

Astrometrie von Asteroiden - vom eigenen Bild zur Positionsmessung

Teil 1: Visuelle Beobachtungen mit dem Schulteleskop

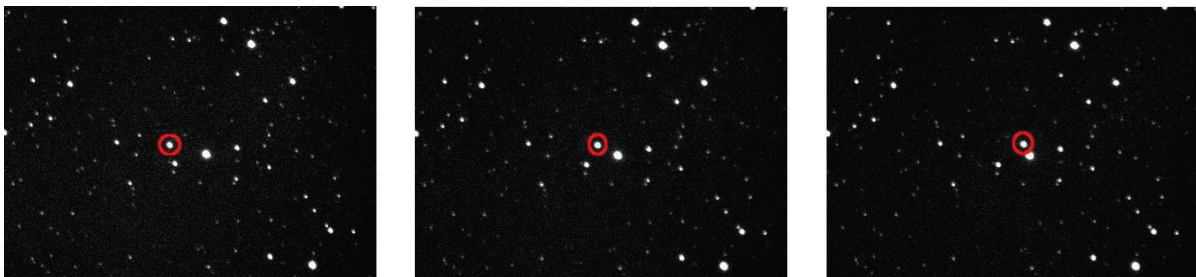
In Bezug auf den SuW-Beitrag „Zensus der erdnahen Asteroiden“ (in Heft 8/2012, Blick in die Forschung: Nachrichten, S. 12)

Carolin Liefke

In regelmäßigen Abständen wird in der Presse von erst kurz zuvor entdeckten Asteroiden berichtet, die dann in den darauf folgenden Tagen die Erde in vergleichsweise geringem Abstand passieren. Manchmal wird dabei sogar die Entfernung Erde-Mond unterboten.

Kleinplaneten deren Umlaufbahn zumindest teilweise im Entfernungsbereich zwischen 0,983 und 1,3 Astronomischen Einheiten von der Sonne liegt, bezeichnet man als erdnahe Asteroiden (engl. Near Earth Objects, abgekürzt NEOs). Abhängig von der Exzentrizität und der großen Halbachse ihrer Umlaufbahn ordnet man sie zusätzlich in verschiedene Unterklassen ein. Als potentiell gefährlich (engl. Potentially Hazardous Asteroids, abgekürzt PHAs) behandelt man diejenigen NEOs, deren Umlaufbahn bis maximal 0,05 AE (ca. 7,5 Mio. km) an die Erdbahn heranreicht und die einen Durchmesser von mindestens 100 bis 150 Metern haben. Zurzeit (Stand: 1. August 2012) beinhaltet die Datenbank des Minor Planet Center 9009 NEOs und 1338 PHAs.

Erdnahe Asteroiden haben – selbst wenn sie der Erde zum Beobachtungszeitpunkt gerade besonders nahe kommen – aufgrund ihrer geringen Größe meist nur sehr geringe Helligkeiten und sind entsprechend schwierig zu verfolgen. Viele der Asteroiden des Hauptgürtels zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter sind jedoch schon kleineren Schulteleskopen zugänglich und können mit einer einfachen Kameraausrüstung auch fotografisch dokumentiert werden.



Asteroid (456) Abnoba bewegt sich in einer Zeitserie von Himmelsaufnahmen vor dem Sternenhintergrund.

Dieser WIS-Beitrag fasst Materialien und Hintergrundinformationen für die visuelle Beobachtung von Kleinplaneten zusammen. Bevor die Schüler anhand eigener Beobachtungen die Bewegung von Asteroiden nachvollziehen, tragen sie in anhand von Arbeitsblättern grundlegendes Wissen über die Einordnung der Asteroiden in unser Sonnensystem und Betrachtungen zum Gesichtsfeld zusammen. Da die erfolgreiche Beobachtung von Kleinplaneten eine sorgfältige Vorabplanung erfordert, sollten die Schüler auch in diesen Teil der Beobachtungsaufgabe maßgeblich miteinbezogen werden.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Astronomie	Astropraxis, Kleinkörper	Aufbau des Sonnensystems , Asteroiden, Bewegung von Himmelskörpern, Beobachtungsplanung , astronomische Koordinatensysteme
Physik	Optik	Vergrößerung , scheinbares und wahres Gesichtsfeld
Fächer- verknüpfung	Astro-Mathematik	Sphärische Trigonometrie mit kleinen Winkeln
Lehre allgemein	Kompetenzen (Erkenntnis, Bewertung, Kommunikation), Unterrichtsmittel	Planung und Durchführung von Himmelsbeobachtungen , Arbeitsblatt, Abschätzungen, Verwendung einer Planetariumssoftware

Allgemeine Hinweise

Grundsätzliche Überlegungen

Bevor man sich an der Beobachtung von Kleinplaneten versucht, sollten sich die Schüler zunächst mit einigen Eigenschaften dieser Himmelskörper auseinandersetzen, die für die Beobachtung relevant sind. Das Arbeitsblatt „Asteroiden“ liefert hierzu einen guten Einstieg.

Für ein erfolgreiches Gelingen und den effizienten Ablauf einer Asteroidenbeobachtung ist eine sorgfältige Planung erforderlich. Um den Schülern dies bewusst zu machen, sollten sie in diesen Prozess vollständig mit einbezogen werden.

