

Die Asteroidenmissionen DART und Hera

Carsten Reese

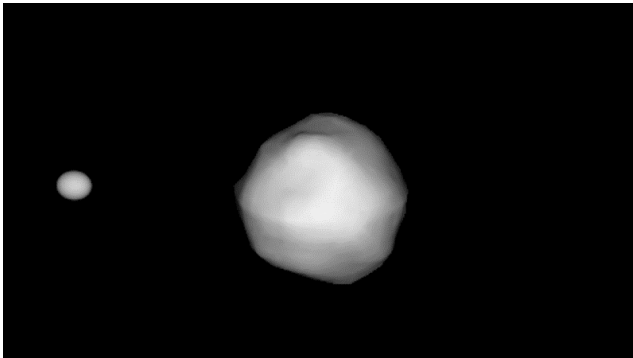


Abb. 1: Didymos und sein Mond Dimorphos – aus Radaraufnahmen und photometrischen Lichtkurven konstruierte Ansicht. © NASA, public domain

Es gibt eine ganze Reihe von mehr oder minder spannenden Science-Fiction-Filmen über Asteroideneinschläge auf der Erde. Meist verhindern mutige Frauen und Männer mit gewagten Manövern das Schlimmste. Die Wirklichkeit ist vielleicht nicht ganz so hochspannend, aber im Verborgenen und mit viel Vorlauf wird auch in der echten Wissenschaft an der Verhinderung von Asteroideneinschlägen auf der Erde gearbeitet. Der Kern der Sache, nämlich die Gefährdung der Erde durch kosmische Treffer, ist nämlich durchaus ernst zu nehmen. Wir kennen den nahen Weltraum und die größeren Brocken in unserem Sonnensystem heute recht gut. Einschläge der gewaltigen Sorte, also von Asteroiden mit mehreren Kilometern Durchmesser, sind in absehbarer Zeit auszuschließen. Aber auch kleinere Brocken im Bereich mehrerer hundert Meter Durchmesser haben das Potenzial gewaltige Schäden anzurichten. Erkennt man das früh genug (wir reden hier von einigen Jahren), dann hat man eigentlich gute Chancen, mit relativ wenig Aufwand (also kleiner Impulsänderung) rechtzeitig eine kleine Bahnstörung zu verursachen, die den Asteroiden am Ende an der Erde vorbeiführt statt dass er sie trifft. Die Vorwarnzeit ist realistisch, da sich die Brocken ja auf elliptischen Bahnen innerhalb unseres Sonnensystems bewegen und nicht plötzlich aus dem Nichts auftauchen. Solche Systemkreuzer wie z.B. Oumuamua, der 2018 hyperbolisch durch unser Sonnensystem flitzte, sind extrem seltene Ausnahmen. Auch Kometen sind zum Teil nicht lange vorher bekannt, aber ebenso zahlenmäßig gegenüber Asteroiden vernachlässigbar, und ein Einschlag auf der Erde ist damit extrem unwahrscheinlich.

Bisher ist die Ablenkung von Asteroiden reine Theorie. Das wird sich in Kürze ändern, denn es wird eine kombinierte Mission (AIDA – Asteroid Impact and Deflection Assessment, etwa „Untersuchung zum

