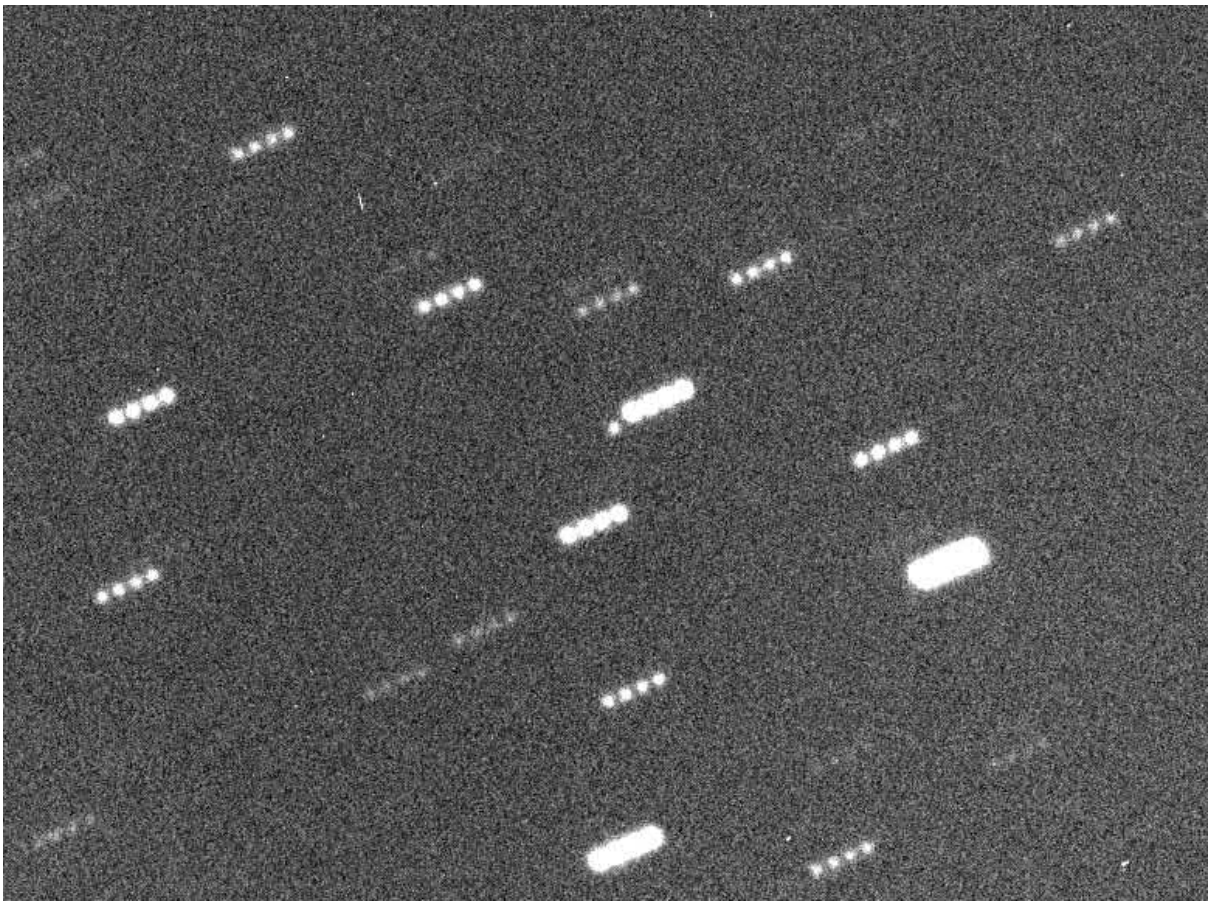
Die Berechnung der Bahn erdnaher Asteroiden anhand eigener Messungen



Ian Phillip von Scheven
Gymnasium am Kothen
Jahrgangsstufe Q1

Eine Projektarbeit im Rahmen des Projektkurses Astronomie 2020/21
am Schülerlabor Astronomie des
CFG Wuppertal
Kursleitung: Bernd Koch
Abgabetermin: 16.05.2021

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **2**

2. Aufgabenstellung und Zielsetzung **3**

3. Theoretische Grundlagen zum Thema **3**

3.1 Asteroiden 3

3.2 NEAs 5

I. Amors 6

II. Apollos 6

III. Atens 6

IV. Atiras 6

V. Potentially Hazardous Asteroids 7

3.3 Die Bahnberechnung eines Asteroiden 7

3.4 Die Gefahren der NEAs 9

4. Ausrüstung **10**

4.1 Ausstattung der Sternwarten 10

4.2 Software 11

4.3 Websites 11

5. Beobachtung der Asteroiden **12**

5.1 Beobachtungsabend 1 12

I. (535844) 14

II. (99942) Apophis 17

5.2 Beobachtungsabend 2 17

I. (535844) 18

II. (99942) Apophis 18

5.3 Beobachtungsabend 3 18

I. (535844) 19

II. (99942) Apophis 19

6. Auswertung der Aufnahmen **19**

6.1 Die Kalibrierung der Aufnahmen 19

I. Rauschen und defekte Pixel 20

II. Vignettierung und Staub 20

III. Durchführung der Kalibrierung 21

6.2 Astrometrische Auswertung der Aufnahmen 21

I. Einstellungen 21

a) Observing Site 22

b) CCD 22
c) Program 23
d) Environment 23
II. Auswertung der Daten vom Beobachtungsabend 2021-02-20 24
III. Auswertung der Daten vom Beobachtungsabend 2021-02-21 31
6.3 Berechnung der Bahnelemente und Zusätzliches 36
I. Berechnung der Bahnelemente von (535844) 36
II. Berechnung der Bahnelemente von (99942) Apophis 39
III. Zusätzliches 39
a) Berechnung der Sprengkraft von (99942) Apophis 39
b) Kategorisierung von Apophis und (535844) 40

7. Bewertung der Ergebnisse 43

8. Anhang 45
8.1 Literaturverzeichnis 45
8.2 Abbildungsverzeichnis 46
8.3 Softwareverzeichnis 48
8.4 Danksagung 49
8.5 Abschlusserklärung 49

1. Einleitung

Schon seit ich denken kann habe ich mich für das Weltall interessiert, und als Kind schon außerschulisch Kurse besucht, die mir unsere nähere Umgebung im selben näher gebracht haben. Als ich also davon erfuhr, dass ich die Möglichkeit hätte, einen Projektkurs zum Thema Astronomie zu besuchen, und dort eine Projektarbeit zum Thema zu verfassen, konnte ich natürlich nicht nein sagen. Nachdem ich diesen Kurs dann eine Weile besucht hatte, musste ich mich für das Thema dieser Projektarbeit entscheiden. Viele denken wenn sie das Wort Astronomie hören wahrscheinlich an schöne Planeten, Monde, gigantische Galaxien, Nebel und Sternhaufen. Mir war es allerdings wichtig, dass meine Projektarbeit sich mit einem Thema beschäftigt, welches die Menschheit, und somit auch mich, direkt betrifft. Selbstverständlich ist die Astrofotografie sehr schön und das Forschen an entfernten Nebeln, Sternen und Galaxien extrem interessant, aber mir kam da etwas anderes in den Sinn: Eine der potenziell größten Bedrohungen für die Menschheit, die unser Sonnensystem zu bieten hat. Asteroiden. Sie haben bereits das Ende eines Zeitalters der Erde hervorgerufen, und wenn ein Asteroid von vergleichbarer Größe wie der des damaligen heute mit der Erde kollidieren würde, hätte dies womöglich ähnlich schwerwiegende Konsequenzen. Jetzt blieb es also nur noch, sich auszusuchen, um was genau zum Thema Asteroiden es in meiner Facharbeit gehen sollte. Da die Gefahr eines Zusammenstoßes real

ist, habe ich viel darüber nachgedacht, wie man einen solchen wohl verhindern könnte, und dabei tat sich mir eine Frage auf: Woher weiß man überhaupt, wann, wo und ob ein Asteroid mit der Erde kollidiert? Ich habe mich etwas über das Thema informiert, und so konnte ich mich darauf beschränken, mich mit den Near Earth Asteroids (NEAs), also den erdnahen Asteroiden auseinanderzusetzen, da diese die wahrscheinlichsten Kandidaten für einen Zusammenstoß sind. Ich habe mich also entschlossen, mich mit den Gefahren der NEAs und der Berechnung ihrer Bahn um die Sonne zu beschäftigen, weil man so herausfinden kann, ob, wann und wo ein Asteroid die Erde trifft. Diese Aufgabenstellung bietet außerdem für mich persönlich noch den Mehrwert, dass ich mich auch nach dieser Projektarbeit weiter mit dem Thema NEAs beschäftigen kann, da mein Wissen über sie erweitert und die Frage, wie man einen Zusammenstoß voraussehen kann, beantwortet wird.

2. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Aufgabenstellung von dieser Projektarbeit ist es, Aufnahmen eines NEAs mit einem Teleskop zu machen. Anschließend sollen dann mithilfe der Aufnahmen Positionen des Asteroiden vermessen werden. Danach soll mit den Positionen des Asteroiden seine Bahn berechnet werden. Der Sinn dahinter ist, dass dabei überprüft wird, ob sich der NEA potentiell auf einem Kollisionskurs mit der Erde befindet. Am Ende soll noch die Genauigkeit der Messungen bewertet werden, indem die eigenen Ergebnisse mit denen von anderen Observatorien verglichen werden. Zusätzlich sollen die Messergebnisse beim Minor Planet Center eingereicht werden. Als Ziele dieses Vorgangs wurden der NEA (535844) und der Potentially Hazardous Asteroid (PHA), also der potentiell gefährliche Asteroid (99942) Apophis ausgewählt, da sich ihre Beobachtung im geplanten Zeitraum des experimentellen Teils anbat.

3. Theoretische Grundlagen zum Thema

3.1 Asteroiden

Ceres, das erste Objekt, welches als Asteroid klassifiziert wurde, wurde im Jahr 1801 durch den italienischen Astronomen Dr. Giuseppe Piazzi entdeckt. [1] Seitdem wurden mit der Zeit immer mehr Asteroiden von stark variierender Größe und Umlaufbahn entdeckt. (Siehe Abb.1)

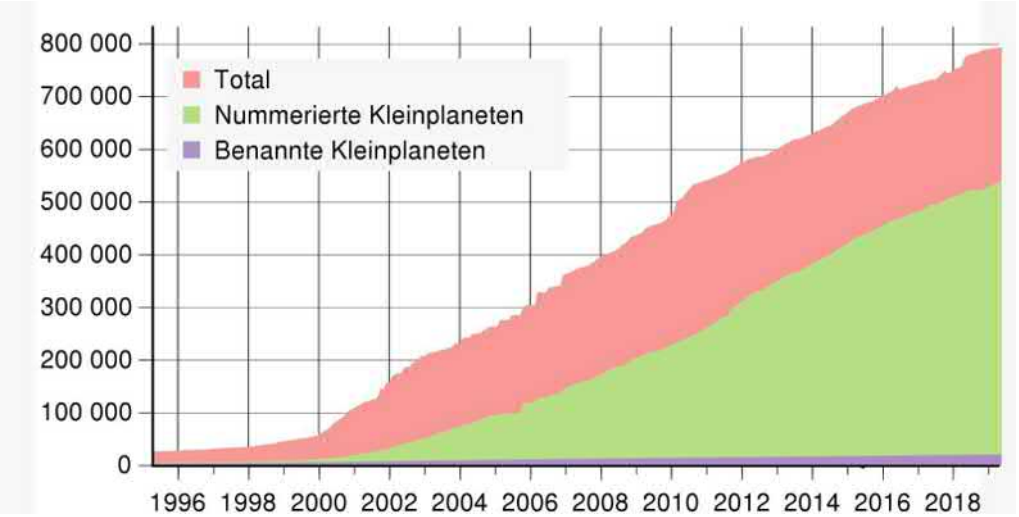


Abb. 1: Die anzahl der bekannten Asteroiden, die davon nummerierten und benannten von 1995 bis 2019

Es gibt zwar keine offizielle Definition für den Begriff Asteroid, aber ein Asteroid ist im grunde genommen das, was laut der IAU als SSSB (Small Solar System Body) klassifiziert werden kann, aber nicht in die Kategorie der Kometen fällt. Ein SSSB ist alles, was in unserem Sonnensystem weder Planet noch Zwergplanet, Stern oder künstlicher Satellit ist. [2] Es gibt für Kometen zwar auch keine Definition, sie können aber grob beschrieben werden als Körper, die eine mittelmäßig bis stark elliptische Bahn oder parabelförmige Bahn um die Sonne haben, und die meiste Zeit in einer großen Distanz zu ihr verbringen. Meistens bestehen sie aus Eis und haben einen Gesteinskern. Sie enthalten teils organische Materialien. [3] Asteroiden hingegen haben meist eine eher schwach elliptische Umlaufbahn um die Sonne. Die meisten Asteroiden bestehen aus Gestein, teilweise können sie aber auch aus Metallen wie Eisen und Nickel bestehen. [3]

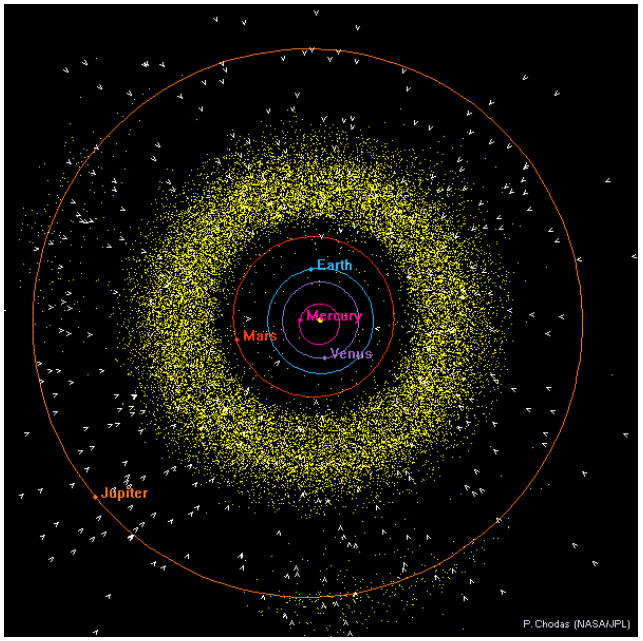


Abb. 2: Eine Abbildung aller bekannten Asteroiden und Kometen vom ersten Januar 2018. Man sieht die Bahnen aller Planeten von der Sonne aus bis einschließlich Jupiter. Die Asteroiden werden als gelbe Punkte dargestellt, die Kometen als weiße Pfeile.

Wie man bereits in Abbildung 2 sehen kann, befinden sich die meisten Asteroiden im Haupt-Asteroidengürtel, der sich zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter befindet [3]. Zu Anfang unseres Sonnensystems gab es nur einige wenige, dafür relativ große Asteroiden. Diese schmolzen durch radioaktiven Zerfall und teilten sich in der flüssigen form in kleinere Asteroiden auf. Einige davon erreichten das hydrostatische Gleichgewicht und wurden zur Kugel, bevor sie wieder fest wurden. Manche waren von zu geringer Masse für ein hydrostatisches Gleichgewicht, und wurden so nicht zur Kugel. Während dieses Prozesses und anschließend stießen immer wieder Asteroiden zusammen, was sie zum Zerfall brachte, wodurch dann sogenannte Asteroidenfamilien entstanden. Diese bestanden aus einer Gruppe von einigen Asteroiden von kleinerer größer als dem, der vorher zu ihnen zerfallen war. Asteroiden jeglicher Größe stoßen bis heute regelmäßig zusammen, und es kann bei einem Größenverhältnis von mindestens 1:50.000 zum Zerfall des größeren der zusammenstoßenden Asteroiden kommen [4]. Daher werden die Asteroiden mit der Zeit im Durchschnitt immer kleiner. Es gibt verschiedene Arten von Asteroiden, zum Beispiel die Trojaner, die sich auf der gleichen Umlaufbahn wie ein Planet befinden. Jupiter hat die meisten Trojaner in seiner Bahn, sie ergeben die beiden sogenannten Trojanergruppen [4] (Siehe Abb.3).

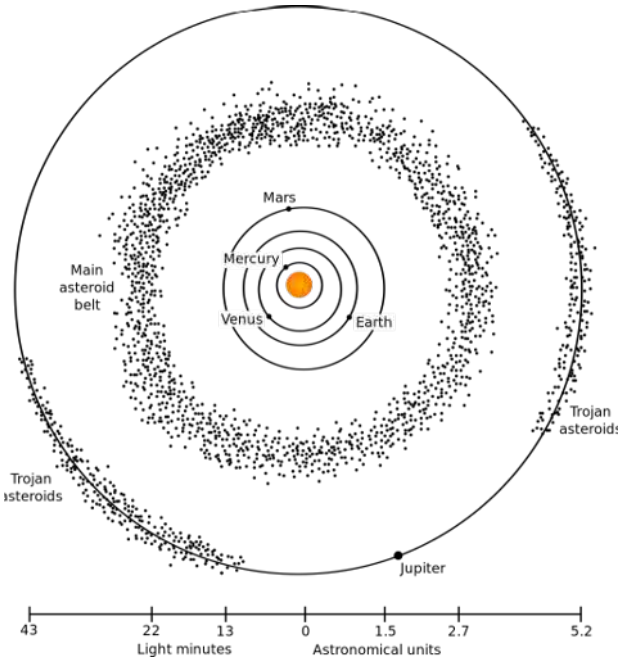


Abb. 3: In dieser Abbildung sieht man die Position der Trojaner ("Trojan Asteroids") auf Der Jupiterbahn. Diese Grafik wurde mithilfe von Positionsdaten von Asteroiden erstellt.

Bis heute, dem 01.05.2021, wurden im Sonnensystem 1,078,983 Asteroiden entdeckt, davon haben 547,966 eine Nummer erhalten [5].

3.2 NEAs

Die NEAs, kurz für Near Earth Asteroids (Englisch für Erdnahe Asteroiden) sind eine Kategorie der Asteroiden. Sie beschreiben die Asteroiden, die zu den Near Earth Objects (NEOs) also

erdnahen Objekten gehören, weil sie einen Perihelabstand q von weniger als 1.3 astronomischen Einheiten haben [6]. Innerhalb von dieser Kategorie gibt es verschiedene Unterkategorien:

I. Amors

In dieser Kategorie befinden sich NEAs mit einer Umlaufbahn, die sich ausschließlich zwischen der der Erde und der des Mars befindet. Benannt wurde die Kategorie nach ihrem Vorbild, dem Asteroiden (1221) Amor (Siehe Abb.4) [6].

II. Apollos

Hier befinden sich die NEAs mit einer großen Halbachse, die größer als die der Erde ist, und die die Erdbahn kreuzen. Benannt wurde die Kategorie nach ihrem Vorbild, dem Asteroiden (1862) Apollo (Siehe Abb.4) [6].

III. Atens

Diese Kategorie beinhaltet die NEAs, die die Erdbahn kreuzen, und eine große Halbachse mit kleinerer Größe als die der Erde haben. Benannt wurde die Kategorie nach ihrem Vorbild, dem Asteroiden (2062) Aten (Siehe Abb.4) [6].

IV. Atiras

Zu dieser Kategorie zählen die NEAs, deren Orbit sich komplett innerhalb des Orbits der Erde befindet. Benannt wurde diese Kategorie nach ihrem Vorbild, dem Asteroiden (163693) Atira (Siehe Abb.4) [6].

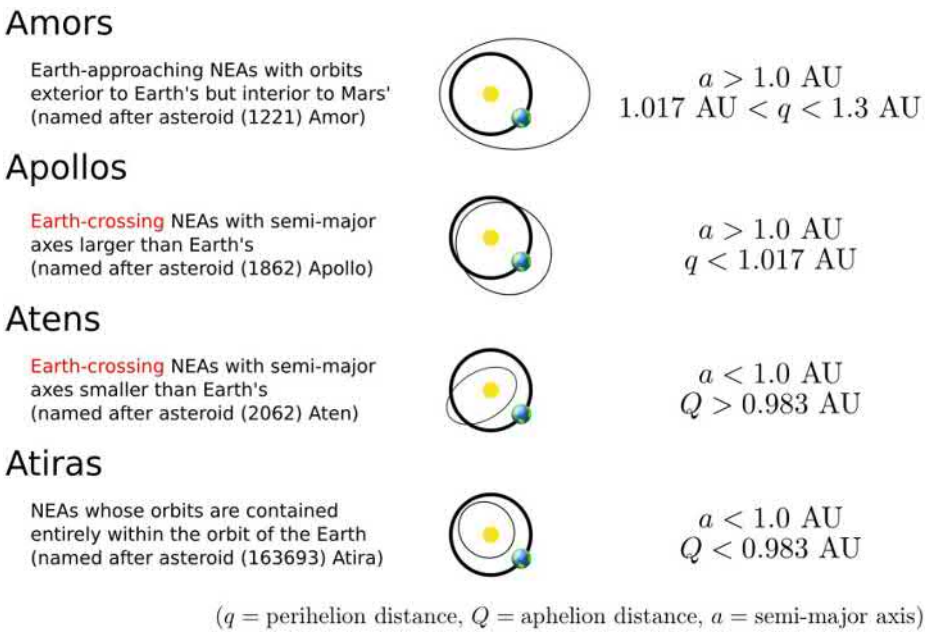


Abb. 4: In dieser Abbildung sieht man beschriftet eine Visuelle Darstellung der Orbits von verschiedenen Kategorien der NEAs. q = Distanz vom Perihel, Q = Distanz vom Aphel a = große Halbachse

V. Potentially Hazardous Asteroids

Die Potentially Hazardous Asteroids, kurz PHAs, sind eine besondere Kategorie innerhalb der NEAs, da sie sowohl Objekte aus den Kategorien Amors, Apollos Atens als auch Atiras beinhalten können. Ein NEA ist ein PHA, wenn er sich zu einem beliebigen Zeitpunkt der Erde näher als 0,05 astronomische Einheiten annähert. Dafür muss das Objekt allerdings mindestens eine Größe von 140 Metern haben [6].
Bis heute wurden etwas über 25.000 NEAs entdeckt (Siehe Abb.5).

