



Gymnasium Bürgerwiese

Parkstraße 4

01069 Dresden

Besondere Lernleistung

Thema:

**Helligkeitsbestimmung des Asteroiden
(41) Daphne und daraus ableitbare Größen.**

vorgelegt von: Tim Lauenstein
Schuljahr: 2018/2019
Betreuer: H. Fratzscher
zweiter Betreuer: M. Hilbig
externer Betreuer: Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ch. Kunze

Bannewitz, 21.12.2018

Inhaltsverzeichnis

1. Vorüberlegung.....	3
1.1 Vorbereitung und Durchführung der praktischen Helligkeitsuntersuchung.....	4
2. Definition Asteroid	9
2.1. Eigenschaften von Asteroiden.....	9
2.2. Asteroiden im Hauptgürtel	10
2.3. Entstehung der Asteroiden im jungen Sonnensystem	13
2.4. Klassifizierung nach den Umlaufbahnen der Asteroiden.....	13
2.4.1 erdnahe Asteroiden	13
2.4.2 Asteroiden auf Planetenbahnen	16
2.4.3 Asteroiden des Hauptgürtels	17
2.4.4 Asteroiden außerhalb der Jupiterbahn	17
3. Asteroid (41) Daphne	19
3.1. Entdeckung und Bahndaten	19
3.2. praktische Helligkeitsbestimmung	20
3.2.1. Versuchsaufbau	20
3.2.2. Bestimmung scheinbare Helligkeit mit Astrometrica	24
3.2.3. Berechnung absolute Helligkeit	31
3.3. Berechnung Durchmesser	33
3.4. Berechnung Masse	34
3.5. Abschätzung freiwerdende kinetische Energie beim theoretischen Erdaufprall	36
3.6. Risikoanalyse	41
4. Abwehrmaßnahmen	46
5. Schlussgedanke	48
6. Eigenständigkeitserklärung	50

1. Vorüberlegung

Ich bin Schüler der 12. Klasse des Gymnasiums Bürgerwiese in Dresden. Seit zwei Jahren beschäftige ich mich in meiner Freizeit intensiv mit Astrofotografie. Ich engagiere mich zudem an der Sternwarte Gönnsdorf in der Schüler-Astro-AG und halte dort Vorträge rund um das Thema "Fotografie von Himmelskörpern".

Mit meinem Teleskop und einer speziellen Kamera ist es mir möglich, auch sehr lichtschwache Objekte, zu fotografieren. Zu diesen lichtschwachen Objekten zählen nicht nur Nebel und Galaxien, sondern auch Asteroiden. Ihre geringe Größe und die ständig wechselnde Himmelsposition machen sie zu einer fotografischen Herausforderung.

Asteroiden, sowie auch Kometen und Meteoroiden, gehören zu den Kleinkörpern an unserem Himmel. Kleinkörper zählen zu den unberechenbarsten Objekten in unserem Sonnensystem. Die NASA warnt häufig vor Asteroiden, welche der Erde sehr nahekommen. Das weckte mein besonderes Interesse gegenüber diesen Himmelskörpern.

Dass die Bahndaten von Kleinkörpern von vielen Forschungseinrichtungen überwacht werden, deutet darauf hin, dass ein Asteroideneinschlag auf der Erde jederzeit in Betracht gezogen werden muss.

Schon vor 65,5 Millionen Jahren führte ein Asteroideneinschlag auf der Erde zu einem Massensterben am Ende der Kreidezeit und damit dem Ende des Zeitalters der Dinosaurier. Diese Theorie soll nun eine Forschergruppe aus 41 Mann bestätigt haben¹.

Das ein Asteroideneinschlag eine ganze Spezies ausgerottet hat, bringt mich zum Nachdenken. Denn warum sollte uns nicht das gleiche Schicksal ereilen?

Im Rahmen meiner Facharbeit möchte ich einen Asteroiden hinsichtlich seiner Helligkeit untersuchen, um daraus rechnerisch seine Masse und den mittleren Durchmesser des Himmelskörpers zu ermitteln. Die Ergebnisse sollen Aufschluss über seine mögliche Zerstörungskraft beim Einschlag auf der Erde geben.

Diplom-Wirtschaftsingenieur Christoph Kunze unterstützt mich bei meinem Vorhaben als externer Berater. Er ist ebenfalls Hobbyastronom, besitzt eine kleine, private Sternwarte und beschäftigt sich hauptsächlich mit Asteroiden. Wenn Großteleskope, wie Pan-STARRS in Hawaii, einen Asteroiden neu entdecken, werden diese auf der NEOCP (Near-Earth Object Confirmation Page) veröffentlicht. Die Datenbank besteht aus kürzlich neu entdeckten und

¹ <https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.erdgeschichte-asteroid-loeschte-dinosaurier-aus.f8563ee5-9600-4f92-bdfb-6ff4d1bccfda.html> [16.07.2018; 13:56 Uhr]

wesentlich erdnahen Asteroiden der letzten Nacht. Die Datenbank ist öffentlich zugänglich und stellt auch die Koordinaten des Asteroiden am Himmel zur Verfügung. Diese ersten Bahndaten sind oftmals ungenau, da nur drei bis fünf Positionen seit der Erstentdeckung bekannt sind. Dementsprechend können die erst mehrere Stunden voraus berechneten Koordinaten von der tatsächlichen Himmelsposition des Himmelskörpers abweichen. Deshalb ist eine weitere Beobachtung zwingend notwendig. Sind also solche Bahndaten von Kleinkörpern auf der NEOCP veröffentlicht worden, zeichnet Herr Kunze mit seinem Teleskop und einer Kamera den Asteroiden auf und bestimmt mittels Astrometrica, einer Computersoftware, die genaue Position des Kleinkörpers am Himmel. Bis 20 mag ist es ihm möglich, den Asteroiden mit entsprechender Nachbearbeitung aufzuzeichnen. Mit einem Stationscode versehen, werden die neu gewonnenen Positionsdaten an die Harvard University gesendet. Diese überprüft im Auftrag des MPC (Minor Planet Center) die Daten. Das Minor Planet Center ist die offizielle Organisation für die Erfassung von Kleinplaneten- und Kometenbahndaten, siehe <https://www.minorplanetcenter.net/>.

1.1 Vorbereitung und Durchführung der praktischen Helligkeitsuntersuchung

Stand 16.07.2018:

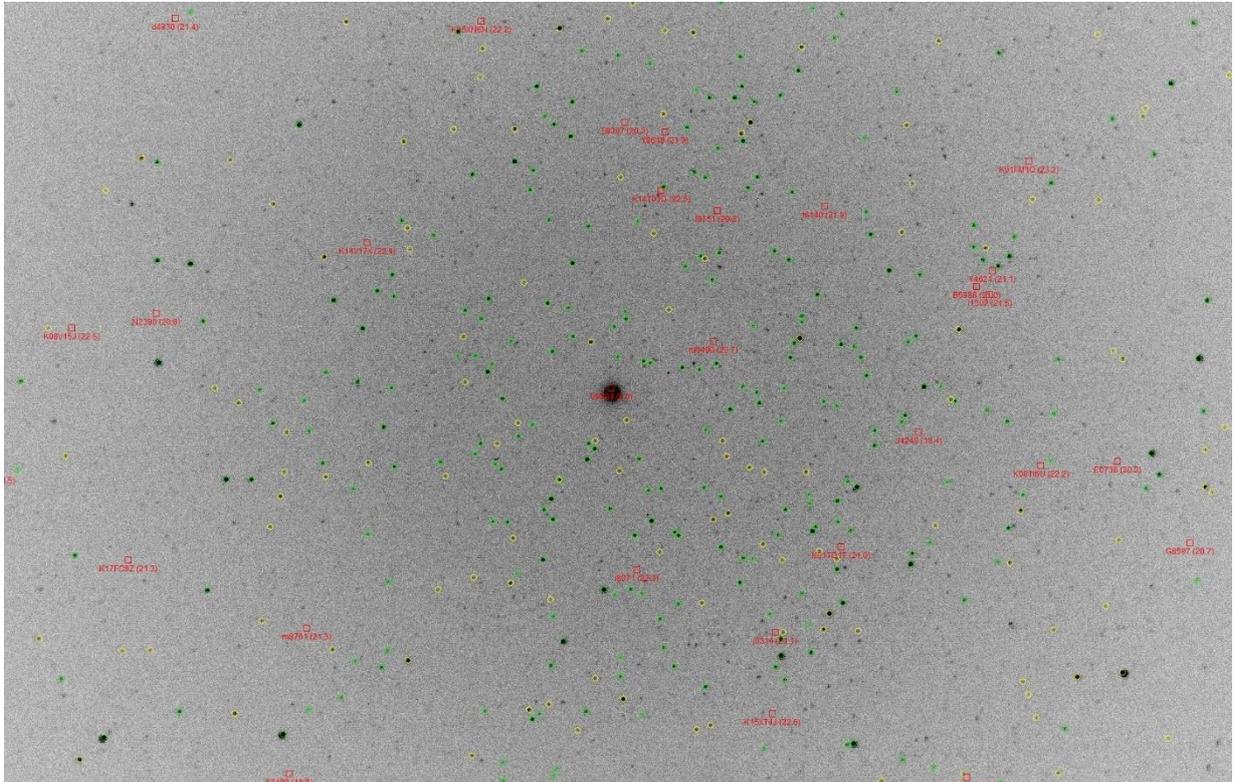
Der Asteroid (4) Vesta erscheint mir für meine Helligkeitsbestimmung ideal. Mit einer absoluten Helligkeit von 3,20 mag ist er der einzige Asteroid, welcher am dunklen Himmel mit bloßem Auge zu sehen ist. Ihn aufzufinden sollte deshalb kein Problem darstellen. (4) Vesta ist deshalb so hell, weil er mit einem Durchmesser von 516 km der größte Asteroid im Asteroiden-Hauptgürtel ist. Somit ist er 34-mal größer, als der Asteroid, welcher die Dinosaurier ausgelöscht hat.

Stand 17.07.2018:

Nachdem die Rohbilder verarbeitet wurden steht fest, dass (4) Vesta für meine Helligkeitsbestimmung nicht geeignet ist. Das Software-Programm Astrometrica, mit welchem man die visuelle Helligkeit bestimmen lassen kann, findet keine passenden Referenzsterne.

Die Helligkeit dieser Referenzsterne ist dem Programm bekannt. Nun kann es die beleuchteten Pixel eines Referenzsternes mit einem von mir definierten Objekt auf dem Bild vergleichen.

Die Differenz von beleuchteter Pixelanzahl und Intensität der Pixelsättigung gibt Aufschluss über die Helligkeit meines Objektes. (4) Vesta ist dafür zu hell. Der Helligkeitsunterschied zwischen dem Asteroiden und den Referenzsternen ist zu groß. Das Programm kann aus den zu lichtschwachen Referenzsternen und dem zu hellem Asteroiden keine Helligkeit auslesen.



(4) Vesta am 16.07.2018. Der Asteroid befindet sich im Bildmittelpunkt.

Nach der Verarbeitung in Astrometrica erhält man ein solches farbumgekehrtes Bild. Die grün und gelb umkreisten Sterne sind die Referenzsterne. Die Auswahl, welcher Stern als Referenzstern diesen soll, führt das Programm automatisch durch. Alle rot markierten Objekte sind Kleinkörper welche sich ebenfalls im Bildausschnitt befinden.

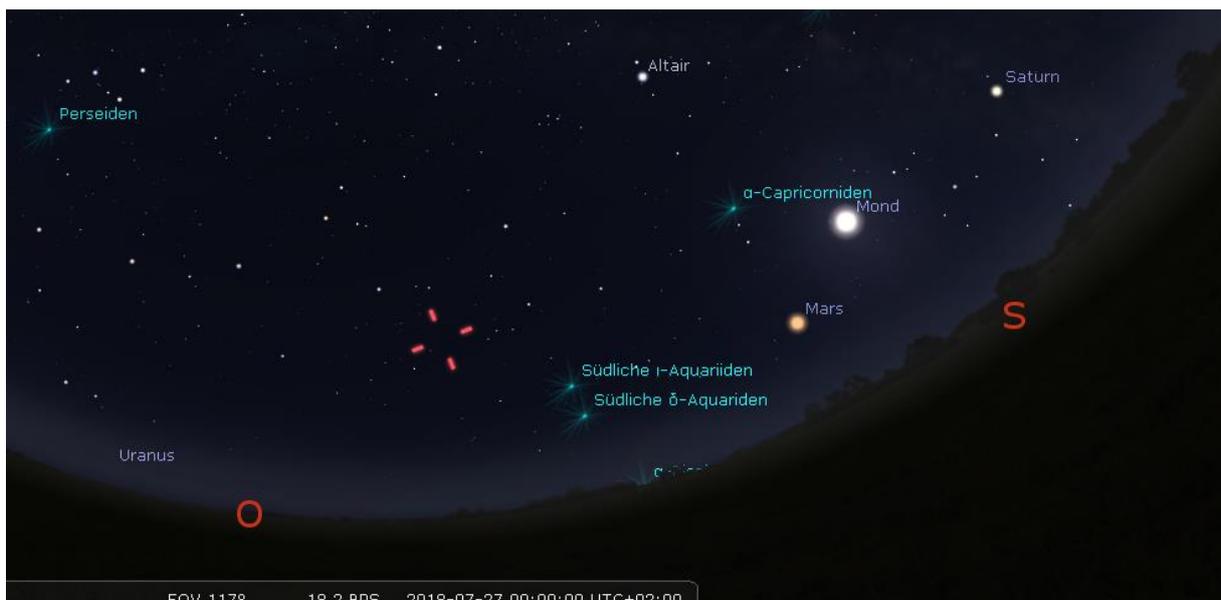
Da mein externer Betreuer, Christoph Kunze, schon die Vermutung hatte, dass (4) Vesta zu hell sein könnte, habe ich mein Teleskop am selben Abend noch auf den Asteroiden (213) Lilaea geschwenkt. Dabei habe ich versucht, den Asteroiden anhand seiner Koordinaten am Himmel aufzuspüren. In Stellarium, einer Astronomie-Software, sind die Daten von Rektaszension und Deklination abzulesen. Im Handcontroller meiner Teleskopmontierung habe ich die Koordinaten eingegeben und die Montierung zu diesen schwenken lassen. Da es eine kurzfristige Entscheidung war, (213) Lilaea zu fotografieren, hatte ich keine Zeit den belichteten Himmelsausschnitt zu überprüfen und auf den Asteroiden abzusuchen. Nun hat sich herausgestellt, dass ich (213) Lilaea nicht getroffen habe. Nur die Koordinaten zu benutzen, ist also zu unzuverlässig.

Beim nächsten Asteroiden muss ich darauf achten, die Live-Bilder mit meinem gewünschten Himmelsausschnitt zu vergleichen. So kann ich sicher sein, dass sich der Asteroid auf dem Bild befindet.

Stand 26.07.2018

Mit Sky Safari 5, einer Software, welche nicht nur die Position von Planeten, Nebeln und Galaxien kennt, sondern auch die Position unzähliger Asteroiden, ist es mir möglich, einen geeigneten Asteroiden für diese Nacht auszuwählen. Er muss höher über dem Horizont stehen als (4) Vesta. Dieser befand sich beim letzten Versuch genau zwischen zwei Wohnhäusern und das Zeitfenster den Asteroiden zu fotografieren, war entsprechend gering. Außerdem muss der Asteroid lichtschwächer als (4) Vesta sein. Um ihn gerade noch so fotografieren zu können, darf er, was seine Helligkeit betrifft, 14 mag nicht überschreiten.

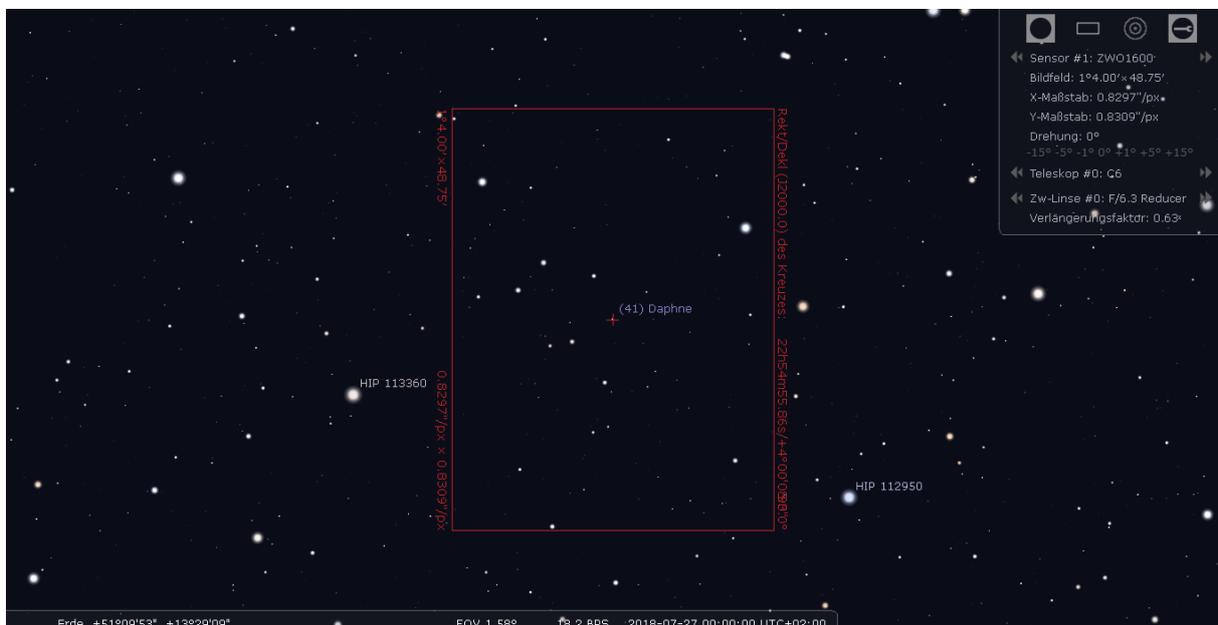
(41) Daphne erscheint mir ideal. Der Asteroid steht hoch genug über dem Horizont um ihn die ganze Nacht lang, zu fotografieren. Um mein weiteres Vorgehen zu planen und mir meine eigene Auffindkarte zu erstellen, die ich später brauchen werde, um den Asteroiden zu finden, muss ich die Bahndaten von (41) Daphne in Stellarium überführen. Das Computerprogramm Stellarium hat wenig bis gar keine Daten zu Asteroiden gespeichert. Über ein Plugin ist es mir möglich, die Bahndaten von (41) Daphne aus dem Internet herunterzuladen. Nun kennt meine bevorzugte Astronomie-Software die Position von (41) Daphne zu jedem Zeitpunkt am Himmel.



