

Zweifacher Blick auf erdnahen Asteroiden

Parallaxenmessung im Schulunterricht

Einfache Grundlagen der Optik, die sich im Unterricht veranschaulichen lassen, ermöglichen es, Objektpositionen auf Astrofotos erstaunlich genau zu messen. So ergaben die mit ferngesteuerten Teleskopen in Australien und Hawaii aufgenommenen Bilder des Asteroiden Apophis Parallaxen, die mit den Ergebnissen professioneller Astronomen vergleichbar sind.

Von Matthias Penselin, Carolin Liefke und Martin Metzendorf

Wie lassen sich Entfernungen kosmischer Objekte bestimmen? Diese Frage ist von grundlegender Bedeutung für die Astronomie. Unser Ziel war es, eine Parallaxenmessung als Schulprojekt durchzuführen und Unterrichtsmaterial zu entwickeln, das die Behandlung der Entfernungsbestimmung in der Schule anhand eigener Himmelsaufnahmen ermöglicht. Zusätzlich sollte moderne Technik genutzt werden, um genaue Resultate mit wissenschaftlichem Wert zu erhalten.

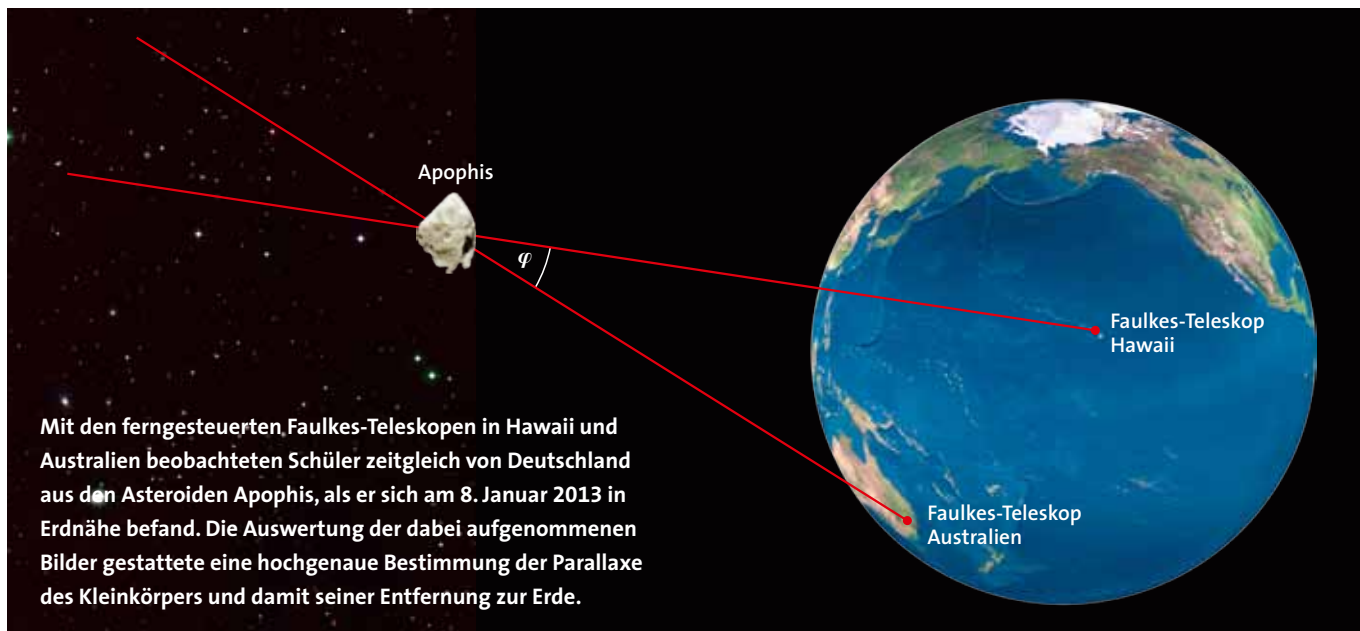
Aus einem einzelnen Foto lassen sich nur die Himmelskoordinaten eines Objekts bestimmen, also nur die Richtung, in der sich das anvisierte Objekt von der Erde aus gesehen zum Aufnahmezeitpunkt befindet. Will man aber die volle dreidimensionale Struktur, beispielsweise unseres Planetensystems oder der Milchstraße entschlüsseln, muss man zusätzlich wissen, wie weit die beobachteten Objekte entfernt sind. Von grundlegender Bedeutung hierfür ist die folgende Beob-

achtung: Betrachten Sie Ihren Daumen abwechselnd mit dem linken oder rechten Auge am ausgestreckten Arm, so scheint er vor dem Hintergrund hin und her zu springen – demnach blicken Sie mit dem einem Auge in eine andere Richtung als mit dem anderen, um den Daumen zu fixieren. Probieren Sie es einmal aus!