Die Art der Vorbereitung und der erforderliche Aufwand hängen sowohl von der eingesetzten Ausrüstung als auch von dem Anspruch an die Genauigkeit der anschließenden Auswertung ab. Prinzipiell gibt es dabei je nach zur Verfügung stehendem Mitteln zunächst folgende Möglichkeiten:

1. Visuelle Beobachtungen mit dem Schulteleskop: Mithilfe selbst erstellter Aufsuchkarten identifizieren die Schüler einen helleren Asteroiden in einem Sternfeld. Durch Markieren der beobachteten Position im Kartenmaterial über mehrere Tage hinweg lässt sich die Bewegung des Kleinplaneten verfolgen.
2. Aufnahmen mit einer Digitalkamera: Die Schüler fotografieren über mehrere Tage hinweg die Himmelsregion um einen helleren Asteroiden, gleichen die Bilder mit Kartenmaterial ab und identifizieren so den Kleinplaneten.
3. Nachgeführte Aufnahmen durch das Schulteleskop: Durch das kleinere Gesichtsfeld bei der Aufnahme kann man bereits über einen Beobachtungszeitraum von weniger als einer Stunde die Bewegung eines Kleinplaneten nachweisen und positionsgenau vermessen.

Aktuelle Bahndaten von Asteroiden

Zwar befinden sich in astronomischen Zeitschriften und Jahrbüchern Aufsuchkarten und Ephemeriden hellerer Asteroiden, im Allgemeinen wird man jedoch auf Ressourcen aus dem Internet oder selbst erstelltes Kartenmaterial zurückgreifen müssen. Viele Planetariumsprogramme sind in der Lage die Positionen von Kleinplaneten hinreichend genau zu berechnen und darzustellen. Da die Bahnelemente von Asteroiden allerdings kontinuierlichen Veränderungen unterworfen sind, ist es zwingend erforderlich, die von den Programmen verwendeten Datenbanken aktuell zu halten, ansonsten kann es zu deutlich sichtbaren Abweichungen zwischen berechneter und tatsächlicher Position am Himmel kommen.

Im Folgenden wird am Beispiel der intuitiv bedienbaren Software Stellarium erläutert, welche Einstellungen vorgenommen werden müssen, um korrekte Asteroidenpositionen mit Stellarium zu ermitteln und Aufsuchkarten zu erstellen, die bei der Beobachtung verwendet werden können. Stellarium ist unter <http://www.stellarium.org/> kostenfrei für verschiedene Betriebssysteme erhältlich.

Standardmäßig enthält Stellarium nur die ersten vier Hauptgürtel-Asteroiden Ceres, Pallas, Juno und Vesta. Weitere helle Kleinplaneten kann man über den Sonnensystem-Editor hinzufügen, und auch die Bahndaten der genannten vier sollten vor einer Beobachtung aktualisiert werden. Dazu wählt man im Einstellungsfenster den Reiter „Erweiterungen“ aus und klickt im Sonnensystem-Editor-Fenster auf „konfigurieren“. In dem sich neu öffnenden „Solar System objects“-Fenster wählt man den Reiter „Solar System“ aus und gelangt über „Import orbital elements in MPC format“ zu einem dritten Fenster „Import data“. Dort kann man nun wahlweise über den Reiter „Online search“ die Daten einzelner Asteroiden abfragen und hinzufügen oder über den „Lists“-Reiter eine vorbereitete Liste hellerer Asteroiden einspielen. Für letzteres wählt man im Menü „Select bookmark“ die Option „MPC's list of bright minor planets“ aus. Gegebenenfalls sollte man in der nun unten erscheinenden URL die Jahreszahl entsprechend anpassen. Mit „Get orbital elements“ werden die aktuellen Bahnelemente aus der Datenbank des Minor Planet Center geladen. Es öffnet sich ein weiteres Fenster mit den in der Datei enthaltenen bzw. bei der Online-Suche gefundenen Asteroiden. Mit „Mark all“ wählt man alle Objekte in der Liste aus und fügt sie schließlich mit „Add objects“ der Stellarium-Datenbank hinzu. Sie können nun über das Suchfeld direkt aufgerufen werden.

Erstellung einer Aufsuchkarte

Standardmäßig enthält Stellarium bereits die Daten von ca. 600.000 Sternen bis zu einer Grenzgröße von 10,5 mag. Für Übersichtskarten und zum Aufsuchen von helleren Asteroiden ist dies normalerweise völlig ausreichend. Über den Reiter „Werkzeuge“ im Einstellungsfenster kann man allerdings bei Bedarf zusätzliche Sternkataloge unkompliziert hinzufügen. Die beiden nächstgrößeren Kataloge erhöhen die Grenzgröße auf 12,0 bzw. 13,5 mag.