Einschlag und der Ablenkung eines Asteroiden“) geben: eine NASA-Sonde zur Impulsänderung und einen ESA Satelliten zur näheren Untersuchung, die genau diese Ablenkung an einem Doppelasteroiden ausprobieren werden. Der Asteroid (65803) Didymos, selbst etwa 780 m im Durchmesser, wird von einem Mond (Dimorphos) mit etwa 160 m Durchmesser in 1,2 km Abstand umkreist. Didymos dreht sich in gut 2 Stunden um seine eigene Achse, der Mond hat wie der Erdmond eine gebundene Rotation und eine Umlaufzeit von etwa 12 Stunden. Die Masse des Gesamtsystems beträgt gut 500 Millionen Tonnen. Es ist geplant, die Sonde DART (**D**ouble **A**steroid **R**edirection **T**est, also etwa Doppelasteroiden-Ablenkungstest) mit dem Mond kollidieren zu lassen (Abb. 2), und zwar mit einer Geschwindigkeit von 6,6 km/s und einer Masse von knapp 600 kg. Der Einschlag wird nicht zu einer messbaren Änderung der Umlaufbahn um die Sonne führen, aber die Umlaufzeit des Mondes wird sich ändern, und zwar um mehrere Minuten. Der Einschlag wird dann stattfinden, wenn Didymos gerade in Erdnähe ist. Aus Radar- und photometrischen Daten wird man von der Erde aus die Änderung der Umlaufzeit bestimmen können, bekommt also relativ schnell und direkt eine Rückmeldung über den Erfolg der Aktion. Deshalb hat man auch ein Doppelsystem gewählt, bei einem einzelnen Asteroiden wäre der Effekt so nicht messbar. Jetzt könnte man denken, dass man da doch keine Wissenschaft betreiben kann. Was soll schon passieren? Der Impuls der Sonde beim zentralen Stoß überträgt sich komplett auf den Mond und ich kann die Wirkung mit Hilfe der Impulserhaltung, der Energieerhaltung und des 3. Keplerschen Gesetzes berechnen:

– die Summe aus potenzieller plus kinetischer Energie des Didymos-Mond Systems ist konstant (negativ, weil es sich um ein gebundenes System handelt), es wird lediglich durch die Sonde Energie zugeführt.

– der Impuls $m_{\text{Sonde}} \cdot v_{\text{Sonde}}$ wird dem System zugeführt

Die spezifische Energie (die Energie bezogen auf die reduzierte Masse

$$\left(M_{\text{Mond}} \cdot M_{\text{Didymos}} \right) / \left(M_{\text{Mond}} + M_{\text{Didymos}} \right)$$

des Zweikörpersystems Didymos plus Mond) ist definiert als

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot v^2 - \frac{G \cdot M}{d} = -1,49 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Das ist Summe aus spezifischer kinetischer Energie und (negativer) potenzieller Energie im Gravitationsfeld. Bei negativem Ergebnis ist der Zustand gebunden. Hierin sind v die Relativgeschwindigkeit der

beiden Körper (näherungsweise die Bahngeschwindigkeit des Mondes), $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ die Gravitationskonstante, M die Gesamtmasse (aus etwa 523 Millionen Tonnen für Didymos und 4,6 Millionen Tonnen für den Mond) und d der Abstand der Körper. Ich habe hier 1158 m eingesetzt, nur so ergibt sich letztendlich eine Lösung, die mit der gemessenen Umlaufzeit von 11,92 Stunden (18 cm/s Bahngeschwindigkeit) in Einklang ist. Die große Halbachse a ergibt sich dann zu 1180 m, also fast eine Kreisbahn (3. Keplersches Gesetz, nach a auflösen).

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G \cdot M_{\text{gesamt}}}$$

Durch Multiplikation mit der reduzierten Masse erhält man die Energie des Systems:

$$E = \frac{\varepsilon \cdot M_{\text{Mond}} \cdot M_{\text{Didymos}}}{M_{\text{Mond}} + M_{\text{Didymos}}} = -6,74 \cdot 10^7 \text{ J}$$

Die Sonde hat bemerkenswerterweise erheblich mehr Energie:

$$E_{\text{kin,Sonde}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{Sonde}} \cdot v_{\text{Sonde}}^2 = 1,31 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

Es gilt aber Impulserhaltung, so dass der Großteil der Energie während des Stoßes in Wärme umgewandelt wird. Umgerechnet kommen knappe 3 Tonnen TNT als Energieäquivalent zum Einsatz, was zwar nur eine kleine Impulsänderung, aber einen ordentlichen Krater zur Folge hat.

$$\begin{aligned} P_{\text{nachher}} &= P_{\text{Mond}} - P_{\text{Sonde}} \\ &= m_{\text{Mond}} \cdot v_{\text{Mond}} - m_{\text{Sonde}} \cdot v_{\text{Sonde}} \\ &= 8,02 \cdot 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m/s} - 3,96 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \\ &= 7,98 \cdot 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

Das Minuszeichen beim Sondenimpuls steht da, weil die Sonde entgegen der Flugrichtung des Mondes einschlagen wird, ihn also bremst.