(41) Daphne in Stellarium. Der Asteroid ist gekennzeichnet durch vier rote Striche, in dessen Mittelpunkt sich der Himmelskörper befindet.

Mein Computer kennt jetzt die Position, an dem sich der Asteroid befinden müsste. Aber die Bahndaten sind meiner Teleskopsteuerung nicht bekannt. Ich werde also mit dem Teleskop eine bekannte, sich ganz in der Nähe befindende Galaxie (NGC 7422) anfahren, denn meine Montierung hat die Position der Galaxie NGC 7422 eingespeichert.

Im nächsten Schritt vergleiche ich die Live-Bilder mit Stellarium. Dabei achte ich auf prägnante Sternkonstellationen wie Dreiecke, helle Sterne oder einprägsame geometrische Figuren. Das hilft, um den fotografierten Bildausschnitt zu identifizieren. Mit Stellarium kann ich die Live-Bilder abgleichen und so Stück für Stück zum Asteroiden navigieren. Meine eigene, erstellte Sternkarte wird mir helfen. In ihr ist sowohl die Kameraposition, als auch die Größe des zu fotografierenden Himmelsausschnitts und Zwischenlinsen im optischen System berücksichtigt worden.



Sternkarte für den 27.07.2018. (41) Daphne befindet sich im Zentrum und ist mit einem roten Kreuz gekennzeichnet. Die rote Umrahmung gibt an, wie groß der Himmelsausschnitt auf meinen Fotos sein wird. Der Bildausschnitt ist abhängig von Kamerasensor und Brennweite des optischen Systems.

Stand 27.07.2018

Ich habe (41) Daphne fotografieren können. 19:00 Uhr habe ich angefangen das Teleskop aufzubauen und die Montierung einzurichten. Als es gegen 22:00 Uhr dunkel genug war, konnte ich die Galaxie NGC 7422 anfahren. Zwei Laptops halfen mir dann beim Aufsuchen des Asteroiden.



Der rechte Laptop war verbunden mit der Teleskopkamera und lieferte mir die Live-Bilder. Auf dem linken Laptop konnte ich die Sterne mit Stellarium abgleichen.

00:41 Uhr habe ich (41) Daphne ausfindig gemacht und den Asteroiden über zwei Stunden fotografiert. Mittels Astrometrica lässt sich nun die scheinbare Helligkeit bestimmen (siehe 3.2.2).

2. Definition Asteroid

„Als Kleinplaneten, Planetoiden oder Asteroiden werden die kleinen [planetenähnlichen] Himmelskörper des Sonnensystems bezeichnet. [...] sie [haben] nur eine kleine Masse und eine geringe Größe“².

In der folgenden Facharbeit werde ich mich auf die Bezeichnung „Asteroiden“ festlegen.

2.1. Eigenschaften von Asteroiden

Asteroiden zeichnen sie sich durch eine ungleichmäßige Formung aus. Es gibt kleine Asteroiden mit einigen Metern Durchmesser und große Asteroiden mit bis zu mehreren hundert Kilometern Durchmesser. Die größten unter ihnen bilden aufgrund ihrer Schwerkraft eine Kugelform aus. Bei kleineren Asteroiden reicht die Schwerkraft nicht aus um diese durch seismische Aktivitäten in eine Kugelform zu zwingen. Sie schweben dann als längliche und unförmige Objekte umher. Asteroiden besitzen aufgrund ihrer geringen Masse keine Atmosphäre.

Die chemische Zusammensetzung von Asteroiden variiert stark. Hauptsächlich bestehen sie aus Metallen, Kohlenstoff und Silikaten. Einige Asteroiden bestehen aus Felsgestein und besitzen einem metallischen Kern, andere sind komplette Metallbrocken aus Eisen und Nickel.

Spektroskopische Untersuchungen im Infrarot- und UV-Bereich geben Aufschluss über die Oberflächenzusammensetzung von Asteroiden. Die Daten werden genutzt um den Asteroiden verschiedene Typen zuzuordnen. Es gibt insgesamt 14 Asteroidentypen.

Oberflächenzusammensetzung der drei häufigsten Asteroidentypen^{3 4 5}

C-Typ 75 Prozent aller Asteroiden sind dem C-Typ zuzuordnen. Damit ist es der am häufigsten vorkommende Typ. Man vermutet, dass dieser Asteroidentyp aus der ältesten Materie unseres Sonnensystems besteht. Denn die C-Typ Asteroiden ähneln in ihrer Zusammensetzung dem solaren Urnebel. Also jenem Nebel aus dem sich das Sonnensystem gebildet hat.

² Astronomie Eine Einführung in das Universum der Sterne, S.151

³ <http://www.meta-evolutions.de/pages/ssdc-asteroiden-guertel.html> [27.08.2018;19:59 Uhr]

⁴ <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/text/asteroids.txt> [08.12.2018; 17:47 Uhr]

⁵ https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10985/1764_read-24566/#/gallery/28781 [08.12.2018; 17:49 Uhr]

Eine dunkle Färbung und ein Albedo von 0,05 lässt Kohlenwasserstoffe auf den C-Typen vermuten. C-Typ Asteroiden findet man im vor allem im äußeren Hauptgürtel (siehe 2.4.3). (41) Daphne ist ein C-Typ Asteroid.

S-Typ Dem S-Typen sind 17 Prozent aller bekannten Asteroiden zuzuordnen. Auf der Oberfläche befinden sich hauptsächlich Eisen- und Magnesiumsilikate. Mit einem Albedo von 0,10 bis 0,22 reflektieren die Asteroiden viel Sonnenlicht. S-Typ Asteroiden kommen vorwiegend im inneren Hauptgürtel vor (siehe 2.4.3).

M-Typ Der dritthäufigste Asteroidentyp besteht zum Großteil aus Metall und besitzt ein Albedo von 0,10 bis 0,18. M-Typ Asteroiden sind überwiegend im mittleren Hauptgürtel vorzufinden (siehe 2.4.3).

2.2. Asteroiden im Hauptgürtel

1766 hat Johann Daniel Titius eine Relation aufgestellt, nach der in gewissen Abständen zur Sonne Planeten vorzufinden sein müssten. Durch die sehr leistungsschwachen Teleskope waren zu dieser Zeit auch nur sechs Planeten bekannt: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn.

Grundlage von Titius Relation war die Zahlenfolge 0, 3, 6, 12, 24, 48 und 96. Jede Zahl ist dabei das Doppelte der vorangegangenen Zahl. Nur 0 und 3 bilden eine Ausnahme. Danach addierte er zu jeder Zahl 4. Es ergibt sich die Zahlenfolge 4, 7, 10, 16, 28, 52 und 100. Diese beschreibt die Abstände der Planeten zu Sonne (beginnend mit dem innersten Planeten Merkur). Demnach beträgt der mittlere Bahnradius des dritten Planeten Erde, in Titius Relation, 10.

Diese Zahlenfolge kann ebenfalls durch eine Formel beschrieben werden:

$$R_n = 4 + 3 \cdot 2^n$$

Für n ist $-\infty, 0, 1, 2, 3, 4, 5$, beginnend mit Merkur einzusetzen. Daraus ergibt sich die obenstehende Zahlenfolge 4, 7, 10, 16, 28, 52 und 100. Diese numerische Beziehung wird heute Titius-Bode Reihe genannt, denn die Formel nach Titius wurde erst Ende des 18. Jahrhunderts vom Astronom Johann Elert Bode publiziert.⁶

⁶ <https://www.welt.de/wissenschaft/weltraum/article130424690/Planetenformel-irrer-Zufall-oder-Naturgesetz.html>
[27.10.2018; 18:00 Uhr]

Tatsächlich ist die Titius-Bodes Reihe eine empirische Relation. Titius hat nur nach einer numerischen Beziehung zwischen den damals bekannten Planeten und dessen Abständen zur Sonne gesucht.

Um die mittleren Abstände der Planeten von der Sonne in Astronomischen Einheiten zu erhalten, wurde die Formel 1787 umgeschrieben:

$$a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

Daraus ergeben sich folgende Werte:

Planet	n	Abstand nach Titius-Bode in AE	Tatsächlicher Wert in AE
Merkur	$-\infty$	0,4	0,39
Venus	0	0,7	0,72
Erde	1	1,0	1,0
Mars	2	1,6	1,52
-	3	2,8	-
Jupiter	4	5,2	5,21
Saturn	5	10,0	9,56

Die von Titius ermittelten Planetenabstände weisen nur sehr kleine Abweichung zu den tatsächlichen Werten auf. Der fünften Stelle in Titius Relation war kein Planet zuzuordnen. Das änderte sich in der Nacht zum 1. Januar 1801. Guisepppe Piazzi (1746-1826) spürte in einer Entfernung von 2,78 AE zur Sonne, ein Objekt auf. Es wies eine kreisähnliche Umlaufbahn auf und entsprach der Entfernungsvorhersage nach Titius. Nach dieser Vorhersage müsste es in einer Entfernung von 2,8 AE einen Planeten geben. Das Objekt schloss die Lücke zwischen Mars und Jupiter und erhielt den Namen Ceres. Doch im Laufe der Zeit entdeckte man immer mehr Himmelskörper in diesem Abstand zu Sonne. 1802 wurde Pallas, 1804 Juno und 1807 Vesta entdeckt⁷. Es stellte sich heraus, dass es sich hierbei nicht um Planeten, sondern um Asteroiden handelt.

Zwischen der Mars- und Jupiterumlaufbahn befinden sich nach heutigem Kenntnisstand mehr als 600 000 Asteroiden⁸. Das sind etwa 75% aller bekannten Asteroiden. Sie bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne und bilden einen mehr als 200 Millionen Kilometer breiten Gürtel. Er trägt die Bezeichnung Asteroidengürtel, Planetoidengürtel oder auch Hauptgürtel. „Die meisten [Asteroiden] haben Bahnen mit großen Halbachsen zwischen 2,2 und 3,5 AE und somit Umlaufzeiten von drei bis sechs Jahren. Ihre Bahnen sind dabei stärker zur Ekliptik geneigt als die der großen Planeten“⁹.

⁷ <http://www.meta-evolutions.de/pages/ssdc-asteroiden-guertel.html> [27.19.2018; 17:57 Uhr]

⁸ <http://www.sternwarte.at/planetenweg/asteroiden.html> [28.10.2018; 11:32 Uhr]

⁹ Vgl. Astrowissen-Zahlen, Daten & Fakten, Hans-Ulrich Keller, 2003, S.130f

Manche Umlaufzeiten der Asteroiden stehen im ganzzahligen Verhältnis zur Umlaufzeit des Planeten Jupiter. Man spricht dann von Resonanz. Wenn sieben Orbits gerade so lange dauern würden wie drei bei Jupiter, dann würde eine 7:3 Resonanz vorliegen. 1866 stieß der amerikanische Astronom Daniel Kirkwood auf das Phänomen. Die durch Gravitationseffekte hervorgerufenen Resonanzen führen zu Bahnstörungen einiger Asteroiden im Asteroidengürtel. Dadurch entstehen Lücken im Hauptgürtel.

Besonders auffällige Lücken finden sich bei den Resonanzverhältnissen 3:1, 5:2, 7:3 und 2:1 (Asteroidenumlaufzeit zu Jupiterumlaufzeit) - siehe Abbildung 1.¹⁰

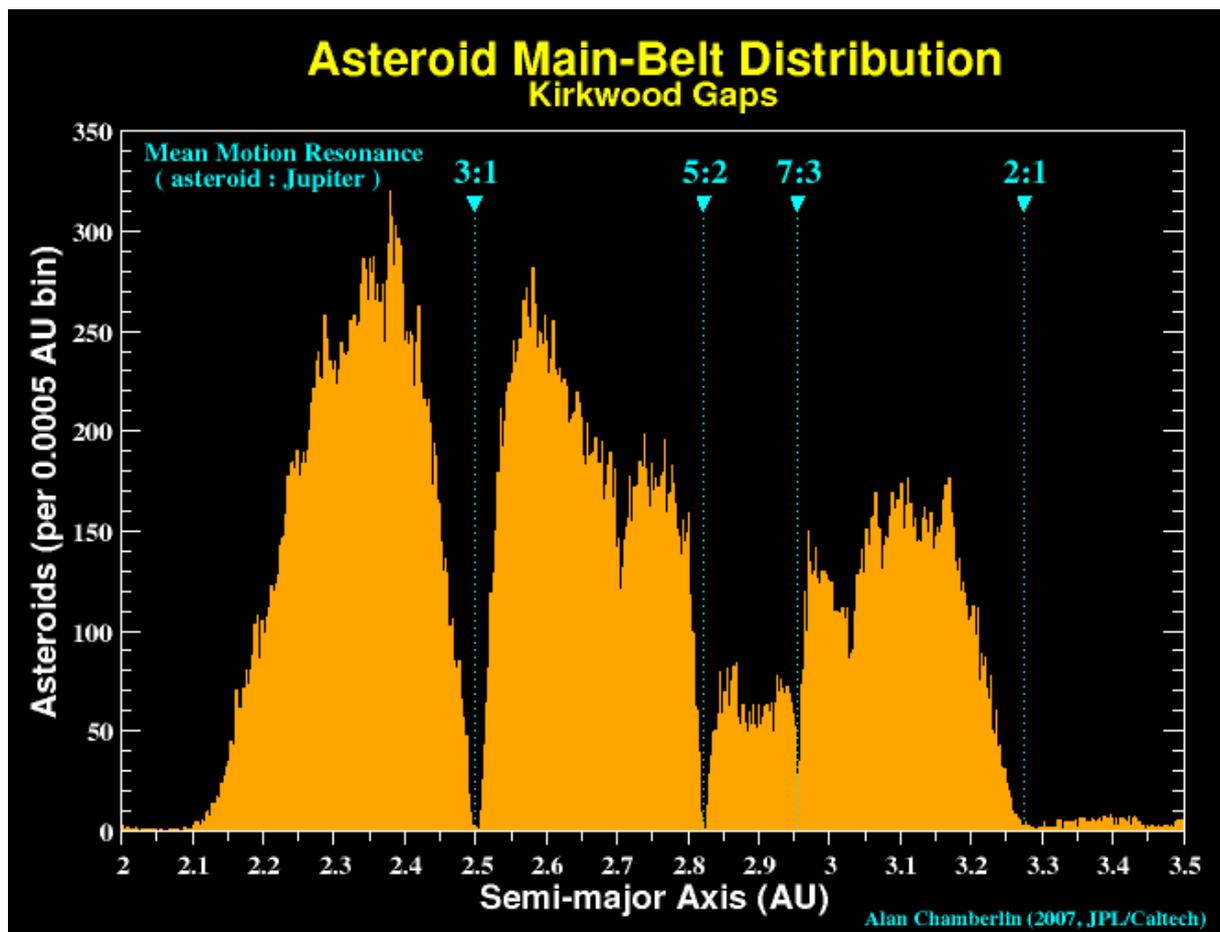


Abbildung 1 – Dieses von der NASA veröffentlichte Histogramm zeigt die Anzahl der Asteroiden pro 0,0005 AE in Abhängigkeit von der großen Halbachse der Asteroiden in AE. Die hellblauen Linien geben die Entfernungen an, in denen sich die Asteroiden in Bahnresonanz mit Jupiter befinden. Insgesamt wurden 156 929 Asteroiden im Histogramm berücksichtigt.

