Lichtkurve.

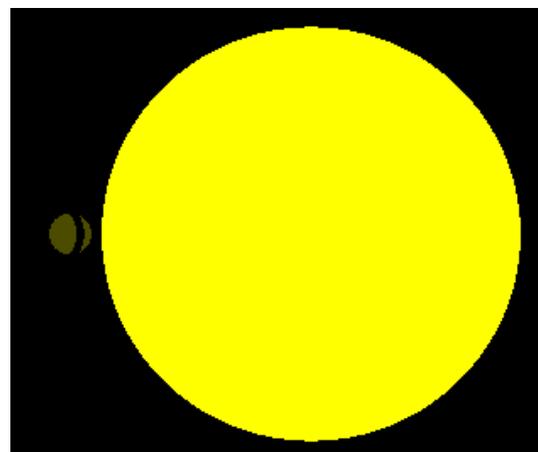


Die blaue Lichtkurve gehört dabei zu dem Planeten, der keinen schwarzen Gürtel besitzt, die rote zu demjenigen mit dem schwarzen Gürtel. Die Kurven sind so normiert, dass ihre Maxima jeweils bei 1.0 liegen. Gezeigt ist der Zeitraum vom primären Transit links bis zum Beginn des sekundären Transits rechts. Interessant sind jetzt die Unterschiede zwischen den beiden Kurven zwischen den beiden Transits: Die blaue Kurve ist dort gänzlich flach, denn die Szene ist immer gleich hell, weil jeweils sowohl der Stern als auch der Planet ganz zu sehen sind. Bei dem Planeten mit schwarzem Gürtel dagegen gibt es eine Helligkeitsentwicklung: Direkt nach dem Transit steigt die rote Kurve erst etwas an. Das liegt daran, dass wir den schwarzen Gürtel nahe des Transits vor der helleren Planetenoberfläche sehen und er die Helligkeit entsprechend vermindert; dort, wo das Maximum der roten Kurve erreicht ist, ist der schwarze Gürtel so gedreht, dass er die hellere Planetenoberfläche umschließt, aber eben keinen Teil von ihr verdeckt; anschließend rotiert der schwarze Gürtel wieder in Sicht, und die Kurve fällt daher zum sekundären Transit hin wieder etwas ab.

Eine genauere Untersuchung der Lichtkurve, die jeweils in Betracht zieht, welchen Teil der Planetenoberfläche wir gerade sehen, könnte diese schwarze-Gürtel-Eigenschaft rekonstruieren. Sie kann zwar nicht unterscheiden, ob es sich wirklich um einen senkrechten Gürtel oder eventuell nur um so etwas einen schwarzen Fleck handelt. Aber sie kann so etwas wie die aufsummierte Helligkeit der Planetenoberfläche zwischen je zwei Längengeraden rekonstruieren ("longitudinale Karte"). Das entspricht den eingangs erwähnten eindimensionalen Karten, die Exoplanetenforscher tatsächlich produziert haben (Cowan und Agol 2008, Knutson et al. 2007).

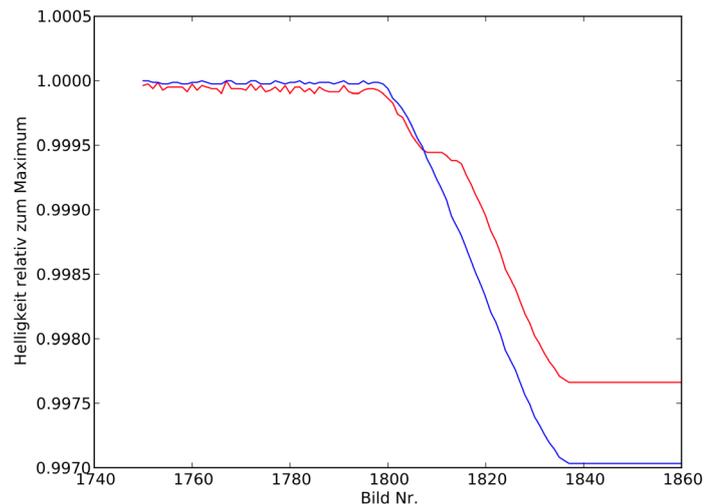
Betrachten wir jetzt noch eine weitere Möglichkeit der Kartierung. Ich konzentriere mich auf den Beginn der Okkultation (sekundärer Transit), also jene Phase, in welcher der Planet hinter seinem Stern verschwindet und verwende von den 4000 Einzelbilder nur diejenigen, die direkt den Beginn der Okkultation zeigen, nämlich die Bilder 1750 bis 1860.

