

Die Bestimmung der Entfernung des Asteroiden Toutatis (4179)

Michael Geffert

In diesem Beitrag wird ein Versuch für eine Praktikumsarbeit vorgestellt, bei dem der Abstand eines Asteroiden von der Erde aus ermittelt werden soll.

| Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag | | |
|--------------------------------------|---|---|
| Astronomie | Planeten, Kleinkörper, Positionsastonomie | Planetensystem, Kepler'sche Gesetze, Entfernungsbestimmung, Koordinatensysteme, Astronomische Einheit |
| Fächer- verknüpfung | Astro-Ma, Astro-Physik, Astro-Geografie | geografische Länge und Breite, maßstäbliche Umrechnung, Abbildungsmaßstab, Interpolation, Geometrie |

Entfernungsbestimmung in unserem Sonnensystem

Alle 130 Jahre zieht die Venus zweimal im Abstand von 8 Jahren von der Erde aus gesehen vor der Sonnenscheibe her und kann z.B. mittels Sonnenprojektion sichtbar gemacht werden. Im 19. Jahrhundert waren etliche Astronomen für solche Beobachtungen in ferne Länder gereist und hatten dort den Vorübergang der Venus vor der Sonne - manchmal unter schwierigen Umständen - vermessen. Warum waren diese Beobachtungen für die Astronomie so wichtig, dass ein derart hoher Aufwand betrieben wurde?

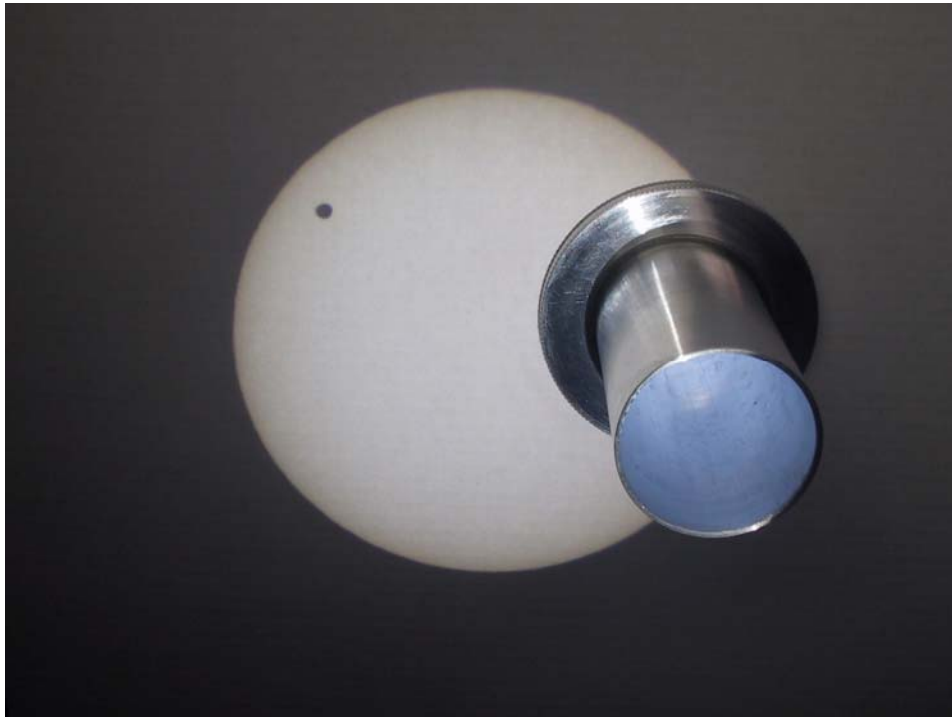


Abbildung 1: Sonnenprojektion des Venustransits im Jahre 2004.. Venusdurchgänge dienten im 19. Jahrhundert zur Bestimmung der Dimensionen unseres Sonnensystems.