¹⁰ https://ssd.jpl.nasa.gov/?histo_a_ast [27.10.2018; 17:03 Uhr]

2.3. Entstehung der Asteroiden im jungen Sonnensystem

Asteroiden sind Überbleibsel aus der Entstehungszeit unseres Sonnensystems. Sie gingen aus der protoplanetaren Scheibe hervor, welche vor 4,5 Milliarden Jahren existierte. Die protoplanetare Scheibe ist der Überrest einer Gas und Staubscheibe aus der unsere Sonne entstanden ist. Sie bestand „[...] zu etwa 98% bis 99% aus Gas, und zu 1% bis 2% aus Staub“¹¹. Man vermutet, dass die Mikrometer großen Staubteilchen durch Van-der-Waals-Kräfte, Dezimeter große Staubaggregate gebildet haben. Aus diesen Stabmassen bildeten sich 1 bis 100 km große unförmige Objekte, die Planetesimale. Es wird angenommen, dass die Planetesimale aufgrund von Akkretionsprozessen entstanden sind. Einige Planetesimale wurden dabei größer als andere. Sie zogen aufgrund ihrer Gravitationskraft weitere Planetesimale an und bildeten die uns bekannten Gesteinsplaneten. Die übrig gebliebenen Planetesimale sind uns heute als Asteroiden bekannt. Ihre Zusammensetzung entspricht der des Planetensystems zur Entstehungszeit. Deshalb können uns Asteroiden Aufschluss über das junge Planetensystem und dessen Entstehung geben.¹²

Bisher nahm man an, dass die Fülle an Asteroiden (siehe 2.2.) im Hauptgürtel auf den Zerfall eines größeren Planeten zurückzuführen ist. Doch das kann heute widerlegt werden, denn die Masse aller Asteroiden im Hauptgürtel entspricht nur einem Bruchteil der Masse unseres Erdmondes. Diese Masse wäre nicht ausreichend gewesen, um zwischen der Mars- und Jupiterumlaufbahn einen Planeten zu bilden. Tatsächlich ist die Entstehung des Hauptgürtels auf den Planeten Jupiter zurückzuführen, genauer gesagt auf seine Gravitation. Die nahm bei seiner Entstehung sehr schnell zu und verhinderte so die Bildung eines Planeten aus den Planetesimale zwischen Mars und Jupiter.¹³

2.4. Klassifizierung nach den Umlaufbahnen der Asteroiden

2.4.1 erdnahe Asteroiden ^{14 15}

1932 wurde der erste Erdbahnkreuzer entdeckt. K. W. Reinmuth taufte diesen auf den Namen Apollo. Der Planetoid (1862) Apollo hat einen mittleren Durchmesser von 1,5 Kilometern und bewegt sich in 1,8 Jahren um die Sonne. Doch bald darauf entdeckte man immer weitere Erdbahnkreuzer wie (1932) Amor, (1936) Adonis oder (1937) Hermes.

¹¹ Siehe http://www.ita.uni-heidelberg.de/~dullemond/lectures/astro_1_2012/Kapitel_8.pdf [18.12.2018; 19:28 Uhr]

¹² https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10985/1764_read-24566/#/gallery/28781 [09.12.2018; 12:13 Uhr]

¹³ https://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-8794/15179_read-37599/ [09.12.2018; 15:08 Uhr]

¹⁴ Vgl. Astrowissen-Zahlen, Daten & Fakten, Hans-Ulrich Keller, 2003, S.131

¹⁵ https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html [29.10.2018; 22:10Uhr]

Heute unterscheidet man die Asteroiden nach ihrer Umlaufbahn. Die Gruppen sind nach den bekanntesten Vertretern benannt:

Apollo-Gruppe

Vertreter des Apollo-Typs können je nach Bahnlage die Erdbahn kreuzen und stellen deshalb ein erhöhtes Risiko für die Erde dar. Ihre Perihel-Distanz ist kleiner als 1,017 AE. Die große Halbachse ihrer Umlaufbahn ist größer als eine Astronomische Einheit. Benannt wurde die Gruppe nach dem Asteroiden (1862) Apollo.



Abbildung 2 – Umlaufbahn der Apollo Gruppe (Ellipse)

Aten-Gruppe

Die Aten-Asteroiden besitzen Aphele größer als 0,983 AE. Sie können die Erdbahn in oder nahe ihrem Aphel kreuzen. Die große Bahnhälfte des Aten-Typs ist kleiner als eine Astronomische Einheit. Benannt wurde die Gruppe, nach dem am 7. Januar 1976 entdeckten Asteroiden (2062) Aten.



Abbildung 4 – Umlaufbahn der Aten Gruppe (Ellipse)

Amor-Gruppe

Die Asteroiden der Amor-Gruppe zeichnen sich durch ihre Perihele von 1,017 AE bis 1,3 AE zur Sonne aus. Sie kommen der Erdbahn sehr nahe, schneiden diese aber nicht. Die Gruppe ist benannt nach dem Asteroiden (1221) Amor.

Bislang sind 3500 Mitglieder des Amor-Typs bekannt¹⁶. Die Umlaufbahnen der Asteroiden liegen außerhalb der Erde, aber innerhalb des Mars.

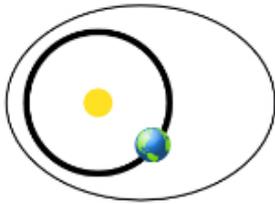


Abbildung 3 – Umlaufbahn der Amor Gruppe (Ellipse)

Atiras-Gruppe

Diese Gruppe wurde nach dem Asteroiden (163693) Atira benannt. Die Umlaufbahn der Kleinkörper des Atira-Typs verlaufen vollständig innerhalb der Erdumlaufbahn. Ihr Aphel ist kleiner als 0,983 AE. Die große Bahnhalbachse ist kleiner als eine Astronomische Einheit.



Abbildung 5 – Umlaufbahn der Atiras Gruppe (Ellipse)

Asteroiden, welche der Erdbahn sehr nahekommen, werden fachsprachlich als NEOs bezeichnet. NEO steht für „Near-Earth Object“, also erdnahe Objekt. Unzählige Amateurastronomen, darunter auch Dipl.Ing. Christoph Kunze, suchen mit ihren Teleskopen den Himmel nach NEOs ab. Unterstützung erhalten sie von diversen Großteleskopen auf der ganzen Welt. Durch ihre Erdnähe müssen diese Objekte besonders präzise beobachtet werden. Nur dann können ihre genauen Bahnen bestimmt und vor möglichen Kollisionen mit der Erde gewarnt werden.

Besonders wichtig ist die Beobachtung und Suche nach Asteroiden des Apollo- und Aten-Typs, da sie der Erde nicht nur nahe kommen, sondern auch deren Umlaufbahn kreuzen können.

¹⁶ https://www.deutschlandfunk.de/amor-in-erdnaehe.732.de.html?dram:article_id=107620 [02.09.2018; 17:39 Uhr]

2.4.2 Asteroiden auf Planetenbahnen

Trojaner¹⁷

In jedem Himmelskörpersystem gibt es Punkte im Raum, an denen sich auftretenden Kräfte zu Null addieren. Diese werden, wie auch in Abbildung 6, mit L_1 , L_2 , L_3 , L_4 und L_5 bezeichnet. Diese Punkte im Raum werden Lagrange-Punkte oder auch Librationspunkte genannt. Ihr Namensgeber war der Italiener Joseph-Louis Lagrange. Insgesamt gibt es in einem Himmelskörpersystem fünf solcher Punkte.

Wenn z.B. ein massereicher Körper, in Abbildung 6 blau dargestellt, einen Stern umkreist, dann heben sich an den Punkten L_1 bis L_5 im Raum die Gravitationskräfte und Zentrifugalkräfte gegenseitig auf. Die Lagrange-Punkte bleiben in Bezug zu dem, den Stern umkreisenden massereichen Körper, ortsfest.

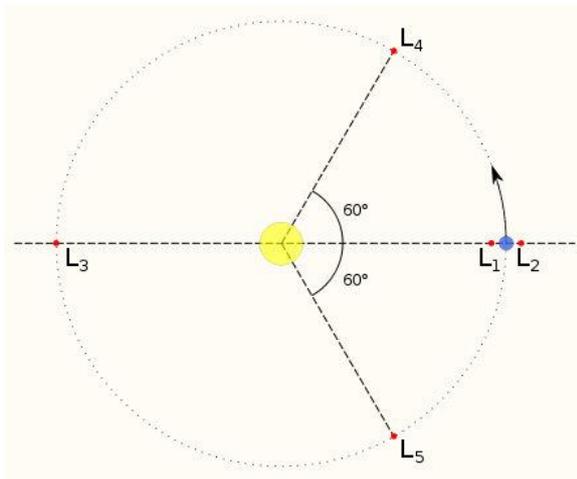


Abbildung 6 – Die Abbildung zeigt ein Himmelskörpersystem aus Zentralgestirn (gelb) und Planeten (blau) und die dazugehörigen Lagrange-Punkte L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , und L_5 auf der Umlaufbahn des Planeten.

Nicht alle Lagrange-Punkte besitzen die gleiche Stabilität. Kleinste Bahnstörungen von Objekten in den Punkten L_1 , L_2 und L_3 würden diese abdriften lassen. Ein künstlicher Satellit im Himmelskörpersystem Sonne-Erde müsste deshalb in den Punkten L_1 bis L_3 alle paar Wochen bahnkorrigiert werden, um seine Position beizubehalten. Die Lagrange-Punkte L_4 und L_5 sind dynamisch stabil. Das heißt, ein Satellit müsste in diesen Punkten nicht bahnkorrigiert werden. Der Satellit würde in L_4 oder L_5 in Bezug zur Erde ortsfest bleiben. Daraus lässt sich schließen, dass natürliche Objekte, wie zum Beispiel Asteroiden, ebenfalls in diesen Punkten scheinbar verharren könnten. Tatsächlich gibt es Asteroiden auf den Bahnen unserer Planeten, die sich in den Punkten L_4 und L_5 befinden. Diese werden als Trojaner bezeichnet.

¹⁷ [http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Exklusiver Beobachtungsplatz fuer Astronomen](http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Exklusiver_Beobachtungsplatz_fuer_Astronomen)
[31.10.2018; 22:00Uhr]

Jupiter besitzt besonders viele Trojaner. In L_4 sind sie dem Gasplaneten auf seiner Umlaufbahn um die Sonne um 60 Grad voraus, in L_5 liegen sie 60 Grad hinter dem Planeten. In den beiden Lagrange-Punkten sind heute mehr als 7000 Jupiter-Trojaner bekannt.

Mittlerweile weiß man, dass alle Planeten außer Merkur und Saturn Trojaner besitzen. Im Jahr 2013 fand man bei Venus einen Trojaner, zwei Jahre zuvor, also 2011 hat man sogar einen Trojaner der Erde aufgespürt. Heute kennen wir neun Mars Trojaner, einen Uranus Trojaner und weitere 22 Neptun Trojaner¹⁸.

2.4.3 Asteroiden des Hauptgürtels

Asteroiden des inneren Hauptgürtels

Die großen Halbachsen der Asteroiden erstrecken sich im inneren Hauptgürtel von 2,1 bis 2,5 AE. Somit fungiert die 3:1 Bahnresonanz als äußere Grenze dieser Zone (siehe 2.2; Abbildung 1).

Asteroiden des mittleren Hauptgürtels

Hierzu zählt man die Asteroiden mit großen Halbachsen von 2,5 bis 2,8 AE. Diese Zone wird von der 3:1 und der 5:2 Bahnresonanz begrenzt (siehe 2.2; Abbildung 1).

Asteroiden des äußeren Hauptgürtels

Die Asteroiden des äußeren Hauptgürtels besitzen große Halbachsen von 2,8 bis 3,3 AE und werden von der 5:2 und 2:1 Bahnresonanz begrenzt (siehe 2.2; Abbildung 1).¹⁹

2.4.4 Asteroiden außerhalb der Jupiterbahn

Zentauren

Zentauren zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Umlaufbahn zwischen der von Jupiter und Neptun liegt. Zentauren „[...] kreuzen meist die Planetenbahnen, wobei es relativ häufig zu nahen Begegnungen mit den großen Planeten kommt“²⁰. Manchmal kollidieren sie mit den Planeten oder werden in kreisähnliche Bahnen gezwungen. Andere werden aus dem Sonnensystem katapultiert oder enden als Satelliten.

¹⁸ <https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/Trojans.html> [04.11.2018; 18:45 Uhr]

¹⁹ Vgl. Abriss der Astronomie, 1969, Hans-Heinrich Voigt, S.131

²⁰ Siehe Astrowissen-Zahlen, Daten & Fakten, Hans-Ulrich Keller, 2003, S.132

Damocloiden

Damocloiden besitzen stark exzentrische und oftmals rückläufige Bahnen. Ihr Aphel liegt meist außerhalb der Uranusbahn. Das Perihel liegt im inneren Sonnensystem, also innerhalb der Marsbahn.²¹

Kuipergürtel-Objekte

Außerhalb der Neptunbahn gibt es eine weitere Zone mit Asteroiden. Es sind die Objekte des Kuipergürtels auch KBOs (Kuiper Belt Objects) genannt.

²¹ https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030200/Personen_Rueckl/Teil_1_Skript_Astrophysik_Kellerer_2017-18.pdf, Seite 136, [09.12.2018; 16:59 Uhr]

3. Asteroid (41) Daphne

3.1. Entdeckung und Bahndaten

Der Asteroid wurde am 22. Mai 1856 von Hermann Mayer Salomon Goldschmidt am Nachthimmel entdeckt. Der deutsch-französischen Astronom spürte (41) Daphne am Pariser Observatorium auf. Benannt wurde der Kleinkörper nach Daphne, einer Nymphe der griechischen Mythologie.

Im Jahr 2008 wurde ein Mond von (41) Daphne entdeckt. Er umkreist den Asteroiden in etwa 405 Kilometer Entfernung und besitzt einen Durchmesser von 2 Kilometern.²²

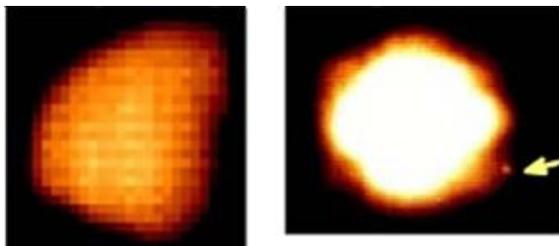


Abbildung 7 - Das linke Bild zeigt die Form von (41) Daphne, rechts ist Daphne mit seinem Mond abgebildet.

Die Bahn von (41) Daphne ist gegenüber der Ekliptik um $15,79^\circ$ geneigt und rechtläufig, folgt also der Bewegungsrichtung der Planeten. Für einen Umlauf benötigt der Asteroid 4,59 Jahre. Das Aphel des Asteroiden liegt 3,5 AE von der Sonne entfernt. Sein Perihel zur Sonne beträgt 2 AE. Der Orbit von (41) Daphne liegt somit im Hauptgürtel.²³

²² Discovery of an Extreme Mass-Ratio Satellite of (41) Daphne in a Close Orbit, 2008

Weblink: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/acm2008/pdf/8370.pdf>

²³ https://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=Daphne [21.10.2018; 16:24Uhr]

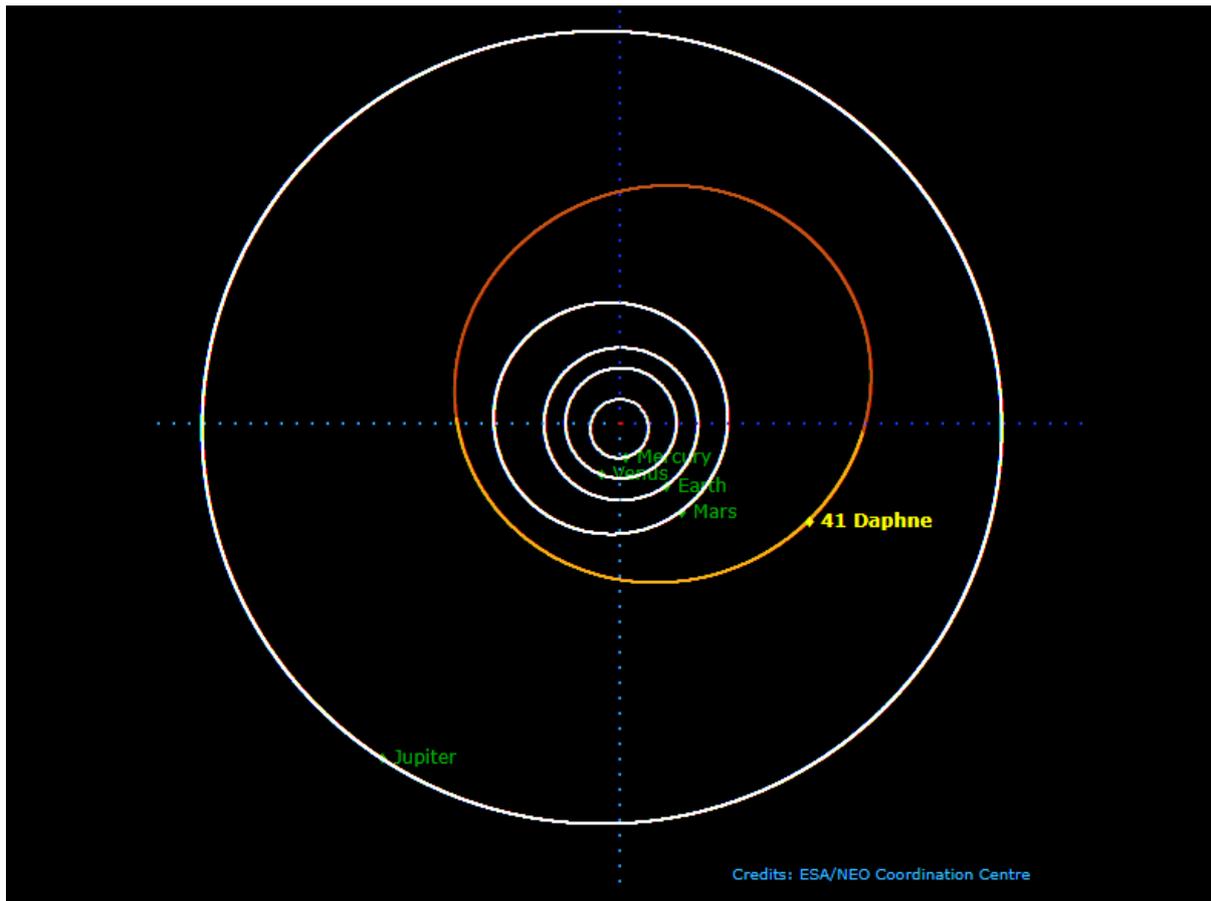


Abbildung 8 – Simulation der Umlaufbahn von (41) Daphne, hier in Orange dargestellt.