Diesen Effekt oder auch den Winkel φ (phi) zwischen diesen Blickrichtungen bezeichnet man als Parallaxe. Führen Sie Ihren Daumen näher an die Augen heran, so ist die Parallaxe größer. Bei bekanntem Augenabstand lässt sich aus den Winkeln des Dreiecks Auge-Auge-Daumen der Abstand zum Daumen berechnen. Erdnahe Himmelsobjekte erscheinen daher bei der Beobachtung von verschiedenen Standpunkten auf der Erde aus gegen den Fixsternhintergrund versetzt an verschiedenen Positionen. Dies gilt auch für nahe Fixsterne, wenn sie von verschiedenen Standpunkten A und B auf der Erdbahn im Jahreslauf beobachtet werden (siehe Grafik S. 74 unten).

Schon Kopernikus wusste, dass die Bewegung der Erde um die Sonne zur Folge haben müsste, dass die Fixsterne im Lauf des Jahres kleine Ellipsen an der Himmelskugel beschreiben. Da man sie mit den damaligen Mitteln nicht nachweisen konnte, war es immerhin möglich abzuschätzen, wie groß die Entfernung der Fixsterne im Vergleich zur Entfernung Erde-Sonne sein muss, damit die Parallaxe unbeobachtbar ist. Der deutsche Astronom Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846) konnte erstmals mit Hilfe der Parallaxe messen, wie weit ein uns naher Stern, nämlich 61 Cygni im Sternbild Schwan, entfernt ist.

Im Schulunterricht ist die folgende Erkenntnis für viele Schüler genauso schockierend wie für die Zeitgenossen der Astronomen in früheren Jahrhunderten: Wäre die Erde zehn Meter von der Sonne entfernt, dann wäre der nächste Fixstern östlich von Moskau. Diese Überlegungen mögen die Bedeutung der Parallaxe für das Erfassen der räumlichen Struktur von Planetensystem und Milchstraße erläutern.



SuW-Grafik

tern. Derzeit verfolgen die Astronomen mit der Raumsonde Gaia das Ziel, die Entfernungen von einer Milliarde Sterne unserer Milchstraße zu bestimmen (siehe SuW 9/2014, S. 26). Sofort klar ist aber auch, dass Parallaxenwinkel in der Astronomie sehr klein sind und dass dementsprechend genau gearbeitet werden muss, wenn man verlässliche Ergebnisse erreichen will.

Ein Vorschlag mit Folgen

Im Herbst 2012 fand am Heidelberger Haus der Astronomie die erste hier durchgeführte bundesweite Lehrerfortbildung statt, an der die Gymnasiallehrer Matthias Penselin und Martin Metzendorf teilnahmen. Hier stellte Carolin Liefke, eine der ständigen Mitarbeiterinnen des Hauses, ihre Initiativen im Asteroidensuchprogramm der International Astronomical Search Collaboration (IASC) vor. Sie sprach über die Möglichkeit, Nachbeobachtungen von Asteroiden mit den Faulkes-Teleskopen durchzuführen – zwei baugleiche Instrumente, von denen sich eines auf dem Vulkan Haleakala bei Hawaii, das andere in Siding Spring in Australien befindet (siehe Bild S. 74 oben).

Warum also, fragten wir uns nach dem Vortrag, sollten wir nicht diese beiden Teleskope nutzen, um damit zeitgleich denselben Asteroiden zu beobachten? Durch die unterschiedlichen Standpunkte auf der Erde wäre ein Asteroid vor dem Fixsternhintergrund parallaktisch verschoben, und aus der Größe seiner Parallaxe sollte sich seine Entfernung berechnen lassen!

Erdnahe Asteroiden

Als »potenziell gefährliche Objekte (englisch: Potentially Hazardous Objects, PHO) bezeichnen die Astronomen Kleinkörper, die der Erdbahn näher als 0,05 Astronomische Einheiten kommen und deren Durchmesser größer als 100 Meter sind. Da sich die Definition auf die Bahn und nicht auf die Körper selbst bezieht, müssen nicht alle PHO wirklich eine akute Bedrohung darstellen.

Auch der Asteroid (99942) Apophis ist ein PHO: Er kommt der Erde am 13. April 2029 auf rund 30 000 Kilometer nahe. Dabei wird sich seine Bahn erheblich ändern. Messungen des Weltraumteleskops Herschel legen einen Durchmesser von rund 300 Metern nahe. Nach der Entdeckung des Asteroiden konnten die Astronomen nicht ausschließen, dass er im Jahr 2029 so abgelenkt wird, dass er 2036 auf der Erde einschlägt. Im Jahr 2009 wurde die Wahrscheinlichkeit dafür auf 1:250 000 herabgesetzt, seit der Opposition 2013 schließt die US-Weltraumbehörde NASA einen Impakt von Apophis auf der Erde im 21. Jahrhundert sicher aus.

Gegenwärtig kennen die Astronomen schätzungsweise 20 bis 30 Prozent aller PHO. Die Suche nach unbekannten PHO und die möglichst präzise Vermessung der Bahn bekannter PHO ist also eine fortbestehend wichtige Aufgabe, auch wenn das öffentliche Interesse leider nur punktuell auf spektakuläre Nachrichten zu diesem Thema fokussiert ist. Die vielleicht größte Bedrohung durch den Einschlag eines Asteroiden der Größe von Apophis in einem Ozean würde durch die ausgelöste Flutwelle entstehen. Die Zerstörungen könnten lokal katastrophal sein, globale Konsequenzen müssten nur befürchtet werden, wenn der abstürzende Asteroid noch wesentlich größer ist.