Der Grund liegt in der Bedeutung des dritten Kepler'schen Gesetzes. Dieses Gesetz besagt, dass die Umlaufzeiten und Bahnhalbachsen der Körper, die sich um unsere Sonne bewegen, in einem festen mathematischen Verhältnis zueinander stehen. Da Umlaufzeiten von der Erde aus leicht zu bestimmen sind, bedeutet dies aber auch, dass die **Kenntnis einer Strecke** im

Sonnensystem den Astronomen die Dimensionen unseres Sonnensystems verrät. Darüber hinaus ist die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne, die Astronomische Einheit, auch die Grundlage der Entfernungsbestimmung im gesamten Kosmos.

→ Man überlege, warum die Kenntnis der Astronomischen Einheit wichtig für die Entfernungsbestimmung der Sterne (und Galaxien) ist (Stichwort Trigonometrische Parallaxe)!

Seit dieser Zeit sind Astronomen auf der Jagd nach der möglichst genauen Bestimmung einer einzigen Entfernung im Sonnensystem. Der berühmte amerikanische Astronom S. Newcomb fasste 1895 die Resultate der verschiedenen Venustransitexpeditionen zusammen und berechnete daraus einen neuen Wert für die Astronomische Einheit. Allerdings wurden die Bemühungen der Astronomen des neunzehnten Jahrhunderts mit der Entdeckung des Asteroiden 433 Eros im Jahre 1898 schnell überholt. Asteroiden bewegen sich auf Bahnen vorwiegend zwischen Mars und Jupiter. Sie sind bereits seit mehr als 200 Jahren bekannt. Da das Größte dieser Objekte einen Durchmesser von weniger als 1000 km hat, nannte man sie kleine Planeten (heute nennt man die großen und kugelförmigen unter ihnen Zwergplaneten, die kleinen zählen zu den Kleinkörpern). Mit 433 Eros hatte man zum ersten Mal ein Objekt gefunden, das der Erde so nahe kommt, dass eine direkte Entfernungsbestimmung möglich wird. Grundlage dieser Messung ist, dass je nach Ort des Beobachters auf der Erde der kleine Planet am Himmel eine andere Position unter den Sternen aufweist. Schon bald wurde den Astronomen klar, dass diese Methode genauere Werte als die Venusdurchgänge lieferte. Einer der Gründe für die bessere Genauigkeit ist die Tatsache, dass Asteroiden von der Erde aus wie Sterne aussehen. Man kann sie nur an ihrer Bewegung gegenüber dem Sternhintergrund identifizieren.

In diesem Versuch soll exemplarisch der Abstand eines Asteroiden von der Erde aus gemessen werden

→ Der Kleinkörper Eros ist kleiner als 30 km. Man schätze ab, welche Winkelausdehnung dieses Objekt in einer Entfernung von 10.000.000 km hat und warum man ihn nur als „Stern“ sehen kann (Stichwort: Luftunruhe bzw. Seeing).

Die Arbeit des Minor Planet Center

Die Zahl der entdeckten kleinen Planeten hat inzwischen die Zahl 100.000 überschritten. Bei dieser hohen Zahl ist es verständlich, dass Astronomen in aller Welt sich darauf geeinigt haben, dass ein zentrales Büro die Daten der Beobachtungen und Berechnungen zu kleinen Planeten verwaltet. Dieses Büro ist seit Jahren in Cambridge in den USA. Es stellt den Beobachtern z. B. auch die sog. Ephemeriden zur Verfügung. Das sind die Koordinaten (s. u.), unter denen man ein Objekt am Himmel finden kann.

In dem Büro werden auch die Regeln festgelegt, wann ein Objekt als entdeckt gilt. Die Entdeckung eines Asteroiden hat nämlich den angenehmen Nebeneffekt, dass der Entdecker für dieses Objekt dann einen Namen vorschlagen darf, der allerdings von einer internationalen Kommission genehmigt werden muss. Wie die Liste der Asteroidennamen zeigt, spielen bei der Benennung der kleinen Planeten natürlich alle menschlichen Vorlieben und Schwächen eine Rolle. In früherer Zeit mussten kleine Planeten übrigens weibliche Namen haben. Das führte dann manchmal zu solch merkwürdigen Namen wie „Bamberga“ und „Piazzi“ (Piazzi war der Entdecker des ersten kleinen Planeten).

