



Ferne Welten - Transitbeobachtungen von Exoplaneten



Maturaarbeit von Anna Friedli

Bern, 17. November 2017

Gymnasium Kirchenfeld

Abteilung MN

Klasse M2018b

Betreuende Lehrkraft: Dr. Markus Wey

Inhaltsverzeichnis

Abstract

1	Einleitung.....	5
2	Die Beobachtung von Exoplaneten	6
3	Beobachtungsinstrumente und Software	8
3.1	Montierung und Aufnahmeteleskop	8
3.2	CCD-Kamera.....	9
3.3	Filter.....	10
3.4	Flip-Flat.....	11
3.5	Steuerung der Beobachtungsinstrumente mit MaxIm DL.....	11
3.6	Bildauswertung und Lichtkurvenmodellierung mit AstrolmageJ	11
3.7	Die Exoplanet Transit Database	12
4	Beobachtung und Auswertung.....	13
4.1	Planung.....	13
4.2	Beobachtung	14
4.3	Bildkalibrierung	17
4.4	Differentielle Blendenphotometrie.....	19
5	Resultate.....	23
5.1	HAT-P-36 b.....	23
5.2	Qatar-1 b	24
5.3	HAT-P-23 b.....	25
5.4	Diskussion.....	26
6	Fazit	27
6.1	Zielerreichung.....	27
6.2	Schwierigkeiten, zu beachtende Sachen, Tipps.....	27
6.3	Danksagungen	28
6.4	Selbstständigkeitserklärung	28
7	Literatur- und Quellenverzeichnis	29
7.1	Abbildungsverzeichnis.....	29
8	Glossar	30
9	Anhang	31
9.1	Journal der beobachteten Exoplaneten	31
9.2	Modellresultate der ETD	40

Abstract

Am 132/925-mm-Refraktor des Sonnenturms Uecht in Niedermuhlern wurden von Frühjahr bis Herbst 2017 mit Hilfe einer QSI-683-CCD-Kamera im Johnson V Filter die Transits der drei Exoplaneten HAT-P-36 b, Qatar-1 b und HAT-P-23 b beobachtet. Die Messung der Flussintensitäten der Hoststerne und mehrerer Vergleichssterne mittels differenzieller Blendenphotometrie sowie die Modellierung der Lichtkurven erfolgten in AstrolmageJ 3.2.0. Die Resultate wurden in die TRESKA-Datenbank der Tschechischen Astronomischen Gesellschaft (<http://var2.astro.cz/ETD/>) sowie in die Datenbank der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft (<http://www.variables.ch/>) aufgenommen. Im Vergleich mit den sich bereits in der TRESKA-Datenbank befindenden Messungen sind die in dieser Arbeit erhaltenen Resultate erfreulicherweise von guter bis hoher Qualität. Die Beobachtungen sollen fortgesetzt werden.

1 Einleitung

Ist die Vorstellung nicht faszinierend, dass irgendwo, Millionen von Lichtjahren entfernt, in einer anderen Galaxie, jemand sitzt und sich vielleicht auch gerade überlegt, ob da draussen noch andere Lebensformen existieren? Immerhin ist diese Möglichkeit durchaus gegeben, ja, man sollte sogar fest damit rechnen.

Noch vor 25 Jahren war die Wahrscheinlichkeit, extraterrestrisches Leben zu entdecken, allerdings verschwindend klein, kannte man doch nur ein einziges Planetensystem im Universum: unser eigenes. Doch diese Wahrscheinlichkeit ist seither drastisch gestiegen. Denn Planeten, die nicht wie Merkur, Venus, Erde und ihre fünf Kameraden um die Sonne kreisen, sondern um irgendeinen der mehr als 100 Milliarden Sterne unserer Milchstrasse, entdeckt man seit 1995 immer häufiger. Diese sogenannten Exoplaneten lassen uns spüren, wie wenig wir eigentlich vom Universum wissen, wie ernüchternd klein und winzig wir auf unserer Erde doch sind.

Klein und winzig sind leider auch die Exoplaneten, ja sogar auch ihre Sonnen (Hoststerne), zumindest von uns aus gesehen. Da erstere keine eigene Leuchtkraft besitzen, ist es bis heute unmöglich, Exoplaneten mit irgendeinem Teleskop direkt zu sehen. Trotzdem gibt es Methoden, wie man einen Exoplaneten indirekt beobachten kann. Eine davon ist die Transitmethode. Mit ihrer Hilfe lassen sich Exoplaneten auch von gut ausgerüsteten Volkssternwarten und Privatobservatorien aus verfolgen.

Ich wollte daher unbedingt selber einen Transit eines Exoplaneten beobachten! Es stellte sich heraus, dass in den massgebenden Datenbanken bis heute noch keine einzige Beobachtung eines Schweizers oder einer Schweizerin zu finden ist. Dies wollte ich ändern. Glücklicherweise fand ich mit dem sich im Familienbesitz befindenden Sonnenturm Uecht eine nahegelegene Privatsternwarte, welche sowohl das Instrumentarium als auch das notwendige Know-how besitzt, um mir bei der Realisierung meiner Pläne behilflich zu sein. Natürlich konnte ich mich unmöglich darauf verlassen, dass ich das Glück haben würde, selbst einen Exoplaneten zu entdecken. Deshalb musste ich mich auf Exoplaneten beschränken, deren Koordinaten und Beobachtungszeiten bereits bekannt sind. Sie zu beobachten ist schon Herausforderung genug. Zu Beginn orientierte ich mich am Buch von Bruce L. Gary (2010), später an den Anleitungen von Dennis M. Conti (2016, 2017).

Ziel der vorliegenden Maturaarbeit war es, mindestens einen Durchgang eines Exoplaneten vor seinem Zentralstern zu beobachten, und anhand des gemessenen Helligkeitsverlaufs wichtige Parameter wie Umlaufzeit, Grösse des Planeten und Schiefe der Bahn gegenüber der Sehlinie zu bestimmen und die Ergebnisse in die internationale Exoplanet Transit Database (<http://var2.astro.cz/ETD/>) einzutragen. Meine Messresultate würden so zusammen mit denjenigen anderer Freiwilliger helfen, die vorhandenen Informationen über die jeweiligen Exoplanetensysteme zu verdichten und zu optimieren.

Und wer weiss, vielleicht entdecke ich irgendwann einmal selbst einen Exoplaneten...

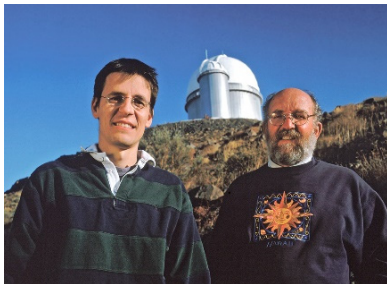
2 Die Beobachtung von Exoplaneten

Die Bezeichnung «Exoplanet»

Der Begriff Exoplanet setzt sich aus den Wörtern exo (altgriechisch: ausserhalb, aussen) und Planet (altgriechisch: herumirrend) zusammen. Er bezeichnet einen Planeten, der sich ausserhalb unseres Sonnensystems befindet und auf den unsere Sonne keinen gravitativen Einfluss ausübt. Dieser Planet gehorcht ebenso den Keplerschen Gesetzen wie die Planeten unseres Sonnensystems, bloss dass er sich um eine andere Sonne bewegt als unsere eigene.

Entdeckung der ersten Exoplaneten

Bereits 1990 hatte der polnische Astronom Aleksander Wolszcsan Hinweise auf das erste andere Sonnensystem in unserem Universum gefunden. Der von ihm entdeckte Pulsar PSR B1257+12 verkörpert darin die Sonne. Ein Pulsar ist ein schnell rotierender Neutronenstern, der der Erde wie ein Leuchtturm regelmässig wiederkehrende Lichtsignale zusendet. Diese Lichtsignale mass Wolszcsan und stellte aufgrund von Störungen in ihrer Abfolge die Existenz dreier Planeten fest. Da es sich bei einem Neutronenstern nicht direkt um ein mit unserer Sonne vergleichbares Objekt handelt, zählte diese Entdeckung nicht als Erstentdeckung eines Exoplaneten.



Die erste definitive Entdeckung eines Exoplaneten in einer Umlaufbahn um einen Stern wie die Sonne wurde hier in der Schweiz gemacht! Der Universitätsprofessor für Astronomie an der Universität Genf, Michael Gustave Mayor, und sein damaliger Mitarbeiter Didier Queloz wandten 1995 mit Erfolg die sog. Radialgeschwindigkeitsmethode zur Entdeckung eines Exoplaneten an.

Abb. 1: Die Professoren Michel Mayor und Didier Queloz vor dem Observatorium La Silla der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile.

Benennung von Exoplaneten

Ein Exoplanet wird immer nach dem Stern, um den er kreist, den sogenannten Hoststern, benannt. Dazu wird einfach dem Namen des Hoststerns ein Kleinbuchstabe angehängt, beginnend mit b. (als a zählt der Hoststern) Zum Beispiel gibt es den Stern HAT-P-36 und den Exoplaneten HAT-P-36 b. Die Reihenfolge der Kleinbuchstaben (b,c,d...) folgt der zeitlichen Abfolge der Entdeckung der jeweiligen Exoplaneten. Die Bezeichnung des Hoststerns folgt darin der Suchkampagne, mit der der entsprechende Exoplanet entdeckt worden ist. So bedeutet beispielsweise die Bezeichnung HAT-P-36, dass es sich um den 36. Planeten handelt, welcher durch das «Hungarian Automated Telescope Network» entdeckt wurde (<https://hatnet.org/>).

Methoden zum Nachweis von Exoplaneten

Eine direkte Beobachtung eines Exoplaneten ist bis heute unmöglich, da Exoplaneten eine zu geringe eigene Leuchtkraft aufweisen und meistens vom Hoststern, den sie umkreisen, überstrahlt werden. Die Mehrheit der Beobachtungen wird durch indirekte Nachweismethoden gemacht.

Bei der Radialgeschwindigkeitsmethode ist die Gravitationswirkung der Ausgangspunkt: Sowohl der Hoststern als auch der Exoplanet bewegen sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Sehen wir von der Erde aus nicht zufälligerweise genau senkrecht auf das Exoplanetensystem, so bewegen sich der Hoststern und die ihn umkreisenden Planeten periodisch auf uns zu und von uns weg. Mit Hilfe des Dopplereffekts lassen sich diese Bewegungen entlang der Sehlinie mit einem hochauflösenden Spektrographen direkt messen: Bewegt sich der Hoststern auf uns zu, so ist das vom Stern kommende Licht kurzwelliger, das heisst, einzelne Linien im Sternspektrum sind dann blau-verschoben. Bewegt sich der Stern von uns weg, dann sind die Spektrallinien rot-verschoben.

Die Transitmethode

Mit der Transitmethode werden heute die meisten neuen Exoplaneten entdeckt. Sie funktioniert allerdings nur bei denjenigen Exoplanetensystemen, die wir fast genau von der Kante her sehen. Die Transitmethode nutzt den Umstand aus, dass sich beim Durchgang des Exoplaneten vor der Sternscheibe (dem Transit) die Helligkeit des Hoststerns leicht reduziert, ähnlich wie das beim Durchgang der Venus oder des Merkurs vor der Sonne der Fall ist (Abb. 2). Je grösser der Exoplanet, desto grösser ist der Helligkeitsrückgang, welcher als Transittiefe (englisch: depth) bezeichnet wird.

Die Transitmethode besteht also praktisch darin, dass vor, während und nach dem Durchgang des Exoplaneten vom Hoststern und seiner Umgebung in möglichst rascher Folge Aufnahmen mit einer Digitalkamera gemacht werden. Auf jeder Aufnahme wird nach der Beobachtung vom Hoststern die Helligkeit gemessen. Dies geschieht, indem eine Kreisblende (englisch: aperture) über das Sternbildchen gelegt wird und die Helligkeit darin bestimmt wird. Aus einer konzentrisch zur Kreisblende angeordneten Ringblende wird danach die Helligkeit des objektfreien Himmelshintergrundes gemessen und von der ermittelten rohen Sternhelligkeit innerhalb der Kreisblende abgezogen. Aufgrund der diversen störenden Effekte der Erdatmosphäre (beispielsweise durch vorbeiziehende dünne Wolken oder durch Durchsichtigkeitsschwankungen infolge von Aerosolen) sind absolute Helligkeitsbestimmungen von Sternen allerdings sehr aufwändig. Daher misst man bei der Beobachtung von Exoplaneten nicht direkt die Helligkeit des Hoststerns, sondern die Helligkeitsdifferenz zwischen dem Hoststern und möglichst vielen sich auf der gleichen Digitalaufnahme befindenden Vergleichssterne (dieses Vorgehen bezeichnet man als differenzielle Blendenphotometrie). Die grafische Darstellung der zeitlichen Abfolge der Helligkeitsdifferenzen heisst Lichtkurve und zeigt den Helligkeitsverlauf des Transits (Abb. 2). Aus der Transittiefe kann die Grösse des Exoplaneten berechnet werden. Aus den genauen Zeiten aus Anfang, Mitte und Ende des Durchgangs lassen sich zudem Störungen in der Umlaufbahn des Exoplaneten entdecken, womit man auf weitere bisher unbeobachtete Mitglieder des Exoplanetensystems schliessen kann.

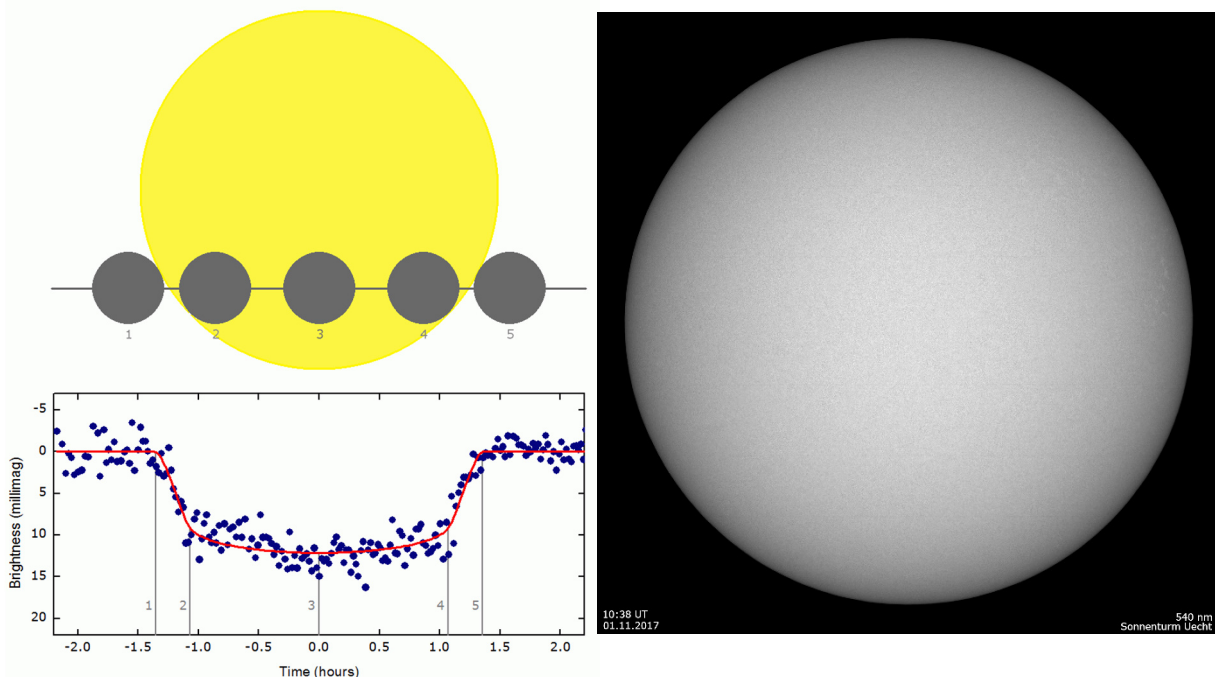


Abb. 2: Verschiedene Zeitpunkte beim Transit eines Exoplaneten vor seinem Hoststern. Die Phase von 1 nach 2 wird als Ingress, die Phase von 4 nach 5 als Egress bezeichnet. Da Hoststerne wie die Sonne (im Bild rechts dargestellt) in der Scheibenmitte deutlich heller sind als am Rand (Randabschattung), nimmt die Helligkeit des Hoststerns zwischen Phase 2 und 3 weiter ab.

3 Beobachtungsinstrumente und Software

Für die Beobachtungen konnte das Instrumentarium des Sonnenturms Uecht genutzt werden, welches via TeamViewer (<https://www.teamviewer.com>) vollständig ferngesteuert werden kann. Die Beobachtung während der Nacht erfolgte daher von mir zu Hause von meinem Laptop aus. Die gewonnenen Rohbilder wurden während der Beobachtungssession direkt auf dem NAS (der externen Festplatte) des Sonnenturms Uecht gespeichert und in den der Beobachtungssession folgenden Tagen mit AstroImageJ (<http://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/>) ausgewertet. Während den Beobachtungssessionen und der Auswertung stand mir mein Vater jederzeit zur Seite.