3.2. praktische Helligkeitsbestimmung

3.2.1. Versuchsaufbau

Teleskop

Zum Fotografieren des lichtschwachen Asteroiden bot sich mein Schmidt-Cassegrain Teleskop an. Üblicherweise wird es auch als C6 bezeichnet, denn es hat eine Öffnung von 6 Zoll, also rund 150 Millimetern. Mit einer Brennweite von 1500 Millimetern ergibt sich ein Öffnungsverhältnis von f10 (Brennweite geteilt durch Öffnung). Dieses Öffnungsverhältnis ist typisch für Schmidt-Cassegrain-Teleskope. Die extrem hohe Brennweite führt zu einem kleinen Gesichtsfeld. Schmidt-Cassegrain Teleskope können sehr kleine Himmelsausschnitte scharf auflösen. Deshalb werden sie besonders gern bei der Planetenfotografie, sowie Asteroiden- und Kometenfotografie eingesetzt. Das verwendete Schmidt-Cassegrain Teleskop, ist aus diesem Grund, die richtige Wahl.

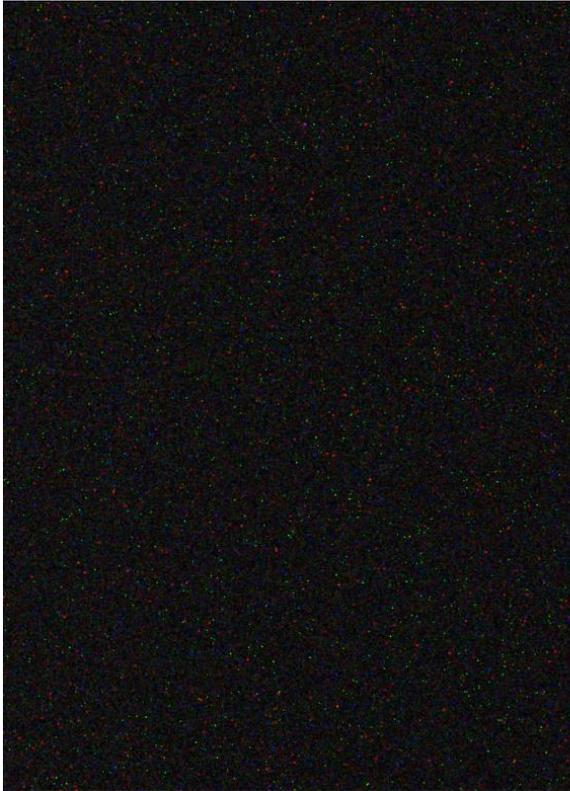
Beim Schmidt-Cassegrain Teleskop passiert das Licht eine Korrekturplatte, auch Schmidt-Platte genannt. Diese beseitigt die sphärischen Aberrationen, also den Abbildungsfehler. Die eintreffenden Strahlen würden ohne Korrekturplatte nicht im selben Punkt zusammenlaufen. Am Rand anfallende Lichtstrahlen könnten nicht richtig fokussiert werden. Doch die Schmidt-Platte korrigiert diesen Strahlengang und man erhält ein scharfes Bild.

Die Strahlen treffen nun auf den konkaven, sphärischen Hohlspiegel, auch Hauptspiegel genannt, welcher das Licht zurück auf den konvexen Fangspiegel wirft. Dieser an der Schmidt-Platte befestigte Sekundärspiegel wirft das Licht durch ein Loch im konkaven Hauptspiegel zurück, wo es auf den Chip einer Kamera trifft. Fokussiert wird über ein Rad, welches den Hauptspiegel verschiebt.

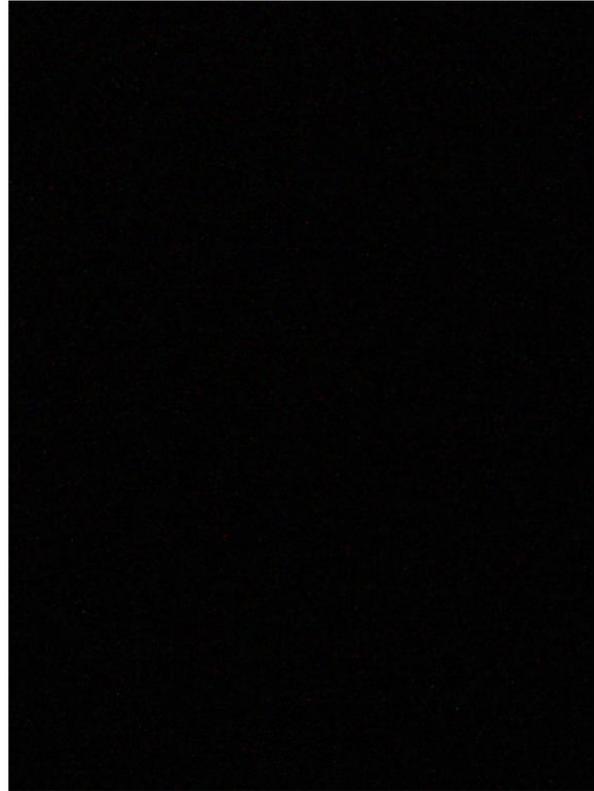
Ich habe mich bewusst für eine zusätzliche Korrekturlinse im optischen System entschieden. Diese Linse, fachsprachlich Focal Reducer genannt, wird an der Okularseite des Teleskops in das optische System eingeschraubt. Sie verkürzt die Brennweite des Schmidt-Cassegrain Teleskop um den Faktor 0,63. Aus $f/10$, ohne Korrektur ergibt sich also $f/6,3$ mit Focal Reducer. Die Brennweite beträgt dann nicht mehr 1500mm, sondern 945mm. Somit erreicht man die gleiche Sättigung mit nur 40 % der Belichtungszeit gegenüber der Fotografie ohne Korrektor. Das ist besonders vorteilhaft, wenn man lichtschwache Objekte fotografieren möchte, wie etwa einen Asteroiden. Des Weiteren ebnet das Korrektursystem das gekrümmte Bildfeld des Schmidt-Cassegrain-Teleskopes.

Kamera

Die Langzeitbelichtung ist ein essentieller Bestandteil der Astrofotografie. Dabei tritt allerdings der Effekt des Bildrauschens auf. Pixel weichen dabei in Helligkeit und Farbe von ihrem eigentlichen Wert ab. Diese Bildfehler würden Einfluss auf die Helligkeitsbestimmung nehmen. Deshalb muss das Bildrauschen minimiert werden. Das schafft man mit peltiergekühlten Kameras. Diesen ist es möglich, die Temperatur des Kamerachips bis 45 Kelvin unter Umgebungstemperatur, zu senken. Thermische Einflüsse auf den Kamerasensor werden unterbunden und man erhält ein störungsärmeres, also rauscharmes Bild.



Sensortemperatur 16,5°C (keine Kühlung)



Sensortemperatur -10,0°C (peltiergekühlt)

Die Abbildungen zeigen das Bildrauschen mit und ohne Kamerakühlung. Der Vergleich findet bei Zimmertemperatur statt. Dabei ist das Objektiv der Kamera geschlossen, es fällt also kein Licht auf den Sensor. Die Kameraeinstellungen sind an die der Asteroidenbilder angepasst. Es wurde dementsprechend 20 Sekunden belichtet und mit eingeschalteter Kühlung auf -10°C gekühlt.

Um den Effekt der Peltierkühlung besser zu veranschaulichen, habe ich den Verstärkerwert erhöht. Dieser ist in der Astrofotografie als Gain-Wert bekannt und entspricht dem ISO-Wert in normalen Digitalkameras. Damit erhöht man die interne Verstärkung des Ausleseverstärkers. In diesem Fall habe ich den Gain-Wert von ursprünglich 310 bei der Asteroidenfotografie, auf nun 442 erhöht.

Man sieht, dass das Bildrauschen durch die Peltierkühlung stark abgenommen hat. Bei -10°C Sensortemperatur ist also gewährleistet, dass meine Helligkeitsbestimmung exakt wird.

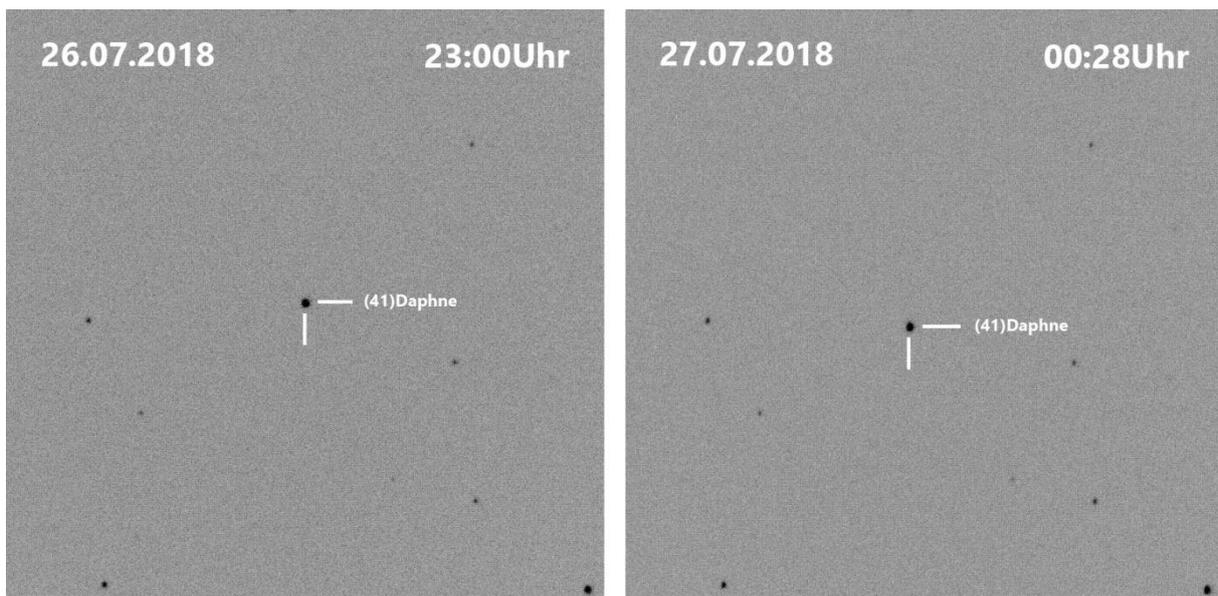
Solch eine Peltierkühlung ist auch in der ZWO ASI 1600 MC PRO-cool verbaut. Zur Beobachtungsnacht konnte ich meinen Kamerachip deshalb auf -10°C kühlen. Die Kamera weist eine Pixelgröße von 3,8µm * 3,8µm auf. Die Auflösung beträgt also 4656*3520 Pixel.

Montierung

Um runde Sterne zu erhalten, ist es bei der Langzeitbelichtung zwingend notwendig, die scheinbare Himmelsdrehung auszugleichen. Das ist heute mit elektronischen Montierungen möglich. In meinem Versuchsaufbau habe ich eine Skywatcher NEQ-5 Pro SynScan GoTo verwendet. Im Steuerungssystem der Montierung sind 42 900 Objekte eingespeichert, die die Montierung automatisch anfahren kann. Asteroiden zählen nicht dazu, sodass man sie eigenständig auffinden muss. Alternativ ist es jedoch möglich, die Montierung mit Stellarium zu verbinden und jegliche Asteroiden über Stellarium, anfahren zu lassen. Bei meinem Versuchsaufbau war das aber nicht nötig.

Die NEQ-5 reicht aus, um 20 Sekunden Belichtungszeiten nachzuführen, ohne dass Strichspuren auf den Aufnahmen entstehen. Eine präzisere Nachführung durch die Unterstützung von Guiding ist bei meiner Helligkeitsmessung also nicht notwendig.

Aufnahmen



Um die Bewegung des Asteroiden zu veranschaulichen, habe ich in einem Zeitraum von 88 Minuten 24 Bilder aufgenommen. Diese wurden jeweils 20 Sekunden belichtet. Vergleicht man die erste Aufnahme am 26.07.2018 um 23:00 Uhr mit der vom 27.07.2018 um 00:28Uhr, dann fällt einem der horizontale Versatz von (41) Daphne auf. Dieser Versatz beweist die Bewegung des Asteroiden am Himmel.



Verarbeitet man alle 24 Einzelaufnahmen in DeepSkyStacker zu einem Summenbild, und zentriert in jedem Bild den Asteroiden auf den Bildmittelpunkt, dann erhält man eine Strichspuraufnahme. Bei dieser erscheint nur der Asteroid unbewegt. Alle Sterne sind als Strichspur zu erkennen. Das Übereinanderlegen der Bilder wird als Stacking bezeichnet. Dabei wird das Bildrauschen reduziert und die Objekte erfahren eine Kontraststeigerung.

3.2.2. Bestimmung scheinbare Helligkeit mit Astrometrica

Scheinbare Helligkeit

„Die Helligkeit, mit der die Gestirne dem Beobachter erscheinen, nennt man scheinbare Helligkeit“²⁴. Diese ist abhängig von der Leuchtkraft und der Entfernung des Objekts zum Beobachter. Die scheinbare Helligkeit m wird in Größenklassen angegeben. Dabei gilt: je höher der Wert der Größenklassen, desto geringer ist die scheinbare Helligkeit und desto lichtschwacher erscheint ein Objekt am Himmel. Die Einteilung in Größenklassen ist nicht linear, sondern logarithmisch. Im Altertum gab es sechs Größenklassen. Die Skala beinhaltete die sehr hellen Fixsterne der ersten Größenklasse und reichte bis zu den gerade noch für das menschliche Auge sichtbaren Sternen der sechsten Größenklasse.

²⁴ Siehe Jugendlexikon für Astronomie und Raumfahrt, VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1982, S.74

Bei einem scheinbaren Helligkeitsunterschied von einer Größenklasse müssen sich dabei die scheinbaren Strahlungsintensitäten zweier Sterne wie 1 : 2,512 verhalten. Ein Stern der fünften Größenklasse ist deshalb 2,512-mal heller, als ein Stern der sechsten Größenklasse. Wenn sich ein Stern um fünf Größenklassen von einem anderen unterscheidet, dann beträgt demnach der scheinbare Helligkeitsunterschied das Hundertfache.

Durch die Erfindung des Teleskops musste die Skala erweitert werden. Mit modernen Instrumenten sind viel lichtschwächere Objekte, jenseits der sechsten Größenklasse zu beobachten. Um hellere Objekte, als die der ersten Größenklasse zu beschreiben, wurde die Skala auch in den mathematisch negativen Bereich erweitert. Die scheinbare Helligkeit wird in Magnitudo, kurz *mag* (auch ^m) angeben. Die Skala erstreckt sich heute von der Sonne mit $-26^m,7$ bis zu den lichtschwächsten fotografischen Objekten mit etwa $+24^m$.

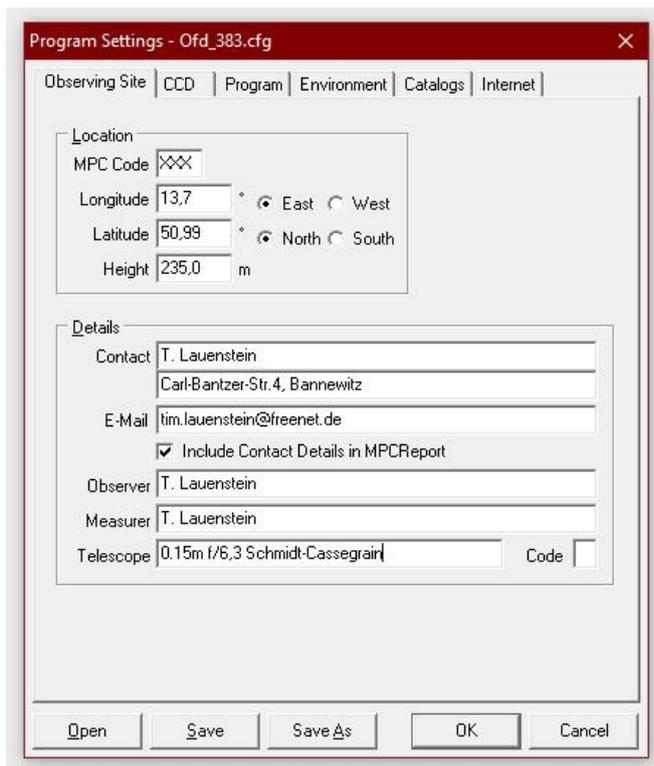
Mit der scheinbaren Helligkeit kann man nicht nur die Helligkeiten der Sterne am Nachthimmel beschreiben, sondern auch die der Asteroiden.