→ Man besuche die Homepage des Minor Planet Center mit den Angeboten, die allen Astronomen zur Verfügung gestellt werden.

(Homepage: <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html>).

Man ermittle aus den im Internet zugänglichen Listen die Namen der Asteroiden mit den Nummern 1773 und 2807. Warum stieß wohl in Amerika die Benennung des Asteroiden mit der Nummer 2807 zunächst auf Widerstand?

Allgemeines zur Entfernungsbestimmung von nahen Asteroiden

Zieht ein Asteroid nahe an der Erde vorbei, so spielt bei der Beobachtung – wie man aus der Grafik entnehmen kann - die Lage des Beobachters auf der Erde eine Rolle. Würde der Asteroid fest im Raume sein, hätte ein Beobachter auf der Erde den Eindruck, dass sich das Objekt am Himmel gegenüber den Sternen, die man sich in großer Entfernung rechts am Bildrand vorstellen muss, bewegt. Diese Bewegung entsteht aber eigentlich nur durch die Veränderung des Beobachtungsortes in Folge der Erddrehung. Umgekehrt lässt sich aus der Veränderung der Beobachtungsrichtung in Abhängigkeit der Erddrehung die Entfernung des Asteroiden bestimmen.

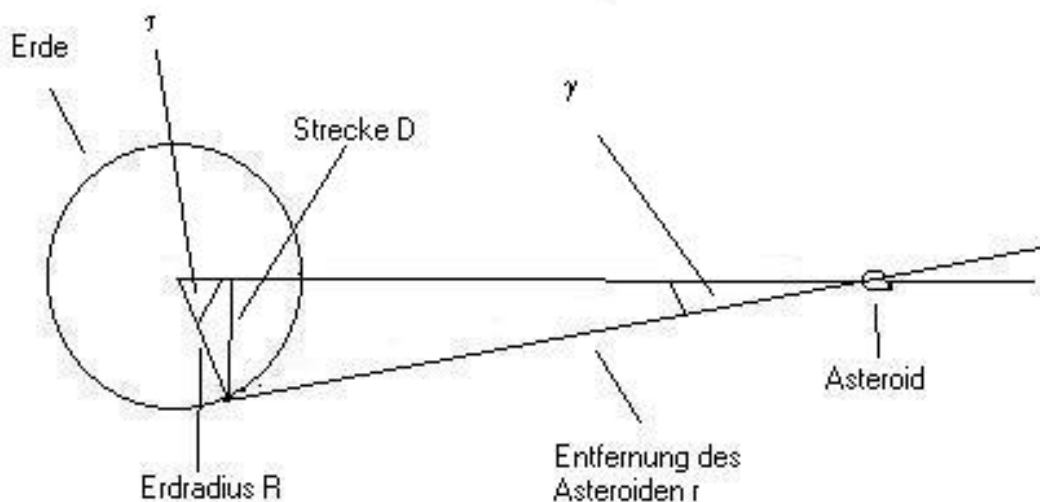


Abbildung 2: Ein Asteroid kommt in geringer Entfernung bei der Erde vorbei. In diesem Falle ist die Position des Asteroiden abhängig von dem Beobachtungsort auf der Erde.

→ Wie sähe die Bewegung aus, wenn ein Objekt sich nur in Deklination nahe an der Erde vorbeibewegt?