Abb 3: Der beleuchtete Sonnenturm Uecht vor dem Hintergrund der Milchstrasse. Bildautor: Patrick Enderli.

Der im Naturpark Gantrisch in Niedermuhlern gelegene Sonnenturm Uecht ist ein professionell betriebenes Privatobservatorium und beherbergt mehrere Teleskope zur langfristigen fotografischen Überwachung der Sonnenaktivität im weissen Licht, im Licht des einfach ionisierten Kalziums (Ca II K) sowie im Licht des elementaren Wasserstoffs (H-alpha). Während der Nacht stehen zusätzliche Instrumente für die Astrofotografie mittels Schmalbandfiltern sowie für photometrische Transitbeobachtungen von Exoplaneten zur Verfügung. Für die Beobachtung von Meteorströmen und Feuerkugeln stehen All-Sky Kameras und Radioteleskope im Einsatz. Zur Beobachtung der Umwelt dienen mehrere Webcams, eine professionelle Wetterstation, ein Wolkensensor sowie ein Messgerät zur Überwachung der Helligkeit des Nachthimmels (<http://www.solarpatrol.ch>).

3.1 Montierung und Aufnahmeteleskop

Das für diese Arbeit benutzte Instrument zur Beobachtung von Exoplaneten befindet sich in der Hauptkuppel auf der Dachterrasse des Sonnenturms Uecht und ist zusammen mit vier weiteren Instrumenten auf einer GM3000-HPS-Montierung der italienischen Firma 10Micron aufgebaut (Abb.4). Die Montierung stellt die präzise Ausrichtung des Instruments auf das Beobachtungsobjekt sicher und gleicht die tägliche Bewegung der Erde sowie die individuelle Bewegung der Beobachtungsobjekte aus.

Sie verfügt über hochpräzise Absolut-Encoder, welche eine korrekturlose Nachführung der Beobachtungsobjekte während mehreren Stunden ermöglichen (<http://www.10micron.eu>). Die Fernsteuerung des Instrumentariums geschieht mit Hilfe von drei PCs, welche sich in einem Beobachtungszimmer direkt unterhalb der Dachterrasse befinden.



Abb. 4: Das Aufnahmeteleskop für die Exoplanetenbeobachtung in der geöffneten Kuppel des Sonnenstuhl Uecht

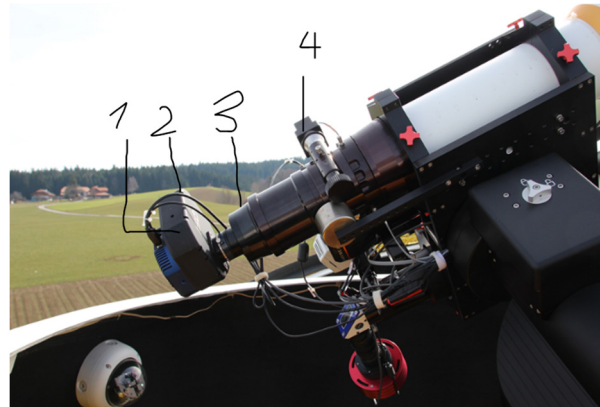


Abb. 5: Detailansicht des Aufnahmetelekos. 1: CCD Kamera. 2: Filterrad. 3: Hilfsoptik zur Ebnung des Bildfeldes. 4: Motorisierter Okularauszug für das Scharfstellen der Bilder

Das Aufnahmeteleskop ist ein Linsenfernrohr (Refraktor) der US-Firma William Optics mit 132 mm Öffnung und 925 mm Brennweite (<https://williamoptics.com>). Das 3-linsige Objektiv mit einem FPL-53 Element bietet eine ausgezeichnete Farbreinheit. Um in der Kamera ein ebenes Bildfeld zu erhalten, wurde ein 3-Zoll-Flattener von TMB eingebaut (Abb. 5). Der originale Okularauszug wurde durch einen motorisierten 3.5-Zoll-Feather-Touch-Auszug ersetzt (<http://starizona.com>). Dieser bietet nebst der Möglichkeit zur Fernsteuerung auch eine höhere Stabilität und eine feinere Fokussierbewegung.

3.2 CCD-Kamera

Als Kamera kommt eine monochrome QSI 683wgs-8 CCD-Kamera (Schwarzweisskamera) von Quantum Scientific Imaging zum Einsatz (<http://www.qsimaging.com>). Der elektronische Sensor-Chip von Kodak hat eine lichtempfindliche Fläche von 17.96 mal 13.52 mm mit 3326 mal 2504 quadratischen Bildelementen (Pixeln) mit einer Kantenlänge von je 5.4 Mikrometern. Das schwarzweisse Bild deckt somit in Kombination mit dem Aufnahmeteleskop eine Fläche von 67 mal 50 Bogensekunden am Himmel ab. Das ist rund viermal die Fläche des Vollmonds oder der Sonne. Die Auflösung beträgt 1.2 Bogensekunden pro Pixel. Sterne, welche theoretisch punktförmig sind, werden aufgrund der Lichtbeugung am Objektiv sowie aufgrund der Luftunruhe zu einem Scheibchen von rund 3 Pixeln Durchmesser verschmiert, wenn wir die Breite des Helligkeitsprofils auf halber Höhe der Intensität messen (sogenannte Full Width at Half Maximum, FWHM). Diese Auflösung ist für die erforderlichen hochpräzisen photometrischen Messungen ideal.

Das Bild entsteht, indem Lichtquanten (Photonen) im Silizium des Halbleiterchips Elektronen freisetzen, welche in den einzelnen Pixeln gesammelt und nach der Belichtung ausgelesen, verstärkt und digitalisiert werden können. Das resultierende digitale Signal hat eine Tiefe von 16 bit. Somit können pro Pixel 65'536 Helligkeitsstufen dargestellt werden. Die Helligkeitsstufen werden als Analog to Digital Units, kurz ADU, bezeichnet. Der Verstärkungsfaktor der Kamera beträgt rund 0.5 Elektronen/ADU. Pro Bildelement könnten theoretisch also rund 33'000 Elektronen gesammelt werden, doch wurde die Aufnahmekapazität (die sogenannte Full Well) der Pixel vom Hersteller auf

rund 25'500 Elektronen begrenzt, um ein Überlaufen der Elektronen in benachbarte Pixel zu verhindern. Der durch das Auslesen verursachte Fehler (das sogenannte Ausleserauschen) beträgt gemäss den Messungen des Sonnenturms Uecht rund 9 Elektronen pro Pixel. Da mit steigender Temperatur im Chip auch ohne Lichteinwirkung spontan Elektronen freigesetzt werden, muss er mithilfe eines thermoelektrischen Peltier-Elements (<https://de.wikipedia.org/wiki/Peltier-Element>) auf rund -20 Grad Celsius gekühlt werden. Die spontane Freisetzung von Elektronen wird so pro Pixel auf rund 0.05 Elektronen pro Sekunde heruntergedrückt. Der Sensor ist empfindlich von kurzwelligem violetten Licht bis ins langwellige Infrarot und besitzt ein Empfindlichkeitsmaximum bei rund 550 nm Wellenlänge, was im gelb-grünen Spektralbereich liegt. Die Lichtausbeute (Quanteneffizienz) beträgt dort etwa 57%. Die Kamera ist zudem mit einem mechanischen Verschluss sowie einem fernsteuerbaren Filterrad für bis zu 8 Farbfilter ausgerüstet.

3.3 Filter

Sterne senden über einen sehr weiten Wellenlängenbereich des Spektrums Licht aus: von der Röntgen- und Ultraviolettstrahlung über das sichtbare Licht bis zur Infrarot- und der Radiostrahlung. Jedes Instrument und jeder Detektor besitzen eine etwas andere Empfindlichkeit dieser Strahlung gegenüber. Damit die Helligkeitsangaben verschiedener Instrumente und Detektoren sinnvoll miteinander verglichen werden können, werden standardisierte Farbfilter eingesetzt, welche in nur einem mehr oder weniger engen Spektralbereich durchsichtig sind. Die in der Photometrie gebräuchlichsten Filtersysteme sind das Johnson UBVR_I und das Sloan Digital Sky Survey u'g'r'i'z' System, welche in Bessell (2005) näher beschrieben sind.

Bruce L. Gary empfiehlt den XOP-BB-Filter, der gegen kleine Wellenlängen wie ein Johnson-V-Filter begrenzt und gegen lange Wellenlängen offen ist, d.h. nur durch die schwindende Empfindlichkeit des CCD-Chips begrenzt ist (Gary, 2010). Dies ist dadurch begründet, dass Gary einen CCD-Chip einsetzt, der in der Nähe von 600 nm seine höchste Quanteneffizienz (QE) aufweist. Damit wäre eigentlich ein Johnson-R-Filter eine gute Wahl, da dieser Filter in Verbindung mit der QE der CCD-Kamera um 600 nm die höchste Durchsichtigkeit hat. Diesen Filter haben verschiedene Beobachter denn auch ausgiebig verwendet. Der XOP-BB-Filter lässt aber mehr Licht durch, da sein Lichtdurchlassbereich wesentlich breiter ist. Dadurch können schwächere Sterne gemessen werden. Der in der QSI-683-Kamera des Sonnenturms Uecht verwendete KAF-8300-Chip hat ein Maximum der QE bei 550 nm, was dem Strahlungsmaximum von sonnenähnlichen Sternen entspricht, dem Hauptarbeitsgebiet des Sonnenturms Uecht. Passende Filter sollten daher idealerweise eine effektive (mittlere) Wellenlänge um 550 nm aufweisen. Die für die Beobachtung von Exoplaneten am Instrumentarium des Sonnenturms Uecht geeigneten Filter sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Alle drei Filter sind im Filterrad der QSI-683wgs-8-Kamera eingebaut (<http://www.astrodon.com>). Der Stroemgren-y-Filter eignet sich aufgrund seines engen Durchlassbereichs speziell für die Helligkeitsmessung von sehr hellen Sternen. In dieser Arbeit wurde aber der Johnson-V-Filter verwendet.

Filter	Effektive Wellenlänge	FWHM
Luminance	550 nm	150 nm
Johnson V	548 nm	100 nm
Stroemgren y	547 nm	23 nm

Tabelle 1: Filter für die Exoplanetenbeobachtung



Abb. 6: Der geöffnete Flip-Flat mit der Leuchtfolie

3.4 Flip-Flat

Vor dem Objektiv befindet sich der "Flip-Flat" von Alnitak Astrosystems (<http://www.optecinc.com/>). Der Deckel kann vom Beobachtungsraum aus ferngesteuert geöffnet und geschlossen sowie die integrierte Leuchtfolie zur Aufnahme von sog. Flatfields ein- und ausgeschaltet werden (Abb. 6).

3.5 Steuerung der Beobachtungsinstrumente mit MaxIm DL

Die Steuerung der grundlegenden Arbeiten, wie beispielsweise das Ein- und Ausschalten des Kuppellichts, das Öffnen und Schliessen der Kuppel, das Hochfahren und Ausschalten der Montierung, das Parkieren der Instrumente sowie die Fernsteuerung des Flip-Flats erfolgt über vom Sonnenturm Uecht entwickelte JScript Skripts und ist von jedem der drei Rechner im Beobachtungsraum aus möglich. Die Fernbedienung des Exoplaneteninstruments erfolgt jedoch nur vom HALPHA-Rechner aus. Als Steuerungssoftware dient hierfür MaxIm DL von Cyanogen (<http://diffractionlimited.com>). Das Programm dient sowohl der Steuerung der Montierung, des Okularauszuges zum Scharfstellen der Bilder, des Filterrades und der Kamerakühlung, als auch der Bildakquisition und der Bildbearbeitung. Besonders nützlich ist die Möglichkeit, Bildsequenzen zu definieren. Dies erleichtert die automatische Akquisition von Kalibrierungsbildern sowie die kontinuierliche Beobachtung des Exoplaneten.

3.6 Bildauswertung und Lichtkurvenmodellierung mit AstrolmageJ

AstrolmageJ (AIJ) ist eine kostenlose Software, die den ganzen Arbeitsprozess von der Kalibrierung der Rohbilder über die Helligkeitsbestimmung bis zur Modellierung der Lichtkurve in einem Paket anbietet. Aus diesem Grund wurde sie in den letzten Jahren sowohl für professionelle als auch für Amateurastronomen zum de facto Standard (Conti, 2017).

Das Programm kann über die Internetseite <http://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/> heruntergeladen werden. Zudem finden sich dort Links zu einem User Guide sowie zu einem Artikel von Collins et al. (2017) im *Astronomical Journal*. Die neueste Version der Anleitung von Dennis M. Conti kann über die Internetseite <http://www.astrodennis.com/> heruntergeladen werden. Dort findet sich zudem auch das für die Auswertung notwendige Konfigurationsfile für die erweiterten Lichtkurvendiagramme von AstrolmageJ.

AstrolmageJ basiert auf ImageJ, das allgemein als Bildbearbeitungsprogramm für die «Life Sciences» bekannt geworden ist (<https://imagej.net>). AstrolmageJ besitzt zusätzlich noch einige spezifische Erweiterungen für die Astronomie, speziell für die Erstellung und Modellierung einer Lichtkurve bei der Beobachtung von Exoplaneten.

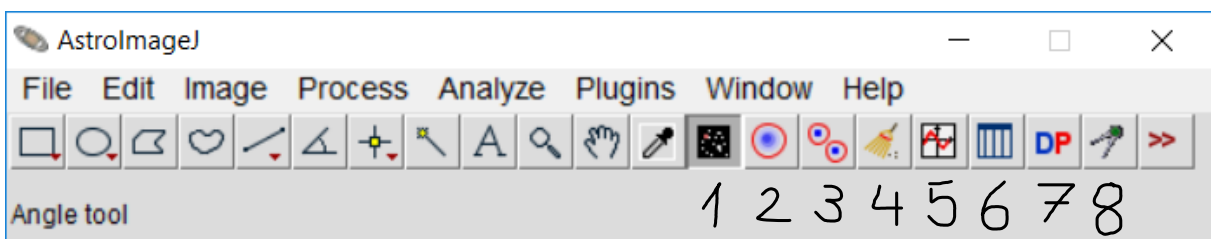


Abb. 7: Bild der Toolbar von AIJ, mit speziellen Tools für die Astronomie

Kurze Beschreibung der Astronomie Tools in der Toolbar von AIJ (Abb. 7):

- 1) Tool zur Kennzeichnung des Astronomie-Modus, muss grundsätzlich immer angewählt sein.
- 2) Tool zur Bestimmung der Helligkeit eines Sterns (single aperture photometry). Nachdem man das Icon angewählt hat, wird der gewünschte Stern mit der Maustaste angeklickt und der Pixelwert

innerhalb des Kreises wird berechnet, davon wird ausserdem der Pixelwert des Hintergrunds abgezogen.

- 3) Tool zur Bestimmung der Helligkeit eines Sterns im Vergleich mit einigen anderen Sternen (multi-aperture differential photometry). Nach Anwählen des Icons werden der Hauptstern (target star) und die Vergleichssterne (comparison stars) angeklickt. Der Pixelwert des Sterns wird nun durch die Summe der Pixelwerte der Vergleichssterne geteilt. Man kann auch die relative Helligkeit der Vergleichssterne zueinander bestimmen.
- 4) Mit dem Besen-Icon entfernt man alle gemachten Zeichen oder Kreise auf dem Bild.
- 5) Tool zur Erstellung der Lichtkurve.
- 6) Die Resultate der «single aperture photometry» und «multi-aperture differential photometry» werden unter «measurement table» gespeichert. Mithilfe dieses Tools lässt sich letztere öffnen.
- 7) Tool zum Öffnen des «Data Processors», der die Master Darks, Flats und Bias herstellt und zuständig ist für die automatische Auswertung der Bilderserien.
- 8) Dieses Icon öffnet den «coordinate converter», der die astronomischen Koordinaten und Zeiten in andere Formate umwandelt, die auf Stern- und Beobachtungskoordinaten basieren. Mithilfe dieses Tools lassen sich auch Koordinatenwebseiten wie Simbad oder sky-map.org aufrufen.

3.7 Die Exoplanet Transit Database

Die Exoplanet Transit Database wurde von Tschechien aus ins Leben gerufen. Dementsprechend sind die Erklärungen und Erläuterungen auf Tschechisch oder Englisch (<http://var2.astro.cz/ETD/>).

Der Sinn und Zweck dieser Seite ist es, die verschiedenen Beobachtungen von Exoplaneten zusammenzutragen und gemeinsam auszuwerten. Ist man registriert, kann man seine Resultate aufschalten.

