

Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Ein Schulprojekt am Realgymnasium Bruneck im Schuljahr 2008/09

Inhaltsverzeichnis:

[Vorwort](#)

[Projektidee](#)

[Projektgruppe & Ausrüstung](#)

[CY Aquarii](#)

[Beobachtungen](#)

[Auswertung](#)

[Zusammenfassung und Ausblick](#)

[Danksagung](#)

Vorwort

[Zum Inhaltsverzeichnis](#)

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit mit der sich ein Lichtstrahl im Vakuum ausbreitet, ist eine der fundamentalsten Naturkonstanten in der Physik. Insbesondere gilt sie seit der Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie durch Albert Einstein als Grenzgeschwindigkeit, welche im Universum nicht überschritten werden kann. Im Laufe der Wissenschaftsgeschichte wurde bereits früh versucht, die Geschwindigkeit des Lichtes zu messen, wobei auch viele Gelehrte der Meinung waren, dass diese unendlich groß sein müsse. Der Däne Ole Römer (1644-1716) publizierte im Jahre 1676 zum ersten Mal astronomische Beobachtungen, aus denen ein endlicher Zahlenwert für die Vakuumlichtgeschwindigkeit abgeleitet werden konnte. Dieser Wert lag bei $c = 213.000$ km/s. In den folgenden Jahrzehnten wurde der Wert stetig verbessert. Fast 200 Jahre nach Römer konnte die Lichtgeschwindigkeit erstmals auch im Labor mit Erfolg gemessen werden. Der heute gültige Wert liegt bei $299.792,458$ km/s. In durchsichtigen Körpern bewegt sich das Licht langsamer.

Bedenkt man, dass die Strecke bis zum Mond ungefähr 384.400 km beträgt, so wird einem die Größenordnung der Vakuumlichtgeschwindigkeit erst bewusst. So braucht das Licht des Mondes bis auf die Erde wenig mehr als eine Sekunde. Von der Sonne dauert es immerhin schon ca. 8 Minuten. Das Licht der Sterne ist viele Jahre, das Licht der Galaxien viele Millionen bis Milliarden Jahre zu uns unterwegs.

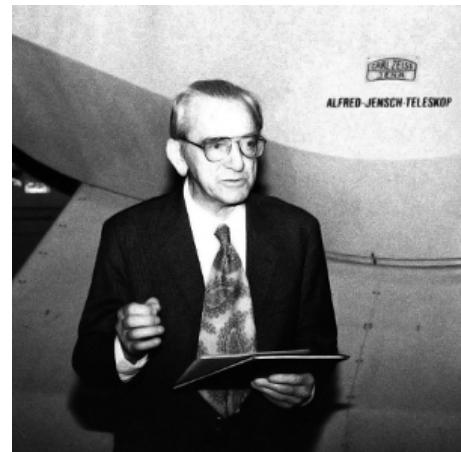
Gerade der ungeheuer große Wert der Lichtgeschwindigkeit macht ihre Messung so kompliziert. So kann man nicht einfach einen Lichtstrahl auf einen Spiegel schicken und die Zeit bis zu seiner Rückkehr stoppen, wie das mit Schall gemacht werden kann. Hört man nämlich sein Echo bei einer 150 m entfernten Felswand erst nach ungefähr einer Sekunde, so kehrt das Licht so ausgesprochen schnell wieder zurück, dass jeder Versuch der konventionellen Zeitmessung fehlschlagen muss. Will man Erfolg haben, so muss man entweder die Fähigkeit zur Messung von kleinen Zeitspannen ungeheuer verbessern, oder die Distanz zum Spiegel ungeheuer groß machen. Diese Hindernisse spiegeln sich im Umstand wieder, dass die simple Bestimmung der Vakuumlichtgeschwindigkeit durch eine Weg-Zeit-Messung nicht zu den Standardversuchen des Physikunterrichts an Schulen gehört. Mehr noch – unsere Recherche hat keine Hinweise darauf ergeben, dass solch ein Unterfangen schon einmal an einer Schule gelang.

Dies war Ansporn genug für uns, es zu versuchen.

Projektidee

Zum Inhaltsverzeichnis

Der von uns verfolgte Ansatz zur Bestimmung der Vakuumlichtgeschwindigkeit war der, den der Astronom Alfred Jensch (1912 – 2001, rechts im Bild) im Jahre 1936 in einem Artikel vorgeschlagen hatte. Die Idee wurde im März 2004 in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ von Werner Pfau nochmals vorgestellt.



Die von Jensch vorgeschlagene Methode beruht auf sorgfältigen und langwierigen Beobachtungen des Sterns mit der Bezeichnung CY Aquarii, also dem Stern CY im Sternbild Wassermann. Dieser Stern zeichnet sich durch mehrere Faktoren aus. Zunächst handelt es sich bei dem Stern um einen sogenannten periodischen Veränderlichen, d.h. seine Helligkeit schwankt aufgrund seines Aufbaus in regelmäßiger Weise zwischen einem Maximal- und einem Minimalwert. Solche Sterne sind an und für sich nicht selten, die Amplitude dieser Helligkeitsänderung ist aber bei CY Aquarii ziemlich groß und der Lichtwechsel passiert außerordentlich schnell. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Maxima der Helligkeit (Periodendauer) beträgt lediglich 88 Minuten, wobei der Stern aber auch dann so schwach bleibt, dass er nur in Teleskopen zu sehen ist. Zudem erhebt sich der Stern nur ca. 10 Grad über die Ekliptik, die Ebene also, in der die Erde um die Sonne umläuft. Man nennt diesen Winkel die ekliptikale Breite des Sterns. Die geringe ekliptikale Breite von CY Aquarii ist eine wichtige Voraussetzung für die Durchführbarkeit der Lichtgeschwindigkeitsmessung.

Obige Ausführungen lassen nun den Vergleich zwischen CY Aquarii und einer sehr genau gehenden Uhr in großer Entfernung zu. Hierbei fungiert das Auftreten des Maximumlichtes als Gongschlag. Die Gongschläge sind am Ort der Erde mit der entsprechenden Ausrüstung gut „hörbar“. Dazu macht man in einer Beobachtungsnacht einfach in kurzer Folge eine große Anzahl von kurzbelichteten Aufnahmen von CY Aquarii (siehe untenstehende Abbildung) und vermisst auf jeder Aufnahme die Helligkeit des Sternes. Der Helligkeitswert wird gegen die Zeit in ein Diagramm aufgetragen und man erhält das, was Astronomen eine „Lichtkurve“ nennen. Diese Lichtkurve zeigt nun die erwähnten periodischen Helligkeitsänderungen. Periode und Zeitpunkt des Eintreffens des Maximumslichtes sind daraus ablesbar. Das nachstehende Diagramm zeigt eine von uns am 20.09.2008 aufgenommene Lichtkurve von CY Aquarii. Die Aufnahmen wurden durch das Schulteleskop mit einer digitalen CCD-Kamera gewonnen.

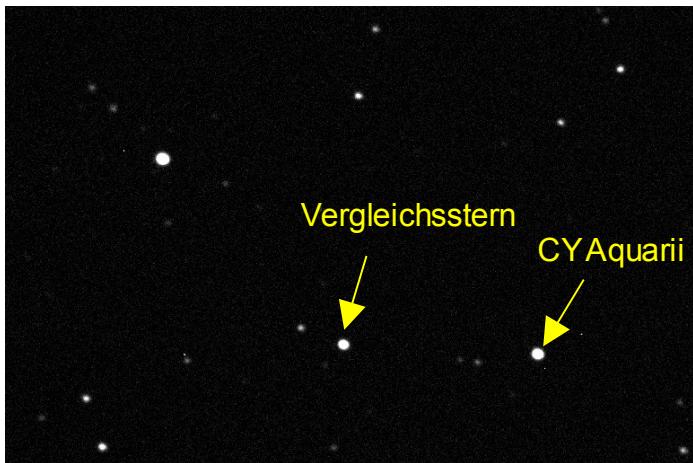


Bild: Sternfeld um CY Aquarii

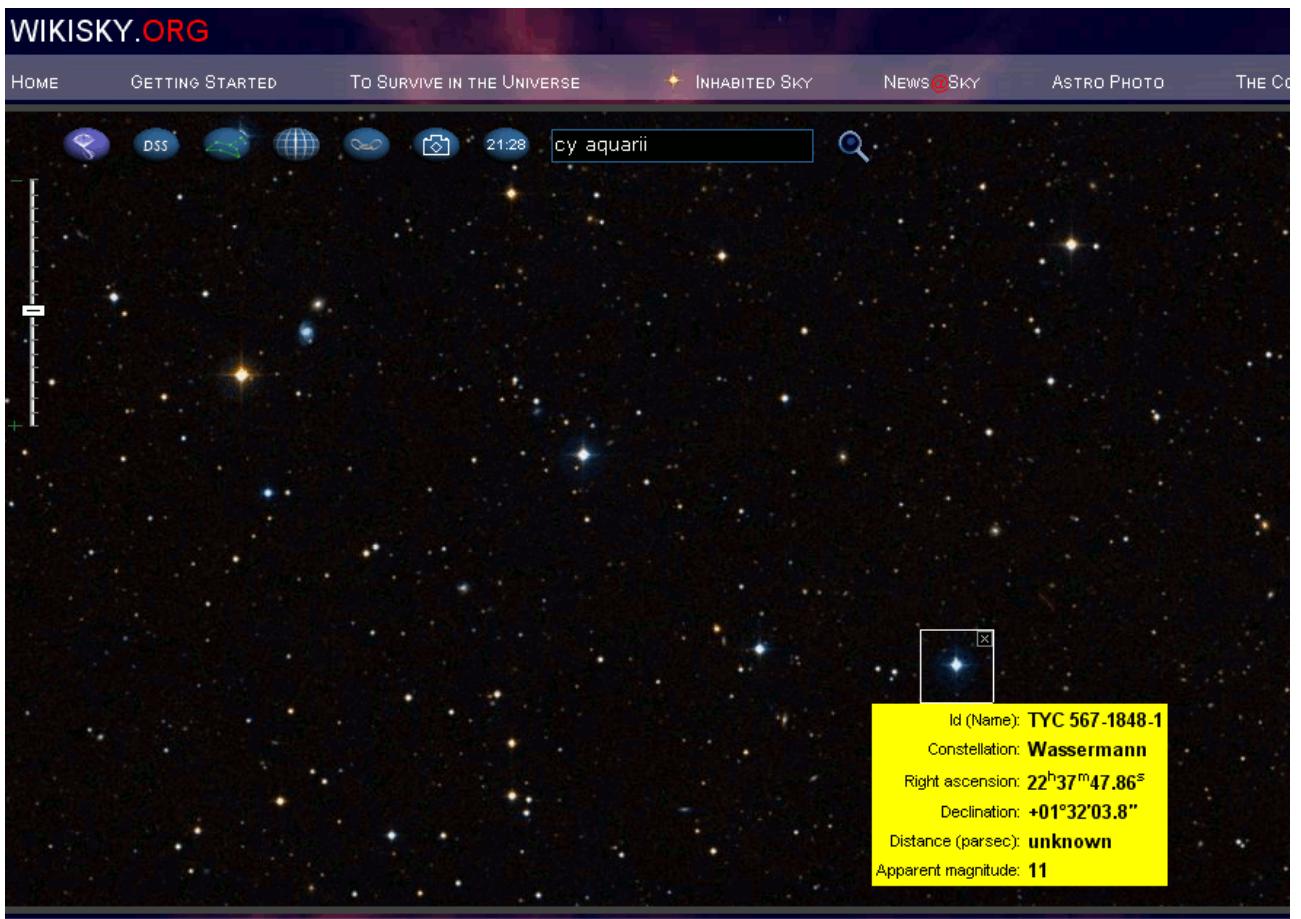


Abb: Sternfeld um CY Aquarii (Quadrat) aus Wikisky. Das Bild lässt sich gut mit dem obigen vergleichen.

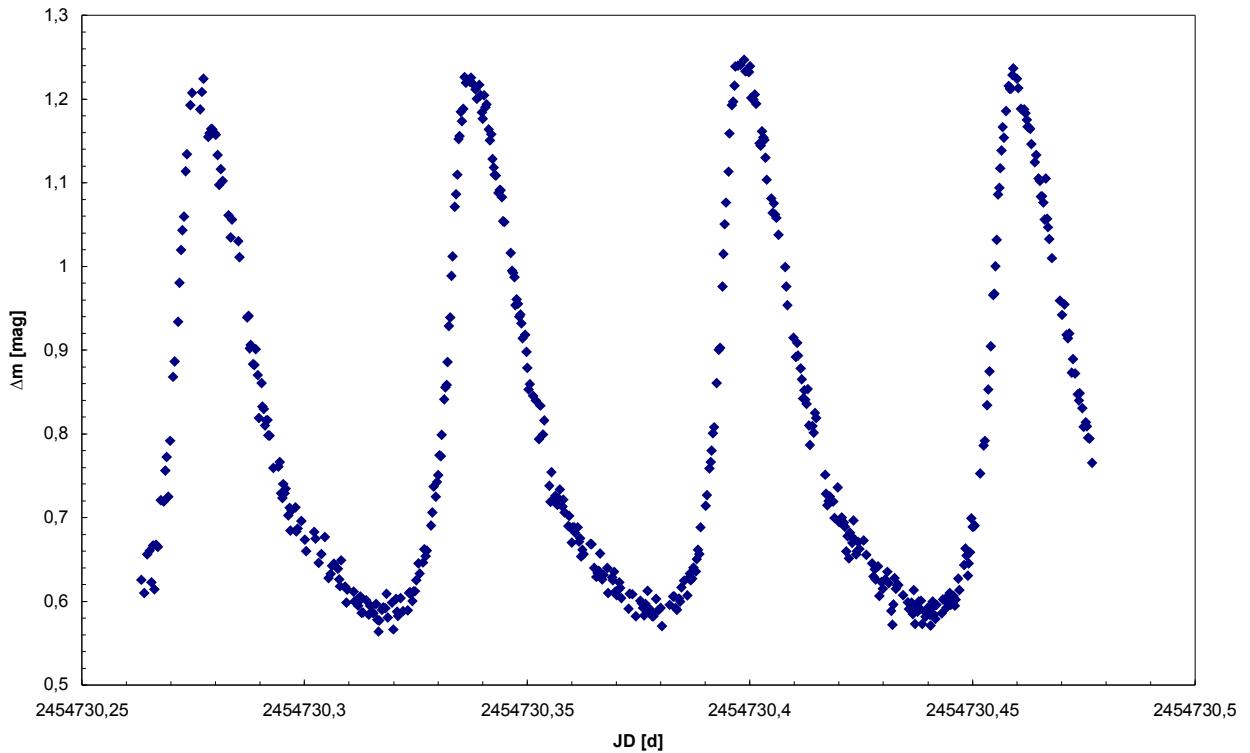


Diagramm: Lichtkurve für CY Aquarii vom 20.09.2008 gewonnen mit CCD-Kamera ST8-XME an Meade LX200. Jeder Punkt des Diagramms entspricht einer Aufnahme von CY Aquarii. Insgesamt wurden für diese Lichtkurve 524 Aufnahmen zu je 20 Sekunden verwertet. Das bedeutet, dass dieses Diagramm die Frucht von ca. 5 Stunden Arbeit ist.