Rechts ist der Planet gegen Anfang der Sequenz zu sehen. Der senkrechte schwarze Gürtel ist dabei gut auszumachen. Zum Vergleich habe ich anschließend wiederum die gleiche Situation ohne den schwarzen Gürtel durchgerechnet (im Skript transit-F.pov die Gürtel-Zeilen wiederum auskommentiert).



Die beiden Lichtkurven, wiederum jeweils auf den Maximalwert des hier durchgerechneten Abschnitts der Umlaufbahn normiert, sind in der Abbildung auf der nächsten Seite zu sehen.

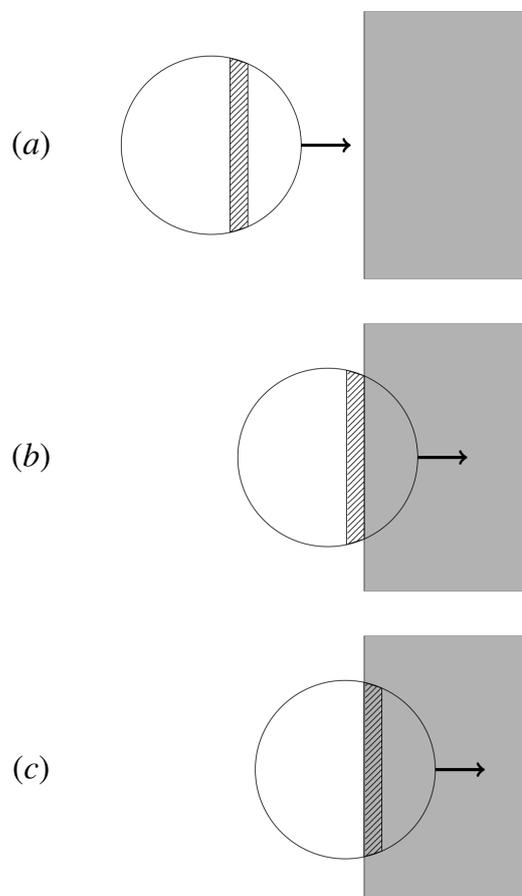
Die rote Lichtkurve zeigt dabei wieder den Helligkeitsverlauf für den Planeten mit schwarzem Gürtel, die blaue für den Planeten ohne Gürtel. Anfangs verlaufen die beiden Lichtkurven so gut wie gleich. Der im Bild bräunliche Teil des Planeten schiebt sich hinter den Stern; die Gesamthelligkeit nimmt dadurch ab. Dann aber beginnt sich im ersten Falle der schwarze Gürtel des Planeten hinter den Stern zu schieben. Dadurch nimmt nun aber die Gesamthelligkeit nicht weiter ab, denn der schwarze Gürtel sendet ja selbst dann, wenn er nicht von dem Stern verdeckt ist, keinerlei Licht aus. Das ist in der roten Lichtkurve an dem kleinen Plateau zu sehen. Im Fall ohne Gürtel schiebt sich der leuchtende Planet auch in dieser Zeit weiter hinter den Stern; die Gesamthelligkeit nimmt daher weiter ab: Die blaue Lichtkurve läuft ununterbrochen weiter nach unten. Ist im ersten Falle der schwarze Gürtel erst komplett hinter der Sternscheibe verschwunden, ist derjenige leuchtende Teil des Planeten an der Reihe, der im Bild oben links vom schwarzen Gürtel liegt. Schiebt er sich hinter den Stern, nimmt die Helligkeit weiter ab. Das Plateau der roten Kurve ist damit beendet, und auch die rote Kurve sinkt weiter ab. Insgesamt liegt das Minimum der roten Kurve über dem der blauen Kurve – der Planet hat im ersten Falle aufgrund seines schwarzen Gürtels insgesamt weniger Helligkeit zur Gesamthelligkeit beigetragen als ohne schwarzen Gürtel; verschwindet er hinter seinem Stern, ist die Gesamthelligkeit also auch nur um einen geringeren Beitrag vermindert.



Auf diese Weise kann man eine Art „eindimensionaler Karte“ des Planeten erstellen, einen „Scan in einer Richtung“. Die Situation ist in der Abbildung rechts schematisch dargestellt. Der Planet ist jeweils der Kreis, und einen senkrechten Streifen darauf habe ich durch Schraffur markiert. Das graue Rechteck rechts soll den Beginn der Sternscheibe markieren. Den Sternrand habe ich dabei als gerade Linie gezeichnet – das ist eine gute Näherung, wenn das Planetenscheibchen relativ zur Sternscheibe klein ist.