Astrometrica

Astrometrica ist ein astrometrisches Programm. Unter Astrometrie, auch Positionsastrometrie genannt, versteht man die „Bestimmung der Örter der Gestirne an der scheinbaren Himmelskugel [...]. Die Astrometrie stellt die Koordinaten der Gestirne fest und überwacht deren Veränderungen“²⁵. Bei all diesen Messungen werden die Objekte als punktförmig betrachtet.

Astrometrica benötigt zur Positionsbestimmung von Asteroiden zwei wesentliche Kataloge. Zum einen, einen Sternkatalog, zum anderen einen Katalog, der die Bahndaten von Asteroiden beinhaltet. Die Position des Asteroiden wird benötigt, damit das Programm weiß, welche Pixel für die Helligkeitsbestimmung ausgewertet werden müssen. Die aktuellen Bahndaten der bekannten Asteroiden sind im Katalog des Minor Planet Center aufgeführt. Um ihn aktuell zu halten, erscheint er monatlich neu.

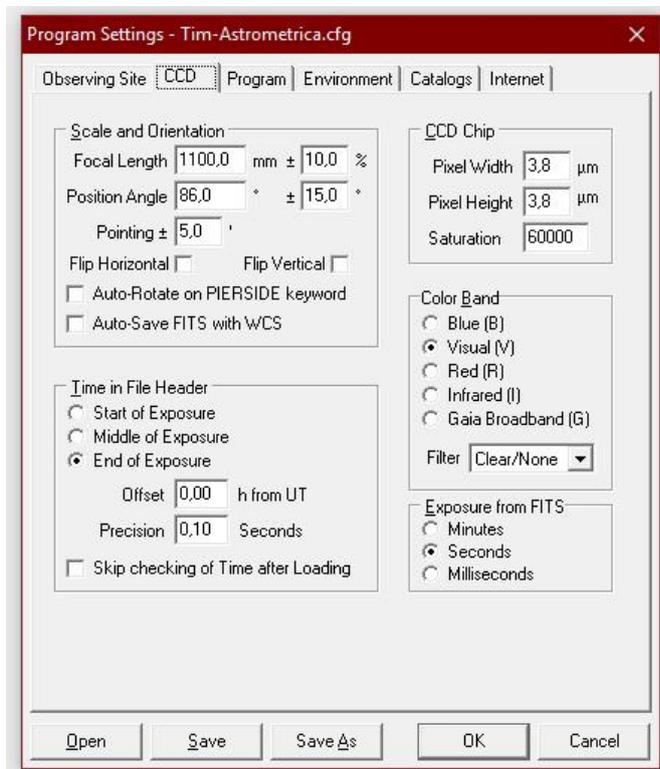
²⁵ Siehe Jugendlexikon für Astronomie und Raumfahrt, VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1982, S.18



Wird in Astrometrica ein Foto hochgeladen, dann versucht das Programm dieser Aufnahme einen Himmelsausschnitt zuzuordnen. Dafür müssen folgende Parameter in Astrometrica voreingestellt werden:

Zuerst werden die eigenen Positionskoordinaten festgelegt. Für meinen Beobachtungsstandort ergibt das 13,7° E und 50,99° N. Meine Position ist um 235,0 m gegenüber dem Meeresspiegel erhöht. Außerdem kann ich meine Kontaktdaten hinterlegen, wenn ich die ermittelten Koordinaten an das MPC, also Minor Planet Center

schicken möchte. Dieses verarbeitet die Positionen dann zu Bahndaten weiter.



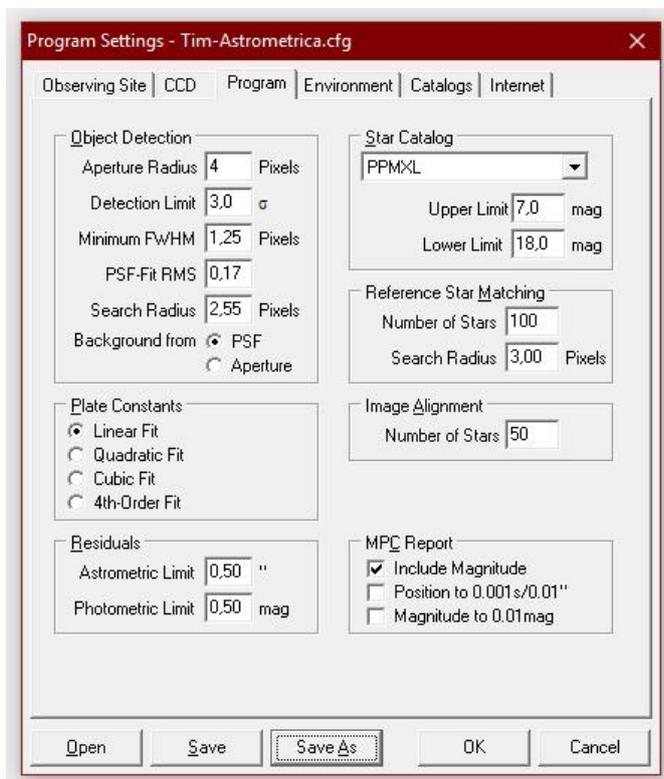
Der nächste Schritt ist, die Parameter für sein jeweiliges Setup festzulegen. Dazu benötigt das Programm eine Angabe zur Brennweite (Focal Length). Die berechnete Brennweite meines Systems liegt bei 945 mm. Mit dem entstandenen Bildausschnitt bei einer Brennweite von 945 mm findet Astrometrica allerdings keine Referenzsterne, jedoch bei der Einstellung der Brennweite von 1100 mm. Diese Abweichung kann durch den Focal Reducer entstehen, da je nach Position im optischen System unterschiedliche Brennweiten generiert werden können. Außerdem

kann der Abstand von Kamera zu Focal Reducer Einfluss auf die Brennweite haben.

Ein weiterer Parameter ist die Kameraposition (Position Angle). Diese Größe beschreibt die Ausrichtung des Kamerasensors zum äquatorialen System. Für meinen Versuchsaufbau ergibt das eine Bildrotation von etwa 86°. Um diesen Betrag wird mein Bild gedreht, damit das Programm Referenzsterne finden kann.

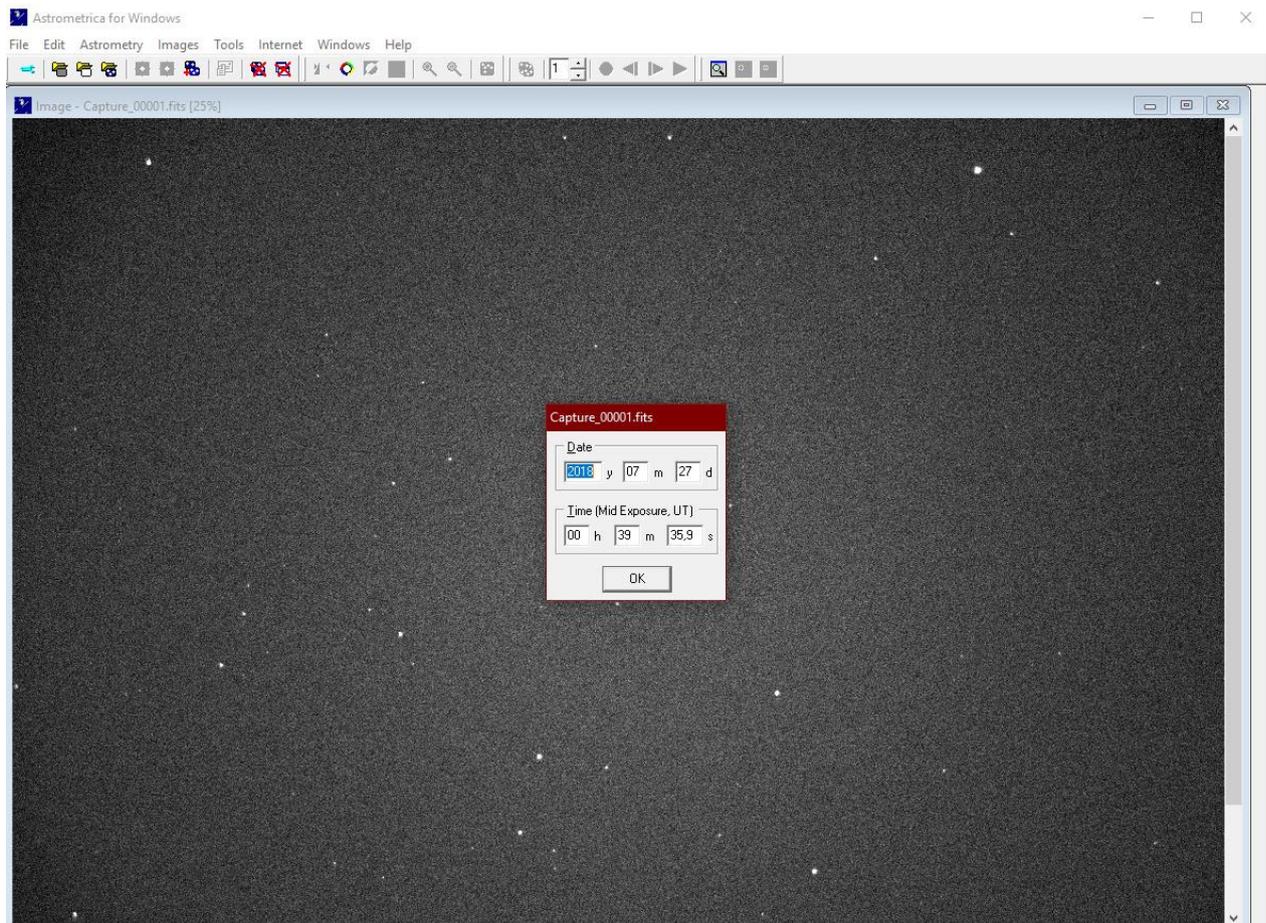
Ein weiteres wichtiges Kriterium ist der Aufnahmezeitpunkt. Dieser wird automatisch in den Metadaten des Aufnahmeformats FITS gespeichert. In diesem, von der Internationalen Astronomischen Union anerkannten Dateiformat, werden auch die Hubble-Bilder oder die des Spitzer Weltraumteleskopes gespeichert. Um Bilder in Astrometrica zu bearbeiten, ist es zwingend notwendig, dass die Rohdaten im FITS-Format aufgenommen wurden. Nachfolgend wird festgelegt, wann das Aufnahmeprogramm die Zeitdaten hinterlegt; entweder am Anfang der Langzeitbelichtungsaufnahme, in der Mitte oder beim Beenden der Aufnahme. Das benutzte Aufnahmeprogramm SharpCap speichert die Systemzeit des Laptops jeweils am Ende der Belichtung in den Metadaten.

Zur genauen Sternerkennung benötigt das Programm außerdem die Pixelgröße der Kamera. Für die ZWO ASI 1600MC PRO-cool ergibt sich ein Wert von 3,8 µm.

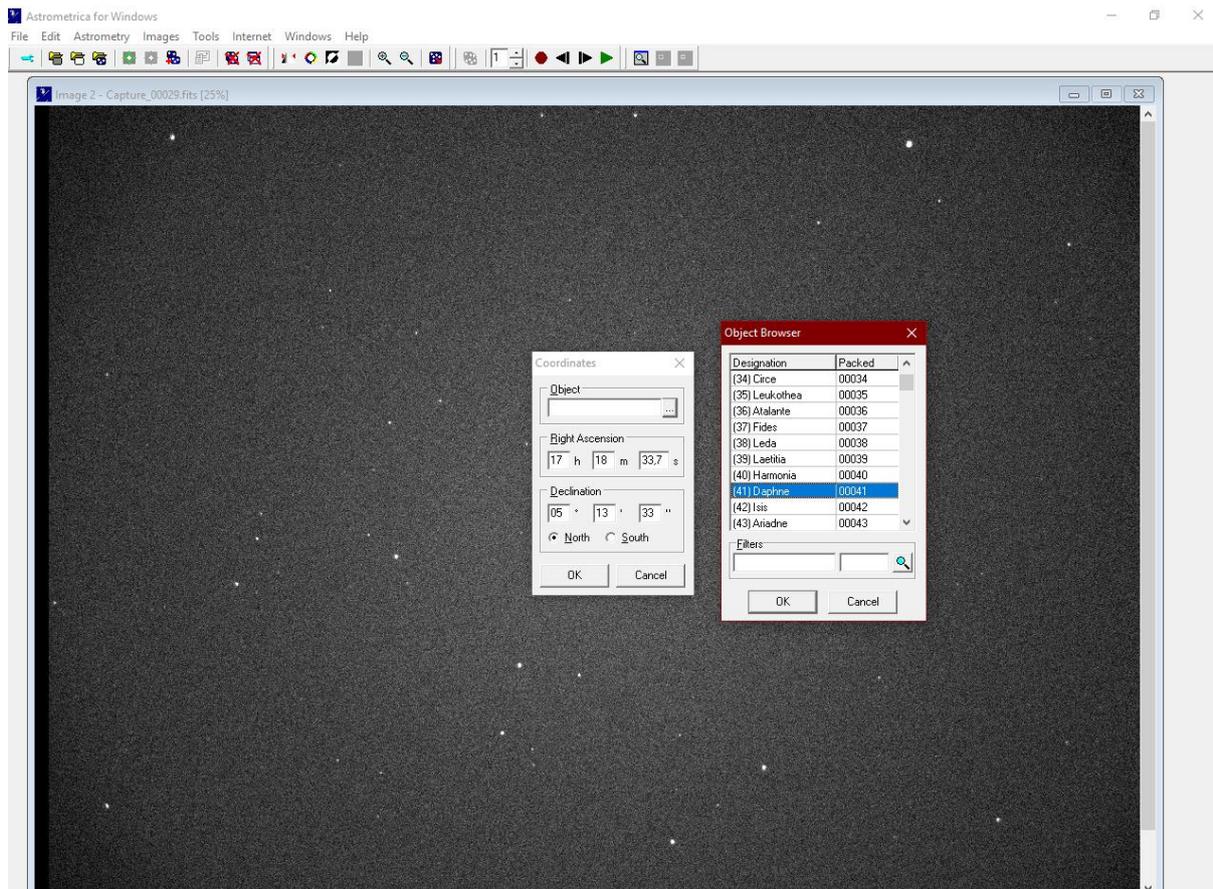


Des Weiteren muss festgelegt werden, welcher Sternenkatalog verwendet wird. Hierbei fiel die Entscheidung auf den PPMXL-Katalog. Er beinhaltet Sterne bis zur 20. Größenklasse und listet 910.468.710 Objekte auf²⁶. Es gibt noch fünf weitere Sternenkataloge. Diese unterscheiden sich alle in ihrer Genauigkeit.

²⁶ <http://www.astrometrica.at/default.html?catalogs.html> [07.10.2018; 13:09Uhr]



Sind alle Parameter eingestellt, kann ein Rohbild in Astrometrica geöffnet werden. Ein Fenster gibt Datum und Uhrzeit aus den Metadaten zur Überprüfung frei.

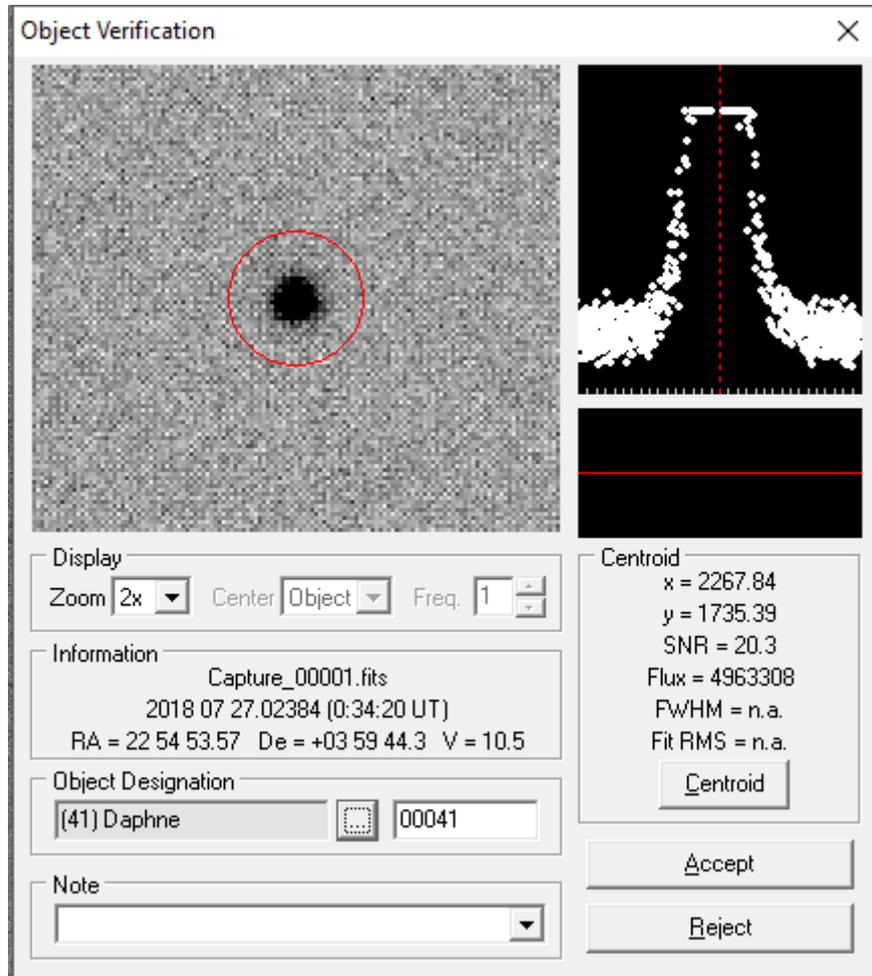


Um der Aufnahme einen Himmelsausschnitt zuzuordnen, müssen die ungefähren Koordinaten für den Bildmittelpunkt, in diesem Fall die Koordinaten des Asteroiden (41) Daphne, ins Programm eingegeben werden. Dieser Asteroid ist in der Datenbank von Astrometrica gelistet. Dementsprechend sind dem Programm die Koordinaten von (41) Daphne bekannt und es ist nicht nötig sie händisch einzugeben.

