

DART im Weltraum

Wie können wir uns vor Asteroideneinschlägen
schützen?



Simon Apffelstaedt

Astronomie 12

2022/2023

Herr Riemer

13.03.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Hintergrund.....	4
3	Theorie, Ansatz und Plan.....	6
3.1	Die Mission.....	6
3.2	Suche nach dem Ziel.....	7
3.3	Planung des Impakts.....	8
3.4	β und die Szenarien nach dem Impakt.....	11
3.5	Ziele der Datenanalyse.....	14
4	Missionsergebnisse und Ausblick.....	15
5	Fazit.....	17
6	Anhang.....	18
6.1	Ergänzende Informationen.....	18
6.1.1	Größenvergleich: DART-Akteure vs. Gebäude.....	18
6.1.2	Die DART-Sonde.....	18
6.1.3	Berechnung von β	18
6.2	Abbildungsverzeichnis.....	19
6.3	Literaturverzeichnis.....	19
6.4	Erklärungen.....	22
6.4.1	Versicherung selbständiger Erarbeitung und Anfertigung	22
6.4.2	Einverständniserklärung zur Veröffentlichung.....	22

1 Einleitung

Seit jeher kreuzen immer wieder Asteroiden den Orbit¹ der Erde. Treffen sie auf die Erde auf, hat das mitunter verheerende Folgen. So veränderte vor circa 66 Millionen Jahren ein Asteroid das Erscheinungsbild unseres gesamten Planeten, da die durch den Einschlag entstandene Staubwolke zu einem starken Temperaturabsturz und somit zu veränderten Lebensbedingungen führte. So wurde das Leben für zum Beispiel die Dinosaurier unmöglich und sie starben für immer aus. Aber nicht nur in der Atmosphäre sind die Auswirkungen zu spüren. Am direkten Einschlagsort ist die Zerstörung oft so groß, dass dort sämtliches Leben ausgelöscht und die Landschaft verwüstet ist [3]. Auch in der jüngeren Geschichte ist die Gefahr, die von diesen Himmelskörpern ausgeht, erkennbar: 2013 explodierte ein Asteroid über Sibirien, als er in die Erdatmosphäre eindrang. Die dadurch entstandenen Meteoriten² und die Druckwelle sorgten für erhebliche Schäden an über 3700 Gebäuden und für circa 1500 verletzte Personen [2]. Es ist also zu erkennen, dass die Gefahr nicht unterschätzt werden darf und es von enormem Vorteil wäre, wenn die Menschheit sich vor Asteroideneinschlägen schützen könnte. Genau dieses Ziel verfolgt die NASA³ mit ihrer DART-Mission, mit deren Prinzip und Erkenntnissen ich mich im Folgenden in meiner Facharbeit auseinandersetzen werde.

Überwiegend werde ich mich mit der DART-Mission an sich beschäftigen, aber an geeigneten Stellen darüber hinaus auch auf daran angeknüpfte Missionen und Forschungen eingehen bzw. verweisen, um die Fragestellung, wie wir uns vor Asteroideneinschlägen schützen können, noch genauer und tiefgehender beantworten zu können. Zur Gliederung sei gesagt, dass ich zuerst einmal darauf eingehen werde, warum es überhaupt notwendig ist, sich Gedanken über den Schutz vor Asteroideneinschlägen zu machen. Danach werde ich mich mit der Theorie und dem Ansatz bzw. der Funktionsweise der DART-Mission beschäftigen, bevor ich mich damit

¹ Umlaufbahn eines Himmelskörpers um ein anderes Objekt

² Bruchstücke/Gesteinsreste von Asteroiden, die auf der Erde einschlagen

³ Amerikanische Weltraumorganisation

auseinandersetze, ob die Mission erfolgreich war und ob Missionen wie DART geeignete Möglichkeiten sind, den Schutz vor Asteroideneinschlägen zu gewährleisten. Für die Bearbeitung dieser Fragestellung greife ich überwiegend auf die Ergebnisse von Onlinerecherche zurück. Zur Angabe von Literaturquellen nutze ich nach dem jeweiligen Textabschnitt von eckigen Klammern umschlossene Zahlen, welche auf die entsprechende Quelle im Literaturverzeichnis (Kapitel 6.3) verweisen (Beispiel: Beispieltext [4]). Selbiges Verfahren gilt auch für die Bilder und Grafiken. Anmerkungen, Verweise oder Erklärungen, die den Lesefluss beeinträchtigen würden, gebe ich in Form von Fußnoten auf der jeweiligen Seite an.

2 Hintergrund

Warum ist es eigentlich notwendig, bzw. warum wäre es eigentlich vorteilhaft, wenn wir als Menschheit in der Lage wären, unseren Planeten Erde vor Asteroideneinschlägen zu schützen?

Asteroiden sind Gesteinsbrocken, die vor etwa 4,5 Milliarden Jahren entstanden sind und somit in etwa so alt sind wie unsere Planeten. Sie zeichnen sich durch ihre unregelmäßige Form und den sehr unterschiedlichen ausfallenden Durchmesser aus. Dieser liegt bei den kleinsten Asteroiden gerade einmal bei wenigen Metern, kann aber bei den größten Asteroiden auch hunderte Kilometer betragen⁴ [8]. Schätzungen zufolge gibt es in unserem Sonnensystem mehr als 10 Millionen Asteroiden [4], Forscher haben bisher jedoch erst circa 1,265 Millionen von ihnen nachgewiesen [11]. Eine überwiegende Zahl dieser Objekte bewegt sich innerhalb des sogenannten Asteroidengürtels. Dieser befindet im Raum zwischen Mars und Jupiter, also in einem Abstand von circa 1,2 – 2,2AE⁵ zur Erde [17]. Normalerweise bewegen sich diese Asteroiden ausschließlich in diesem Raum auf ihren Umlaufbahnen, stellen also grundsätzlich keine Bedrohung dar. Allerdings kann es, durch zum Beispiel Kollisionen zwischen Asteroiden untereinander, vorkommen, dass diese von ihrer eigentlichen Bahn abkommen und fortan auf einer neuen Bahn durch unser Sonnensystem fliegen. Weitere Gründe für eine Bahnänderung wären unter anderem der Yarkovsky-Effekt⁶ und die Wechselwirkungen mit Planeten auf Grund derer Gravitation [5]. Die neu entstandenen Bahnen können die Bahn der Erde kreuzen, sodass ein Zusammenstoß möglich wäre, sollten Erde und Asteroid gleichzeitig an dieser „Kreuzung“ sein. Objekte, die der Erde auf diese Weise nah kommen und die bei einer Kollision unter Umständen große Schäden anrichten würden, werden NEOs⁷ genannt. Zur Aufklärung und Gefahrenabschätzung solcher NEOs gibt es spezielle Zentren von den