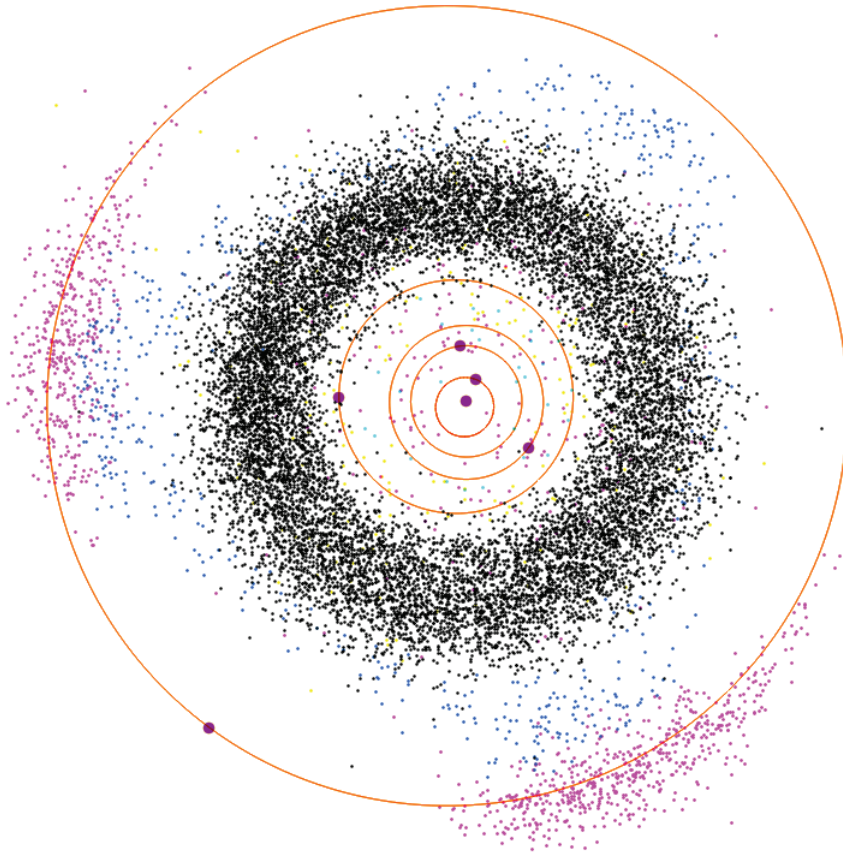
Aufsuchkarten werden in Stellarium als Bildschirmfoto des Stellarium-Hauptfensters mit der Tastenkombination Strg-S erstellt. Für druckfähige Karten sollte man allerdings im Reiter „Werkzeuge“ im Einstellungsfenster die Option „Farben invertieren“ einstellen, so dass in der Bilddatei die Sterne dunkel auf hellem Hintergrund dargestellt werden. Zusätzlich empfiehlt es sich, in den Himmel- und Anzeigeoptionen die Darstellung der Atmosphäre zu deaktivieren. Der Himmel erscheint dann im Hauptfenster vollkommen schwarz und auf dem Bildschirmfoto reinweiß. Es empfiehlt sich, mehrere Aufsuchkarten in verschiedenen Maßstäben zu erstellen. Der Maßstab zumindest einer der Karten sollte dabei dem jeweils im Okular bzw. mit der Kamera abgedeckten Gesichtsfeld entsprechen. Entsprechende Überlegungen können die Schüler nach Bearbeiten des Arbeitsblatts zum Gesichtsfeld oder zum Abbildungsmaßstab selbst anstellen.

Arbeitsblatt „Asteroiden“

Unser Sonnensystem besteht nicht nur aus der Sonne, den acht Planeten und ihren Monden. Hinzu kommen fünf Zwergplaneten – Pluto ist einer von ihnen – und unzählige kleinere Objekte wie Asteroiden und Kometen. Die ersten Asteroiden hat man schon vor über 200 Jahren entdeckt, inzwischen kennt man aber mehr als 600.000 von ihnen. Die meistens von ihnen befinden sich im Hauptgürtel, also zwischen den Umlaufbahnen der Planeten Mars und Jupiter, und bewegen sich dort um die Sonne. Einige sind aber auch in der Nähe der Umlaufbahn von Jupiter zu finden, jeweils in der Bahn vor und hinter dem Planeten. Man nennt sie Trojaner. Immer wieder kommen außerdem einzelne Asteroiden der Erde gefährlich nahe, sie heißen deshalb auch auf Englisch Potentially Hazardous Asteroids, abgekürzt PHAs.