Aus der Geometrie der beiden Dreiecke lässt sich folgende Gleichung (die Strecke D ist in beiden Dreiecken gleich) aufstellen:

$$r = R \cdot \cos(\beta) \cdot \frac{\sin(\tau)}{\sin(\gamma)}$$

β ist die geografische Breite und τ der Stundenwinkel zum Zeitpunkt der Beobachtung. (Die wahren Verhältnisse sind in Wirklichkeit noch etwas komplizierter, können aber hier wegen der kleinen Deklination näherungsweise so angesetzt werden.). Der Winkel γ ist die Verschiebung des Asteroiden gegenüber dem Sternhintergrund, der sich im Laufe der Nacht ändert, was eine Bewegung des Objekts vortäuscht. Da ein Asteroid normalerweise auch eine reale Bewegung gegenüber den Sternen hat, beobachtet man auf einem Ort der Erde eine aus beiden Effekten resultierende Bewegung. Mit Kenntnis der wahren Bewegung am Himmel lässt sich dann der perspektivische Effekt ermitteln und nach der Formel daraus die Entfernung ableiten.

Die Entfernungsbestimmung geschieht daher im Prinzip durch die Bestimmung der Positionen des Asteroiden gegenüber dem Sternhintergrund, der Bestimmung der wahren Bewegung des Objektes, die von der gemessenen Bewegung abgezogen wird und der Anwendung obiger Formel.

Die Bestimmung von Himmelskoordinaten

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen der astrometrischen Messungen erläutert werden, die für die Bestimmung von Asteroidenpositionen wichtig sind.

Da man ihre Entfernung nicht kennt, gibt man die Lage von Himmelsobjekten in einem sphärischen Koordinatensystem in einer Einheitskugel an. Man tut dann so, als hätten alle Objekte am Himmel die gleiche Entfernung. Analog zur Erdkugel definiert man an der Himmelskugel zwei Winkel, **Rektaszension α** und **Deklination δ** , die der geografischen Länge und Breite entsprechen. Aus historischen Gründen wird die Rektaszension α nicht in Grad sondern in Zeiten (Stunden, Minuten und Sekunden) angegeben.

→ Welchem Winkel entspricht eine Zeit von 6 Stunden?

In diesem Koordinatensystem befinden sich die Sterne in erster Näherung in Ruhe und ändern ihre Koordinaten nur wenig, so dass wir ihre Bewegung hier vernachlässigen wollen. Wie das Wort Planeten („Wandelsterne“) schon andeutet, trifft dieses für große und kleine Planeten (und alle anderen Objekte unseres Sonnensystems) nicht zu. Da die Erde sich dreht, haben Menschen auf der Erde zudem das Gefühl, dass sich das Koordinatensystem mit den Sternen um die Erde dreht. Die Nachführung der Fernrohre sorgt aber dafür, dass diese sich in gleicher Weise bewegen und sorgen so für die Bilder von ruhenden Sternen.

In der Praxis werden Asteroiden mit CCD Kameras (früher Photoplatten) aufgenommen. Sie bilden einen kleinen Teil des Himmels, z. B. wenige Bogenminuten ab.

→ Erinnerung: (Ein Grad lässt sich in 60 Bogenminuten (') einteilen, jede Bogenminute enthält 60 Bogensekunden ("). In der Astronomie spielen gerade die Winkel kleiner als ein Grad eine wichtige Rolle.

Für jede Positionsbestimmung mittels fotografischer Aufnahmen (heute geschieht das eher über CCD-Aufnahmen) benötigt man mehrere Sterne, deren Rektaszensionen und Deklinationen bereits bekannt sind. Sie heißen Referenzsterne. Mittels ausgefeilter Programme kann dann eine Transformation zwischen den rechtwinkligen Koordinaten auf der Aufnahme und den sphärischen Koordinaten am Himmel durchgeführt und damit die sphärischen Koordinaten unseres Objektes bestimmt werden. Das Ergebnis einer Positionsbestimmung sind Rektaszension und Deklination und die Aufnahmezeit eines Objektes, die man z. B. mit den Ephemeridendaten des Minor Planet Center vergleichen kann.

Auswertung der Aufnahmen

In unserem Beispiel soll auf einigen Aufnahmen die Position des kleinen Planeten Toutatis bestimmt werden. Zur Bestimmung der Entfernung reichen im Prinzip zwei Aufnahmen aus. Über die Auswahl der geeigneten Aufnahmen wird im Verlauf noch etwas ausführlicher eingegangen werden.