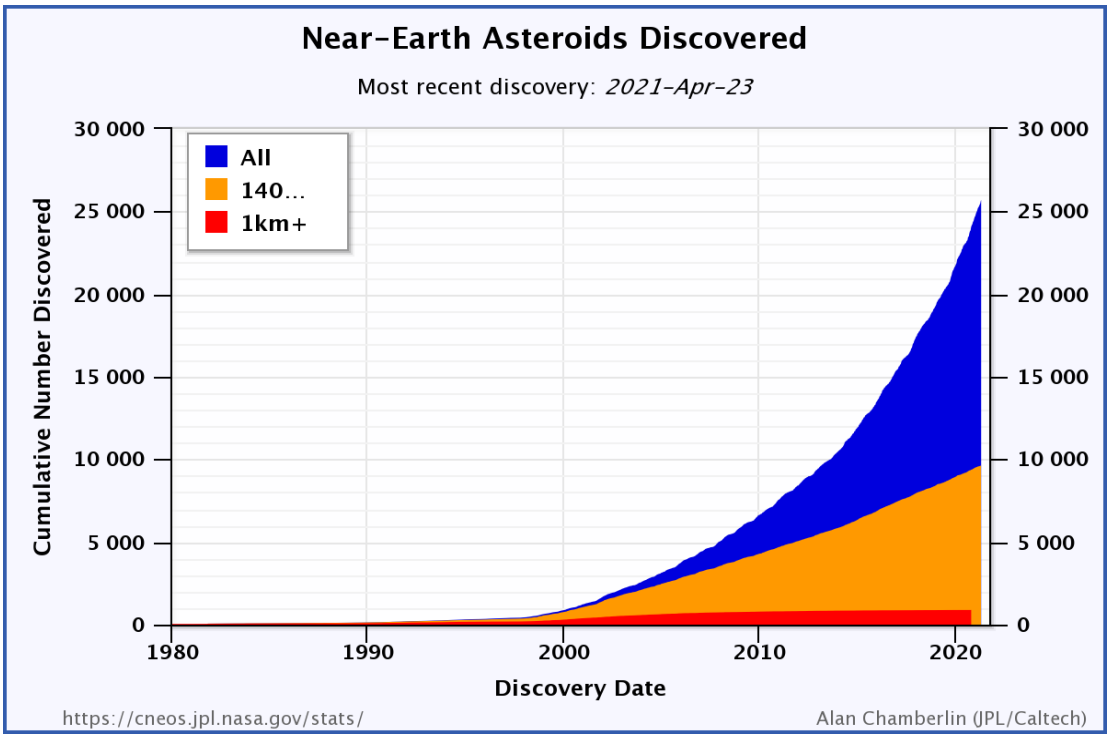


Abb. 5: Die Anzahl der bekannten NEAs im Laufe der Zeit. In blau NEAs aller Größen, in orange die ab 140 Metern Größe und und in rot die ab einem Kilometer Größe.

3.3 Die Bahnberechnung eines Asteroiden

Schon seitdem Astronomen sich mit den Körpern in unserem Sonnensystem beschäftigen, bestand Interesse an der Berechnung ihrer Bahnen. Die ersten erfolgreichen Berechnungen einer Bahn von einem Objekt der SSSB-Kategorisierung wurden an Kometen vorgenommen, bereits bevor Ceres, der erste bekannte Asteroid, entdeckt wurde. Die Erkenntnis, die diese Berechnungen erstmals erlaubte, war das Newtonsche Gravitationsgesetz [7]. Die erste Berechnung geschah durch Halley, der in 1705 die ersten Bahnen von Kometen, die er berechnet hatte, veröffentlichte. Da die Methoden zur Berechnung damals noch nicht sehr fortgeschritten waren, gab es meist sehr große Messfehler von bis zu 15 Bogenminuten [7]. Mit der Zeit wurden die Methoden allerdings immer moderner, und heutzutage können wir die Bahnen mit hilfe von Computern so genau berechnen wie nie zuvor, mit Messfehlern von unter einer Bogensekunde. Das Entspricht weniger als einem Neunhundertstel der

erstmaligen Messfehler. Um die elliptische Bahn eines Körpers um die Sonne zu beschreiben, verwendet man 6 verschiedene Größen, die sogenannten Bahnelemente [7].

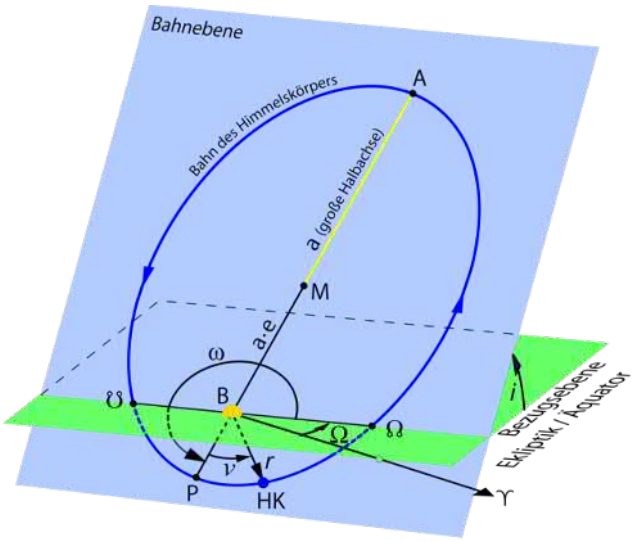


Abb. 6: In dieser Grafik sind alle Bahnelemente bei einer elliptischen Bahn visuell dargestellt. In gelb sieht man die Sonne, in hellblau die Bahnebene, in grün die Ekliptik und in blau die Bahn.

Die Bahnelemente lauten wie folgt:
Die Große Halbachse a [7] beschreibt die größte Distanz vom Mittelpunkt der Ellipse zu ihrem äußeren Rand.
Die Exzentrizität e [7] ist bei einer Ellipse immer kleiner als 1 und wird mit a multipliziert zur Distanz vom Mittelpunkt der Ellipse zu einem ihrer Brennpunkte. Im Brennpunkt befindet sich immer die Sonne.
Die Bahnneigung oder Inklination i [7] beschreibt den Winkel, in dem die Bahnebene, also die Ebene, auf der sich die Bahn befindet, zur Ekliptik geneigt ist. Die Ekliptik ist die Ebene der Erdbahn.
Die Länge des aufsteigenden Knotens Ω [7] bezeichnet den Winkel zwischen der Referenzebenen-Bezugsrichtung ♈ und der Schnittlinie von der Bahnebene und der Ekliptik.
Das Zeichen ω beschreibt den Winkel zwischen den Linien die Perihel und Brennpunkt und den aufsteigenden Knoten und Brennpunkt verbinden. Das Perihel ist die kürzeste Distanz zwischen dem Brennpunkt, also der Sonne, und dem Objekt. Es kann durch die Formel $a - a \times e$ beschrieben werden. Der aufsteigende Knoten ist der Punkt, an dem das Objekt auf seiner Bahn von unten nach oben die Ekliptik durchläuft.
Der Buchstabe T steht für den Zeitpunkt, zu dem das Objekt das Perihel durchläuft [7].

Man kann diese Bahnelemente anhand von mehreren gemessenen Positionen eines Objekts, also den Ephemeriden, berechnen. Dieser Vorgang nennt sich Datenreduktion. Bei der Datenreduktion müssen noch einige Faktoren außer den Positionen des beobachteten Objektes beachtet werden. Erstens gibt es die Refraktion, welche die Beugung von Licht beim übertreten in ein anderes Medium beschreibt, was beim Eintreten des Lichts in die Erdatmosphäre geschieht [7]. Zweitens gibt es die Parallaxe, welche die Verschiebung des

Beobachters bezeichnet. Bei der Berechnung von Bahnen von Asteroiden muss man hier die Bewegung der Erde um die Sonne und die Drehung der Erde berücksichtigen. Das gesamte Sonnensystem bewegt sich zwar auch, aber da sich sowohl die Asteroiden als auch die Erde mit dem Sonnensystem mitbewegen, entsteht dadurch keine zusätzliche relative Bewegung [7]. Drittens gibt es die Aberration, welche eine optische Verschiebung des Körpers durch die Zeit, die das Licht braucht, um vom Körper zum Beobachter zu gelangen, beschreibt. Sie entsteht dadurch, dass sich während der Zeit, die das Licht zum zurücklegen der Distanz zwischen Körper und Beobachter braucht, sowohl der Körper als auch der Beobachter weiterbewegen [7]. Viertens gibt es die Präzession und Nutation, welche eine Schwankung der Erdbahn und somit der Ekliptik und die Präzession der Erde beschreiben [7]. All diese Faktoren werden bei der Datenreduktion berücksichtigt. Nachdem man mit einer Datenreduktion aus Ephemeriden eines Asteroiden seine Bahn berechnet hat, kann man aus dieser wiederum zukünftige Ephemeriden des Objektes berechnen. Außerdem kann man so überprüfen, ob die Gefahr eines Zusammenstoßes zwischen dem Asteroiden und der Erde besteht. Da die Bahnen von Asteroiden im Sonnensystem natürlich nicht ohne Messfehler berechnet werden können und sich durch Zusammenstöße oder durch Gravitation andere Objekte ab und zu ändern können, ist es wichtig, dass ein Asteroid regelmäßig beobachtet wird. Geschieht dies nicht, findet man ihn sonst irgendwann nicht wieder, da sich die Bahn zu sehr verändert hat.

3.4 Die Gefahren der NEAs

Da die NEAs und PHAs der Erde nah kommen, besteht die Gefahr, dass wenn sich die Erdbahn mit der Bahn von einem der NEAs kreuzt, es einen Zeitpunkt gibt, zu dem die Erde und der NEA sich treffen. Solche Kollisionen haben nachweislich bereits stattgefunden. Beispielsweise schlug vor ungefähr 65 Millionen Jahren auf der mexikanischen Halbinsel Yucatan ein Meteorit mit einer Größe von schätzungsweise 10 Kilometern ein [8]. Der Krater, den er hinterließ, hatte einen Durchmesser von 180 Kilometern. Dies war “Eine der gewaltigsten Naturkatastrophen, die es auf der Erde je gegeben hat.” [8]. Auch heutzutage stößt die Erde ständig mit Asteroiden zusammen, aber da die meisten davon sehr klein sind, verglühen sie in der Atmosphäre zu einem Großteil und gelangen wenn überhaupt nur als Steine von einigen Zentimetern Größe an die Erdoberfläche. Wenn man eine Sternschnuppe sieht, handelt es sich dabei um einen Meteorit, der beim Eindringen in die Erdatmosphäre verglüht [9]. Ab und zu gibt es dennoch einen größeren, aber nicht katastrophalen Einschlag. Beispielsweise gab es am 30. Juni 1908 in Sibirien an einer Stelle in der Nähe des Podkamennaja Tunguska-Flusses eine Explosion unbekannten Ursprungs mit einer Energie von 10-15 Mt, bei der es sich vermutlich um einen Meteoriteneinschlag handelte [10]. Die Sprengkraft dieses Einschlags entspricht ungefähr der der Castle Bravo-Explosion, die 1954 entstand, als eine Wasserstoffbombe vom U.S.-Militär getestet wurde [11]. Die Explosion in Sibirien warf in einem Bereich von circa 2150 km² um den Einschlagsort alle Bäume um [10]. Wie man sieht, hätte ein einschlag eines Asteroiden , der dem Asteroiden, der vermutlich

beim Tunguska-Ereignis eingeschlagen ist ähnelt, katastrophale Folgen, wenn er in einem bewohnten Gebiet einschlagen würde. Es wäre fast, als würde eine Wasserstoffbombe explodieren. Deshalb gilt es, es zu versuchen, Einschläge möglichst vorauszusehen, damit Gegenmaßnahmen getroffen werden können. Zum Beispiel bestände bei einer rechtzeitigen Warnung die möglichkeit einer Evakuierung der Einwohner eines Gebiets. Daher ist es wichtig, dass die bekannten NEAs und PHAs regelmäßig beobachtet werden, weil so ihre Bahn immer möglichst genau bekannt ist. Wie gefährlich ein PHA der zum Meteorit wird ist, hängt im Grunde genommen davon ab, mit welcher Energie er einschlagen würde. Die Energie, die bei einem Einschlag freigesetzt werden kann, entspricht der kinetischen Energie, die der Meteorit mit sich führt. Als Formel für die kinetische Energie gilt:

$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2$[12]

Das heißt, je mehr Masse ein Meteorit hat, und je schneller er sich auf die Erde zubewegt, desto mehr Energie hat er auch. Die Energie der Explosion einer Wasserstoffbombe wird in TNT-Äquivalent angegeben. Eine Tonne TNT entspricht einer Energie von 4.184 Gigajoule, also gilt als TNT-Äquivalent 4184×10^{6} J/kg. Als Beispiel hätte ein Meteorit, der eine Masse von 10.000t besitzt und mit einer Geschwindigkeit von 20km/s auf die Erde trifft, eine Energie von

$$E = \frac{1}{2} \times 10000000\, kg \times (20000\, m/s)^2 = 2 \times 10^{15} J$$

also von 2 Petajoule. Dies würde ein TNT-Äquivalent von

$$\frac{2 \times 10^{15} J}{4184 \times 10^{6} J/kg} = 478011\, kg \approx 478\, t$$

also 478 Tonnen TNT bedeuten.

4. Ausrüstung

4.1 Ausstattung der Sternwarten

An den ersten beiden Beobachtungsabenden gab es folgendes Equipment:
I.: Beim Teleskop handelt es sich um ein 0,36m Schmidt-Cassegrain-Teleskop mit einem Öffnungsverhältnis von f/6.7.
II.: Die verwendete Kamera ist die STF-8300M.
III.: Beim Filter handelt es sich um einen Baader-Rotfilter
Am dritten Beobachtungsabend wurde folgendes Equipment verwendet:
I.: Das Teleskop, das verwendet wurde, ist ein 0,51m Corrected Dall-Kirkham-Teleskop von Planewave. Es hat ein Öffnungsverhältnis von f/6.7
II.: Die Kamera, die verwendet wird, ist die STX-16803.
III.: Beim Filter handelt es sich auch um einen Baader-Rotfilter.

4.2 Software

I.: 10micron Keypad, digitale Version. Diese Software wird verwendet, um die Montierung Teleskope von einem Computer aus zu steuern.
II.: Stellarium (Software 1). Diese Software ist eine Simulation vom Himmel, in der man sehen kann, wo sich Objekte zu einem beliebigen Zeitpunkt befinden. Das Programm wird verwendet, um die Sichtbarkeit von Objekten zu überprüfen. Außerdem werden die Objekte vom Teleskop mit Hilfe von Stellarium anvisiert, was auch eine Funktion des Programms ist.
III.: MaxIm DL 5 (Software 2). Dieses Programm wird verwendet, um die Kamera und den Filter mit einem Computer zu steuern und es speichert die Aufnahmen im fit-Format ab, dabei erstellt es den FITS-Header. Außerdem wird es für die Kalibrierung der Aufnahmen verwendet.
IV.: Astrometrica (Software 3). Dieses Programm ermöglicht das Vermessen von Positionen eines Objektes anhand einer Aufnahme des Objektes am Sternenhimmel. Dafür wird es auch verwendet.
V.: FindOrb (Software 4). Diese Software kann aus Positionen eines Objektes die Bahnelemente des selben berechnen, wofür sie verwendet wird.
VI.: Zoom (Software 5). Dieses Programm wird verwendet, um den Computer von der privaten Sternwarte von Herrn Koch fernzusteuern.
VII.: Dimension 4 (Software 6). Dieses Programm wird verwendet, um die Systemzeit der zur Beobachtung verwendeten Computer auf die Sekunde genau zu halten.
VIII.: FocusLynx Commander (Software 7). Dieses Programm wird verwendet, um die Kamera richtig zu fokussieren.
IX.: SpecTrack 1.0 (Software 8). Dieses Programm wird verwendet, um das Teleskop auf die Sterne nachzuführen.
X.: 10micron Clock Sync version 3.4. Dieses Programm wird verwendet, um die Uhr in der Teleskopmontierung synchron mit der des Computers zu halten.

4.3 Websites

I.: Minor Planet Center. Diese Website wurde verwendet, um Objekte für die Observation zu finden, und sie stellt Datensätze zu Asteroiden bereit. Hier findet man die Website: https://minorplanetcenter.net/
II.: Horizons Web Interface: Diese Website stellt Nutzern Ephemeriden von bekannten Asteroiden zur verfügung. Das Minor Planet Center verweist teilweise auf sie. Hier findet man die Website: https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi

5. Beobachtung der Asteroiden

5.1 Beobachtungsabend 1

Dieser Abend fand am 20.02.2021 statt. Da die Beobachtung vom Schülerlabor aus sich nicht anbat, wurde stattdessen die private Sternwarte von Herrn Koch für die Beobachtung über Zoom ferngesteuert (siehe Abb.7,8). Das Equipment war ein 0,36m SCT mit einem Öffnungsverhältnis von f/6.7, als Kamera wurde die STF-8300M verwendet (siehe Abb.9,10). Ein Baader-Rotfilter wurde benutzt (siehe Abb.10). Das Wetter war leicht wolkig (siehe Abb.11). Die Mondphase lag bei ungefähr 60%.

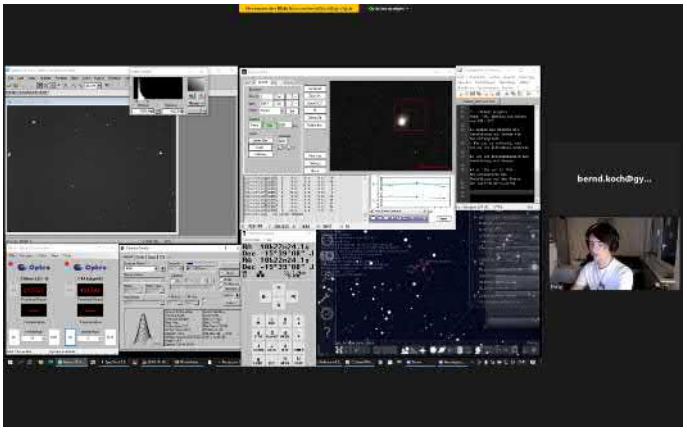


Abb. 7: So sah es aus, wenn ich den Computer von Herrn Koch über Zoom ferngesteuert habe.

Abb. 8: Herrn Kochs private Sternwarte, das Stargate Observatory.

Abb. 9: Das 0,36m Schmidt-Cassegrain-Teleskop des Stargate Observatory.

Abb. 10: Die STF-8300M-Kamera inklusive Filter am Teleskop.

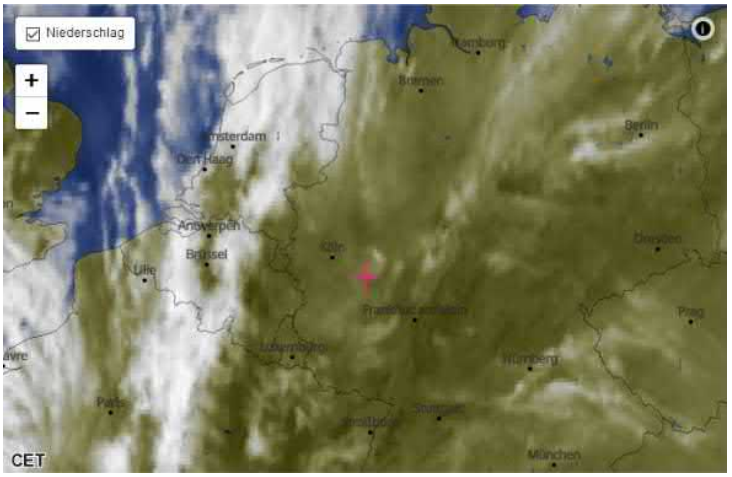


Abb. 11: Satellitenbild von der Umgebung des Stargate Observatory zum Zeitpunkt der Beobachtungen.

Bevor man mit der Beobachtung anfangen kann, muss man sichergehen, dass die Systemzeit des Computers, der verwendet wird, auf einige hundertstel Sekunden genau ist. Dafür wurde das Programm Dimension 4 (siehe Abb.12) verwendet.

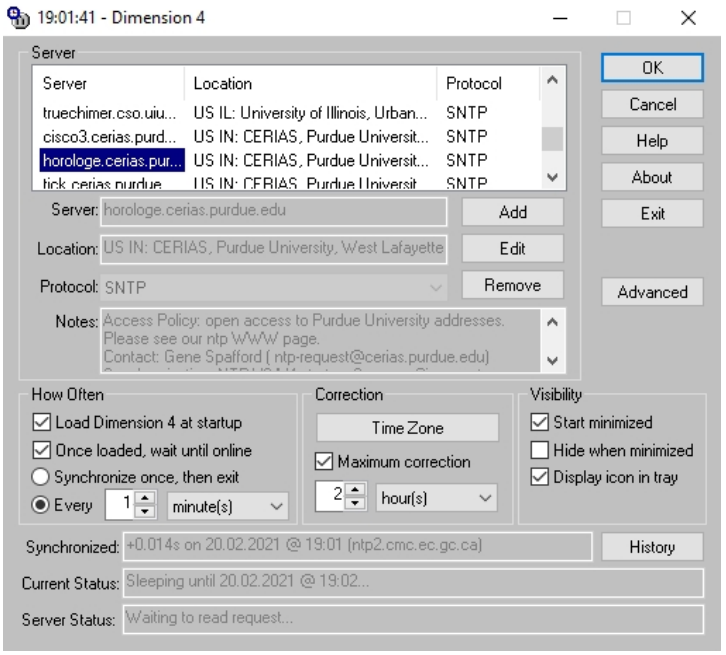


Abb. 12: Dimension 4 bei der Synchronisation der Zeit des Computers.

Da die Montierung vom Teleskop auch eine eigene Uhr beinhaltet, muss die Uhrzeit auch dort durch ein Programm synchron gehalten werden. Dafür wird das Programm 10micron Clock Sync version 3.4 (siehe Abb.13).