⁴ Größenvergleich Didymos-Asteroid zu Gebäuden: Grafik 5, Kapitel 6.1.1

⁵ AE: Astronomische Einheit (1AE = 149.597.870.700m)

⁶ Bahnänderung durch Erwärmung der Oberfläche und Rückstoßeffect ab Abgabe der Wärmestrahlung [18]

⁷ Near-Earth Object

Raumfahrtorganisationen, wie das Planetary Defense Office der ESA⁸ oder das Planetary Defense Coordination Office der NASA. Die dort ansässigen Forscher beobachteten die NEOs genaustens und versuchen deren Umlaufbahnen möglichst genau zu berechnen, damit ein drohender Einschlag auf der Erde ausgeschlossen, oder aber auch erkannt werden kann. Durch diese Bemühungen sind bisher circa 20.000⁹ solcher NEOs aufgespürt worden [6]. Sollte bei diesen Beobachtungen festgestellt werden, dass ein Asteroid in der Zukunft möglicherweise auf der Erde einschlagen wird, stellt sich die Frage, ob und was dagegen unternommen werden kann. Denn abhängig von Größe, Geschwindigkeit und Einschlagswinkel kann ein Asteroid, wie bereits in der Einleitung erwähnt, auf der Erde massiven Schaden anrichten. Um zu erforschen, wie wir Menschen einen solchen Einschlag verhindern können, hat die NASA im Jahr 2021 nach mehrjähriger Planungs- und Konzeptionsphase die DART-Mission¹⁰ gestartet. Mit dieser Mission soll getestet werden, ob es möglich ist, einen Asteroiden gezielt auf eine andere Umlaufbahn zu lenken und somit einen möglichen Zusammenstoß mit der Erde zu verhindern [1]. Zusätzlich wird 2024 im Rahmen der Asteroid Impact & Assessment collaboration (AIDA) die ESA-Mission Hera starten, um die Auswirkungen der DART-Mission auf den Asteroiden genauer zu untersuchen [7].

⁸ European Space Agency

⁹ Stand: 2019

¹⁰ DART: Double Asteroid Redirection Test

3 Theorie, Ansatz und Plan

3.1 Die Mission

DART steht für Double Asteroid Redirection Test. Auf Deutsch bedeutet das in etwa so viel wie Doppel-Asteroiden-Umleitungs-Test. Gemeint ist damit der Versuch, einen Asteroiden eines Doppel-Asteroiden Systems¹¹ durch gezielte Maßnahmen auf eine andere Umlaufbahn zu bringen [16]. In einem Doppelasteroidensystem kreist ein kleinerer Asteroid auf Grund der Gravitation um einen Größeren, ähnlich, wie der Mond um die Erde kreist. Bei der DART-Mission hat sich die NASA für den Asteroiden Didymos mit seinem Begleiter¹² Dimorphos entschieden. Die Idee hinter DART basiert auf dem sogenannten Impaktor-Prinzip. Dahinter verbirgt sich, dass ein Himmelskörper mit einem sogenannten Impaktor, zum Beispiel einer Raumsonde oder Rakete, beschossen wird. Durch den Aufprall auf den Himmelskörper wird die kinetische Energie des Impaktors auf den Körper übertragen. Da auch der Himmelskörper eine Bewegung in eine bestimmte Richtung ausübt, ergibt sich nach dem Einschlag eine neue resultierende Kraft, die je nachdem, wie Himmelskörper und Impaktor zu Zeitpunkt des Einschlages zueinanderstanden, in eine neue Richtung weist oder die Richtung beibehält, dafür aber stärker oder schwächer wirkt¹³. Bei der DART-Mission kommt als Impaktor eine Raumsonde, die DART-Sonde¹⁴, zum Einsatz. Der Hauptteil der Sonde ist gerade einmal 1,2m x 1,3m x 1,3m groß. Insgesamt ergibt sich inklusive der Solarpaneele zur Stromversorgung eine Spannweite von 18,5m. Viel wichtiger als die Größe ist für den Ablenkungsversuch aber das Gewicht der Sonde. Dies beträgt beim Aufprall noch etwa 570kg. Beim Start ist die Sonde schwerer, da die Menge an Treibstoff, welcher für den Flug verbraucht wird, logischerweise noch höher ist. An Nutzlast¹⁵ führt die Sonde einzig eine Kamera mit, die dazu dient, das

¹¹ auch binäres Asteroidensystem genannt [20]

¹² sich zu Didymos mondähnlich verhaltender Asteroid

¹³ Genaueres zur Funktionsweise in Kapitel 3.3 und 3.4

¹⁴ Grafik der Sonde: Grafik 7; Kapitel 6.1.2

¹⁵ fest an der Sonde montierte Gerätschaften

autonome Navigationssystem SMART Nav¹⁶ mit Bildern zu versorgen. Außerdem schickt die Kamera Bilder der Oberfläche der Einschlagstelle an die Erde. Zusätzlich zur Kamera transportiert die Sonde auch noch den CubeSat¹⁷ LICIACube mit. Dies ist ein Kleinsatellit, der im Vorfeld des Impakts von der DART-Sonde gelöst wird und die Aufgabe hat, Bilder des Einschlages aufzunehmen, um eine erste Auswertung zu ermöglichen und den Aufprall zu dokumentieren [16]. Am Ende der Mission erhoffen sich die Forscher eine Menge an Daten- und Erkenntnisgewinn, mit dem sie die Erde vor Asteroiden, die in der Zukunft die Erde gefährden, verteidigen können. Denn dazu benötigt es genaue Daten darüber, welche Auswirkungen ein Impakt auf einen Asteroiden hat, damit eine Abwehrmission im Ernstfall genaustens dosiert werden kann, ohne dass das Problem noch weiter verschärft wird.