Aufgaben

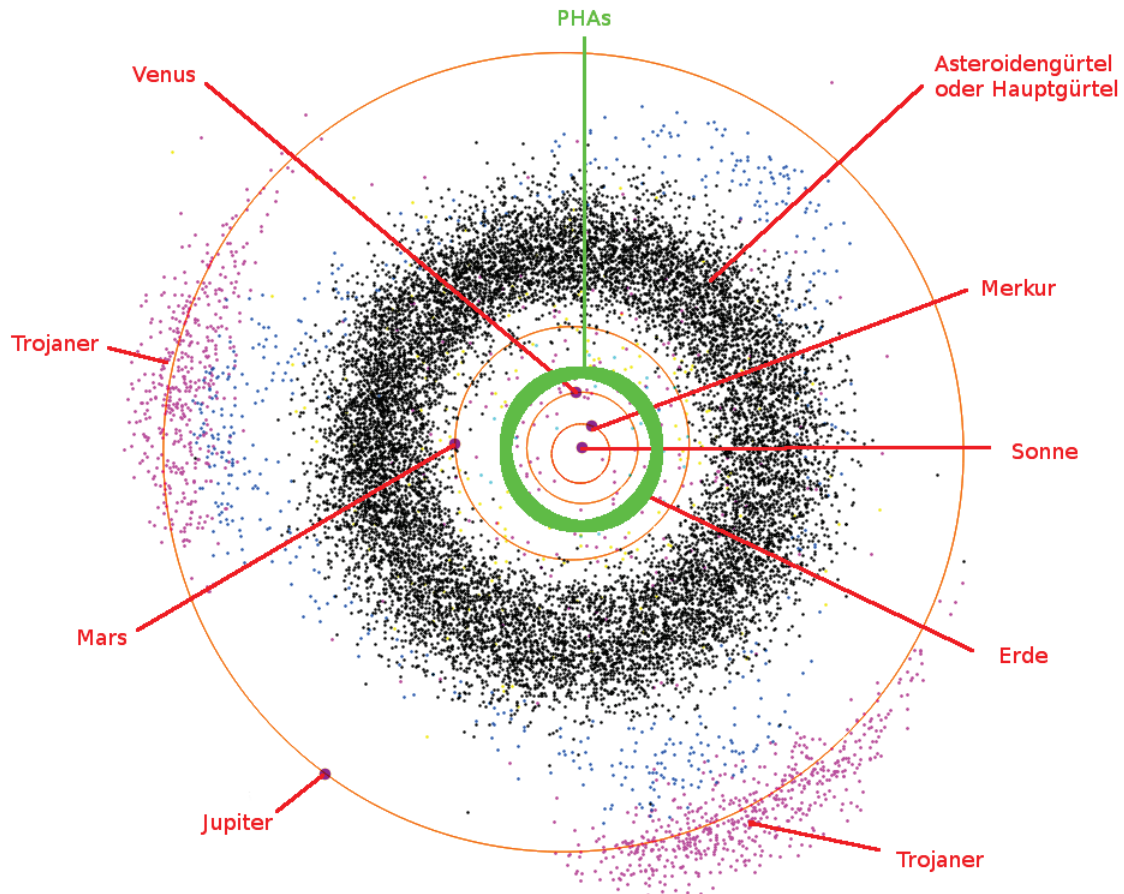
1. Diese Grafik zeigt den inneren Teil unseres Sonnensystems. Beschrifte die Planeten und die verschiedenen Asteroidengruppen. Markiere den Bereich, in den die PHAs bei ihrer Annäherung an die Erdbahn vordringen. Zum Vergleich: Der Radius der Erdbahn beträgt 149,6 Mio. km.



2. Wie groß ist der Anteil der PHAs an der Gesamtzahl der Asteroiden?
3. Das größte Mitglied des Asteroidengürtels ist in Wirklichkeit ein Zwergplanet: Ceres befindet sich 2,77-mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde. Für einen Umlauf um die Sonne benötigt sie 4,6 Jahre. Wie schnell bewegt sich Ceres auf ihrer Umlaufbahn in km/s?

Lösungen zu den Aufgaben des Arbeitsblatts „Asteroiden“

1.



Verglichen mit dem Maßstab der Skizze ist der Bereich der PHAs klein: Bei 150 Mio. km Erdbahnradius entsprechen die im Lesetext genannten 8 Mio. km Abstand zur Erdbahn nur ca. 1 mm, der Ring um die Erdbahn sollte also insgesamt ca. 2 mm dick sein.

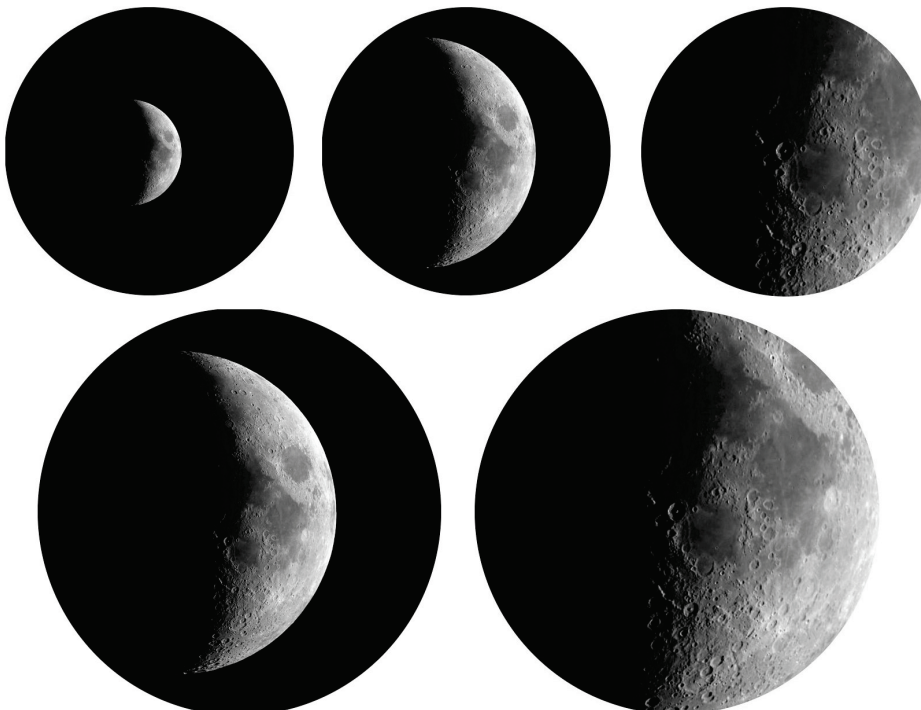
2. Dem Lesetext entnehmen die Schüler, dass man zurzeit 1306 PHAs kennt, aber vermutet, dass insgesamt 3200 bis 6200 von ihnen existieren. In der Aufgabenstellung werden 600.000 bekannte Asteroiden genannt. Die Schüler müssen daher zunächst erkennen, dass sie die Annahme machen müssen, dass bei der Gesamtzahl der derzeit bekannten Asteroiden derselbe Anteil wie bei den PHAs noch unbekannt ist, um überhaupt ein Verhältnis angeben zu können. In diesem Fall käme man auf einen Anteil von ca. 0,2 %.
3. Zunächst rechnen die Schüler die Angaben für den Abstand und die Umlaufdauer in Sekunden und km um (ca. 414 Mio. km bzw. 145 Mio. s). Gegebenenfalls muss den Schülern die Formel für den Kreisumfang vorgegeben werden (2,6 Mrd. km). Daraus ergibt sich eine Bahngeschwindigkeit $v = U / T$ von ca. 17,9 km/s.