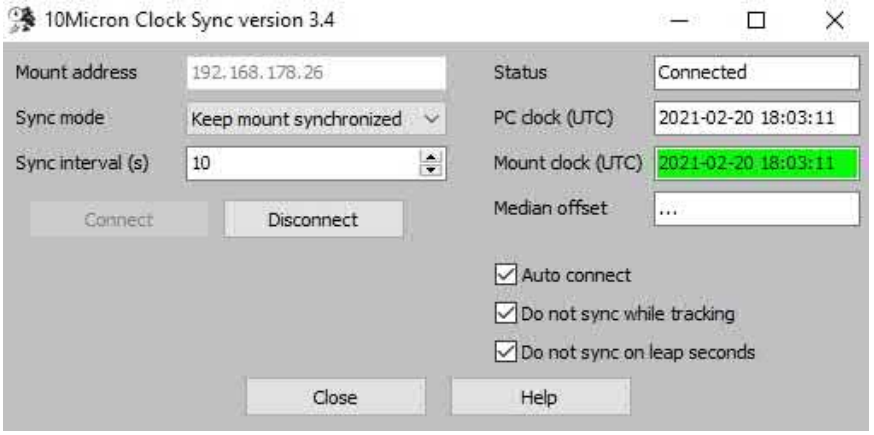


Abb. 13: 10micron Clock Sync version 3.4 während der Arbeit.

I. (535844)

(535844) befand sich zum Zeitpunkt der Aufnahmen ungefähr 40° vom Mond entfernt. Zunächst wurde das Teleskop an diesem Abend auf (535844) ausgerichtet. Dafür wurde das Programm Stellarium (siehe Abb.14) verwendet, welches es einem erlaubt, ein Objekt auszuwählen, und das Teleskop automatisch auf das Objekt zu schwenken.

Abb. 14: Stellarium beim Beobachten. Das Objekt ist rot markiert, das Sichtfenster der Kamera rot umrandet. Das Teleskop zeigt in dieser Aufnahme zum Objekt.

Da wurde die Kamera dann mit den Programmen FocusLynx Commander und MaxIm DL fokussiert. In der folgenden Abbildung sieht man unten links FocusLynx und oben rechts die Informationen zur Fokussierung, die von MaxIm DL bereitgestellt werden. Der FWHM-Wert wird beim Fokussieren so weit wie möglich gesenkt.

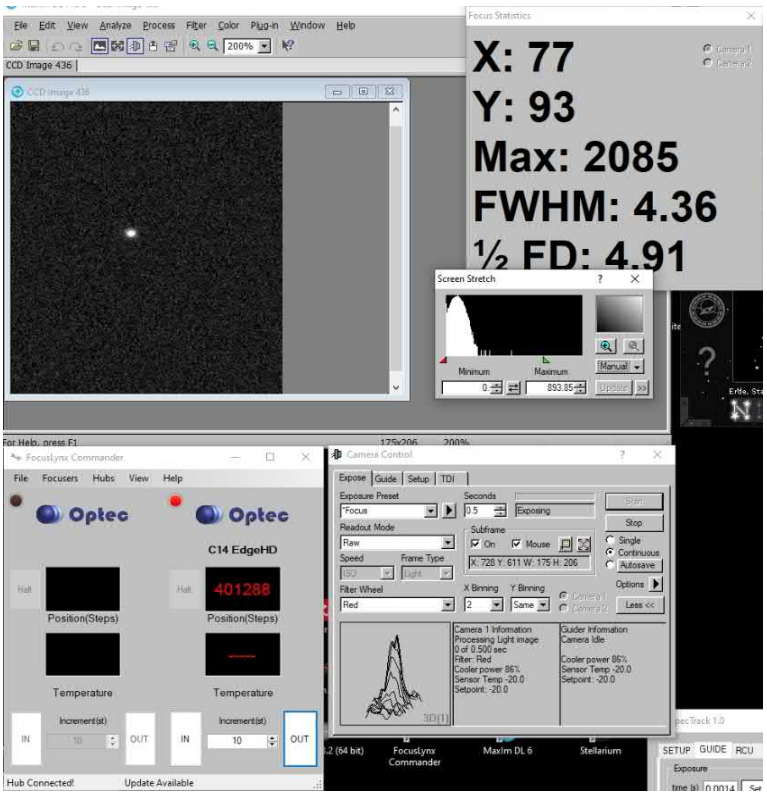


Abb. 15: FocusLynx Commander, im Bild ist außerdem MaxIm DL.

Danach wurde eine kleine Serie von Aufnahmen des Objektes (535844) mit einer Belichtungszeit von 120s aufgenommen. Diese Aufnahmen sollten nur dem Zweck dienen, das Objekt zu sichten, bevor Aufnahmeserien für die Analyse gemacht werden. Das Teleskop wurde durch das Programm SpecTrack auf die Sterne nachgeführt. Die Aufnahmeserie wurde in MaxIm DL eingerichtet und vorgenommen.

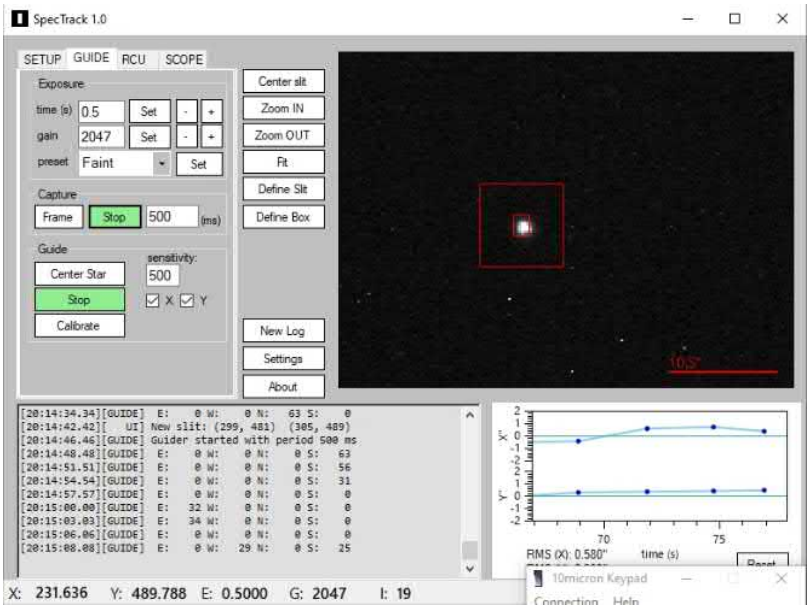


Abb. 16: SpecTrack 1.0 bei der Nachführung auf einen Stern.

Das Programm SpecTrack 1.0 (siehe Abb.16) führt das Teleskop auf die Sterne nach, indem es die Bewegung eines festgelegten Sternes analysiert und das Teleskop so bewegt, dass der Stern sich in der Aufnahme immer am gleichen Ort befindet. In der folgenden Abbildung sieht man MaxIm DL.

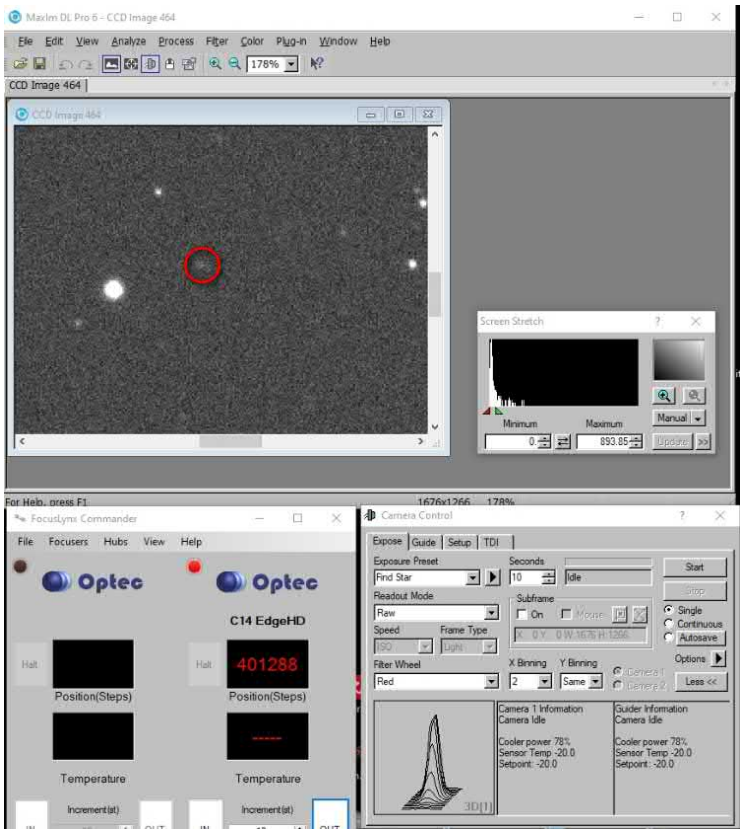


Abb. 17: Maxim DL 5, oben und unten rechts. (535844) ist in rot markiert.

In dem Fenster, welches man in der Abbildung 17 unten rechts sieht, kann man eine Aufnahmeserie einrichten. Man wählt dort die Belichtungszeit, den Filter, und die Zahl der Aufnahmen. Das Binning muss auch eingestellt werden. Anschließend drückt man auf “start” und MaxIm DL erstellt die Aufnahmeserie. Man sieht im Fenster unten rechts nun, wie weit das Erstellen der Aufnahmeserie fortgeschritten ist. Im Fenster oben sieht man immer die zuletzt erstellte Aufnahme. Rechts daneben ist das Histogramm-Fenster geöffnet, mit dem man einstellt, welche Pixel-Helligkeit im Fenster wie hell dargestellt werden soll. In der ersten Aufnahmeserie gab es keine Probleme, (535844) zu finden, der Asteroid war zwar nicht besonders hell aber deutlich erkennbar (Siehe Abb.17). Nachdem diese Serie abgeschlossen wurde, wurde das Teleskop statt auf die Sterne auf das Objekt nachgeführt. Das SpecTrack diese Fähigkeit nicht besitzt, wurde die Eigenbewegung in Bogensekunden pro Minute ermittelt, indem die JPL-Database für eine Ephemeridenrechnung verwendet wurde. Die Eigenbewegung für die Uhrzeit der nächsten Aufnahmeserie betrug ungefähr $\Delta RA = -2{,}78''/m$ und $\Delta DE = -2{,}42''/m$ Die Uhrzeit war ungefähr 20 Uhr UTC. Diese Eigenbewegung wurde nun um die Nachführung vorzunehmen in das 10micron Keypad (siehe Abb.18) eingetragen, welches das Teleskop dann entsprechend der EInstellungen konstant auf das Objekt ausrichtet.

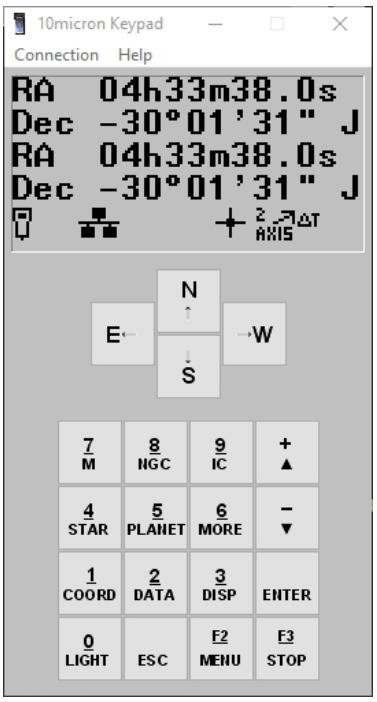


Abb. 18: Das 10micron Keypad.

In der Abbildung sieht man rechts unterhalb der Angabe für die Ausrichtung des Teleskops, dass es nach festgelegten Werten nachgeführt wird. Nachdem die Nachführung eingerichtet wurde, wurde mit MaxIm DL eine Serie von 10 Aufnahmen mit jeweils 120s Belichtungszeit vorgenommen. Auf den Aufnahmen war das Objekt durch die Nachführung besser zu sehen als auf den Probeaufnahmen. Ab hier wird für die jede Aufgabe das gleiche Programm verwendet, welches auch in diesem Abschnitt für die Aufgabe verwendet wurde.

II. (99942) Apophis

Apophis wurde nach einem zweiten Objekt beobachtet, welches nicht relevant für die Projektarbeit ist. Apophis befand sich zum Zeitpunkt der Aufnahmen ungefähr 90° vom Mond entfernt. Das Wetter war noch ungefähr dasselbe wie zu Anfang des Abends. Zunächst wurde von Apophis eine Serie von 10 Aufnahmen mit einer Nachführung auf die Sterne und einer Belichtungszeit von 60s aufgenommen. Das Objekt war nur schwach zu erkennen, da es tief am Himmel stand und so von 2,75 Luftmassen (Airmass) abgeschwächt wurde. Anschließend wurde eine 300s-Aufnahme mit Nachführung auf das Objekt vorgenommen. Apophis war auf dieser Aufnahme wegen der scheinbaren Nähe zu einem Stern leider nicht zu sehen. Es folgten zwei weitere dieser 300s-Aufnahmen, auf denen Apophis zu sehen war.

5.2 Beobachtungsabend 2

Das Datum dieses Abends war der 21.02.2021. Auch hier bot sich die Beobachtung vom Schülerlabor aus nicht an. Deshalb wurde hier wie beim ersten Abend alles per Zoom ferngesteuert. Das Wetter war sehr klar, es gab keinen Wind und keine Luftfeuchtigkeit. Die Mondphase betrug ungefähr 70%.

I. (535844)

Zuerst wurde wieder (535844) beobachtet. Die Entfernung zwischen dem Asteroiden und dem Mond betrug diesmal nur ungefähr 25°. Nachdem die Beobachtungen wie am Vorabend vorbereitet wurden, wurde das Objekt bei einer Nachführung auf die Sterne nicht sichtbar, was vermutlich am Streulicht des Mondes lag. Bei einer Nachführung auf das Objekt war es glücklicherweise doch zu finden. Wegen der schlechten Sichtbarkeit wurden an diesem Abend fortan alle Aufnahmen des Objektes auf (535844) nachgeführt. Zunächst wurden 3 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 300s und 5 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 120s vorgenommen. Hier lag die Eigenbewegung bei ungefähr ΔRA = -2.93"/m und ΔDE = -2,65"/m. da diese Aufnahmen einige Zeit dauerten, wurde die eingestellte Korrektur für die Eigenbewegung anschließend auf ΔRA = -2,96"/m und ΔDE = -2,697"/m korrigiert. Die Werte für die Eigenbewegung wurden wieder mit Daten aus der JPL Database berechnet. Nach dieser Korrektur folgten erneut 3 Aufnahmen mit 300s Belichtungszeit und 5 Aufnahmen mit 120s Belichtungszeit. Der Asteroid war auf allen Aufnahmen einigermaßen zu erkennen.

II. (99942) Apophis

Das Wetter war immer noch gleich, aber Apophis hatte einen größeren Abstand von 80° zum Mond. Als das Objekt mit einer Nachführung auf die Sterne und mit 60s Belichtungszeit gesucht wurde, war es gut zu sehen, allerdings war das Seeing schlecht. Anschließend wurde eine Aufnahmeserie mit 10 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 60s und einer Nachführung auf die Sterne vorgenommen. Danach wurde das Teleskop mit aus der JPL Database berechneten Daten für die Eigenbewegung auf das Objekt nachgeführt. Die Eigenbewegung betrug ungefähr ΔRA = -2.86"/m und ΔDE = +1.20"/m. Mit dieser Nachführung wurden 5 Aufnahmen von 120s Belichtungszeit und 2 Aufnahmen mit 300s Belichtungszeit vorgenommen. Danach wurde das Teleskop erneut auf die Sterne nachgeführt. Die folgende Aufnahmeserie enthielt 10 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 60s. Das Objekt war auf allen Aufnahmen deutlich zu erkennen, das Seeing war aber teilweise schlecht.

5.3 Beobachtungsabend 3

An diesem Abend, der am 24.02.2021 stattfand, bot sich die Beobachtung von Station 7 des Schülerlabors für Astronomie aus an. Der Mond war an diesem Tag sehr hell. Außerdem gab es einen sehr roten Sonnenuntergang, was an Saharastaub in der Atmosphäre lag. Es gab leichte Windböen, aber die Wolkenbedeckung war nicht stark. Als Teleskop wurde hier ein 0,51m Corrected Dall-Kirkham-Teleskop von Planewave (siehe Abb.19) benutzt, welches ein Öffnungsverhältnis von f/6.7 hat. Die Verwendete Kamera war die STX-16803, und sie war mit einem Baader-Rotfilter versehen (siehe Abb.20). Für diesen Beobachtungsabend wurden die gleichen Computerprogramme verwendet, die bei den anderen auch benutzt wurden.

Abb. 19: 0,51m CDK-Teleskop von Planewave auf der Montierung.

Abb. 20: Montierung von Kamera und Filter am Teleskop durch mich.

I. (535844)

Die Suche nach dem Objekt mit Aufnahmen von 120s und 300s Belichtungszeit ist leider fehlgeschlagen. Das Objekt konnte an diesem Abend also leider nicht aufgenommen werden, da es nicht sichtbar war. Dies lag vermutlich an einer Kombination aus starkem Mondlicht und Saharastaub.

II. (99942) Apophis

Das Objekt, welches nicht so nah am Mond war wie (535844), war auf Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 120s erkennbar. Es wurde eine Serie von 10 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 120s aufgenommen. Die Aufnahmen waren auf die Sterne nachgeführt.

Insgesamt konnten leider nicht alle Aufnahmen von den Beobachtungsabenden verwertet werden, da manche ausgemustert werden mussten oder Astrometrica keine erfolgreiche Datenreduktion durchführen konnte.

6. Auswertung der Aufnahmen

6.1 Die Kalibrierung der Aufnahmen

Die Aufnahmen müssen vor ihrer Auswertung kalibriert werden, um Fehler zu beheben, die bei Aufnahmen standardmäßig entstehen. Die Informationen, die in einer Aufnahme

enthalten sind, sind wie stark jeder Pixel der Kamera während des Zeitraums beleuchtet wurde, und es gilt, diese Informationen möglichst fehlerfrei zu gewinnen, bevor sie ausgewertet werden. Es gibt vier Fehler, die beim Kalibrieren behoben werden müssen.

I. Rauschen und defekte Pixel

Es gibt ein standardmäßiges sogenanntes Rauschen in allen Aufnahmen, welches dadurch entsteht, dass der Sensor der Kamera nicht nur das Licht aufnimmt, sondern teilweise auch die Bewegung der Moleküle. Deshalb wird die gemessene Helligkeit in einem Pixel niemals 0 sein. Dieses Rauschen lässt sich durch eine Verringerung der Temperatur des Sensors vermindern, kann aber nie gänzlich eliminiert werden. Außerdem können die Pixel einer Kamera vereinzelt kaputt sein und für pixelgroße, weiße Punkte in der Aufnahme sorgen. Diese beiden Störfaktoren lassen sich in der Kalibrierung weitgehend eliminieren. Das funktioniert folgendermaßen: Man macht eine Serie von Aufnahmen, sogenannten „Darkframes“. Dafür benutzt man die Kamera, die auch für das Aufnehmen der auszuwertenden Bilder benutzt wurde. Man benutzt dabei einen sogenannten „Dark Filter“. Dies ist ein Filter, der kein Licht von außen in den Sensor der Kamera lässt. So erhält man ein Bild, in dem nur noch die heißen Pixel der Kamera und das Rauschen zu sehen sind. Man macht nun eine Serie solcher Aufnahmen, woraus anschließend ein sogenanntes „Masterdark“ entsteht. Das Rauschniveau der Pixel, genauer gesagt der Wert, um den alle Pixel ungefähr rauschen, ist bei gleicher Temperatur des Sensors gleichbleibend, und bei allen Pixeln ähnlich groß. Deshalb benutzt man um das Masterdark zu erstellen alle aufgenommenen Darkframes und berechnet den Durchschnittswert aller Pixel. Daraus erhält man im Masterdark einen fast gleichen Wert für alle Pixel, der dem Rauschniveau ungefähr entspricht. Da man hier den Durchschnittswert der Pixel benutzt, wird die Annäherung an das genaue Rauschniveau im Masterdark je größer, desto mehr Darkframes man benutzt. Schlussendlich subtrahiert man die Werte der Pixel im Masterdark von den Werten der entsprechenden Pixel in der Aufnahme die man kalibriert. Da man nun das Rauschniveau subtrahiert hat ist das Rauschen sehr stark vermindert geworden. Zudem wurden die kaputten Pixel eliminiert. Da es sein kann, dass für manche Pixel ein negativer Wert bei der Subtraktion des Masterdarks entsteht, suchen die Computerprogramme, die die Aufnahme verarbeitet haben, nach ihnen. Sie addieren anschließend einen kleinen Wert, sodass dieses Problem behoben wird. Nachdem dieser Prozess der Kalibrierung abgeschlossen wurde, kann man die Objekte in einer Aufnahme deutlich besser erkennen.

II. Vignettierung und Staub

Jede Aufnahme, die mit einem Teleskop vorgenommen wurde, hat eine gewisse Vignettierung. Eine Vignettierung bedeutet, dass es eine Randabschattung gibt. Je weiter außen am Sensor sich ein Pixel befindet, desto schlechter ist er belichtet. Das liegt daran, dass jedes Teleskop Licht so durchlässt, dass außen am Sensor weniger Licht ankommt als in der Mitte. Entscheidend ist für die Stärke dieses Effekts das Öffnungsverhältnis. Es

beschreibt das Verhältnis zwischen der vorderen Öffnung eines Teleskops und der Brennweite des Teleskops. Je größer dieses Öffnungsverhältnis ist, desto stärker ist die Vignettierung. Des weiteren befindet sich meistens ein bisschen Staub im Teleskop, der einzelne Stellen verdunkelt. Auch diese Effekte lassen sich bei der Kalibrierung weitgehend eliminieren. Das funktioniert folgendermaßen: Man nimmt eine gleichmäßige Lichtquelle, und platziert sie an der vorderen Öffnung des Teleskops. Nun macht man eine Aufnahme. Hier sieht man nur das Rauschen, die Vignettierung, kaputte Pixel und Staub. Objekte sind logischerweise nicht zu sehen. Zunächst bearbeitet man auch diese Aufnahme mit einem Masterdark. Jetzt bleiben in der Aufnahme nur noch die Vignettierung und der Staub, dieses Bild nennt man nun Masterflat. Anschließend dividiert man die Werte der Pixel von der zu kalibrierende Aufnahme durch die gleichen Pixel im Masterflat. Da die Vignettierung und die Staubflecken auf beiden Aufnahmen gleich stark sind, werden sie dadurch eliminiert. Dieser Prozess nennt sich “Flatfielding”. Auch dieser Vorgang soll die Analyse der Aufnahmen erleichtern, da alle Objekte nach dem Flatfielding besser zu erkennen sind.