3.2 Suche nach dem Ziel

Damit das Ziel der Mission, die Ablenkung eines Asteroiden, erreicht werden kann, muss im Vorfeld genaustens geschaut werden, mit welchem Himmelskörper, zu welchem Zeitpunkt und mit welchen Mitteln und Methoden die besten Ergebnisse erzielt werden können, sodass die Mission auch wirtschaftlich-ökonomisch noch vertretbar ist. Es muss also ein Kompromiss zwischen dem besten Ergebnis, den Kosten und dem Aufwand gefunden werden. Dafür wurde bei der DART-Mission ein Asteroidensystem gesucht, welches von der Erde aus gut zu beobachten ist, damit die Auswirkungen möglichst genau dokumentiert werden können. Des Weiteren muss gewährleistet sein, dass durch die Durchführung der Mission der Asteroid nicht auf eine für die Erde gefährliche Bahn gelenkt wird, um künftige Gefahren ausschließen zu können. Das Doppel-Asteroidensystem Didymos wurde für die DART-Mission ausgewählt, da es zum einen wenig Energie benötigt, um mit einem Raumschiff dort hinzugelangen, zum anderen, da sich von der Erde aus Lichtkurvenmessungen durchführen lassen. Mit diesen lassen sich nach dem Einschlag die Bahnänderungen

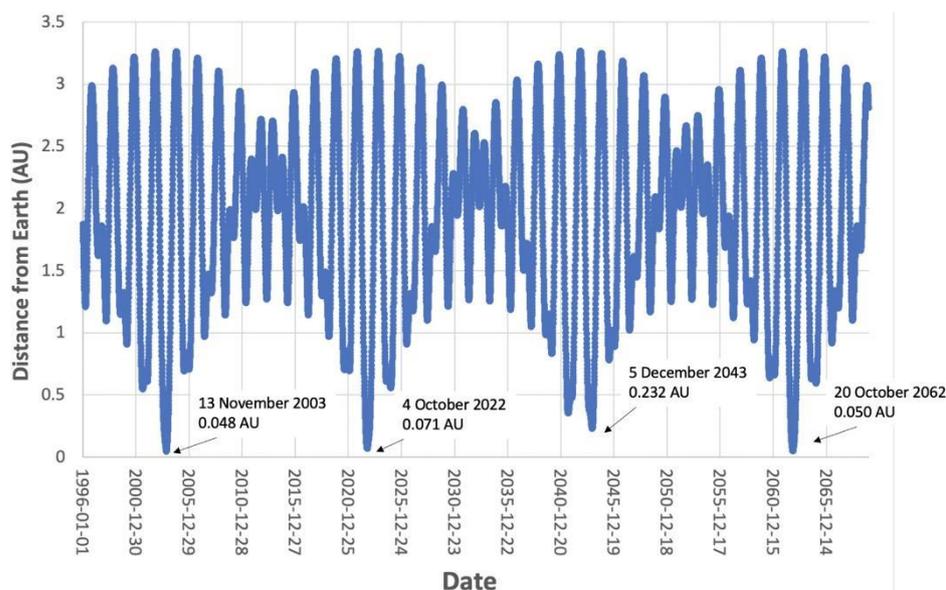
¹⁶ autonomes Navigationssystem zum zielgenauen Treffen von Dimorphos

¹⁷ Nanosatelliten mit geringer Größe und Gewicht (1-10kg) [19]

feststellen. Auch war es bei Planungsbeginn absehbar, dass man nur wenige Jahre auf die richtige Gelegenheit für die Durchführung warten musste¹⁸. All diese vorteilhaften Voraussetzungen machten eine wirtschaftlich stemmbare Mission möglich. Ein zusätzlicher Vorteil dieses Asteroidensystems ist, dass die stoffliche Zusammensetzung von Didymos und Dimorphos der entspricht, die die meisten auf der Erde eingeschlagenen Meteoriten aufweisen. Somit kann man davon ausgehen, dass sich die aus der DART-Mission gewonnenen Daten auf viele weitere Asteroiden übertragen lassen, wodurch Abwehraktionen gegen möglicherweise einschlagende Asteroiden genauer geplant werden können. Auch in der Modellierung von möglichen Einschlagsszenarien von Asteroiden auf der Erde lassen sich diese Daten dadurch zuverlässig einsetzen [14]¹⁹.

3.3 Planung des Impakts

Damit die Forscher ein aussagekräftiges Ergebnis erhalten und die Mission gelingt, müssen viele Faktoren stimmen. Der passende Zeitpunkt für den Einschlag der Sonde auf Dimorphos wurde ermittelt, indem der Abstand des Asteroidensystems zur Erde in den nächsten Jahren berechnet wurde.

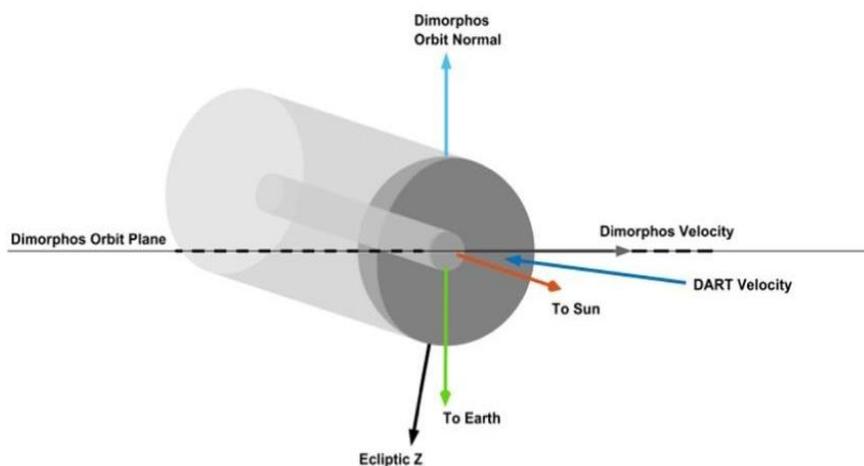


Grafik 1: Entfernung des Didymos-Systems zur Erde [14]