Zur Positionsbestimmung dienen die zehn Aufnahmen der Materialsammlung, die mit der Bezeichnung „Tou“ beginnen. Sie stammen von einer längeren Aufnahmeserie mit einem Refraktor (Öffnung = 15 cm; Brennweite = 150 cm) des Observatoriums Hoher List. Dabei bedeutet „Tou12_22“ die 22. Aufnahme der 12. Serie. Die Aufnahmezeiten finden sich in der Liste: „Zeiten_ephem.doc“.

Das hier vorgestellte - zugegebenermaßen etwas grobe Verfahren kann ohne besondere Hilfsmittel (es genügen Taschenrechner und Geo-Dreieck) durchgeführt werden, kann aber auch noch durch einfache Programme der Bildverarbeitung, die in der Lage sind, rechtwinklige Koordinaten zu messen, verbessert werden.

Obwohl die Abbildung von sphärischen Koordinaten (Kugeloberfläche) in rechtwinklige Koordinaten in einer Ebene im Allgemeinen komplexer ist, kann sie für kleine Bereiche als linear angesehen werden. Dann gibt es eine einfache Beziehung zwischen sphärischen und rechtwinkligen Koordinaten. Wenn man zusätzlich noch die Orientierung des sphärischen Koordinatensystems auf den Aufnahmen kennt, kann man die gemessenen Abstände auf den Aufnahmen leicht in sphärische Koordinaten umrechnen.

→ Warum kann es dann trotzdem noch eine Drehung der Koordinatensysteme gegeneinander geben, zum Beispiel bei Teleskopen mit wechselnden Kameras.

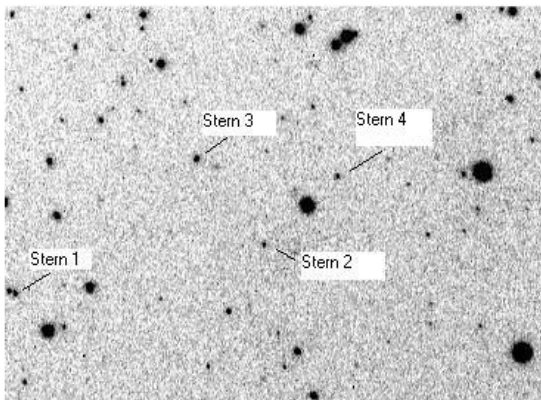


Abbildung 3: Aufnahme des kleinen Planeten Toutatis. Der Asteroid unterscheidet sich nicht von den Sternen. Er ist das helle Objekt in der Mitte der Aufnahme. Zur besseren Sichtbarkeit ist die Aufnahme im Negativ dargestellt. (Aufnahme: Observatorium Hoher List)

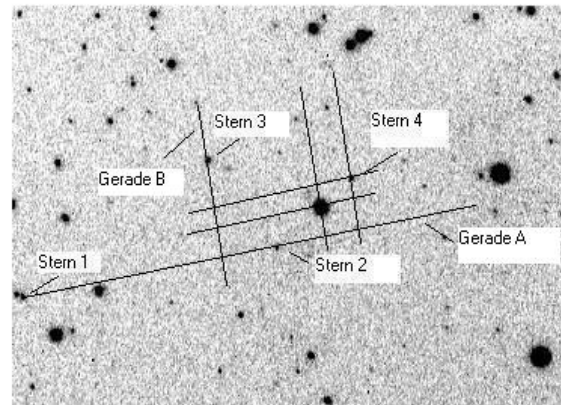


Abbildung 4: Stern 1 und 2 haben gleiche Deklination. Diese Grafik zeigt die Hilfskonstruktion zur Messung der Koordinaten des Asteroiden.

| Objekt | α_{2000} | δ_{2000} |
|---------|-----------------|-----------------|
| Stern 1 | 21h 53m 28s5 | -15g 34' 33" |
| Stern 2 | 21h 52m 51s3 | -15g 34' 38" |
| Stern 3 | 21h 52m 58s5 | -15g 31' 13" |
| Stern 4 | 21h 52m 38s8 | -15g 32' 46" |

Tabelle 1: Daten der Referenzsterne zur Ermittlung der Koordinaten des Asteroiden.