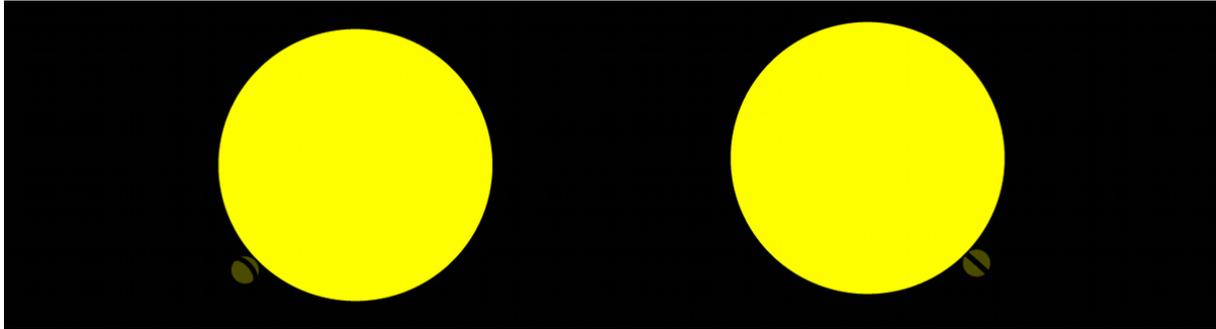
In Bild (a) bewegt sich das Planetenscheibchen noch auf den Sternrand zu. In Bild (b) hat sich das Planetenscheibchen soweit hinter das Sternscheibchen geschoben, dass der schraffierte Streifen gerade noch ganz zu sehen ist, in Bild (c) soweit, dass der Streifen gerade *nicht* mehr zu sehen ist.

Zieht man die im Moment (c) gemessene Gesamthelligkeit von der im Moment (b) gemessenen ab, dann erhält man den Beitrag des schraffierten Streifens zur Gesamthelligkeit. Analog erhält man den Beitrag jedes anderen senkrechten Streifens. Das ist die erwähnte „eindimensionale Karte“: Für jeden senkrechten Streifen auf dem Planetenscheibchen können wir dessen aufsummierte Helligkeit bestimmen. Darüber, wie die Helligkeit innerhalb des Streifens verteilt ist (ein heller Fleck oben? Eine dunklere Region unten?) können wir dagegen in dieser Situation nichts aussagen.



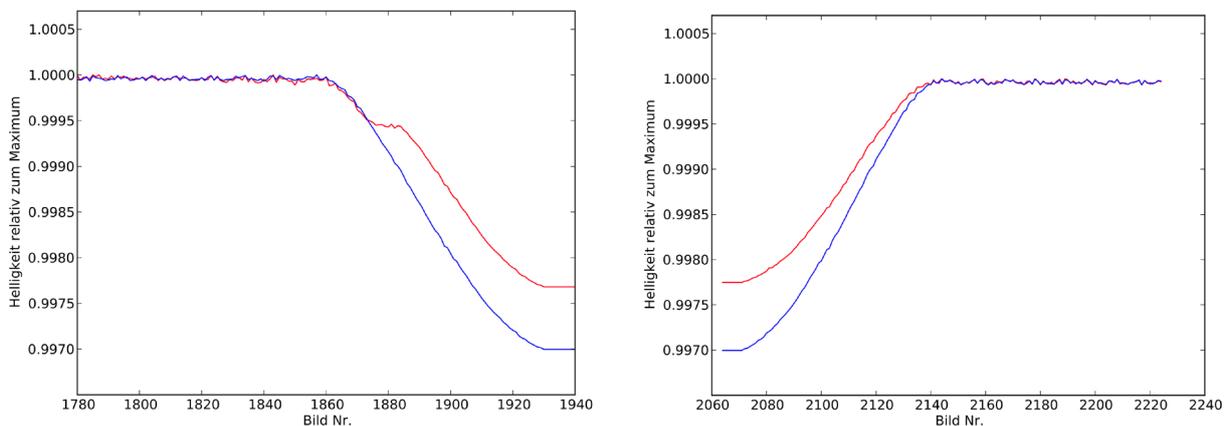
Dass der Rand des Sternscheibchens (näherungsweise) senkrecht zur Bewegungsrichtung des Planetenscheibchens verläuft, ist ein Spezialfall. Es tritt nämlich nur bei einer Inklination von 90 Grad auf, also wenn wir direkt von der Seite auf das System schauen.