Normalerweise nutzen Astronomen den Erdbahndurchmesser als Basisstrecke, um den Abstand zu Fixsternen zu bestimmen. Der gegenseitige Abstand der beiden Faulkes-Teleskope beträgt nur 7640,9 Kilometer – im Vergleich zum Erdbahndurchmesser von rund 300 Millionen Kilometern. Der entscheidende Punkt, von dem die Realisierbarkeit unseres Projekts abhing, lag nun darin, ein geeignetes nahes Objekt zu finden, das an beiden Te-

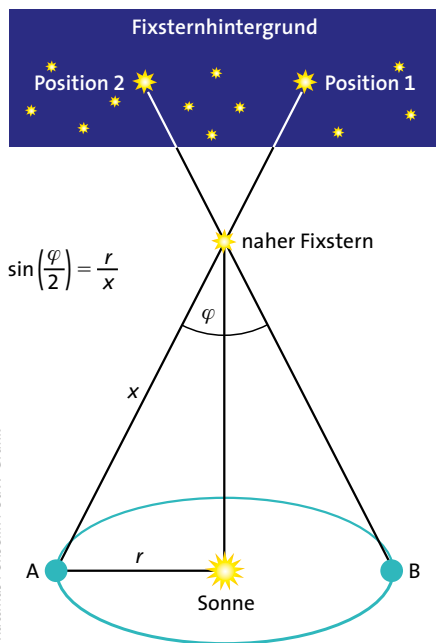
leskopstandorten gleichzeitig hoch genug über dem Horizont steht – und zudem eine Phase mit gutem Wetter an beiden Observatorien zu erwischen. Die beobachtungstechnischen Aspekte waren schnell geklärt: Martin Metzendorf und Matthias Penselin würden an ihren Schulen die Teleskope steuern, und Lothar Kurtze, der die Arbeit der deutschsprachigen Schulen mit den Faulkes Telescopes koordiniert, würde ihnen mit Rat und Tat zur Seite ste-

hen. Und bei der Durchführung könnten die beiden Lehrer von seiner langjährigen Erfahrung bei der Suche nach Kleinplaneten profitieren.

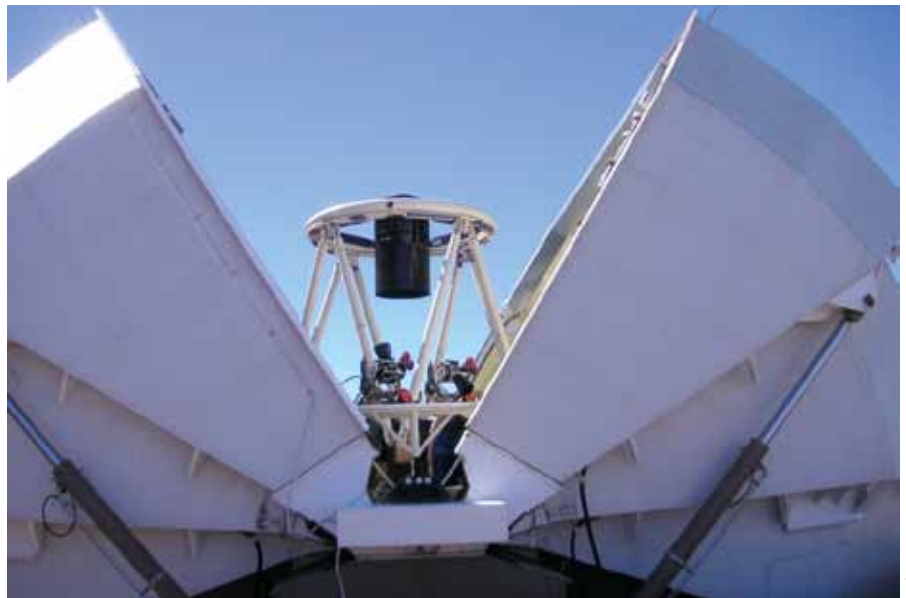
Das richtige Ziel

Die Frage nach der Gefährdung der Erde durch Asteroiden weckt bei Schülern stets Interesse. Asteroiden sind aber darüber hinaus auch ein wichtiges Ziel astronomischer Beobachtungen. Nach der im Astronomieunterricht üblichen Behandlung des Planetensystems entsteht bei den Schülern oft der Eindruck, das Planetensystem sei im Wesentlichen leer – vor allem dann, wenn es gelingt, die tatsächlichen Größenverhältnisse zu veranschaulichen. Außerdem erscheint ihnen das Planetensystem wie ein statisches Uhrwerk, das gemäß den keplerschen Gesetzen immer weiter läuft, ohne Entwicklung.