Man ermittle durch Vergleich der Grafiken den Asteroiden auf jeder Aufnahme, markiere das Objekt und identifiziere die Sterne 1 bis 4.

Wie man sieht, wandert der Asteroid beträchtlich auf den Aufnahmen. Für die einfache Positionsbestimmung wird ausgenutzt, dass die Sterne Nummer 1 und 2 in obiger Abbildung in etwa gleiche Deklination aufweisen.

Danach ist zunächst mit dem Geodreieck eine Verbindung der Sterne 1 und 2 zu ziehen. Diese Richtung ist die Rektaszensionsrichtung. Als nächstes müssen dazu senkrechte Linien durch die Sterne 3 oder 4 (je nachdem ob der Asteroid rechts oder links vom Stern 2 liegt) und durch den Asteroiden gezogen werden. Diesen Linien entspricht die Deklinationsrichtung. Nun ist die Hilfskonstruktion zur Bestimmung der Rektaszension des Asteroiden nach Abbildung 5 fertig.

Man bestimme den Abbildungsmaßstab in Rektaszension A_α aus folgender Gleichung:

$$A_\alpha = \frac{\alpha_4 - \alpha_2}{\text{Strecke}(X - \text{Stern2})} \quad (\text{in Einheiten Zeitsekunden/mm})$$

Man rechne mit dem Abbildungsmaßstab die in mm gemessene Strecke von Stern 2 zu Punkt Y in Zeitsekunden um und ziehe das Ergebnis von der Rektaszension des Sterns 2 ab, um die Rektaszension des Asteroiden zu erhalten.

Die Daten für die Deklination können entsprechend ermittelt werden. Hierzu dient die Hilfskonstruktion in Abbildung 6. Bei einigen Aufnahmen ist es unter Umständen günstiger, den Stern mit der Nummer 3 zu verwenden.

Für die Deklination gibt es eine entsprechende Gleichung für den Abbildungsmaßstab, hier ist die Einheit aber "/mm.

ACHTE AUF DIE KOORDINATENRICHTUNGEN!

Die **Rektaszension** läuft in den Bildern von rechts nach links. Am Himmel nimmt die Rektaszension übrigens von West nach Ost zu. Die **Zahlenwerte der Deklination** werden von oben nach unten größer (negative Deklination!)

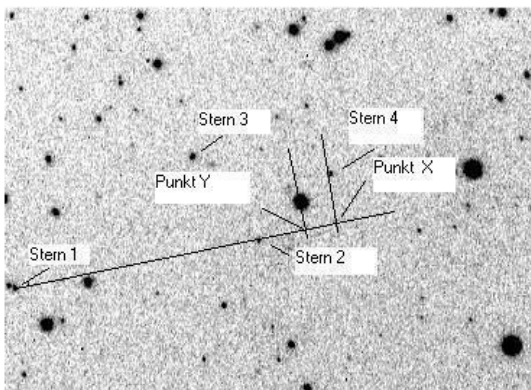


Abbildung 5: Hilfskonstruktion zur Bestimmung der Rektaszension des Asteroiden.

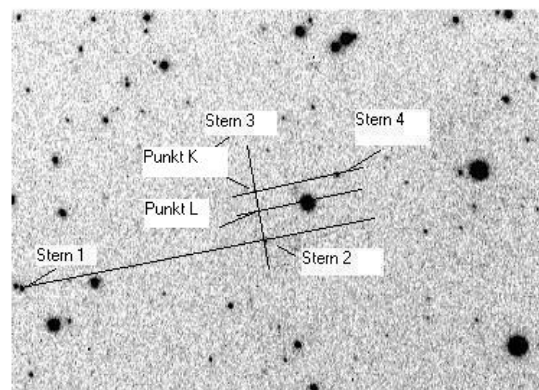


Abbildung 6: Hilfskonstruktion zur Bestimmung der Deklination des Asteroiden.