Als letztes schauen wir uns deswegen ein um 20 Grad gegen die Sichtlinie geneigtes System an (Inklination 70°). Wir wählen für den Zylinder, mit dem wir unseren schwarzen Gürtel gebaut haben, eine Rotation von 45° . Die folgenden Bilder (Einzelbilder 1859 und 2144) zeigen den Planeten kurz vor (links) und kurz nach (rechts) der Okkultation:



Offenbar ist derjenige Teil des Sternscheibchenrands, den das Planetenscheibchen hinterquert, beim Eintritt anders orientiert als beim Austritt – beim Eintritt um rund 45 Grad nach links geneigt, beim Austritt um rund 45 Grad nach rechts, und damit beim Eintritt grob parallel zum schwarzen Gürtel unseres Beispielplaneten, beim Austritt senkrecht dazu.

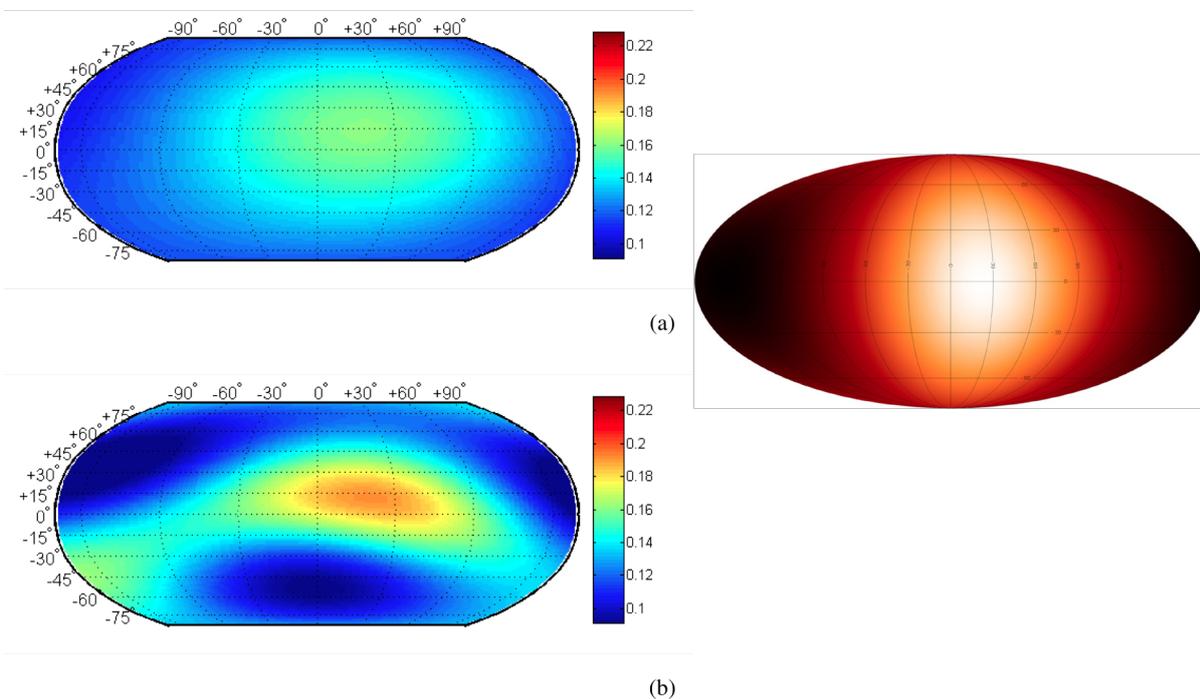
Dieser Unterschied zeigt sich auch bei den Lichtkurven (rot mit schwarzem Gürtel, blau ohne, wieder jeweils auf das Maximum normiert):



Beim Eintritt (linke Kurve) ist wiederum das kleine Plateau in der roten Lichtkurve zu sehen – Zeichen eines schwarzen Streifens parallel zur Begrenzung des Sternscheibchens dort, wo der Planet hinter den Stern tritt. Beim Austritt dagegen (rechte Kurve) ist der Verlauf glatt. Hier ist der schwarze Gürtel ja auch senkrecht zur Begrenzung des Sternscheibchens; es gibt daher keine Phase, in der die Helligkeitszunahme aufgrund des schwarzen Gürtels aussetzen würde. Aus beiden Informationen zusammen lässt sich rekonstruieren, dass es sich tatsächlich um einen Streifen handelt und nicht um einen Fleck – ein Fleck nämlich hätte auch beim Austritt eine zwischenzeitliche Abflachung der Kurve bewirkt (ausprobieren!).

In dieser Situation wird das Planetenscheibchen nicht nur in eine, sondern in zwei nichtparallele Richtungen „gescannt“. Aus den gesammelten Informationen von Eintritts- und Austrittslichtkurve lässt sich dann nicht mehr nur eine eindimensionale Karte erstellen, sondern eine zweidimensionale.