Arbeitsblatt „Gesichtsfeld und scheinbarer Durchmesser“

Bei vielen Himmelsobjekten weiß man gar nicht, wie groß sie in Wirklichkeit sind, da man ihre Entfernung nicht kennt. Stattdessen gibt man ihren scheinbaren Durchmesser als Winkel an. Genauso kann man dann beispielsweise auch die Abstände von Sternen oder die scheinbare Bewegung von Planeten auf der Himmelskugel messen.

Aufgaben

- Überlege dir, wie der Winkeldurchmesser, die wahre Größe und die Entfernung eines Objektes miteinander zusammenhängen. Fertige eine Skizze dazu an.
- Mit einem Teleskop wird der scheinbare Durchmesser des beobachteten Objektes vergrößert dargestellt. Der Vergrößerungsfaktor ist abhängig von der Brennweite des Teleskopobjektivs und des verwendeten Okulars und berechnet sich über $V = f_{\text{Objektiv}} / f_{\text{Okular}}$. Allerdings die Größe des sichtbaren Bildausschnitts, das sogenannte wahre Gesichtsfeld, durch die Bauart des jeweiligen Okulars begrenzt. Das wahre Gesichtsfeld berechnet sich aus dem scheinbaren Gesichtsfeld des Okulars und der Vergrößerung über $wGF = sGF / V$. Einfachere, ältere Okulare haben ein scheinbares Gesichtsfeld von nur 40° , dabei hat man das Gefühl durch eine enge Röhre zu blicken. Moderne, hochwertige Okulare erreichen 100° und mehr. In diesem Falle kann man oft den eigentlichen Rand des Gesichtsfelds nicht mehr sehen. Die Grafik illustriert den Effekt unterschiedlicher Vergrößerungen und Gesichtsfelder am Beispiel des Mondes, der am Himmel einen Durchmesser von etwa $0,5^\circ$ erreicht. Berechne für die fünf vorgegebenen Okulare am genannten Teleskop die Vergrößerung und das wahre Gesichtsfeld. Was fällt auf?



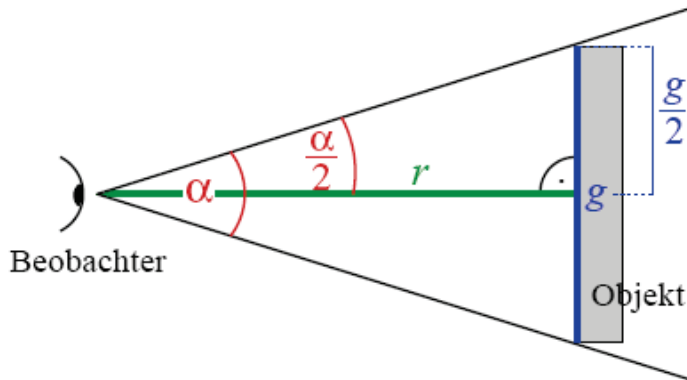
Berechne für die fünf vorgegebenen Okulare am genannten Teleskop die Vergrößerung und das wahre Gesichtsfeld. Was fällt auf?

Anblick des Mondes mit verschiedenen Okularen an einem C8-Schmidt-Cassegrain-Teleskop mit 2032 mm Brennweite. Obere Reihe von links nach rechts: Okulare mit 50° scheinbarem Gesichtsfeld und Brennweiten von 55 mm, 25 mm und 9 mm. Untere Reihe: Okulare mit 70° Gesichtsfeld bei 18 mm und 9 mm Brennweite.

- Erstelle für euer Schulteleskop und die dazugehörigen Okulare einen Steckbrief nach dem Muster unten. Wenn das scheinbare Gesichtsfeld nicht auf den Okularen aufgedruckt ist, recherchiere anhand ihrer Typenbezeichnungen und Brennweiten im Internet. Mit welchen Okularen passt der Mond noch vollständig in das Gesichtsfeld, mit welchen sieht man nur noch einen Teil des Mondes?

Lösungen zu den Aufgaben des Arbeitsblatts „Gesichtsfeld und scheinbarer Durchmesser“

1. Anhand der Skizze lässt sich leicht nachvollziehen, dass gilt: $\tan(\alpha/2) = g / (2r)$ mit dem scheinbaren Durchmesser α , der wahren Objektgröße g und dem Abstand r .