¹⁸ siehe Grafik 1 und Erläuterungen in 3.3

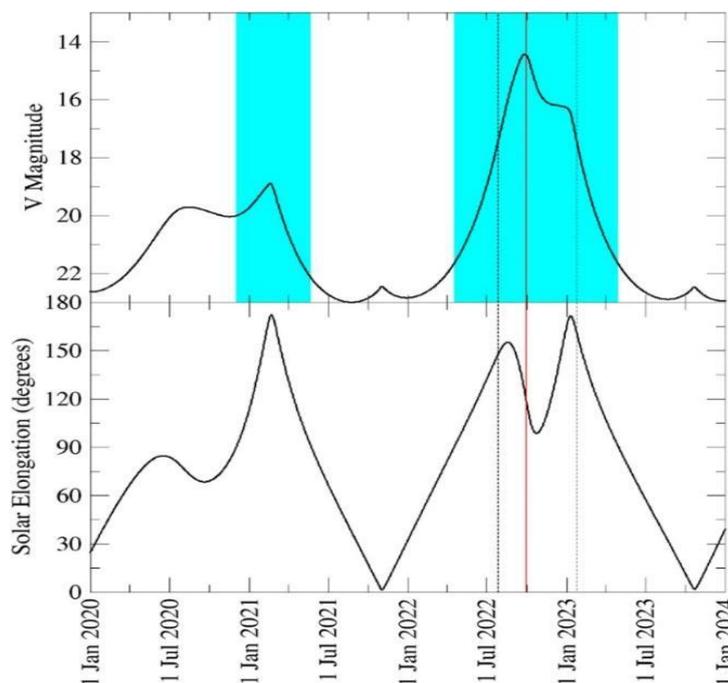
¹⁹ Quelle bezieht sich auf sämtlichen Inhalt in Kapitel 3.2

Ein möglichst geringer Abstand ist praktisch, da so bestimmte Messungen direkt von der Erde aus durchgeführt werden können. Der bei Planung nächstmögliche Zeitpunkt, bei dem ein möglichst geringer Abstand zwischen Erde und System vorliegt, war der 4.10.2022 (siehe Grafik 1). Da sich danach erst 2062 wieder eine geeignete Möglichkeit bieten würde, legte man den Fokus auf das Jahr 2022. Die Erdnähe allein ist allerdings nicht das einzige Kriterium für die Festlegung des Einschlagzeitpunktes. Auch muss sichergestellt werden, dass sich Dimorphos in einer für die DART-Sonde erreichbaren Position befindet und ein Einschlagswinkel erreicht werden kann, der sicherstellt, dass die von DART auf Dimorphos übertragene Energie ausreicht, um erkennbare Bahnabweichungen feststellen zu können. Nach den Gesetzen der Physik wäre die Kraftübertragung dann am größten, wenn DART zum Zeitpunkt des Impakts in einem Winkel von 180° zur Umlaufbahn von Dimorphos steht. Denn so würde die gesamte Energie der Sonde der kinetischen Energie des Asteroiden entgegenwirken und der Bremseffekt wäre am größten. Die DART-Sonde müsste also auf der zum Impaktzeitpunkt am Orbit von Dimorphos anliegenden Tangente fliegen. Da es allerdings bestimmte Abweichungen und Ungenauigkeiten in der Berechnung der Position von Dimorphos und in der Flugbahn von DART geben kann, ist ein exakt frontaler Aufprall praktisch nicht zu erreichen. Viel mehr kann es Berechnungen zufolge im „worst-case“ zu einem Aufprallwinkel von 33° abweichend zur Bahnebene von Dimorphos kommen. Die Sonde würde also von schräg unten auf den Asteroiden einschlagen (Grafik 2).



Grafik 2: mögl. Impakt aus Sicht der Orbit-Ebene des Dimorphos [14]

Dadurch würde ein erheblicher Teil der Aufprallenergie nicht mehr entgegen der Kraft von Dimorphos wirken, sondern schräg dazu. Dadurch wird die Bremswirkung verringert und der Asteroid unter Umständen zusätzlich in vertikale Richtung abgelenkt, sollte die Impaktenergie dafür genügen. Durch die verringerte Bremswirkung wird die Umlaufzeit von Dimorphos nicht so stark verändert, wie bei einem perfekten Einschlagswinkel von 180° zur Bahnebene. Die Veränderung der Umlaufgeschwindigkeit sollte allerdings möglichst groß sein, damit eine erfolgreiche Ablenkung des Asteroiden beobachtet werden kann. Diese Beobachtung ist ein weiterer wichtiger Faktor für die Wahl des Einschlagzeitpunktes. Nur wenn von der Erde aus zum Zeitpunkt des Einschlages und kurz danach Bilder und Messungen gemacht werden können, kann man erste Erkenntnisse über den Erfolg der Mission sammeln. Ob ein Himmelskörper von der Erde aus gut zu beobachten ist, hängt von zwei entscheidenden Faktoren ab. Das ist zum einen die sogenannte Sonnenelongation²⁰, die beschreibt, in welchem Winkel ein Himmelskörper zur Sonne steht und zum anderen die scheinbare Helligkeit des Asteroiden, welche in V Magnituden angegeben wird²¹.