Astrometrica kennt jetzt das ungefähre Sternenfeld, welches fotografiert wurde und vergleicht dieses mit dem Sternenkatalog. Das Bild wird aufgelöst, bekannte Sternkonstellationen aus dem Sternenkatalog werden dabei mit den Sternkonstellationen der Aufnahme abgeglichen.

Nach diesem Vorgang ist das Bild soweit berechnet, dass jedem beliebigen Punkt des Bildes die dementsprechende Koordinate von Rektaszension und Deklination zugeordnet werden kann. Dies stellt die Grundvoraussetzung dar, um astrometrisch ausmessen zu können.

Alle errechneten Informationen zu (41) Daphne werden anschließend im Programm angezeigt. Neben der vergrößerten Ansicht des Asteroiden aus der Aufnahme, befindet sich eine Darstellung, die der Gauß-Kurve ähnelt. Hierbei ist erkennbar, wie viele Pixel der Kleinkörper belegt hat.



Das Feld „Information“ zeigt nun die gemessene Position des Asteroiden. Sie beträgt Rekt/Dekl: 22h 54m 53,57s / +03° 59′ 44,3″. Dass die Messung korrekt ist, zeigt ein Vergleich mit Stellarium, welches für die gleiche Uhrzeit die Koordinaten Rekt/Dekl: 22h 54m 55,30s / +04° 00′ 03,5″, angibt. Daneben befindet sich die Angabe zur visuellen Helligkeit des Asteroiden, gekennzeichnet mit V. Um diese zu bestimmen, wird die Anzahl und die Intensität der Pixel des Asteroiden, mit der Anzahl und Intensität der Pixel von bekannten Referenzsternen verglichen. Von diesen Referenzsternen ist die scheinbare Helligkeit bekannt und somit kann das Programm diese Helligkeit mit der Pixelanzahl und Pixelsättigung des Asteroiden ins Verhältnis setzen. Für (41) Daphne ergibt sich eine scheinbare Helligkeit von 10,5 mag.

3.2.3. Berechnung absolute Helligkeit

Um die absolute Helligkeit von (41) Daphne zu errechnen, ist eine theoretische Vorüberlegung über die absolute Helligkeit von Sternen nötig:

Die scheinbare Helligkeit eines Sterns hängt im Wesentlichen von der Entfernung des Sterns zum Beobachter ab, deshalb ist sie kein vergleichbares Maß für die tatsächliche Leuchtkraft. „Diese wird durch die absolute Helligkeit M erfaßt. Man versteht darunter die (scheinbare) Helligkeit, die der Stern hätte, wenn er sich in 10 pc Entfernung befände“²⁷.

$$1pc = 206265 AE \quad \text{oder} \quad 1pc = 3,26 \text{ Lichtjahre}$$

Die absolute Helligkeit wird wie die scheinbare Helligkeit in mag angegeben. Als alternative Schreibweise wird häufig ein großes M über dem Dezimalkomma verwendet. In der weiteren Arbeit findet die Schreibweise in mag Anwendung.

Asteroiden sind Reflektoren. Sie werden von der Sonne angestrahlt und leuchten nicht selbst. Des Weiteren ist die Lichtmenge, welche reflektiert wird, viel kleiner als die von der Sonne ausgestrahlte Lichtmenge. Für die absolute Helligkeit von Reflektoren im Sonnensystem nimmt man deshalb an, dass sich der Beobachter nicht 10 pc vom Stern, sondern 1 AE vom Asteroiden entfernt befindet.

Berechnung in Bezug auf (41)Daphne:

Allgemeingültige Formel für Sterne:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10} \left(\frac{r}{10pc} \right)$$

m ... scheinbare Helligkeit in mag
 M ... absolute Helligkeit in mag
 r ... Abstand des Sterns in pc

Die Formel für Reflektoren im Sonnensystem muss umgestellt werden. Hierfür wird r durch den Abstand a in AE ausgetauscht. 10 pc im Nenner werden zu 1 AE.

Der Abstand a beschreibt nicht nur den Abstand vom Beobachter zum Asteroiden, vielmehr ist nach dem Abstand vom Beobachter zum Asteroiden und weiter zur Sonne gefragt. Da Reflektoren nicht selbstleuchtend sind, muss der Weg, den das Licht von der Sonne zum Asteroiden benötigt, mit einbezogen werden.

$$m - M = 5 \cdot \log_{10} \left(\frac{a}{1AE} \right)$$

²⁷ Siehe Jugendlexikon für Astronomie und Raumfahrt, VEB Bibliographisches Institut Leipzig, 1982, S.75

Man kann nun den Bruch in ein Produkt umwandeln. Es ergibt sich:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10} \left(a \cdot \frac{1}{1AE} \right)$$

Nun lässt sich das Produkt als Summe der einzelnen Faktoren umschreiben:

$$m - M = 5 \cdot \left[\log_{10}(a) + \log_{10} \left(\frac{1}{1AE} \right) \right]$$

Durch ausmultiplizieren ergibt sich:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10}(a) + 5 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{1AE} \right)$$

Die Errechnung des Bruchs $\frac{1}{1AE}$ ergibt 1. Und $\log_{10}(1) = 0$. Der hintere Summand entfällt.

Es ergibt sich folgende Formel:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10}(a)$$

Als nächstes wird die Formel nach der absoluten Helligkeit M umgestellt:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10}(a) \quad /+M$$

$$m = (5 \cdot \log_{10}(a)) + M \quad /-(5 \cdot \log_{10}(a))$$

$$M = m - (5 \cdot \log_{10}(a))$$

Um die absolute Helligkeit berechnen zu können, fehlt noch der Abstand a. Dieser setzt sich aus dem Abstand des Beobachters zu (41) Daphne und dem Abstand Asteroid zur Sonne zusammen. Beide Werte können aus Stellarium abgelesen werden.

$$a = 2,777 \text{ AE (Asteroid zu Sonne)} + 1,954 \text{ AE (Beobachter zu Asteroid)} = 4,731 \text{ AE}$$

$$m = 10,5 \text{ mag (siehe 3.2.2)}$$

Jetzt müssen die Werte eingesetzt werden:

$$M = 10,5 \text{ mag} - (5 \cdot \log_{10}(4,731))$$

$$M = 7,12 \text{ mag}$$

Es ergibt sich eine absolute Helligkeit von 7,12 mag.

3.3. Berechnung Durchmesser

Das Center for Near Earth Object Studies (CNEOS) der NASA stellt zur Berechnung des Durchmessers eines Asteroiden in Kilometer folgende Formel zur Verfügung²⁸:

$$d = 10^{(3,1236 - 0,5 \cdot \log_{10}(a) - 0,2 \cdot M)}$$

a ... Albedo

M ... absolute Helligkeit

Für diese Berechnung wird der Albedo des Asteroiden benötigt. Für die Asteroiden des C-Typs und damit auch (41) Daphne (siehe 2.1) ergibt sich ein Albedo von 0,05. Das JPL (Jet Propulsion Laboratory), welches unter anderem für die NASA arbeitet, gibt einen noch genaueren Wert von 0,059 an²⁹.

Die obige Formel nimmt ein kugelförmiges Objekt an. Doch (41) Daphne ist unförmig (siehe 3.1, Abbildung 7). Es wird also der mittlere Durchmesser des Asteroiden berechnet.

Folgende Größen sind nun bekannt:

$$a = 0,059$$

$$M = 7,12 \text{ mag}$$

Eingesetzt in die Formel des Center for Near Earth Object Studies ergibt das:

$$d = 10^{(3,1236 - 0,5 \cdot \log_{10}(0,059) - 0,2 \cdot 7,12 \text{ mag})}$$

$$d = 206 \text{ km}$$

Der berechnete mittlere Durchmesser des Asteroiden beträgt also 206 km. Dieser Wert nähert sich damit sehr stark dem vom JPL berechneten mittleren Durchmesser des Asteroiden von 205,495 km an.

²⁸ https://cneos.jpl.nasa.gov/tools/ast_size_est.html [11.12.2018; 16:46 Uhr]

²⁹ <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=41> [12.10.2018; 14:24 Uhr]

Die Entfernung zweier deutscher Städte soll den Durchmesser des Asteroiden (41) Daphne, veranschaulichen. Dabei entspricht die Luftlinie von Dresden nach Gotha (211 km) in etwa dem mittleren Durchmesser des Asteroiden³⁰.



Dargestellt ist die Luftlinie von Dresden (D) nach Gotha (G).

3.4. Berechnung Masse

Die Massenberechnung erfolgt unter der Annahme, dass der Asteroid eine Kugelform aufweist.

Das Volumen des Asteroiden kann deshalb berechnet werden durch:

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3$$

$$r = \frac{d}{2} \quad r = \frac{206\text{km}}{2} \quad r = 103\text{km} \quad r = 1,03 \cdot 10^7\text{cm}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot (1,03 \cdot 10^7\text{cm})^3$$

$$V = 4,6 \cdot 10^{21} \text{ cm}^3$$

³⁰ Entfernung in Google Maps bestimmt

Um die Masse des Asteroiden zu berechnen, wird zudem seine mittlere Dichte benötigt.

Al Conrad und sein Team veröffentlichten 2008 ihre Dichtemessungen bezüglich (41) Daphne in der American Astronomical Society³¹. Die Wissenschaftler nahmen die Bilddaten mit einer adaptiven Optik am W.-M.-Keck-Observatorium auf Hawaii, sowie mit dem Very Large Telescope in der Atacama-Wüste in Chile, auf. Ihre Arbeit trägt den Titel: "SHAPE AND SIZE OF ASTEROID (41) DAPHNE FROM AO IMAGING". Dabei bestimmten sie eine mittlere Dichte von $1,95 \frac{g}{cm^3}$.

DENSITY COMPARISON		
Asteroid	Density gm/cm³	Reference
121 Hermione	1.1±0.3	Marchis et al. 2005
45 Eugenia	1.2 (+0.6,-0.3)	Merline et al. 1999
90 Antiope	1.3±0.4	Merline et al. 2002
253 Mathilde	1.3±0.2	Veverka et al. 1997
762 Pulcova	1.8±0.8	Merline et al. 2002
41 Daphne	1.95±0.1	Carry et al. 2009 (in preparation)
1 Ceres	2.15±0.1	Carry et al. 2008

Abbildung 9 - Auszug aus: „SHAPE AND SIZE OF ASTEROID (41) DAPHNE FROM AO IMAGING“. Die Angaben, darunter die Dichte des Asteroiden (41)Daphne, sind rot markiert.

Die Masse des Asteroiden errechnet sich, wie folgt:

$$m = V \cdot \rho$$

$$m = 4,6 \cdot 10^{21} \text{ cm}^3 \cdot 1,95 \frac{g}{\text{cm}^3}$$

$$m = 8,97 \cdot 10^{21} \text{ g} \quad m = 8,97 \cdot 10^{18} \text{ kg}$$

Die berechnete Masse beträgt $8,97 \cdot 10^{18} \text{ kg}$.

Damit besitzt (41) Daphne deutlich mehr Masse, als die beiden Marsmonde Phobos ($1 \cdot 10^{16} \text{ kg}$) oder Deimos ($1,8 \cdot 10^{15} \text{ kg}$).

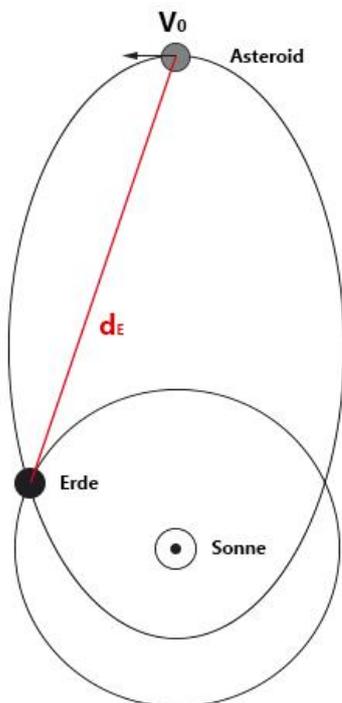
Ein geeigneter Vergleich gelingt mit dem fünft-massereichsten Jupitermond Himalia. Er besitzt mit $6,7 \cdot 10^{18} \text{ kg}$ annähernd so viel Masse wie (41) Daphne.

³¹ <https://web.archive.org/web/20090918181731/http://www2.keck.hawaii.edu/inst/people/conrad/research/pub/dps08oct2008v4b.pdf> [12.10.2018; 17:32]

3.5. Abschätzung freierwerdende kinetische Energie beim theoretischen Erdaufprall

In diesem Kapitel soll die freiwerdende Energie abgeschätzt werden, die beim Einschlag von (41) Daphne auf der Erde, freigesetzt werden würde. Unter Annahme, dass sich der Asteroid in Kollisionskurs mit der Erde befindet, fließt nur noch seine Geschwindigkeit in die Berechnung ein. In meiner Abschätzung ruht die Erde und bewegt sich deshalb nicht. Alle anderen Himmelskörper, wie der Erdmond oder die Sonne werden nicht in die Berechnung einbezogen. Andernfalls wäre die Rechnung als Mehrkörperproblem nicht möglich. Die Rechnung ist deshalb auch nur als Annäherung zu betrachten, da die gravitativen Einflüsse von Mond und Sonne somit nicht berücksichtigt werden, ebenso wenig wie die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne.

Die Grundlage der Abschätzung besteht darin, dass die kinetische- und potentielle Energie des Asteroiden auf seinem Orbit gerade der Energie entspricht, welche beim Aufprall freigesetzt wird. Das lässt sich durch den Energieerhaltungssatz begründen.



Die Abbildung zeigt den Asteroiden auf seiner Umlaufbahn in einer Distanz d_E zur Erde. Der Asteroid besitzt außerdem eine Anfangsgeschwindigkeit v_0 .

Die Gesamtenergie des Asteroiden E , setzt sich aus seiner kinetischen, sowie potentiellen Energie in Bezug zur Erde zusammen. Es gilt:

$$E_{kin_{v_0}} + E_{pot_{d_E}} = E$$

Für die Rechnung werden deshalb zwei Formeln benötigt. Die der kinetischen Energie und die der potentiellen Energie eines Körpers in einem Gravitationsfeld:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_A \cdot v^2$$

$$E_{pot} = -G \cdot \frac{m_A \cdot m_E}{d} \quad G \quad \dots \quad \textit{Gravitationskonstante}$$

m_A ... *Masse Asteroid*

m_E ... *Masse Erde*

d ... *Abstand der beiden Körper*

Somit ergibt sich die Gleichung:

$$\frac{1}{2} m_A \cdot (v_0)^2 - G \cdot \frac{m_A \cdot m_E}{d_E} = E$$

Folgende Werte sind bekannt:

$$m_A = 8,97 \cdot 10^{18} \textit{ kg (siehe 3.4)}$$

$$m_E = 5,975 \cdot 10^{24} \textit{ kg}$$

$$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \frac{\textit{Nm}^2}{\textit{kg}^2}$$

Die Angaben zur Distanz d_E und der Geschwindigkeit v_0 stammen aus Stellarium und gelten für den Zeitpunkt der Aufnahmen am 27.07.2018.

$$d_E = 292\,301\,000 \textit{ km} = 2,92301 \cdot 10^{11} \textit{ m}$$

$$v_0 = 17,820 \frac{\textit{km}}{\textit{s}} = 17820 \frac{\textit{m}}{\textit{s}}$$

Eingesetzt in die oben genannte Formel ergibt sich:

$$\frac{1}{2} \cdot 8,97 \cdot 10^{18} \textit{ kg} \cdot \left(17820 \frac{\textit{m}}{\textit{s}}\right)^2 - 6,672 \cdot 10^{-11} \frac{\textit{Nm}^2}{\textit{kg}^2} \cdot \frac{8,97 \cdot 10^{18} \textit{ kg} \cdot 5,975 \cdot 10^{24} \textit{ kg}}{2,92301 \cdot 10^{11} \textit{ m}} = E$$

$$E = 1,4 \cdot 10^{27} \textit{ J}$$

Diese Energie besitzt der Asteroid vor dem Eintritt in die Erdatmosphäre. Da die Erdatmosphäre Reibung am Asteroiden verursacht, wird ein Teil in thermische Energie umgewandelt. Der Rest wird durch den Aufschlag am Boden freigesetzt und führt letztendlich zur Zerstörung. Deshalb wird die Energie E bei der Kollision in thermische Energie und auch in „Impaktenergie“ umgewandelt.

$$E = E_{th} + E_I$$

Da sich dieses Kapitel nur auf das System Asteroid-Erde bezieht und deshalb nur als Abschätzung betrachtet werden kann, wird auch die in der Atmosphäre freigesetzte Wärme, die thermische Energie, vernachlässigt. Um einen genauen Wert für die auf der Erdoberfläche freigesetzte Energie zu erhalten, müsste man nicht nur alle massereichen Objekte im Sonnensystem einbeziehen, sondern auch die in der Atmosphäre freigesetzte Energie von der Gesamtenergie E subtrahieren.