Auf der Liste (Abb. 8) befinden sich alle Exoplaneten, die bereits entdeckt worden sind, sowie zahlreiche Kandidaten, von denen eine endgültige Bestätigung noch aussteht. Wählt man einen solchen Exoplaneten mit Doppelklick aus und gibt die Koordinaten seines Beobachtungsortes ein, so erhält man eine Prognose der nächsten Beobachtungsmöglichkeiten (Abb. 9).

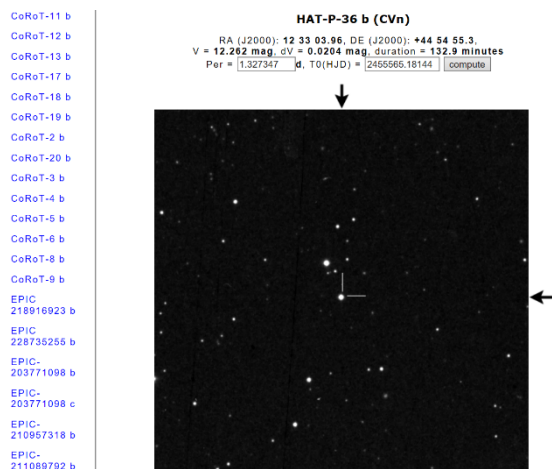


Abb. 8: Bildausschnitt der Position vom Exoplaneten HAT-P-36 b und Angaben zu Koordinaten, Helligkeit, Periode, Durchgangsdauer und Transittiefe.

Your ELONGITUDE (in deg): 0° - 360°

Your LATITUDE (in deg): 90° - 0° - 90°

Transits predictions for NEXT 365 days.
ELONGITUDE: 7.4539° and LATITUDE: 46.8547°

Transit occurs below 20° in the sky. | During the daylight. | Observable.

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2458069.885	12.11 8:08 (85°E)	12.11. 9:14 (84°W)	12.11 10:21 (72°W)
2458071.213	13.11 15:59 (20°NW)	13.11. 17:06 (12°NW)	13.11 18:12 (7°W)
2458072.540	14.11 23:51 (13°NE)	15.11. 0:57 (20°NE)	15.11 2:03 (28°NE)
2458073.867	16.11 7:42 (83°E)	16.11. 8:48 (85°W)	16.11 9:55 (74°W)
2458075.195	17.11 15:33 (21°NW)	17.11. 16:40 (13°NW)	17.11 17:46 (8°NW)
2458076.522	18.11 23:25 (12°NE)	19.11. 0:31 (19°NE)	19.11 1:38 (27°NE)
2458077.849	20.11 7:16 (82°E)	20.11. 8:23 (87°SW)	20.11 9:29 (76°W)
2458079.177	21.11 15:07 (22°NW)	21.11. 16:14 (14°NW)	21.11 17:20 (8°NW)
2458080.504	22.11 22:59 (11°NE)	23.11. 0:05 (17°NE)	23.11 1:12 (26°NE)

Abb. 9: Mögliche Beobachtungszeiten des Exoplaneten HAT-P-36 b. Effektiv beobachtbar ist nur der Transit vom 14.11., der schwarz eingefärbt ist. Bei den Angaben in Hellgrau ist der Exoplanet zu nah am Horizont, d.h. unterhalb von 20 Grad am Himmel. Bei den Zeiten in Gelb wäre der Exoplanet zwar theoretisch genug hoch am Himmel, jedoch ist es Tag und er kann nicht beobachtet werden.

4 Beobachtung und Auswertung

4.1 Planung

Wie zu Beginn von Kapitel 3 beschrieben, stand als Beobachtungsort der Sonnenturm Uecht in Niedermuhlern bereits von Anfang an fest. Das dort zur Verfügung stehende Nachtteleskop von William Optics war zwar schon häufig zur Astrofotografie eingesetzt worden – für die Beobachtung von Exoplaneten allerdings noch nie... Da die Beobachtungen von unserem Wohnort in Belp aus ferngesteuert werden sollten, musste jede Beobachtungsnacht sorgfältig geplant werden, da allfällige Fehler nicht rasch vor Ort korrigiert werden konnten. Bei größeren Fehlmanipulationen drohte gar eine ernsthafte Beschädigung des Instrumentariums.

Als Erstes musste entschieden werden, ob in der kommenden Nacht überhaupt beobachtet werden konnte. Hierzu wurde an Tagen mit wolkenlosem Himmel am frühen Nachmittag die lokale Wetterprognose für den Sonnenturm Uecht konsultiert, welche die Meteomedia AG regelmässig aktualisiert. Versprachen die Wetterprognosen durchgehend günstige Wetterbedingungen, so mussten als nächstes ein geeigneter Hoststern und ein geeigneter Exoplanet gefunden und entschieden werden, wann mit den Vorbereitungsarbeiten begonnen werden muss.

Alle diese offenen Fragen können mit Hilfe der Transitprognosen auf der Internetseite der Exoplanet Transit Database beantwortet werden (Abb. 10). Dort werden die Transitbeobachtungskandidaten angezeigt, sobald man unter «Transit Predictions» die Länge und Breite des Beobachtungsortes eingegeben und das Ganze mit «submit» bestätigt hat. Zu beachten ist, dass entgegen der üblichen Konvention eine östliche Länge der Sternwarte (was beim Sonnenturm Uecht der Fall ist) positiv einzugeben ist. Die Koordinaten des Sonnenturms Uecht lauten: ELong: 7.4539; NLat: 46.8547.

ETD - Exoplanet Transit Database
<http://var.astro.cz/ETD>

Observers community | How to contribute to ETD | Model-fit your data | Transit predictions | KEPLER Transit predictions | KEPLER Candidates

Your ELONGITUDE (in deg): 0° - 360°
 Your LATITUDE (in deg): 90° - 0° - -90°

Available predictions: (UT evening date)
 2017-11- 09, 10, **11**, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,
 2017-12- 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10,
 User defined time span: From: Till:

Transits predictions for ELONGITUDE: 7.4539° and LATITUDE: 46.8547°

OBJECT	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)	D (min)	V (MAG)	DEPTH (MAG)	Elements Coords
WASP-33 b	16:20 And 26°,NE	11.11. 17:42 38°,E	19:03 52°,E	163	8.3	0.0151	54163.22373+1.2198669°E RA: 02 26 51.08 DE: +37 33 02.5
Qatar-4 b	17:42 And 63°,E	11.11. 18:46 74°,E	19:50 84°,SE	128	13.6	0.0215	57323.65441+1.8053949°E RA: 00 19 26.22 DE: +44 01 39.4

Abb. 10: Ausschnitt aus der Liste der Vorschläge für beobachtbare Exoplaneten am 11.11.2017 für den Sonnenturm Uecht

Die Liste zeigt alle Exoplaneten, welche während dem Transit 20 Grad über Horizont sind.

Für die weitere Planung müssen der Zeitpunkt des Sonnenunter- und allenfalls -aufgangs, sowie die Zeiten der bürgerlichen und der astronomischen Dämmerung bestimmt werden. Dies geschieht am einfachsten mit Hilfe einer drehbaren Sternkarte. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Sternkarte alle Zeiten in mittlerer Ortszeit (MOZ) anzeigt. Die Korrektur von Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) auf MOZ ist für den Sonnenturm Uecht minus 30 Minuten.

Der Sonnenuntergang bestimmt, ab wann die Kuppel geöffnet werden kann. Die astronomische Dämmerung gibt den frühesten Zeitpunkt der ersten wissenschaftlich verwertbaren photometrischen Messung an. Sie endet, wenn die Sonne 18 Grad unter dem Horizont steht. Bis dahin müssen die Kalibrierbilder (Bias, Darks, Flats, im Kapitel 4.3 erklärt) aufgenommen und die Kamera fokussiert sein. Auch sollten Testaufnahmen der Zielregion aufgenommen, der Hoststern identifiziert und die Belichtungszeit optimiert worden sein. In den Sommermonaten muss allerdings schon früher begonnen werden, da ansonsten zu wenig Vorbereitungszeit zur Verfügung steht. Ein Fokussieren an einem hellen Stern ist meistens schon kurz nach Sonnenuntergang möglich.

Zum Schluss muss noch abgeklärt werden, ob ein sogenannter Meridianflip des Teleskops nötig ist (ein Drehen des Teleskops um 180 Grad). Dies ist dann der Fall, wenn das Teleskop, das dem Stern nach Eingabe der Koordinaten im Verlauf der Beobachtungen über den Nachthimmel selbstständig folgt, an der Montierungssäule anstehen würde und die Messung somit abgebrochen werden müsste. Das heisst, dass auf der Sternkarte nachgeprüft werden muss, ob und wann ein Meridianflip nötig ist.

Nun können aus der Targetliste der ETD geeignete Beobachtungskandidaten herausgesucht werden. Auswahlkriterien sind:

- Die Helligkeit des Sterns im visuellen V-Filter sollte nicht geringer als 13. Grösse sein¹.
- Der Hoststern sollte einer der Spektralklassen F, G oder K angehören, da der Hoststern sonst zu hell wäre oder man ihn im Infrarotbereich beobachten müsste².
- Die Transittiefe sollte wenn möglich grösser als 10 mmag sein.
- Es sollten möglichst keine Sterne in unmittelbarer Nähe zum Hoststern vorhanden sein (sonst zu ungenaue Helligkeitsresultate).
- Es sollte etliche etwa gleich helle Vergleichssterne im Bildfeld der Aufnahme haben.
- Bereits eine Stunde vor dem Ingress (Beginn des Transits) und noch eine Stunde nach dem Egress (Ende des Transits) sollte weiter beobachtet werden, um die unverfinsterte Normalhelligkeit des Hoststerns zuverlässig bestimmen zu können, ohne dass das Objekt zu nahe am Horizont steht oder Dämmerung herrscht.
- Es sollte möglichst kein Meridianflip durchgeführt werden müssen (höherer Aufwand).

4.2 Beobachtung

Nachdem ein geeigneter Kandidat ausgewählt worden ist, kann mit den Vorbereitungsarbeiten begonnen werden. Hierbei ist zu beachten, dass alle Instrumente bis auf die Kuppel mit MaxIm DL über den Rechner HALPHA gesteuert werden. Die Kuppel muss vorläufig noch vom Rechner HYPERION aus bedient werden.

¹ Die scheinbare Helligkeit der Sterne wird in Grössenklassen angegeben und trägt den Zusatz «mag», für Magnitude. Die Skala der Grössenklassen beginnt im Minusbereich und reicht bis in den Plusbereich. Je heller ein Stern ist, desto geringer ist seine Grösse. Die Wega (Alpha Lyrae) gilt als Referenzstern nullter Grösse. Die Sonne zum Beispiel hat einen Wert von -26 mag, die in dieser Arbeit beobachteten Objekte dagegen befinden sich in einem Bereich zwischen +7 bis +13 mag.

² Die Spektralklassen eines Sterns geben Auskunft über das Aussehen seines Lichtspektrums. Es existieren die Spektralklassen O, B, A, F, G, K, M, L und T. O-Sterne strahlen das meiste Licht im Ultraviolett, T-Sterne dagegen im Infrarot aus. Die Sonne gehört zur Spektralklasse G und sendet hauptsächlich gelbliches Licht aus.

Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Vorbereitung einer Beobachtung

1. Starten des Observatoriums: Auf HALPHA das Skript "Start night observing" ausführen.
2. Kühlen der Kamera: Auf HALPHA MaxIm DL starten, Kamera verbinden, Cooler anstellen.
3. Einrichten der Verzeichnisse auf dem NAS und der lokalen Sequenzen in MaxIm DL.
4. Fokussieren an hellem Stern mit V Filter.
5. Kalibrierungsserie mit Bias und 1 sec Flats mit V Filter.
6. Probeaufnahme des Targetfeldes; Optimieren des Bildfeldes.
7. Optimieren der Belichtungszeit, ev. Anpassen der Aufnahmesequenz.

Diese Vorbereitungsarbeiten müssen alle eine Stunde vor dem Beginn der eigentlichen Beobachtung abgeschlossen sein. Die beiden letzten Schritte sind etwas heikel. Nachdem das Teleskop auf die Himmelskoordinaten des Hoststerns gefahren ist muss dieser noch eindeutig identifiziert werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Aufsuchekärtchens, welches die ETD von jedem Exoplaneten bereitstellt.



Abb. 11: CCD-Bild vom Sonnenturm Uecht von der Messung des HAT-P-36 b (gelb umkreister Stern)

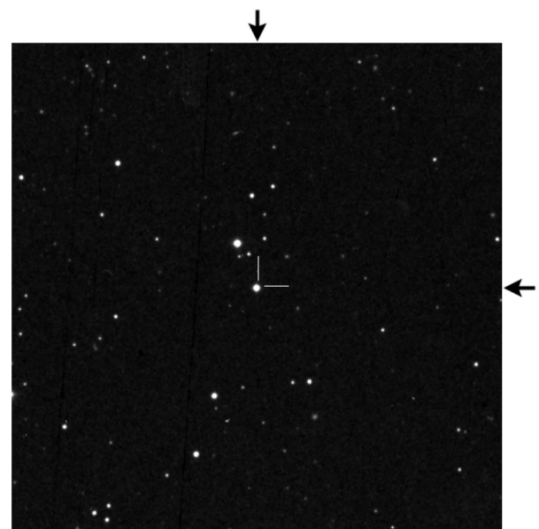


Abb. 12: Zur Verfügung stehender Bildausschnitt von der ETD, um den Stern HAT-P-36 zu finden

Der nächste heikle Schritt ist die Bestimmung der notwendigen Belichtungszeit: Der Stern darf nicht überbelichtet, muss jedoch trotzdem möglichst hell sein. Die Helligkeit wird in der Einheit ADU (Analog to Digital Unit) angegeben. Ein Stern darf nicht heller als 65 000 ADU sein, da sich dort die Sättigungsgrenze des CCD-Sensors befindet. Das ideale Signal lag unseren Versuchen zufolge bei ungefähr 40 000 ADU, also wurde vor jeder Beobachtung versucht, möglichst genau an diesen Wert zu kommen. Als visuelles Hilfsmittel zum Einstellen der idealen Belichtungszeit diente das Helligkeitsprofil, welches man in MaxIm DL abrufen kann.

Sobald die optimale Belichtungszeit feststeht, wird eine Testaufnahme des Hoststerns gemacht. Dadurch berechnet man die Dauer des Fotografierens und anschließenden Speichern des Bildes. Mithilfe dieser Zeit kann man nun errechnen, wie viele Bilder es während der gesamten Beobachtungszeit geben wird.

$$\text{Anzahl Bilder} = \frac{\text{Beobachtungszeit insgesamt (inkl. Zusatzstunde vor- und nachher)}}{\text{Speicherzeit + Belichtungszeit für ein Bild}}$$

Nun, da alle benötigten Parameter bekannt sind, kann die Aufnahmesequenz in MaxIm DL aktualisiert und eine Stunde bevor der Exoplanet von der Erde aus gesehen den Stern passiert, gestartet werden.

Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Beobachtung:

1. Starten der Aufnahmesequenz.
2. Ev. Durchführen des Meridianflips.
3. Auf HALPHA das Script "Shutdown mount" ausführen.
4. Auf HYPERION Skript "Close Astrohaven dome" ausführen.
5. Darkserie mit Belichtungszeit der Science Frames.
6. Aufwärmen der Kamera.
7. Disconnect Kamera und Runterfahren des Observatoriums

Die ganzen Beobachtungen und auch schon die dafür nötigen Berechnungen konnten, wie schon erwähnt, vom mit den PCs des Sonnenturms verknüpften Computer von zu Hause aus gemacht werden.

Aus diesem Grund musste alle paar Minuten kontrolliert werden, ob die Verbindung zum jeweiligen PC noch bestand und die Beobachtungen noch liefen. Deren Dauer betrug meistens zwischen 3-5 Stunden, manchmal auch noch mehr.

Nach dem Herunterladen des letzten Bildes mussten noch die Darkaufnahmen gemacht und die ganze Beobachtungsserie gespeichert werden. Danach wurden alle Instrumente heruntergefahren und die Programme geschlossen.

4.3 Bildkalibrierung

Die Auswertung bestand aus zwei Schritten und nahm den Hauptteil der Zeit in Anspruch. Um sie etwas anschaulicher zu machen, erfolgt die Erklärung anhand eines Beispiels einer gemachten Messung des Exoplaneten HAT-P-36 b.

Zuerst müssen die CCD-Rohbilder kalibriert werden, damit sichergestellt ist, dass die systematischen Bildfehler so gut wie möglich korrigiert werden können. Die Kalibrierung besteht darin, entsprechende Hilfsbilder aufzunehmen und diese vom eigentlichen Signalbild abzuziehen.