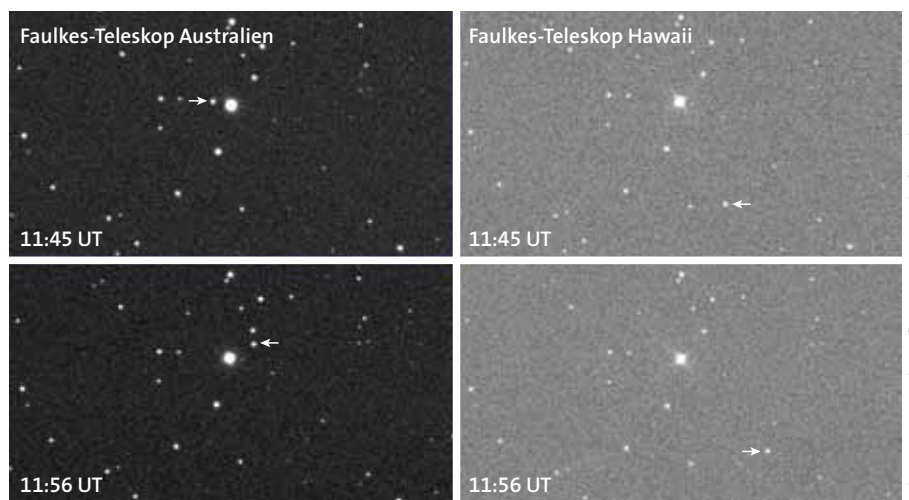
Behandelt man aber Kleinkörper, dann wandelt sich dieses Bild. Anstatt acht Körper haben wir plötzlich hunderttausende. Ihre Bahnen kreuzen sich, und die Objekte können sich immer wieder gegenseitig beeinflussen. In Wahrheit hat sich die Gestalt des Planetensystems ja beständig geändert und wird sich auch in Zukunft ändern. Ein rein statisches Bild des Plane-



Infolge des Erdumlaufs um die Sonne verschiebt sich die Position eines nahen Sterns aus der Sicht eines irdischen Beobachters vor dem fernen Fixsternhintergrund. Aus der gemessenen Parallaxe ϕ lässt sich zusammen mit dem bekannten Abstand r der Erde zur Sonne die gesuchte Distanz x zum Stern berechnen.



Jedes der ferngesteuerten Faulkes-Teleskope ist mit einem lichtstarken Ritchey-Chrétien-Spiegelsystem ausgerüstet und befindet sich an einem klimatisch günstigen Standort.



Der Vergleich der Aufnahmen von Apophis verdeutlicht die Parallaxe und Eigenbewegung des Asteroiden während seiner Erdnähe am 8. Januar 2013: Wegen der großen Distanz zwischen den beiden Faulkes-Teleskopen erscheint der Asteroid an unterschiedlichen Positionen bezüglich der Fixsterne.

tensystems würde unserem modernen astronomischen Weltbild nicht entsprechen.

Der Asteroid Apophis gehört zu den potenziell gefährlichen Objekten (englisch: Potentially Hazardous Objects, siehe Kasten S. 73). Es war also ein wissenschaftlich sinnvolles Ziel, die Erdnähe von Apophis im Januar 2013 zu nutzen, um seine Bahn genauer als zuvor vermessen zu können und auf diese Weise mit noch größerer Sicherheit ausschließen zu können, dass im 21. Jahrhundert ein Impakt dieses Kleinkörpers auf der Erde stattfindet. Gleichzeitig war aber der Moment seiner Erdnähe,

zu dem man die Bahn optimal vermessen konnte, auch der günstigste Moment für die Bestimmung der Parallaxe. Neben dem richtigen Objekt ist aber für die Parallaxenmessung als Schulprojekt entscheidend, dass die Faulkes-Teleskope genau die passenden »Fotoapparate« darstellen.

Zwei schöne Teleskope

Dank ihres Hauptspiegeldurchmessers von zwei Metern lassen sich mit den Faulkes-Teleskopen auch lichtschwache Objekte nachweisen. Mit ihrer Brennweite von 18300 Millimetern ermöglichen die Opti-

ken zudem genaue Positionsbestimmungen. Hinzu kommt, dass sich die Teleskope über eine benutzerfreundliche Oberfläche fernsteuern lassen.

Der Initiator Martin C. Faulkes wollte für Schulen in seinem Heimatland England eine einfache und zugleich leistungsfähige Beobachtungsmöglichkeit schaffen. Die Standorte sind so gewählt, dass der lokale Nachthimmel während der normalen Schulzeit in Mitteleuropa beobachtet werden kann. Mit beiden Instrumenten ist sowohl der Blick auf den nördlichen als auch auf den südlichen Sternhimmel gewährleistet. Daher nutzten wir die Teleskope auch oft, um im Schulunterricht Deep-Sky-Objekte zu fotografieren. Kostproben gibt es auf den Astronomie-Webseiten unserer Schulen: www.julian-goeltz.de und www.lgl.de.