Eine Berechnung der freiwerdenden thermischen Energie des Asteroiden, beim Durchgang durch die Erdatmosphäre, würde sich sehr aufwendig gestalten. Hierbei muss man beachten, dass der Luftdruck beim Durchgang des Asteroiden durch die Erdatmosphäre, exponentiell zunimmt.

In einer Höhe von 85 Kilometern über dem Erdboden fangen kleine Staubteilchen an zu verglühen. Hier beginnt die Mesosphäre. Treten kleine Gesteinsbrocken in die Mesosphäre ein und leuchten dort hell auf, dann spricht man von einem Meteor oder umgangssprachlich von einer „Sternschnuppe“. (41) Daphne würde ebenfalls in rund 85 Kilometern, also der Mesosphäre, zu glühen beginnen und thermische Energie freisetzen. Doch mit einem mittleren Durchmesser von 206 km (siehe Kapitel 3.3), wäre die Berechnung der unterhalb der Mesosphäre freigesetzten thermischen Energie sehr komplex. Während das eine Ende des Asteroiden die Erdoberfläche berühren würde, würde sich das andere Ende noch weit über der Mesosphäre befinden und noch nicht einmal zu glühen beginnen.

Für die Berechnung der thermischen Energie muss deshalb beachtet werden, dass nicht nur der Luftdruck bei Annäherung an den Erdboden exponentiell zunimmt, sondern sich auch die Reibungsfläche des Asteroiden in der Atmosphäre ständig ändert.

Dass die freiwerdende thermische Energie vernachlässigt werden kann, zeigt eine weitere Abschätzung. Dabei wird eine konstante Atmosphärendichte angenommen. Für die Abschätzung wird die größte Luftdichte, nämlich die am Boden verwendet.

Die Abschätzung erfolgt außerdem unter der Bedingung, dass die Reibungsfläche des Asteroiden an der Atmosphäre konstant ist. Die Reibungsfläche entspricht der maximalen Querschnittsfläche. Die tatsächlich abgebende thermische Energie müsste deshalb kleiner sein als das Ergebnis meiner Abschätzung.

Die umströmte Querschnittsfläche des Asteroiden lässt sich berechnen durch:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad r = \frac{d}{2} = \frac{206km}{2} = 103km = 103\,000m$$

$$A = \pi \cdot (103\,000m)^2 = 3,3 \cdot 10^{10}m^2$$

Für die Luftwiderstandskraft gilt:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot \rho \cdot v_0^2 \quad c_W \dots \text{Luftwiderstandsbeiwert}$$

A ... umströmte Querschnittsfläche

ρ ... Dichte der Luft

v_0 ... Geschwindigkeit

Bekannte Werte sind:

$$c_W = 0,45 \quad (\text{Widerstandsbeiwert einer Kugel})$$

$$A = 3,3 \cdot 10^{10}m^2$$

$$\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3} \quad (\text{Luftdichte am Boden})$$

$$v_0 = 17820 \frac{m}{s}$$

Eingesetzt in die Formel für die Luftwiderstandskraft ergibt sich:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot 0,45 \cdot (3,3 \cdot 10^{10}m^2) \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(17820 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$F_L = 2,8 \cdot 10^{18}N$$

Die freigesetzte thermische Energie ist das Produkt aus der Luftwiderstandskraft und dem zurückgelegtem Weg durch die Atmosphäre:

$$E_{th} = F_L \cdot s$$

$$E_{th} = 2,8 \cdot 10^{18} N \cdot 85\,000 m$$

$$E_{th} = 2,38 \cdot 10^{23} J$$

Die freiwerdende thermische Energie macht somit weniger als 0,017 Prozent an der Gesamtenergie E aus:

$$2,38 \cdot 10^{23} J \ll 1,4 \cdot 10^{27} J$$

Deshalb ist die thermische Energie vernachlässigbar.

Da in der Abschätzung die Reibung der Erdatmosphäre vernachlässigt wurde, erhalte ich einen Wert von $1,4 \cdot 10^{27} J$. Das ist die Energie, die bei der Kollision von (41) Daphne mit der Erde freigesetzt werden würde und $3,3 \cdot 10^{14}$ Kilotonnen TNT entspricht. Zum Vergleich: die Atombombe von Hiroshima hatte eine Sprengkraft von 15 Kilotonnen TNT. Die größte jemals getestete Wasserstoffbombe hingegen hatte eine Sprengkraft von 50 000 Kilotonnen TNT.

3.6. Risikoanalyse

Risikoanalyse der NASA in Bezug auf Asteroideneinschläge

Im Folgenden wird Bezug genommen auf den Report des „NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop“³². In der am 25. Januar 1992 stattfindenden Konferenz erörterte ein internationales Team, welche Möglichkeiten es gibt, Kleinkörper schneller zu identifizieren. Dabei legte die NASA besonderes Augenmerk auf Asteroiden mit einem Durchmesser von ein bis zwei Kilometern. Diese Asteroiden sind groß genug, um nicht in der Atmosphäre zu verglühen, aber dennoch klein genug, um von den meisten Teleskopen unentdeckt zu bleiben. Außerdem wiesen Asteroiden, welche in der Vergangenheit die Erdbahn kreuzten, auch einen ähnlichen Durchmesser auf.

Im Workshop unterteilten die Teilnehmer die Asteroiden in drei Kategorien:

Kategorie 1: Asteroiden mit einem Durchmesser von 10-100 m

Asteroiden mit einem geringeren Durchmesser als 10 m verlieren ihre komplette Energie in der Atmosphäre. Als Meteor treten sie als Leuchterscheinung in der Atmosphäre hervor, erreichen aber den Boden nicht.

Asteroiden mit einem größeren Durchmesser (ab 10 m) können die Erde erreichen, wenn sie viel Eisen mit sich führen. Dann kann ein 10 m Asteroid, welcher die Erdatmosphäre mit einer typischen Geschwindigkeit von $20 \frac{km}{s}$ durchquert, eine Sprengkraft von 50 bis 100 Kilotonnen TNT entwickeln. Diese Sprengkraft entspricht etwa drei bis sechs Hiroshima Atombomben.

Steinige Asteroiden mit einem Durchmesser von 10 m zerfallen in der Atmosphäre zu Fragmenten. Die dabei entstehende Schockwelle hört man noch in einer Entfernung von bis zu 600 km.

Kategorie 2: Asteroiden mit einem Durchmesser von 100 m bis zu 1 km

Metallreiche Asteroiden mit einem Durchmesser größer 100 m erreichen die Erdoberfläche und hinterlassen dort große Krater. Trifft beispielsweise ein 150 m großer Asteroid die Erde, dann entsteht ein zwei Kilometer großer Krater. Solch ein Ereignis wiederholt sich etwa alle 5000 Jahre.

³² <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19920025001.pdf> [15.10.2018; 20:05Uhr] "The Spaceguard Survey: Report of the NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop", 1992

Kreuzt ein 1 km großer Asteroid die Erde, dann könnten ganze Länder vernichtet werden. Gebäude würden durch die Schockwelle zerstört und es würde in dicht besiedelten Ländern Millionen Tote geben.

Kategorie 3: Asteroiden mit einem Durchmesser von 1-5 km

Ab dieser Größenordnung von Asteroiden, so die Wissenschaftler des Workshops, würde ein Einschlag katastrophale Folgen haben. Verallgemeinert nimmt das internationale Team an, dass die Kratergröße eines Einschlags, etwa dem 10 bis 15-fachen des Durchmessers des Asteroiden entspricht. Das heißt, trifft ein 1 Kilometer großer Asteroid die Erde, dann entsteht ein 10 Kilometer großer Krater. Solche Krater formen sich aufgrund eines Asteroideneinschlag alle 300 000 Jahre.

Bei Einschlagskörpern mit einem Durchmesser knapp über einem Kilometer ist die größte Gefahr, dass beim Aufprall Unmengen an Staub in die Stratosphäre geschleudert werden. Dieser Staubschleier hätte massive globale Auswirkungen. Die Weltbevölkerung würde mit großen Ernteaussfällen kämpfen und in Folge dessen würde ein Massensterben durch Hungersnot einsetzen.

Ein Asteroid mit mehreren Kilometern Durchmesser würde eine extreme Explosion hervorrufen und teilweise beim Einschlag verdampfen. Ein Feuersturm, so groß wie ein Kontinent, würde Tiere und Pflanzen verglühen lassen.

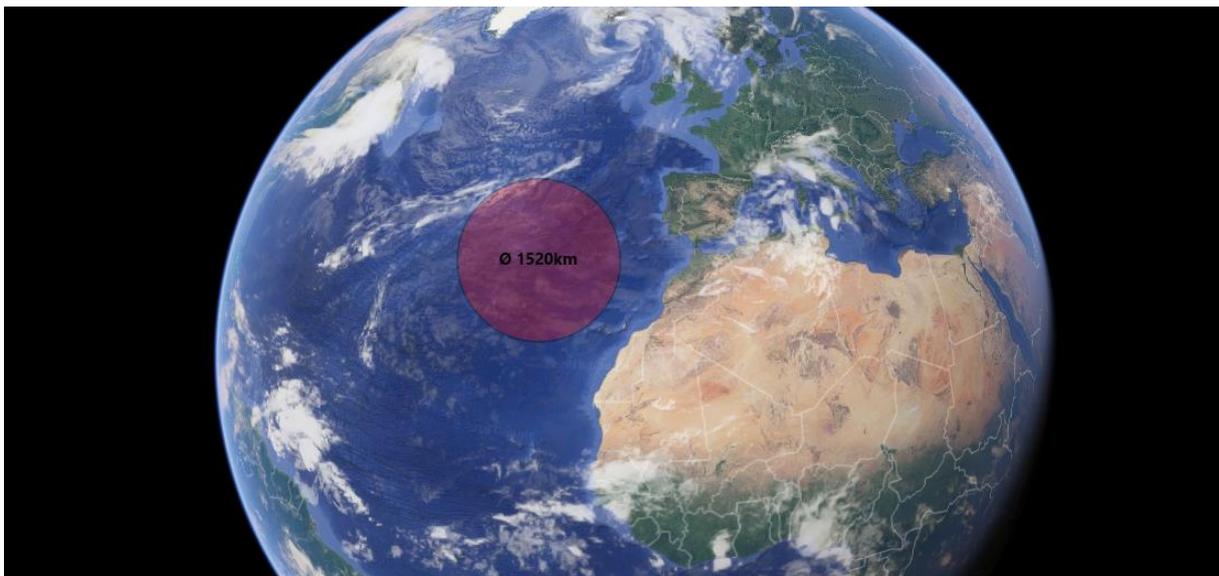
Der beim Aufprall weggeschleuderte Staub würde den Tag über Monate hinweg verdunkeln. Pflanzen könnten keine Fotosynthese mehr betreiben. Bei dieser Tagesdunkelheit würden die Temperaturen um 10 Kelvin abfallen. Außerdem würde Salpetersäure im Feuerball des Einschlagkörpers, durch die in der Atmosphäre vorhandenen Stickstoffmengen produziert werden. Fällt Salpetersäure nieder, würden ganze Seen versauern, ebenso Bäche, Böden und die oberen Wassermassen der Weltmeere.

Dass ein Asteroid einige lebenden Spezies der Flora und Fauna auslöschen kann, zeigt der Asteroideneinschlag von vor 65 Millionen Jahren. Er stellt den Übergang von der Kreidezeit zum Paläogen dar und wird mit dem Aussterben der Dinosaurier verbunden. Dieses Ereignis soll laut den Forschern des Near-Earth-Object Detection Workshop eine Sprengkraft von 100 Millionen Megatonnen TNT entwickelt haben. Die Einschlaghäufigkeit eines solchen etwa 15 Kilometer großen Asteroiden, wird auf alle 1 Million bis 30 Millionen Jahre geschätzt.

Risikoanalyse in Bezug auf den Asteroiden (41) Daphne

Robert Marcus³³, ein Student des "Department of Astronomie" der Harvard Universität, H. Jay Melosh³⁴, ein Physiker und Geophysiker, sowie Gareth Collins³⁵, ein Professor des Imperial College London, schrieben ein Computerprogramm, welches die Auswirkung von Asteroideneinschlägen berechnet³⁶. Dazu werden Parameter wie Größe, Dichte und Geschwindigkeit eines Asteroiden benötigt. Mir sind alle Werte bezüglich (41) Daphne bekannt. Da 70% der Erde vom Meer bedeckt sind, lasse ich (41) Daphne auch im Meer einschlagen, genauer gesagt im Nordatlantik. Das „Earth Impact Effects Program“ benötigt für einen Wasserimpakt die Angabe zur Meerestiefe. Für den Atlantik sind das 3860 m³⁷. Der Einschlagswinkel in meiner Simulation beträgt 90°. Das Programm gibt nun die errechneten Daten aus.

Der Durchmesser, des auf dem Meeresboden dauerhaft geformten Kraters würde 1520 km betragen (siehe rot markierter Kreis³⁸). Es wird eine Kratertiefe von 2,69 km errechnet.



Beim Aufprall würden Unmengen von Wassermassen verdrängt. Wenn das Wasser zurück in den nun entstandenen Krater fließt, entstehen Tsunamis. Mithilfe des Programms lassen sich die Amplituden der Tsunamiwellen in unterschiedlichen Entfernungen bestimmen. Schlägt (41) Daphne im Zentrum des rot markierten Kreis ein, können so Aussagen zu den Tsunamiwellen an unterschiedlichen Küsten getroffen werden. Auf die Westküste Portugals würde 3,6 h nach dem Impakt eine bis zu 1,7 km große Tsunamiwelle treffen.

³³ <https://www.cfa.harvard.edu/~rmarcus/index.html> [16.10.2018; 15:08Uhr]

³⁴ <http://www.eaps.purdue.edu/people/faculty-pages/melosh.html> [16.10.2018; 15:08Uhr]

³⁵ <http://www.imperial.ac.uk/people/g.collins> [16.10.2018; 15:08Uhr]

³⁶ Simulationsprogramm: <https://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEarth/ImpactEffects/> [16.10.2018; 15:24Uhr]

³⁷ <http://www.natur-lexikon.de/meere1.htm> [16.10.2018; 20:10Uhr]

³⁸ Vermessung erfolgte in Google Maps

Fünf Stunden nach dem Impakt würde sich eine immer noch bis zu 1,2 km hohe Tsunamiwelle vor der Nordost-Küste Südamerikas auftürmen. 7000 km vom Aufschlagsort des Asteroiden entfernt, hätte die Tsunamiwelle immer noch eine Höhe von 600 m. Somit würden selbst die Küsten Nordrusslands überschwemmt werden.

Der Asteroideneinschlag würde als sehr helle Leuchterscheinung zu beobachten sein. Der Feuerball wäre 18-mal heller als die Sonne. Beim Einschlag würde außerdem sehr viel Hitze freigesetzt. Schlägt der Asteroid im Zentrum des Kreises ein, dann könnte im rund 5000 km entfernten Warschau Glas schmelzen. Die Bevölkerung würde tödliche Verbrennungen erleiden.

Durch den Einschlag entsteht weltweit ein Erdbeben der Stärke 12,3 auf der Richterskala. Ein solch hoher Wert wurde noch nie registriert. Die Folgen für unsere Erde und die Menschheit können deshalb nur abgeschätzt werden. Sicher ist, dass das Erdbeben zu einer globalen Katastrophe führen würde. Selbst Häuser im Umkreis von einigen tausend Kilometern zum Impaktort, könnten den Erschütterungen nicht standhalten. Eine vollständige globale Verwüstung wäre anzunehmen.

Durch den Aufprall entsteht außerdem eine Druckwelle. Dadurch können Autobahnbrücken einstürzen, PKW's umkippen und Glasfenster zerspringen. 90% der Bäume könnten der Druckwelle nicht standhalten. Die Druckwelle würde globale Auswirkungen haben. So würden auf der ganzen Welt mehrstöckige Gebäude einstürzen. Eine große Gefahr geht auch von Winden aus, die sich aus der Druckwelle heraus, entwickeln könnten.

Weil (41) Daphne 13-mal größer ist als der Asteroid, welcher die Dinosaurier auslöschte, ist davon auszugehen, dass ein Impakt durch (41) Daphne das Ende der Menschheit bedeuten würde.

(41) Daphne ist ein Asteroid der Amor Gruppe. Das heißt, er kreuzt unsere Erdbahn nicht. Ein direkter Zusammenstoß mit der Erde ist deshalb extrem unwahrscheinlich.

Es ist dennoch möglich, dass (41) Daphne durch gravitative Wechselwirkungen von seinem Orbit minimal abweicht und mit einem anderen Kleinkörper kollidiert. (41) Daphne steht in einer 9:22 Bahnresonanz zum Mars. Seine Umlaufbahn wird über die Zeit gestört und ist nicht eindeutig vorhersagbar. Dies geht aus der Arbeit „Resonances and chaos in the asteroid belt“ von Miloš Šidlichovský hervor³⁹. Theoretisch wäre es möglich, dass (41) Daphne mit einem anderen Asteroiden des Hauptgürtels kollidiert.

³⁹ „Resonances and chaos in the asteroid belt“ von Miloš Šidlichovský
Weblink: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1999esra.conf..297S>

Schon Trümmerteile von (41) Daphne würden ausreichen, um bei einer Kollision mit der Erde, für die globale Verwüstung zu sorgen.