III. Durchführung der Kalibrierung

Ich habe für die Kalibrierung das Computerprogramm MaxIm DL 5 benutzt, welches das erstellen eines Masterdarks und Masterflats aus Darkframes und Flats auf Befehl durchführen kann. Auch die Kalibrierung der Aufnahmen mithilfe von Masterdarks und dem Masterflat wurde von MaxIm DL 5 vorgenommen. Nun sind die Aufnahmen bereit für die Auswertung.

6.2 Astrometrische Auswertung der Aufnahmen

Nachdem die Aufnahmen kalibriert wurden, kann ich nun zur Auswertung der Datensätze übergehen. Ich werde die Datensätze, die ich zu dem Near Earth Object (535844) gesammelt habe, verwenden. Der erste Schritt der Auswertung ist die Positionsbestimmung anhand der Datensätze. Diese erfolgt mithilfe des Programms Astrometrica.
Ich habe an 2 Abenden, dem 20.02.2021 und dem 21.02.2021 Datensätze von (535844) gesammelt. Bei diesem Objekt handelt es sich um einen Asteroiden, der sich der Kategorie der NEOs zuordnen lässt. Am dritten Beobachtungsabend war das Objekt leider zu lichtschwach und nicht mehr zu sehen.

I. Einstellungen

Das erste was ich tun muss, um mit der Positionsbestimmung anfangen zu können, ist im Programm Astrometrica die richtigen Einstellungen zu treffen. In den Einstellungen gibt es verschiedene Kategorien:

a) Observing Site

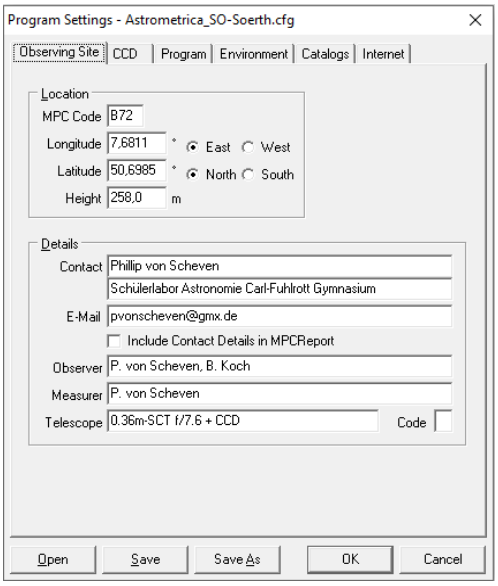


Abb. 21: Observing Site

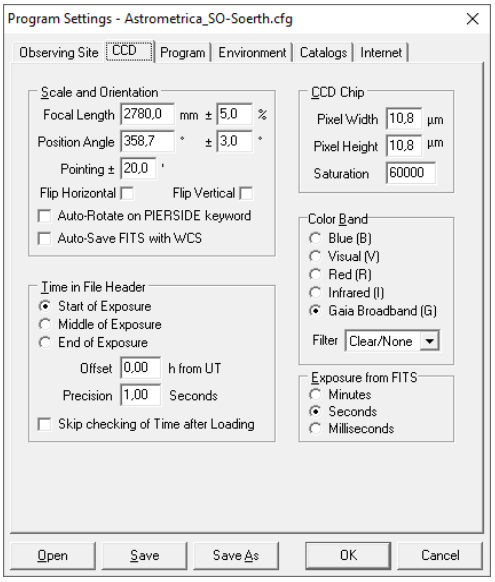


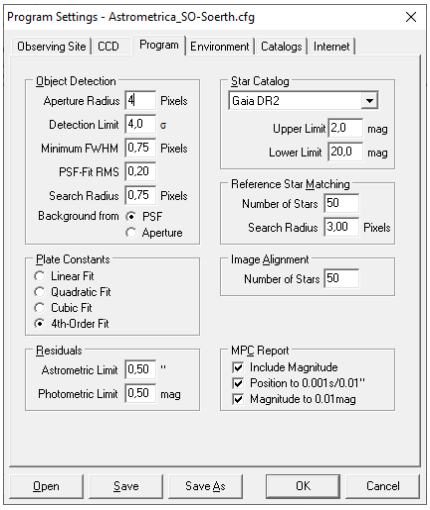
Abb. 22: CCD

In dieser Kategorie (Siehe Abb.21) trägt man zunächst den Ort des bei der Beobachtung benutzten Teleskops und die Höhe über dem Meeresspiegel, auf der es sich befindet, ein. Diese Daten werden bei der Positionsbestimmung benötigt, da der Beobachtungsort Einfluss darauf hat, wo sich das Objekt am Himmel befindet. Außerdem trägt man die relevanten Informationen über das Teleskop ein, welches man benutzt hat. Dazu zählt die Art des Teleskops, in diesem Fall ein Schmidt-Cassegrain-Teleskop, und die Art der Kamera, in diesem Fall eine Charged Coupled Device-Kamera. Zudem ist der Durchmesser vom Teleskop (0,36m) und sein Öffnungsverhältnis f/7,6 angegeben. Das Öffnungsverhältnis ergibt sich, wenn man die Brennweite durch den Durchmesser des Teleskops teilt. Zusätzlich gibt man noch einige Kontaktdaten an, die teils in der Datei mit den Resultaten der Positionsbestimmung, dem MPCReport, vermerkt werden.

b) CCD

In dieser Kategorie (Siehe Abb.22) trägt man folgendes ein: Die Brennweite des Teleskops, den Positionswinkel, die Messfehler dieser Werte, und der Messfehler bei der Angabe, auf welche Position das Teleskop gerichtet ist. Man gibt auch an, welcher Zeitpunkt der Aufnahme im FITS-Header der Aufnahme angegeben ist. In diesem Fall ist der Startzeitpunkt der Aufnahme angegeben. Man gibt auch den Messfehler der Zeit an, welcher unter einer Sekunde sein sollte. Man gibt auch an, welche Größe ein Pixel der Kamera hat, in diesem Fall 10,8 Mikrometer. Die Sättigung muss auch eingetragen werden, hier beträgt sie 60.000. Zudem wählt man den verwendeten Filter der Aufnahmen aus. Man muss auch auswählen, in welcher Einheit die Belichtungszeit im FITS-Header vermerkt wurde.

c) Program



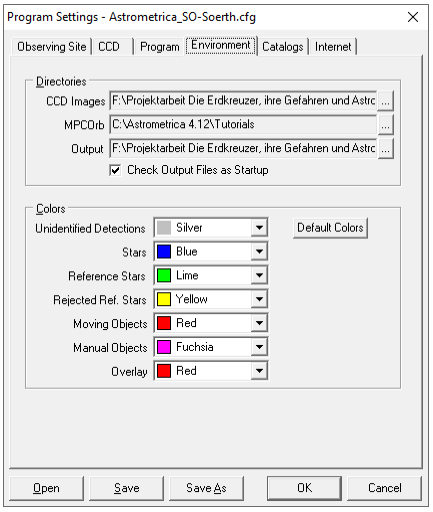


Abb. 23: Program *Abb. 24: Environment*

Hier (Siehe Abb.23) trifft man zuerst Einstellungen dazu, wie Astrometrica die Sterne erkennt, z.B. wie groß in Pixeln sie maximal sein sollten und wie oft in den Aufnahmen nach einem Stern gesucht wird, hier alle 0,75 Pixel. Die maximale Größe der Sterne in Pixeln, der Aperture Radius, beträgt hier 4 Pixel, da es sich um eine Voreinstellung für eine relativ kurze Aufnahme von 60s handelt. Je länger die Aufnahmen sind, desto größer muss der Wert werden. Man wählt außerdem, mit welcher Methode die Plattenkonstante berechnet werden soll. Die Methode 4th-Order Fit ist die genaueste, weshalb man diese wählen sollte. Man stellt des weiteren die maximale Abweichung der Positionen der Sterne von den im Sternkatalog angegebenen Positionen ein, hier eine halbe Bogensekunde. Die Abweichung von der erwarteten Helligkeit ist hier auf maximal 0,5 mag eingestellt. Man wählt auch den Sternenkatalog aus, der zur Erkennung der Sterne benutzt werden soll. Ich habe mich für Gaia DR2 entschieden, weil dieser Katalog die meisten Sterne am genauesten aufführt. Im selben Abschnitt wählt man das obere und untere Limit der Helligkeit der Objekte, die aus dem Sternenkatalog für die Positionsbestimmung verwendet werden dürfen (reference star matching). In der Kategorie Image Alignment wählt man aus, wie viele Sterne aus dem Katalog benutzt werden sollen, um den Bildausschnitt zu identifizieren. Man kann noch ein paar zusätzliche Optionen für den MPCReport, die Datei, die am Ende die aus den Aufnahmen entnommenen Informationen beinhaltet, auswählen. Die Optionen sind hier die Positionsangaben noch genauer anzuzeigen, die Helligkeit anzuzeigen und diese auch noch genauer anzuzeigen. Ich habe alles ausgewählt, da eine genauere Position immer wünschenswert ist, und die Helligkeit eine Interessante Zusatzinformation ist.

d) Environment

In Environment wählt man lediglich den Speicherort der Aufnahmen, die man analysieren will, den Speicherort der MPCOrb-Datei, und den Zielort für den MPCReport aus. Außerdem kann man auswählen, mit welchen Farben Astrometrica bei der Positionsbestimmung welche Art von Objekten markiert. Die MPCOrb- Datei ist eine Datenbank, in der die Bahnen

von allen bekannten Kleinkörpern im Sonnensystem aufgeführt sind. Man kann sie verwenden, um die bekannten Objekte, die man Beobachtet hat, und die keine Sterne sind, zu identifizieren. Dazu später mehr. Die Datenbank wird vom Minor Planet Center bereitgestellt und sollte regelmäßig aktualisiert werden.

II. Auswertung der Daten vom Beobachtungsabend 2021-02-20

Nachdem nun alle Einstellungen getroffen wurden, kann die Auswertung der Datensätze beginnen. Als erstes analysiere ich die Aufnahmen vom ersten Beobachtungsabend, 2021-02-20. Hier entnehme ich die Daten aus einer Aufnahmeserie mit 10 Bildern und einer Belichtungszeit von 60s.

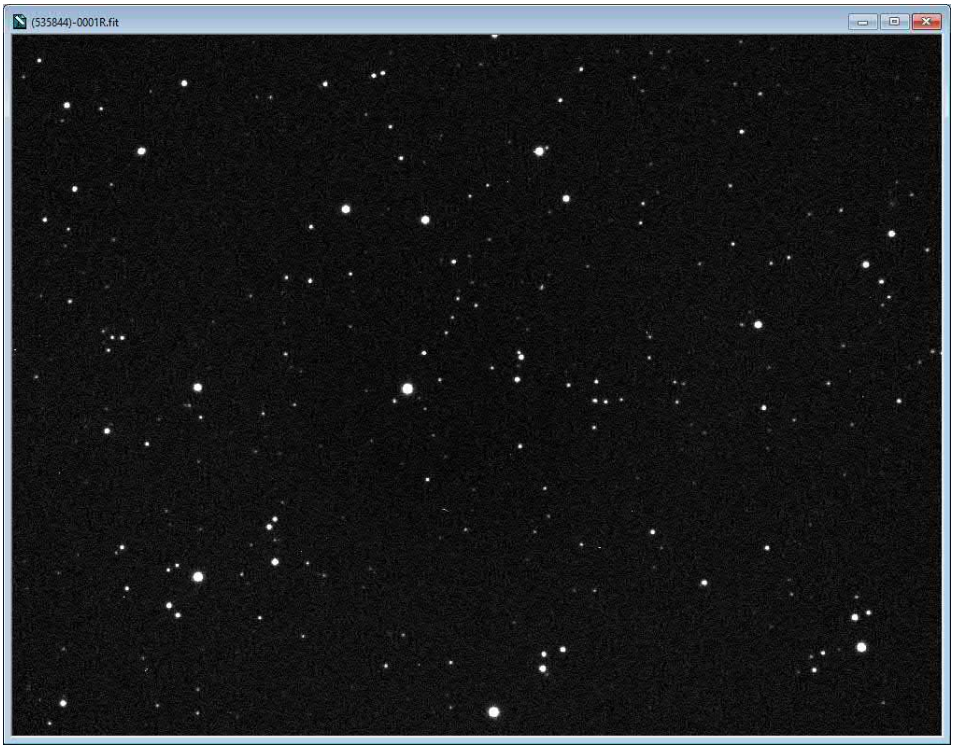


Abb. 25: Die erste Aufnahme der Serie

Zuerst öffne ich alle Aufnahmen in Astrometrica. Nachdem ich die Aufnahmen geöffnet habe, (Siehe Abb.25) muss ich die Richtigkeit des im FITS-Header angegebenen Zeitpunkt der Aufnahme bestätigen (Siehe Abb.26). Dies geschieht für jeder Aufnahme. Die Zeitpunkte stimmen bei allen verwendet Aufnahmen, ich muss also keine Korrektur vornehmen.

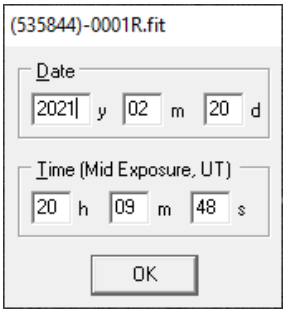


Abb. 26: Dieses Fenster öffnet sich für jede Aufnahme, die man geöffnet hat.

Man muss dank dem FITS-Header nur bestätigen.

Das erste, was das Programm tut, ist eine astrometrische Lösung für die Aufnahmen zu finden. Das bedeutet, dass Astrometrica die Sterne, die in der Aufnahme zu sehen sind, mithilfe des Sternkatalogs identifiziert, und basierend darauf jedem Pixel eine Koordinate im Bogenmaß zuweist. Hierfür muss man zunächst die Koordinaten der Bildmitte, angeben. Wenn man die Aufnahmen wie ich mit dem Programm MaxIm DL gemacht hat, ist in der Aufnahmedatei vermerkt, wo sich die Bildmitte am Himmel ungefähr befindet. MaxIm DL erstellt bei der Aufnahme nämlich einen sogenannten FITS-Header, wo wichtige Informationen wie zum Beispiel der Zeitpunkt der Aufnahme, Informationen über die Kamera und das Teleskop und die Belichtungszeit vermerkt sind. Dieser Header ist Teil der Datei, in der sich die Aufnahme befindet. Wenn dies nicht der Fall ist, empfiehlt es sich, die Position des beobachteten Kleinplaneten zum Zeitpunkt der Aufnahme anzugeben, welche Astrometrica dank der MPCOrb-Datei selbst berechnen kann. Dies funktioniert natürlich nur, wenn man einen bereits bekannten Asteroiden beobachtet hat, also sollte man stets MaxIm DL für Aufnahmen benutzen, insofern dies möglich ist.

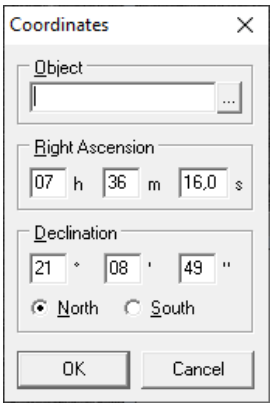


Abb. 27: Coordinates

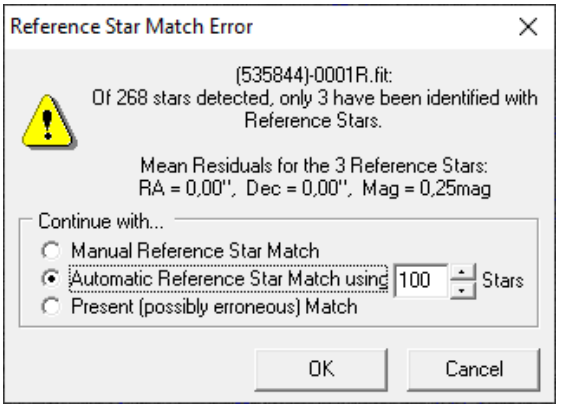


Abb. 28: Reference Star Match Error

In diesem Fenster wählt man entweder oben den beobachteten Kleinplaneten, oder die Koordinaten der Aufnahme werden unten mit den Informationen aus dem FITS-Header unten eingetragen.

Nachdem man in diesem Fenster (Siehe Abb.27) auf “OK” gedrückt hat, beginnt Astrometrica damit, zu versuchen, eine astrometrische Lösung für alle Aufnahmen zu finden. Da wir es in den Einstellungen so festgelegt haben, versucht Astrometrica es zuerst, 50 der Sterne in der Aufnahme als Referenzsterne für die astrometrische Lösung zu benutzen. 50 Sterne können allerdings zu wenig sein, um erfolgreich eine astrometrische Lösung zu finden. Dies ist auch hier so. Deshalb öffnet sich ein Fenster wie in Abbildung 28.
In diesem Fenster (Siehe Abb.28) wählt man wie hier die zweite Option. Dadurch wird die Anzahl der Sterne, die als Referenzsterne benutzt werden dürfen, verdoppelt. Dies kann theoretisch wiederholt werden, bis es funktioniert, oder bis es im Bild nicht mehr genug Sterne gibt, um die Anzahl der Referenzsterne erneut zu erhöhen. Bei diesen Aufnahmen hat Astrometrica bei 200 Referenzsternen eine astrometrische Lösung gefunden. Nun sehen die Fenster aller Aufnahmen wie folgt aus:

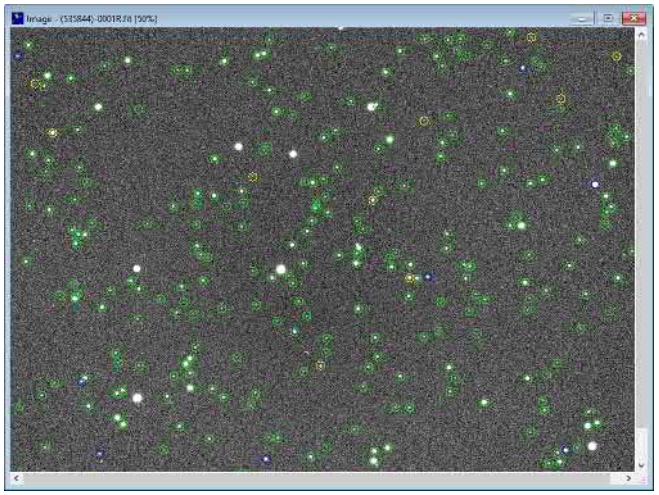


Abb. 29: Die erste Aufnahme der Serie mit astrometrischer Lösung

In grün werden hier die Referenzsterne markiert, die Astrometrica identifiziert hat. In gelb werden die erkannten Sterne markiert, die nicht als Referenzsterne benutzt wurden, die aber theoretisch genutzt werden könnten. In blau sind die Sterne markiert, die nicht identifiziert werden konnten. Zusätzlich zu diesem Fenster öffnet sich noch ein zweites:

Data Reduction Results

Image	Stars	Ref. Stars	Ref./Ast.	Fit Order	dRA	dDe	Ref./Phot.	dmag	Zero Pt.
(535844)-0001R.fit	283	267	262	4	0.13''	0.11''	225	0.18mag	25.69mag
(535844)-0002R.fit	296	271	265	4	0.14''	0.11''	218	0.20mag	25.73mag
(535844)-0003R.fit	293	270	260	4	0.13''	0.12''	228	0.18mag	25.71mag
(535844)-0004R.fit	299	280	265	4	0.14''	0.12''	233	0.19mag	25.70mag
(535844)-0005R.fit	316	288	273	4	0.12''	0.12''	235	0.18mag	25.81mag

Abb. 30: Die Informationen zu den ersten fünf Aufnahmen von (535844)

Hier (Siehe Abb.30,31) sieht man Informationen zu der astrometrischen Lösung für jedes Bild. Aufgelistet von links nach rechts finden sich die Anzahl der im Bild entdeckten Sterne, die Anzahl der Referenzsterne, die Zahl der aus dem Katalog und im Bild erkannten Sterne, und die Ordnung der Lösung der Plattenkonstante, die verwendet wurde. Des weiteren sind die durchschnittliche Differenz der Rektaszension in Bogensekunden zwischen der Position der Referenzsterne im Bild und der Position der Referenzsterne im Sternkatalog, sowie die durchschnittliche Differenz der Deklination in Bogensekunden zwischen der Position der Referenzsterne im Bild und der Position der Referenzsterne im Sternkatalog angegeben. Außerdem sind die für die Photometrie angewendeten Sterne, die durchschnittliche Abweichung der Helligkeit der Referenzsterne von der im Sternkatalog angegebenen Helligkeit, und die Helligkeit des Hintergrundes angegeben.

Data Reduction Results

Image	Stars	Ref. Stars	Ref./Ast.	Fit Order	dRA	dDe	Ref./Phot.	dmag	Zero Pt.
(535844)-0006R.fit	298	280	266	4	0.14''	0.12''	228	0.16mag	25.69mag
(535844)-0007R.fit	328	306	297	4	0.11''	0.11''	238	0.18mag	25.93mag
(535844)-0008R.fit	305	286	270	4	0.11''	0.14''	228	0.16mag	25.75mag
(535844)-0009R.fit	329	310	298	4	0.11''	0.10''	262	0.19mag	25.97mag
(535844)-0010R.fit	330	300	292	4	0.10''	0.11''	248	0.18mag	26.03mag

Abb. 31: Die Information zu den letzten 5 Aufnahmen von (535844)

Als nächstes gilt es, den Kleinplaneten in den Aufnahmen zu identifizieren. Hierfür aktiviere ich zunächst die Funktion “Known Object Overlay”. Jetzt berechnet Astrometrica, welche Kleinkörper in der Aufnahme zu sehen sein sollten, und markiert die Position, in der sie erwartet werden, in der Aufnahme (Siehe Abb.32).

