

Abbildung 1: Hypsipyle am Abend des 15. März 2017 um 20:50 Uhr UT (links) und am 16. März um 03:03:31 Uhr UT, aufgenommen mit Moneth South

Die tägliche Parallaxe eines Kleinplaneten

U. Backhaus, J. Möllmanns, R. Schüneck

10. August 2017

Der Vorteil, die Entfernung eines Kleinplaneten dadurch zu bestimmen, dass man seine tägliche Parallaxe misst, besteht darin, dass man keinen weit entfernten Beobachter als Partner für simultane Beobachtungen benötigt. In diesem Papier¹ wird die Methode ausführlich erläutert und anhand der ersten Messungen demonstriert, die im März 2017 durchgeführt wurden.

Vielleicht gelingt es, andere zu motivieren, die Messungen selbst zu wiederholen und dadurch zu selbst bestimmten Werten für die Entfernung von Kleinplaneten zu kommen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

2

¹Es handelt sich hier um die Adaption eines entsprechenden Papiers über den Mond: „Die tägliche Parallaxe des Mondes“ (<http://www.astronomie-und-internet/parallaxes/taeglicheMondparallaxe.pdf>)

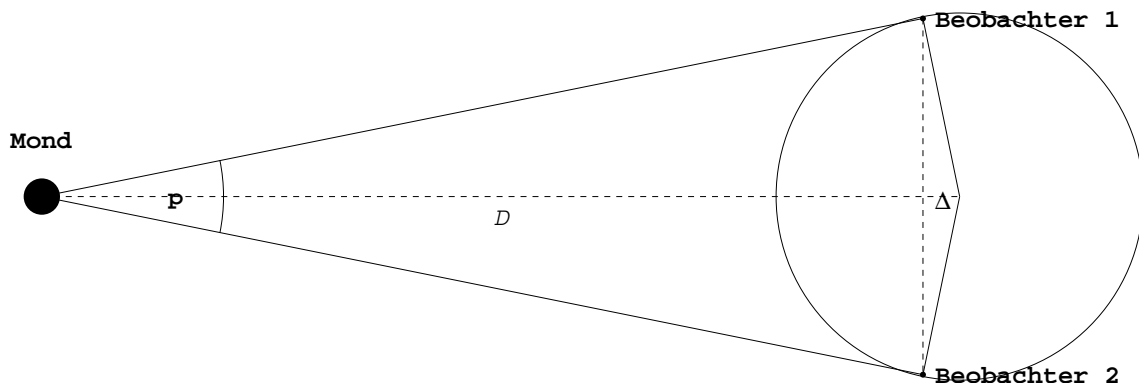


Abbildung 2: Das Prinzip der Entfernungsbestimmung durch Parallaxenmessung

2 Die Grundidee	3
3 Tipps und Anleitungen für eigene Messungen und Auswertungen	5
4 Beispiel	6
4.1 Auswahl von Objekt und Beobachtungszeitpunkten	6
4.2 Die Bestimmung Objektpositionen auf den Fotos	7

1 Einleitung

Die Entfernung eines Objektes des Sonnensystems zu bestimmen, bedeutet, darauf zu „zeigen“, indem man es von verschiedenen, weit von einander entfernten Orten am Sternenhimmel *gleichzeitig* beobachtet oder fotografiert, und die Differenz p zwischen den jeweiligen Richtungen zu messen – in der Regel in Bezug auf den Hintergrund der sehr viel weiter entfernten Sterne. Wenn der Abstand Δ zwischen den Beobachtern bekannt ist, ist es Prinzip einfach, die Entfernung d des Objektes zu berechnen (Abb. 2):

$$d = \frac{\frac{\Delta}{2}}{\tan \frac{p}{2}} \approx \frac{\Delta}{p} \tag{1}$$