In der aktuellen Forschung spukt die Idee, auf diese Weise eine Oberflächenkarte eines Exoplaneten zu erstellen, schon einige Jahre herum (Rauscher 2007). Die ersten Karten – beide aufgrund von Daten des NASA-Infrarot-Weltraumteleskops Spitzer, beide vom Planeten HD 189733b – wurden allerdings erst vor zwei Jahren veröffentlicht. Dabei waren zwei Forschergruppen unabhängig voneinander und mit etwas unterschiedlichen Auswertungsalgorithmen zum Ziel gelangt. Die Karten sind recht grob, und der Vergleich der Rekonstruktionen zeigt die Gemeinsamkeiten – den helleren Fleck – ebenso wie die Unterschiede im Detail: Links zwei leicht unterschiedliche Rekonstruktionen von de Wit et al. 2012, rechts eine (von zwei) Rekonstruktionen von Majeau et al. 2012a und 2012b (in leicht unterschiedlichen Projektionen als „Weltkarten“ dargestellt):



Als erdnächster heißer Jupiter ist HD 189733b für solche Untersuchungen besonders gut geeignet. Man darf jedenfalls gespannt sein, wie es mit diesem Forschungsgebiet weitergeht. Spätestens mit dem Start des James-Webb-Weltraumteleskops (JWST), der derzeit für das Jahr 2018 angesetzt ist, werden sich für diese Art von Exoplanetenkartierung ganz neue Möglichkeiten ergeben.

Ausblick

Mit den hier vorgestellten Beispielprogrammen habe ich qualitativ insbesondere solche Merkmale von Exoplaneten-Transit-Lichtkurven vorgestellt, die sich in materiellen Modellen nicht oder nur schwierig nachstellen lassen: Einfach einstellbare Inklinationen, die Auswirkungen der Randverdunkelung auf die Kurvenform, eine einfache Variante der Transit“spektroskopie“ (oder zumindest Atmosphärendurchleuchtung) und, last but not least, Ansätze zur Kartierung von Exoplanetenoberflächen.

Zahlreiche Vertiefungen sind denkbar. Die erste besteht im Übergang zur qualitativen Beschreibung; darin, aus den Lichtkurven möglichst viele Parameter für den betrachteten Exoplaneten abzuleiten (die fehlenden Informationen, die in Wirklichkeit aus Radialgeschwindigkeitsmessungen abgeleitet werden, muss man in diesem Falle vorgeben).

Die weiteren Vertiefungen und Variationen nutzen aus, dass POV-Ray außer den hier beschriebenen noch viele andere Simulationen zulässt. Auch wenn zu erwarten ist, dass die Umlaufbahnen für Planeten, die ihren Mutterstern in relativ geringer Entfernung umkreisen (und deren Transits wir daher mit größerer Wahrscheinlichkeit sehen), so gut wie kreisförmig sind (das ergibt sich aus Gezeiten-Wechselwirkungen zwischen Stern und Planet), lassen sich natürlich auch die Lichtkurven für exzentrische Umlaufbahnen simulieren (numerische Lösung der Kepler-Gleichung nötig). Im Kapitel zur Okkultation hatte ich bereits angedeutet, wie das die Lichtkurve verändert.

Wer das spannende Thema Störeinflüsse anschneiden möchte, kann einen der für Transitmessungen wichtigsten ebenfalls direkt in die hier gezeigten Simulationen einbauen: Sternflecken auf einem rotierenden Stern.

Doppelstern-Transitkurven haben die Astronomen schon deutlich länger messen können als Planeten-Transitkurven. Auch ihre Form lässt sich in der hier gezeigten Weise mit POV-Ray simulieren – dann müssen freilich beide Sterne um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Wer mag, kann auch hier realistische Parameter für Sterngröße und relative Helligkeit herausuchen und schauen, wie treu sich die tatsächlich beobachteten Lichtkurven mit POV-Ray nachbilden lassen.

Im Kapitel Okkultation leuchteten beide Kugeln – Stern und Planet – für sich, simuliert durch ihre Reaktion auf (fiktives) diffuses Umgebungslicht, und ein brauchbares Modell für die Beobachtung von jungen (heißen) Planeten im Infraroten. In POV-Ray lässt sich der Stern auch als richtige Lichtquelle modellieren, deren Licht die Planetenoberfläche beleuchtet. Mit dieser Modifikation lässt sich der Einfluss der Planetenphase (welcher Bruchteil des Planeten liegt vom Beobachter aus gesehen im Schatten?) auf die Lichtkurve simulieren, bevor es dann wiederum zu einer Okkultation – diesmal nicht des Eigenleuchtens, sondern des reflektierten Leuchtens des Planeten – kommt.