Speziell für unser Parallaxenprojekt ist es wichtig, dass die Teleskope so weit auseinanderliegen, dass eine ausreichend lange Basisstrecke zwischen den beiden »Augen« liegt. Andererseits liegen die Standorte der Observatorien noch so nahe beieinander, dass sich ein genügend großer Teil des Himmels zeitgleich mit beiden Teleskopen anvisieren lässt.

16 Bilder und zwei Filme

Schließlich buchten wir für den 8. Januar 2013 eine halbe Stunde Beobachtungszeit parallel an beiden Teleskopen. Für die Auswertung wählten wir vier von Australien und zwölf von Hawaii aus aufgenommene

Bilder mit ausreichend hoher Bildqualität. Setzt man alle Bilder von einem Standort aus zu Animationen zusammen, sieht man sofort, wie sich Apophis gegen den Fixsternhintergrund bewegt. Vergleicht man aber die beiden Animationen, beispielsweise in dem man sie in zwei Fenstern gleichzeitig nebeneinander ablaufen lässt, so erkennt man, dass die von Australien aus betrachtete Bahn von Apophis gegen die von Hawaii aus beobachtete Bahn versetzt ist: Die Parallaxe wird beim Betrachten der Filme sofort sichtbar (siehe Bilder S. 74 Mitte).

Zur Auswertung standen uns prinzipiell zwei Wege offen. Zum einen gab es zwei Aufnahmen mit guter Qualität, die mit einem Zeitabstand von nur 18 Sekunden

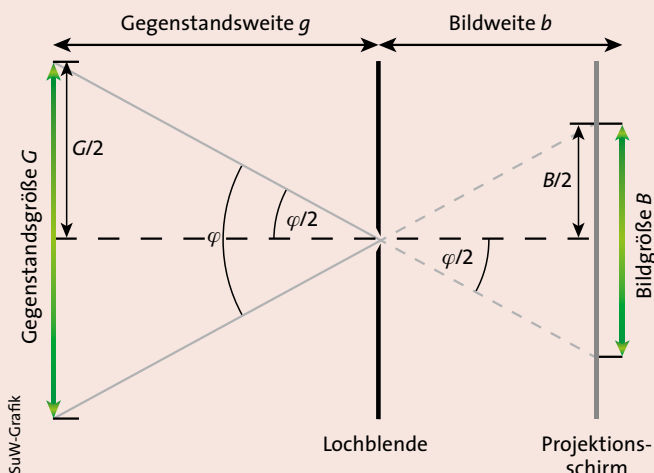
Der Pixelmaßstab unserer Aufnahmen

Bezeichnet man die Größe eines Gegenstands, der durch ein optisches System – beispielsweise durch eine Lochblende – abgebildet wird, als G und seine Entfernung als Gegenstandsweite g , so erzeugt die Optik ein Bild der Größe B in einer Entfernung von der Hauptebene der Optik, die man Bildweite b nennt. Der Grafik lässt sich entnehmen, dass die Größen B , G , b und g durch eine einfache Beziehung miteinander verbunden sind:

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b}.$$

Projiziert man beispielsweise die Sonne mit einer Lochblende auf einen Schirm, hat man somit ein maßstäbliches Abbild der Sonnengröße G zu ihrer Entfernung g vor Augen. Für eine Bildweite von 650 Millimetern (Entfernung zwischen Lochblende und Schirm) findet man eine Bildgröße von 6 Millimetern. Da aber die Entfernung der Sonne zunächst unbekannt ist, lässt sich in Wahrheit nur ihr Winkeldurchmesser φ bestimmen. Er folgt gemäß obiger Skizze aus der Formel

$$\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{G}{2g} = \frac{B}{2b}.$$



In unserem Beispiel ergibt sich $\varphi = 0,53$ Grad. Schon hier kann man also lernen, dass die Bildgröße astronomischer Objekte stets eine Aussage zum Winkeldurchmesser des Objekts beinhaltet.

Was ändert sich nun, wenn man zu den Faulkes-Teleskopen wechselt? Man muss in den obigen Formeln lediglich die Bildweite b durch die Brennweite f der Faulkes-Teleskope ersetzen. Der Grund liegt darin, dass in der Linsengleichung der Optik

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

der Bruch $1/g$ wegen der großen Entfernung des abgebildeten astronomischen Objekts vernachlässigbar klein ist. Die Linsengleichung vereinfacht sich also zu $1/f = 1/g$ beziehungsweise $g = f$, so dass die Formel für den Winkeldurchmesser nun

$$\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{B}{2f}$$

lautet. Mit $f = 18\,300$ mm und $B = 0,027$ mm für die Größe eines Pixels des Chips der Faulkes-Teleskope findet man nun denjenigen Winkel φ_p der einem Pixel am Himmel entspricht:

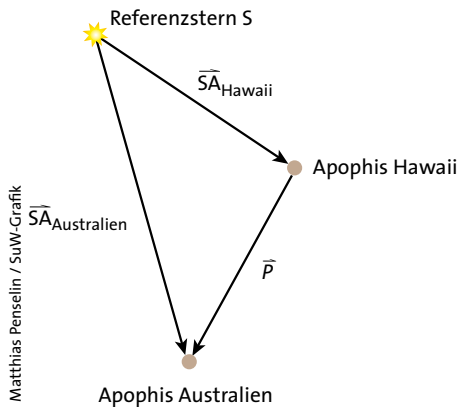
$$\varphi_p = 2 \arctan \left(\frac{\varphi_p}{2f} \right) = 8,453 \cdot 10^{-5} \text{ Grad},$$

also 0,304 Bogensekunden. Diese Angabe nennt auch der Dateihdr der von Hawaii aus aufgenommenen CCD-Bilder.