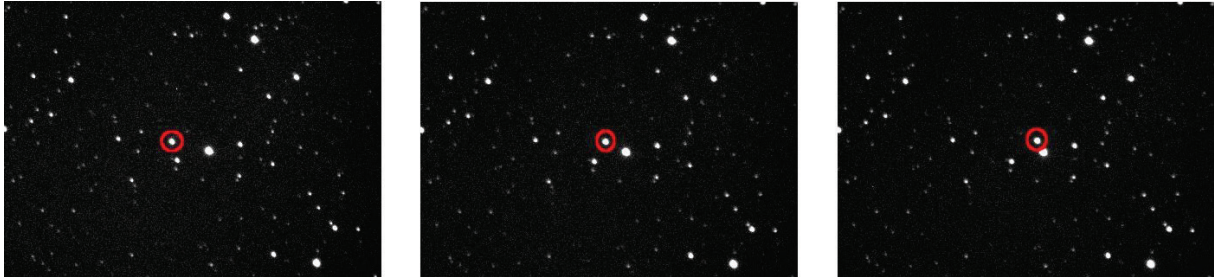


2. Bei unterschiedlicher Vergrößerung zeigen das 25-mm-Okular mit 50° scheinbarem Gesichtsfeld und das 18-mm-Okular mit 70° scheinbarem Gesichtsfeld denselben Bildausschnitt. Die beiden 9-mm-Okulare liefern dieselbe Vergrößerung, aber das Okular mit 70° scheinbarem Gesichtsfeld zeigt einen deutlich größeren Bildausschnitt.

Okular	Vergrößerung V	wahres Gesichtsfeld wGF
55 mm, 50° sGF	37x	$1,35^\circ$
25 mm, 50° sGF	81x	$0,62^\circ$
9 mm, 50° sGF	225x	$0,22^\circ$
18 mm, 70° sGF	113x	$0,62^\circ$
9 mm, 70° sGF	225x	$0,32^\circ$

Beobachtungsprojekt „Die Bewegung eines Asteroiden“

Auf den ersten Blick sehen Asteroiden am Himmel aus wie Sterne: Sie sind so klein und so weit weg, dass man auch im Teleskop nur einen hellen Punkt erkennen kann. Schon innerhalb weniger Tage kann man allerdings leicht beobachten, wie sich Asteroiden auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne vor dem Sternhintergrund bewegen.



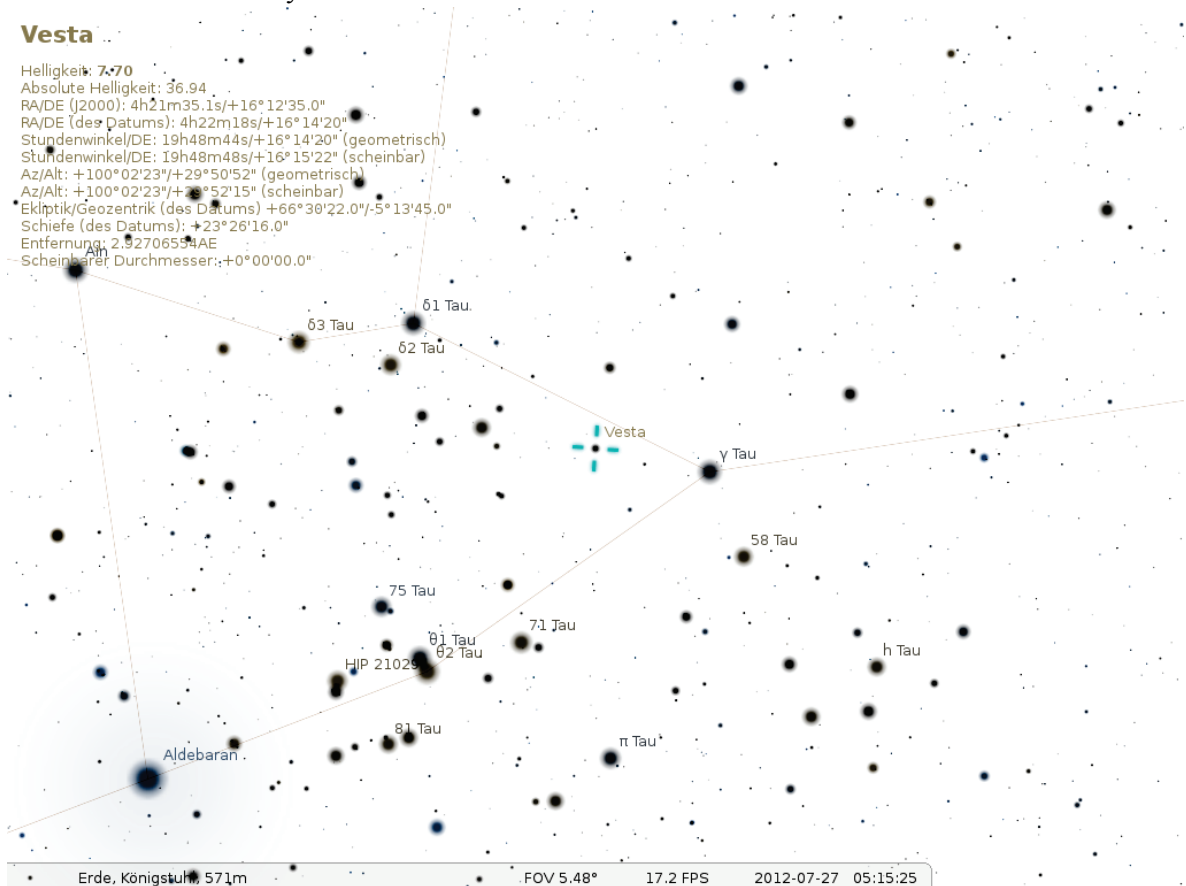
Das Ziel dieses Projektes ist es, die Bewegung eines Asteroiden vor dem Sternhintergrund mit dem Schulteleskop nachzuverfolgen und zu dokumentieren.