Bei den Kartierungsmöglichkeiten lässt sich direkt nachschauen, welche Spuren verschiedene Arten von Oberflächenmerkmalen – ein Fleck? Ein Karomuster? Streifen unterschiedlicher Orientierung? – in den Eintritts- und Austrittslichtkurven hinterlassen.

Insgesamt eine Vielfalt an möglichen Erweiterungen und Vertiefungen - zum Teil parallel zur Exoplanetenforschung, die bei einer Reihe der hier vorgestellten Messungen in den nächsten Jahren noch interessante Fortschritte machen dürfte.

Danksagung

Ich danke Jeroen Bouwman vom Max-Planck-Institut für Astronomie für hilfreiche Anmerkungen zu Teilen dieses Textes.

Quellen

Anmerkung: Unter dem Stichwort „ADS-Eintrag“ sind jeweils die Einträge der Artikel im Astrophysics Data System verlinkt; von dort gelangt man direkt auf verfügbare Online-Versionen der entsprechenden Artikel. In der PDF-Version dieses Textes sind die Links direkt anklickbar.

Agol, E., J. Steffen, R. Sari und W. Clarkson 2005: "On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits" in *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* Bd. 359, S. 567-579. [[ADS-Eintrag](#)]

Backhaus, U. et al. 2012: "The quest for companions to post-common envelope binaries. I. Searching a sample of stars from the CSS and SDSS" in *Astronomy & Astrophysics* Bd. 538, Artikel A84. [[ADS-Eintrag](#)]

Bakos, G. Á. et. al. 2013: "HATSouth: A Global Network of Fully Automated Identical Wide-Field Telescopes" in *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* Bd. 125, S.154-182. [[ADS-Eintrag](#)]

Beuermann, K. et al. 2012: "The quest for companions to post-common envelope binaries. II. NSVS14256825 and HS0705+6700" in *Astronomy & Astrophysics* Bd. 540, Artikel A8. [[ADS-Eintrag](#)]

Borucki, William J. & Audrey L. Summers 1984: „The photometric method of detecting other planetary systems“ in *Icarus* Bd. 58, S. 121-134. [[ADS-Eintrag](#)]

Borucki, William; David Koch, Gibor Basri, Natalie Batalha et al. 2008: „Finding Earth-size planets in the habitable zone: the Kepler Mission“ in *Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics*, Proceedings of the IAU Symposium, Bd. 249, S. 17-24. [[ADS-Eintrag](#)]

Brinkmann, Steffen 2012: "Weißt du, wieviel Planeten stehen?" in *Sterne und Weltraum* 9/2012, S. 27-29

Brown, Timothy 2003: „Distant planet is the hottest yet“ in *Nature* Bd. 421, S. 488-489. [[ADS-Eintrag](#)]

Charbonneau, David, Timothy M. Brown, David W. Latham und Michel Mayor 2000: „Detection of planetary transits across a sun-like star“ in *Astrophysical Journal* Bd. 529, S. L45-L48. [[ADS-Eintrag](#)]

Chooan, W., W. Ketpichainarong, P. Laosinchai und B. Panijpan 2011: „A demonstration setup to simulate detection of planets outside the solar system“ in *Physics Education* Bd. 46(5), S. 554-558. [[ADS-Eintrag](#)]

Cowan, Nicolas B. und Eric Agol 2008: "Inverting phase functions to map exoplanets" in *Astrophysical Journal* Bd. 678, S. L129-L132. [[ADS-Eintrag](#)]

Debus, Oliver 2013: „Die Suche nach der zweiten Erde“. *Wissenschaft in die Schulen* MS 03/2013. [<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/zentrales-wis-dokument-ms-03-2013/1185797>]

De Wit, J. et al. 2012: „Towards consistent mapping of distant worlds: secondary-eclipse scanning of the exoplanet HD 189733b“ in *Astronomy & Astrophysics* Bd. 548, Artikel-Nr. A128. [[ADS-Eintrag](#)]