Dass Splitterteile von Asteroiden eine große Gefahr darstellen, zeigt der Meteor von Tscheljabinsk. Dieser war das Produkt einer kosmischen Kollision zweier Asteroiden. Der Mutterasteroid des Tscheljabinsk-Meteoriten ist demnach mit einer Geschwindigkeit von 1400 bis 5400 Kilometer pro Stunde mit einem anderen rund 150 m großen Asteroiden zusammengestoßen. Das ergab die Analyse unzähliger Splitterfragmente. Ein 20 Meter großes Bruchstück trat am 15. Februar 2013 über der russischen Millionenstadt Tscheljabinsk in die Erdatmosphäre ein und explodierte in einer Höhe von 30 Kilometern über dem Erdboden. Der Asteroid setzte damals eine Energie von 500 bis 600 Kilotonnen TNT frei.



Abbildung 10 – Aufnahme der entstandenen Rauchwolke eine Minute nach dem Eintritt des Meteors in die Erdatmosphäre. Das Bild von Alex Alishevskikh entstand 200 Kilometer von Tscheljabinsk entfernt.

Die Druckwelle beschädigte 7000 Häuser rund um den Ural. Durch zersplitterte Fensterscheiben wurden ca. 1500 Menschen verletzt⁴⁰.

Würde (41) Daphne auf seiner instabilen Umlaufbahn mit einem anderen Asteroiden kollidieren, dann könnten Bruchstücke der Kollision die Erde durchaus treffen und Schaden anrichten.

⁴⁰ <http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/meteorit-von-tscheljabinsk-ueber-russland-bei-kollision-entstanden-a-971003.html> [17.10.2018; 12:41Uhr]

4. Abwehrmaßnahmen

Rast ein Asteroid auf die Erde zu, dann gibt es laut ESA zwei Möglichkeiten einen Einschlag zu verhindern. Entweder man zerstört den Asteroiden oder lenkt ihn von seiner Flugbahn ab. Die Europäische Raumfahrtorganisation bevorzugt Letzteres. Durch Zerstören von Asteroiden, z.B. mit Bomben, entstehen viele kleine Bruchfragmente, deren Bahnen nicht vorhergesagt werden können. Als Alternative zu Bomben, könnte der Asteroid mithilfe von Impaktoren zerstört werden. Impaktoren sind unzählige kleine Einschlagskörper. Allerdings würden sich ebenfalls Probleme mit Bruchstücken ergeben.

Deshalb wäre eine Bahnablenkung sinnvoller. Auch dafür wurden schon jetzt unterschiedliche Konzepte entwickelt, zum Beispiel das Anbringen von Raketen- oder Nukleartriebwerken am Asteroiden. Ebenso könnte man stark gebündeltes Licht mit Sonnenspiegeln auf Asteroiden richten und Teile des Asteroiden verdampfen lassen. Das ausströmende Gas würde die Bahn des Asteroiden verändern. Auch mit den oben genannten Impaktoren, könnte man die Bahn eines Asteroiden beeinflussen. Dafür muss die Kraft der Geschosse in dem Maße reduziert werden, dass der Asteroid nur abgelenkt aber nicht zerstört wird. Diese Methode ist heute schon technisch umsetzbar und die ESA verfolgt diesen Ansatz weiter.⁴¹

Es gibt schon für 2020 eine konkret geplante Mission mit dem Ziel, die Bahnablenkung eines Asteroiden durch einen Impaktor zu untersuchen. Ursprünglich sollte die „Asteroid Impact & Deflection Assessment“ Mission, kurz AIDA, Aufschluss über die Bahnablenkung eines Asteroiden durch den Beschuss mit einer Sonde geben. Bei dieser Mission kooperierten NASA und ESA. Die Mission bestand aus 2 Sonden, der amerikanischen Sonde „DART“ (Double Asteroid Redirection Test) und der europäischen Sonde „AIM“ (Asteroid Impact Mission). Im Jahr 2016 bewilligte der ESA-Ministerrat keine Gelder für die Mission „AIM“, sodass die ESA aus dem Programm aussteigen musste⁴². Die NASA hält mit „DART“ weiter an ihrer Mission fest.

Ursprünglich sollte die ESA-Raumsonde „AIM“ 2020 zum Didymos-Asteroidensystem, einem Doppelasteroidensystem, starten und dieses im Jahr 2022 erreichen.

⁴¹ http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Noch_Zukunft_Die_Asteroidenabwehr [17.10.2018; 22:20Uhr]

⁴² <https://spacenews.com/nasa-presses-ahead-with-asteroid-mission-despite-esa-funding-decision/> [17.10.2018; 22:13Uhr]

Das Doppelasteroidensystem besteht aus dem Didymos-Asteroiden mit einem Durchmesser von 800 Metern und seinem kleineren Trabanten mit einem Durchmesser von 150 Metern. Der Trabant, umgangssprachlich als „Didymoon“ bezeichnet, umkreist den größeren Didymos-Asteroiden.

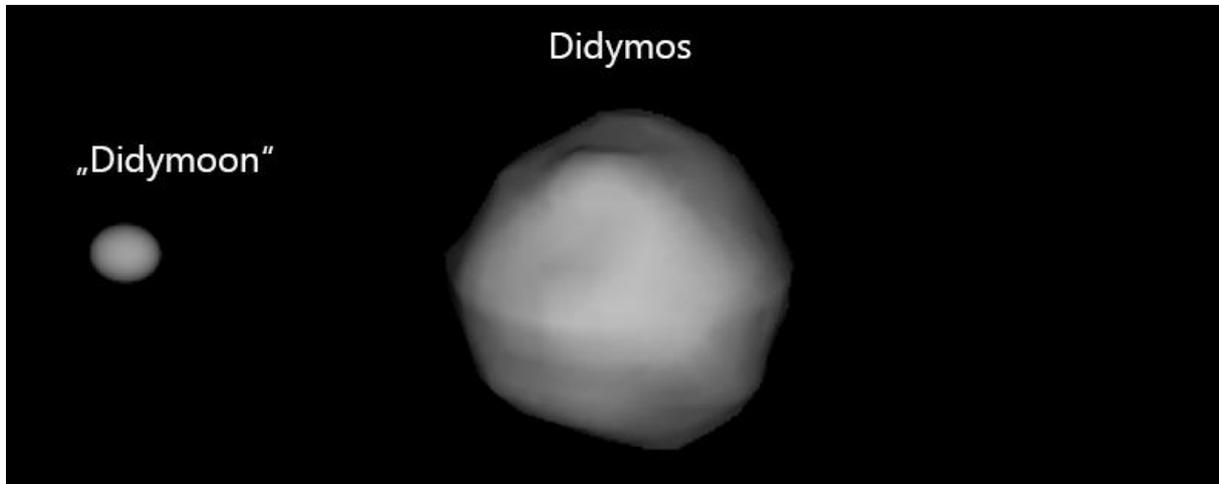


Abbildung 11 – Die Abbildung zeigt eine Simulation des Didymos-Asteroidensystem aus fotometrischen Lichtkurven sowie Radardaten. In der Bildmitte befindet sich der Didymos-Asteroid, links von diesem der „Didymoon“. Der „Didymoon“ umrundet Didymos in einem Abstand von einem Kilometer alle 11,9 Stunden.

Die Sonde „AIM“ sollte vorrangig „Didymoon“ kartographieren, sowie Daten zu seinem Aufbau und seiner Umlaufbahn um den Didymos-Asteroiden sammeln. Nachdem alle Daten gesammelt wurden, war die Ankunft der NASA Sonde „DART“ geplant.

DART sollte vier Monate nach der Ankunft von „AIM“ in den „Didymoon“ einschlagen. Um den „Didymoon“-Asteroiden mit einer Geschwindigkeit von sechs Kilometern pro Sekunde zu treffen, plant die NASA den Einsatz einer autonomen Navigationssoftware, basierend auf einer Onboard-Kamera. Bei einer Kollision von „DART“ und „Didymoon“ würden sich die Geschwindigkeit, sowie die Umlaufbahn des Asteroiden ändern. Ursprünglich sollte „AIM“ die Bahnabweichung des „Didymoon“ nach dem Impakt von „DART“ vermessen. Die Daten sollten Aufschluss darüber geben, ob und auch größere potentiell gefährliche Asteroiden soweit abgelenkt werden können, dass diese nicht auf der Erde einschlagen.⁴³

Die Bahnänderung des „Didymoon“ durch den Impakt von „DART“ könnte auch von der Erde aus im Jahr 2022 mit Teleskopen vermessen werden. Deshalb plant die NASA, trotz des Ausstiegs der europäischen Sonde „AIM“, ihre Mission durchzuführen. Die geplante Mission wird zeigen, ob man der Asteroidenabwehr durch Impaktoren weiter nachgehen sollte.

⁴³ <https://www.nasa.gov/planetarydefense/dart> [17.10.2018; 22:38Uhr]

5. Schlussgedanke

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass das Thema rund um Asteroiden sehr komplex ist.

Asteroiden bestehen aus den unterschiedlichsten Stoffen, vor allem aber aus Metallen, Kohlenstoff und Silikaten. Rund 75 Prozent der unförmigen Objekte findet man im Hauptgürtel, doch die Klassifizierung nach den Umlaufbahnen hat gezeigt, dass sich Asteroiden im ganzen Sonnensystem bewegen. Dabei muss besonders auf die Asteroiden der Apollo- und Aten-Gruppe geachtet werden, denn diese kreuzen die Erdbahn und stellen deshalb ein erhöhtes Risiko dar.

Asteroiden sind wissenschaftlich interessante Himmelskörper. Sie entstanden aus der protoplanetaren Scheibe und sind die Vorläufer unserer Planeten. Die chemische Zusammensetzung der Asteroiden entspricht deshalb der chemischen Zusammensetzung des Planetensystems zur Entstehungszeit.

Im praktischen Teil der Arbeit wurde ein Asteroid hinsichtlich seiner Helligkeit untersucht. Die größte Herausforderung war, einen geeigneten Asteroiden zu finden und zu fotografieren. Es wurden drei Versuche benötigt. (4) Vesta war zu hell. Astrometrica, ein Computerprogramm, konnte die Helligkeit des Asteroiden nicht bestimmen. (213) Lilaea, ein zweiter Asteroid, war nicht auf dem fotografierten Bildausschnitt zu sehen. Nachdem ich beim dritten Versuch an (41) Daphne die Live-Bilder mit einer Sternenkarte verglichen hatte, konnte ich den Asteroiden fotografieren und seine Helligkeit in Astrometrica auslesen. Aus der ermittelten scheinbaren Helligkeit lässt sich eine absolute Helligkeit errechnen. Mit der absoluten Helligkeit ist es möglich, den mittleren Durchmesser, sowie die Masse von (41) Daphne zu bestimmen. Diese Werte werden benötigt, um die Energie abzuschätzen, welche freigesetzt werden würde, wenn Erde und (41) Daphne kollidieren. In der Risikoanalyse wird klar, dass der Impakt von (41) Daphne auf die Erde zur globalen Verwüstung führen würde. (41) Daphne hätte deutlich mehr Zerstörungskraft als der Asteroid, welcher vor 65 Millionen Jahren die Dinosaurier ausgelöscht hat. (41) Daphne ist dem Amor-Typ zuzuordnen und kreuzt unsere Erdbahn grundsätzlich nicht. Der Asteroid steht aber in einer Bahnresonanz mit dem Planeten Mars. Die Umlaufbahn von (41) Daphne ist deshalb nicht stabil und er könnte mit einem anderen Asteroiden kollidieren. Dabei können Bruchstücke entstehen, welche ebenfalls eine große Gefahr für unsere Erde darstellen (siehe Meteor von Tscheljabinsk).

Abschließend wurde auf die Abwehrmaßnahmen eingegangen. Es stellt sich heraus, dass die gezielte Zerstörung eines Asteroiden unweigerlich Bruchstücke verursacht. Eine Bahnablenkung ist deshalb sinnvoller. Inwiefern ein Asteroid durch einen Impaktor abgelenkt werden kann, wird in Zukunft mit der NASA Sonde „DART“ untersucht. Die Sonde wird dabei auf einem kleinen Asteroiden namens „Didymoon“ einschlagen und ihn so von seiner Bahn ablenken.

Einen Asteroiden zu fotografieren, erwies sich für mich als große Herausforderung. Asteroiden sind kleine und lichtschwache Objekte und somit nur schwer vom scheinbaren Sternenhintergrund zu trennen.

Meine Überlegungen zur freiwerdenden kinetischen Energie beim Zusammenstoß des Asteroiden mit der Erde führten zu der Erkenntnis, dass lediglich eine Abschätzung rechnerisch möglich ist.

Beim Schreiben der Facharbeit war zu beachten, dass Fakten nur Originalquellen entnommen werden (z.B. NASA, ESA, DLR, MPC, JPL). Die Angaben anderer Webseiten sind oftmals veraltet. Da täglich neue Asteroiden entdeckt werden, halten nur offizielle Institutionen ihre Daten vollständig und aktuell.

Die Facharbeit hat gezeigt, dass viele Informationen aus der Helligkeitsmessung eines Asteroiden abgeleitet werden können. Im Laufe der Arbeit ist mir bewusster geworden, welche Auswirkungen ein Asteroideneinschlag für die Erde haben kann. In meinem Hobby, der Astrofotografie, werde ich mich zukünftig erneut der Herausforderung stellen, einen Asteroiden zu fotografieren.

6. Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorgelegte Facharbeit ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Ich bestätige ausdrücklich, dass Zitate und Quellenangaben mit größter Sorgfalt und Redlichkeit in der vorgeschriebenen Art und Weise kenntlich gemacht sind.

Bannewitz, den 21.12.2018

A handwritten signature in blue ink that reads "Tim Lauenstein". The signature is written in a cursive style with a large initial 'T'.

Tim Lauenstein

Glossar

AE

AE steht für „Astronomische Einheit“. Eine „Astronomische Einheit“ entspricht ungefähr dem mittleren Abstand zwischen der Erde und der Sonne.

$$1 \text{ AE} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Akkretion

Akkretion bezeichnet den Prozess, bei dem Materie von einem kosmischen Objekt aufgesammelt wird.

Aphel

Das Aphel beschreibt den fernsten Punkt auf einer Umlaufbahn um die Sonne.

DeepSkyStacker

DeepSkyStacker ist ein Computerprogramm zum übereinanderlegen mehrerer Einzelaufnahmen. Dabei wird das Bildrauschen im Summenbild reduziert. Es kommen somit mehr Details zum Vorschein

Fotometrische Lichtkurve

Ein Fotometer wird für Helligkeitsmessungen verwendet. Man erhält eine Lichtkurve welche die Stärke der Strahlung über einen Wellenlängenbereich darstellt. Aus der Lichtkurve lassen sich physikalische Eigenschaften des untersuchten Objekts bestimmen.

Große Halbachse

Die große Halbachse einer Ellipse ist die Hälfte ihres längsten Durchmessers.

Hauptgürtel

Bezeichnet einen Bereich im Sonnensystem zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter, in welchem sich ca. 75% aller bekannten Asteroiden befinden.

Inneres Sonnensystem

Zum inneren Sonnensystem zählt man: Sonne, Merkur, Venus, Erde und Mars.

Metadaten

Metadaten sind Daten, welche die eigentliche Datei beschreiben. Für astronomische Bilder sind das Informationen zu Belichtungszeit, Kamera und Aufnahmezeitpunkt.

Peltierkühlung

Peltier-Elemente erzeugen beim Stromfluss eine Temperaturdifferenz, die zum Kühlen verwendet werden kann. Heute findet man in allen professionellen Astronomie-Kameras, Peltier-Elemente, um Bildrauschen zu vermeiden.

Perihel

Das Perihel beschreibt den nächsten Punkt auf einer Umlaufbahn um die Sonne.

Stellarium

Stellarium ist ein Computerprogramm zur Simulation des Sternenhimmels.

Van-der-Waals-Kräfte

Van-der-Waals-Kräfte sind zwischenmolekulare Kräfte, die zwischen Atomen bzw. Molekülen auftreten.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1

https://ssd.jpl.nasa.gov/?histo_a_ast

[27.10.2018; 18:10Uhr]

Abbildung 2,3,4,5

https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html (Center for Near Earth Object Studies)

[02.09.2018; 18:00 Uhr]

Abbildung 6

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2009/05/2_L1_bis_L5_im_System_Sonne_-_Erde

[05.09.2018; 16:14 Uhr]

Abbildung 7

<https://www.lpi.usra.edu/meetings/acm2008/pdf/8370.pdf>

[13.09.2018; 11:10 Uhr]

Abbildung 8

<http://neo.ssa.esa.int/search-for-asteroids?sum=1&des=41%20Daphne>

[17.10.2018; 20:09Uhr]

Abbildung 9

<https://web.archive.org/web/20090918181731/http://www2.keck.hawaii.edu/inst/people/conrad/research/pub/dps08oct2008v4b.pdf>

Aus: "SHAPE AND SIZE OF ASTEROID (41) DAPHNE FROM AO IMAGING", 2008

[12.10.2018; 17:45Uhr]

Abbildung 10

http://photos.cyberborean.org/main.php?g2_itemId=6432

[17.10.2018; 19:35Uhr]

Abbildung 11

https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/screen_shot_2017-06-30_at_12.03.56_pm.png

[14.12.2018; 23:00Uhr]