1. Wähle mithilfe des Internetportals Heavens-Above (<http://www.heavens-above.com/>) und einer drehbaren Sternkarte oder dem Programm Stellarium einen geeigneten Asteroiden für die Beobachtung aus. Welche Eigenschaften sollte er haben?
2. Erstelle mit dem Programm Stellarium zwei Aufsuchkarten mit unterschiedlichen Maßstäben als Bildschirmfoto. Die erste Karte soll dir dabei helfen, den Asteroiden in dem Sternbild zu finden, in dem er steht. Sie sollte ein Gesichtsfeld (engl. field of view, abgekürzt FOV) von mehreren Grad haben. Die zweite Karte soll in etwa den Anblick im Übersichtsokular wiedergeben und ein entsprechend kleineres Gesichtsfeld haben. Blende bei der zweiten Karte das Koordinatennetz mit ein. Drucke die Bildschirmfotos so groß wie möglich aus.
3. Suche (und finde!) den Asteroiden mithilfe deiner selbst erstellten Karten im Teleskop. Befindet er sich verglichen mit den anderen auf der Karte verzeichneten Sternen exakt an der berechneten Position? Wenn nein, woran könnte das liegen?
4. Beobachte den Asteroiden über einen möglichst langen Zeitraum (ab besten über zwei Nächte oder mehr!) und zeichne seine Position bei jeder neuen Beobachtung in die Karte ein. Notiere den genauen Beobachtungszeitpunkt.
5. Lies mithilfe des Koordinatennetzes die Himmelskoordinaten des Asteroiden zum jeweiligen Beobachtungszeitpunkt ab.
6. Bestimme die Winkelabstände zwischen den einzelnen Positionen. Verwende dafür die Näherungsformel $d = (\Delta\alpha)^2 \cdot \cos \delta_1 + (\Delta\delta)^2$ mit $\Delta\alpha = (\alpha_1 - \alpha_2)$ und $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$, wobei α die Rektaszension und δ Deklination ist.
7. Wie schnell bewegt sich der Asteroid am Himmel?
8. Zusatzaufgabe: Überlege dir, wie die Formel für den Abstand zustande kommt.

Hinweise zum Beobachtungsprojekt „Die Bewegung eines Asteroiden“

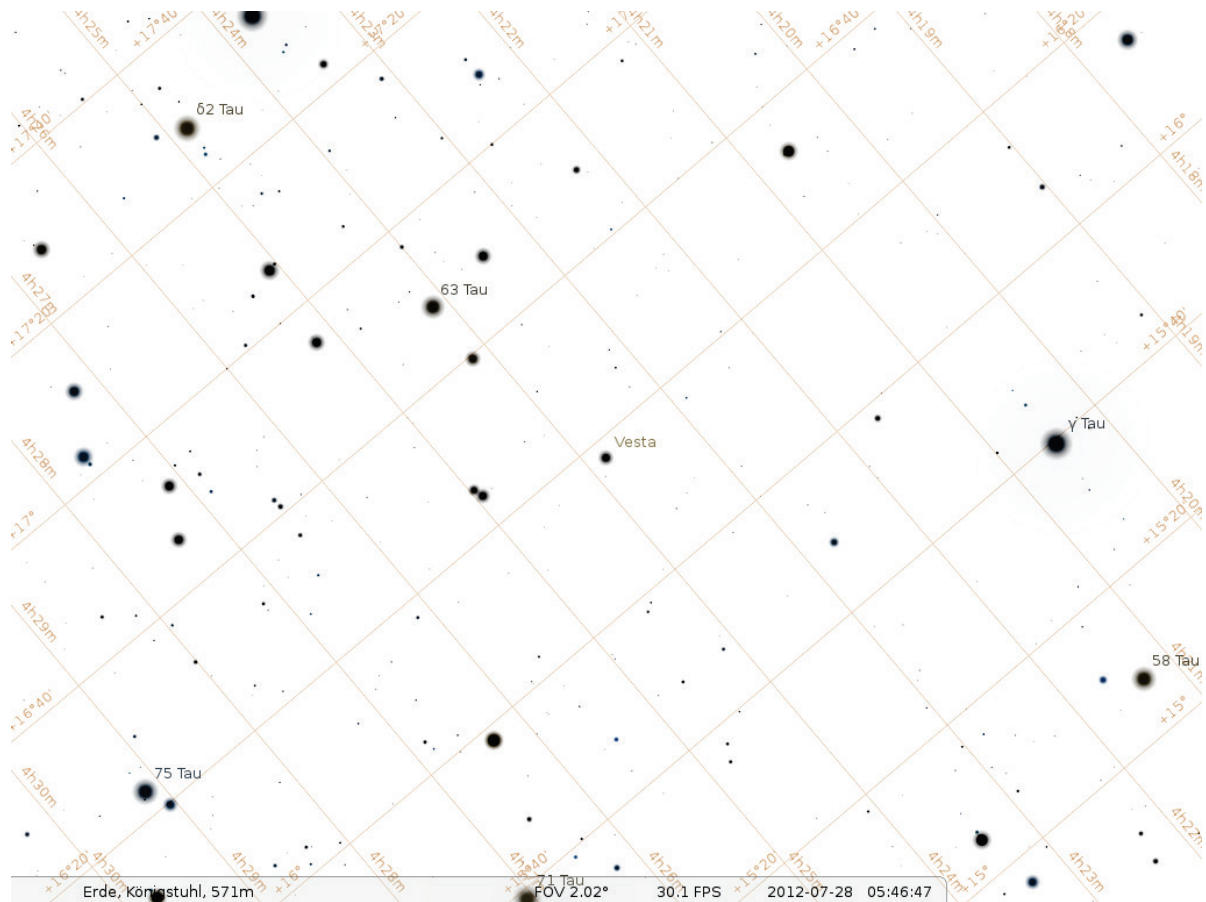
- Das Internetportal Heavens-Above (<http://www.heavens-above.com/>) listet auf seiner Startseite alle Kleinplaneten auf, deren Helligkeit zurzeit 10,0 mag übersteigt. Diese Asteroiden wären somit prinzipiell für visuelle Beobachtungen geeignet, allerdings macht die Webseite keine Aussage zur tatsächlichen Sichtbarkeit. Zwar befinden sich auf den jeweiligen Unterseiten weitere Informationen und zwei einfache Aufsuchkarten, es besteht aber dennoch die Möglichkeit, dass die Asteroiden zu nah an der Sonne oder sogar unter dem Horizont stehen und somit unbeobachtbar sind. Es empfiehlt sich daher, die dort genannten Kandidaten entweder gemeinsam mit den Schülern zu überprüfen und anhand der Ergebnisse den geeignetsten Asteroiden auszuwählen oder die Schüler die Überprüfung einzelner Asteroiden in Kleingruppen machen lassen (entweder mithilfe einer drehbaren Sternkarte oder mit Stellarium). Wenn möglich sollten sich die Schüler zudem die notwendigen Kriterien selbstständig erarbeiten:
 - Der Asteroid sollte möglichst hell sein. Je heller, desto einfacher ist er zu beobachten.
 - Zur angedachten Beobachtungszeit (also vermutlich bevorzugt in den Abendstunden) sollte der Asteroid möglichst hoch über dem Horizont stehen.
 - Örtliche Gegebenheiten müssen berücksichtigt werden (z.B. eingeschränkte Horizontsicht am Beobachtungsort).
 - Bei Beobachtungen über mehrere Tage hinweg sollte sichergestellt werden, dass der Mond dem Asteroiden nicht zu nahe kommt.