Für eine solche Messung ist es erforderlich, sich mit weit entfernten Beobachtern, meist auf anderen Erdteilen, zusammen zu tun und sich mit ihnen sehr genau zu gemeinsamen Messungen zu verabreden. Wir haben solche internationalen Projekte mehrmals durchgeführt, am Mond in den Jahren 2000 ([?]) und 2009 ([?]). Die dabei gemachten Erfahrungen waren für alle Teilnehmer faszinierend und lehrreich. Es zeigte sich jedoch auch, dass genaue Absprachen schwierig sind und von vielen Teilnehmern nicht genau genug eingehalten werden. Es reizt mich deshalb schon lange, mindestens seit 1999 [?], die Mondentfernung messen zu können, ohne mich mit weit entfernten anderen Beobachtern verabreden zu müssen – auch wenn dadurch viel von dem besonderen Reiz weltweiter Zusammenarbeit verloren geht.

2 Die Grundidee

Man kann die Notwendigkeit umgehen, einen weit entfernten Partner zu finden, indem man sich selbst durch die Drehung der Erde an einen anderen Ort „transportieren“ lässt. Die Parallaxe eines Objekts des Sonnensystems, die auf diese Weise gemessen wird, heißt seine „tägliche Parallaxe“. Diese Messmethode wird jedoch dadurch erschwert, dass sich diese Objekte *bewegen*. Wenn man einen Kleinplaneten einige Stunden später wieder fotografiert, hat er sich auf seiner Bahn um die Sonne weiterbewegt und dadurch seine Position relativ zur Erde verändert (Abb. 1). Der Unterschied zwischen den beiden beobachteten Positionen wird deshalb eine Überlagerung aus Eigenbewegung und Parallaxe sein.

Glücklicherweise kann die Eigenbewegung dadurch abgetrennt werden, dass man die Position des Objektes zweimal im Abstand der Periode eines „Objekttages“ misst. Das ist die Rotationsdauer der Erde in dem rotierenden Bezugssystem, dessen Ursprung gleich dem Erdmittelpunkt ist und dessen eine Achse in Richtung Objekt zeigt. Sie lässt sich berechnen aus der siderischen Winkelgeschwindigkeit der Erde $\omega_E = \frac{2\pi}{23h56m}$ und der Eigenbewegung des Objektes in Rektaszension: $\omega_O = \dot{\alpha}_O = \mu_\alpha$. Im Falle des Mondes ist (im Mittel) $\omega_O = \frac{2\pi}{24h50m}$. Die Winkelgeschwindigkeit der Erde in diesem Koordinatensystem ist

$$\omega_{E_{syn}} = \omega_E - \omega_O.$$

Die Länge T_{syn} des Objekttages ist also

$$T_{syn} = \frac{2\pi}{\omega_{E_{syn}}}$$

Bei Fixsternen ist der Objekttag der *Sterntag* (23h56m), beim Mond *im Mittel* der *Mondtag* (24h50m). *Bei den anderen Objekten des Sonnensystems, außer vielleicht bei den schnellsten und der Erde nächsten, wird man die Eigenbewegung μ_α gegenüber $\omega_E \approx 15^\circ/h = 15''/s$ wohl vernachlässigen können.*

Nach einem Objekttag ist die Konstellation von Erdmittelpunkt, Objekt und Beobachter bei beiden Messungen dieselbe², und der Unterschied zwischen den zu den Zeiten t_1 und t_3 gemessenen Positionen (α_1, δ_1) und (α_3, δ_3) zeigt – parallaxenfrei! – die Positionsveränderung des Objektes aufgrund seiner Eigenbewegung. Nehmen wir dann an, dass sich das Objekt in der Zwischenzeit gleichförmig bewegt³, können wir durch Interpolation für die Zeit t_2 eine Position (α'_2, δ'_2) berechnen. Sie ist in Abbildung 3 rot gezeichnet. Diese Richtung hätte ein *virtueller Beobachter* gemessen, der, anders als der reale Beobachter, seit der ersten Messung nicht an der Rotation der Erde teilgenommen hat. .