Grafik 3: V Magnitude & Sonnenelongation des Didymos-Systems [14]

²⁰ Winkel zwischen Sonne und Himmelskörper; Bezugspunkt ist die Erde [21]

²¹ Ein geringerer Wert bedeutet hier eine höhere scheinbare Helligkeit; deshalb ist in Grafik 3 die Hochachse umgedreht (kl. Werte oben)

Am besten beobachten kann man einen Himmelskörper, wenn der Winkel zwischen Sonne und Objekt mit Bezug zur Erde mehr als 90° beträgt. Während des sich aus den vorhergehenden Kriterien ergebenden Zeitraums für einen Einschlag (2021/2022) gibt es zwei Zeitspannen in denen das Didymos-System eine Elongation von mehr als 90° aufweist (Grafik 3; blau gefärbt). Betrachtet man die scheinbare Helligkeit, ist zu erkennen, dass diese in der späteren der beiden Elongationsspitzen-Zeitspannen deutlich höher als in der ersten (geringere V Magnitude), wodurch Didymos und Dimorphos heller wirken und besser zu sehen sind. Teleskope können ausreichend genaue Bilder liefern, sobald die scheinbare Helligkeit einen Wert von 17,5 Magnituden unterschreitet. Auch dies ist im zweiten Zeitfenster gegeben (Grafik 3, Bereich zwischen den gestrichelten Linien). Da in diesem Zeitraum auch die Sonnenelongation sehr groß ist, hat man sich dafür entschieden, den Einschlag der DART-Sonde auf den 30.09.2022 zu terminieren (Grafik 3; rote Linie). An diesem Tag ist die scheinbare Helligkeit in etwa maximal²² und die Elongation mit 120° ebenfalls gut für Beobachtungen geeignet [14]²³.

3.4 β und die Szenarien nach dem Impakt

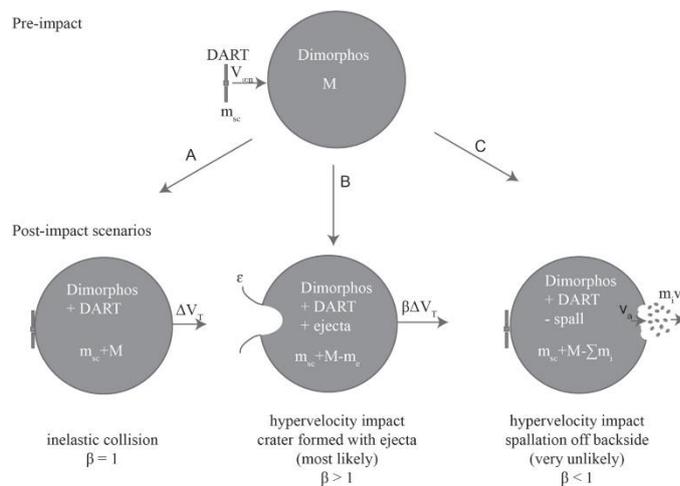
Wenn die DART-Sonde auf Dimorphos eingeschlagen ist, gibt es grundsätzlich drei mögliche Szenarien. All diese Szenarien unterscheiden sich darin, wie stark die Auswirkungen des Impakts ausfallen. Dadurch hängt das Erreichen der Ziele der DART-Mission maßgeblich vom Eintreten dieser Szenarien ab. Damit die Forscher eine Änderung der Umlaufbahn von Dimorphos feststellen können, muss sich dessen Umlaufzeit P um Didymos um mindestens 73 Sekunden verkürzen ($\Delta P = 73s$). Diese Änderung wiederum hängt von den Auswirkungen des Impakts ab. Die Auswirkungen berechnen sich aus dem Impuls von Dimorphos, dem Impuls der Raumsonde und dem sogenannten Impulsübertragungsverbesserungsparameter β ²⁴. Dieser Parameter kann als Faktor gesehen werden, der

²² Im betrachteten Zeitraum

²³ Quelle bezieht sich auf sämtlichen Inhalt in Kapitel 3.3

²⁴ Wird bei der Auswertung und Schlussfolgerung noch einmal wichtig

beschreibt, wie stark der Impuls der Raumsonde durch den Auswurf von Asteroidengestein verstärkt wird. Die Zahl, die für β eingesetzt wird, hängt von verschiedenen Parametern ab²⁵. So wird im ersten der drei möglichen Szenarien (Szenario A) davon ausgegangen, dass DART auf der Oberfläche einschlägt, diese aber nicht beschädigt wird. Es entsteht also kein (größerer) Krater und es wird kein Gestein in den Weltraum gestoßen. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass $\beta = 1$ gilt und der Faktor somit keinen weiteren Einfluss auf die Auswirkungen des Impakts hätte (Grafik 4, unten links). Bei diesem Einschlag wäre also allein die Energie der Raumsonde für die Änderung der Umlaufbahn verantwortlich. In Szenario B entsteht nach dem Aufschlag der Sonde auf der Oberfläche ein Krater und eine größere Menge Auswurfmaterial wird abgestoßen. Dadurch verstärkt sich die Auswirkung auf Dimorphos. Dies kann man sich ähnlich vorstellen, wie bei einem aufgeblasenen Luftballon, den man loslässt. Auch dieser erhält durch die ausströmende Luft einen Schub, welcher entgegengesetzt der Strömungsrichtung der Luft wirkt, wodurch der Ballon im Raum umherfliegt. Genau dasselbe Prinzip liegt auch der Modellierung dieses zweiten möglichen Falls zugrunde. In diesem Fall wird β mit $\beta > 1$ beschrieben (Grafik 4, Mitte unten). Dieses Szenario ist zum einen der wahrscheinlichste Fall, da dies zum Beispiel auch bei Asteroideneinschlägen auf der Erde der Fall ist, zum anderen ist es auch der für das Ergebnis vorteilhafteste Fall, da die Bahnänderung verstärkt wird und so die Wahrscheinlichkeit, dass diese zu beobachten ist verbessert wird.