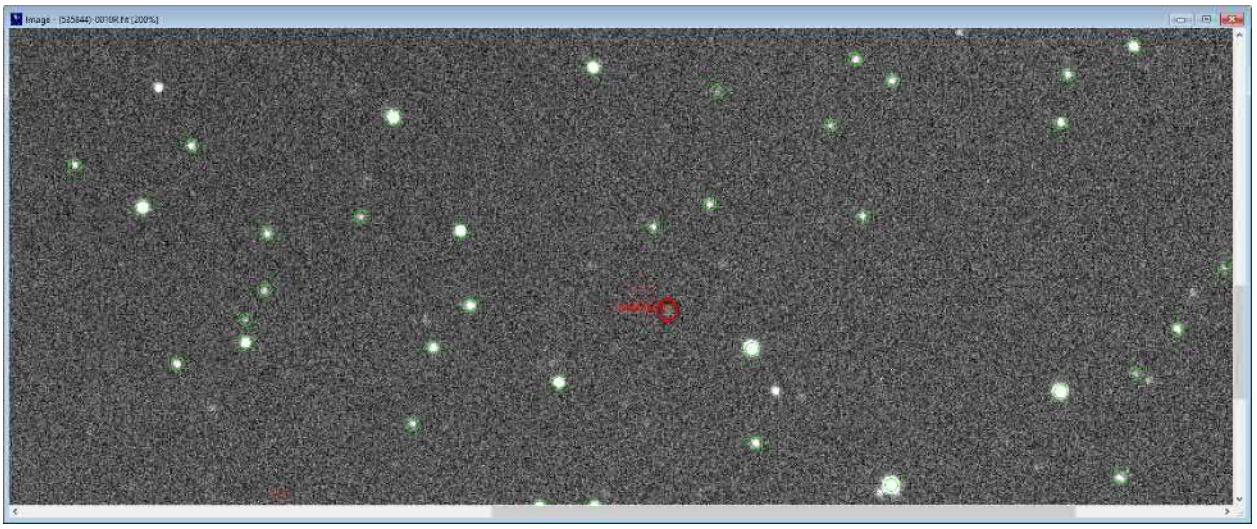


Abb. 32: Hier ist die erwartete Position von dem Ziel meiner Beobachtung, (535844), durch ein rotes Kästchen markiert. Die tatsächliche Position des Asteroiden habe ich in rot eingekreist.

Da sich (535844) nicht bei der erwarteten Position befindet, was oft vorkommt, muss ich um den Asteroiden zu identifizieren ein zusätzliches Feature von Astrometrica nutzen. Das Feature heißt “Blink Images”, und es animiert alle Aufnahmen inklusive des Known Object Overlays, sodass sie im gleichen Fenster alle nacheinander in kurzem Abstand gezeigt werden. Da sich die Markierung für die erwartete Position nun bewegt, kann man nach einer blassen Wolke im Bild suchen, die sich ungefähr gleich wie die Anzeige für die erwartete Position des Asteroiden bewegt. Bei dieser Wolke handelt es sich dann um das Objekt. Ich habe es so identifiziert und in der Aufnahme oben markiert. Wie man oben sieht, ist (535844) in diesen Aufnahmen recht blass. Das heißt, dass ich die “Stack and Track”-Methode anwenden muss, um ihn aufzuhellen, da die Position genauer bestimmt werden kann, wenn der Asteroid deutlich zu erkennen ist. Die Stack and Track- Methode funktioniert folgendermaßen: Man addiert einige Aufnahmen des Asteroiden und verschiebt die Aufnahmen dabei so, dass der Asteroid sich visuell immer an der gleichen Stelle befindet. Dadurch wird der Asteroid deutlicher sichtbar, da die blassen Wolken heller werden, wenn man sie addiert. In Astrometrica funktioniert das folgendermaßen:
Zunächst wählt man in einem Fenster die Aufnahmen, die addiert werden sollen. Da ich gerne 3 Positionen von diesem Beobachtungsabend erhalten möchte, stacke ich 3x3 Aufnahmen aus der 10er- Serie. Da ich deswegen eine Aufnahme ausmustern muss, weil 3x3 = 9 gilt, schaue ich nach, bei welcher der Aufnahmen der Messfehler in ΔRA und ΔDE der Referenzsterne am größten ist. Die Optionen wären wie man in den Informationen zu den 10 Aufnahmen sieht Nr.4 und Nr.6. Ich habe mich entschieden, Nr. 4 auszumustern, weil ich so für die Stack and Track-Methode 3 mal 3 aufeinanderfolgende Aufnahmen habe, was beim

Ausmustern von Nummer 6 nicht der Fall wäre. Ich beginne das Stack and Tracking also mit den ersten drei Aufnahmen. Zuerst wähle ich sie im folgenden Fenster aus, bestätige dann und bestätige auch die Zeitpunkte der Aufnahmestarts erneut.

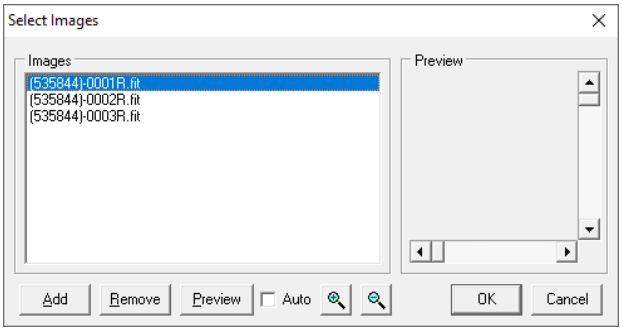


Abb. 33: Hier wähle ich die Aufnahmen aus.

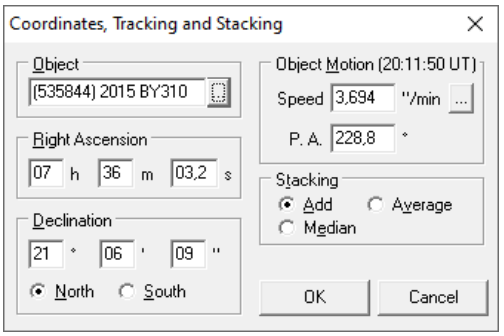


Abb. 34: Coordinates, Tracking and Stacking

Anschließend wähle ich im folgenden Fenster das Objekt in den Aufnahmen, (535844), aus. Das Programm benötigt diese Information, damit es die Bilder so verschieben kann, dass die Positionen des Objekts am Ende visuell aufeinanderliegen. Zunächst findet Astrometrica bei der anschließenden astrometrischen Lösung wieder kein Ergebnis, aber nachdem ich die Referenzsterne erneut auf 200 erhöht habe, funktioniert es. Wir erhalten wieder ein Fenster mit den Informationen zur erhaltenen astrometrischen Lösung (Siehe Abb.35).

Data Reduction Results

Image	Stars	Ref. Stars	Ref./Ast.	Fit Order	dRA	dDe	Ref./Phot.	dmag	Zero Pt.
(535844)-0001R.fit	247	237	235	4	0.13''	0.11''	204	0.15mag	25.66mag
(535844)-0002R.fit	244	223	221	4	0.12''	0.10''	186	0.17mag	25.69mag

Abb. 35: Das Fenster mit den Informationen zu den Resultaten der astrometrischen Lösung für die Stack and Track-Methode.

Der Messfehler der Referenzsterne, der bei einem Durchschnitt von 0,125'' Rektaszension und 0,105'' Deklination liegt, ist akzeptabel. Nun schaue ich ungefähr bei der Position des Objekts in den Einzelaufnahmen nach, und finde das Objekt.

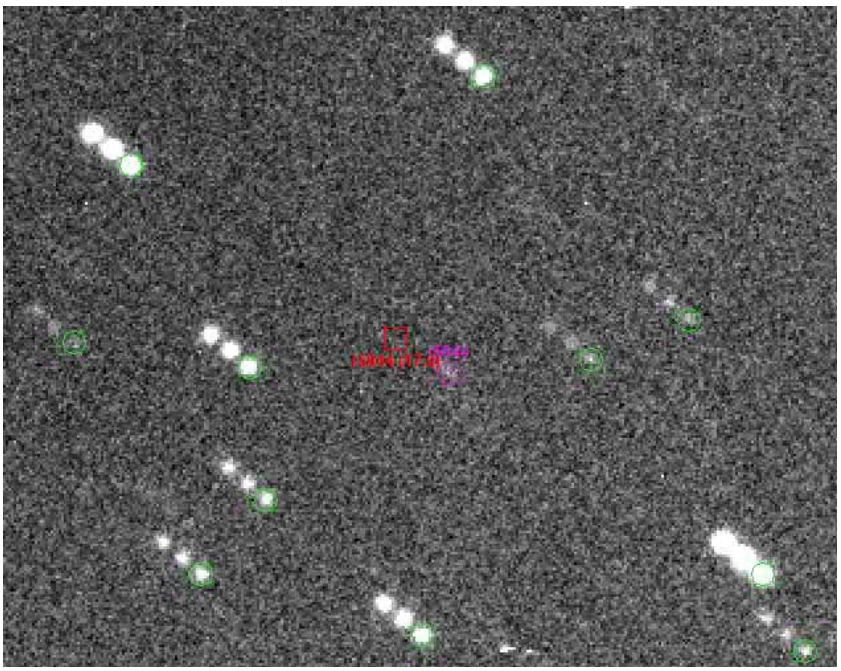


Abb. 36: Das Objekt ist hier in lila markiert. In rot sieht man erneut die erwartete Position. Durch die Sterne kann man erkennen, dass die Bilder verschoben wurden, bevor man sie addiert hat.

Man erkennt, dass (535844) zwar nicht zu einem perfekten Punkt geworden ist, aber trotzdem ist das Resultat akzeptabel (Siehe Abb.36). Als nächstes klicke ich auf das Objekt, um seine Position zu bestimmen und diese anschließend in die MPCReport-Datei einzutragen. Es öffnet sich folgendes Fenster:

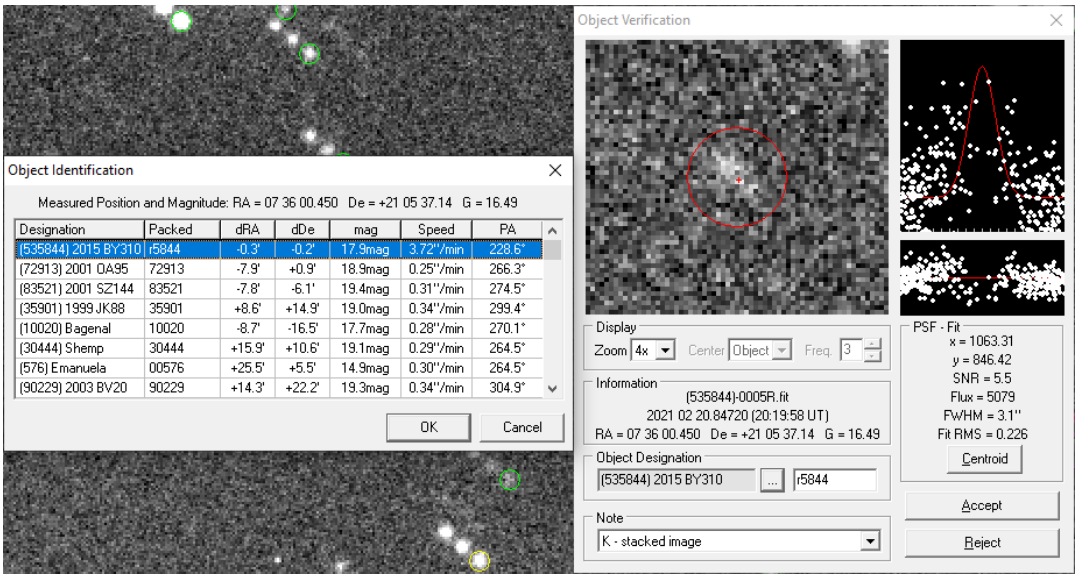


Abb. 37: Object Verification + Identification

Im Fenster rechts sieht man nun oben, welcher Punkt von Astrometrica als Mitte des Objekts erkannt wurde. Rechts davon sieht man einen Funktion, die die Verteilung der Helligkeit um die Mitte des Objekts beschreibt. Sieht man dort keine Funktion oder die Mitte ist deutlich falsch gewählt, klickt man rechts im Fenster auf “Centroid” und korrigiert die Mitte. Falls dies

nicht funktioniert, muss man in die Einstellungen zu Program gehen und den Aperture Radius auf die Größe des Kleinplaneten in Pixeln in der Aufnahme anpassen. Solche Schritte waren hier nicht nötig, da die Mitte bereits richtig gewählt wurde, nachdem der Aperture Radius im Vorhinein angepasst wurde. Ich wähle nun das Objekt, welches Astrometrica dort erkannt hat. Man klickt auf Object Designation und das links zu sehende Fenster öffnet sich. Dort sind Objekte aufgeführt, die sich zum Zeitpunkt der Aufnahme in der nähe des beobachteten Objekts befinden sollten. Durch die angegebene Entfernung sieht man hier, dass die erwartete Position von (535844) sich zu dem Zeitpunkt der Aufnahme am nächsten am beobachteten Objekt befindet. Das heißt, dass es sich hier um (535844) handeln muss. Ist dies nicht der Fall, und die erwartete Position eines anderen Objektes befindet sich näher an der Position des beobachteten Objekts, muss erneut sichergestellt werden, dass es sich bei dem beobachteten Objekt um das Objekt handelt, für das man es hält. Hierfür könnte erneut das Animieren der Aufnahmen mit dem Known Object Overlay nützlich sein. Ist man sich sicher, dass man das Objekt richtig identifiziert hat, klickt man im Fenster rechts auf “Accept”. Nun wurde die vermessene Position des Objektes in die MPCReport-Datei eingetragen. Das Stack and Tracking von Aufnahmen 1-3 ist nun abgeschlossen. Die Stack and Track-Methode wiederhole ich nun für die Aufnahmen 5-7 und 8-10, um zwei weitere Positionen für den Beobachtungsabend zu erhalten. Nachdem dies abgeschlossen wurde, kann man bereits einen Blick auf die MPCReport- Datei werfen, um zu sehen, ob alle Werte eingetragen wurden. Man öffnet die Datei entweder in Astrometrica beim Reiter “File”, oder man öffnet den Ordner, den man in den Einstellungen bei Environment als “Output” gewählt hat, und öffnet dort die Datei. Es handelt sich bei der MPCReport- Datei um eine normale Textdatei (Siehe Abb.38).

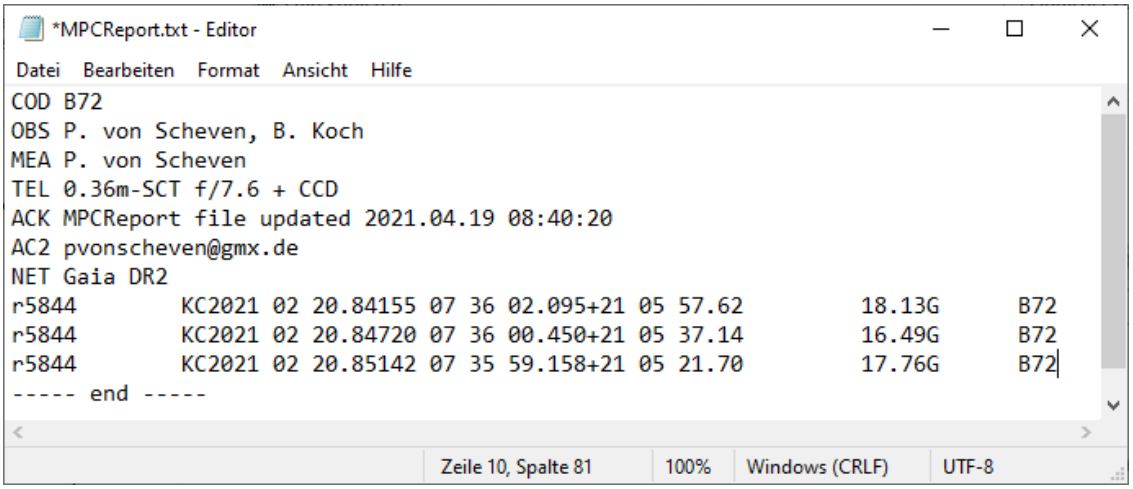


Abb. 38: Die MPCReport-Datei nach bisherigem Stand.

Hier sind die bisher bestimmten Positionen und einige Informationen über Teleskop, Kamera und die Beobachter sowie der Beobachtungsort angegeben. Diese Datei wird später für die Berechnung der Bahn des Objektes benötigt.

III. Auswertung der Daten vom Beobachtungsabend 2021-02-21

Zunächst gibt es an diesem Abend eine Serie von sechs Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 300s. Diese Aufnahmen wurden auf das Objekt nachgeführt, was bedeutet, dass die Sterne Striche sind und der einzige Punkt das Objekt ist.

Abb. 39: Die erste Aufnahme der Sechserserie. Während die Sterne zu Strichen werden, ist das Objekt als Punkt sichtbar. Es wurde hier in rot markiert.

Das Objekt ist auf den Aufnahmen (Abb.39) sehr gut zu sehen, was bedeutet, dass die Stack and Track- Methode für diesen Datensatz nicht erforderlich ist. Es müssen allerdings die Einstellungen für die Erkennung der Sterne angepasst werden, da die Striche sonst nicht als Sterne identifiziert werden können. Dafür habe ich in der Einstellungskategorie Program die Einstellung Aperture Radius auf 20 Pixel erhöht, was bedeutet, dass der Strich von einem Stern jetzt eine Länge von bis zu 40 Pixeln haben kann. Nun lasse ich Astrometrica die astrometrische Lösung finden. Nachdem dies abgeschlossen wurde, öffne ich erneut das Known Object Overlay, um zu überprüfen, ob es sich bei dem Punkt tatsächlich um (535844) handelt.

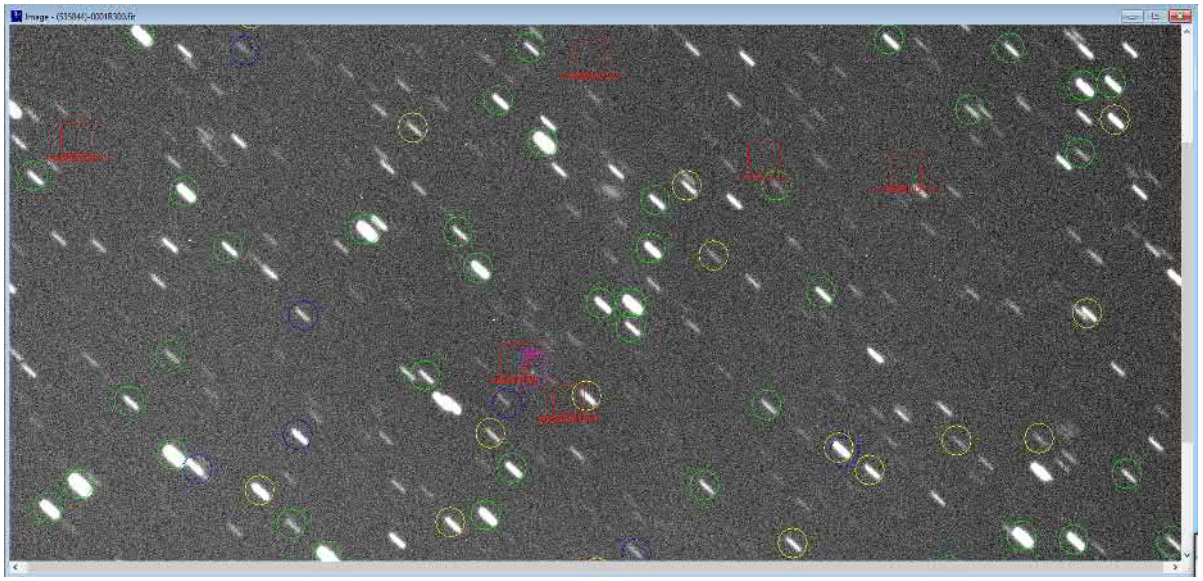


Abb. 40: Die erste Aufnahme aus der Serie mit astrometrischer Lösung. Die Farbgebung der Markierungen entspricht der, die auch beim Auswerten des ersten Beobachtungsabends verwendet wurde. Das Objekt ist hier lila markiert, da der Screenshot entstand, nachdem die Position bereits vermessen wurde.