Am einfachsten und anschaulichsten vielleicht, indem man für Rektaszension und Deklination einzeln eine konstante Änderungsrate annimmt (**Methode 1**⁴, s. Abbildung

²Diese Aussage ist in Abbildung 3 nicht erkennbar, weil die Eigenbewegung des Kleinplaneten stark übertrieben dargestellt ist.

³Etwas anderes können wir nicht tun, solange die Entfernung des Kleinplaneten nicht bekannt ist und deshalb seine geozentrische Bewegung nicht aus Beobachtungsdaten abgeleitet werden kann.

⁴Anders als der Mond bewegt sich der Kleinplanet in dem kurzen Beobachtungszeitraum in sehr guter Näherung gleichförmig auf seiner Bahn. Trotzdem werden sich, weil seine Bahn gegen den Äquator

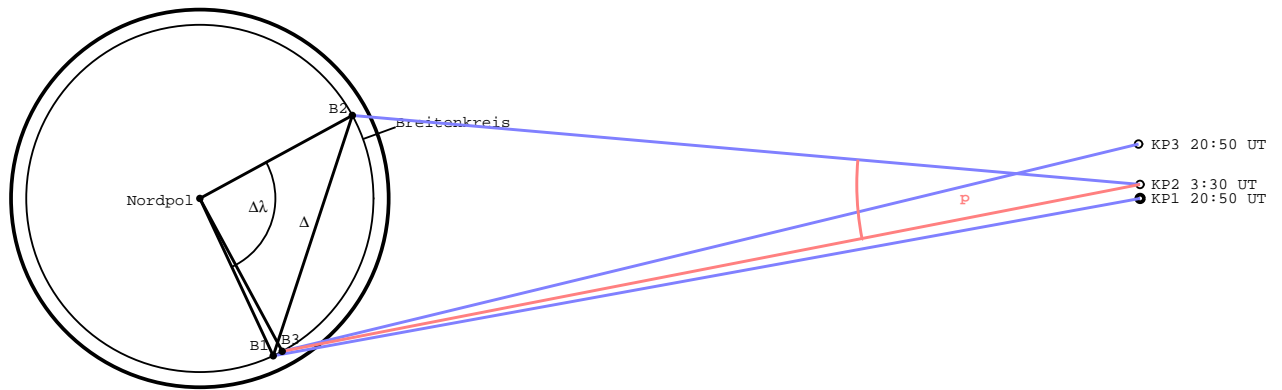


Abbildung 3: Messung der täglichen Parallaxe an einem Kleinplaneten, dargestellt im Inertialsystem (s. Text): Die drei blauen Linien entsprechen den drei gemessenen Positionen des Kleinplaneten. Die rote Linie zeigt die zwischen den Messungen 1 und 3 interpolierte Position. Sie repräsentiert die Richtung, die der Beobachter gemessen hätte, wenn er seit der ersten Messung nicht an der Erdrotation teilgenommen hätte. Der Parallaxenwinkel p ergibt sich aus dem Vergleich dieser berechneten Richtung und der von Beobachter B_2 gemessenen Richtung.

