

Die Bestimmung von Rotationslichtkurven von Kleinplaneten (Teil 1)

von Axel Martin

Das Turtle Star Observatory (TSO) ist eine im Jahr 1995 gegründete Privatsternwarte in Mülheim-Ruhr. Unser hauptsächliches Interesse galt dabei von Anfang an den Kleinkörpern unseres Sonnensystems. Seit Januar 1997 werden von uns vor allem Kleinplaneten astrometrisch beobachtet und deren Positionen an das Minor Planet Center (MPC) in den USA gemeldet.

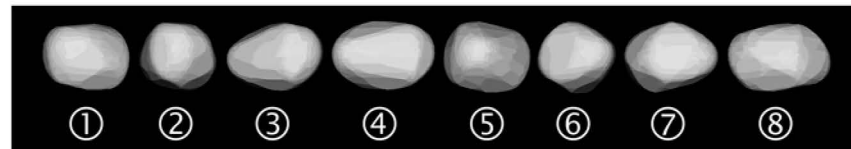
Mit Stand vom 31.05.2021 wurden von uns so insgesamt fast 10.000 Positionen bestimmt. In den Jahren 2002 bis 2016 gelang es uns hierbei sogar, 17 neue Kleinplaneten zu entdecken [1], wobei uns aber leider nur in fünf Fällen später auch die tatsächlichen Entdeckerrechte nach den jeweils gültigen Regeln des MPC zugesprochen wurden.

Während bis etwa zur Jahrtausendwende auch mit kleineren Amateurteleskopen in diesem Betätigungsfeld für die Forschung interessante Daten gewonnen werden konnten, haben professionelle Suchprogramme inzwischen dafür gesorgt, dass die astrometrisch interessanten Objekte nur noch selten heller als 20 mag sind. Aufgrund unseres aufgehellten Himmels sind wir aber trotz ausgeklügelter Beobachtungsmethoden wie z. B. „Track & Stack“ [2] bzw. „Synthetic Tracking“ [3] der Eigenbewegung eines Kleinplaneten leider nur selten in der Lage, solche lichtschwachen Objekte überhaupt sicher vermessbar zu erreichen.

Seit dem Jahr 2007 haben wir unsere Tätigkeiten daher mehr und mehr auf die Bestimmung der Rotationslichtkurven von Kleinplaneten umgestellt. Im Folgenden soll unsere Vorgehensweise bei diesen Beobachtungen vorgestellt werden.

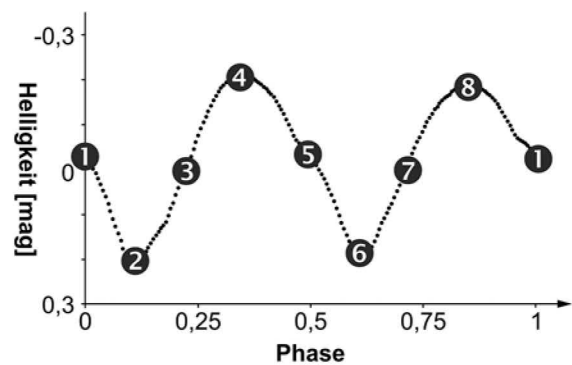
Vorweg etwas Theorie

Aktuell (1. Juni 2021) sind Rotationszeiten von nur knapp 35.000 der mehr als 1 Mio. bekannten Kleinplaneten publiziert. Dies



(87) Sylvia

$P = 5,183640 \text{ h}$
 $JD = 2459304,3001968$



¹ Ein Lichtwechsel entsteht, wie hier am Beispiel des später auch in der Praxis beobachteten Kleinplaneten (87) Sylvia gezeigt, meist dadurch, dass aufgrund der Rotation eine unterschiedliche große beleuchtete Fläche des Himmelskörpers in Richtung Erde zeigt. Im Normalfall erfolgt die Rotation dabei nur um eine Achse – es könnten aber theoretisch auch Rotationen um zwei oder gar alle drei Raumachsen (auch mit unterschiedlichen Rotationszeiten) vorkommen.