Wie man hier (Siehe Abb.40) sieht, befindet sich der Punkt sogar zum Teil noch im Bereich, in dem (535844) an dem Abend zu erwarten war, der hier wieder als rotes Kästchen mit der Beschriftung “r5844” markiert ist. Es befindet sich zwar auch die Markierung der Stelle eines anderen Kleinplaneten in der Nähe vom Punkt, da die Aufnahme aber auf das Objekt nachgeführt wurde, und seine Eigenbewegung unterschiedlich zu der vom Objekt ist, wäre dieser nicht als Punkt zu erkennen. Die Eigenbewegung von (535844) betrug zum Zeitpunkt der Aufnahme ungefähr -175.808’’/h Rektaszension und -159.539’’/h Deklination, während sich das Objekt in der Nähe, 2020 LS, zu dem Zeitpunkt mit ungefähr -18.9604’’/h Rektaszension und 8.564775’’/h Deklination bewegte [HORiZONS Web-Interface, NASA]. Es ist also ausgeschlossen, dass es sich um ein anderes Objekt handelt. Da es jetzt sicher ist, dass es sich bei dem aufgenommenen Objekt um (535844) handelt, kann die Position nun vermessen werden. Vorher habe ich allerdings den Aperture Radius in der Kategorie Program der Einstellungen wieder verringert, um weniger vom Hintergrund mitzumessen und so ein genaueres Ergebnis zu erzielen. Das Vermessen der Positionen für diesen Datensatz funktioniert nachdem man auf das Objekt klickt genauso wie bei dem letzten Datensatz, weshalb ich diesen Vorgang hier nicht erneut erklären werde. Nachdem das Objekt auf allen sechs Aufnahmen vermessen wurde, prüfe ich nun erneut, ob alle Daten in die MPCReport-Datei eingetragen wurden:

```
COD B72
OBS P. von Scheven, B. Koch
MEA P. von Scheven
TEL 0.36m-SCT f/7.6 + CCD
ACK MPCReport file updated 2021.04.13 11:56:22
AC2 pvonscheven@gmx.de
NET Gaia DR2
r5844        KC2021 02 20.84155 07 36 02.095+21 05 57.62         18.13G      B72
r5844        KC2021 02 20.84720 07 36 00.450+21 05 37.14         16.49G      B72
r5844        KC2021 02 20.85142 07 35 59.158+21 05 21.70         17.76G      B72
r5844        dC2021 02 21.80050 07 31 50.096+20 06 25.01         16.07G      B72
r5844         C2021 02 21.80681 07 31 48.324+20 06 02.65         17.22G      B72
r5844        dC2021 02 21.81447 07 31 46.118+20 05 33.94         17.24G      B72
r5844        dC2021 02 21.83975 07 31 38.234+20 03 53.03         17.28G      B72
r5844         C2021 02 21.84605 07 31 36.568+20 03 31.35         17.18G      B72
r5844         C2021 02 21.85237 07 31 34.320+20 03 02.68         17.16G      B72
----- end -----
```

Abb. 41: Die MPCReport-Datei nach neuem Stand

Von diesem Beobachtungsabend gibt es noch einen Datensatz, nämlich 10 Aufnahmen mit 120s Belichtungszeit. Da die Belichtungszeit hier kürzer als beim letzten Datensatz und somit auch der Kleinplanet blasser ist, werde ich hier wieder die Stack and Track-Methode verwenden. Diese Aufnahmen wurden auch auf (535844) nachgeführt. Zunächst habe ich allerdings in den Einstellungen bei Program den Aperture Radius wieder auf 10 Pixel gesenkt, da die Sterne zwar immer noch Striche aber dank der kürzeren Belichtungszeit nicht mehr sehr lang sind. Da ich beim Erstellen der Aufnahmen leider versäumt habe, einzustellen, dass die Bildmitte im FITS-Header vermerkt werden soll, habe ich stattdessen die Position des Objektes gewählt. Dies hat gut funktioniert. Astrometrica konnte bei den Aufnahmen zwar schon bei 100 Referenzsternen eine astrometrische Lösung finden, aber ich habe die Anzahl der Referenzsterne dennoch auf 200 erhöht, um ein leicht genaueres Ergebnis zu erhalten (Siehe Abb.42+43).

Data Reduction Results

Image	Stars	Ref. Stars	Ref./Ast.	Fit Order	dRA	dDe	Ref./Phot	dmag	Zero Pt.
(535844)-0001R120.fit	233	213	144	4	0.16''	0.15''	156	0.15mag	26.92mag
(535844)-0002R120.fit	225	197	153	4	0.16''	0.15''	145	0.14mag	26.90mag
(535844)-0003R120.fit	240	217	154	4	0.19''	0.17''	169	0.11mag	27.01mag
(535844)-0004R120.fit	236	212	151	4	0.16''	0.17''	151	0.11mag	27.00mag
(535844)-0005R120.fit	239	214	167	4	0.16''	0.14''	172	0.19mag	26.88mag

Data Reduction Results

Image	Stars	Ref. Stars	Ref./Ast.	Fit Order	dRA	dDe	Ref./Phot	dmag	Zero Pt.
(535844)-0006R120.fit	244	213	154	4	0.20''	0.19''	158	0.13mag	27.05mag
(535844)-0007R120.fit	266	240	181	4	0.15''	0.15''	194	0.17mag	27.06mag
(535844)-0008R120.fit	278	263	204	4	0.18''	0.16''	223	0.17mag	27.07mag
(535844)-0009R120.fit	278	261	225	4	0.14''	0.12''	235	0.16mag	27.06mag
(535844)-0010R120.fit	274	258	214	4	0.12''	0.12''	234	0.11mag	27.16mag

Abb. 42+43: Die Ergebnisse der Datenanalyse der Aufnahmen

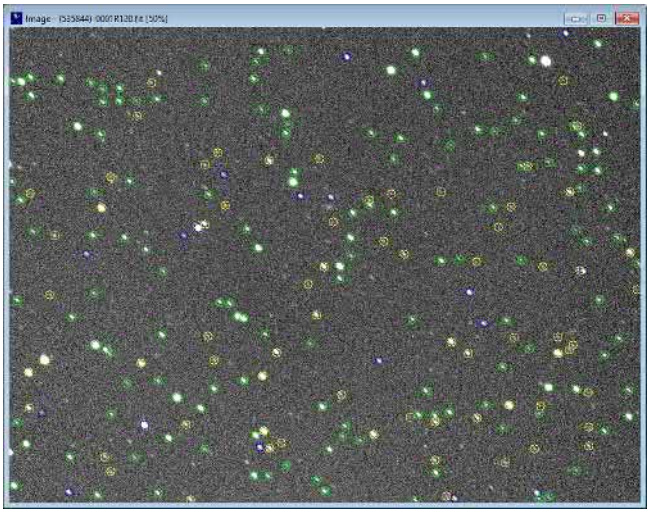


Abb. 44: Die erste Aufnahme dieser Serie mit Astrometrischer Lösung. Die farbliche Markierung gleicht der aus den letzten Aufnahmen.

Ich muss bei diesem Datensatz (Abb.44) wieder eine der Aufnahmen ausmustern, da ich erneut nur 3x3 = 9 Aufnahmen verwenden kann und insgesamt 10 vorhanden sind. Ich entscheide mich für Aufnahme 6, da diese wie bei den Ergebnissen zu sehen ist den größten Messfehler hat. Das heißt die Serien, die ich für die Stack and Track-Methode verwenden werde, lauten den Nummerierungen der Aufnahmen nach wie folgt: [1,2,3], [4,5,7] und [8,9,10]. Bevor ich mit dem Stack-and-Tracking beginne, werde ich aber wie beim ersten Datensatz das Objekt auf den Aufnahmen mithilfe vom Known Object Overlay und der Blink Images-Funktion ausfindig machen (Siehe Abb.45).

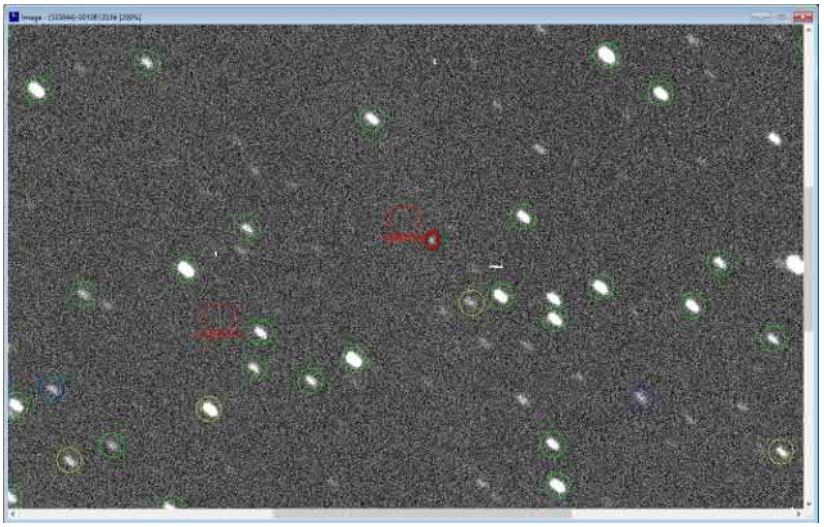


Abb. 45: Aufnahme 10. Das Objekt ist durch einen roten Kreis markiert.

Wie man hier sieht, ist das Objekt lichtschwächer als in den Aufnahmen mit 300s Belichtungszeit, was zu erwarten war. Zudem befindet es sich erneut rechts unterhalb von seiner erwarteten Position. Da ich jetzt weiß, wo sich das Objekt in den Aufnahmen befindet, nutze ich nun wie beim ersten Datensatz die Stack and Track-Methode, um die

Positionen des Objektes zu vermessen (Abb.46). Ich beschreibe den Prozess nicht noch einmal im Detail, weil er dem des ersten Datensatzes gleicht.

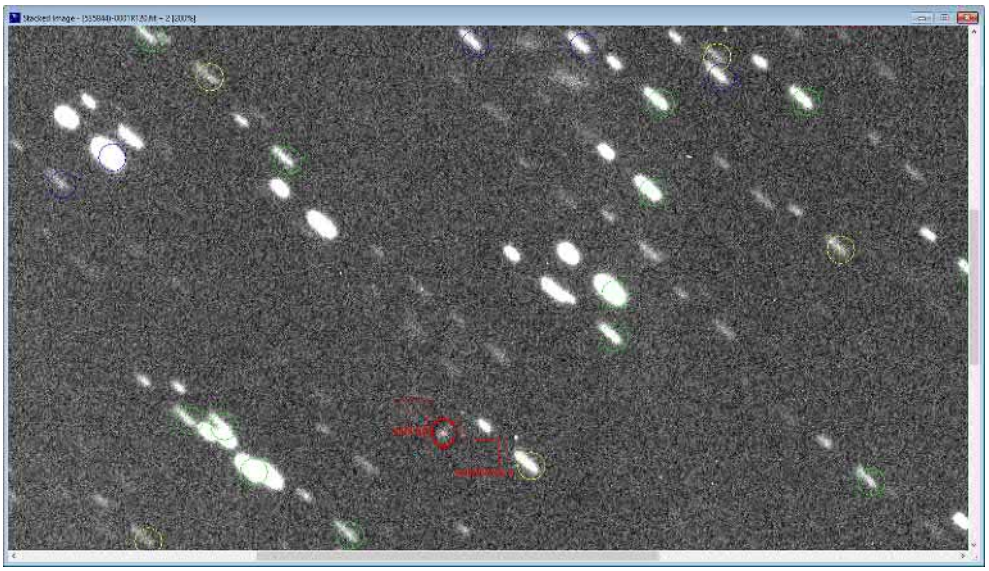


Abb. 46: Das Resultat vom Stack and Tracking von Aufnahmen 1,2 und 3.

Data Reduction Results

Image	Stars	Ref. Stars	Ref./Ast.	Fit Order	dRA	dDe	Ref./Phot.	dmag	Zero Pt.
(535844)-0001R120.fit	154	136	117	4	0.14''	0.14''	102	0.15mag	26.91mag
(535844)-0002R120.fit	153	132	114	4	0.15''	0.14''	104	0.17mag	26.86mag

Abb. 47: Die Informationen zur Astrometrischen Lösung vom Stack and Tracking der Aufnahmen 1,2, und 3

Data Reduction Results

Image	Stars	Ref. Stars	Ref./Ast.	Fit Order	dRA	dDe	Ref./Phot.	dmag	Zero Pt.
(535844)-0004R120.fit	162	146	117	4	0.15''	0.16''	105	0.12mag	26.97mag
(535844)-0005R120.fit	161	143	122	4	0.14''	0.11''	104	0.13mag	26.93mag

Abb. 48: Die Informationen zur Astrometrischen Lösung vom Stack and Tracking der Aufnahmen 4,5, und 7

Data Reduction Results

Image	Stars	Ref. Stars	Ref./Ast.	Fit Order	dRA	dDe	Ref./Phot.	dmag	Zero Pt.
(535844)-0008R120.fit	213	203	171	4	0.19''	0.15''	181	0.21mag	27.01mag
(535844)-0009R120.fit	211	193	182	4	0.12''	0.11''	171	0.14mag	27.06mag

Abb. 49: Die Informationen zur Astrometrischen Lösung vom Stack and Tracking der Aufnahmen 8,9, und 10

Das Resultat vom Stack and Tracking auf der letzten Seite sieht so (Siehe Abb.47,48,49) aus, als ob es nur aus 2 Aufnahmen bestehen würde, allerdings sind es definitiv 3 Aufnahmen. Zwei von ihnen erfolgten direkt nacheinander, was zufolge hat, dass sich aus den Sternen in den beiden Aufnahmen ein größerer Strich bildet, anstelle davon, dass eine Lücke zwischen den Sternen entsteht. Deswegen gibt es auf der Aufnahme nur einen kleinen und einen größeren Strich pro Stern. Nachdem das Stack and Tracking erfolgt ist, war das Objekt immer sehr gut zu erkennen, was man auch im Beispiel auf der letzten Seite sehen kann. Nachdem ich die Positionen des Objektes mit der gleichen Methode, die in den anderen Datensätzen verwendet wurde, vermessen habe, sieht die MPCReport-Datei nun so aus:

```
MPCReport.txt
COD B72
OBS P. von Scheven, B. Koch
MEA P. von Scheven
TEL 0.36m-SCT f/7.6 + CCD
ACK MPCReport file updated 2021.04.27 16:15:24
AC2 pvonscheven@gmx.de
NET Gaia DR2
r5844        KC2021 02 20.84155 07 36 02.095+21 05 57.62         18.13G      B72
r5844        KC2021 02 20.84720 07 36 00.450+21 05 37.14         16.49G      B72
r5844        KC2021 02 20.85142 07 35 59.158+21 05 21.70         17.76G      B72
r5844        dC2021 02 21.80050 07 31 50.096+20 06 25.01         16.07G      B72
r5844        KC2021 02 21.80552 07 31 48.73 +20 06 07.9          17.4 G      B72
r5844         C2021 02 21.80681 07 31 48.324+20 06 02.65         17.22G      B72
r5844        dC2021 02 21.81447 07 31 46.118+20 05 33.94         17.24G      B72
r5844        KC2021 02 21.82417 07 31 43.10 +20 04 55.3          17.3 G      B72
r5844        dC2021 02 21.83975 07 31 38.234+20 03 53.03         17.28G      B72
r5844         C2021 02 21.84605 07 31 36.568+20 03 31.35         17.18G      B72
r5844        KC2021 02 21.85108 07 31 34.95 +20 03 10.4          17.2 G      B72
r5844         C2021 02 21.85237 07 31 34.320+20 03 02.68         17.16G      B72
----- end -----
```

Abb. 50: Finale MPCReport-Datei von (535844)

Nun wurden in allen Datensätzen, die ich von (535844) aufgenommen habe, so viele Positionen bestimmt wie möglich. Wie man sieht, konnte ich Insgesamt 12 Positionen vermessen (Siehe Abb.50).

6.3 Berechnung der Bahnelemente und Zusätzliches

I. Berechnung der Bahnelemente von (535844)

Jetzt werde ich die Bahn von (535844) anhand von den Positionen, die ich vermessen habe, berechnen. Ich werde zusätzlich dazu auch noch die Bahn vom NEO mit der Nummer (99942), dem sehr bekannten Asteroiden Apophis, berechnen. Dafür habe ich auch von ihm selbst Aufnahmen angefertigt und anhand von ihnen Positionen Positionen von Apophis bestimmt. Die MPCReport-Datei von Apophis sieht wie folgt aus:

```
*MPCReport (99942).txt - Editor
Datei  Bearbeiten  Format  Ansicht  Hilfe
COD B72
OBS P. von Scheven, B. Koch
MEA P. von Scheven
TEL 0.36m-SCT f/7.6 + CCD
ACK MPCReport file updated 2021.04.29 16:43:20
AC2 pvonscheven@gmx.de
NET Gaia DR2
99942        KC2021 02 20.94403 10 26 34.57 -16 06 16.9          14.0 G      B72
99942        KC2021 02 20.94618 10 26 33.967-16 06 13.07         15.46G      B72
99942        KC2021 02 20.94832 10 26 33.369-16 06 09.72         15.49G      B72
99942        KC2021 02 21.89958 10 22 22.017-15 39 02.91         15.06G      B72
99942        KC2021 02 21.91396 10 22 17.940-15 38 37.92         14.91G      B72
99942        KC2021 02 21.92869 10 22 13.738-15 38 12.87         14.91G      B72
99942        KC2021 02 24.89917 10 08 44.190-14 02 10.96         15.36G      G04
99942        KC2021 02 24.90459 10 08 42.593-14 01 59.81         14.92G      G04
99942        KC2021 02 24.90951 10 08 41.122-14 01 49.50         15.00G      G04
----- end -----
Zeile 18, Spalte 1   100%   Windows (CRLF)   UTF-8
```

Abb. 51: MPCReport-Datei von Apophis

Ich habe 9 Positionen vermessen, jeweils 3 für jeden Beobachtungsabend. Die oben vermerkten Informationen gelten nur für die Positionen, deren Aufnahmen wie rechts steht am Teleskop mit dem MPC Code B72 aufgenommen wurden. Der Beobachtungsabend am 24.02.2021 fand am Teleskop mit dem MPC Code G04 statt, wo als Information zum Teleskop und der Kamera folgendes gilt: 0.51-m CDK f/6.7 Corrected Dall-Kirkham + CCD. Es ist nicht schlimm, dass dies nicht in der MPCReport-Datei vermerkt ist, da man für die Berechnung der Bahn eines Objektes im Endeffekt nur die vermessene Position und den Ort, von dem aus sie gemessen wurde, benötigt. Da bei jeder vermessenen Position der Ort des Teleskops separat vermerkt ist, entstehen dadurch keine Fehler.
Die Berechnung der Bahnelemente von (535844) und (99942) anhand der Positionen, die ich von ihnen vermessen habe, erfolgt durch das Computerprogramm FindOrb. Um die Berechnung durchzuführen, öffne ich zunächst das Programm, und wähle dann die Option “Select file containing astrometry” (Siehe Abb.52).

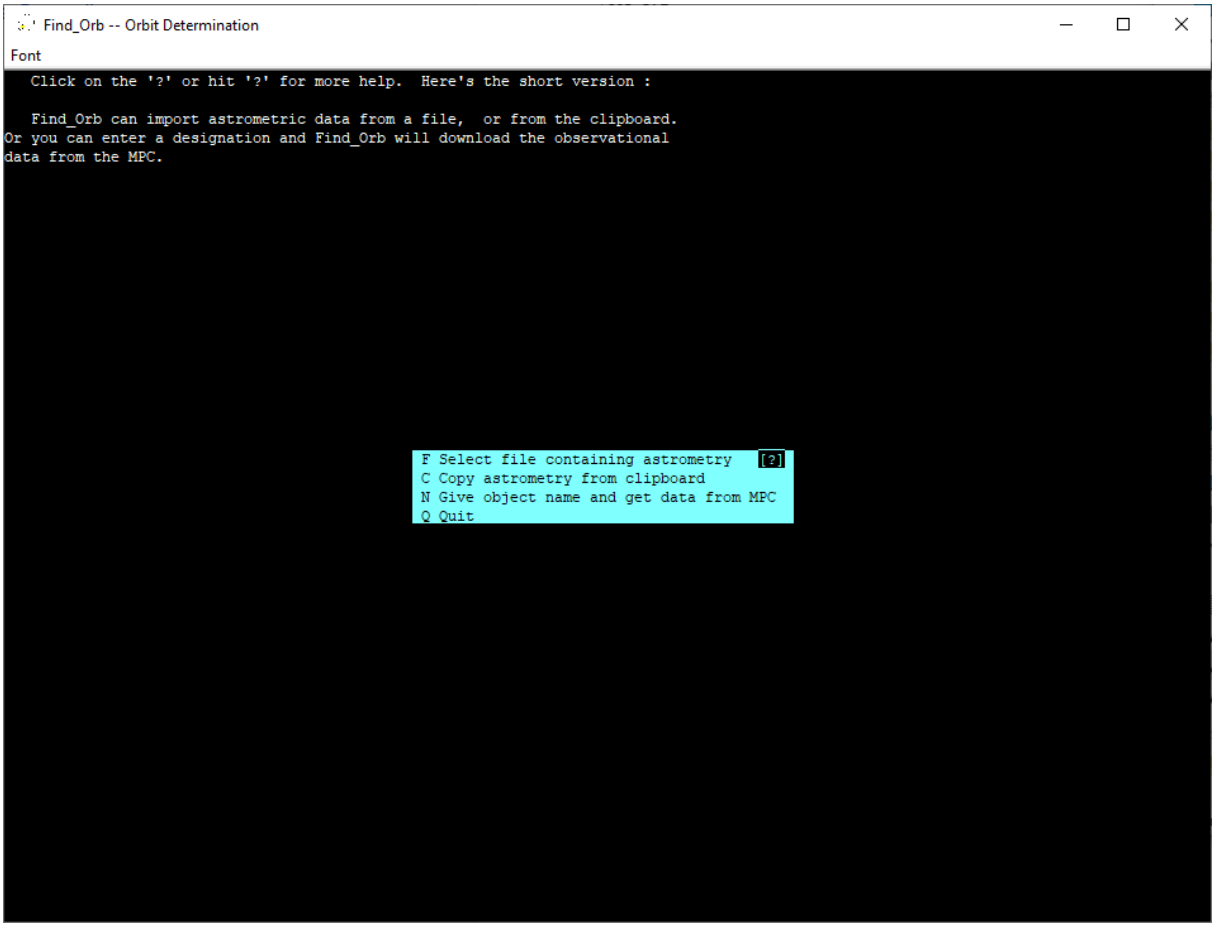


Abb. 52: Der Startbildschirm von FindOrb.