Hierzu sind folgende drei Hilfsbildertypen notwendig.

Bias: Wenn der CCD-Chip ohne Belichtung ausgelesen wird, dann werden die für jedes Pixel gemessenen Nullpunktwerte als Bias bezeichnet. Diese enthalten das sogenannte «Hintergrundrauschen». Normalerweise ist der Bias für jedes einzelne Pixel anders, aber konstant. Bleibt er unberücksichtigt, dann werden die Helligkeitsmessungen von Objekten verfälscht, da diese gewöhnlich nicht immer in dasselbe Pixel fallen.

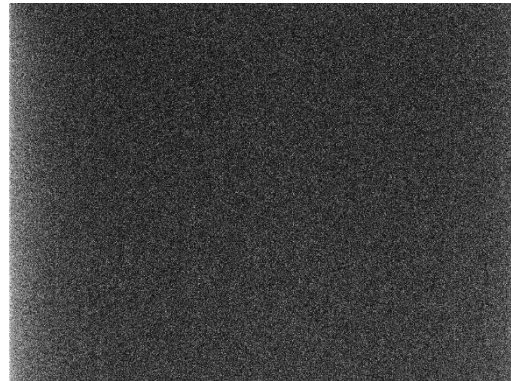


Abb. 13: Aufnahme eines Bias

Dark: Auch ohne Belichtung werden in den Pixeln je nach Temperatur von sich aus Elektronen freigesetzt: der sog. Dunkelstrom. Dieser verfälscht die Helligkeitsmessungen. Zum Teil produzieren nämlich einzelne «heisse Pixel» so viel Elektronen, dass sie sogar überlaufen können.

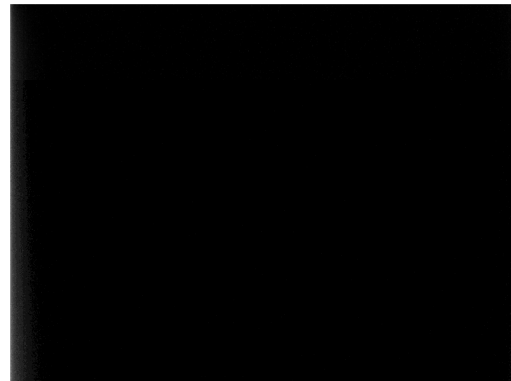


Abb. 14: Aufnahme eines Darks

Flat: Die gemessene Empfindlichkeit jedes einzelnen Pixels schwankt leicht. Dies kommt aufgrund der Optik (Linse, Spiegel, Field-Flattener) oder des Detektors (CCD-Chip) zu Stande. Dadurch würde die Helligkeit desselben Himmelsobjekts anders ausfallen, wenn es in verschiedene Regionen des CCD-Chips fallen würde. Die Vignettierung des Bildes rechts kommt durch die Bauweise des Teleskops zustande. Die dunklere graue Scheibe ist das Abbild eines Staubkorns.

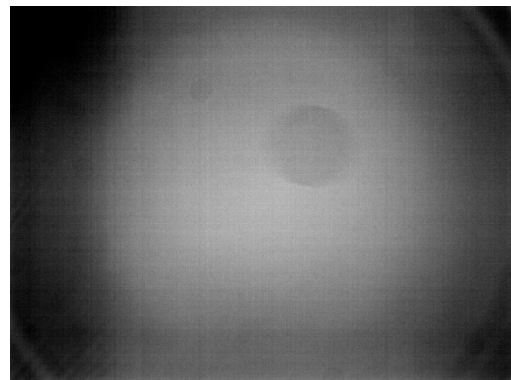


Abb. 15: Aufnahme eines Flat-Fields

Sind die einzelnen Kalibrierbilder bekannt, kann das kalibrierte Signal pro Pixel wie folgt berechnet werden:

$$\text{Gemessenes Signal} = \frac{(\text{Signal-Bias-Dark})}{\text{Flat}}$$

Die Bildkalibrierung als erster Teilschritt erfolgt mithilfe von AstrolmageJ. Nachdem man das Programm geöffnet hat, wählt man das Icon DP, welches zuständig für die Bildkalibrierung ist, an.

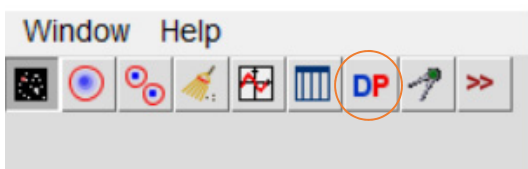


Abb. 16: Detailsicht des Menus von AIJ

Daraufhin öffnen sich zwei Fenster:

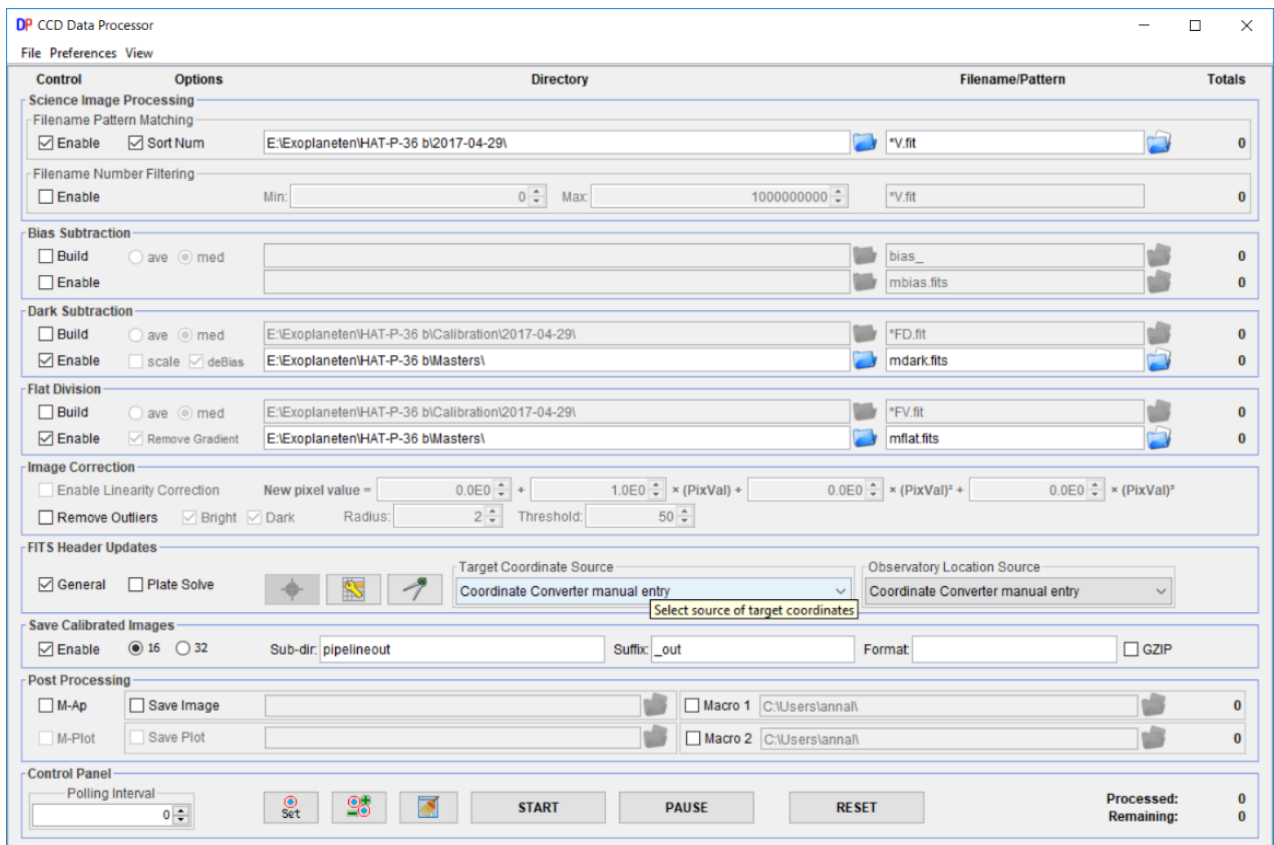


Abb. 17: Erstes sich öffnendes Fenster von AstrolmageJ. Hier setzt man die «Pfade», welche angeben, von wo die Bilder geholt werden sollen und organisiert die Produktion der Master Bias, Flats und Darks.

Alle «Build» und «Enable» Kästchen zu den Bias, Flats und Darks sind anzuwählen. Jeweils rechts daneben verweist man auf den Ordner, wo man seine gemachten Rohbilder abgespeichert hat. Unter «Save Calibrated Images» ist es wichtig, dass das Suffix «_out» lautet. Um dafür zu sorgen, dass die Rohbilder koordinatenmässig erkannt und einzelne Sterne beschriftet werden können, wird unter «FITS Header Updates» das dritte Symbol angeklickt und man wird mit Simbad verbunden.

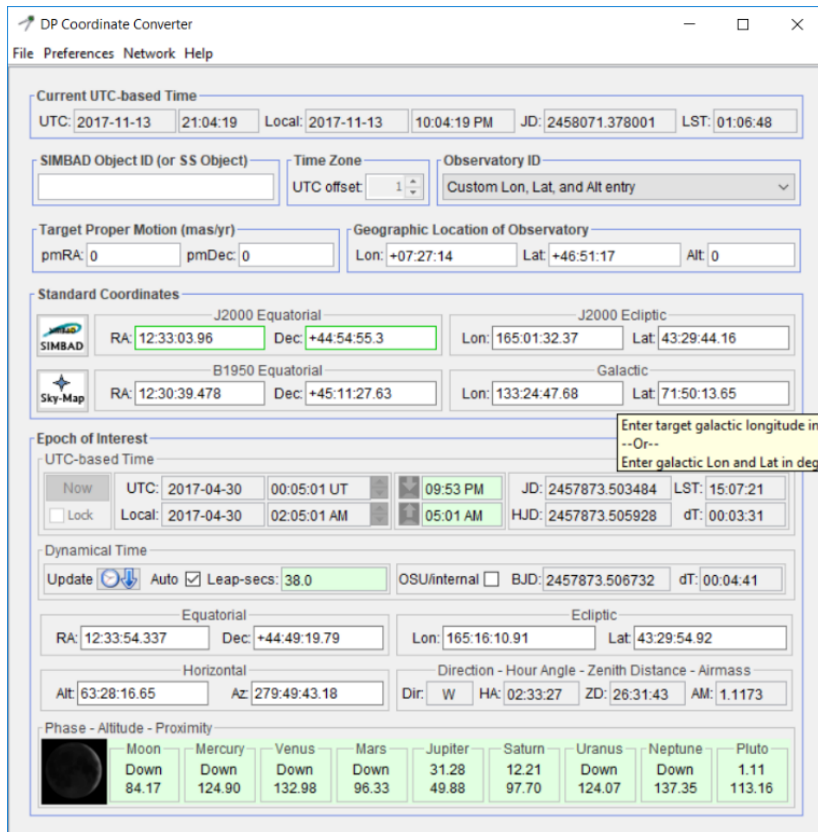


Abb. 18: Zweites sich öffnendes Fenster von AstrolmageJ. Hier stellt man die Verknüpfung zu Simbad her und stellt somit sicher, dass AIJ die Objekte auf den Rohbildern bekannten Himmelskoordinaten zuordnen kann.

Beim zweiten Fenster gibt es noch weitere Einstellungen zu Simbad. Es müssen die Rektaszension und Deklination des beobachteten Objekts, also die Himmelskoordinaten des Hoststerns, eingegeben werden. Wie zu sehen ist, kann man alternativ zu Simbad auch Sky-Map verwenden. Oberhalb der «Standard Coordinates» benötigt es unter «Geographic Location of Observatory» auch noch die Koordinaten des Beobachtungsortes, in diesem Fall die des Sonnenturms Uecht.

Nach der Durchführung all dieser Schritte wird auf dem ersten Fenster unten auf «START» gedrückt und AstrolmageJ erstellt dann automatisch die Master Darks, Bias und Flats. Diese werden, ebenfalls automatisch, von den gemachten Rohbildern abgezogen und es entstehen die kalibrierten Science-Frames, die in einem eigenen Unterverzeichnis gespeichert werden.

4.4 Differentielle Blendenphotometrie

Der zweite Teilschritt der Auswertung ist die Bestimmung der Helligkeitsdifferenzen zwischen dem Hoststern und möglichst vielen Vergleichssterne mittels differentieller Blendenphotometrie. Damit können auf den kalibrierten Science Frames die Helligkeitsschwankungen des Hoststerns HAT-P-36 gemessen werden. Der erste Schritt ist das Einlesen der kalibrierten CCD-Bildsequenz in AstrolmageJ. Dazu muss im Hauptmenü unter File > Import > Image Sequence der Ordner mit den gespeicherten Science Frames angewählt werden. Die Bilder öffnen sich dann in einem weiteren Fenster (Abb. 19).

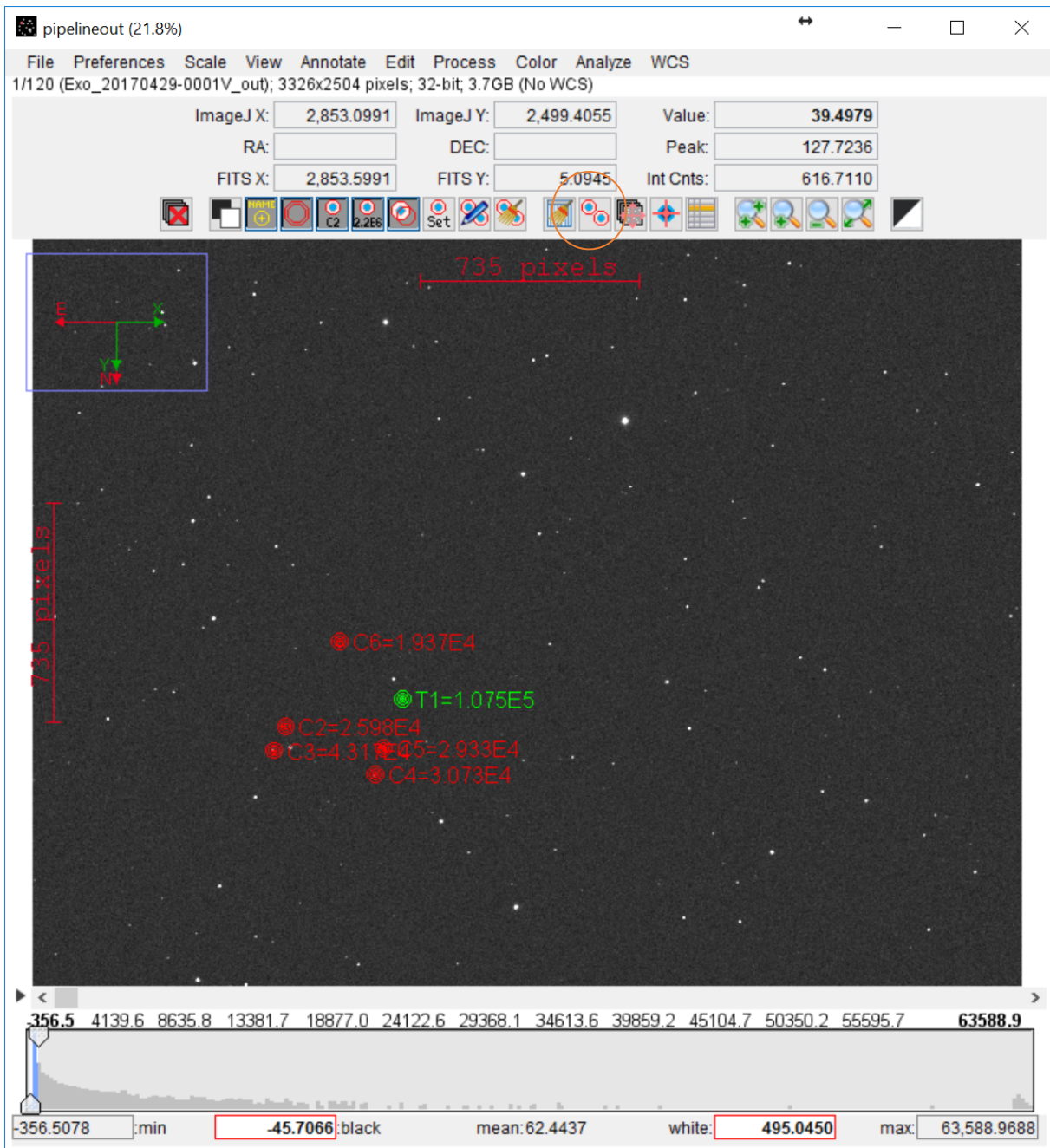


Abb. 19: sich öffnendes Fenster von AIJ mit gekennzeichnetem Hauptstern und den Vergleichssterne

Nach dem Anwählen des «multi-aperture differential photometry»-Icons lassen sich der Hauptstern und die Vergleichssterne auswählen. Die idealen Radien der Blenden (englisch: Apertures) werden einem auf einem Seeing Profil angezeigt und können sodann als Vorgabewerte für die ganze Messserie übernommen werden.