Grafik 4: Szenarien nach dem Impact [14]

²⁵ s. nächste Seite und Kapitel 6.1.3

Die dritte Möglichkeit (Szenario C), welche allerdings von Forschern als sehr unwahrscheinlich angesehen wird, besteht darin, dass sich nach einem Aufprall auf der Vorderseite von Dimorphos auf genau der entgegengesetzten Seite Gestein ablöst und durch den dadurch entstehenden Schub der Impuls verringert oder sogar aufgehoben wird, da auch hier der Impuls entgegen der Auswurfrichtung wirkt. In diesem Fall gilt $\beta < 1$ und je nachdem, wie viel kleiner als 1 das β ist, kann es sein, dass das Missionsziel nicht erreicht werden kann, da keine Bahnänderung sichtbar wird ($\Delta P < 73s$). Berechnungen der Forscher zufolge ist im wahrscheinlichsten Fall (Szenario 2) davon auszugehen, dass eine Änderung der Umlaufdauer von deutlich mehr als 73s stattfindet. Diese könnte sogar bei 5 bis 10 Minuten liegen. Genauer lässt sich der Faktor β noch beschreiben, wenn man ihn selbst als abhängige Größe betrachtet. Denn er ist unter anderem vom Verhältnis der Sondenmasse²⁶ m_{sc} und der Masse des zu treffenden Asteroiden M abhängig. Auch die Geschwindigkeiten, die die Sonde in Bezug auf verschiedene Richtungen aufweist, spielt eine Rolle (zum Beispiel die Geschwindigkeit $V_{\infty n}$, welche die Geschwindigkeit entlang der Normalen beschreibt und die Geschwindigkeit $V_{\infty \perp n}$, welche orthogonal zu $V_{\infty n}$ wirkt). Auch spielt die durch den Einschlag erreichte Änderung der Umlaufgeschwindigkeit ΔV_T eine Rolle, weshalb bei der Planung der Mission nur grob geschätzt werden kann, wie groß β ist²⁷. Ein genauer Wert lässt sich somit erst nach der Mission ermitteln. Neben diesen Größen gibt es noch weitere Abhängigkeiten, die schlussendlich zu folgender Formel zur Berechnung von β führen²⁸ [14²⁹]:

$$\beta = \frac{\frac{M}{m_{sc}} \Delta V_T - V_{\infty \perp n} \cdot \hat{e}_T + V_{\infty n} \epsilon \cdot \hat{e}_T}{V_{\infty n} (\hat{n} + \epsilon) \cdot \hat{e}_T}$$

Grafik 5: Formel zur Bestimmung von β [14]

²⁶ Masse der Raumsonde (s. Kapitel 3.1)

²⁷ siehe Erläuterungen zu $\beta < / = / > 1$

²⁸ Eine genaue Auflistung der Parameter findet sich in Kapitel 6.1.4

²⁹ Quelle gilt für sämtlichen Inhalt in Kapitel 3.4

3.5 Ziele der Datenanalyse

Bei der Auswertung der Missionsdaten werden verschiedene Ziele verfolgt. Zum einen sollen mit Hilfe der Daten der Bordkamera der DART-Sonde die Eigenschaften der Oberfläche der Einschlagsstelle genauer bestimmt werden, damit man anhand dessen schauen kann, wieviel Kraft die Sonde beim Aufprall mutmaßlich auf den Asteroiden übertragen hat. Des Weiteren soll mit Hilfe der Aufnahmen des LICIACubes und mit Teleskopbeobachtungen von der Erde aus die Menge an ausgeworfenem Gestein bestimmt werden. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse auf die Festigkeit und Zusammensetzung des Asteroiden ziehen und der Effekt des Auswurfes genauer beurteilen. Diese Erkenntnisse sind wichtig, damit ein möglichst genauer Wert für den Faktor β ermittelt werden kann [14]. Dieser ließe sich dann auf andere Asteroiden übertragen und somit zur Berechnung möglicher Abwehrmissionen nutzen. Hauptziel soll also sein, dass die Ergebnisse von DART auf andere Asteroiden mit ähnlicher stofflicher Zusammensetzung übertragen werden können und aufgrund der zu erwartenden Impulsverstärkung β eine Raumsonde konstruiert werden kann, die sowohl die passende Masse, als auch auch Geschwindigkeit und Flugbahn hat, um einen potenziell gefährlichen Asteroiden auf eine ungefährliche Bahn zu lenken, ohne, dass dabei wortwörtlich über das Ziel hinausgeschossen wird. Dies wäre der Fall, wenn zum Beispiel der Wert für β falsch errechnet würde und auf Grund dessen eine Raumsonde auf dem Asteroiden einschlagen würde, die viel zu viel Masse mitführt, wodurch der Asteroid zwar abgelenkt würde, aber wieder eine für die Erde gefährliche Umlaufbahn einnähme. Daher ist es notwendig, aus den Daten der DART-Mission eine möglichst genaue Aussage über den Wert von β zu treffen. Ein weiteres Ziel der Auswertung ist es, die Eigenschaften des binären Asteroidensystems kennen zu lernen, damit auch diese Erkenntnisse bei anderen Asteroiden und kommenden Missionsplanungen mitberücksichtigt werden können.

4 Missionsergebnisse und Ausblick

Am 23. November 2021 war es so dann endlich weit. Alle Planungen waren abgeschlossen, alle Modelle berechnet und die Rakete samt Raumsonde gefertigt. Um 6:21 Uhr UTC³⁰ startete die DART-Mission auf ihren Flug zum binären Asteroidensystem Didymos. Nach über 8 Monaten Flugzeit schlug die DART-Sonde am 26. September 2022 um 23:14.24 Uhr UTC auf ihrem Ziel Dimorphos ein [16]. Auf Grund dessen, dass die Mission vor noch gar nicht allzu langer Zeit erst abgeschlossen wurde, ist die Auswertung noch nicht vollständig abgeschlossen, weshalb erst eine begrenzte Menge an Daten zur Verfügung steht. Außerdem soll im Jahr 2024 eine Aufklärungsmission der ESA, die Hera-Mission, starten, die die Auswirkungen auf Dimorphos noch genauer untersuchen wird. Aber schon jetzt weisen die Bilder und Daten, die von der DART-Sonde selbst und vom mitgeführten LICIACube gesammelt wurden, auf einen Erfolg der Mission hin. Und auch durch die Beobachtung von der Erde aus wurden bereits Erkenntnisse gewonnen, die dies unterstützen. Die Umlaufdauer von Dimorphos um Didymos konnte um ganze 33 Minuten verkürzt werden [9]. Diese Änderung beträgt ein Vielfaches dessen, was für eine Beobachtung nötig gewesen wäre und übertrifft auch die prognostizierte Änderung von 5-10 Minuten (s. Kapitel 3.4) deutlich. Auch der Faktor β konnte bereits genauer bestimmt werden. Durch die beim Anflug auf das Asteroidensystem entstandenen Bilder konnte die Masse und die Beschaffenheit der Oberfläche von Dimorphos genauer bereits näher analysiert werden. Durch diese Daten und durch die Analyse des auf Teleskopbildern sichtbaren „Schweifes“³¹, der nach dem Aufprall durch den Auswurf gebildet wurde, konnte ein genauerer Wert für β festgelegt werden. Der Faktor β liegt in etwa bei 2,2 – 4,9, was bedeutet, dass der Impuls der DART-Sonde durch die Auswürfe sicher mehr als verdoppelt, vielleicht sogar fast verfünffacht wurde, im Gegensatz zu einem Aufprall, bei dem kein Auswurf entstanden wäre (s. Modell 1 in Kapitel 3.4 ($\beta = 1$)) [13]. Im Jahr 2024 wird dann die Hera-Mission der ESA starten, um weitere Erkenntnisse über das Didymos-