Die Einheiten auf den Achsen der Lichtkurve verlangen einige Erklärungen. Auf der x-Achse ist das sogenannte Julianische Datum aufgetragen. Diese Zeitskala ist eine fortlaufende Tagesskala, welche am 01.01.2000 um 12:00 Uhr UT den Wert 2451545,0 aufwies. Für das Messen von Zeiten in der Astronomie hat sich diese Skala bewährt, da sie Unterscheidungen wie Wochen, Monate oder Stunden, Minuten usw. nicht kennt und auch frei von Unregelmäßigkeiten wie Schalttagen ist.

Der Abstand zwischen zwei Maxima in dem Diagramm beträgt ungefähr 0,06 Tage, d.h. ca. 88 Minuten. Das zweite Maximum in dem Diagramm liegt bei JD 2454730,337550, was dem 20.09.08 um 22:06 Uhr MESZ entspricht.

Auf der y-Achse erwarten wir eine Helligkeitsangabe. In der Astronomie werden Helligkeiten in Magnituden (mag) angegeben. In unserer Lichtkurve haben wir auf die Angabe der tatsächlichen Helligkeit des Sterns verzichtet. Stattdessen haben wir den Helligkeitsunterschied zu einem nahe stehenden und unveränderlichen Vergleichsstern aufgetragen. Das hat einen großen Vorteil. Viele Einflüsse (z.B. durchziehende Schleierwolken oder Dunst) ändern die gemessene Helligkeit von CY Aquarii, aber auch jene des Vergleichssterns. Durch die Differenzbildung fällt diese unerwünschte Fehlerquelle weg.

Was hat das aber mit der Lichtgeschwindigkeit zu tun?

Nehmen wir zunächst an, die Erde und CY Aquarii wären ortsfest im Universum. Das Licht eines Maximums bricht von CY Aquarii auf und erreicht nach ungefähr 1300 Jahren die Erde. Das nächste Maximumslicht wird 88 Minuten später abgestrahlt. Der Zeitabstand

zwischen diesen beiden Maxima kann auch auf der Erde zu 88 Minuten bestimmt werden. Wie lange das Licht tatsächlich unterwegs war, ist für uns nicht bestimmbar und auch nicht relevant.

Würde sich CY Aquarii von der Erde entfernen, so würde uns das Licht des zweiten Maximums mit einer kleinen Verspätung erreichen, da ja dieses Licht einen leicht vergrößerten Weg zurücklegen müsste. Die am Ort der Erde gemessene Periodendauer wäre dann scheinbar leicht größer als die am Ort des Sterns. Trotzdem gilt, dass die Periodendauer konstant wäre, sofern sich der Stern mit konstanter Geschwindigkeit entfernen würde.

Dieselben Überlegungen bleiben gültig, wenn sich die Sonne mit der Erde von CY Aquarii entfernen würde. Die Periode ist konstant, wenn auch nicht ganz die wahre. Wir halten also fest, dass wir die wahre (man sagt intrinsische) Periodendauer des Sterns nicht kennen. Trotzdem erscheint uns der Stern als streng periodisch veränderlich. Wir nennen diese messbare Periodendauer die „heliozentrische Periodendauer“. Ein hypothetischer Beobachter auf der Sonne würde sie ständig messen können.

Nun aber leben wir aber nicht auf der Sonne, sondern auf einem Himmelskörper, der sich im Laufe eines Jahres aufgrund des Umlaufs um die Sonne ein halbes Jahr lang von CY Aquarii entfernt und das darauffolgende halbe Jahr auf CY Aquarii zubewegt – das Ganze noch mit einer veränderlichen, weil projizierten Geschwindigkeit. Die Folge ist eine winzige rhythmische Veränderung der Periodendauer über das Jahr und infolgedessen auch eine Veränderung der Maximumszeitpunkte. Die „geozentrische Periodendauer“ ist also nicht vollkommen konstant!

Anfang September steht die Erde ziemlich genau zwischen Sonne und CY Aquarii. Der Stern ist somit die ganze Nacht über beobachtbar. Kennt man einen Maximumszeitpunkt im September und die heliozentrische Periodendauer des Sterns, so kann man durch simples Hinzuzählen eines ganzzahligen Vielfachen dieser Periodendauer einen Maximumszeitpunkt z.B. Ende Dezember vorhersagen. Beobachtet man nun aber den Stern erneut Ende Dezember, so bemerkt man, dass das vorhergesagte Maximum mit Verspätung am Ort der Erde eintrifft. Das deshalb, weil sich die Erde auf ihrer Umlaufbahn inzwischen von CY Aquarii entfernt hat und das Licht nun auch noch diese zusätzliche Strecke durchlaufen muss. Die Verspätung kann maximal einen Wert von 16 Minuten annehmen – das wäre das Ergebnis der Division von Erdbahndurchmesser durch Lichtgeschwindigkeit.

Wir beschreiten nun den umgekehrten Weg! Wir bestimmen einen Maximumszeitpunkt im September und die Periode so genau wie möglich und sagen einen Maximumszeitpunkt im Dezember vorher. Durch Bestimmung der Verspätung und der Strecke zwischen den beiden Erdpositionen im September und Dezember können wir auf die Lichtgeschwindigkeit hochrechnen.

Die folgenden Bilder fassen das Gelesene nochmals zusammen:

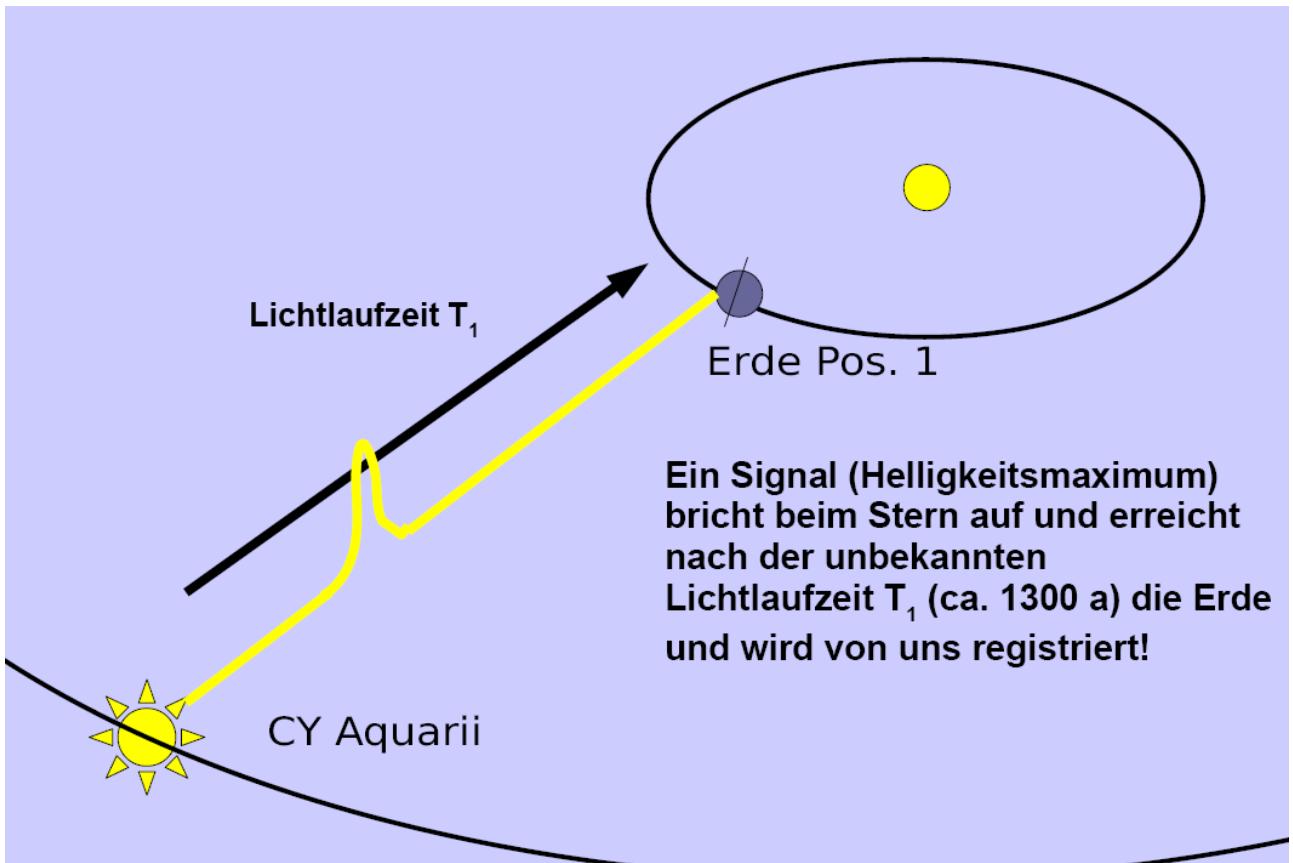


Abb. a) Situation im September

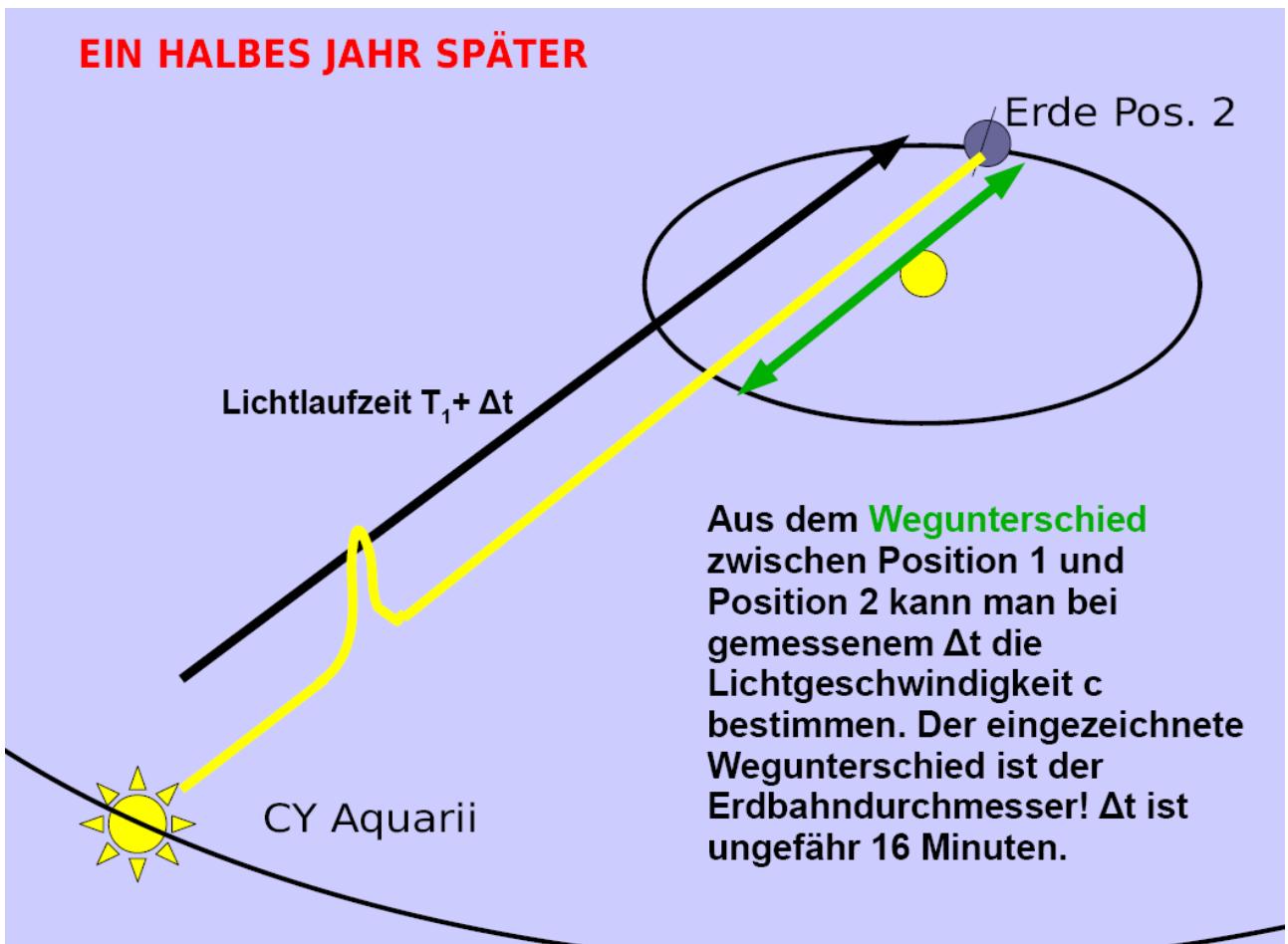


Abb. b) Situation ein halbes Jahr später

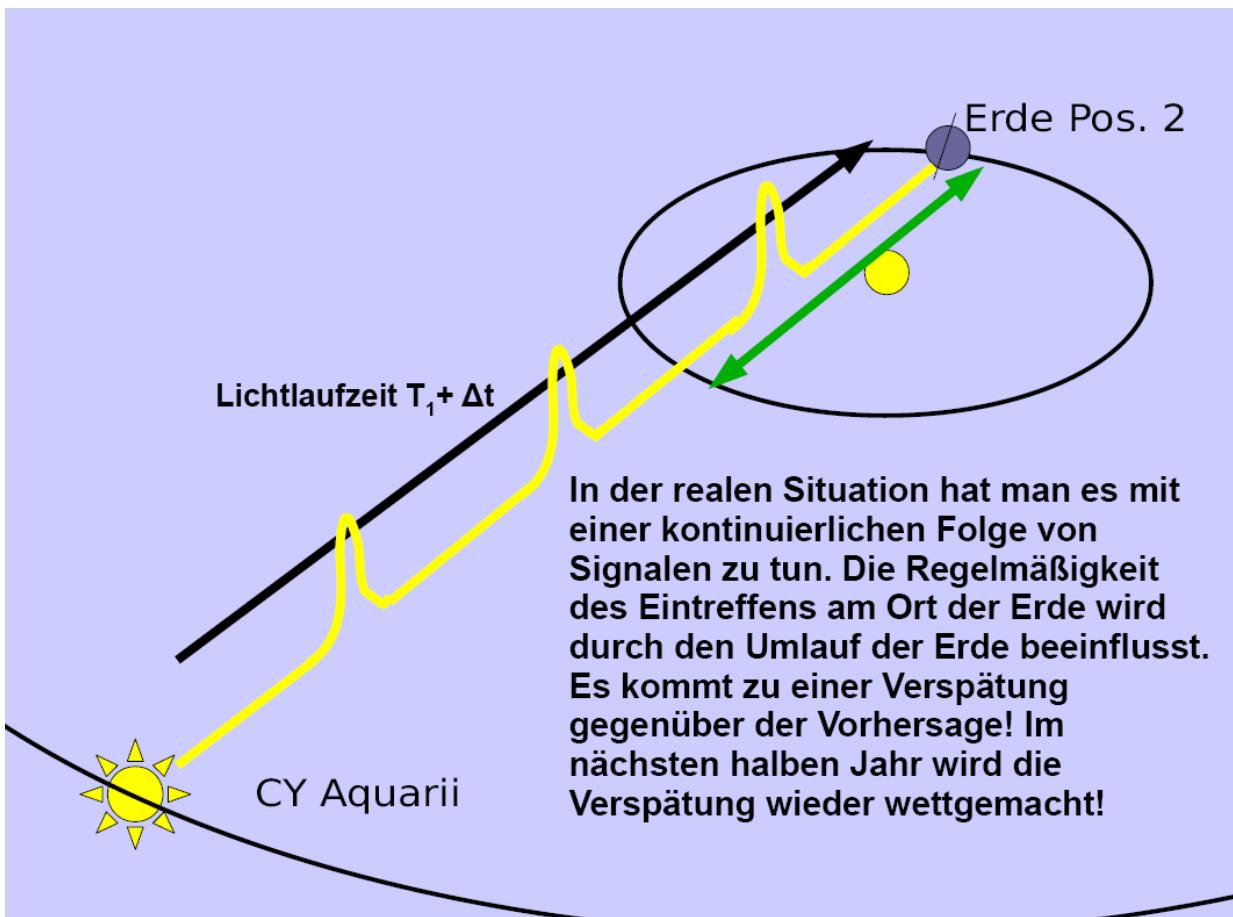


Abb. 5) Mehrere Maxima

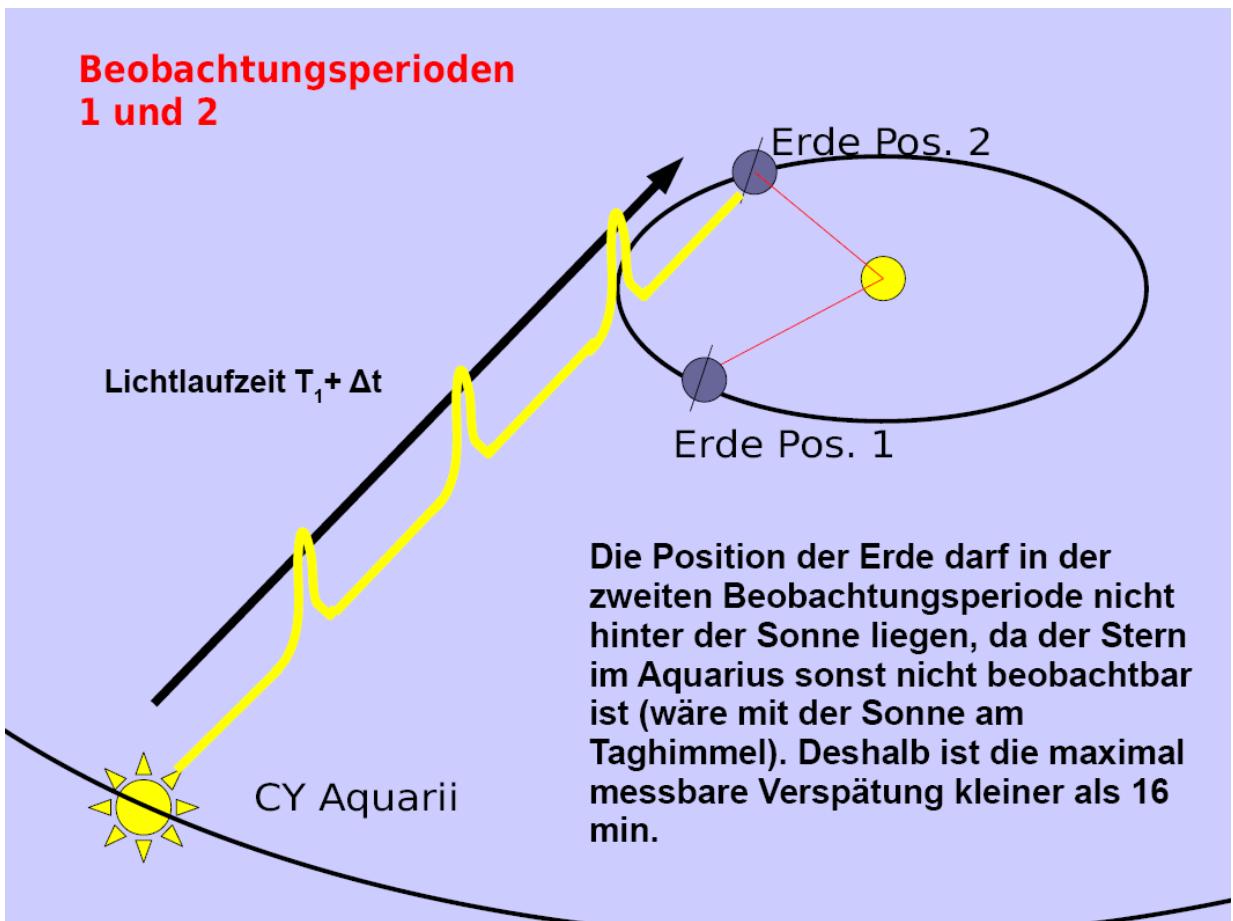


Abb. d) Situation im September und Dezember

Erhebung über der Ekliptik

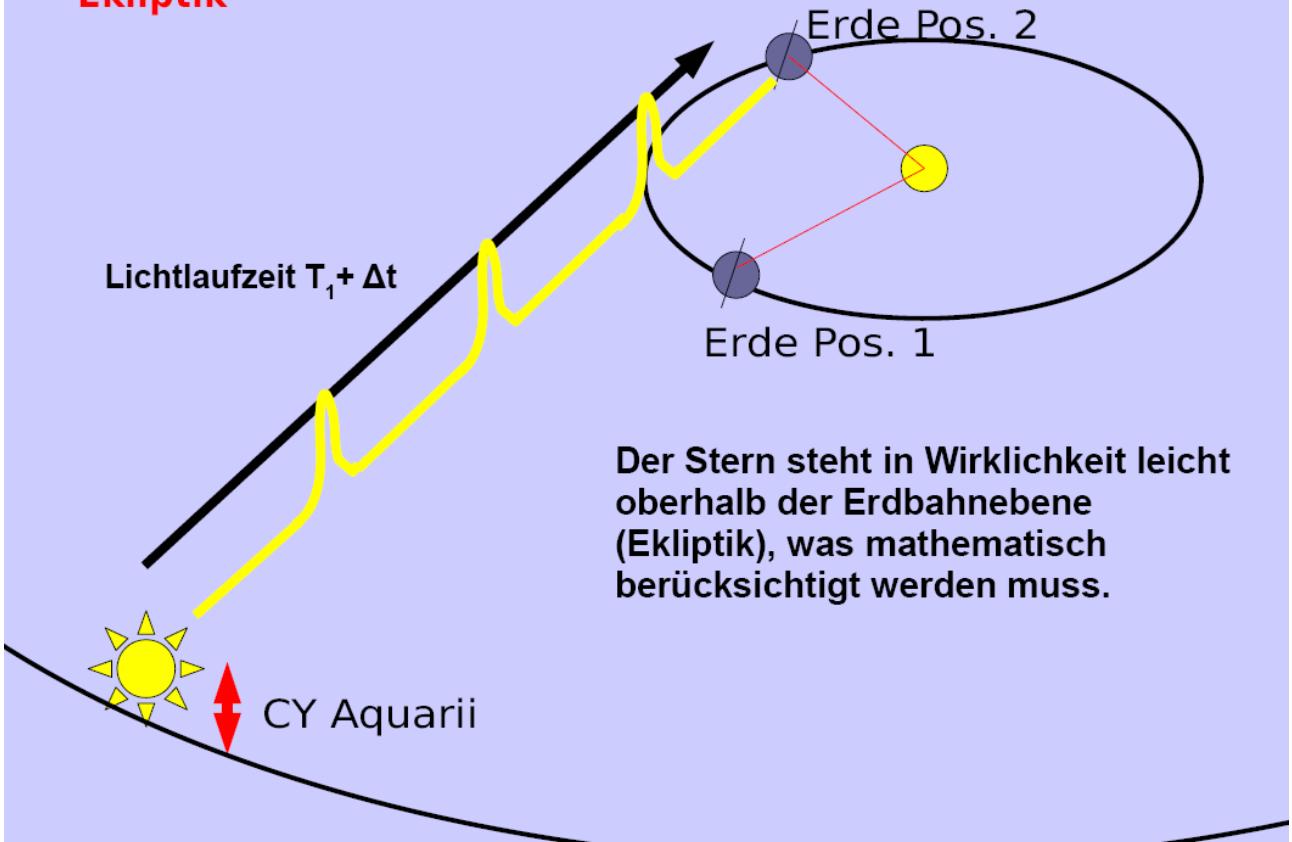


Abb. e) Erhebung über der Ekliptik von ca. 10°

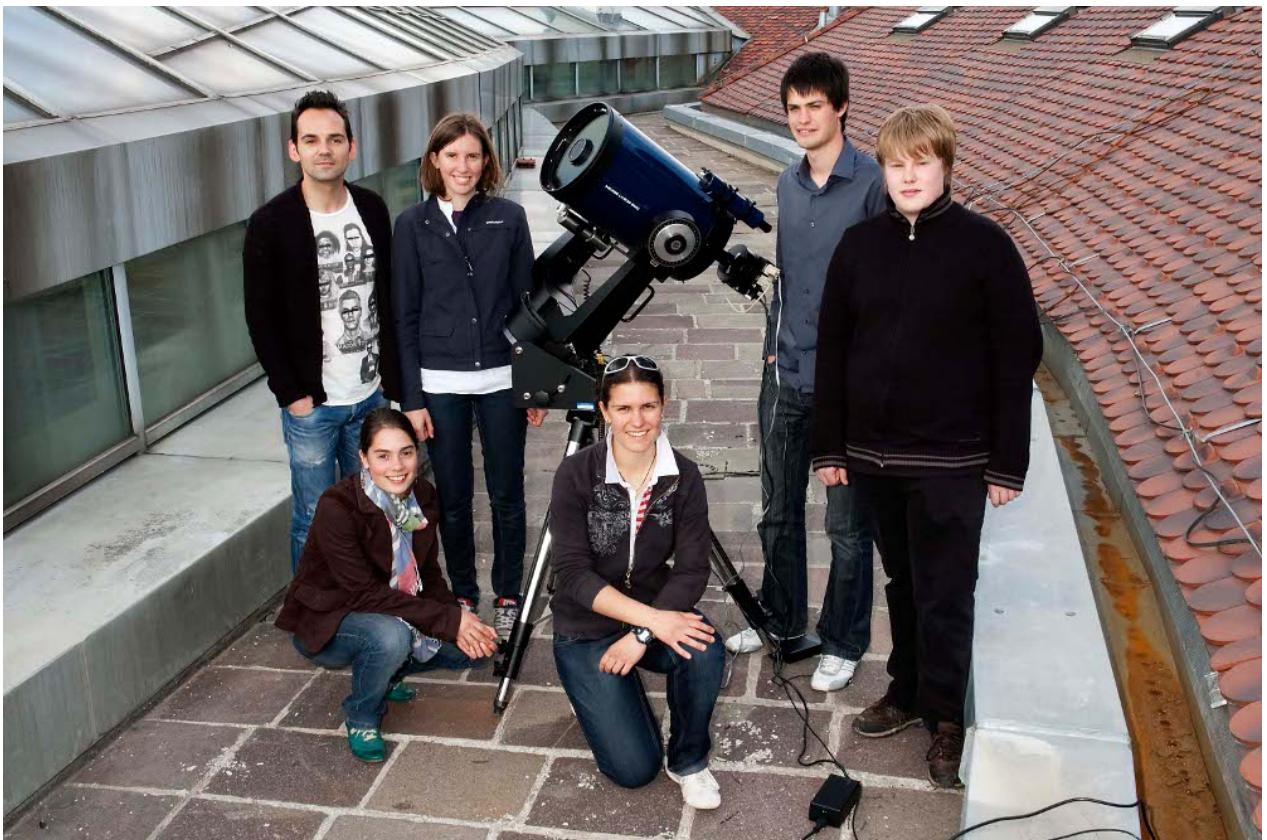
Zusammengefasst bestand die Problemstellung also in der Gewinnung von mehreren Lichtkurven, um daraus die Maximumszeitpunkte und die Periodendauer zu ermitteln. Der Rest sollte mit grundlegenden Kenntnissen aus Trigonometrie zu bewältigen sein.

Diese Einschätzung sollte sich allerdings als übertrieben optimistisch herausstellen. So verschlang die Auswertung der Daten unerwarteterweise mehr Zeit als die Gewinnung der Daten.

Projektgruppe & Ausrüstung

[Zum Inhaltsverzeichnis](#)

Die Astro-Projektgruppe bestand aus fünf Schülern der dritten, vierten und fünften Klasse, namentlich David Cont, Florian Peintner, Brenda Zoderer, Elisabeth Moritz und Maria Lena Campei, sowie dem Physiklehrer Christof Wiedemair.