- Fischer, Olaf 2006a: „Einblicke ins Familienalbum der Exoplaneten“. *Wissenschaft in die Schulen* 2/2006. [<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/einblicke-ins-familienalbum-der-exoplaneten/1051518>]
- Fischer, Olaf 2006b: „Wie man Exoplaneten entdecken kann: Modellexperimente, Modellvorstellungen und Rechnungen“. *Wissenschaft in die Schulen* 1/2006. [<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/wie-man-exoplaneten-entdecken-kann/1051519>]
- Fischer, Olaf 2006c: „Der Dopplereffekt und die Entdeckung von Exoplaneten“ auf *Lehrer Online*, 23.1.2006. [<http://www.lehrer-online.de/dopplereffekt-exoplaneten.php>]
- Fischer, Olaf 2007: „Veränderliche Sterne – Lichtkurven selbst gemacht“ auf *Lehrer Online*, 11.5.2007. [<http://www.lehrer-online.de/lichtkurven.php>]
- Fortney, Jonathan J. et al. 2011: „Discovery and Atmospheric Characterization of Giant Planet Kepler-12b: An Inflated Radius Outlier“ in *Astrophysical Journal Supplement* Bd. 197, Artikel-Nr. 9. [[ADS-Eintrag](#)]
- Geffert, Michael 2010: „Mit ‚CoRoT‘ und ‚Kepler‘ auf der Suche nach einer zweiten Erde“. *Wissenschaft in die Schulen* MS/OS 8/2010. [<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/mit-corot-und-kepler-auf-der-suche-nach-einer-zweiten-erde/1051348>]
- George, S.J. 2011: “Extrasolar planets in the classroom” in *Physics Education* Bd. 46(4), S. 403-406. [[ADS-Eintrag](#)]
- Gould, Alan, Edna DeVore und Pamela Harman 2010: “Kepler Mission: A First Step Toward Finding Other Earths” in *The Universe in the Classroom* Nr. 76 – Frühling 2010. [<http://www.astrosociety.org/edu/publications/tnl/76/76.html>]
- Gould, Roy R., Susan Sunbury und Ruth Krumhansl 2012: „Using online telescopes to explore exoplanets from the physics classroom“ in *American Journal of Physics* Bd. 80(5), S. 445-451. [[ADS-Eintrag](#)]
- Guenther, Eike W. und Daniel Sebastian 2011: "CoRoT und die Entdeckung der ersten Gesteinsplaneten außerhalb unseres Sonnensystems" in *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* Bd. 48(6), S. 11-15.
- Hatzes, Artie P. und Eike W. Guenther 2011: "Die Entdeckung und Erforschung extrasolarer Planeten mit der Radialgeschwindigkeitsmethode" in *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* Bd. 48(6), S. 16-19
- Henry, Gregory W.; Marcy, Geoffrey W.; Butler, R. Paul; Vogt, Steven S. 2000: „A Transiting ‘51 Peg-like’ Planet“ in *Astrophysical Journal* Bd. 529, S. L41-L44. [[ADS-Eintrag](#)]
- Herbstmeier, Uwe 2011: „Erleuchtender Schatten aus dem Sternsystem CV Serpentis“. *Wissenschaft in die Schulen* 9/2011. [<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/erleuchtender-schatten-aus-dem-sternsystem-cv-serpentis/1116255>]
- Hofschulz, Olaf 2014: „Wie findet man erdähnliche Exoplaneten? Ein Unterrichtsprojekt für die Sekundarstufe I“. *Wissenschaft in die Schulen* 2/2014. [<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/wie-findet-man-erdahnliche-exoplaneten/1156166>]
- Holman, Matthew J. und Murray, Norman W. 2005: "The use of transit timing to detect terrestrial-mass extrasolar planets" in *Science* Bd. 307, S. 1288-1291. [[ADS-Eintrag](#)]

Huang, Su-Shu 1963: „The problem of life in the universe and mode of star formation“ in A. G. W. Cameron (Hg.): *Interstellar Communication*. Benjamin: New York

Kaltenegger, Lisa 2013: „Exoplaneten – Eine Spurensuche“ in *Sterne und Weltraum* 9/2013, S. 46-55.
<http://www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1202666>

Konacki, Maciej; Guillermo Torres, Saurabh Jha und Dimitar D. Sasselov 2003: „An extrasolar planet that transits the disk of its parent star“ in *Nature* 421, S. 507-509. [[ADS-Eintrag](#)]

Liefke, Carolin 2013. Persönliche Mitteilung.

LoPresto, Michael C. und Racel McKay 2004: „Detecting Our Own Solar System from Afar“ in *The Physics Teacher* 42, S. 208-211. [[ADS-Eintrag](#)]

LoPresto, Michael C. und Rachel McKay 2005: „An introductory physics exercise using real extrasolar planet data“ in *Physics Education* Bd. 40(1), S. 46-50.