Zur Kontrolle ist es günstig, sich die Koordinatenachsen und ihren Verlauf noch einmal vor Augen zu führen, und zu schauen, ob die ermittelten Koordinaten wirklich diese Werte annehmen können. Das Lösungsblatt enthält zur Kontrolle die gemessenen Koordinaten für jede Aufnahme.

Die Entfernung des Asteroiden Toutatis (4179)

Zur Bestimmung der Entfernung von Toutatis benötigt man zur Ermittlung des Winkels γ die Position des Asteroiden, wenn dieser gerade im Meridian, in südlicher Richtung, steht. Diese Position könnte man aus den gemessenen Daten extrapolieren. Außerdem müsste man aus den Beobachtungen von verschiedenen Nächten die genaue wahre Bewegung des Asteroiden am Himmel ermitteln.

Wir werden hier ein etwas vereinfachtes Verfahren anwenden und uns dabei auf die Rektaszensionsdaten konzentrieren:

Aus der Ephemeride in der Materialsammlung ermittle man die Änderung der Rektaszension (eine Winkelgeschwindigkeit) von 4179 Toutatis in der Einheit sec/h.

Zur weiteren Auswertung werden dann jeweils zwei Aufnahmen ausgewertet. Die Aufnahme Tou9_1 ist ungefähr zu der Zeit gemacht worden, als das Objekt im Süden stand. Es ist nun günstig, Aufnahmen zu kombinieren, die etwa im gleichen Zeitabstand vor und nach dieser Zeit gemacht wurden. Man überlege sich an Hand der Abbildung 2 die Geometrie. Für solche Aufnahmen gilt, dass der Winkel τ jeweils gleich ist, der Unterschied in Rektaszension zwischen diesen Aufnahmen aber dem doppelten Winkel γ entspricht, wenn man die eigene Bewegung des Asteroiden abgezogen hat.

Man wähle eines der Paare Tou3_2/Tou12_22, Tou2_1/Tou14_5 oder Tou1_1/Tou14_21 zur weiteren Bearbeitung aus. Aus den Aufnahmedaten bestimme man die Zeitdifferenz und daraus den Stundenwinkel τ . (Sternzeit und bürgerliche Zeit sollen die gleichen Minutenlängen haben. Bitte beachten, dass die Zeitdifferenz dem doppelten Stundenwinkel entspricht. Die Umrechnung in Grad nicht vergessen!)

Man ziehe von den Rektaszensionsdifferenzen die aus der Ephemeride ermittelte Rektaszensionsbewegung von Toutatis ab, teile durch 2 und rechne das Ergebnis (Winkel γ !) in Bogensekunden und dann in Grad um. Die geographische Breite des Beobachtungsortes (Observatorium Hoher List) beträgt $50^{\circ} 48' 09''$. Der Erdradius R wird mit 6370 km angesetzt.

Man berechne nach obiger Formel die Entfernung in Kilometern und teile das Ergebnis durch 149.600.000 km. Dies entspricht dem Resultat in Astronomischen Einheiten.

Wenn man bedenkt, dass ein Asteroid normalerweise eine Entfernung von 2 bis 5 Astronomischen Einheiten von der Erde hat, versteht man, was es bedeutet, von einem „nahen“ Vorübergang zu sprechen. Inzwischen hat es sogar Asteroiden gegeben, die deutlich näher als der Mond an der Erde vorbeigezogen sind wie z. B. der Asteroid 2004 FU162.

Heutzutage bestimmt man übrigens die Astronomische Einheit wieder durch Beobachtungen der Venus, diesmal aber durch sehr genaue Radar-Abstandsmessungen.