Im Bild von rechts: Florian Peintner, David Cont, Maria Lena Campei, Elisabeth Moritz, Brenda Zoderer und Christof Wiedemair. Aufnahmeort ist das Dach des Realgymnasiums, wo auch die Beobachtungen stattfanden. Im Fokus des LX200 ist die CCD-Kamera angebracht.

Anfang September kurz nach der Opposition begann unser Team mit der Beobachtungskampagne von CY Aquarii. Hierfür verwendeten wir ein 10"- Schmidt-Cassegrain-Teleskop vom Typ LX200 von Meade in Verbindung mit der digitalen Astro-CCD-Kamera ST8-XME von SBIG.

Als Beobachtungsstandort für die insgesamt 14 Beobachtungsnächte wählten wir das Dach der Schule. Trotz des damit leicht zu erreichenden Standorts gab es viele Ärgernisse. So war das Teleskop auf dem Dach vor der Witterung ungeschützt und musste vor jeder Beobachtung neu aufgebaut und ausgerichtet werden. Vom Ausbalancieren über das Verlegen der Kabel für die Stromzufuhr, das Anschließen des Computers, das Ausrichten auf den Polarstern, den Anschluss der Kamera und das Fokussieren verging meist mehr als eine Stunde bis zum „first light“. Vor allem das Ausrichten des Teleskops wurde in so mancher Beobachtungsnacht aufgrund der spärlichen Beleuchtung und der klinrenden Kälte zum Geduldspiel. Auch der Abbau des Teleskops in den späten Nachtstunden nach der Beobachtung wurde meist zur Tortur.

Die herbstlichen bzw. winterlichen Wetterverhältnisse machten uns schwer zu schaffen: Selten war der Himmel gänzlich wolkenlos, frisch gefallener Schnee musste vom Schuldach geschaufelt werden, plötzlich einsetzender Regen zwang die Gruppe die Beobachtung abzubrechen und das empfindliche Teleskop samt Elektronik eiligst abzubauen. Manche Widrigkeiten führten zu kreativen Gegenmaßnahmen: eine eigens geplante und konstruierte „Teleskopheizung“ (Taukappenheizung) sollte das Beschlagen der Optik durch die feuchte Novemberluft verhindern. Manches ließ sich aber nicht ändern, wie z.B. die starke Aufhellung des Nachthimmels durch die künstliche Stadtbeleuchtung.



Bild: Elisabeth und Maria Lena in einer feucht-kalten Novembernacht. Am frostfreien Streifen an der Taukappe sieht man, dass die Teleskopheizung funktioniert. Der schwarze Zylinder an der Rückseite des Teleskops ist die CCD-Kamera. Unter dem offenen Dachfenster war unser Beobachtertisch.



Bild: Florian räumt in der Dämmerung den Beobachtungsplatz frei.

Die Steuerung des Teleskops und der Kamera erfolgte mit einem Laptop über ein USB-Kabel aus dem Dachgeschoss. Dort machten wir es uns während der Aufnahmen gemütlich. Bis auf gelegentliches manuelles Nachführen des Teleskops, sobald der Stern zum Rand des Bildfelds lief und eventueller Änderungen der Belichtungszeit, gab es in dieser Phase nicht allzuviel zu tun. Die Zeit vertrieben wir uns zumeist mit dem Begutachten und Diskutieren unserer Aufnahmen, mit Musikhören oder mit dem aktuellen Schulratsch. Zwei mal bestellten wir uns auch eine Pizza.



Bild: Wer hart arbeitet muss auch mal was essen...

Die Auswertung wurde größtenteils gemeinsam vorgenommen, soweit sich die verschiedenen Verpflichtungen der einzelnen Gruppenmitglieder unter einen Hut bringen ließen. Nach dem Motto „Vier Augen sehen mehr als zwei!“, wurde die Verarbeitung der enormen Datenmengen zumeist in Zweierteams vorgenommen. Besonders heikle Bearbeitungsschritte wurden mehrfach und unabhängig durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Die letzten Arbeitsschritte wurden gemeinsam besprochen durchgeführt.



Bild: Florian beim angestrengten Übelegen.

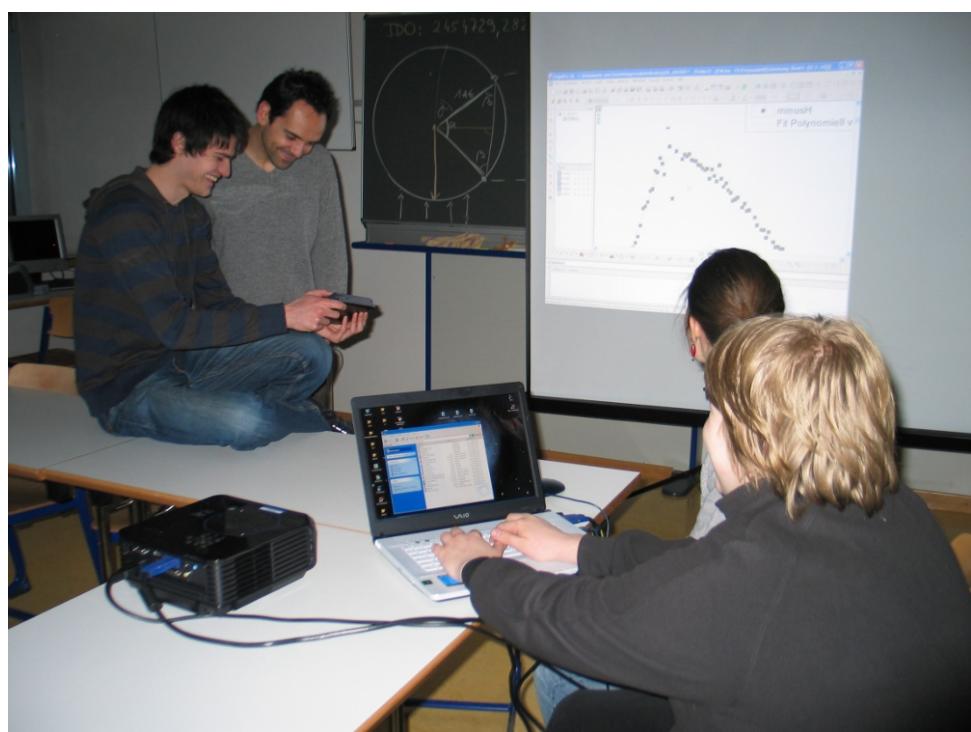


Bild: Diskutieren lässt es sich am besten anhand projizierter Daten.



Bild: Brenda bei der Datenreduktion.

Bei der Auswertung kamen mehrere Laptops und zwei Desktop-PC's zum Einsatz. Die für das Projekt verwendeten Programme waren:

- CCDOPS (Kamerasteuerung, im Lieferumfang der Kamera)
- Scopedriver (Teleskopsteuerung, Testversion)
- Fitswork (Bildbearbeitung, Freeware)
- Muniwin (Photometrie, Freeware)
- Notepad (Editor, Bestandteil des Betriebssystems)
- Excel (Tabellenkalkulation, Microsoft Office)
- Calc (Tabellenkalkulation, OpenOffice.org)
- Origin (wissenschaftliche Datenauswertungssoftware, Testversion)

Besonders Muniwin und Origin haben uns in ihrer Effizienz und Mächtigkeit beeindruckt!

CY Aquarii

Zum Inhaltsverzeichnis

CY Aquarii befindet sich – wie sein Name schon verrät – im Sternbild „Aquarius“, zu Deutsch Wassermann. Damit liegt er in unmittelbarer Nähe zum Himmelsäquator, d.h. der Stern ist an den meisten Orten der Erde zu sehen.

Anfang September steht CY Aquarii in Opposition zur Erde. Der Stern erreicht in dieser Zeit um Mitternacht seinen höchsten Stand. In den folgenden Monaten bis Dezember, die wir zur Beobachtung des Sterns ausnutzen, steht CY Aquarii in den Stunden vor Mitternacht über dem Horizont.

CY Aquarii wird den SX- Phoenicis Sternen zugerechnet, welche allesamt durch ihre extrem hohe zeitliche Variabilität der Lichtintensität auffallen. Dieser schnelle Lichtwechsel wurde 1930 vom Astronom Alfred Jensch entdeckt. Der Stern ändert seine Helligkeit innerhalb von ungefähr 88 Minuten von 11,2 auf 10,4 Magnituden, was einer Erhöhung des Strahlungsflusses um den Faktor 2,1 entspricht. Nichtsdestotrotz ist der Stern auch im Maximum nur in Teleskopen erkennbar! 1936 schlug Jensch vor, den Stern für die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit zu benutzen, was er auch selbst durchführte.

Wie die meisten Sterne bezieht auch CY Aquarii seine Strahlungsenergie aus dem zentralen Wasserstoffbrennen. Die dabei freiwerdende Energie wird durch Strahlung und durch Konvektion an die Sternoberfläche transportiert. Dort wird sie in Form von Photonen in den Raum emittiert. Auch vom Aufbau ähnelt CY Aquarii den meisten Sternen, denn wie diese besteht auch er zum größten Teil aus den beiden im Universum häufigsten Elementen Wasserstoff und Helium. Zusätzlich ist das Gas schwach mit Metallen, d.h. in der Astronomie mit Elementen schwerer als Helium, angereichert, wobei CY Aquarii verglichen mit anderen Sternen eine Unterhäufigkeit an diesen Elementen aufweist.

In einigen Punkten ist CY Aquarii aber durchaus von anderen Sternen verschieden. So ändern sich Oberflächentemperatur und Radius und infolge dessen die Helligkeit laufend. Der dafür verantwortliche Effekt wird als Kappa-Mechanismus bezeichnet.

Nicht pulsierende Sterne liegen im Kräftegleichgewicht. Die nach innen gerichtete Gravitationskraft gleicht die nach außen gerichteten Kräfte wie Strahlungsdruck und Gasdruck aus. In Summe sind diese Kräfte also Null, der Stern dehnt sich weder aus, noch zieht er sich zusammen. Sterne die sich nicht im Kräftegleichgewicht befinden ändern hingegen laufend ihren Radius und ihre Oberflächentemperatur.

Die Ursache für dieses Wachsen und Schrumpfen des Radius ist eine Schale im Stern, in der die Opazität (also die Lichtundurchlässigkeit) mit der Temperatur zunimmt. Wird diese Schale verdichtet, steigt die Dichte und Temperatur und damit die Opazität des Gases. Die aus dem Zentrum des Sterns kommenden Lichtteilchen können diese Schicht nun schwerer passieren und es bildet sich unterhalb ein Strahlungsstau.

Dadurch nimmt der nach außen gerichtete Strahlungsdruck zu. Er überwiegt den Gravitationsdruck und der Stern beginnt sich auszudehnen. Durch die Ausdehnung kühlst sich die Schale wieder ab, die Opazität sinkt wieder. Die aufgestaute Energie kann nun entweichen. Da das Gas eine gewisse Trägheit besitzt stoppt die Ausdehnung nach Überschreiten des Gleichgewichtspunktes der Kräfte nicht sofort wieder und der Stern

dehnt sich weiter aus. Sein Wachstum wird aber zunehmend von der nun dominierenden Gravitation gebremst. Kommt das Ausdehnen zum Stillstand, dreht sich die Situation um: Die nach innen gerichteten Kräfte sind nun größer als Gas- und Strahlungsdruck und der Stern beginnt zu schrumpfen. Der Prozess wiederholt sich.

In diesem wiederholten Wachsen und Schrumpfen des Sternradius finden wir auch die Ursache für den periodischen Lichtwechsel von CY Aquarii: Aufgrund der Abhängigkeit der Kugeloberfläche vom Kugelradius ändert sich die strahlende Fläche des Sterns. Befindet sich CY Aquarii in seiner größten Ausdehnung kann er eine große Menge an Licht emittieren. Ist hingegen der Radius, und folglich auch die Oberfläche, klein weist er eine geringere Helligkeit auf. Allerdings spielt auch die Temperatur für die Gesamthelligkeit eine wichtige Rolle.

Das Spektrum der ausgesandten Strahlung eines Sterns hängt mit der Temperatur der Sternoberfläche zusammen. Je heißer der Stern ist, umso mehr ist der Hauptteil der emittierten Strahlung im Spektrum zu kurzen Wellenlängen hin verschoben. Bei CY Aquarii schwankt dieses Abstrahlungsmaximum aufgrund seiner wechselnden Temperatur zwischen 400 und 500 nm. Damit geht eine Farbänderung der Sternoberfläche zwischen weiß und gelbweiß einher, welche aber für unsere Zwecke irrelevant ist.

Die letzte und verlässlichste Angabe für die Periodendauer von CY Aquarii findet sich in einem Artikel von Fu und Sterken in „Astronomy and Astrophysics“, v.405, p.685-688 aus dem Jahre 2003 mit dem Titel „Long-term variability of the SX Phoenicis star CY Aquarii“. Dieser Artikel ist unter <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003A&A...405..685F> abrufbar. Dort wird die Periodendauer zu $P = 0,061038394$ d angegeben. Im Folgenden wird diese Periodendauer als „Literaturperiode“ bezeichnet.