Im Prinzip beschreibt die Formel einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der Bildgröße B und dem Winkel φ . Da das Gesichtsfeld der Faulkes-Teleskope bei nur zehn Bogenminuten liegt, sind aber alle Winkel klein, und daher gilt im Bogenmaß näherungsweise

$$\tan \varphi \approx \varphi = \frac{B}{f}.$$

Der Proportionalitätsfaktor zwischen Winkel und Bildgröße ist somit der Kehrwert der Brennweite.



Auf den in Australien und Hawaii aufgenommenen Bildern wird jeweils die Lage $\vec{SA}_{Hawaii}$ beziehungsweise $\vec{SA}_{Australien}$ von Apophis bezüglich eines Referenzsterns S vermessen. Der in Pixeln berechnete Betrag des Differenzvektors $\vec{P}$ entspricht dem gesuchten Parallaxenwinkel.

den fotografiert worden waren. Also sollte durch direkten Vergleich dieser beiden Bilder eine einfache Abstandsbestimmung möglich sein.

Zweitens sollte eine genauere Abstandsbestimmung möglich sein, wenn alle 16 Bilder in eine gemeinsame Auswertung einbezogen werden. Hierbei sind allerdings sowohl die Bahnbewegung von Erde und Apophis relevant als auch die Drehung unseres Planeten. Daher ist die Parallaxe im Allgemeinen zeitabhängig.

Für eine möglichst einfache Auswertung setzen wir nun voraus, dass sich jede in Pixeln gemessene Distanz auf den Bildern der Faulkes-Teleskope mit einem konstanten Faktor – dem Pixelmaßstab – in eine Winkeldistanz am Himmel umrechnen lässt. Wir berechneten diesen Faktor bei bekannter Brennweite und Pixelgröße mit Hilfe einfacher Grundlagen der Optik (siehe Kasten S. 75).

Anschließend maßen wir in den beiden Bildern die Position von Apophis (A) bezüglich eines Referenzsterns (S). Die jeweiligen Positionen notierten wir als Vektoren $\vec{SA}_{Hawaii}$ und $\vec{SA}_{Australien}$, jeweils mit einer in Pixeln ausgedrückten x- und y-Koordinate: $\vec{SA}_{Hawaii} = (x_1, y_1)$ beziehungsweise $\vec{SA}_{Australien} = (x_2, y_2)$. Zieht man diese Vektoren voneinander ab, so ergibt sich ein Differenzvektor $\vec{P} = \vec{SA}_{Australien} - \vec{SA}_{Hawaii}$, der den Weg des Asteroiden in einem Bild zu der Position im zweiten Bild beschreibt (siehe Grafik oben).

Der Betrag von $\vec{P}$ ist die der Parallaxe entsprechende Distanz in Pixeln, die dann

mit Hilfe des Pixelmaßstabs in Grad umgerechnet wird. Auf diesem Weg fanden wir die Parallaxe: $\varphi = 0,03049$ Grad. Dieses Ergebnis weicht von den im Folgenden beschriebenen Daten des US-amerikanischen Minor Planet Center (MPC) nur um rund ein Prozent ab.

Noch am Abend des 8. Januar 2013 führte Lothar Kurtze eine genauere Auswertung durch, in die er alle 16 Aufnahmen einbezog. Die Himmelskoordinaten von Apophis bestimmte er jeweils mit Hilfe der Software Astrometrica. Dazu identifiziert die Software durch Abgleich mit einem Sternkatalog möglichst viele Fixsterne und errechnet aus ihren bekannten Positionen eine »nichtlineare Plattenlösung«. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen Pixelkoordinaten und Himmelskoordinaten. Sodann passt die Software an die Helligkeitsverteilung des sternähnlichen Abbilds von Apophis eine Gaußverteilung an. Sie ermöglicht eine auf Pixelbruchteile genaue Bestimmung der Position des Asteroiden in jeder Aufnahme. Nun lassen sich die Himmelskoordinaten von Apophis auf allen Einzelbildern bestimmen. Noch am gleichen Tag erhielt das MPC die aus den Bildern bestimmten Positionen.

Trägt man diese Koordinaten in Abhängigkeit von der Zeit auf, so lassen sich die innerhalb der Beobachtungszeit an beiden Standorten gewonnenen Daten jeweils durch zwei lineare Funktionen annähern. Aus den beiden Funktionen wurde dann für 11:50 Uhr UT die Position am Himmel von Apophis von Hawaii aus und von

Australien aus berechnet. Auf diese Weise erreichten wir, dass alle Bilder in die Berechnung der Parallaxe einfließen. Wir erhielten so das Ergebnis $\varphi = 0,030096$ Grad.