³⁰ Universal Time Coordinated = koordinierte Weltzeit [12]

³¹ Beim Aufprall weggeschleudertes Gestein und Staub, welches/welcher nun hinter dem Kometen herzieht

System und die Eigenschaften von Dimorphos zu sammeln. Hierbei sollen unter anderem die stoffliche Zusammensetzung der Asteroiden, die Auswirkungen der Änderung der Umlaufdauer und der Auswurfgeschwindigkeit genauer in Augenschein genommen werden [10]. Die Daten werden benötigt, um die Genauigkeit von Modellierungen und Berechnungen zu verbessern und um herauszufinden, auf welche Asteroiden sich die gewonnenen Erkenntnisse übertragen lassen. Denn nicht alle Asteroiden verhalten sich bei einem Einschlag gleich, sodass zum Beispiel der Impulsübertragungsverstärkungsfaktor β bei Asteroiden, die eine andere Zusammensetzung und damit einhergehend eine andere Oberflächenfestigkeit haben, größer oder kleiner sein kann [14].

5 Fazit

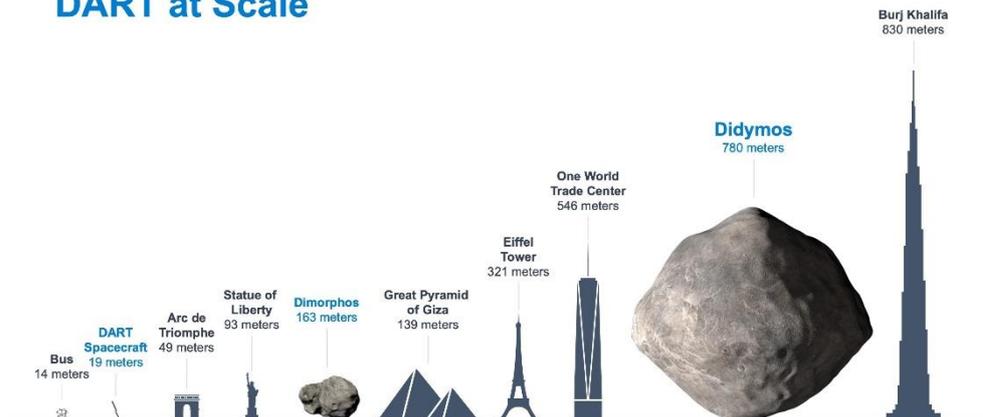
Die NASA hat mit der DART-Mission bewiesen, dass es mit Hilfe des Impaktor-Prinzips möglich ist, einen Asteroiden abzulenken und seine Bahn zu beeinflussen. Außerdem ist es gelungen, Daten zu ermitteln, die es in Zukunft möglich machen, ähnliche Missionen deutlich präziser zu entwickeln und durchzuführen, da Faktoren wie die Impulsverstärkung nun besser eingeschätzt werden können. Die Verteidigung unseres Planeten Erde gegen Asteroiden ist also ein großes Stück vorangeschritten, wenngleich es noch einer Menge an Datenerhebung, Analyse und Forschung benötigt, bevor man bei der Asteroidenabwehr von einem zuverlässig funktionierenden System sprechen kann. Denn im Ernstfall ist immer noch eine Vorlaufzeit von mindestens mehreren Jahren, besser sogar Jahrzehnten nötig, um eine Mission zur Abwehr eines Asteroiden zu planen und diesen sicher von der Erde abzulenken.

6 Anhang

6.1 Ergänzende Informationen

6.1.1 Größenvergleich: DART-Akteure vs. Gebäude

DART at Scale



Grafik 6: Größenvergleich: DART-Akteure vs. Gebäude [15]

6.1.2 Die DART-Sonde



Grafik 7: Computergrafik der DART-Sonde [15]

6.1.3 Berechnung von β

$$\beta = \frac{\frac{M}{m_{sc}} \Delta V_T - V_{\infty n} \cdot \hat{e}_T + V_{\infty n} \epsilon \cdot \hat{e}_T}{V_{\infty n} (\hat{n} + \epsilon) \cdot \hat{e}_T}$$

Grafik 8: Formel zur Bestimmung von β [14]

Table B1
Source of Data Inputs to the DART Estimate of β

Parameter	Definition—Source
ΔP	Change in orbital period of satellite due to DART impact—derived from timing of ground-based mutual event observations
ΔV_T	Along-track change in orbital velocity—obtained from ΔP and the binary mutual orbit parameters
m_{sc}	Spacecraft mass—estimated from fuel consumption and known dry mass value
\hat{e}_T	Unit vector describing satellite orbital velocity at impact—derived from orbit and impact time
\hat{n}	Surface normal unit vector at the impact site—shape modeling
V_∞	Impact velocity—spacecraft navigation
$V_{\infty,n}$	Component of impact velocity in normal direction—computed from $V_{\infty,n} = V_\infty \cdot \hat{n}$
$V_{\infty,t}$	Component of impact velocity orthogonal to normal direction—computed from $V_{\infty,t} = V_\infty - V_{\infty,n} \hat{n}$
M	Target mass—shape and volume from DART and LICIACube imaging, and radar measurements of system, assuming uniform bulk density across Didymos system
ϵ	Offset vector between surface normal direction and ejecta velocity vector—derived from impact simulation and modeling given the known V_∞ and \hat{n} .