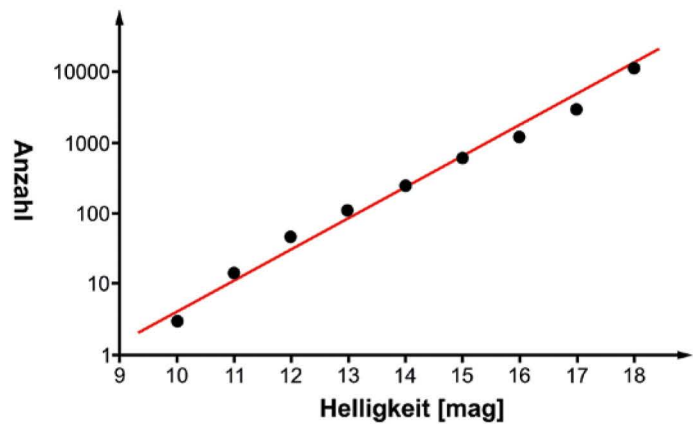
Weitere Gründe für Lichtwechsel sind neben einer lokal stark unterschiedlich reflektierenden Oberfläche auch die gegenseitige Bedeckung bei Doppelasteroiden oder das Vorhandensein eines Asteroiden-Mondes, der vom Hauptkörper bedeckt wird. Bild: © Interactive service for asteroid models (<http://isam.astro.amu.edu.pl/>)

liegt hauptsächlich daran, dass nur wenige Kleinplaneten überhaupt so hell werden, dass sie sinnvoll fotometriert werden können. Je nach Rotationszeit kann die Erstellung einer kompletten Lichtkurve aber auch sehr zeitaufwändig sein, so dass sich nur wenige Profiastronomen mit dem praktischen Teil dieses Forschungsgebietes beschäftigen können. Meist sind es Amateurastronomen, die dank ihrer frei einteilbaren Beobachtungszeit das Datenmaterial auch über mehrere Nächte hinweg sammeln und (vor-)auswerten. Die Profis übernehmen dann die theoretische Interpretation der Datensätze (s. Abb. 1).

Die eigentliche Helligkeitsbestimmung erfolgt im Amateurbereich überwiegend durch differenzielle Fotometrie, d. h. die

Helligkeit des Zielobjektes wird relativ zur Helligkeit eines oder mehrerer im gleichen Bildfeld befindlichen Vergleichsterne bestimmt. Weil die Lichtkurven fast aller Kleinplaneten über den gesamten visuellen Wellenlängenbereich sehr ähnliche Eigenschaften aufweisen, müssen hierbei nicht zwangsläufig die vielleicht aus anderen Bereichen der Fotometrie bekannten UBVR-I-Filter mit ihren genormten spektralen Durchlassbereichen verwendet werden. Dies spart nicht nur Kosten, sondern hat auch noch den Vorteil, dass mehr Licht auf den Aufnahmesensor gelangt. Obwohl also prinzipiell auch ganz ohne Filter gearbeitet werden könnte, verwenden wir am TSO aufgrund unserer Lage inmitten einer Großstadt einen leicht kontrasterhöhend wirkenden LPR-Filter.

2 Mit abnehmender Helligkeit steigt die Zahl der zu einer bestimmten Zeit (hier: der 30.04.2021) beobachtbaren Kleinplaneten exponentiell an. Es ist jedoch zu beachten, dass dies die Zahl aller Objekte am kompletten Himmel ist! Aufgrund der im Text genannten „technischen“ Auswahlkriterien kommen meist nur knapp 25% dieser Objekte für die fotometrische Beobachtung in der betreffenden Nacht in Frage. Grafik: Axel Martin



Bevor jetzt die eigentliche Bildgewinnung starten kann, muss aber zunächst einmal ein passender Kleinplanet ausgewählt werden (s. Abb. 2). Hierbei spielen verschiedene Gesichtspunkte eine Rolle:

- Der Kleinplanet sollte in der betreffenden Nacht möglichst lange am Stück zu beobachten sein. Je länger hierbei die einzelnen Bildsequenzen sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass bereits die Beobachtungen eines Abends erste aussagekräftige Rückschlüsse auf die Rotationsdauer zulassen.
- Der Kleinplanet sollte auf jeder der Einzelaufnahmen ein S/N-Verhältnis von >100 erreichen, weil sich hieraus die spätere Genauigkeit der Messung ergibt. Als Faustregel gilt:
 - S/N = 10 > Fehler = 0,1 mag
 - S/N = 100 > Fehler = 0,01 mag
 - S/N = 1000 > Fehler = 0,001 mag
- Aufgrund ihrer Eigenbewegung können lichtschwache Kleinplaneten jedoch nicht beliebig lange belichtet werden, um das o. g. S/N-Verhältnis zu erreichen. Nach unserer Erfahrung sollte die Belichtungszeit deshalb maximal so gewählt werden, dass der Kleinplanet nicht mehr als im Verhältnis 1:1,5 in die Länge gezogen wird. Bei „normalschnellen“ Kleinplaneten ($\mu \approx 1''/s$) wird dies je nach Abbildungsmaßstab der Teleskop-/Kamera-Kombination bei Belichtungszeiten von max. 2 bis 3 Minuten der Fall sein. Was sich zunächst wie ein genereller Nachteil anhört, sorgt andererseits aber