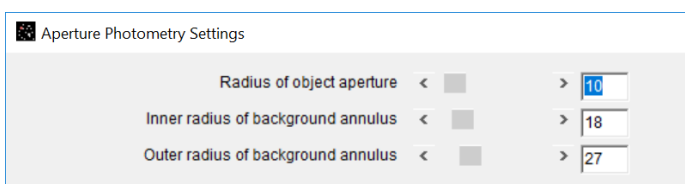


Abb. 20: Einstellungen zu den Radien der inneren Kreisblende und der äusseren Ringblende, die automatisch vom Seeing Profil übernommen werden können.

Die Vergleichssterne sollten möglichst alleinstehend sein, insbesondere sollten sich in der Ringblende keine weiteren Sterne befinden. Ausserdem sollten sie eine Helligkeit haben, die 0.5 bis 1.5 mal so gross ist wie die des Hoststerns. Mit einem Klick auf Enter werden automatisch auf allen Science Frames die Blenden für alle ausgewählten Messobjekte gesetzt und die Resultate werden in Form einer Tabelle (Abb. 21) ausgegeben, welche anschliessend gespeichert und in Excel weiterverarbeitet werden kann.

	Label	slice	Saturated	J.D. -2400000	JD.UTC	JD.SOBS
1	Exo_20170429-0001V_out.fit	1.000000	0.000000	57873.364352	2457873.364352	2457873.3638
2	Exo_20170429-0002V_out.fit	2.000000	0.000000	57873.365475	2457873.365475	2457873.3650
3	Exo_20170429-0003V_out.fit	3.000000	0.000000	57873.366620	2457873.366620	2457873.3661
4	Exo_20170429-0004V_out.fit	4.000000	0.000000	57873.367743	2457873.367743	2457873.3672
5	Exo_20170429-0005V_out.fit	5.000000	0.000000	57873.368889	2457873.368889	2457873.3684
6	Exo_20170429-0006V_out.fit	6.000000	0.000000	57873.370012	2457873.370012	2457873.3695
7	Exo_20170429-0007V_out.fit	7.000000	0.000000	57873.371157	2457873.371157	2457873.3706
8	Exo_20170429-0008V_out.fit	8.000000	0.000000	57873.372280	2457873.372280	2457873.3718
9	Exo_20170429-0009V_out.fit	9.000000	0.000000	57873.373414	2457873.373414	2457873.3729
10	Exo_20170429-0010V_out.fit	10.000000	0.000000	57873.374537	2457873.374537	2457873.3740
11	Exo_20170429-0011V_out.fit	11.000000	0.000000	57873.380220	2457873.380220	2457873.3797
12	Exo_20170429-0012V_out.fit	12.000000	0.000000	57873.381354	2457873.381354	2457873.3808
13	Exo_20170429-0013V_out.fit	13.000000	0.000000	57873.382488	2457873.382488	2457873.3820
14	Exo_20170429-0014V_out.fit	14.000000	0.000000	57873.383611	2457873.383611	2457873.3831
15	Exo_20170429-0015V_out.fit	15.000000	0.000000	57873.384757	2457873.384757	2457873.3842
16	Exo_20170429-0016V_out.fit	16.000000	0.000000	57873.385880	2457873.385880	2457873.3854
17	Exo_20170429-0017V_out.fit	17.000000	0.000000	57873.387014	2457873.387014	2457873.3865

Abb. 21: Tabelle mit Ergebnissen der Helligkeitsbestimmung

Nun bedarf es noch der Modellierung der Lichtkurve. Dazu wird im Hauptmenü das entsprechende Icon zur Lichtkurvengestaltung angewählt.

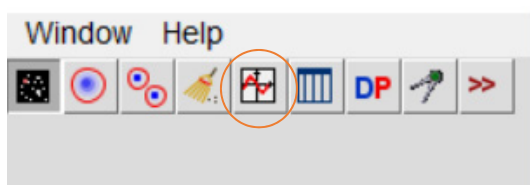


Abb. 22: Hauptmenü von AIJ

Von den drei sich öffnenden Fenstern sind zuerst die Einstellungen in Abb. 23 vorzunehmen. Zwingend ist hierbei die Angabe der Spektralklasse des Hauptsterns oder dessen Temperatur unter «Host Star Parameters». Passende Daten sind in der Datenbank von Exoplanet.eu unter dem jeweiligen Namen des Exoplaneten katalogisiert (z.B. unter http://exoplanet.eu/catalog/hat-p-36_b/). Ausserdem muss man unter «Parameter» in der Spalte «Prior Center» Vorgabewerte für Quad LD u1 und Quad LD u2 eingeben, die unter <http://astrutils.astronomy.ohio-state.edu/exofast/limbdark.shtml> abrufbar sind.

Bei jeder Veränderung eines Vorgabewertes rechnet AIJ automatisch im Hintergrund die passendsten Werte für die Lichtkurve, speichert sie in einer Tabelle und stellt sie zusammen mit den gemessenen Einzelwerten und ihren Fehlern grafisch dar (Abb. 24, 29 und 32). Die Modellierung läuft allerdings nicht in jedem Fall ganz automatisch ab, so dass man um einen guten Fit zu erhalten, einzelne Vorgabewerte fixieren und andere so lange verändern muss, bis das Bayesian Information Criterium (BIC) unter der Rubrik «Fit Statistics» in Abb. 23 einen minimalen Wert angenommen hat.

Die Formeln für die Berechnung der Helligkeitsdifferenzen und ihrer Fehlerwerte sind detailliert in Collins et. al. (2017) beschrieben.

rel_flux_T1

User Specified Parameters (not fitted)

Orbital Parameters

Period (days) Cir Ecc ω (deg)

Host Star Parameters (enter one)

Sp.T. Teff (K) J-K R* (Rsun) M* (Msun) ρ^* (cgs)

Transit Parameters

Enable Transit Fit Auto Update Priors Extract Prior Center Values From Light Curve, Orbit, and Fit Markers

Parameter	Best Fit	Lock	Prior Center	Use	Prior Width	Cust	StepSize
Baseline Flux (Raw)	<input type="text" value="0.730948039"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.723049658"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.144609932"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
$(R_p / R_*)^2$	<input type="text" value="0.018733146"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.005"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0025"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.005"/>
a / R_*	<input type="text" value="4.680000000"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="4.68"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="7.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="4.68"/>
T_C	<input type="text" value="2457873.437000000"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="2457873.437"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.001"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0009"/>
Inclination (deg)	<input type="text" value="83.956599891"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="83.5"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="15.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>
Quad LD u1	<input type="text" value="0.533425890"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.53342589"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
Quad LD u2	<input type="text" value="0.212476200"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.2124762"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
Calculated from model	<input type="text" value="0.493"/> <input type="text" value="0.093781"/> <input type="text" value="02:15:03"/> <input type="text" value="0.064588"/>			<input type="text" value="0.014596"/> <input type="text" value="1.0996"/>	<input type="text" value="G5V"/> <input type="text" value="1.20"/>		

Detrend Parameters

Use	Parameter	Best Fit	Lock	Prior Center	Use	Prior Width	Cust	StepSize
<input checked="" type="checkbox"/>	AIRMASS	<input type="text" value="-0.015275260803"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/>	Width_T1	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/>	Sky/Pixel_T1	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/>	X(FITS)_T1	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/>	Y(FITS)_T1	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/>	tot_C_cnts	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/>	BJD_TDB	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>
<input type="checkbox"/>	Meridian_Flip	<input type="text" value=""/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="1.0"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="text" value="0.1"/>

Fit Statistics

Fit Statistics: RMS (norm) χ^2/dof BIC dof χ^2

Plot Settings

Show Model Show in legend Line Color: Line Width:

Show Residuals Show in legend Show Error Line Color: Line Width: Symbol: Symbol Color: Shift:

Fit Control

Fit Control: Auto Update Fit Fit Tolerance: Max Allowed Steps: Steps Taken:

Abb. 23: Eines von drei sich öffnenden Fenstern zur Einstellung der Lichtkurvenerstellung

Nach der Modellierung können die berechneten Werte separat gespeichert und in die ETD geladen werden. Aus den hochgeladenen Daten rechnet die ETD selbstständig ein Lichtkurvenmodell und publiziert dieses auf ihrer Webseite (siehe Kapitel 9.2).

5 Resultate

5.1 HAT-P-36 b

Die Beobachtung des HAT-P-36 b erfolgte am 29.4.2017 von 22:43 bis 02:05 Uhr. Der HAT-P-36 b ist ein Gasplanet und umkreist einen Stern der Spektralklasse G. Der Stern befindet sich in den Jagdhunden unterhalb der Deichsel des grossen Wagens. HAT-P-36 b ist 1.83-mal so gross wie der Jupiter und seine Umlaufszeit beträgt 1.3 Tage. Entdeckt wurde er 2011.

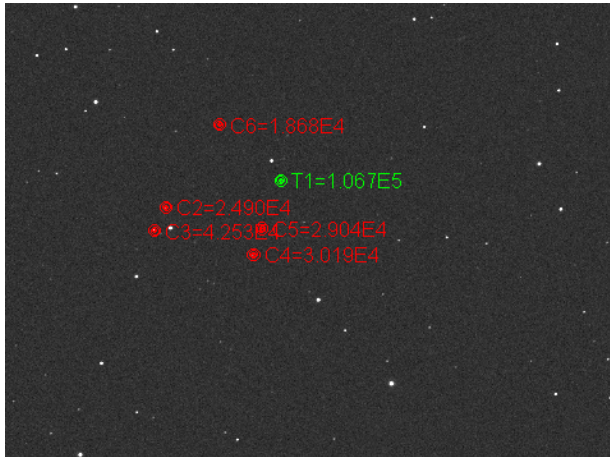


Abb. 24: Bild des HAT-P-36-b (T1) mit Vergleichssterne (C2-C6)

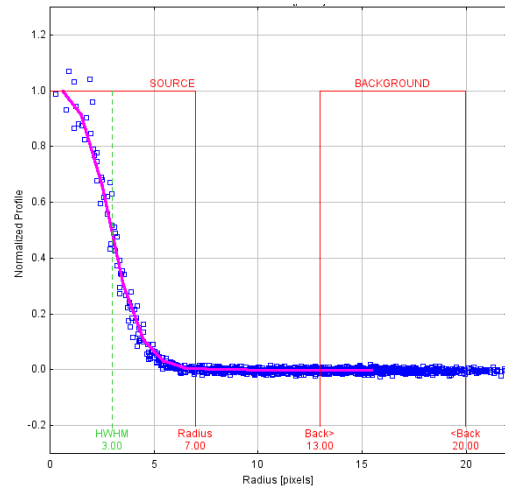


Abb. 25: Seeing Profil des HAT-P-36 b mit Vorschlägen der idealen Radien der Apertures

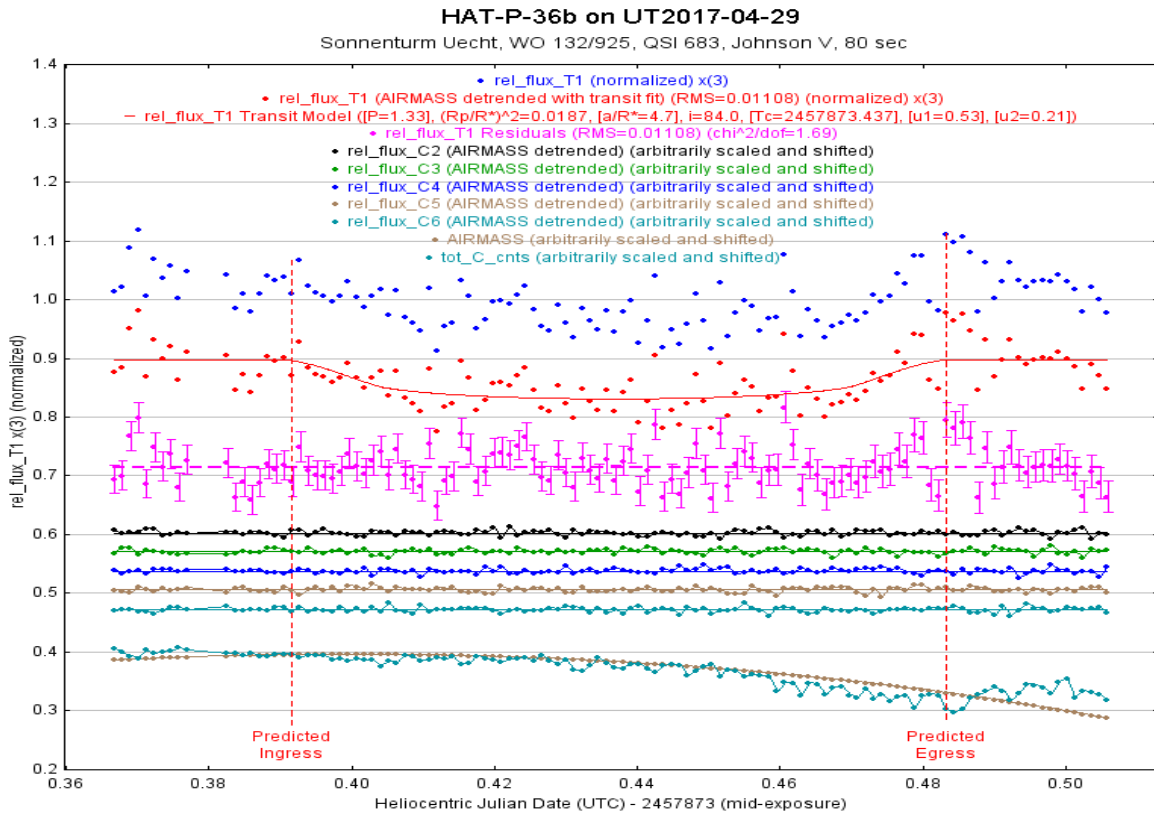


Abb. 26: Die Lichtkurve und die Residuen (violett) als Endresultat (rot). Ingress und Egress sind klar erkennbar und die Korrektur durch die Vergleichssterne (schwarz, grün, blau, braun, türkis) ist vorgenommen worden.

5.2 Qatar-1 b

Der Exoplanet Qatar-1 b wurde am 17.6.2017 von 00:28 bis 04:06 Uhr beobachtet. Er ist ebenfalls ein Gasplanet, der einen Stern der Spektralklasse G umkreist. Dieser Stern befindet sich zwischen dem Sternbild des Drachens und des Cepheus. Die Grösse des Qatar-1 b entspricht 1.29 Jupitergrössen. Er umrundet seinen Hoststern in 1.4 Tagen. Die Entdeckung des Exoplaneten erfolgte im Jahr 2010.