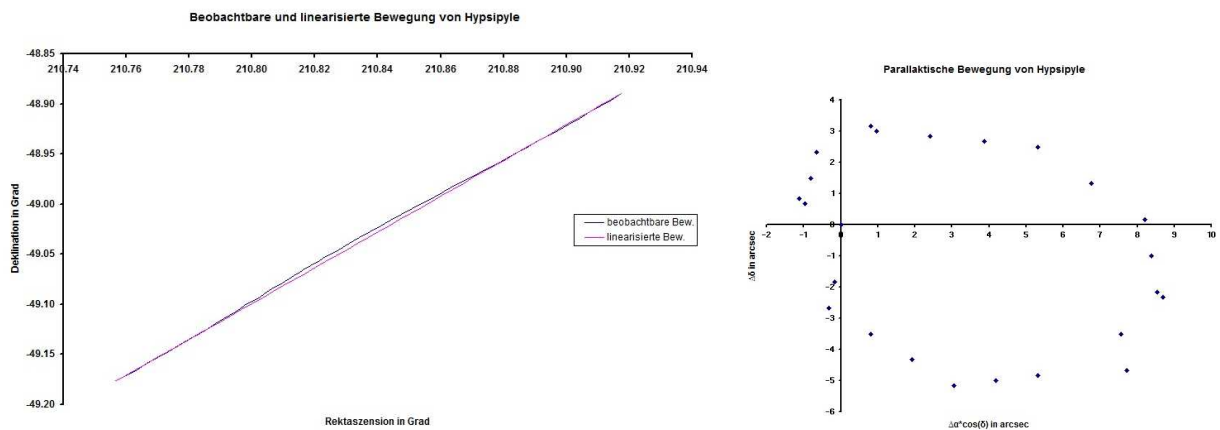


Abbildung 4: Links: Berechnete topozentrische Positionen eines Himmelskörpers mit Eigenbewegung, hier am Beispiel des Kleinplaneten Hypsipyle während der interessierenden 24 Stunden; überlagert ist der beobachtbaren Bewegung ihre durch Interpolation gewonnene Linearisierung. Rechts: Durch Abzug der linearisierten Bewegung von den topozentrischen Positionen ergibt sich eine Figur, die als parallaktische Ellipse interpretiert werden kann, die durch die Bewegung des Beobachters aufgrund der Erddrehung hervorgerufen wurde (erzeugt mit MPC und Excel), siehe auch [?]).

4):

Berechnung von (α'_2, δ'_2) Seit Beginn des Sterntages (t_1) hat sich der Mond zur Zeit t_2 aufgrund seiner Eigenbewegung um

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha_3 - \alpha_1}{t_3 - t_1}(t_2 - t_1) \text{ bzw. } \Delta\delta = \frac{\delta_3 - \delta_1}{t_3 - t_1}(t_2 - t_1)$$

weiterbewegt. Der virtuelle Beobachter hätte also den Kleinplaneten zur Zeit t_2 in der korrigierten Richtung

$$(\alpha'_2, \delta'_2) = (\alpha_1 + \Delta\alpha, \delta_1 + \Delta\delta)$$

beobachtet (rot gezeichnete Blickrichtung vom 20:50-Ort des Beobachters zur 3:03-Position des Kleinplaneten in Abb. 3).

Aus den Positionen (α_2, δ_2) und (α'_2, δ'_2) lässt sich der Parallaxenwinkel p berechnen, weil sie gleichzeitig am Kleinplaneten gemessen bzw. berechnet wurden:

$$p' = \sqrt{(\alpha'_2 - \alpha_2 \cos \delta)^2 + (\delta'_2 - \delta_2)^2} \quad (2)$$

3 Tipps und Anleitungen für eigene Messungen und Auswertungen

- Der Kleinplanet muss im Abstand eines Sterntages⁵ (ca. 23h56m), also an zwei aufeinander folgenden Abenden oder Morgen, und zusätzlich ein weiteres Mal etwa in der Mitte des Zeitintervalls, also morgens oder abends, fotografiert werden.
- Damit die Basislänge Δ der Parallaxenmessung möglichst groß werden kann, sollte der Kleinplanet während der Dunkelheit möglichst lange über dem Horizont sichtbar sein. Das ist in der Nähe seiner Opposition zur Sonne – besonders im Winter – der Fall. Am besten fotografiert man deshalb den Kleinplaneten **in den Wintermonaten am Ort des Teleskops!** kurz nach Aufgang und kurz vor Untergang.
- Geeignete Objekte für das gewählte Teleskop und das interessierende Datum lassen sich mit der Seite *What's observable* des JPL⁶ finden. Hier erhält man die Untergangs-, Kulminations- und Aufgangszeiten der Asteroiden und Kleinplaneten, mit deren Hilfe und mit den Sonnenauf- und -untergangszeiten man geeignete Objekte auffinden kann. Wichtig ist es, die Anzahl der auszugebenden Objekte hoch genug anzusetzen (Hypsipyle hatte bei zu unscharfen Randbedingungen zunächst die Nummer 384!).