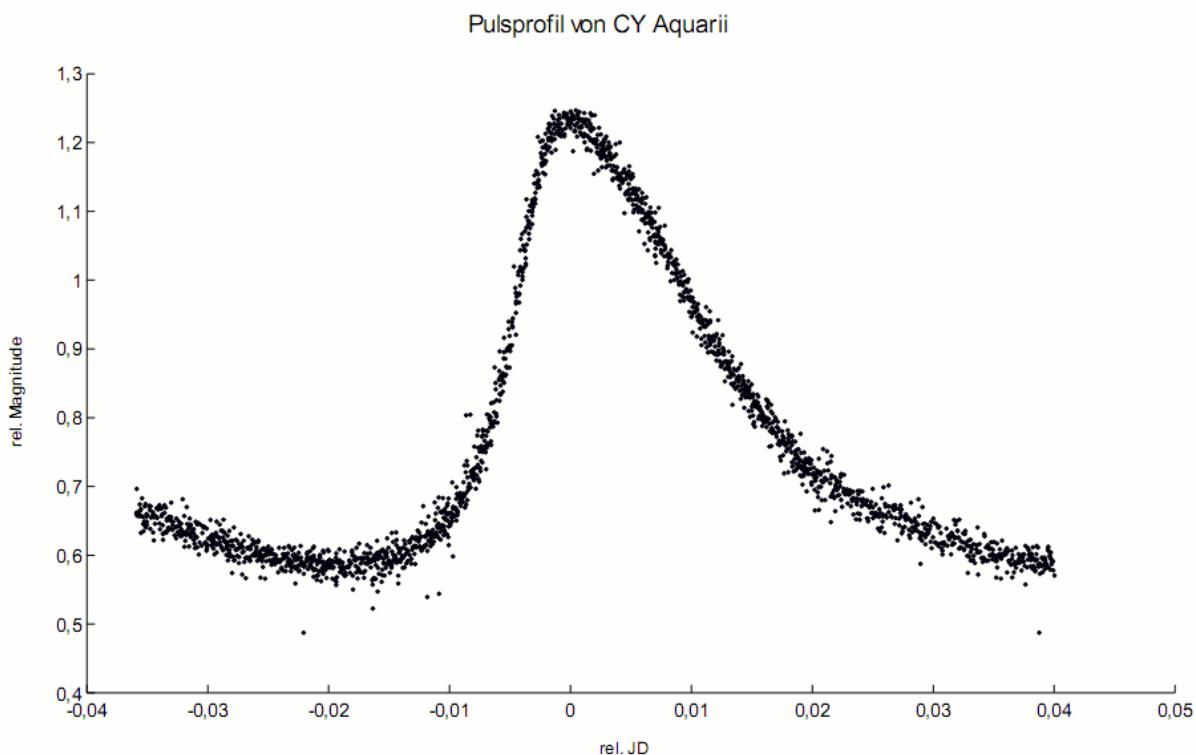


Diagramm: Pulsprofil von CY Aqr, gewonnen durch Überlagerung von 10 Einzelmaxima.

Beobachtungen

Zum Inhaltsverzeichnis

Für die Beobachtungen auf dem Schuldach wurde stets das LX200 der Schule mit der CCD-Kamera ST8-XME ohne Filter benutzt. Auf ein Filter wurde bewusst verzichtet, um die Belichtungszeit klein zu halten. Diesem Ziel diente auch das Binning des Chips auf 2x2 Pixel. So konnte CY Aquarii zumeist innerhalb von 20 Sekunden mit ausreichend vielen Umgebungssternen abgebildet werden. Im Autograb-Modus führt das Steuerungsprogramm CCDOPS die Datengewinnung selbst durch, der Benutzer muss nur gelegentlich eingreifen, um z.B. die Teleskopausrichtung oder den Fokus manuell zu korrigieren. Als besonders aufwändig erwiesen sich das ständige Auf- und Abbauen, sowie das Einrichten des Teleskops.

CCDOPS speichert zu jedem der gewonnen Bilder einen Zeitwert, den das Programm aus der Computersystemzeit ausliest. Das bedeutete, dass der verwendete Laptop vor jedem Einsatz über das Internet mit einem Zeitserver synchronisiert werden musste. Wir entschieden uns für den voreingestellten Zeitserver time.windows.com in der Hoffnung, dass dieser die für uns benötigte Genauigkeit aufweist.

Die Beobachtungen von CY Aquarii begannen wetterbedingt und aufgrund von Schwierigkeiten, im Gewimmel der Sterne den richtigen zu finden leider erst am 19.09.2008. Eine feste und bleibende Aufstellung des Teleskops in einer Sternwarte hätte uns hier viel Ärger erspart.

Von diesem Datum an lief der Beobachtungszeitraum bis zum 28.12.08. Beobachtet wurde an 14 Abenden, wobei allerdings wetterbedingt nur 12 Abende verwertbare Daten lieferten. Die Tabelle zeigt relevante Informationen zu den Beobachtungsnächten:

Datum	Anzahl Bilder	Anzahl Maxima
19.09.2008	486	3
20.09.2008	704	4
28.09.2008	480	2
09.10.2008	582	2
17.10.2008	174	3
21.10.2008	324	2
10.11.2008	453	3
25.11.2008	466	2
08.12.2008	527	3
26.12.2008	455	2
27.12.2008	417	1
28.12.2008	223	1

Somit wurden mit den Kalibrierungsaufnahmen insgesamt fast 6000 Aufnahmen von CY Aquarii gewonnen, was einer Datenmenge von 4,5 Gigabyte ergibt. Unser Beobachtungszeitraum überdeckt fast 1700 Perioden des Sterns, wobei natürlich nur für 28 Maxima auch tatsächlich Maximumszeiten bestimmt werden konnten.

Das Wetter war im Herbst und Winter 2008 denkbar ungeeignet für astronomische Beobachtungen, selten war der Himmel wolkenlos. Aufgrund von solchen leichten Schleierwolken hatten wir insbesondere große Probleme hochwertige Flatfields (Kalibrierungsaufnahme im Dämmerungslicht) für die anschließende Datenreduktion zu gewinnen. Außerdem sind wir im mobilen Betrieb des Teleskops immer wieder gezwungen, die Kamera vom Teleskop zu trennen und wieder anzubringen, was uns nicht auf reproduzierbare Art und Weise gelang. Die Nachführung war oftmals ungenau, was zu Unterbrechungen in der Datengewinnung für Korrekturbewegungen des Teleskops führte. Das generell schlechte Seeing auf dem Schuldach und insbesondere bei der geringen Horizonthöhe von CY Aquarii im Dezember machte das Bewerten des Fokus oftmals zum Geduldsspiel. Einmal beschlug bei hoher Luftfeuchtigkeit die Optik mit gefrierendem Tau, was uns zum Bau einer Taukappenheizung veranlasste. Ein anderes Mal musste die Beobachtung wegen plötzlich einsetzenden Regens abgebrochen und das Teleskop eiligst abgebaut werden.

Generell hat uns diese Erfahrung sehr an der Tauglichkeit des Schuldaches für astronomische Beobachtung zweifeln lassen. Der Wunsch nach einer permanenten Aufstellung des Teleskops in einer Sternwarte außerhalb der Stadt ist gewachsen.

Auswertung

[Zum Inhaltsverzeichnis](#)

Die Arbeitsschritte der Auswertung lassen sich wie folgt gliedern:

Nr.	Arbeitsschritt	Methode / Programm	Ergebnis
0	Beobachtung	Teleskop, CCD	Rohbilder
1	Dark- und Flatkorrektur	Muniwin	Korrigierte Rohbilder
2	Photometrie	Muniwin, Excel	Helligkeitswerte, Lichtkurven
3	Fit der Lichtkurven, Finden der Maxima	Origin	Maximumszeitpunkte
4	Bestimmen der Periodendauer	Excel	Periodendauer
5	Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit	Excel, Origin, Calc	Lichtgeschwindigkeit

0. Beobachtung

Nach dem Abschluss der Beobachtungsphase lagen an die 6000 Graustufenbilder mit einer Bittiefe von 16 Bit und dazugehörigem Aufnahmezeitpunkt vor. Desweiteren etliche Kalibrationsaufnahmen zur Bildkorrektur (Darks und Flats). Nun galt es diese Flut von Daten schrittweise zu reduzieren.

1. Dark- und Flatkorrektur

Für gewöhnlich führen wir die Dark- und Flatkorrekturen an CCD-Bildern mit Fitswork oder CCDSoft durch. Dank eines Hinweises von Herbert Raab (www.astrometrica.at) wandte ich mich an Klaus Bernhard, welcher mir für die gesamte Photometrie das freie Programm „muniwin“ empfahl (<http://c-munipack.sourceforge.net>). Unsere Erfahrungen mit dem Programm sind ausgesprochen positiv. Es ist intuitiv verständlich, klein und schnell. Auf der folgenden Seite sei ein exemplarischer Screenshots gezeigt.

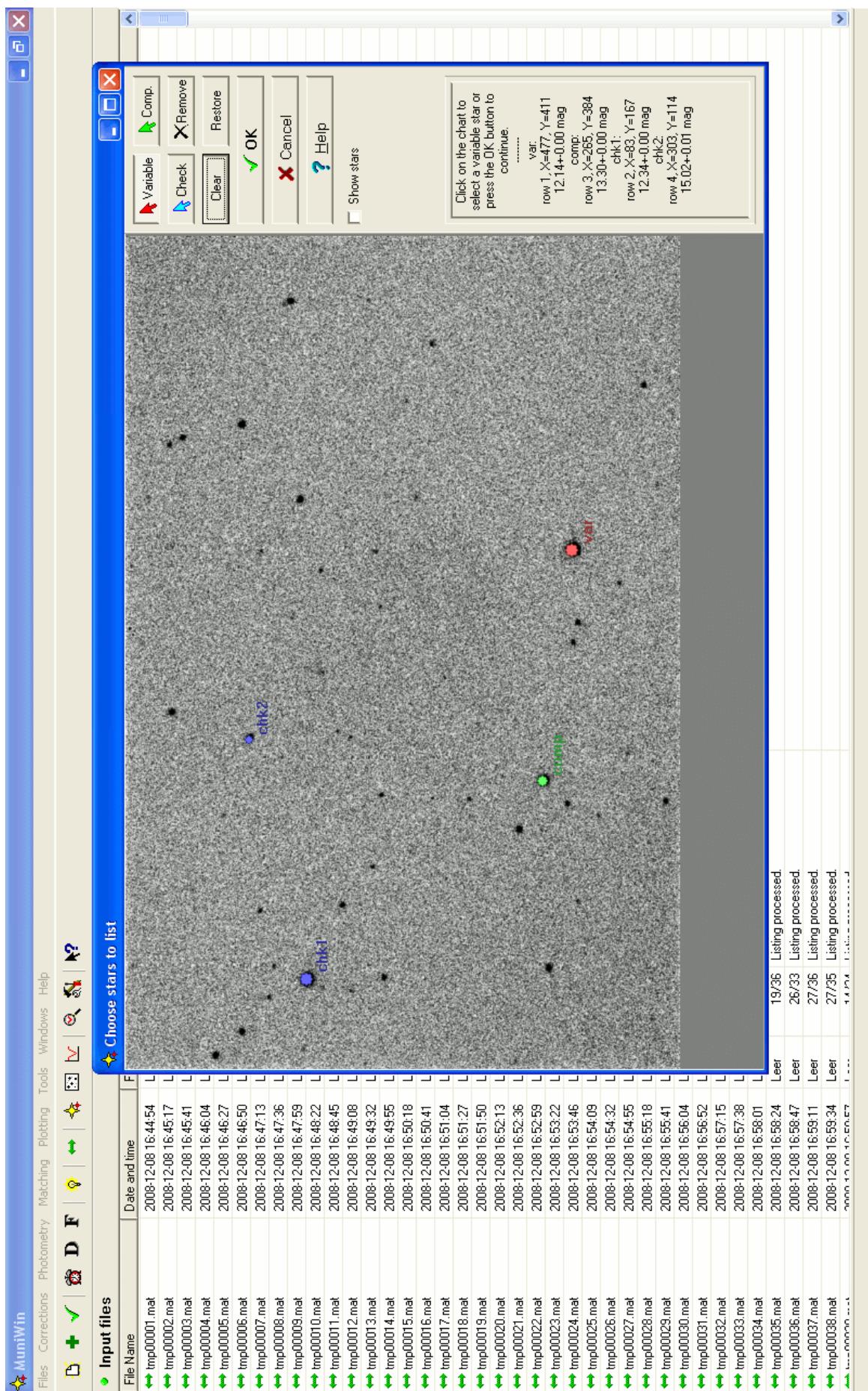


Abb.: Screenshot aus Muniwin

2. Photometrie

Bei der Photometrie von Sternen wird die in der Sternabbildung gesammelte Lichtmenge quantifiziert. Muniwin legt zu diesem Zweck kreisrunde Aperturen um jedes Helligkeitszentrum auf dem Bild das bestimmten Kriterien entspricht und summiert alle Pixelwerte innerhalb dieser Apertur auf. Die Apertur muss dabei groß genug sein, um den gesamten Stern zu umfassen. Ist die Apertur zu klein, so wird die Helligkeit des Sterns unterschätzt. Ist sie zu groß zählt man irgendwann nur noch den Himmelshintergrund dazu. Muniwin erlaubt es, die Größe der Apertur schrittweise zu erhöhen und die Geschmeidigkeit der Lichtkurve gleichzeitig mit dem Auge zu beurteilen. Das Ergebnis der Photometrie mit Muniwin ist eine Lichtkurve wie auch eine Tabelle, welche anschließend z.B. in Microsoft Excel oder OpenOffice.org Calc importiert werden kann. In diesen Programmen haben wir den Tabellen und Lichtkurven den Feinschliff gegeben und sie für die Weiterverarbeitung in Origin vorbereitet.

3. Fit der Lichtkurven, Finden der Maximumszeitpunkte

Hat man eine Lichtkurve wie in Abb. 4 vor sich und soll daraus die Zeitpunkte der Helligkeitsmaxima ermitteln klingt das zunächst nach einem leichten Auftrag. Man zieht einfach vom höchsten Punkt eine Parallele zur y-Achse und liest das Julianische Datum ab. Will man es aber genau und objektiv machen, so wird das Ganze schon komplizierter. Im Realgymnasium kommt man im Laufe seiner Schulkarriere in der Regel nur mit einer Ausgleichsgeraden in Berührung, bei der verlangt wird, dass eine Gerade eine gegebene Punktemenge möglichst gut annähert. Für solch einen Auftrag wird zumeist Excel oder auch der Voyage200 von Texas Instruments herangezogen.

In unserem Fall folgen die Datenpunkte aber keiner Geraden und folglich ist ein linearer Fit nutzlos. Der Versuch eine periodische Funktion zu finden, welche die gesamte Lichtkurve eines Beobachtungsabends wiedergibt schlug fehl, sodass wir uns darauf verlegten, einzelne „Peaks“ mit Hilfe von Polynomen möglichst hohen Grades anzunähern. Da bei Excel bei Polynomen sechster Ordnung Schluss ist, beschlossen wir es mit der Testversion von Origin8 Pro zu versuchen. Das Programm verlangte einiges an Einarbeitung, erwies sich in unseren Augen aber als ausgesprochen professionell und mächtig. So „fitteten“ wir sämtliche „Peaks“ mit Polynomen neunter Ordnung und ließen Origin auch gleich das Maximum der Fit-Funktion durch Ableiten finden. Auch die Fehlerbalken die in der Tabelle aus Muniwin enthalten waren wurden bei diesem Vorgang von Origin berücksichtigt. Die Maximumszeitpunkte wurden wiederum in einer Excel-Tabelle gesammelt.