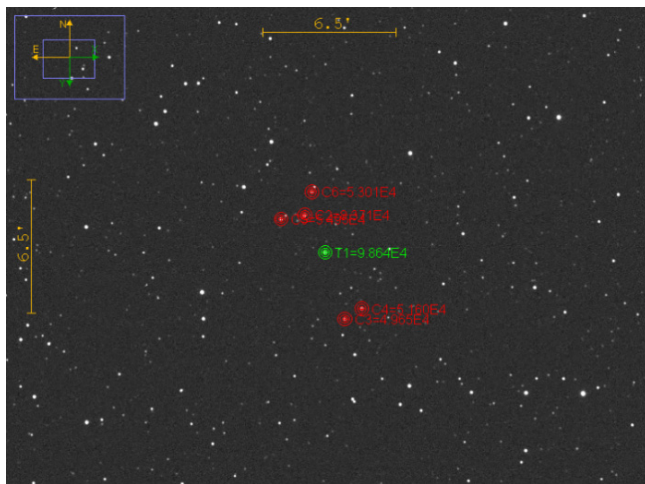


Abb. 27: Der Qatar-1b (T1) und seine Vergleichssterne (C2-C5)

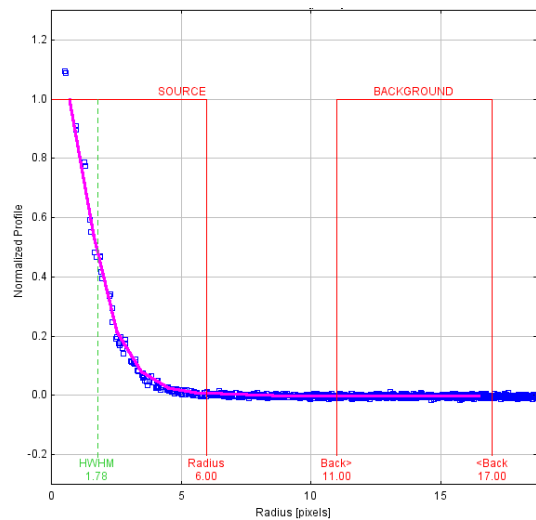


Abb. 28: Seeing Profil des Qatar-1 b mit Vorschlägen der idealen Radien der Apertures

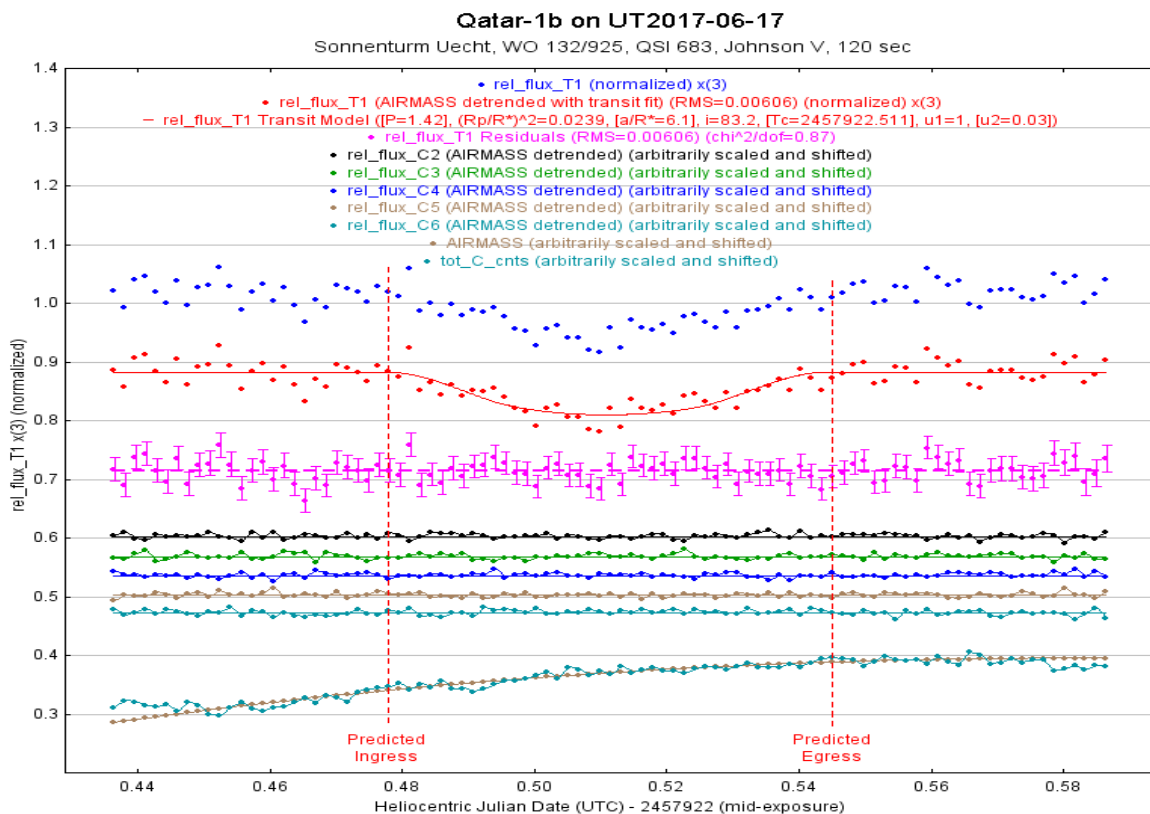


Abb. 29: Die Lichtkurve (rot) und die Residuen (violett) als Endresultat.

5.3 HAT-P-23 b

Die Beobachtung des HAT-P-23 b erfolgte am 16.10.2017 von 21:00 bis 00:25 Uhr. Auch er gehört zu den Gasplaneten und umkreist ebenfalls einen Stern der Spektralklasse G, welcher sich im Sternbild des Delphins zwischen Delphin und Atair befindet. Der HAT-P-23 b ist mit 2.07 Jupitergrößen der grösste der drei beobachteten Planeten. Seine Umlaufzeit beträgt 1.2 Tage. Man entdeckte ihn im Jahr 2010.

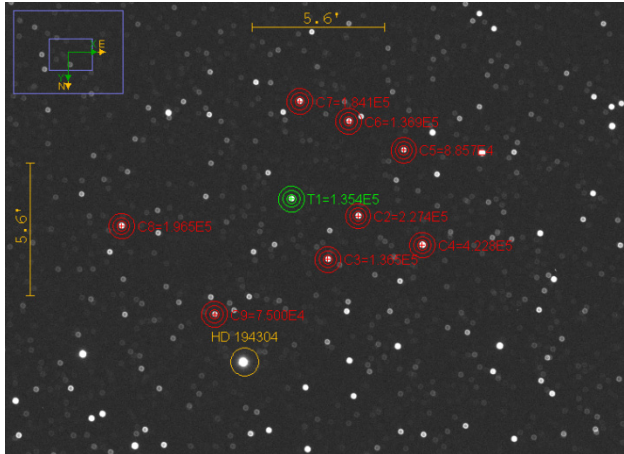


Abb. 30: Der HAT-P-23 b (T1) und seine Vergleichsterne (C2-C9)

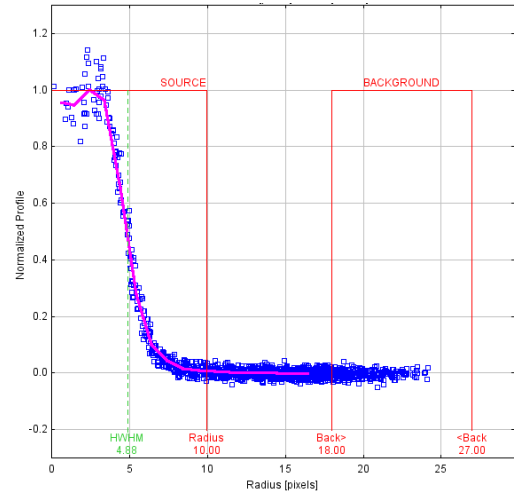


Abb. 31: Seeing Profil des HAT-P-23 b mit Vorschlägen zu den idealen Radien der Apertures

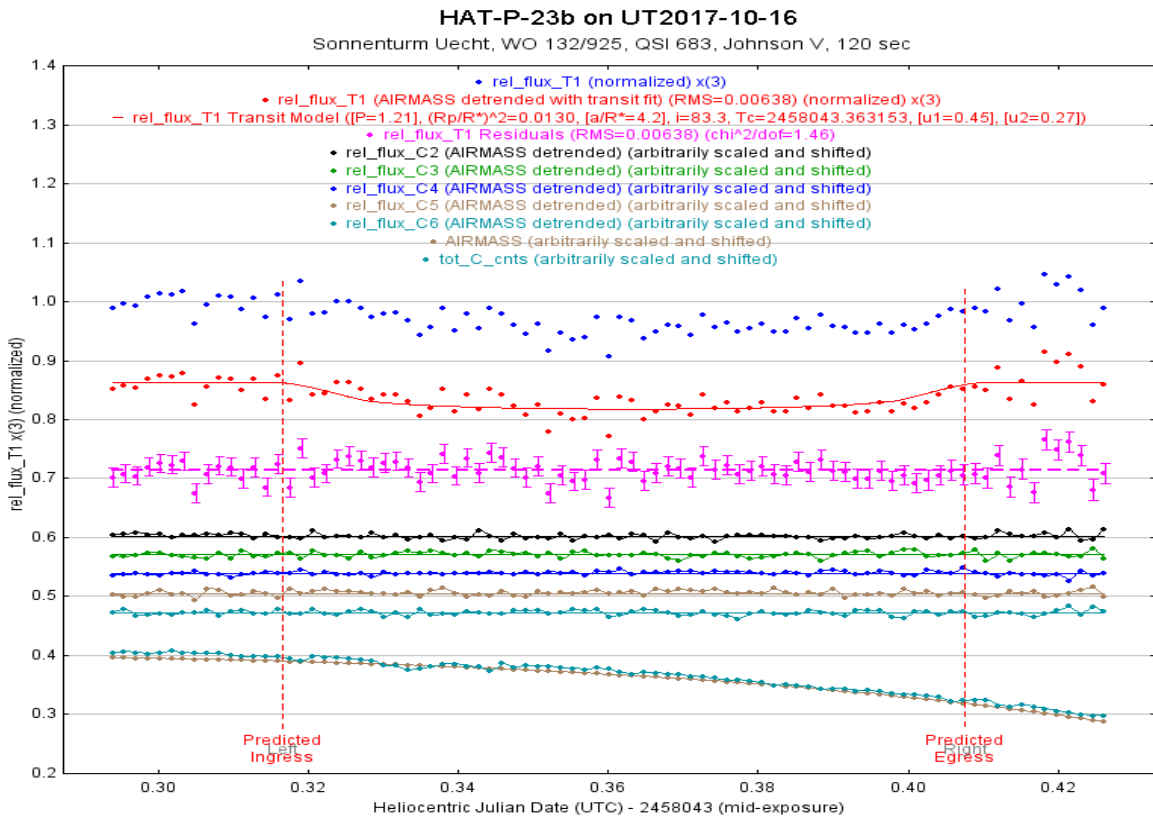


Abb. 32: Die Lichtkurve (rot) und die Residuen (violett) als Endresultat.

5.4 Diskussion

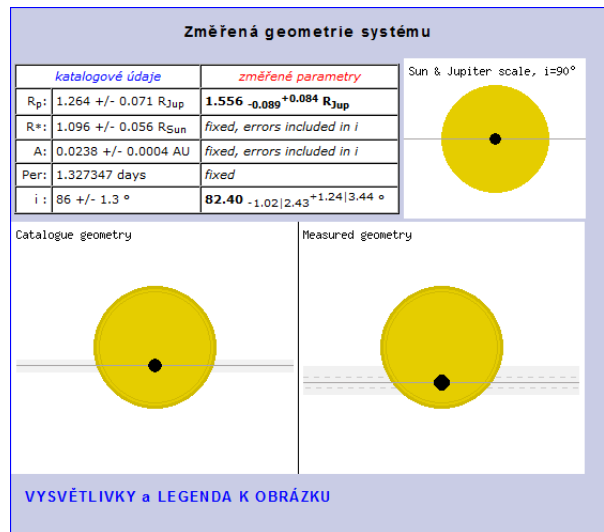
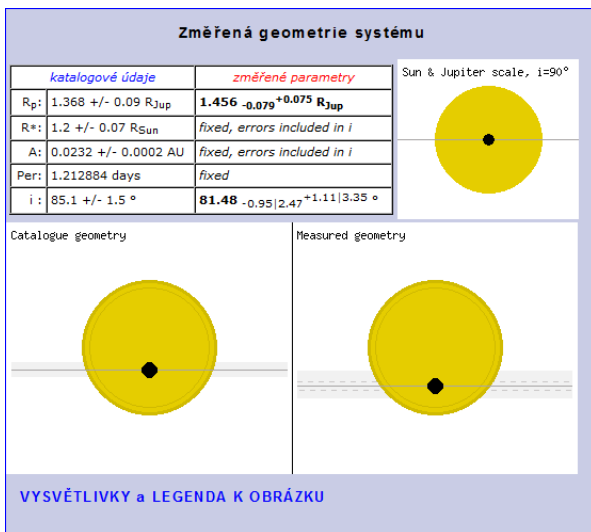


Abb. 33: Die in der ETD modellierten Parameter von HAT-P-23 b

Abb. 34: Die in der ETD modellierten Parameter von HAT-P-36 b

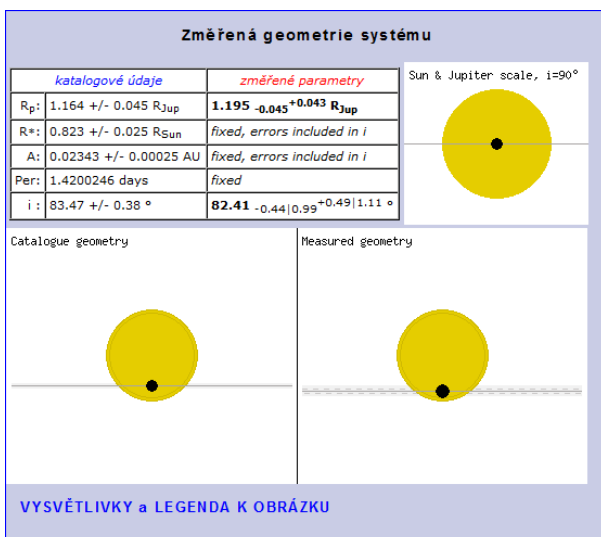


Abb. 35: Die in der ETD modellierten Parameter von Qatar-1 b

Oben aufgeführt sind die der ETD entnommenen publizierten Resultate unserer Beobachtungen. In einer kleinen Tabelle sind jeweils unsere Messwerte mit den Katalogwerten zusammengestellt. Grafisch wurden die Größenverhältnisse des Exoplaneten und des Hoststerns sowie die Inklination der Bahnebene des Exoplaneten gegenüber der Sehlinie und ihr wahrscheinlicher Fehler dargestellt.

Die Resultate für die Planetenradien sind jeweils ziemlich gut herausgekommen: Der Fehler befindet sich im Hundertstel- (HAT-P-23 b und Qatar-1 b) oder im Zehntelbereich (HAT-P-36 b).

Als am fehlerhaftesten erwies sich die Inklination, die doch immerhin Differenzen zwischen 1-4 Einheiten aufweist.

Im Anhang, Kapitel 9.2 sind zudem unsere Messergebnisse den Resultaten der Datenbank gegenübergestellt. Hier zeigt sich, dass wir mit unseren ersten Versuchen in Sachen Genauigkeit bei den Besten sind.

6 Fazit

6.1 Zielerreichung

Das Ziel meiner MA, eine Transitbeobachtung bei einem Exoplaneten durchzuführen und die Resultate in die Exoplanet Transit Database einzupflegen, habe ich erreicht. Doch die drei bisher publizierten Ergebnisse werden nicht die einzigen bleiben; ich plane, mit den Exoplanetenbeobachtungen weiterzumachen. Seit kurzem existiert sogar eine Schweizer Internetseite dafür: Jonas Schenker, der Mitglied der «Rudolf Wolf Gesellschaft» des Sonnenturms Uecht und gleichzeitig Fachgruppenbetreuer der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft (SAG) ist, hat sie erstellt. Sie ist abrufbar unter dem Link <http://variables.ch/index.html> und besitzt eine eigene Rubrik für Exoplaneten mit den bisherigen Resultaten meiner MA.

Ein weiteres Ziel von mir ist es, selbst einen Exoplaneten zu entdecken. Nun habe ich die Zeit dazu und gehe somit auch kein Risiko ein, wenn ich nichts entdecke.

Zum Schluss ist noch zu sagen, dass ich während meiner Arbeit hauptsächlich mit Dossiers und Texten auf Englisch gearbeitet habe, was nicht weiter schlimm war, jedoch hat es länger gedauert, alles zu begreifen, da ich anfangs beim Lesen des AIJ-Erklärungsdossiers schon das neue Fachvokabular der Photometrie nur schwer verstand. Deshalb werde ich für den zukünftigen Exoplanetenclub der SAG das AIJ-Erklärungsdossier und eventuell auch Dennis M. Contis Exoplanetenbeobachtungsdossier vom Englischen ins Deutsche übersetzen. Möglicherweise nützt es später auch dem Gornergrat, wo die Exoplanetenbeobachtung auch am Aufkommen ist.

6.2 Schwierigkeiten, zu beachtende Sachen, Tipps

Da der Arbeitsprozess aus vielen Teilschritten besteht, und das Endresultat einige Stufen durchlaufen muss, gibt es natürlich auch viele Sachen, die man falsch machen kann. (Leider nicht nur hypothetisch.)

Beachtung der Zeitzonen

Auf der «Exoplanet Transit Database» ist die Zeit immer in UTC angegeben. Um zu bestimmen, welche Zeitspanne die Durchgänge der Exoplaneten auf dem Sonnenturm Uecht ausfüllen würden, musste eine Umrechnung in die damals geltende Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) erfolgen.

Berücksichtigung der Vor- und Nachlaufzeit

Damit der Verlauf der Lichtkurve schön zu sehen ist, müssen sowohl eine Stunde vor als auch nach dem eigentlichen Transit bereits Beobachtungen gemacht werden. Falls das vergessen geht, kann man auf der späteren Lichtkurve nicht genau bestimmen, wann der Transit denn nun begonnen bzw. aufgehört hat.

Die Eingabe der richtigen Koordinaten am richtigen Ort

Bei einem Programm wie AstrolmageJ muss man auf viele Orte verweisen und auch bei den Koordinaten die jeweils richtigen nehmen.