auch dafür, dass die Lichtkurve selbst bei schnell rotierenden Objekten nicht zu grob abgetastet wird.

- Ganz anders verhält es sich bei hellen Kleinplaneten: Hier wird die maximal mögliche Belichtungszeit durch den linearen Arbeitsbereich des Aufnahmesensors begrenzt. Während dieser bei CCD-Chips ohne Anti-Blooming in der Regel bei ca. 90% der Full-Well-Kapazität liegt, liegt er bei CMOS-Sensoren und CCD-Chips mit Anti-Blooming üblicherweise nur bei ca. 75 % bis 80 % der Full-Well-Kapazität. Hierbei ist zu beachten, dass diese Angaben immer nur für den Betrieb im 1x1-Binning gelten! Bei Verwendung anderer Binning-Modi kann der lineare Arbeitsbereich deutlich kleiner sein.

Achtung: Die hier genannten Werte für die maximale Sättigung beziehen sich immer auf ein unkalibriertes Rohbild!

Theoretisch wäre es zwar möglich, sehr helle Objekte auch noch mit entsprechend kurzen Belichtungszeiten zu fotometrieren, in der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass bei unserer Teleskop-/Kamera-Kombination und Belichtungszeiten unter 10 Sekunden meist nicht mehr ausreichend viele Vergleichssterne auf den Bildern vorhanden sind. Von dem bei solch schnellen Belichtungsfolgen entstehenden gigantischen Datenvolumen einmal ganz abgesehen.

Meist kann schon alleine aufgrund dieser technischen Überlegungen die Zahl der möglichen Zielobjekte auf deutlich unter 50 heruntergedrückt werden. Doch bei welchem dieser Objekte ist die Erstellung einer Lichtkurve nun am sinnvollsten? Am TSO gehen wir dabei so vor, dass wir die betreffenden Objekte zunächst einmal in den bekannten Lichtkurven-Datenbanken [4, 5] im Internet suchen. Sind bereits eine oder gar mehrere Lichtkurven zu einem Objekt publiziert worden, interessieren uns vor allem folgende Dinge:

- Welche Lichtwechselamplitude wurde bisher gemessen? Auch wenn die Amplitude aus den o. g. Gründen variieren kann, kann zumindest abgeschätzt werden, ob mit den zur Verfügung stehenden Geräten überhaupt ein Lichtwechsel nachgewiesen werden kann oder ob dieser im Messfehler untergeht.
- Welche Rotationszeit wurde bisher gemessen? Vor allem dann, wenn die Rotationszeit relativ nah an einem Vielfachen von 12 Stunden liegt, schaut man in den folgenden Nächten fast wieder genau auf den gleichen Teilbereich der Lichtkurve. Im Extremfall kann es so passieren, dass ein Einzelbeobachter gar keine komplette Lichtkurve aufzeichnen kann!
- Von wann stammen die bereits publizierten Lichtkurven? Aufgrund der relativen Bahnverhältnisse von Erde und Kleinplanet schauen wir immer aus anderen Blickwinkeln auf den Kleinplaneten, was dazu führt, dass sich die Lichtkurven von

Opposition zu Opposition geringfügig unterscheiden. Innerhalb einer Oppositionsperiode ist dieser Effekt zwar auch vorhanden, aber meist nur minimal ausgeprägt. Falls also bereits eine Lichtkurve aus der aktuellen Oppositionsperiode vorliegt, ist eine weitere Verfolgung dieses Objektes momentan nicht sinnvoll.

- Sind Lichtkurven aus mehreren Oppositionen vorhanden und wenn ja, führten diese alle zur Bestimmung derselben Rotationszeit? Nicht selten ist es der Fall, dass lückenhafte und/oder stark verrauschte Lichtkurven zu einer komplett falschen Abschätzung der Rotationszeit geführt haben.