- Die Abbildung zeigt als Beispiel eine Übersichtskarte mit der Position des Kleinplaneten Vesta am 27. Juli 2012 in den Hyaden:



Anhand einer solchen Karte mit einem Gesichtsfeld von 5 - 10° sollten Schüler schon mit wenig Beobachtungserfahrung in der Lage sein, die ungefähre Position eines Asteroiden in einem Sternbild zu lokalisieren und das Fernrohr entsprechend einzurichten.

Die zweite Karte mit 1 - 5° Gesichtsfeld wäre ein Beispiel für einen kleineren Himmelsausschnitt mit Koordinatennetz, wie man sie zum direkten Vergleich mit dem Anblick in einem Okular mit langer Brennweite und zum Verzeichnen der Positionen des Asteroiden über mehrere Tage hinweg verwenden kann.



3. Oftmals wird die Aufsuchkarte nicht für exakt den Beobachtungszeitpunkt erstellt worden sein. Schon bei wenigen Stunden Abweichung wird die Bewegung des Asteroiden deutlich sichtbar. Sofern man aktuelle Bahndaten verwendet, sollten Ungenauigkeiten in der Berechnung der Position vernachlässigbar sein.

7. In der Nähe der Opposition können Hauptgürtelasteroiden sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 0,8 Bogenminuten pro Stunde über den Himmel bewegen. Im Allgemeinen dürften die Geschwindigkeiten aber deutlich darunter liegen.

8. Da man es üblicherweise mit kleinen Winkeln von deutlich unter einem Grad zu tun haben wird, besteht keine Notwendigkeit, die wesentlich kompliziertere und schwerer herzuleitende Abstandsformel $\cos d = \sin \delta_1 \cdot \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$ der sphärischen Trigonometrie zu verwenden. Stattdessen kann sozusagen ein Pythagoras über Rektaszension und Deklination benutzt werden, bei dem es allerdings zu berücksichtigen gilt, dass die Rektaszension nicht entlang von Großkreisen gemessen wird und dementsprechend mit $\cos \delta$ modifiziert werden muss, um die Verkleinerung der Kleinkreise hin zum Himmelspol zu berücksichtigen.

Internetadressen

- Heavens Above (aktuelle astronomische Beobachtungsdaten inkl. heller Asteroiden): <http://www.heavens-above.com/>
- CalSKY (konfigurierbarer Online-Himmelskalender, deutsch): <http://www.calsky.com/>
- Stellarium-Homepage (englische Seiten, Programm installiert sich automatisch auf Deutsch): <http://stellarium.org/>
- Cartes du Ciel (ein weiteres frei verfügbares, plattformübergreifendes Planetariumsprogramm mit implementierter Asteroidendarstellung): <http://www.ap-i.net/skychart/start>

Bildnachweis

- Aufnahmen des Asteroiden Abnoba und der Mondsichel von der Autorin
- Grafik des inneren Sonnensystems: Wikipedia, Public Domain
- Skizze zum scheinbaren Durchmesser: Marc Layer (Wikipedia, CC BY-SA 3.0)
- Stellarium-Screenshots, die keine eingebetteten Bilder oder Sternbilddarstellungen enthalten, stehen unter der GNU General Public Licence.