Anschließend wähle ich die MPCReport-Datei von (535844) aus, da ich die Bahn von diesem Objekt zuerst berechnen möchte. Nun berechnet das Programm die Bahnelemente.

```
R1: .08072  R2: .07695  Quit Open... NewObj AddObj epheM Full Herget Vaisa resiD Gauss constr Epoch all_perts Undo NonGravs HelioOnly
(1)Mer (2)Ven (o)Ear (4)Mar (5)Jup (6)Sat (7)Ura (8)Nep (9)Plu (o)Moo (a)Ast
Click on an observation to get information about it.  Right-click to get
further options.  Ctrl-click to select multiple observations.          10:12:36
Version Mar 12 2021
Using DE421/LE421; covers years 1899.9 to 2050.0
Orbital elements:  (535844)                                    MOIDs: Me  0.527490 Ve  0.249083 Ea  0.023132 Ma  0.019333
   Perihelion 2021 Apr 3.58656 ± 1.88 TT = 14:04:39 (JD 2459308.08656)   MOIDs: Ju  2.803945 Sa  7.130429 Ur 17.253162 Ne 27.682135
Epoch 2021 Feb 21.0 TT = JDT 2459266.5   Earth MOID: 0.0231   Ma: 0.0193   Find_Orb ver: Mar 12 2021 21:18:28
M 338.89675027 ± 4.3              (J2000 ecliptic)          Find_Orb     Tisserand relative to Earth: 2.93382
n   0.50745355 ± 0.0845           Peri.  229.18140 ± 0.9                 Earth encounter velocity 7.7174 km/s
a   1.55670091 ± 0.188            Node   328.85226 ± 0.20                Barbee-style encounter velocity: 7.8423 km/s
e   0.3884355 ± 0.0726            Incl.    4.77187 ± 0.27                Diameter 217.2 meters (assuming 10% albedo)
P   1.94/709.41d           H 21.4   G  0.15   U 11.1                   Score: 1.118767
q 0.95202301 ± 0.00604    Q 2.16137881 ± 0.381
10 of 12 observations 2021 Feb. 20-21 (24.2 hr); mean residual 0".93
   YYYY MM DD.DDDDD   RA (J2000)   dec      sigmas   mag     ref Obs     Xres  Yres   delta  R
 KC2021 02 20.84155 07 36 02.095+21 05 57.62         18.13GV     B72     .58+  .63+  .08072 1.0522
 KC2021 02 20.84720 07 36 00.450+21 05 37.14         16.49GV     B72     .26+  .03-  .08070 1.0522
 KC2021 02 20.85142 07 35 59.158+21 05 21.70         17.76GV     B72     .84-  .63-  .08069 1.0521
 dC2021 02 21.80050 07 31 50.096+20 06 25.01         16.07GV     B72    1.6-  1.5-  .07714 1.0480
 KC2021 02 21.80552 07 31 48.73 +20 06 07.9          17.4 GV     B72     .40+  .76+  .07712 1.0480
  C2021 02 21.80681 07 31 48.324+20 06 02.65         17.22GV     B72     .15+  .48+  .07711 1.0480
 dC2021 02 21.81447 07 31 46.118+20 05 33.94         17.24GV     B72    1.6+  1.3+  .07708 1.0480
 KC2021 02 21.82417 07 31 43.10 +20 04 55.3          17.3 GV     B72     .40+  .23+  .07705 1.0479
 dC2021 02 21.83975 07 31 38.234+20 03 53.03         17.28GV     B72    1.6-  1.5-  .07699 1.0479
  C2021 02 21.84605 07 31 36.568+20 03 31.35        x17.18GV     B72   ( 1.9+  1.4+) .07697 1.0478
 KC2021 02 21.85108 07 31 34.95 +20 03 10.4          17.2 GV     B72     .68+  .17+  .07695 1.0478
  C2021 02 21.85237 07 31 34.320+20 03 02.68        x17.16GV     B72   ( 2.7-  2.5-) .07694 1.0478
```

Abb. 53: Das Fenster mit den Resultaten der Berechnung der Bahn von (535844) durch FindOrb

Ganz oben im Fenster (Abb.53) sieht man eine Leiste, in der einem diverse zusätzliche Funktionen des Programms angeboten werden. Direkt darunter kann man auswählen, von welchen Körpern das Programm die Anziehungskraft bei der Berechnung der Bahn berücksichtigen soll. Wie man sieht, wurde bei der Berechnung die Anziehungskraft des Mondes und der Erde berücksichtigt, weil die anderen Planeten sich in der nächsten Zeit nicht in der Nähe von (535844) befinden und die Bahn daher nur unmaßgeblich beeinflussen. Der rot markierte Bereich im Programm zeigt, von welchem Jahr bis zu welchem Jahr einige Daten außerhalb der Positionen gültig sind, die das Programm während der Berechnung benutzt hat. In diesem Fall sind diese Daten von 1899 bis 2050 gültig, wie man sieht. Im gelb markierten Bereich darunter findet man die Bahnelemente, welche in den SI-Einheiten angegeben werden und durch ihre englischen Kürzel oder Formelbuchstaben angegeben werde. Die große Halbachse beträgt laut den Messungen ungefähr 1,55 astronomische Einheiten, die Exzentrizität ist ungefähr 0,388. Die Bahnebene hat eine Inklination von ungefähr 4,8°, und die Länge des aufsteigenden Knotens beträgt ungefähr 328,9°. Der Winkel vom Perihel hat eine Größe von ungefähr 229,2°, und der Zeitpunkt, zu dem sich (535844) im Perihel befindet, ist ungefähr der dritte April 2021. Damit haben wir nun die wichtigen Bahnelemente, die für eine Ephemeridenrechnung benötigt werden. FindOrb zeigt aber noch andere interessante Informationen an, zum Beispiel die nächste Annäherung das Asteroides an die Erde. Laut dem Programm nähert sich der Asteroid der Erde bis auf eine Distanz von 0,02 astronomischen Einheiten an. Das bedeutet, dass (535844) ein PHA ist, da er sich der Erde mehr als 0,05 astronomische Einheiten annähert. Außerdem schätzt FindOrb einen Wert für Albedo, also die Reflektivität vom Asteroiden des gesamten Lichtes in Prozent ein. Daraus berechnet FindOrb dann den Durchmesser des Objektes, angenommen es handelt sich dabei um eine Kugel. Hier hat das Programm einen Albedo-Wert von 10% angenommen, und daraus einen Durchmesser von 217,2 m berechnet. Im Abschnitt unterhalb des gelb gefärbten Abschnittes sieht man alle Werte, die für die Berechnung der Bahnelemente benutzt wurden. Die Werte, die zu sehr

von den anderen abwichen, wurden dort wo der Messfehler steht grün markiert, und für die Berechnung nicht verwendet. Der Messfehler, der bei unseren Messungen von diesem Objekt durchschnittlich im Gegensatz zu anderen Messwerten vorkommt, ist 0,93”.

II. Berechnung der Bahnelemente von (99942) Apophis

Als nächstes füttere ich das Programm mit den Messergebnissen von Apophis. Dies funktioniert genauso wie bei (535844). Dabei ergibt sich folgendes: (Siehe Abb.54)

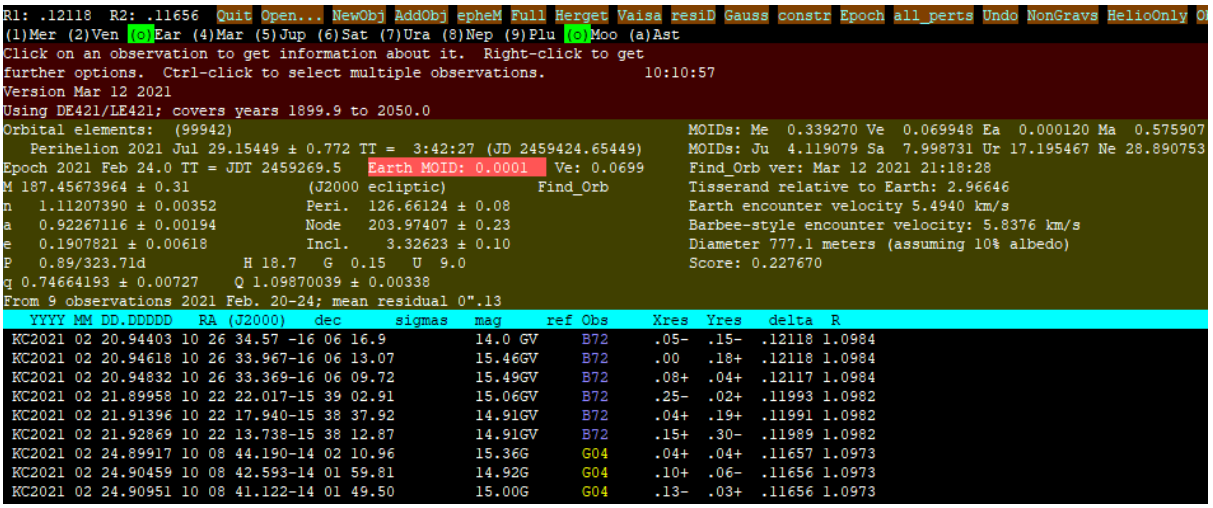


Abb. 54: Fenster mit den Resultaten der Bahnberechnung von Apophis.

Der Wert der großen Halbachse liegt bei ungefähr 0,922 astronomischen Einheiten. Die Exzentrizität hat einen Wert von ungefähr 0,19. Die Bahnebene hat eine Inklination von ungefähr 3,32°, und die Länge des aufsteigenden Knotens beträgt ungefähr 204°. Das Perihel liegt bei einem Winkel von ungefähr 127° und das Objekt befindet sich dort ungefähr am neunundzwanzigsten Juli 2021. Der durchschnittliche Messfehler von den Positionen, die wir hier gemessen haben, beträgt 0,13 Bogensekunden. Bei einem Albedo von 10% und einer Kugelform hätte das Objekt einen Durchmesser von 777,1 m. Was hier besonders auffällt, ist das Objekt sich laut den Berechnungen der Erde bis auf 0,0001 astronomische Einheiten annähert. Dies würde zwar keinen Zusammenstoß bedeuten, da die Erde selbst 12.742 km [13] oder 0,00008 astronomische Einheiten groß ist, und der Radius somit 6371 km [13] oder 0,00004 AU beträgt, aber dies ist eine sehr nahe Annäherung. Diese Information wurde rot markiert, da es bei der Berechnung immer noch einen Messfehler gibt und sich für die Bestätigung, dass es sich um keinen Zusammenstoß handelt, empfiehlt, weitere Beobachtungen und Messungen vorzunehmen.

III. Zusätzliches

a) Berechnung der Sprengkraft von (99942) Apophis

Als zusätzliche Information werde ich nun noch berechnen, welche Explosionskraft in TNT-Äquivalent Apophis bei einem Zusammenstoß mit der Erde hätte. Hierfür nimmt man

an, dass es sich bei dem Asteroiden um einen soliden Asteroiden handelt, der beim Eintritt in die Erdatmosphäre nicht zerbricht. Um dies zu berechnen werden drei Informationen benötigt: Die relative Geschwindigkeit vom Asteroiden und der Erde beim Zusammenstoß, der Radius des Objektes und seine Dichte. Die relative Geschwindigkeit wird von FindOrb mithilfe des Tisserand-Parameters berechnet und als "Tisserand relative to earth" angezeigt. Hier beträgt sie ungefähr 2,966 km/s, also ungefähr 2966 m/s. Der Radius von Apophis wird bei den Annahmen, dass sein Albedo-Wert 10% und er eine Kugel ist ungefähr 388 m, also ungefähr die Hälfte des von FindOrb mit diesen Annahmen angegebenen Durchmessers. Apophis hat eine Dichte von Schätzungsweise 3,2g / cm³ [14], und in kg/m³ umgerechnet eine Dichte von

$\rho = \frac{m}{V}$[12]

$\frac{3,2}{1000} kg \times 100^{3} cm^{3} = 3200 kg/m^{3}$

also 3200 kg/m³. Nun berechnen wir das Volumen von Apophis in m³ mit der Formel für das Volumen einer Kugel:

$\frac{4}{3}\pi \times r^{3}$[12]

Damit rechnen wir:

$\frac{4}{3}\pi \times (388m)^{3} = 244671726 m^{3}$

Also nehmen wir an, Apophis hat ein Volumen von 244.671.726m³. Nun berechnen wir mit der Formel für die Masse eines Objektes Apophis Masse:

$Q = \frac{m}{V} \Rightarrow m = Q \times V$

$3200 kg/m^{3} \times 244671726\, m^{3} \approx 7,83 \times 10^{11} kg$

Nun benutzen wir die nun bekannte Masse und relative Geschwindigkeit, um mit der Formel für kinetische Energie die Energie, die beim Zusammenstoß freigesetzt wird, zu berechnen.

$E = \frac{1}{2} \times m \times v^{2}$[12]

$\frac{1}{2} \times 7,83 \times 10^{11} kg \times (2966 m/s)^{2} \approx 3,44 \times 10^{18} J$

Apophis hätte beim Zusammenstoß also ungefähr eine Energie von 3,44 Trillionen Joule. Dies rechnen wir nun um in TNT-Äquivalent, indem wir die Gesamtenergie durch die Energie pro Tonne von TNT teilen:

$\frac{3,44 \times 10^{18} J}{4184 \times 10^{9} J/t} \approx 822180 t$

Wenn Apophis mit der Erde zusammenstoßen würde, und dabei unsere Annahmen gelten würden, hätte er also eine Sprengkraft von ungefähr 822.180 Tonnen TNT oder 0,822 Megatonnen TNT. Dies entspricht ungefähr der Sprengkraft einer kleinen Wasserstoffbombe, hätte allerdings noch keine globalen Auswirkungen.

b) Kategorisierung von Apophis und (535844)

Um noch herauszufinden, in welche der vier Arten von NEAs man (99942) Apophis und (535844) einordnen kann, müssen wir uns das Aphel und Perihel der Objekte anschauen.

Beide Objekte müssen entweder zu den Apollos oder Atens gehören, da sie die Erdbahn kreuzen. Dies liegt daran, dass ihr Perihel mit q ≈ 0,952 AU für (535844) und mit q ≈0,747 AU für Apophis kleiner ist als 1,017 AU. Außerdem ist ihr Aphel mit Q ≈ 2,161 AU für (535844) und mit Q≈1,099 AU größer als 0,983 AU. Die Information, dass dies so sein muss, findet man in der Abbildung zu den verschiedenen Arten von NEAs mit der Nummerierung {4}. Die Werte q für das Perihel und Q für das Aphel werden von FindOrb zusätzlich zu den Bahnelementen angegeben. Ob es sich bei Apophis und (535844) um Apollos oder Atens kommt letztendlich darauf an, ob sie eine große Halbachse a haben, die größer oder kleiner ist als die der Erde. Die große Halbachse der Erde ist genau eine AU groß, da die astronomische Einheit durch sie definiert ist. Nun können wir also feststellen, dass Apophis ein NEA aus der Kategorie der Atens ist, da seine große Halbachse wie oben angegeben bei ungefähr 0,992 AU liegt und damit kleiner als eine astronomische Einheit ist. Außerdem ist er ein PHA, weil er sich der Erde laut unseren Berechnungen mit 0,0001 AU MOID näher als 0,05 AU an die Erde annähern wird. (535844) hingegen fällt in die Kategorie der Apollos, da seine große Halbachse wie oben angegeben mit ungefähr 1,55 AU größer als eine astronomische Einheit ist. Um die Bahnen der Objekte zu veranschaulichen kann man sich im Small-Body Database Browser von JPL ein dreidimensionales Modell von der Bahn eines Objektes im Sonnensystem anschauen. Hier kann man zwar keine selbst berechneten Bahnelemente für die Erstellung der Diagramme benutzen, aber da meine Bahnelemente nicht zu sehr von denen in der Datenbank abweichen sollten, handelt es sich dabei dennoch um eine gute Veranschaulichung. Die Website hat eine Funktion, mit der man Screenshots der Diagramme machen und herunterladen kann. Ich habe sie verwendet um die Bahnen der Objekte von zwei Perspektiven aus aufzunehmen. Die Bahn von Apophis sieht folgendermaßen aus:

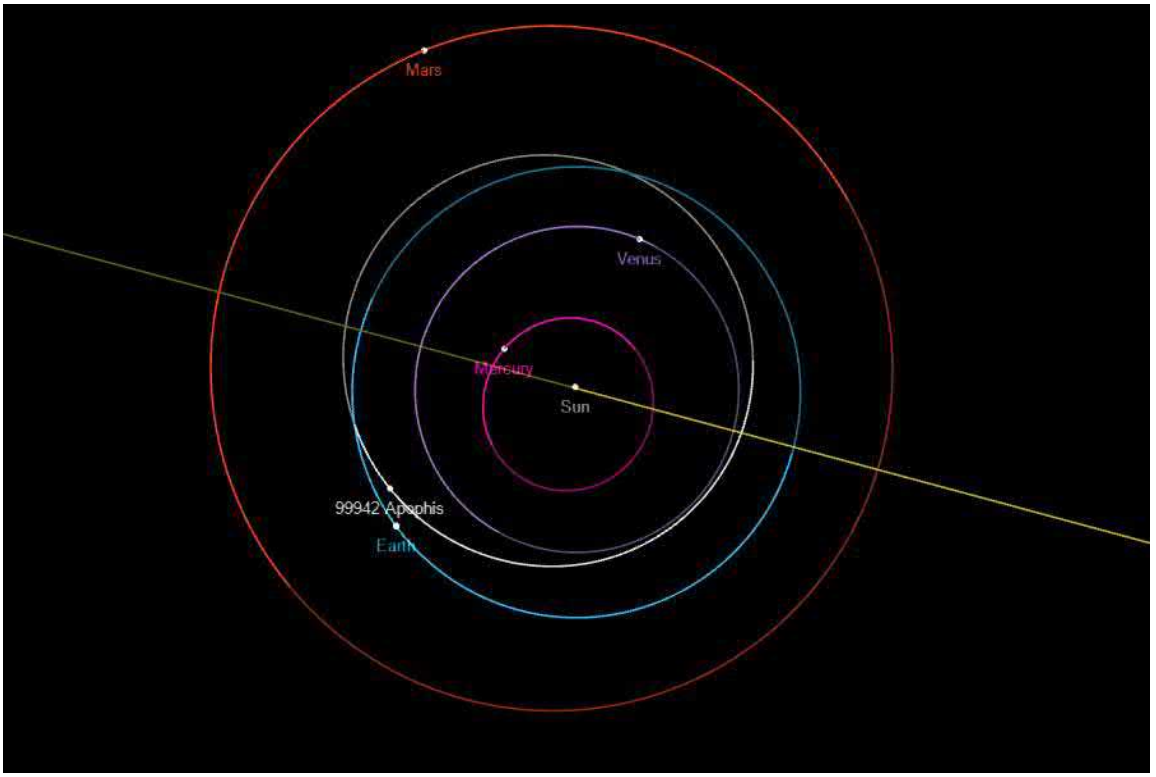


Abb. 55: Die Bahn von Apophis aus einer Perspektive von oben auf die Ekliptik.

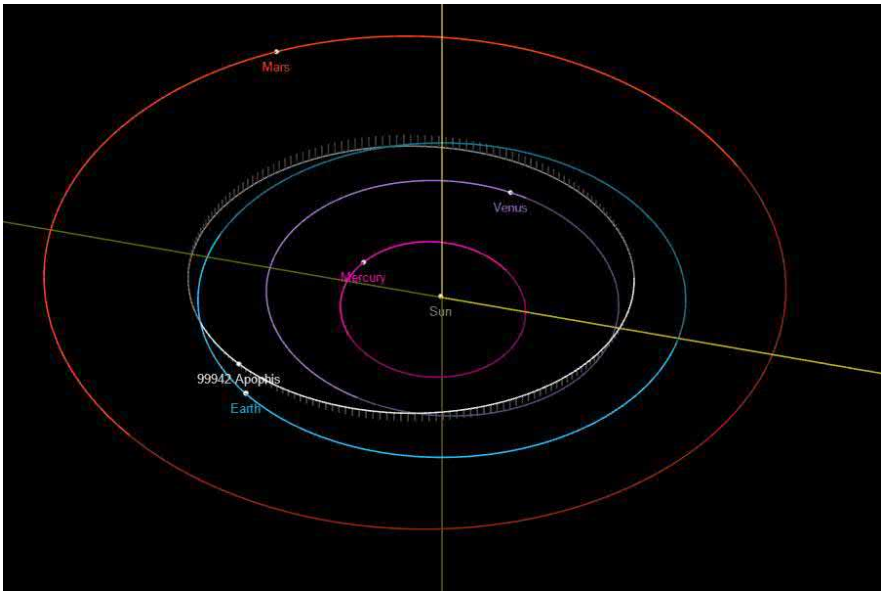


Abb. 56: Die Bahn von Apophis aus einer schrägen Perspektive.

In den Aufnahmen ist die Bahn von Apophis grau, und außer der Bahn von Apophis sieht man hier noch die Bahnen von Merkur, der Venus, dem Mars und der Erde. Man kann gut sehen, dass es sich bei Apophis um einen NEA aus der Kategorie der Atens handelt, da seine Bahn sich zwar teils auf beiden Seiten der Erdbahn befindet, aber von oben kleiner als die Erdbahn aussieht. Dies liegt an der kleineren großen Halbachse von Apophis. Wie man in Abbildung 56 gut sehen kann, hat die Bahn von Apophis nur eine leichte Neigung im Gegensatz zur Ekliptik. In den folgenden Aufnahmen von (535844) ist die Bahn des NEAs auch in grau markiert.