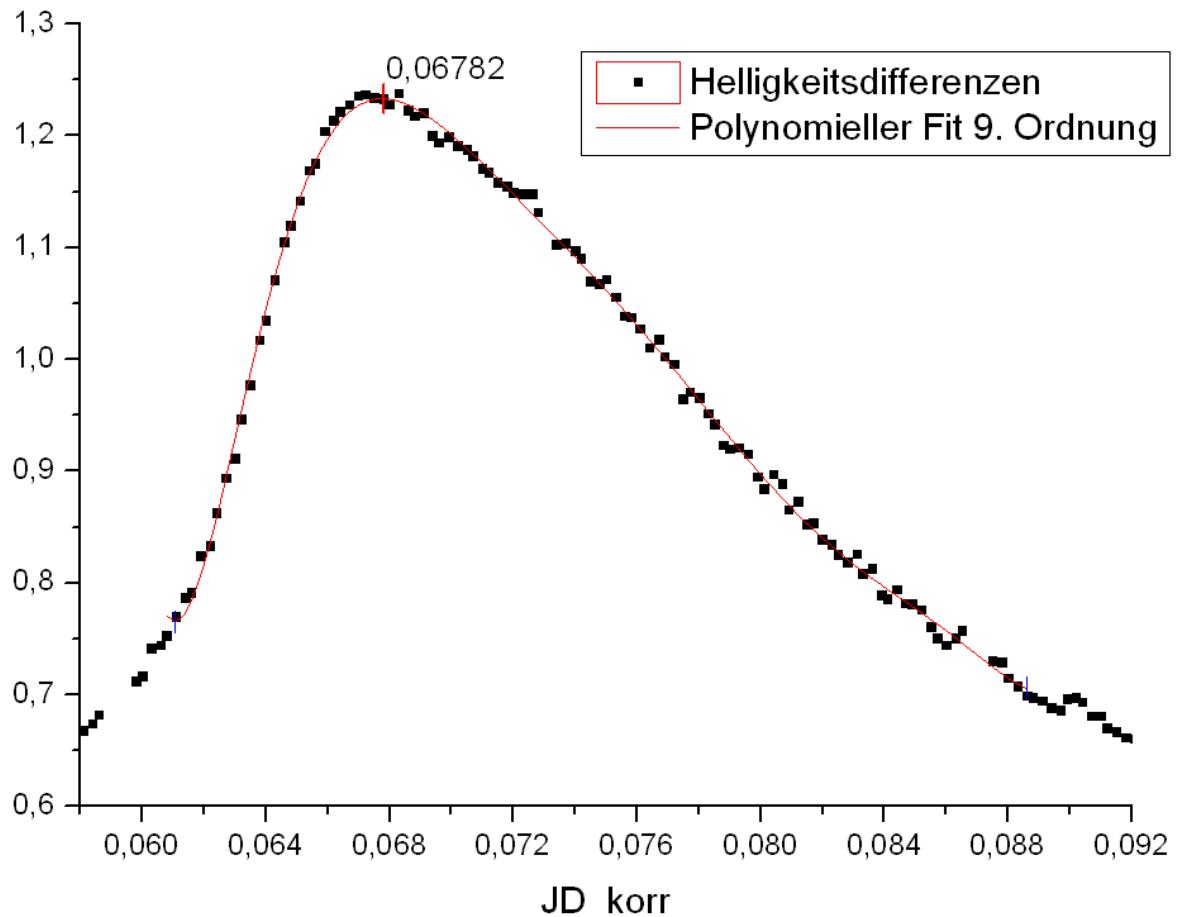


Diagramm: Fit eines Helligkeitsmaximums mit einem Polynom neunter Ordnung mit Origin.

Im Diagramm sieht man, dass die Flanken der Lichtkurve so steil zu sein scheinen, dass selbst die neunte Ordnung für den Fit nicht auszureichen scheint. Solange derselbe Fehler sich aber in jedem „Peak“ wiederholt, hat dies keinen Einfluss auf das Endergebnis.

Bis zu diesem Zeitpunkt wurden alle Arbeiten auf drei 2er-Teams aufgeteilt. Alle folgenden Arbeitsschritte wurden zur Vermeidung von Fehlern unabhängig voneinander von je zwei Teams erledigt und das Ergebnis anschließend verglichen.

Die nächste Tabelle zeigt das Ergebnis dieses Schrittes. Die Julianischen Daten der Maximumszeitpunkte wurden in das gewöhnliche Kalenderdatum umgewandelt.

Bestimmung der Maximumszeiten aus den Lichtkurven (ORIGIN)							
DATUM	MAX NR.	MAX NR.	DATUM	UHRZEIT	JD	ANMERKUNGEN	AUSWERTER
an diesem Tag	seit Beginn	des Max.	des Max.	des Maximums			
080919	1	1	19.09.08	19:11:40,99	2454729,299780		Florian, David, Brenda
	2	2	19.09.08	20:39:13,25	2454729,360630		Florian
	3	3	19.09.08	22:07:22,66	2454729,422130		Florian
	4	4	19.09.08	23:33:44,93	2454729,481779	schlechtes Maximum	Florian
080920	1	17	20.09.08	18:37:59,23	2454730,276380		Brenda
	2	18	20.09.08	20:06:04,32	2454730,337550		Brenda
	3	19	20.09.08	21:33:33,12	2454730,398300	gutes Maximum	Brenda
	4	20	20.09.08	23:01:12,29	2454730,459170		Brenda
080928	1	149	28.09.08	20:00:01,44	2454738,333350	gutes Maximum	David
	2	150	28.09.08	21:27:57,89	2454738,394420	gutes Maximum	David
081009	1	329	09.10.08	19:41:56,26	2454749,321140		Florian
	2	330	09.10.08	21:09:51,84	2454749,382260		Florian
081017	1	459	17.10.08	18:09:25,92	2454757,256550		Brenda
	2	460	17.10.08	19:37:24,96	2454757,317650		Brenda
	3	461	17.10.08	21:04:44,26	2454757,378290		Brenda
081021	1	525	21.10.08	18:50:56,83	2454761,285380		Brenda
	2	526	21.10.08	20:18:41,18	2454761,346310		Brenda
081110	1	852	10.11.08	17:54:53,28	2454781,246450		Florian
	2	853	10.11.08	19:22:29,86	2454781,307290		Florian
	3	854	10.11.08	20:50:00,38	2454781,368060		Florian
081125	1	1098	25.11.08	18:19:19,49	2454796,263420	gutes Maximum	David
	2	1099	25.11.08	19:47:02,98	2454796,324340		David
081208	1	1310	08.12.08	16:54:42,62	2454809,204660		Wiedemair
	2	1311	08.12.08	18:22:38,21	2454809,265720		Wiedemair
	3	1312	08.12.08	19:47:41,86	2454809,326590		Wiedemair
081226	1	1605	26.12.08	17:06:17,28	2454827,212700		Brenda
	2	1606	26.12.08	18:34:05,09	2454827,273670		Brenda
081227	1	1622	27.12.08	18:00:57,02	2454828,250660		David
	2	4623	27.12.08	19:28:36,19	2454828,311530	schlechtes Maximum	David
081228	1	1639	28.12.08	18:54:52,70	2454829,288110		Brenda

Tabelle: Ergebnis nach der Photometrie und den Fits. Screenshot aus Calc.

3. Finden der Periodendauer

In der Literatur wird der Wert der Periodendauer für CY Aquarii in einer Arbeit von Fu und Sterken aus dem Jahr 2003 zu 0,061038394 +/- 0,000000006 Tagen angegeben. Das entspricht 87 Minuten und 53,72 Sekunden. In einer älteren Arbeit von Powell, Joner und McNamara aus dem Jahre 1995 wird noch ein Wert von 0,061038610 Tagen genannt. Das entspricht einem Unterschied von ca. 0,02 Sekunden. Solch kleine Unterschiede mögen belanglos erscheinen, sind aber für unsere Zwecke durchaus relevant, wie wir später sehen werden. In obigen Arbeiten wird außerdem auf mögliche Änderungen der Periodendauer und deren Ursachen eingegangen.

Pfau gibt in seiner Internet-Anleitung zur Durchführung einer Lichtgeschwindigkeitsmessung unter <http://www.astro.uni-jena.de/Users/pfau/SuW2004/text.html> an, dass die Bestimmung der Periodendauer mit Amateurmitteln nur Sinn macht, wenn „*wirklich zuverlässige Beobachtungen vorliegen, die vor allem einen längeren Zeitraum überdecken*“. Wir wollten in unserem Projekt die Bestimmung der Periode in jedem Fall selbst versuchen, da es uns nicht sinnvoll erschien, für die Bestimmung einer Konstante die in der Literatur bekannt ist, eine andere Konstante aus der Literatur zu benutzen. Einmal mussten wir das leider ohnehin tun, da wir den Abstand Erde-Sonne in der Auswertung als bekannt annehmen müssen.

In der Physik ist die Bestimmung einer Periodendauer etwas, das ausgesprochen genau gemacht werden kann. Will man den gegebenen Zeitmessfehler auf ein Tausendstel seiner Größe drücken, so genügt es einfach, die Zeit für Tausend Schwingungen zu

messen und diesen Wert dann durch eintausend zu teilen. Der Messfehler, der nur einmal auftritt, wird durch die Division auch um den Faktor 1000 kleiner.

Nun ist unsere Periode leider über das Jahr wegen der Beobachtungsposition auf der Erde leicht variabel und die Schwingung ist auch wegen Wetter und Tageslicht nicht ununterbrochen beobachtbar. Das zweite Hindernis ist leicht behebbar, indem man eben möglichst viele beobachtbare Schwingungen aufzeichnet und die Lücken dazwischen interpoliert. Das erste Hindernis könnte man aus dem Weg räumen, indem man die Lichtkurven einfach um den Laufzeiteffekt des Lichtes korrigiert. Dazu müsste man aber die Lichtgeschwindigkeit benutzen und hätte damit genau den Effekt herauskorrigiert, um den es uns geht. Stattdessen könnte man CY Aquarii zur sogenannten Oppositionszeit intensiv beobachten. Die Oppositionszeit ist jene Zeit, zu der die Erde genau zwischen Sonne und CY Aquarii steht. Der Abstand der Erde zu CY Aquarii kann in den Tagen vor und nach der Opposition in guter Näherung als konstant angenommen werden (siehe Skizze zur Bahngeometrie – ekliptikale Länge der Erde 341°) - Lichtlaufzeiteffekte würden in der Periodendauer keine Rolle spielen.

Leider haben wir unsere Beobachtungen von CY Aquarii erst am 19.09.2008 beginnen können, also erst zwei Wochen nach der Oppositionsstellung. Zu diesem Zeitpunkt hat die Erde bereits eine ekliptikale Länge von 357° , ist also bereits 16° auf ihrer Bahn um die Sonne vorangeschritten. Ihr Geschwindigkeitsvektor hat damit bereits eine kleine Komponente, die von CY Aquarii weg weist und die Periodendauer hat sich für einen Beobachter auf der Erde bereits um einen kleinen Betrag erhöht.

Weitere Beobachtungen von CY Aquarii haben am 20.09.2008 und am 28.09.2008 stattgefunden. Leider sind die Beobachtungen vom 20.09.2008 mit einem Zeitfehler behaftet, der durch fehlende Synchronisierung der Computersystemzeit mit dem Zeitserver hervorgerufen wurde. Am Tag darauf haben wir versucht diesen Fehler zu quantifizieren wobei wir auf einen Wert von 4 Sekunden gekommen sind. Die Daten vom 20.09.2008 wurden bei der Auswertung mit Muniwin in weiterer Folge um diese 4 Sekunden korrigiert.

Die Periodendauer von CY Aquarii haben wir nun wie folgt bestimmt:

Wir haben verschiedene Kombinationen von Beobachtungsnächten betrachtet und für die vorhandenen Maximumszeitpunkte Zeitdifferenzen gebildet, welche anschließend durch die Anzahl der dazwischenliegenden Perioden durchdividiert wurde, um die Genauigkeit zu erhöhen. Die Anzahl der dazwischenliegenden Perioden ließ sich durch die ungefähre Kenntnis der Periodendauer leicht bestimmen. Maximumszeitpunkte die in derselben Nacht lagen wurden nicht kombiniert, da der zu erwartende Fehler zu groß geblieben wäre.

Sämtliche ermittelte Periodendauern wurden anschließend arithmetisch gemittelt. Die folgende Tabelle gibt die Ergebnisse für fünf verschiedene Kombinationen von Beobachtungsnächte wieder. In den letzten beiden Spalten werden zwei auftretende Fehler abgeschätzt.

Jeder Punkt in unseren Lichtkurven steht für eine 20-sekündige Belichtung. Damit wird unabhängig von sonstigen Einflüssen ein Limit für die Genauigkeit der ermittelten Maximumszeiten gesetzt. In der Tat schwanken die Zeitdifferenzen zwischen je zwei aufeinanderfolgende Perioden um ungefähr 20 Sekunden. Der Fit mit einem Polynom neunter Ordnung für jedes Maximum konnte hier offenbar keine höhere Genauigkeit

erbringen. Fehler A wird nun als Quotient dieser 20 Sekunden und der Anzahl der zwischen den beiden Beobachtungsnächten liegenden Perioden berechnet. Je weiter die beiden Beobachtungsnächte auseinander liegen, umso kleiner würde der Fehler A durch die Division werden. Allerdings wächst dann der Fehler B, wie wir gleich sehen werden.