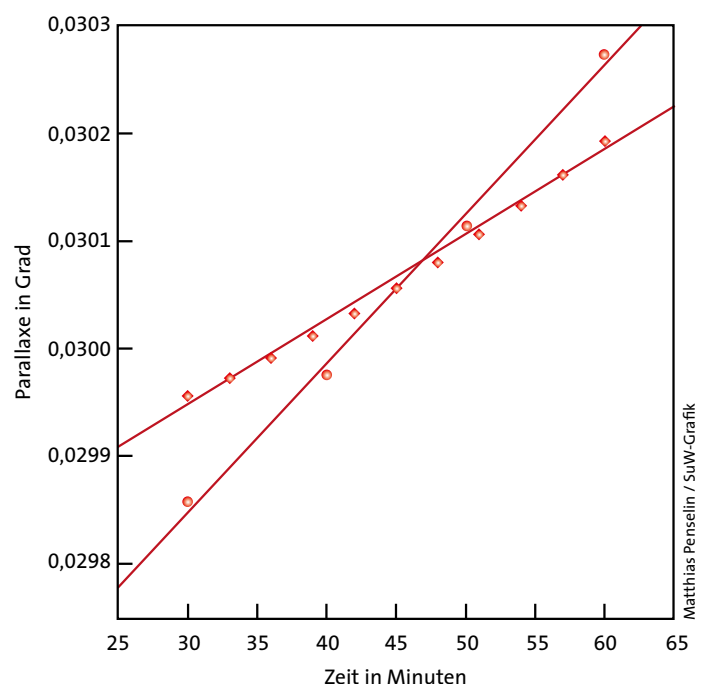
Da Apophis von allgemeinem Interesse ist und der Oppositionszeitpunkt für die genaue Vermessung der Asteroidenbahn der günstigste ist, schickten in den Tagen um den 8. Januar 2013 viele Beobachtergruppen ihre Positionsbestimmungen an das MPC, wonach die Astronomen die Bahn neu berechneten. Zeitgleich vermaß die NASA den Asteroiden per Radar. Ein Impact von Apophis im 21. Jahrhundert kann nunmehr ausgeschlossen werden.

Andererseits ergibt sich im Nachhinein die Möglichkeit, unsere Ergebnisse für die Parallaxe mit denjenigen Werten zu vergleichen, die sich aus der Ephemeridenrechnung des MPC nach der Neuberechnung der Bahn ergeben. Die von uns bestimmten Werte weichen am Ende des Beobachtungszeitraums um rund ein zehntausendstel Grad von den Werten des MPC ab, was 0,36 Bogensekunden entspricht (siehe Diagramm unten). Durch die Einbeziehung aller Bilder und durch die Auswertung mit der Software Astrometrica lässt sich also ein nur drei Hundertstel Grad großer Winkel auf wenige Promille genau messen.

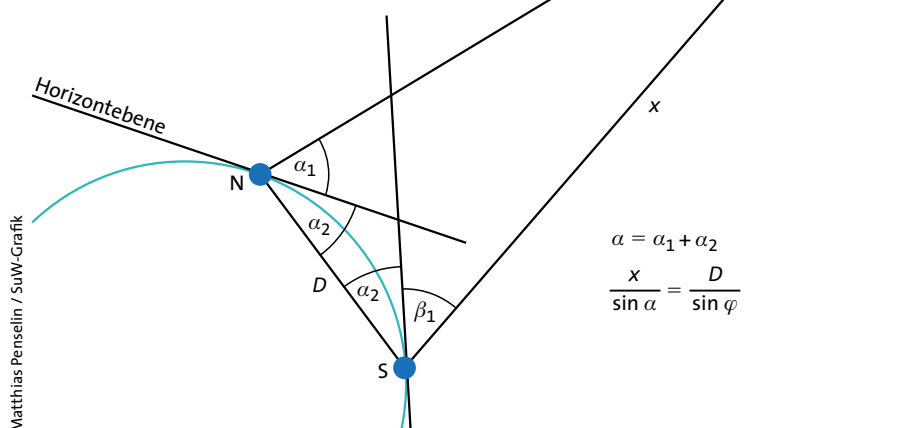
Von der Parallaxe zum Abstand

Um aus der Parallaxe den Abstand zu Apophis berechnen zu können, muss der räumliche Abstand der Teleskope bekannt sein. Hierzu nutzten wir die beim MPC hinterlegten »Parallaxenkonstanten«. Sie

Während des Beobachtungszeitraums von rund 30 Minuten änderte sich die Parallaxe von Apophis infolge der Erdrotation. Die von den Autoren ermittelten Parallaxen (Rauten) weichen von denjenigen Werten, die sich aus der vom Minor Planet Center berechneten Bahn ergeben (Kreise), maximal um ein zehntausendstel Grad ab.