Fokus

Während der Beobachtungen muss man ab und zu kontrollieren, ob die Sterne noch richtig fokussiert sind. Es kann nämlich sein, dass sich das im Verlauf der Beobachtung durch die sich langsam verändernde Aussentemperatur ändert.

Falls man selbst eine Exoplanetenbeobachtung plant, sollte man sich auf jeden Fall genug Zeit für die Vorbereitung nehmen, so dass man nicht in den Stress kommt, sei es etwa bei der Identifikation des Sterns oder der Aufnahme der Kalibrierbilder. Auch wichtig ist, flexibel in Bezug auf die Belichtungszeiten zu sein. Denn da man ja die Helligkeitsunterschiede bestimmen möchte, muss die Helligkeitsmessung so exakt wie möglich sein. Genügend Daten sind essenziell für ein gutes Ergebnis. Auch das Wetter und die Mondphasen sollte man berücksichtigen. Seinen Beobachtungsstandort sollte man vorzugsweise etwas abgelegen oder erhöht auswählen.

6.3 Danksagungen

Ich habe kein einfaches Maturaarbeitsthema gewählt, dessen bin ich mir bewusst. Ohne meinen Vater Dr. Thomas K. Friedli, dem der Sonnenturm Uecht gehört und der an der Universität Bern ein Diplom in Astronomie gemacht hat, wäre es für mich kaum möglich gewesen, diese Arbeit durchzuführen. Während des gesamten Arbeitsprozesses stand er mir immer mit Rat und Tat zur Seite und zusammen haben wir es sogar geschafft, das Bildbearbeitungsprogramm AstrolmageJ zu verstehen. Auch wusste er natürlich bestens über die Bedienung der Instrumente Bescheid. Bei meiner schriftlichen Maturaarbeit half er mir ausserdem beim Layouten.

Ebenfalls vom Fach ist Dr. Markus Wey, mein Betreuer, der sich zu meinem Glück ziemlich spontan dazu bereit erklärt hat, mich in meinem Projekt zu unterstützen und zu begleiten. Ich habe mich nämlich buchstäblich in letzter noch möglicher Sekunde für dieses Thema entschieden. Mit seiner Hilfe strukturierte ich meine Maturaarbeit und nach den persönlichen Gesprächen mit ihm wusste ich immer wieder genau, was ich noch zu tun hatte. Mit dem Antrag an das Observatorium für Exoplanetenbeobachtungen auf dem Gornergrat gab er mir sogar die neue Perspektive, mein Wissen und meine Erfahrungen womöglich weiterzugeben. Auch an ihn geht ein grosser Dank.

Ebenfalls dankbar bin ich Patrick Enderli und Jonas Schenker. Die beiden sind ebenfalls Sonnenbeobachter des Sonnenturms Uecht und sind in der Rudolf-Wolf-Gesellschaft meines Vaters. Von Patrick stammen die Bilder des Sonnenturms Uecht und Jonas hat extra wegen meiner Arbeit eine Rubrik für Exoplaneten auf seiner Seite erstellt. Beide haben meine Messungen und Publikationen mit Interesse verfolgt und mir dafür gratuliert. Das gab mir Motivation.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinen Eltern Maria Hostettler-Friedli und (noch einmal) Thomas Karl Friedli dafür bedanken, dass sie meine Maturaarbeit durchgelesen und mich auf Fehler hingewiesen haben. Ich bin ihnen so dankbar, dass sie immer hinter mir stehen und mich auf meinem Lebensweg mit ganzem Herzen unterstützen.

6.4 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, die vorliegende Maturaarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die in den Verzeichnissen genannten Quellen benutzt zu haben. Alle Stellen, die aus diesen Quellen stammen, habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Konsequenzen eines Teil- oder Vollplagiats sind mir bewusst.

Anna Lea Friedli

Belp, 17.11.2017

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

Bessell, M.S., 2005: Annu. Rev. Astron. Astrophys. 43, 1 – 38

Gary, B. L., 2010: *Exoplanet Observing for Amateurs*. Third Edition, 2010

Collins, K. A.: *AstroImageJ 2.4.1. User Guide plus Getting Started with Differential Photometry*.

Collins, K. A., Kielkopf, J. F., Stassun, K. G. & Hessman, F. V., 2017: AJ, 153, 77 - 90

Conti, D. M., 2016: *A Practical Guide to Exoplanet Observing*. Revision 2.2. December 2016

Conti, D. M., 2017: *A Practical Guide to Exoplanet Observing*. Revision 3.1. September 2017

Friedli, T.K., 1996: *Blendenphotometrie und Reduktion von CCD Helligkeitsbeobachtungen*.
Diplomarbeit Universität Bern, 1996.

Erklärung und Ursprung des Wortes Exoplanet: <http://www.wortbedeutung.info/Exoplanet/>

Erklärung scheinbare Helligkeit: https://de.wikipedia.org/wiki/Scheinbare_Helligkeit

Exoplaneten allgemein: <https://de.wikipedia.org/wiki/Exoplanet>

Exoplanet Transit Database Predictions: <http://var2.astro.cz/ETD/predictions.php>

Website des Sonnenturms Uecht: <http://www.solarpatrol.ch/>

Entnahme der Host Star Parameter: <http://exoplanets.org>

Bestimmung der Quad LD u1 und u2 Parameter: <http://astrutils.astronomy.ohio-state.edu/exofast/limbdark.shtml>

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: <https://exoplanets.nasa.gov/the-search-for-life/exoplanets-101/>

Abb. 2a: <http://www.astro.uni-jena.de/wasp-3/gfx/wap3-lc.gif>

Abb. 2b, 3 und das Titelbild : Patrick Enderli, Sonnenturm Uecht.

Abb. 4, 5, 6, 11, 13, 14, 15: Anna Friedli.

Abb. 7, 16 - 32 : Screenshots von AstroImageJ 3.2.0

Abb. 8, 9, 10, 12, 33, 34, 35: Screenshots aus <http://var2.astro.cz/ETD/>

Abbildungen des Anhangs alle von <http://var2.astro.cz/ETD/>

8 Glossar

ADU: Analog to Digital Unit, bezeichnet die Einheit, in der die Stärke der Helligkeit gemessen wird.

Bias Frame: Wird direkt ausgelesen (keine Belichtung), linear zu den Darks, heisse Pixel, die sich am Anfang auf dem Chip befinden, werden ausgelesen

Dark Frame: Wird gleich lang belichtet wie das Science Frame, wird aber abgedeckt, es gibt also kein Licht. Theoretisch sollte es eine komplett schwarze Fläche sein. Jedoch ist der Dunkelstrom sichtbar, die heißen Pixel auf dem Chip.

Deklination: entspricht dem himmlischen Breitengrad, stellt den Erhebungswinkel über dem Himmelsäquator dar.

Egress: Ende des Transits (auf der Lichtkurve Ende der Ausbauchung).

Exoplanet: Ein Exoplanet ist ein Planet in einem anderen Sonnensystem, er umkreist also nicht die Sonne, sondern irgendeinen anderen Fixstern.

Flatfield: Wird 1s belichtet, «Donut», ist eine von drei Ungenauigkeiten, die bei der Bildkalibrierung vom Hauptbild abgezogen werden müssen. Für das Flatfield wird das Flip Flat des Teleskops benötigt. Die eigentlich weisse Fläche ist vignettiert (aufgrund der Form des Teleskops), weist einige dunkle Flächen auf (vom Chip) und hat am Rand diverse Strahlen, erzeugt durch die Öffnungen im Teleskop (z.B. Filterrad). Das Flatfield muss bei einem Meridianflip wiederholt werden.

Gain: der Gain ist der Umrechnungsfaktor, den es braucht, um aus einem Signal in der Einheit ADU die Anzahl Elektronen zu berechnen.

Hoststern: Auch «Mutterstern», Stern, um den der zu beobachtende Exoplanet kreist.

Ingress: Beginn des Transits (auf der Lichtkurve Beginn der Ausbauchung).

Meridianflip: Das Umschlagen des Teleskops von einer Seite der Montierungssäule auf die andere. Das Bild in der CCD-Kamera dreht sich hierbei um 180 Grad. Da das Umschlagen des Teleskops etwa zwei Minuten in Anspruch nimmt, und bei der Auswertung die geänderte Bildorientierung berücksichtigt werden muss, wird in der Regel darauf geachtet, dass kein Meridianflip nötig ist. Das heisst, der gesamte Transit sowie die nötige Vor- und Nachbeobachtung spielt sich entweder ganz auf der Ostseite oder ganz auf der Westseite der Montierungssäule ab. Dies ist in der Planungsphase einer Exoplanetenbeobachtung am einfachsten mit einer drehbaren Sternkarte zu überprüfen.

Pixel: Bildelement, kleinste Einheit des Bildes.

Rektaszension: entspricht dem himmlischen Längengrad, der Winkel in Bezug auf den Himmelsäquator.

Science Frame: CCD-Aufnahme des Zielobjektes, das Hauptbild, welches mit Bias, Darks und Flats kalibriert werden kann.

Transitmethode: Eine Möglichkeit, Exoplaneten zu beobachten, ist es, die Helligkeitsschwankungen seines Fixsterns zu bestimmen, die entstehen, wenn der Exoplanet den Fixstern von der Erde aus betrachtet passiert. Als Ergebnis der Transitmethode erhält man eine Lichtkurve mit Ausbauchung.

9 Anhang

9.1 Journal der beobachteten Exoplaneten

Insgesamt wurden Transite von neun verschiedenen Exoplaneten beobachtet, jedoch wurden bisher nur drei davon ausgewertet. Sie sind nun der Reihe nach aufgeführt:

Erste Beobachtung am 29.4.17 vom Exoplaneten HAT-P-36 b (CVn)

RA (J2000) : **12 33 03.96**, DE (J2000): **+44 54 55.3**,
 V = **12.262 mag**, dV = **0.0204 mag**, duration = **132.9 minutes**

ELONGITUDE: 7.5° and LATITUDE: 47°

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2457873.438	29.04 21:24 (88°,S)	29.04. 22:30 (79°,W)	29.04 23:36 (68°,W)

Calibration Frames:

Flatfields, 27 Frames, 1 sec Exp., V Filter

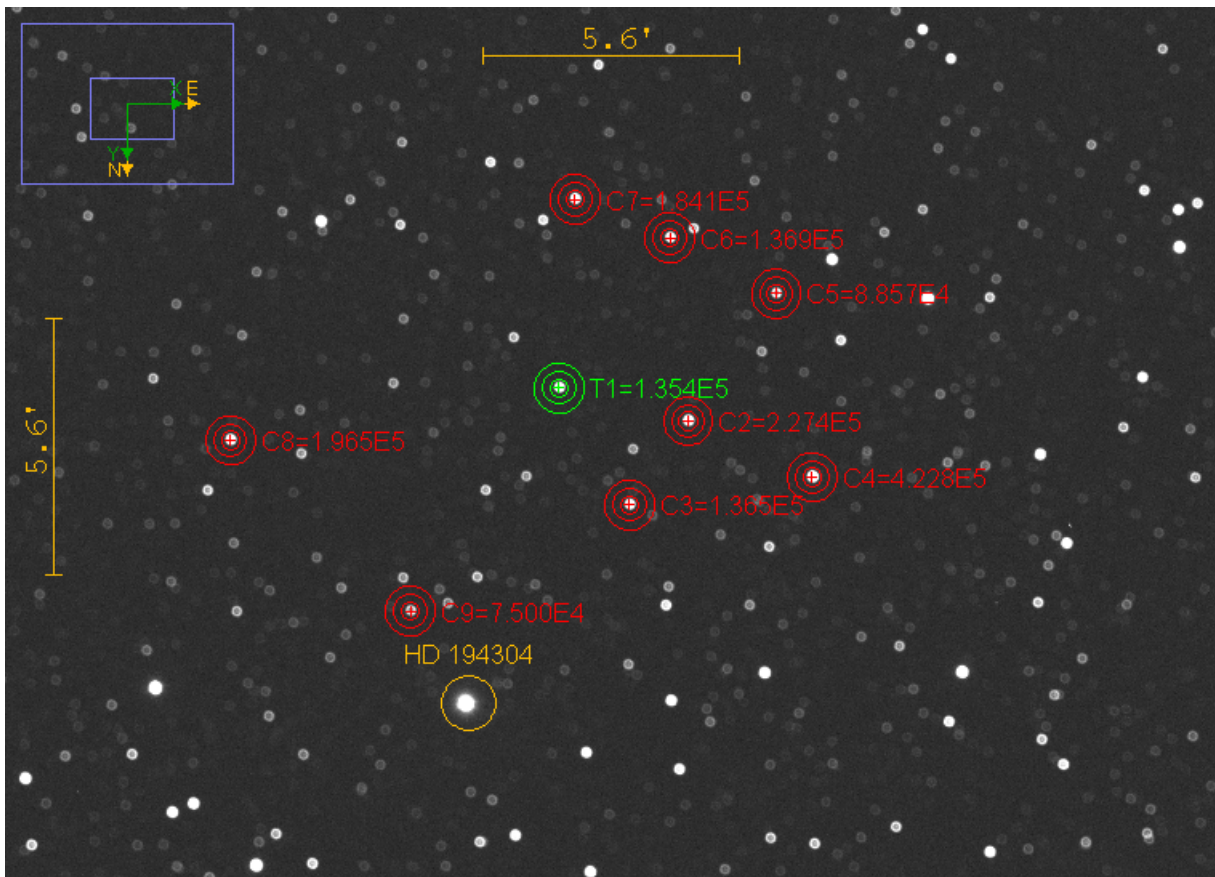
Flatdarks, 27 Frames, 1 sec Exp.

Flatfields 27 Frames, 1 sec. Exp., V Filter, with focus position as for the science frames ;

Darks, 27 Frames, 80 sec Exp., same exposure time as for the science frames

Focus with Merak, Beta UMa, 2.34 mag mit 50er Schritten. Belichtungszeit gemäss Tabelle: 0.2 sec.

10 Science Frames zu 80 sec mit Instrument westlich der Säule; 110 Aufnahmen zu 80 sec mit Instrument östlich der Säule.



Zweite Beobachtung am 17.6.17 vom Exoplaneten Qatar-1 b (Dra)

RA (J2000) : 20 13 32, DE (J2000): +65 09 43 ,

V = 12.84 mag, dV = 0.0204 mag, duration = 96.7 minutes

ELONGITUDE : 7.5° and LATITUDE: 47°

Transit occurs below 20° in the sky. | **During the daylight.** | **Observable.**

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2457922.512	17.06 23:28 (64°,NE)	18.06. 0:17 (68°,NE)	18.06 1:05 (71°,N)

Der Stern befindet sich zwischen Drachen und Cepheus.

Mit einer Stunde Überhang kommt der Stern um 03:30 MOZ in den Begrenzer der Montierung. Das ist 04:00 MEZ oder 03:00 UT. Der Transit ist aber mit einer Stunde Zugabe um 2 Uhr UT fertig. **Ein Meridianflip ist daher nicht nötig.**

Der Ingress beginnt um 23:28 UT also 01:28 MESZ oder um 23:58 MOZ. **Wir beginnen um 00:28 MESZ** oder um 22:58 MOZ.

Der Egress endet um 01:05 UT, also um 03:05 MESZ oder um 01:35 MOZ. **Wir hören auf um 04:05 MESZ** oder um 02:35 MOZ.