Ist von einem der möglichen Kleinplaneten bisher noch keine Lichtkurve publiziert worden, ist er prinzipiell natürlich ein sehr interessantes Ziel! Doch auch wenn hier sicherlich „Ruhm und Ehre“ der Erstvermessung locken, sollte auf jeden Fall beachtet werden, dass die Beobachtung eines solchen Objektes auch zu viel Zeitaufwand und ggf. auch Frust führen kann. Man weiß schließlich noch gar nichts über ihn, so dass prinzipiell der erste und/oder der zweite der oben genannten Punkte zutreffen könnten.

Unsere Sternwarte

Das TSO verfügt aktuell über einen optisch und mechanisch optimierten 14-Zoll-Newton $f/4,6$ der Firma Orion UK, dessen Öffnungsverhältnis mit Hilfe eines 0,73x-Komakorrektors der Firma ASA auf $f/3,4$ vergrößert wird. Als Aufnahmekamera dient eine ST-10-XME-CCD-Kamera der Firma SBIG, die im 1x1-Binning betrieben wird. In den letzten zwei Jahren hat sich dabei gezeigt, dass dieses Setup sowohl mechanisch als auch thermisch so stabil ist, dass außer nach einem Hardware-Umbau nur ein oder zwei Mal pro Jahr nachfokussiert werden muss.

Das Teleskop ist seit Anfang 2021 auf einer parallaktischen Montierung des Typs 10Micron GM2000 aufgestellt. Diese wird zusammen mit der 3-m-ScopeDome-Kuppel via Remote-Desktop bequem von der Wohnung aus ferngesteuert (s. Abb. 3).

Zur Vereinfachung der späteren Bildreduktion haben wir uns im Laufe der Zeit eine Korrekturbild-Bibliothek mit Standard-Belichtungszeiten angelegt. Diese sind von 30 s bis 210 s mit $\Delta t = 30$ s gestaffelt. Da die ST-10 XME über eine geregelte Kühlung verfügt, wurde diese Belichtungsreihe jeweils für Temperaturen zwischen $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit $\Delta T = 5\text{K}$ erstellt. Weil die Kamera permanent am Teleskop verbleibt, reicht uns ein (bereits mit einem passendem Dunkelbild korrigiertes) Master-Flat aus. Alle hier genannten Korrekturbilder sind dabei Sigma-Mittelungen aus jeweils 50 Einzelbelichtungen.

Die Bildgewinnung

Zu Beginn einer Beobachtungsnacht wird die Kamertemperatur in den o. g. Temperaturstufen so eingestellt, dass eine Kühlleistung von $<85\%$ benötigt wird. Nachdem der Kleinplanet angefahren wurde, kann dann über die Kamera-Software eine Bildserie programmiert werden.

Hierzu wird aus den Standard-Belichtungszeiten diejenige ausgewählt, bei der das hellste Pixel des Kleinplaneten etwa 50 % bis 60 % der maximal möglichen Sättigung des Aufnahmesensors erreicht. Da ja zu Beginn der Messung nicht klar ist, ob sich der Kleinplanet im Minimum oder Maximum seiner Lichtkurve befindet, ist auf diese Weise fast immer gewährleistet, dass der lineare Empfindlichkeitsbereich des Sensors nicht im Laufe der Aufnahmeserie verlassen wird.



3 Das 14-Zoll-Newton-Teleskop des Turtle Star Observatory. Bild: Axel Martin

Wie nun aus den so erstellten Bildern die gesuchte Lichtkurve ermittelt wird, erfahren Sie im zweiten Teil dieses Artikels, der sich mit der Datenauswertung und der anschließenden Publikation der Messergebnisse beschäftigt.

Internethinweise (Stand 05.01.2022):

- [1] Kleinplaneten-Entdeckungen am Turtle Star Observatory: www.turtlestar.de/entdeckungen.htm
- [2] Software „Astrometrica“: www.astrometrica.at
- [3] Software „Tycho Tracker“: www.tycho-tracker.com
- [4] Asteroid Lightcurve Database (LCDB): <https://minplanobs.org/MPInfo/php/lcdb.php>
- [5] Courbes de rotation et de luminosité d'astéroïdes et d'étoiles variables: http://obswww.unige.ch/~behrend/page_cou.html