Die Standorte der Teleskope Faulkes North in Hawaii (N) und Faulkes South in Australien (S) bilden mit Apophis (A) ein Dreieck. Die gesuchte Entfernung x lässt sich aus der bekannten Distanz D der Teleskope und der Horisonthöhe α_1 mit Hilfe des Sinussatzes berechnen.



$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$\frac{x}{\sin \alpha} = \frac{D}{\sin \varphi}$$

geben die Teleskopstandorte in Polarkoordinaten an. Rechnet man sie in kartesische Koordinaten um, so lässt sich mit Hilfe des Satzes des Pythagoras die Distanz D der Teleskope zueinander berechnen. So erhielten wir den bereits genannten Wert von 7640,9 Kilometern.

Um nun die Berechnung des Abstands von Apophis möglichst einfach zu gestalten, legten wir hierbei einen kugelförmigen Erdkörper zu Grunde und betrachteten das aus Teleskop N, Teleskop S und Apophis gebildete Dreieck N-S-A (siehe Grafik oben). Entnimmt man aus den Metadaten unserer Bilddateien die Horisonthöhen α_1 und β_1 von Apophis an beiden Standorten, so lässt sich mit der Winkelsumme im Dreieck der Winkel α_2 zwischen den Horizontebenen und der Verbindungslinie der Orte berechnen:

$$\alpha_1 + 2\alpha_2 + \beta_1 + \varphi_A = 180 \text{ Grad}$$

beziehungsweise

$$\alpha_2 = \frac{180 \text{ Grad} - \varphi_A - \alpha_1 - \beta_1}{2}$$

Damit sind in dem Dreieck N-S-A alle Winkel und eine Strecke bekannt. Nun lässt sich über den Sinussatz die Distanz x zwischen Apophis und einem der Teleskope berechnen:

$$\frac{x}{\sin \alpha} = \frac{D}{\sin \varphi},$$

wobei $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ ist. Daraus folgt

$$x = \frac{D \sin \alpha}{\sin \varphi}.$$

Wir erhalten aus unseren Bildern für die Entfernung von Apophis zum Teleskop »Faulkes South« eine Distanz x von 14,50 Millionen Kilometern. Zum Vergleich: Aus den Daten des MPC ergibt sich 14,46 Millionen Kilometer – eine sehr gute Übereinstimmung.

Die Sterne standen günstig

Parallaxenmessungen sind schwierig. Spätestens seit Kopernikus war die Unmöglichkeit, mit den damaligen Instrumenten Parallaxen zu messen, ein gutes Argument zu Gunsten des geozentrischen Weltbilds. Der Nachweis, dass schon die mit bloßem Auge sichtbaren Sterne so viel weiter von uns entfernt sind als alle Objekte unseres Planetensystems und dass Fixsternparallaxen zwar sehr klein, aber heutzutage messbar sind, ist ein wichtiger Schritt zu einem weit geöffneten modernen Weltbild, das der Schulunterricht heutzutage vermitteln sollte.

Die Schüler sollen erfahren, dass grundlegende Prinzipien der astronomischen Entfernungsbestimmung auf einfache Weise verstanden werden können. »Astronomische Zahlen« – das sollen nicht Angaben sein, unter denen sich niemand etwas vorstellen kann, sondern Ergebnisse guter Messungen. Viele Faktoren mussten zusammenkommen, um im Schulunterricht eine Parallaxe messen und daraus die Entfernung von Apophis bestimmen zu können. Wir hoffen, dass viele Bildungseinrichtungen mit unserem Unterrichtsmaterial diesen glücklichen Moment nachvollziehen können.



MATTHIAS PENSELIN unterrichtet am Albert-Schweitzer-Gymnasium in Crailsheim Physik und benachbarte Fächer. Seit September 2013 führt

er im Haus der Astronomie Workshops für Schulklassen durch. Schwerpunkte seines Astronomieunterrichts sind neben der Arbeit mit den Faulkes-Teleskopen die Aufnahme und quantitative Auswertung digitaler Bilder sowie die Spektroskopie.



MARTIN METZENDORF ist Mitglied der Starkenburg-Sternwarte in Heppenheim und Physiklehrer am Lessing-Gymnasium in Lampertheim (LGL). Dort

leitet er die Schulsternwarte. Seit 2009 ist das LGL eine der Pilotschulen des Faulkes Telescope Project sowie Partnerschule des Hauses der Astronomie in Heidelberg und des Deutschen SOFIA Instituts in Stuttgart.



CAROLIN LIEFKE promovierte in Astrophysik an der Hamburger Sternwarte und ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Haus der Astronomie in Heidelberg.

Literaturhinweise

Althaus, T.: Apophis: Kein Einschlag im Jahr 2036. In: Sterne und Weltraum 3/2013, S. 14

Quetz, A. M.: Zum Nachdenken: (99942) Apophis. In: Sterne und Weltraum 6/2009, S. 24

Voigt, H. H.: Abriss der Astronomie. Herausgegeben von H.-J. Röser und W. Tscharnuter. Wiley-VCH, Berlin 2012

Weblinks zum Thema: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1310000

W I S Didaktische Materialien: www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1311287