Grafik 9: Parameter zur Berechnung von β [14]

6.2 Abbildungsverzeichnis

Grafik 1: Entfernung des Didymos-Systems zur Erde [14] 8

Grafik 2: mögl. Impakt aus Sicht der Orbit-Ebene des Dimorphos [14]..... 9

Grafik 3: V Magnitude & Sonnenelongation des Didymos-Systems [14] ... 10

Grafik 4: Szenarien nach dem Impakt [14] 12

Grafik 5: Formel zur Bestimmung von β [14]..... 13

Grafik 6: Größenvergleich: DART-Akteure vs. Gebäude [15] 18

Grafik 7: Computergrafik der DART-Sonde [15]..... 18

Grafik 8: Formel zur Bestimmung von β [14]..... 18

Grafik 9: Parameter zur Berechnung von β [14] 19

Grafik 10: Logo der DART-Mission [15].....(Deckblatt)

Grafik 11: Logo der Schule(Deckblatt)

6.3 Literaturverzeichnis

[1] Andone, D. (17. 02 2023). *NASA unveils plan to test asteroid defense technique*. Von edition.cnn.com:
<https://edition.cnn.com/2017/07/01/us/nasa-asteroid-defense-trnd/index.html> abgerufen

- [2] ARD alpha. (15. 02 2023). *Asteroidenabwehr - Die Erde vor knallharten Feinden schützen*. Von ardalpha.de: <https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/asteroideneinschlag-dlr-abwehr-100.html> abgerufen
- [3] ARD alpha. (07. 03 2023). *Asteroideneinschlag im Yucatán war wohl die Ursache*. Von ardalpha.de: <https://www.ardalpha.de/wissen/weltall/astronomie/dinosaurier-asteroid-aussterben-dino-meteorit-100.html> abgerufen
- [4] Bremer, H., & Skalli, S. (15. 02 2023). *Asteroiden*. Von planetwissen.de: <https://www.planetwissen.de/natur/weltall/asteroiden/index.html> abgerufen
- [5] DLR. (15. 02 2023). *Asteroiden*. Von dlr.de: https://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-174/319_read-15360/ abgerufen
- [6] ESA. (15. 02 2023). *About asteroids and Planetary Defence*. Von esa.int: https://www.esa.int/Space_Safety/About_asteroids_and_Planetary_Defence abgerufen
- [7] ESA. (17. 02 2023). *Asteroid Impact & Deflection Assessment (AIDA) collaboration*. Von esa.int: https://www.esa.int/Space_Safety/Hera/Asteroid_Impact_Deflection_Assessment_AIDA_collaboration abgerufen
- [8] Kayser, R. (15. 02 2023). *Asteroiden*. Von Welt der Physik: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/von-meteoriten-bis-kleinplaneten/asteroiden/> abgerufen
- [9] Merzdorf, J. (28. 02 2023). *Early Results from NASA's DART Mission*. Von nasa.gov: <https://www.nasa.gov/feature/early-results-from-nasa-s-dart-mission> abgerufen
- [10] Michel, P., & 47 weitere. (07. 03 2023). *The ESA Hera Mission: Detailed Characterization of the DART Impact Outcome and of the Binary Asteroid (65803) Didymos*. Von iopscience.iop.org: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/ac6f52/pdf> abgerufen
- [11] Park, R. (15. 02 2023). *ssd.jpl.nasa.gov*. Von Solar System Dynamics: <https://ssd.jpl.nasa.gov/> abgerufen

- [12] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. (28. 02 2023). *Koordinierte Weltzeitskala UTC*. Von ptb.de:
<https://www.ptb.de/cms/index.php?id=956> abgerufen
- [13] Raj, A. (07. 03 2023). *NASA's DART Data Validates Kinetic Impact as Planetary Defense Method*. Von nasa.gov:
<https://www.nasa.gov/feature/nasa-s-dart-data-validates-kinetic-impact-as-planetary-defense-method/> abgerufen
- [14] Rivkin, A. S., & 23 weitere. (17. 02 2023). *The Double Asteroid Redirection Test (DART): Planetary Defense Investigations and*. Von iopscience.iop.org:
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/ac063e/pdf> abgerufen
- [15] The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory LLC. (07. 03 2023). *DART Gallery*. Von dart.jhuapl.edu:
<https://dart.jhuapl.edu/Gallery/> abgerufen
- [16] The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory LLC. (17. 02 2023). *DART Mission Overview*. Von dart.jhuapl.edu:
<https://dart.jhuapl.edu/Mission/index.php> abgerufen
- [17] Vito Technology, Inc. (15. 02 2023). *Asteroidengürtel: Ein Planet, der sich nie gebildet hat*. Von starwalk.space:
<https://starwalk.space/de/news/asteroid-belt-facts> abgerufen
- [18] Vokrouhlicky, D., & Bottke, W. F. (23. 02 2023). *Yarkovsky and YORP effects*. Von scholarpedia.org:
http://www.scholarpedia.org/article/Yarkovsky_effect abgerufen
- [19] Walker, R. (17. 02 2023). *Technology CubeSat*. Von esa.int:
https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Technology_CubeSats abgerufen
- [20] Wikipedia. (17. 02 2023). *Doppelasteroid*. Von wikipedia.org:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelasteroid> abgerufen
- [21] Wikipedia. (23. 02 2023). *Elongation (astronomy)*. Von wikipedia.org: [https://en.wikipedia.org/wiki/Elongation_\(astronomy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Elongation_(astronomy)) abgerufen

6.4 Erklärungen

6.4.1 Versicherung selbständiger Erarbeitung und Anfertigung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

6.4.2 Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den _____

Unterschrift der Schülerin / des Schülers