Wichtige Kriterien bei der Suche sind:

- Helligkeit (Mag. Limit)

geneigt ist, seine Rektaszension und Deklination nicht gleichförmig ändern. Eine Interpolation, die diese Bahnneigung berücksichtigt, wird in **Anhang ??** beschrieben.

⁵Die Eigenbewegung des Kleinplaneten in der Größenordnung einiger Bogenminuten pro Tag ist so klein, dass sie vernachlässigt werden kann.

⁶<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbwobs.cgi>

SB What's Observable

This tool provides a list of small-bodies only (asteroids and/or comets) which are optically observable from the specified location on the night of the specified date/time with the specified observing constraints satisfied.

Current Settings

Observation Time [change]: 2017-03-15 20:00 UT
Observer Location [change]: Sutherland [K94] (20°48'39.5"E, 32°22'47.9"S, 1765.9 m)
Observer Constraints [change]: Mag. Limit=18, Zenith Dist. (max. deg.)=70, Topocentric Range (au)=1-6, Obs. Duration (minutes minimum)=480,
Require Mag. Param's=yes, Max. Output=50

Abbildung 5: Eingabedaten bei der Suche nach einem geeigneten Objekt

- geozentrischer Abstand (Δ) für eine ausreichend große Parallaxe
- ausreichend lange Beobachtungszeit für eine ausreichend große Basislänge
- Nachdem man sich für einen Kleinplaneten entschieden hat, lassen sich seine zu erwartenden Koordinaten mit dem **Minor Planet's and Comet Ephemeris Service** der IAU (MPC)⁷ berechnen, um das Teleskop geeignet positionieren zu können.
- Auffinden der geeigneten Belichtungszeit und die Bestimmung der Kleinplanetenkoordinaten können an Tagen *vor* der eigentlichen Messung geübt werden!

4 Beispiel

Die Algorithmen der Auswertung werden im Anhang ausführlich beschrieben.

4.1 Auswahl von Objekt und Beobachtungszeitpunkten

Beobachtet werden sollte am 15./16. März 2017 mit dem Monet-South-Teleskop in Sutherland, Südafrika (K94). Abbildung 5 zeigt die bei der Suche nach einem geeigneten Objekt verwendeten Randbedingungen, die als 34. Objekt zu Hypsipyle führten. In dieser Nacht ist es zwischen 18:15 UT und 03:13 UT völlig dunkel. Der Kleinplanet Hypsipyle erwies sich als geeigneter Kandidat: Er geht um 18:43 UT auf und um 7:34 UT unter, ist also die ganze Nacht über dem Horizont, hat eine Helligkeit von 15.3 mag und einen geozentrischen Abstand von 1.37 AE.

Um die Höhen zu prüfen, die Hypsipyle über dem Horizont erreicht, wurden die Ephemeriden von Hypsipyle durch das JPL zunächst für den ersten Abend berechnet. Die folgenden Eingaben

- Objects: **Hypsipyle**
- Ephemeris start date: **2017-03-15 1900** (15. März 2017 ab 19:00 UT)
- Number of dates to output: **24**
- Ephemeris interval: **5 minutes**
- Observatory code: **K94** (großes „K“!)

⁷<http://cfa-www.harvard.edu/iau/MPEph/MPEph.html>

- Display R.A./Decl. in **full sexagesimal**
- Display motions as: **"/min**

fürten zu 24 Ephemeriden im Abstand von fünf Minuten (also für zwei Stunden), die u. a. Rektaszension, Deklination, Azimut, Höhe, die Magnitude und die Eigenbewegung enthalten.