Majeau, Carl, Eric Agol und Nicolas B. Cowan 2012a: „A Two-dimensional Infrared Map of the Extrasolar Planet HD 189733b“ in *Astrophysical Journal Letters* Bd. 747, Artikel-Nr. L20. [[ADS-Eintrag](#)]

Majeau, Carl, Eric Agol und Nicolas B. Cowan 2012b: „ERRATUM: A Two-dimensional Infrared Map of the Extrasolar Planet HD 189733b“ in *Astrophysical Journal Letters* Bd. 757, Artikel-Nr. L32. [[ADS-Eintrag](#)]

McCray, Richard 2006-2007: „Planetfinder: An Online Interactive Module for Learning How Astronomers Detect Extrasolar Planets“ in *Astronomy Education Review* Bd. 5(2), S. 217-225. [[ADS-Eintrag](#)]

Mordasini, C., Y. Alibert, H. Klahr und Th. Henning 2012a: „Characterization of exoplanets from their formation. I. Models of combined planet formation and evolution“ in *Astronomy & Astrophysics*, Bd. 547, id. A111. [[ADS-Eintrag](#)]

Mordasini, C., Y. Aliberti, C. Georgy, K.-M. Dittkrist, H. Klahr & Th. Henning 2012b: „Characterization of exoplanets from their formation. II. The planetary mass-radius relationship“ in *Astronomy & Astrophysics*, Bd. 547, id. A112. [[ADS-Eintrag](#)]

Neuhäuser, Ralph 2011a: "Exo-Planeten im Unterricht" in *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* Bd. 48(6), S. 6-10

Neuhäuser, Ralph 2011b: "Direkte Abbildung von jungen Planeten" in *Astronomie + Raumfahrt im Unterricht* Bd. 48(6), S. 33-36.

Prather, Edward E. und Timothy F. Slater 2001: „Bringing Extra-solar Planets into the Introductory Physics Classroom“ in *The Physics Teacher* Bd. 39, S. 120-122. [[ADS-Eintrag](#)]

Rauscher, Emily et al. 2007: „Toward Eclipse Mapping of Hot Jupiters“ in *Astrophysical Journal* Bd. 664, S. 1199-1209. [[ADS-Eintrag](#)]

Rößler, Florian 2012: "Die Entdeckung und Untersuchung von Exoplaneten: Modellierung eines Exoplanetentransits". Staatsexamensarbeit. Heidelberg: Ruprecht-Karls-Universität

Rosenblatt, Frank 1971: „A Two-Color Photometric Method for Detection of Extra-Solar Planetary Systems“ in *Icarus* Bd. 14, S. 71-93. [[ADS-Eintrag](#)]

Seager S. (Hg.) 2010: *Exoplanets*. University of Arizona Press, Tucson, und Lunar and Planetary Institute, Houston. ISBN 978-0-8165-2945-2

Seager, S. und G. Mallén-Ornelas 2003: “A unique solution of planet and star parameters from an extrasolar planet transit light curve” in *Astrophysical Journal* Bd. 585, S. 1038-1055. [[ADS-Eintrag](#)]

Sjøberg , Svein & Camilla Schreiner 2010: *The ROSE project. An overview and key findings*. Online auf <http://roseproject.no/network/countries/norway/eng/nor-Sjoberg-Schreiner-overview-2010.pdf> [letzter Zugriff am 27.1.2014]

Snellen, Ignas A.G., Remco J. de Kok, Ernst J.W. de Mooij und Simon Albrecht 2010: „The orbital motion, absolute mass and high-altitude winds of exoplanet HD209458b“ in *Nature* Bd. 465, S. 1049-1051. [[ADS-Eintrag](#)]

Strand, Kaj A. 1943: „61 Cygni as a Triple System“ in *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* Bd. 55, S. 29-32. [[ADS-Eintrag](#)]

Struve, Otto 1952: „Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work“ in *The Observatory* Bd 72, S. 199-200. [[ADS-Eintrag](#)]

Tinetti, Giovanna, Thérèse Encrenaz und Athena Coustenis 2013: „Spectroscopy of planetary atmospheres in our Galaxy“ in *Astronomy and Astrophysics Review*, Artikel-Nr. 63. [[ADS-Eintrag](#)]

Vieser, Wolfgang 2013: „Der mehrfache Sonnenuntergang“. *Wissenschaft in die Schulen* MS/OS 01/2013. <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/der-mehrfache-sonnenuntergang/1156153>

Wallasch, Joachim Michael 2008: „Neues aus der Forschung – Exoplaneten“. *Wissenschaft in die Schulen* MS 11/2008. [<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/zentrales-wis-dokument-ms-11-2008/1049491>]