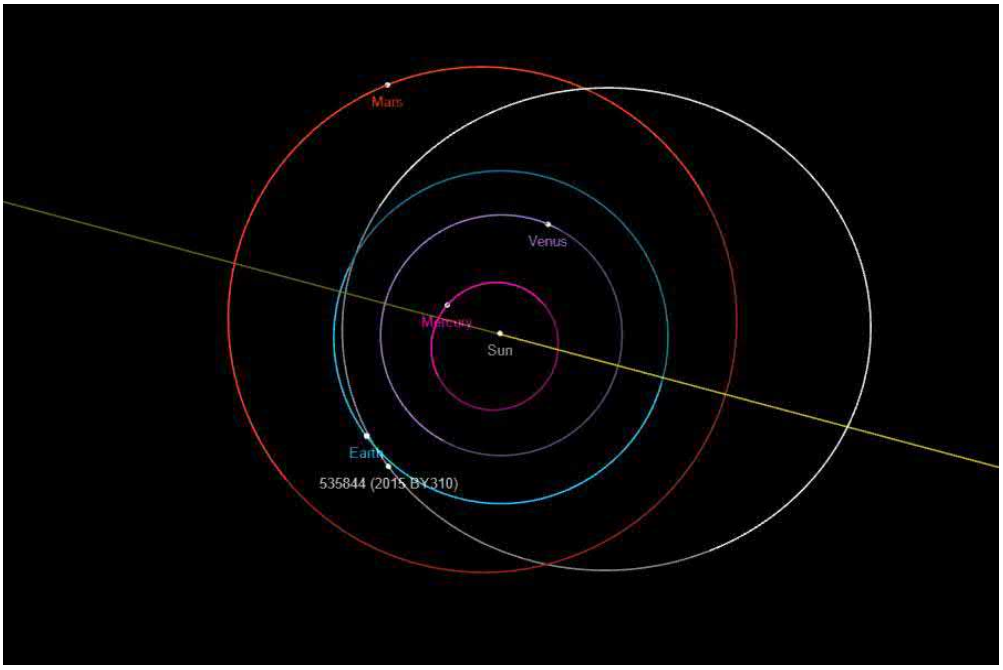


Abb. 57: Die Bahn von (535844) aus einer Perspektive von oben auf die Ekliptik.

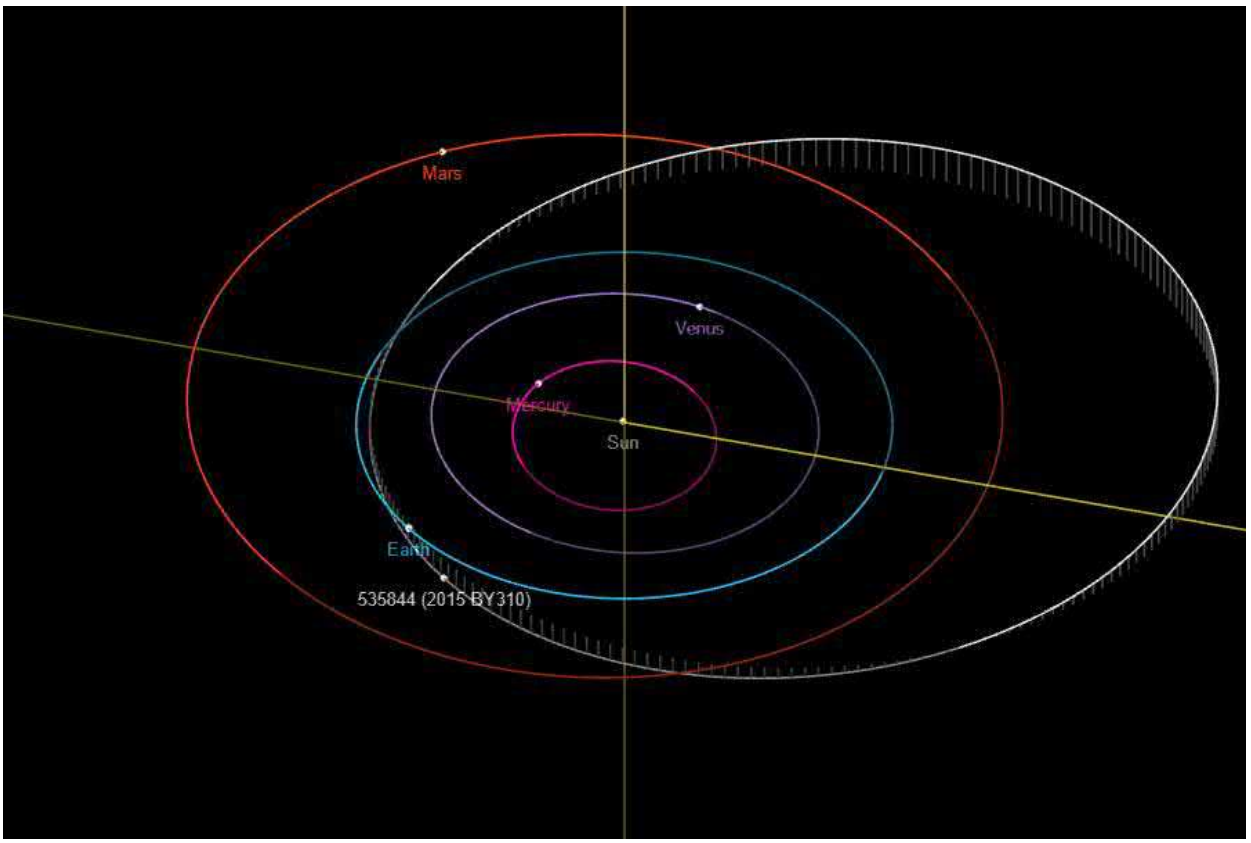


Abb. 58: Die Bahn von (535844) aus einer schrägen Perspektive.

Wie man in Abbildung 57 erkennen kann, befindet sich auch die Bahn von (535844) auf beiden Seiten der Erdbahn. Im gegensatz zu der von Apophis ist sie allerdings wesentlich größer als die Erdbahn, woran man sieht, dass (535844) ein NEA aus der Kategorie der Apollos ist. In Abbildung 58 sieht man, dass auch die Bahn von (535844) nur eine geringe Neigung zur Ekliptik hat.

7. Bewertung der Ergebnisse

Um die Genauigkeit unsere Ergebnisse zu bewerten, werde ich den durchschnittlichen Restfehler von unseren Aufnahmen von Apophis mit denen von einigen anderen Beobachtern im Zeitraum vom 14.02.2021 bis zum 28.02.2021 vergleichen. (535844) eignet sich für einen solchen Vergleich nicht besonders gut, da er in dem Zeitraum sehr lichtschwach war und sich nah am Mond befand, was den Messfehler stark erhöhen kann. Um unsere Messwerte von Apophis mit denen von anderen Sternwarten zu vergleichen, lege ich eine Tabelle an. Die Werte für den durchschnittlichen Restfehler werden wie bei uns durch FindOrb berechnet, indem ich die Datensätze in das Programm einfüge. Die Datensätze Stammen vom Minor Planet Center, wo sie von anderen eingereicht wurden.

MPC-Code des Beobachters	Beobachtungszeit-raum	Anzahl der Messwerte	Anzahl Beobachtungs-abende	Durchschnittlicher Restfehler
B72	21.-22.02.2021	6	2	0,11”
G04	24.02.2021	3	1	0,05”
T08	14.-23.02.2021	12	3	0,05”
Q21	15.-21.02.2021	11	3	0,29”
T05	16.-20.02.2021	8	2	0,13”
Z84	16.-25.02.2021	12	6	0,05”
691	17.-18.02.2021	6	2	0,08”
Z80	17.-28.02.2021	18	6	0,18”
Q62	14.-21.02.2021	16	4	0,14”
L28	21.02.2021	41	1	0,20”
G33	22.-25.02.2021	8	3	0,34”
W33	24.02.2021	6	1	0,03”
G17	20.-24.02.2021	6	2	0,30”
Z99	25.-28.02.2021	13	4	0,10”
N42	14.-27.02.2021	240	4	0,25”
118	25.-28.02.2021	9	3	0,26”
M44	14.-22.02.2021	16 + 1 unbenutzt	6	0,57”
M46	14.-15.02.2021	12	2	0,29”
186	14.-27.02.2021	20	5	0,31”

Zuerst sind B72, das Stargate Observatory von Herrn Koch, und G04, die Station 7 am Schülerlabor für Astronomie eingetragen. Danach folgen andere Observatorien. Bei M44 steht, dass es 16 Messwerte + einen unbenutzten Messwert gibt, da einer der ursprünglich 17 Messwerte von FindOrb als zu schlecht für das zum Vermessen benutzen markiert wurde. Wenn man den Durchschnitt der Restfehler aller Observatorien in der Tabelle ausrechnet, erhält man aus der Rechnung einen Wert von ungefähr 0,20 Bogensekunden. Da mein durchschnittlicher Restfehler, also 0,13 Bogensekunden weit darunter liegt, muss man sich keine Sorgen darüber machen, ungewöhnliche Fehlerquellen bei der Beobachtung oder Analyse der Beobachtungen zu haben. Das heißt also, dass meine Messwerte und Analyse von Apophis eine gute Genauigkeit haben. Dass die Messwerte und Analyse bei (535844) im Endeffekt einen größeren Restfehler erzeugt haben, liegt vermutlich daran, dass er, wie man

im experimentellen Teil lesen kann, immer recht nah am Mond war, und wie man in den Ergebnissen sieht fast immer lichtschwächer war als Apophis. Die Kombination aus Lichtschwäche und Mond sorgte bei der Aufnahme wahrscheinlich dafür, dass die Helligkeit und das visuelle Zentrum des Objekts stark vom Streulicht des Mondes beeinflusst wurden, was für einen zusätzlichen Messfehler gesorgt hat.
Zu den Fehlerquellen, die sich bei Observatorien auf der Erdoberfläche leider nicht vermeiden lassen, zählen oft das atmospheric seeing, leichte Wolkenbedeckung, Staubpartikel in der Atmosphäre, und Temperaturveränderung am Teleskop, welche eine leichte Veränderung der Brennweite verursachen kann. Diese Dinge führen im Endeffekt oft zu einer leichten Verschiebung des Objektes, einer ungleichmäßigen Abschwächung des Objektes, und einer Verfälschung der Rechnungen, in denen die Brennweite des Teleskops gebraucht wird. Außerdem arbeiten die Kameras nie zu einhundert Prozent genau, was immer eine ganz leicht verfälschte Helligkeit und somit verfälschte Position des Objekts in der Aufnahme nach sich zieht. Zusätzlich kann es sein, dass es bei der Vermessung der Objekte durch Programme wie Astrometrica einen kleinen Fehler gibt. Aufgrund dessen kann ein Asteroid von der Erde aus nie genau vermessen werden, aber Messungen mit einem Restfehler von 0,13” sind schon ziemlich genau und ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis. Die Aufnahmen und Messungen haben im Endeffekt auch dazu beigetragen, die Objekte nicht aus den Augen zu verlieren, und sicherzustellen, dass ihre Position bekannt bleibt, da einige vermessene Positionen beim Minor Planet Center eingereicht worden sind. Außerdem konnte festgestellt werden, dass sie sich nicht auf einem Kollisionskurs mit der Erde befinden.

Als Fazit kann man also ziehen, dass die Vermessung von NEAs und die Berechnung ihrer Bahnen durch das Schülerlabor für Astronomie sinnvoll und sogar überdurchschnittlich genau sind. Außerdem konnte festgestellt werden, dass (535844) und (99942) in näherer Zukunft wahrscheinlich nicht mit der Erde kollidieren werden.

8. Anhang

8.1 Literaturverzeichnis

[1] Bode, Johann Elert: Von dem neuen, zwischen Mars und Jupiter entdeckten achten Hauptplaneten des Sonnensystems.
https://books.google.de/books?hl=en&lr=&id=TKA5AAAAcAAJ&oi=fnd&pg=PP3&dq=piazzi+entdeckung+ceres&ots=1W0k2durK5&sig=4QxUKSzs7-puSSgf5mJdrKnkyHg&redir_esc=y#v=onepage&q=piazzi%20entdeckung%20ceres&f=false Datum: 01.05.2021
[2] International Astronomical Union, The Final IAU Resolution on the definition of "planet" ready for voting, 24 August 2006, Prague
https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0602/ Datum: 01.05.2021

[3] Center for Near Earth Object Studies, FAQs, What are asteroids and comets? https://cneos.jpl.nasa.gov/faq/ Datum: 01.05.2021
[4] Rees, Martin: Universum, Die große Bild-Enzyklopädie, Dorling Kindersley Verlag, München, 2006, 2011
[5] Nasa, Small Body Database Browser, How Many Solar System Bodies? https://ssd.jpl.nasa.gov/?body_count Datum: 01.05.2021
[6] Center for Near Earth Object Studies, NEO Basics https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html Datum: 01.05.2021
[7] Koller, Josef: Seminarvortrag: Die Bahnberechnung der Himmelskörper, Institut für Astronomie, Innsbruck, den 5. November 1996
[8] Kenkmann, Thomas: Mit der Wucht von Millionen Wasserstoffbomben, Tagesspiegel-Sonderseiten : Humboldt-Uni, 10. April 2004 https://www.hu-berlin.de/de/pr/medien/publikationen/presse/tsp/ss04/chicxulub_html Datum: 02.05.2021
[9] Coulter, Dauna: What's Hitting Earth? Science@NASA, 01. März 2011 https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2011/01mar_meteornetwork/ Datum: 02.05.2021
[10] P. Farinella et al.: Probable asteroidal origin of the Tunguska Cosmic Body, 18. Mai 2001 https://www-th.bo.infn.it/tunguska/aah2886.pdf Datum: 02.05.2021
[11] Operation Castle, 1954 - Pacific Proving Ground, http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Tests/Castle.html Datum: 02.05.2021
[12] Das große Tafelwerk interaktiv 2.0, Cornelsen Verlag, Berlin, 2011
[13] NASA, By the Numbers | Earth - NASA Solar System Exploration https://solarsystem.nasa.gov/planets/earth/by-the-numbers/ Datum: 05.05.2021
[14] Binzel, Richard P., Can NEAs be grouped by their common physical characteristics?, Massachusetts Institute of Technology https://web.archive.org/web/20120412135701/http://www.aero.org/conferences/planetarydefense/2007papers/S1-8--Binzel-Brief.pdf Datum: 05.05.2021

8.2 Abbildungsverzeichnis

Titelblatt: Gestacktes Bild von Apophis am 20.02.2021
Abb. 1: By Graph is own work. - Graph generated from archive statistics by IAU Minor Planet Center, at [1]。, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30437540 Datum: 01.05.2021
Abb. 2: Courtesy NASA/JPL-Caltech. P.Chodas, Inner Solar System orbit Diagrams. https://ssd.jpl.nasa.gov/?ss_inner Datum: 01.05.2021
Abb. 3: By my own work derived from NASA's image. - Image:Asteroid Belt.jpg, Public Domain, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5077985 Datum: 01.05.2021
Abb. 4: Courtesy NASA/JPL-Caltech. Center for Near Earth Object Studies, NEO Basics https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html Datum: 01.05.2021
Abb. 5: Courtesy NASA/JPL-Caltech. Center for Near Earth Object Studies, Discovery Statistics

https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html Datum: 01.05.2021
Abb. 6: Von Modalanalytiker - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33729773 Datum: 01.05.2021
Abb. 7: So sah es aus, wenn ich den Computer von Herrn Koch über Zoom ferngesteuert habe.
Abb. 8: Koch, Bernd. Das Stargate Observatory bei Tag.
Abb. 9: Koch, Bernd. Das 0,36m Schmidt-Cassegrain-Teleskop des Stargate Observatory.
Abb. 10: Koch, Bernd. Die STF-8300M-Kamera inklusive Filter am Teleskop.
Abb. 11: Satellitenbild von der Umgebung des Stargate Observatory zum Zeitpunkt der Beobachtungen.
Abb. 12: Dimension 4 bei der Synchronisation der Zeit des Computers.
Abb. 13: 10micron Clock Sync version 3.4 während der Arbeit.
Abb. 14: Stellarium beim Beobachten.
Abb. 15: FocusLynx Commander, im Bild ist außerdem MaxIm DL.
Abb. 16: SpecTrack 1.0 bei der Nachführung auf einen Stern.
Abb. 17: Maxim DL 5, oben und unten rechts.
Abb. 18: Das 10micron Keypad.
Abb. 19: 0,51m CDK-Teleskop von Planewave auf der Montierung.
Abb. 20: Montierung von Kamera und Filter am Teleskop durch mich.
Abb. 21: Observing Site
Abb. 22: CCD
Abb. 23: Program
Abb. 24: Environment
Abb. 25: Die erste Aufnahme der Serie
Abb. 26: Dieses Fenster öffnet sich für jede Aufnahme, die man geöffnet hat.
Abb. 27: Coordinates
Abb. 28: Reference Star Match Error
Abb. 29: Die erste Aufnahme der Serie mit Astrometrischer Lösung
Abb. 30: Die Informationen zu den ersten 5 Aufnahmen von (535844)
Abb. 31: Die Informationen zu den letzten 5 Aufnahmen von (535844)
Abb. 32: Hier ist die erwartete Position von dem Ziel meiner Beobachtung, (535844), durch ein rotes Kästchen markiert.
Abb. 33: Hier wähle ich die Aufnahmen aus
Abb. 34: Coordinates, Tracking and Stacking
Abb. 35: Das Fenster mit den Informationen zu den Resultaten der astrometrischen Lösung für die Stack and Track-Methode
Abb. 36: Das Objekt ist hier in lila markiert.
Abb. 37: Object Verification + Identification
Abb. 38: Die MPCReport-Datei nach bisherigem Stand.
Abb. 39: Die erste Aufnahme der Sechserserie.
Abb. 40: Die erste Aufnahme aus der Sechserserie.

Abb. 41: Die MPCReport-Datei nach neuem Stand.
Abb. 42+43: Die Ergebnisse der Datenanalyse der Aufnahmen
Abb. 44: Die Ergebnisse der Datenanalyse der Aufnahmen
Abb. 45: Aufnahme 10. Das Objekt ist durch einen roten Kreis markiert.
Abb. 46: Das Resultat vom Stack and Tracking von Aufnahmen 1,2 und 3.
Abb. 47: Die Informationen zur Astrometrischen Lösung vom Stack and Tracking der Aufnahmen 1,2, und 3
Abb. 48: Die Informationen zur Astrometrischen Lösung vom Stack and Tracking der Aufnahmen 4,5, und 7
Abb. 49: Die Informationen zur Astrometrischen Lösung vom Stack and Tracking der Aufnahmen 8,9, und 10
Abb. 50: Finale MPCReport-Datei von (535844)
Abb. 51: MPCReport-Datei von Apophis
Abb. 52: Der Startbildschirm von FindOrb.
Abb. 53: Das Fenster mit den Resultaten der Berechnung der Bahn von (535844) durch FindOrb
Abb. 54: Fenster mit den Resultaten der Bahnberechnung von Apophis.
Abb. 55: Courtesy NASA/JPL-Caltech. Die Bahn von Apophis aus einer Perspektive von oben auf die Ekliptik.
https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=apophis;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb Datum: 13.05.2021
Abb. 56: Courtesy NASA/JPL-Caltech. Die Bahn von Apophis aus einer schrägen Perspektive.
https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=apophis;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb Datum: 13.05.2021
Abb. 57: Courtesy NASA/JPL-Caltech. Die Bahn von (535844) aus einer Perspektive von oben auf die Ekliptik. https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=535844;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb Datum: 13.05.2021
Abb. 58: Courtesy NASA/JPL-Caltech. Die Bahn von (535844) aus einer schrägen Perspektive.
https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=535844;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb Datum: 13.05.2021

Alle Aufnahmen, bei denen keine Quelle angegeben ist, sind im Zuge der Projektarbeit von mir oder für mich erstellt worden.

8.3 Softwareverzeichnis

Software 1: Stellarium. http://stellarium.org/ Datum: 13.05.2021
Software 2: MaxIm DL 5. https://diffractionlimited.com/product/maxim-dl/ Datum: 13.05.2021
Software 3: Astrometrica. http://www.astrometrica.at/ Datum: 13.05.2021
Software 4: FindOrb. https://www.projectpluto.com/find_orb.htm Datum: 13.05.2021

Software 5: Zoom. https://zoom.us/ Datum: 13.05.2021
Software 6: Dimension 4. http://www.thinkman.com/dimension4/ Datum: 13.05.2021
Software 7: FocusLynx Commander.
https://www.optecinc.com/astronomy/downloads/focuslynx.htm Datum: 13.05.2021
Software 8: SpecTrack 1.0.
https://www.baader-planetarium.com/de/spectrack-autoguiding-software-f%C3%BCr-sternspektroskopie.html Datum: 13.05.2021

8.4 Danksagung

Zunächst möchte ich mich herzlichst bei Herrn Bernd Koch, dem Betreuer dieser Projektarbeit, bedanken. Er hat mir die Beobachtung, Vermessung und Berechnung der Bahnelemente von Asteroiden beigebracht, und stand mir immer für Rat und die Beantwortung von Fragen zur Seite. Er ließ mich seine private Sternwarte fernsteuern, als es sich nicht anbot, vom Schülerlabor für Astronomie aus zu beobachten, und hat mir auch sonst alles beigebracht, was ich über Astronomie weiß.
Außerdem möchte ich mich bei Sven Römer, meinem ehemaligen Physiklehrer, bedanken, da er mich in Zusammenarbeit mit Herrn Koch auf das Schülerlabor Astronomie am Carl-Fuhlrott-Gymnasium aufmerksam gemacht hat.
Zudem möchte ich mich noch bei allen kostenlosen Websites bedanken, die ich in der Projektarbeit verwendet habe. Dazu zählt die Website des Minor Planet Centers, die Datensätze zu Asteroiden bereitstellt, und die JPL-Website, wo es Funktionen wie den JPL Small Body Database Browser oder das HORIZONS Web Interface gibt. Die Website stellt einem Ephemeriden von bereits bekannten Objekten zur Verfügung. Auch die CNEOS-Website war mit ihren Informationen zu NEAs sehr hilfreich.
Ich möchte mich auch bei allen kostenlosen Programmen bedanken, die ich für die Projektarbeit verwendet habe. Dazu zählen Stellarium, FindOrb, Zoom, Dimension 4, und FocusLynx Commander.
Schlussendlich möchte ich mich bei den Sponsoren des Schülerlabors für Astronomie am CFG bedanken, die mir den Besuch vom Projektkurs und die Verwendung von tollem Equipment ermöglicht haben.

8.5 Abschlusserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Projektarbeit selbstständig angefertigt und dabei keine anderen Hilfsmittel und Quellen als die von mir angegebenen verwendet habe, und dass ich alle Stellen in der Projektarbeit, die inhaltlich oder im Wortlaut aus anderen Werken entnommen wurden, gekennzeichnet habe.