Der Tabelle ließ sich entnehmen, dass Hypsipyle ab 19:45 UT eine Höhe von mehr als 30° hat. Bei einer entsprechend geänderten Abfrage zeigte sich, dass der Kleinplanet um 3:00 UT noch eine Höhe von 63° hat. Da es danach aber bereits beginnen würde, heller zu werden, wurden als Beobachtungszeiten 20:00, 03:00 und um 20:50 UT festgelegt⁸.

Genauer: Es wurden drei Beobachtungsblöcke von zwei Stunden Länge beantragt, in denen das Objekt fünfmal sechs Sekunden lang (**Setup:** Type: simple, Exposure repeats: 5) mit voller Auflösung (**CCD:** Binning 1x1), **Scheduling:** MultiBlockTime, die start times als julianische Daten und die length of window: 2h) belichtet werden sollte.

Die Komplexität dieses „Antrages“ kommt daher, dass bei nur einem Block die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass das Teleskop zu seiner Startzeit mit einem anderen Projekt beschäftigt der gewünschten Zeit aufgenommen werden. ist. Wenn jenes Projekt am Ende des Blocks noch läuft, wäre bei nur einer Messung die Chance vertan, Fotos zu erhalten. Durch eine Blocklänge von zwei Stunden kann irgendwann in dieser Zeit fotografiert werden, wenn kein anderes Projekt läuft. Natürlich hat das den Nachteil, dass die Fotos ggf. nicht genau zu den gewünschten Zeiten aufgenommen werden.

4.2 Die Bestimmung Objektpositionen auf den Fotos

Abbildung 1 zeigt zwei der um 20 und um 3 UT aufgenommenen Fotos. Hypsipyle ist jeweils durch einen gelben Kreis markiert. Der Kleinplanet war im Gewirr der Fixsterne leicht zu finden, weil das Teleskop – mit Hilfe der vorher berechneten Positionen – genau auf ihn auf ihn zielte. Wenn das nicht der Fall ist, muss man ihn durch den Vergleich des Fotos mit dem „Field of View“ identifizieren, das die Projektbeschreibung unter „Target“ zeigt, nachdem die Zielkoordinaten eingetragen worden sind.

Zur Bestimmung der genauen Koordinaten lädt man die Bilder zu **Astrometry.net**⁹ hoch, das nach einiger Zeit aus der „result page“ ein **new-image.fits** zum Download bereitstellt. Dieses Bild enthält die genaue Astrometrieparameter des Bildes. Lädt man es in **AstroImageJ** und fährt man mit dem Mauszeiger über das dargestellte Bild, werden darüber – in dezimaler Darstellung – die äquatorialen Koordinaten zu der jeweiligen Mausposition angezeigt. Die genaue Position des gewünschten Objektes kann man sich mit der **Aperture**-Routine anzeigen lassen.¹⁰

Wie sich die genauesten Positionsdaten erzielen lassen, ist noch nicht ganz geklärt.¹¹ Ich habe bisher zwei Verfahren verwendet:

⁸Leider übertrug ich zu dem Zeitpunkt, ohne nachzudenken, die Länge des Beobachtungsintervalls von der entsprechenden Messung am Mond auf den Kleinplaneten.

⁹<http://nova.astrometry.net/upload>

¹⁰Das ausgegebene Ergebnis hängt etwas von den eingestellten Aperture-Kreisen ab.

¹¹Hier kann Ronald sicher noch seine Erfahrungen einfließen lassen. Er hat, glaube ich, bisher die besten Ergebnisse erzielt.

1. Alignment aller kurz nacheinander aufgenommener Fotos. Das gemittelte Bild wird an **Astrometry.net** gesendet. (Ist wohl nicht so gut.)
2. Verwendung des - nach Augenschein – schärfsten Fotos der Serie zur Astrometrie.