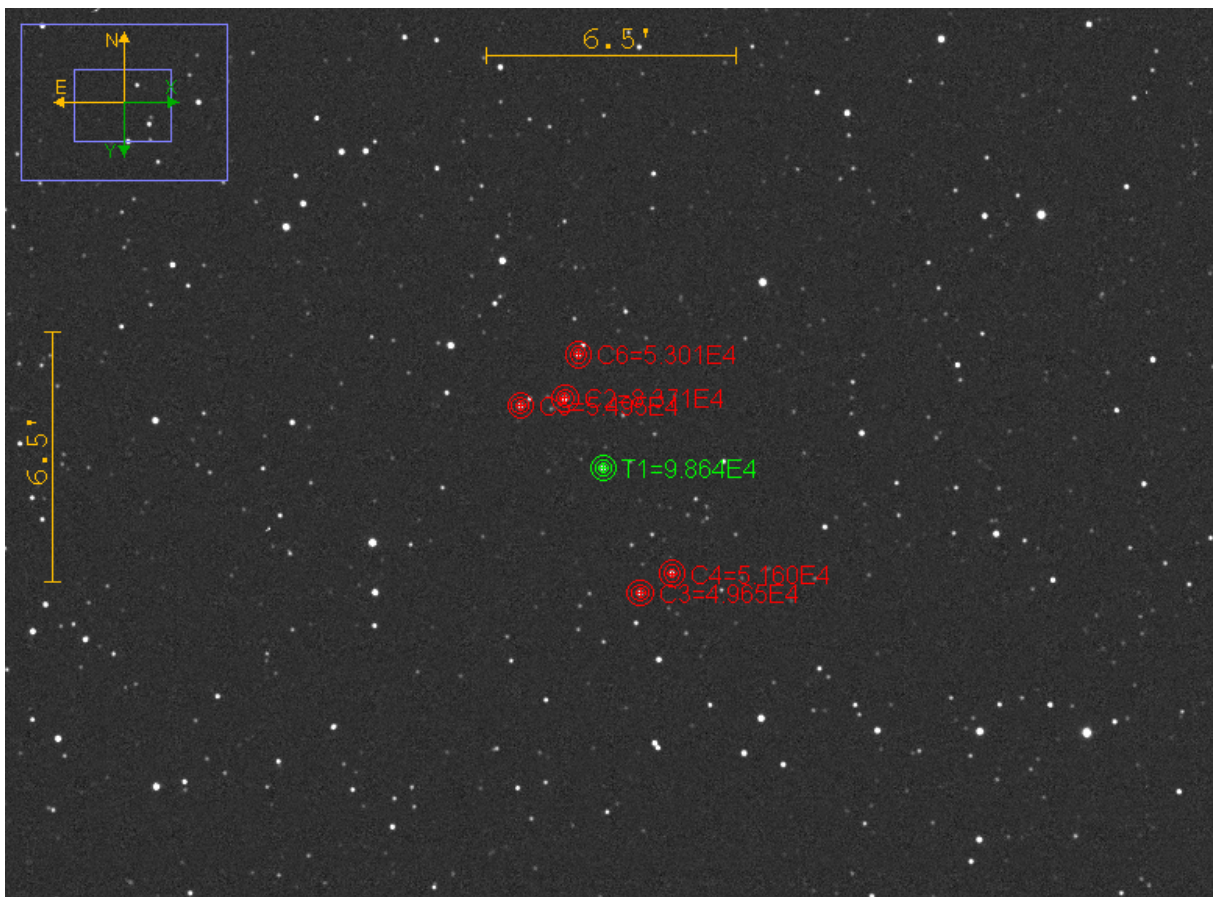
27 Bias, Flats und Flatdarks gemacht.

Downloadzeiten 19 sec pro Frame.

Fokus mit Alderamin, Alpha Cephei, mag 2.47, Laut Tabelle eine Belichtungszeit 0.03 sec

Belichtungszeit des Science Frames bei 120 Sekunden gefunden, ergibt 95 Bilder mit 19 Sekunden Downloadzeit.

27 Darks zu 120 Sekunden Belichtungszeit gemacht.



Dritte Beobachtung am 18.6. 17 vom Exoplaneten WASP-14 b (Boo)

RA (J2000): **14 33 06.35**, DE (J2000): **+21 53 40.98**,
 V = **9.75 mag**, dV = **0.0108 mag**, duration = **167 minutes**

ELONGITUDE: 7.5° and LATITUDE: 47°

Transit occurs below 20° in the sky. | **During the daylight.** | **Observable.**

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2457923.461	18.06 21:41 (59°,SW)	18.06. 23:04 (47°,W)	19.06 0:28 (34°,W)

Der Stern befindet sich in der Nähe des Arcturus im Bootes.

Mit einer Stunde Vorlauf befindet sich der Stern immer auf der Westseite des Himmels. **Ein Meridianflip ist daher nicht nötig.**

Der Ingress beginnt um 21:41 UT also 23:41 MESZ oder um 22:11 MOZ. **Wir beginnen um 23:11 MESZ** oder um 21:41 MOZ.

Der Egress endet um 00:28 UT, also um 02:28 MESZ oder um 00:58 MOZ. **Wir hören jedoch bereits auf um 03:00 MESZ** oder um 01:30 MOZ, da sich WASP-14b sonst zu tief über dem Horizont befindet.

17 Bias, Flats und Flatdarks gemacht.

Downloadzeiten 19 sec pro Frame.

Focus with Merak, Beta UMa, 2.34 mag. Daraus ergibt sich laut Tabelle eine Belichtungszeit 0.03 sec

Leider konnte der Stern nicht gefunden werden, da kein genügendes Signal zustande kam. Die Koordinaten wurden mehrfach überprüft, auch wurde die Pointinggenauigkeit des Instruments überprüft. Um Mitternacht wurde abgebrochen, nachdem noch eine Darkserie geschossen wurde.

Vierte Beobachtung am 20.6.17 vom Exoplaneten HD189733 b (Vul)

RA (J2000): **20 00 43.713**, DE (J2000): **+22 42 39.07**,
V = **7.67 mag**, dV = **0.0282 mag**, duration = **109.6 minutes**

ELONGITUDE: 7.5° and LATITUDE: 47°

Transit occurs below 20° in the sky. | **During the daylight.** | **Observable.**

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2457924.552	20.06 0:20 (62°,SE)	20.06. 1:15 (66°,S)	20.06 2:10 (65°,S)

Der Stern befindet sich am Ende des Pfeiles inmitten des Sommerdreiecks.

Mit einer Stunde Vorlauf befindet sich der Stern immer auf der Ostseite des Himmels. **Ein**

Meridianflip ist daher nicht nötig.

Der Ingress beginnt um 00:20 UT also 02:20 MESZ oder um 00:50 MOZ. **Wir beginnen um 01:20 MESZ** oder um 23:50 MOZ.

Der Egress endet um 02:10 UT, also um 04:10 MESZ oder um 02:40 MOZ. **Wir hören jedoch bereits auf um 04:40 MESZ** oder um 03:10 MOZ, da der Mutterstern sonst in den Begrenzer läuft. Zudem hat die Dämmerung da bereits begonnen.

17 Bias, Flats und Flatdarks sowie Darks mit 15 sec. Belichtung gemacht.

Downloadzeiten 19 sec pro Frame.

Fokus mit Alderamin, Alpha Cephei, mag 2.47, Laut Tabelle eine Belichtungszeit 0.03 sec

Belichtungszeit des Science Frames bei 12 Sekunden gefunden, ergibt 380 Bilder mit 19 Sekunden Downloadzeit.

Die letzten paar Bilder sind trotzdem in den Begrenzer gelaufen. Auch hat die Dämmerung spürbar eingesetzt.

Fünfte Beobachtung am 14.10 vom Exoplaneten WASP-10 b (Peg)

RA (J2000): **23 15 58.23**, DE (J2000): **+31 27 47.1**,

V = **12.7 mag**, dV = **0.0394 mag**, duration = **127.8 minutes**

Per = 3.092727 d, T0(HJD) = 2454357.85803

Transit occurs below 20° in the sky. | **During the daylight.** | **Observable.**

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2458041.296	14.10 18:02 (52°,E)	14.10. 19:06 (63°,SE)	14.10 20:09 (71°,SE)

Der Stern befindet sich in der Nähe von Beta Pegasi oberhalb des Pegasusquadrats.

Die Sonne geht um 19 Uhr MESZ unter.

Mit einer halben Stunde Vorlauf und Nachlauf befindet sich der Stern immer auf der Ostseite des Himmels. **Ein Meridianflip ist daher nicht nötig.**

Der Ingress beginnt um 18:02 UT also 20:02 MESZ oder um 18:30 MOZ. **Wir beginnen um 19:30 MESZ** oder um 18:00 MOZ.

Der Egress endet um 20:09 UT, also um 22:09 MESZ oder um 20:39 MOZ. **Wir hören auf um 22:40 MESZ** oder um 21:10 MOZ.

17 Bias, V Flats und Flatdarks gemacht.

Fokus mit Alderamin, Alpha Cephei, mag 2.47, Laut Tabelle eine Belichtungszeit 0.03 sec

81 Bilder mit 120 sec Belichtungszeit. Die ersten 6 Bilder sind auf den falschen Koordinaten. Man muss das Teleskop mit dem MaxIm Teleskopdriver connecten und dann die J2000 er Koordinaten eingeben...

17 Darks mit 120 sec gemacht.

Sechste Beobachtung am 14.10.17 vom Exoplaneten WASP-93 b (Cas)

RA (J2000): **00 37 50.11**, DE (J2000): **+51 17 19.5**,

V = **10.97 mag**, dV = **0.0119 mag**, duration = **134.1 minutes**

Per = 2.7325321 d, T0(HJD) = 2456079.5642

Transit occurs below 20° in the sky. | **During the daylight.** | **Observable.**

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2458041.522	14.10 23:24 (81°,NW)	15.10. 0:32 (71°,NW)	15.10 1:39 (60°,NW)

Der Stern befindet sich zwischen M31 und Alpha Cassiopeiae in der Cassiopeia.

Mit einer Stunde Vorlauf und Nachlauf befindet sich der Stern immer auf der Westseite des Himmels.

Ein Meridianflip ist daher nicht nötig.

Der Ingress beginnt um 23:24 UT also 01:24 MESZ oder um 23:54 MOZ. **Wir beginnen um 00:30 MESZ** oder um 23:00 MOZ.

Der Egress endet um 01:39 UT, also um 03:39 MESZ oder um 02:09 MOZ. **Wir hören auf um 04:40 MESZ** oder um 03:09 MOZ.

Fokus mit Alderamin, Alpha Cephei, mag 2.47, Laut Tabelle eine Belichtungszeit 0.03 sec

118 Bilder mit 80 sec Belichtungszeit.

Wahrscheinlich zu früh aufgehört...

Siebte Beobachtung am 15.10.17 vom Exoplaneten HAT-P-37 b (Dra)

RA (J2000): **18 57 11.16**, DE (J2000): **+51 16 08.9**,
 V = **13.23 mag**, dV = **0.0204 mag**, duration = **139.8 minutes**
 Per = **2.797436 d**, T0(HJD) = 2455642.14318

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2458042.343	15.10 19:04 (68°,NW)	15.10. 20:14 (57°,NW)	15.10 21:24 (46°,NW)

Der Stern befindet sich zwischen Deneb und Vega im Drachen.

Die Sonne geht um 19 Uhr MESZ unter.

Mit einer Stunde Vorlauf und Nachlauf befindet sich der Stern immer auf der Westseite des Himmels.

Ein Meridianflip ist daher nicht nötig.

Der Ingress beginnt um 19:04 UT also 21:04 MESZ oder um 19:34 MOZ. **Wir beginnen um 20:00 MESZ** oder um 18:30 MOZ.

Der Egress endet um 21:24 UT, also um 23:24 MESZ oder um 21:54 MOZ. **Wir hören auf um 24:30 MESZ** oder um 22:54 MOZ.

17 Bias, V Flats und Flatdarks gemacht.

112 Frames mit 120 sec Belichtungszeit gemacht.

Achte Beobachtung am 16.10.17 vom Exoplaneten HAT-P-23 b (Del)

RA (J2000): **20 24 29.73**, DE (J2000): **+16 45 44.3**,
 V = **12.43 mag**, dV = **0.0076 mag**, duration = **130.75 minutes**
 Per = 1.212884 d, T0(HJD) = 2454852.26464

Transit occurs below 20° in the sky. | **During the daylight.** | **Observable.**

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2458043.362	16.10 19:36 (55°,SW)	16.10. 20:41 (47°,SW)	16.10 21:47 (37°,W)

Der Stern befindet sich zwischen dem Delphin und Atair im Delphin.

Die Sonne geht um 19 Uhr MESZ unter.

Mit einer halben Stunde Vorlauf und Nachlauf befindet sich der Stern immer auf der Westseite des Himmels. **Ein Meridianflip ist daher nicht nötig.**

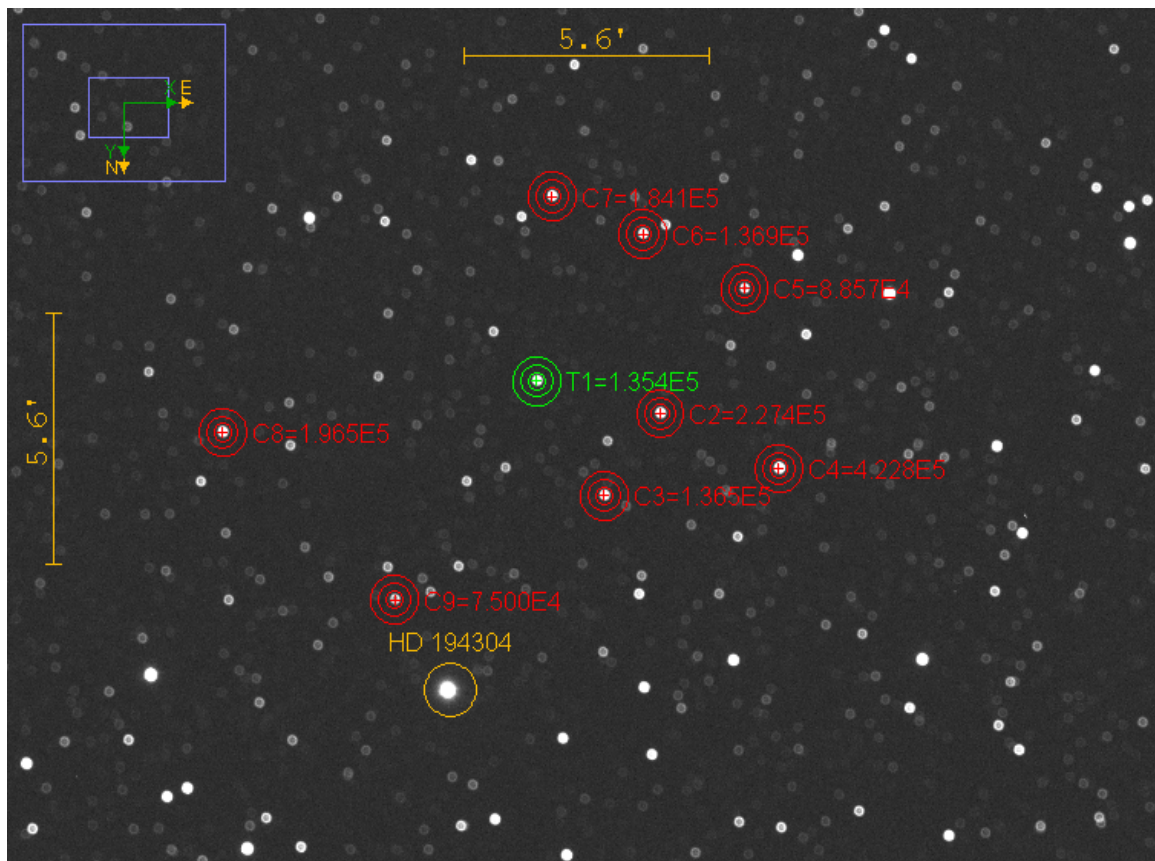
Der Ingress beginnt um 19:36 UT also 21:36 MESZ oder um 20:06 MOZ. **Wir beginnen um 21:00 MESZ** oder um 19:30 MOZ.

Der Egress endet um 21:47 UT, also um 23:47 MESZ oder um 22:17 MOZ. **Wir hören auf um 24:25 MESZ** oder um 22:55 MOZ.

17 Bias, V Flats und Flatdarks gemacht.

$(130.75 + 65) * 60 / 139 = 84.4964$, 85 Frames mit 120 sec Belichtungszeit gemacht.

17 Darks gemacht



Neunte Beobachtung am 18.10.17 vom Exoplaneten HAT-P-32 b (And)

RA (J2000): **02 04 10.24**, DE (J2000): **+46 41 16.8**,
 V = **11.29 mag**, dV = **0.0244 mag**, duration = **186.5 minutes**
 Per = 2.150008 d, T0(HJD) = 2454420.44637

Transit occurs below 20° in the sky. | **During the daylight.** | **Observable.**

Tmid (HJD)	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)
2458045.360	18.10 19:04 (45°,NE)	18.10. 20:38 (60°,E)	18.10 22:11 (75°,E)

Der Stern befindet sich knapp nördlich von Gamma Andromedae in der Andromeda

Die Sonne geht um 19 Uhr MESZ unter.

Mit einer halben Stunde Vorlauf und Nachlauf befindet sich der Stern immer auf der Ostseite des Himmels. **Ein Meridianflip ist daher nicht nötig.**

Der Ingress beginnt um 19:04 UT also 21:04 MESZ oder um 19:34 MOZ. **Wir beginnen um 20:30 MESZ** oder um 19:00 MOZ.

Der Egress endet um 22:11 UT, also um 24:11 MESZ oder um 22:41 MOZ. **Wir hören auf um 24:41 MESZ** oder um 23:11 MOZ.

17 Bias, V Flats und Flatdarks gemacht.

Fokussiert mit Alderamin

$(186.5 + 65) * 60 / 139 = 108.5612$, 110 Frames mit 120 sec Belichtungszeit gemacht.

Während den Aufnahmen zweimal nachfokussiert.

17 Darks gemacht.

9.2 Modellresultate der ETD