Fehler B hängt mit der Laufzeit des Lichtes zusammen. Die Erde bewegt sich auf ihrer Kreisbahn um die Sonne mit einer Geschwindigkeit von 30 km/s. Das bedeutet, dass sie in den 88 Minuten zwischen zwei Maxima eine Strecke von ca.

$$s = 30 \frac{km}{s} \cdot 60 \frac{s}{min} \cdot 88 min = 158400 km \text{ zurücklegt.}$$

Steht die Erde bei einer ekliptikalnen Länge von 341° , steht also CY Aquarii in Opposition, so bewegt sich die Erde orthogonal auf die Sichtlinie zu CY Aquarii. Ein zweites nachfolgendes Maximum muss denselben Weg wie das erste zurücklegen und es gibt damit keine Verspätung in der Lichtlaufzeit. Die bestimmte Periodendauer würde der Ruheperiodendauer am Ort des Sterns entsprechen. Wächst die ekliptikale Länge der Erde aber, so gibt es eine wachsende Komponente der Erdbewegung welche entlang der Sichtlinie zu CY Aquarii liegt. Nachfolgende Maxima müssen längere Wege zurücklegen und es kommt zu einer Verspätung aufgrund der Lichtlaufzeit. Die beobachteten Perioden werden länger. Die 158400 km müssen mit dem Sinus der Differenz der ekliptikalnen Längen zwischen CY Aquarii und der Erde (und eigentlich auch mit dem Cosinus der ekliptikalnen Breite von CY Aquarii) projiziert werden. Der resultierende Fehler wird in der Tabelle Fehler B genannt. Er wächst mit zunehmendem Abstand zur Oppositionszeit Anfang September.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Ergebnisse:

Nr.	Tageskombination	Periodenwert [d]	I der Erde – I CY Aquarii	Fehler A	Fehler B
1	19.09. und 20.09.	0,061030663	16°	$1,25s = 1,4 \cdot 10^{-5} d$	$0,14 s = 1,7 \cdot 10^{-6} d$
2	19.09. und 28.09.	0,061037543	21°	$0,14 s = 1,6 \cdot 10^{-6} d$	$0,19 s = 2,2 \cdot 10^{-6} d$
3	20.09. und 28.09.	0,061038444	21°	$0,14 s = 1,6 \cdot 10^{-6} d$	$0,19 s = 2,2 \cdot 10^{-6} d$
4	17.10. und 21.10.	0,061043520	49°	$0,31 s = 3,6 \cdot 10^{-6} d$	$0,40 s = 4,6 \cdot 10^{-6} d$
5	26.12., 27.12. und 28.12	0,061045895	118°	$0,83 s = 9,6 \cdot 10^{-6} d$	$0,47 s = 5,4 \cdot 10^{-6} d$

Der Fehler A ist tatsächlich bei eng beisammen liegenden Tageskombinationen groß. Fehler B ist hingegen umso größer, je weiter man von der Oppositionsstellung von CY Aquarii entfernt ist. Wir halten die Kombinationen 2 und 3 für die verlässlichsten, da beide Fehler klein und in derselben Größenordnung sind.

Natürlich könnte man geneigt sein, den Fehler B einfach von der ermittelten Periodendauer abzuziehen, da man ja weiß, dass die Periodendauern zu größeren Werten hin verfälscht werden, damit hätte man aber die Lichtgeschwindigkeit, welche ermittelt werden soll, in deren Bestimmung mit hineingenommen, was nicht zulässig ist.

Eine ausführliche Beobachtung von CY Aquarii in der Gegend der Oppositionszeit 2009 von Ende August bis Mitte September wäre für die Bestimmung einer guten Periodendauer wünschenswert. Wenn zudem die Belichtungszeit unter 20 Sekunden gedrückt werden könnten wäre das eine weitere Verbesserung, die jedoch ein größeres Teleskop erfordern würde. Vielleicht können wir hier die Hilfe der Amateurastronomen Max Valier bzw. der Unisternwarte München mit dem Observatorium Wendelstein erhalten.

3. Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

Pfau schlägt in seiner Anregung vor, mehrere Maximumszeitpunkte, welche auch über mehrere Tage verteilt sein können zu einem Normalmaximum zu kombinieren. Damit kann der Fehler in der Maximumszeit durch Mittelung klein kriegen. Ein ähnliches Vorgehen haben wir bereits bei der Bestimmung der Periodendauer benutzt.

Für die Bestimmung des ersten Normalmaximums haben wir die Lichtkurven vom 19.09.2008 und des 20.09.2008 benutzt. In unserer fortlaufenden Nummerierung liegen die Maxima Nr. 1, 2, 3, 17, 18, 19 und 20 auf diesen Lichtkurven. Die Maxima zwischen Nr. 3 und 17 waren für uns nicht beobachtbar. Nichtdestotrotz haben wir uns dafür entschieden das Maximum Nr. 10 als Normalmaximum zu wählen. Dies hat den von Pfau erläuterten Vorteil, dass somit der Fehler aus der Unkenntnis der genauen Periode klein gehalten wird. Durch die nachfolgende Beschreibung des Vorgehens wird dieser Umstand klar:

Zählt man zum Maximum Nr. 1 neunmal die Periodendauer hinzu, sollte man auf den Zeitpunkt des Maximums Nr. 10 kommen. Analog zählt man zum Maximum Nr. 2 die Periodendauer achtmal hinzu. Vom Maximum Nr. 20 zählt man die Periodendauer zehnmal weg. Man kann den Zeitpunkt des 10. Maximums also wie folgt „ermitteln“:

$$\bar{t}_{10} = \frac{(t_1 + (10-1) \cdot P) + (t_2 + (10-2) \cdot P) + (t_3 + (10-3) \cdot P) + (t_{17} + (10-17) \cdot P) + (t_{18} + (10-18) \cdot P) + (t_{19} + (10-19) \cdot P) + (t_{20} + (10-20) \cdot P)}{7}$$

Allgemein ist der gemittelte Zeitpunkt des k-ten Maximums ermittelt durch Benutzung von N benachbarter Einzelmaxima: $\bar{t}_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_i (t_i + (k-i) \cdot P)$. Günstig ist es, sich für ein k zu entscheiden, bei welchem sich sämtliche Terme die P enthalten möglichst aufheben. Dieses k ist das arithmetische Mittel sämtlicher benutzten Maximumsnummern. Durch dieses Vorgehen, war es uns möglich die Werte für das 10. und das 1627. Maximum zu bestimmen. Diese Werte sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. Außerdem enthält die Tabelle eine Abschätzung des Fehlers dieser gemittelten Zeit. Hierzu wurden die Beträge der Abweichungen der Einzelzeiten von der gemittelten Zeit arithmetisch gemittelt.

k	Maximumszeit (JD) des k-ten Maximums	Einzelmaximumsnummern	Größenordnung Fehler [s]
10	2454729,84908001	1, 2, 3, 17, 18, 19 und 20 vom 19.09. und 20.09.	13,77
51	2454732,35168206	1, 2, 3, 149 und 150 vom 19.09. und 28.09.	9,39
1627	2454828,55562694	1605, 1606, 1622, 1639 vom 26.12., 27.12. und 28.12.	10,81

Nun können wir die ermittelte Periodendauer benutzen um vom 10. bzw. 51. Maximum auf das 1627. zu schließen. Wir zählen hierzu (1627-10)-mal die Periodendauer zum 10. Maximumszeitpunkt bzw. (1627-51)-mal die Periodendauer zum 51. Maximumszeitpunkt hinzu. Diese vorhergesagten Maximumszeitpunkte sollten nun vom tatsächlichen so abweichen, dass eine Verspätung offenbar wird. Diese schreiben wir dann der Lichtlaufzeit zu.

$$t_{1627} - t_{10} + (1627 - 10) \cdot 0,0610379935 = 0,007438 \text{ d} = 11,68 \text{ min}$$

$$t_{1627} - t_{51} + (1627 - 51) \cdot 0,0610379935 = 0,007439 \text{ d} = 11,62 \text{ min}$$

Beide Epochenkombinationen führen zur Vorhersage eines 1627sten Maximumszeitpunktes, welche 11,68 Minuten vor dem gemessenen liegt. Das tatsächliche Maximum trat mit einer Verspätung von 11,62 Minuten auf. Die Übereinstimmung deutet an, dass die Normalmaxima gut bestimmt wurden und dass eventuelle Fehler in der Vorhersage in der Periodendauer ihre Ursache haben.

Wir fassen zusammen: Das Licht von CY Aquarii muss im September einen geringeren Weg bis zur Erde zurücklegen, als im Dezember. Für die Wegdifferenz benötigt das Licht mit der unbekannten Lichtgeschwindigkeit fast 11 Minuten. Wenn wir nun die Wegdifferenz bestimmen können, können wir durch Quotientenbildung (Weg durch Zeit) die Lichtgeschwindigkeit bestimmen. Die Wegdifferenz ermitteln wir auf geometrischem Wege aus den bekannten Positionen der Erde.

Die nächste Skizze soll die Berechnung des Abstandes erklärend unterstützen. Die Ellipse stellt die Bahn der Erde um die Sonne dar. Sie bildet den Äquator ($b = 0^\circ$) des ekliptikalnen Koordinatensystems dar. Der Längennullpunkt ($l = 0^\circ$) dieses Koordinatensystems liegt im sogenannten Frühlingspunkt (grün), also dem Punkt an dem die Sonne von der Erde aus betrachtet am 21. März steht. CY Aquarii hat in diesem Koordinatensystem die Koordinaten $l = 341,6^\circ$ und $b = 9,45^\circ$. Das Licht von CY Aquarii kommt bei allen Positionen der Erde auf ihrer Bahn aus dieser Richtung. Die Lichtstrahlen (gelb) können aufgrund der großen Distanz des Sterns als parallel betrachtet werden.

Uns interessiert die Position der Erde (blauer Kreis) zur Zeit des 10ten (bzw. 51sten) und des 1627sten Maximums. Beim 10ten Maximum unserer Zählung steht die Erde bei $l = 357^\circ$ (roter Radiusvektor). Beim 1627sten Maximum unserer Zählung steht die Erde bei $l = 97^\circ$ (roter Radiusvektor). Es ist unschwer zu erkennen, dass die Erde in der zweiten Position ein wenig weiter von CY Aquarii entfernt ist. Der genaue Abstand wird nun trigonometrisch ermittelt.

Skizze: Geometrische Situation dargestellt mit Geogebra.

Licht von CY Aquarii

$l = 341^\circ$

$l = 357^\circ$

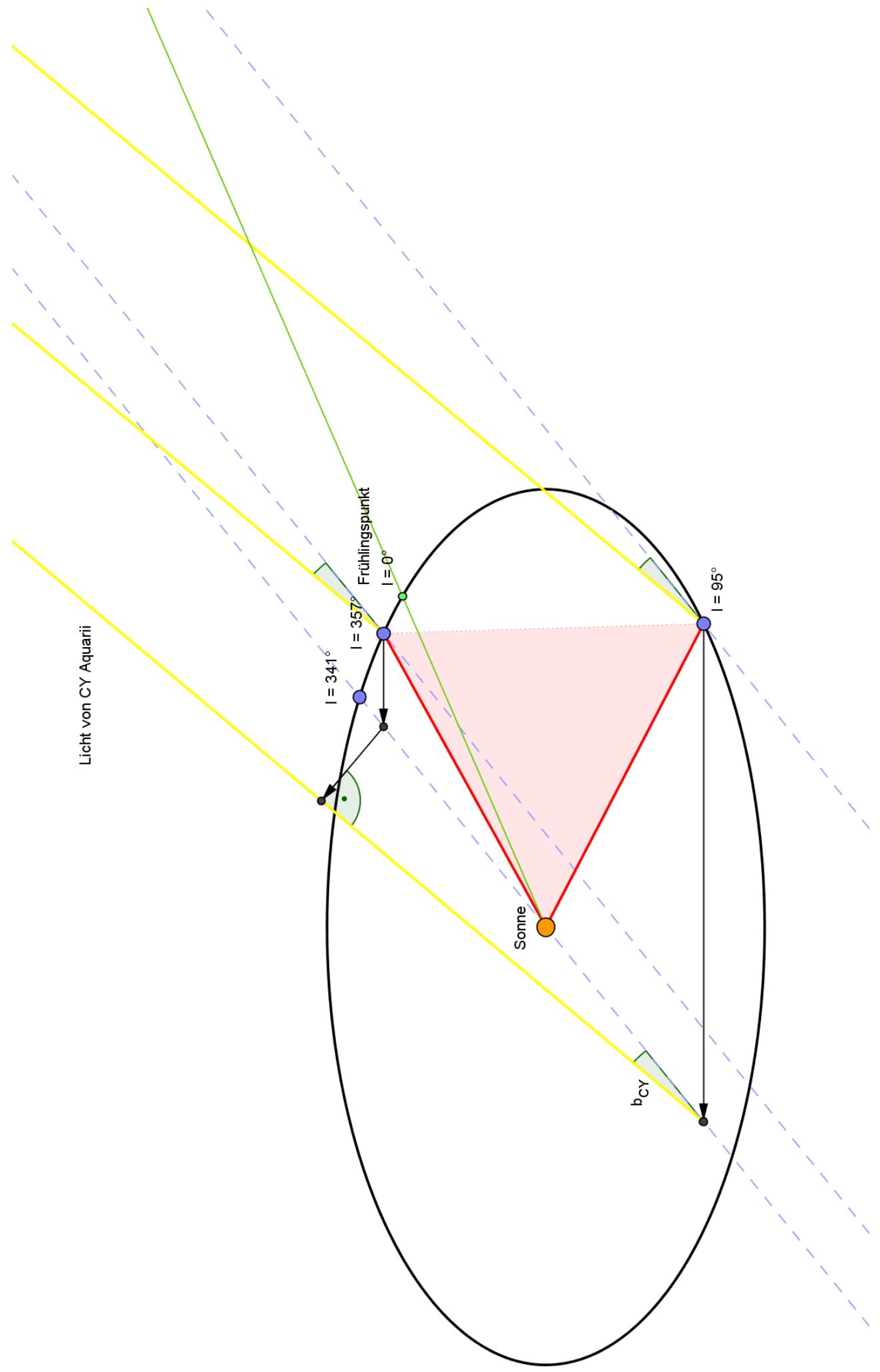
$l = 0^\circ$

Frühlingspunkt

$l = 95^\circ$

Sonne

b_{CY}



Dazu benutzen wir die Formel:

$$r = (R_{E,10} \cdot \cos(l_{E,10} - l_{CY}) - R_{E,1627} \cdot \cos(l_{E,1627} - l_{CY})) \cdot \cos(b_{CY})$$

Der Index E steht für die Erde, CY für CY Aquarii. Die ersten beiden Cosinuse projizieren den Radiusvektor auf die strichlierte Linie mit $l = 341,6^\circ$, der letzte Cosinus projiziert schließlich auf die Sichtlinie zu CY Aquarii (schwarze Pfeile). Aufgrund der Elliptizität der Erdbahn wird der Erdbahnradius beim 10ten Maximum und am 1627sten Maximum unterschieden, obwohl dies im Rahmen der erreichbaren Genauigkeit nicht notwendig wäre.

Um in die Formel einsetzen zu können, benötigt man die Werte für $R_{E,10}$, $R_{E,1627}$, $l_{E,10}$ und $l_{E,1627}$. Diese haben wir aus den Julianischen Daten der Maximumszeitpunkte ermittelt. Dazu haben wir das Julianische Datum zunächst in ein gewöhnliches Kalenderdatum umgewandelt. Dazu muss man wissen, dass das Julianische Datum des 1. Jänners 2001 um 12:00 Uhr UT genau 24 usw. beträgt. Von diesem Datum kann man nun hochrechnen. Die ermittelten Werte haben wir mit dem „Julian Date Converter“ unter der Internetadresse „<http://aa.usno.navy.mil/data/docs/JulianDate.php>“ kontrolliert. Um aus dem Kalenderdatum der Maximumszeitpunkte die oben geforderten Werte zu ermitteln haben wir den Internetdienst Calsky (www.calsky.de) benutzt. Die nächsten Tabellen zeigen die ermittelten Werte sowie die daraus berechnete Lichtgeschwindigkeit.

Nr.	R_E [AE]	l_E [°]
10	1,0041573	357,75
51	1,0034761	0,20
1627	0,9834040	96,68

Kombination	r [km]	t [min]	c [km/s]	Fehler zu c_{wahr} in %
10 -1627	203856513	11,68	290.879	-2,97
51 - 1627	201871515	11,62	289.629	-3,39

Das Problem mit diesen Werten ist, dass sie eigentlich nicht so gut sein dürften. Wir haben abgeschätzt, dass unsere in der Tabelle berechneten Periodendauern mit einem Fehler B in der Größenordnung von $2 \cdot 10^{-6}$ d behaftet sind. Dieser Fehler ist nicht zufällig, sondern gerichtet, d.h. die tatsächliche Periodendauer abzüglich der Lichtlaufzeiteffekte zwischen zwei Maxima sollte kürzer sein. Setzt man aber diesen kleineren Wert in die Berechnung ein, ergeben sich viel zu kleine Lichtgeschwindigkeiten von ca. 210.000 km/s. Die beste Annahme bislang ist, dass die von uns ermittelte Periodendauer mit einem relativ großen Fehler behaftet ist und in unserem Fall nur zufällig zu einem sehr guten Ergebnis führt.

Es kristallisierte sich an dieser Stelle heraus, dass die Genauigkeit unseres Ergebnisses mit der Genauigkeit der bestimmten Periodendauer steht und fällt. Das Vorgehen das wir bislang praktiziert hatten war offenbar weit zu ungenau, um den korrekten Wert für P zu liefern und die guten Ergebnisse nur Frucht des Zufalls. Nicht umsonst benutzt Pfau bei seinen Berechnungen den Literaturwert für die Periodendauer. Unser Unvermögen die korrekte Periodendauer zu bestimmen wird relativiert, wenn man bedenkt, dass ein Fehler

in der Größenordnung von beispielsweise einem Zwanzigstel Sekunde pro Sternschwingung sich über die beobachteten 1639 Schwingungen zu mehr als einer Minute aufsummiert und am Schluss zu einem Fehler in der Lichtgeschwindigkeit von bereits 10% führt.

Als weiterer Nachteil des bislang eingeschlagenen Weges ist zu nennen, dass nur etwa ein Drittel der gewonnenen Daten bislang in die Berechnung eingeflossen ist. Die Lichtkurven von Oktober, November und Anfang Dezember blieben ungenutzt. Dies sollte mit unserem zweiten Ansatz geändert werden. Dieser Ansatz wird im folgenden beschrieben.

Wir wählten zunächst willkürlich ein Bezugsmaximum z.B. das 1098ste (weil dort die Erde, Sonne und CY Aquarii fast einen rechten Winkel bilden). Das Licht des 1098sten Maximums trifft am Ort der Erde zu einer Zeit $t_{g,1098}$ ein, wobei das „g“ für „geozentrisch“ steht. Am Ort der Sonne trifft es zu einer Zeit ein, die wir $t_{h,1098}$ nennen wollen, wobei das „h“ für „heliozentrisch“ steht. Hat man diese Vereinbarungen getroffen, so kann man für jeden beliebigen geozentrischen Maximumszeitpunkt folgende Gleichung aufstellen:

$$t_{g,i} = t_{h,1098} + (i-1098) \cdot P - \frac{r}{c \cdot 3600 \cdot 24}$$

Links des Istgleichs steht der i-te geozentrische Maximumszeitpunkt unserer Zählung. Rechts steht zunächst unser heliozentrischer Bezugsmaximumszeitpunkt. Der nächste Summand sorgt dafür, dass aus dem 1098sten heliozentrischen Maximum, das i-te wird. Das geschieht durch entsprechend häufiges Hinzuzählen der unbekannten Periodendauer. Der letzte Summand auf der rechten Seite ist die sogenannte „Lichtgleichung“. Dieser Summand berücksichtigt den Umstand, dass das Licht mit der endlichen und unbekannten Lichtgeschwindigkeit eine bestimmte Zeit benötigt um vom Ort der Sonne den Ort der Erde zu erreichen. r ist folgerichtig der korrekt projizierte Abstand zwischen Sonne und Erde. Dieses r wird analog wie oben bestimmt (siehe Skizze).

Obige Gleichung ist nun aber von der Form:

$$y(x_1, x_2) = m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + b$$

Die Größe y ist linear abhängig von 2 freien Variablen x_1 und x_2 . Wir identifizieren y als $t_{g,i}$, b als $t_{h,1098}$, x_1 als $(i-1098)$, P als m_1 , r als x_2 und m_2 als $\frac{-1}{c \cdot 3600 \cdot 24}$.

Legt man nun in Origin Spalten für $t_{g,i}$, $(i-1098)$ und r an, so kann man durch eine multiple lineare Regression die Parameter m_1 und m_2 , sowie $t_{h,1098}$ bestimmen. Der nachfolgende Screenshot zeigt das Ergebnis eines solchen Fits.

$t_{h,1098}$ wird „Schnittpunkt mit der y-Achse“ genannt, m_1 wird D genannt und m_2 C . Es ergibt sich schlussendlich:

$$P = 0,0610374255 \text{ d}$$

$$c = 257000 \text{ km/s}$$

$$t_{h,1098} = 2454796,264126$$

Dies weicht zwar 14 % vom tatsächlichen Wert der Lichtgeschwindigkeit ab, dafür ist

dieser Wert bei weitem verlässlicher als der vorher ermittelte. Die Periodendauer konnten wir im Vergleich zum Literatur-Periodenwert von Fu und Sterken aus dem Jahre 2003 auf ein zwölftel Sekunde genau ermitteln.

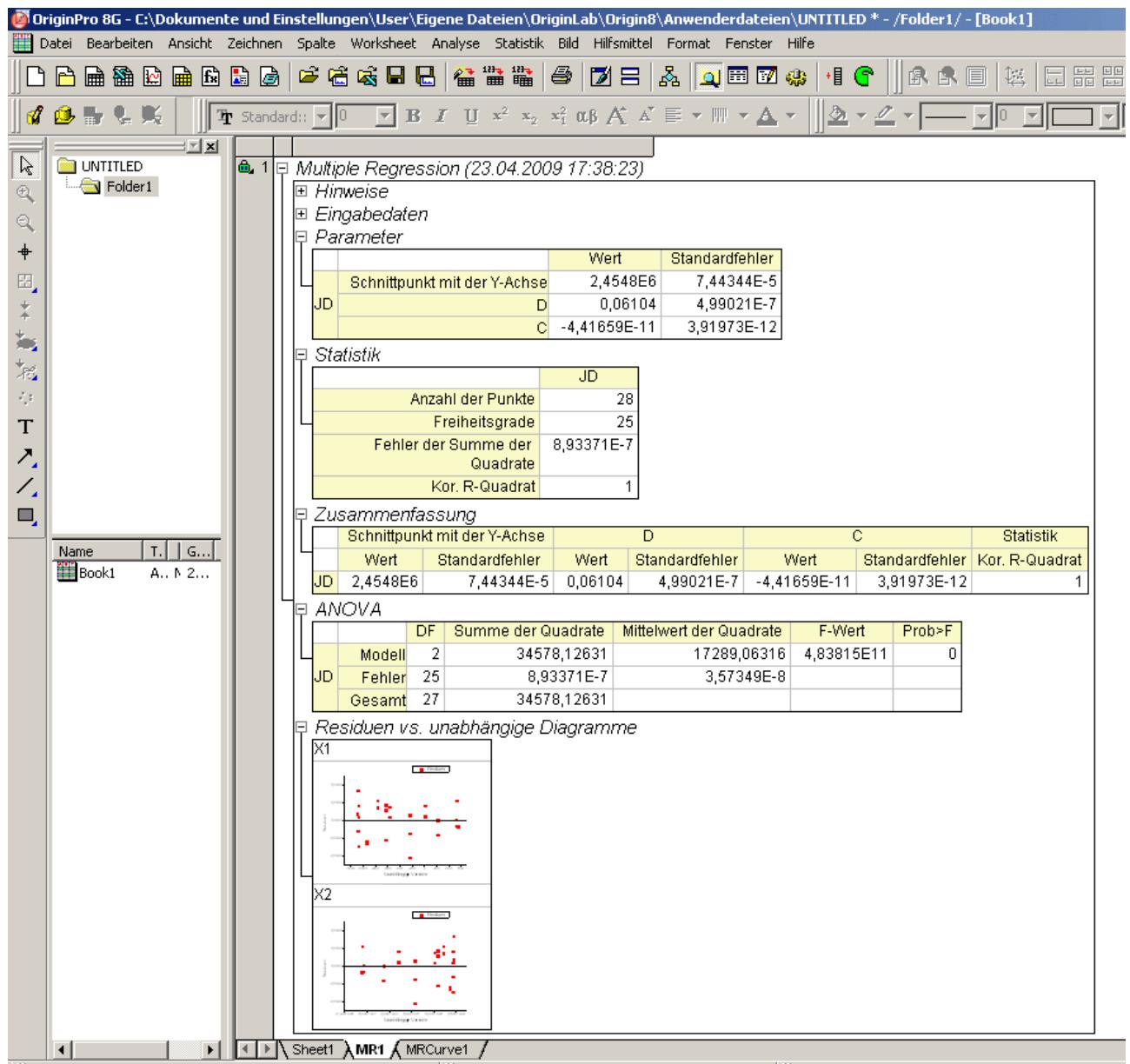


Bild: Ergebnis des multilineararen Fits mit Origin.

Nimmt man hingegen den Literatur-Periodenwert von Fu und Sterken als gegeben an, so wird aus dem multilineararen Fit ein linearer. Die so ermittelte Lichtgeschwindigkeit beträgt 308500 km/s.

Weitere Auswertungsschritte folgen...

Zusammenfassung und Ausblick

Zum Inhaltsverzeichnis

Im Schuljahr 2008/09 wurde am Realgymnasium in Bruneck ein aufwändiges Astroprojekt durchgeführt, dessen Ziel es war den Wert der Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen. Das Vorhaben war in mehrfacher Hinsicht interessant. Zum einen wurde die Frage nach der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit und ihrem eventuellen Wert in der Wissenschaftsgeschichte lange Zeit kontroversiell diskutiert. Auf der anderen Seite ist es im Physiklabor einer Schule auf direktem Wege nicht möglich diese fundamentale Naturkonstante zu bestimmen. Deshalb wurde es unserer Recherche zufolge auch niemals gemacht.

Die Astrogruppe, die sich zur Durchführung des Projektes gebildet hat, bestand aus den Schülern David Cont, Florian Peintner, Brenda Zoderer, Elisabeth Moritz, Maria Lena Campei und dem Physiklehrer Christof Wiedemair. Die Beobachtungsphase erstreckte sich von September bis Dezember, die Reduktion der Daten und Auswertung wurde im Frühjahr 2009 erledigt.

Die Methode, welche verfolgt wurde basiert auf dem Vorschlag, den der 2001 verstorbene Astronom Alfred Jensch im Jahre 1936 machte. In einer Publikation empfahl er, den variablen Stern CY Aquarii im Sternbild Wassermann als genau gehende Uhr zu gebrauchen und über die Verspätung der Ankunftszeiten des Maximumslichtes aufgrund des Erdumlaufs, die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen.

So wurde in 14 Nächten der Stern CY Aquarii mit einer CCD-Kamera an einem Teleskop des Typs LX200 beobachtet. Ergebnis dieser Kampagne waren 6000 digitale Bilder mit einer Gesamtbelichtungszeit von 33 Stunden. Das Datenmaterial umfasst damit 4,5 Gigabyte. Diese Bilder wurden mit Muniwin photometriert und die gewonnenen Daten in „Excel“ exportiert. Wo „Excel“ nicht mehr weiterwusste sprang „Origin“ in die Bresche.

Nach vielen Mühen und Irrwegen konnte die Lichtgeschwindigkeit schließlich zu 257.000 km/s bestimmt werden, was eine Abweichung von 14% vom realen Wert darstellt. Der maßgebliche Fehler konnte in der Unsicherheit der wahren Periodendauer des Sterns ausgemacht werden. Diesen Wert haben wir zwar auf eine beeindruckende zwölftel Sekunde bestimmen können, dies reicht aber immer noch nicht für ein besseres Endergebnis.

Möglicherweise können wir den Fehler durch aufwändigere Auswertungsmethoden verringern. Eine maßgebliche Verbesserung könnte man jedoch nur dann erreichen, wenn die Belichtungszeit für ein Einzelbild reduziert werden könnte. Mit dem LX200 haben wir Belichtungszeiten von 20 Sekunden benutzt. Mit dem Observatorium der Amateurastronomen Max Valier könnte man dies auf 2 Sekunden reduzieren. Wir ziehen in Betracht, mit diesem Verein diesbezüglich in Kontakt zu treten.

Ideen für ein Projekt, welches sich eine potentielle Astrogruppe im nächsten Schuljahr vorknöpfen könnte, stehen noch aus...

Danksagung

[Zum Inhaltsverzeichnis](#)

Ein Dank für den einen oder anderen Beitrag zum Projekt gilt:

Herrn Herbert Raab und Klaus Bernhard für die Empfehlung von „Muniwin“, den Direktoren Dr. Alfred Niederhofer und Dr. Gregor Beikircher, dem Assistenten Albert Kofler und dem restlichen Schulpersonal, den Deutschlehrern Matthias Willeit und Hans Peter Lercher.