Der Impuls des Mondes ist etwa 200-fach größer als der der Sonde. Die Geschwindigkeit des Mondes lässt sich einfach aus seiner Umlaufzeit und dem Bahnradius bestimmen, sie liegt wie oben schon erwähnt bei sehr langsamen knapp 18 cm/s. Die Schwerkraft eines so kleinen Systems ist eben sehr gering.

Da der Impuls nach dem Stoß nun bekannt ist, kann man nun rückwärts die neue Geschwindigkeit des Mondes ermitteln, die etwa 0,8 mm/s langsamer ist als vorher. Ebenfalls rückwärts bestimmt man nun die neue Energie des Systems zu $-6,81 \times 10^7 \text{ J}$ und damit

die neue Halbachse und Umlaufzeit zu 1168 m bzw. 11,74 Stunden. Die neue Umlaufzeit differiert um fast 12 Minuten, das ist gut messbar von der Erde. Ich habe aktuelle Zahlen verwendet, z.B. eine Masse der Sonde von 600 kg. Im Netz gibt es andere Angaben, die geringere Unterschiede ausweisen, weil insbesondere die Sondenmasse niedriger angenommen wurde.

Der scheinbare Widerspruch, dass der Mond sich nach der Kollision langsamer bewegt, aber dennoch für einen Umlauf weniger Zeit benötigt, folgt aus der Bahnmechanik. Die Geschwindigkeitsabnahme bewirkt, dass die Bahn elliptisch wird und die große Halbachse schrumpft. In der kleineren Entfernung bewegt sich der Mond dann aber zwangsläufig schneller: die potenzielle Energie wird in kinetische Energie gewandelt.

So weit, so gut. Diese prinzipielle Rechnung stimmt (fast) z.B. für einen Asteroideneinschlag auf dem Mond. Auf dem Didymos-Mond ist aber die Schwerkraft fast nicht messbar. Um genau zu sein, gilt Folgendes:

Schwerebeschleunigung an der Oberfläche (ebenfalls üblicherweise a , nicht verwechseln mit der großen Halbachse); r bezeichnet hier den Radius des Körpers:

$$a = \frac{G \cdot M}{r^2}$$

Also nur $0,23 \text{ mm/s}^2$ für Didymos und $0,048 \text{ mm/s}^2$ für seinen Mond. Auf der Erde liegt der Wert bekanntermaßen bei $9,8 \text{ m/s}^2$.

Fluchtgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{r}}$$

Mit den Werten für Didymos $0,93 \text{ m/s}$, für seinen Mond $0,42 \text{ m/s}$. Da es sich aber um ein Mehrkörpersystem handelt (Sonne mit einbezogen), gibt es Trajektorien zu den zugehörigen Lagrange-Punkten, die schon mit weit weniger Geschwindigkeit erreicht werden. Im Idealfall (am richtigen Ort und in der richtigen Richtung) reichen bei Dimorphos schon etwa 4 cm/s , damit etwas nie wieder zurückfällt.

Ein kleiner Hüpfen reicht also schon, um das System zu verlassen. Zum Vergleich: die Fluchtgeschwindigkeit vom Erdmond beträgt etwa 2300 m/s , weshalb herausgeschlagenes Material praktisch komplett auf ihn zurückfällt, unsere Rechnung also stimmt. Hier bedeutet das aber, dass bei dem Einschlag Material aus dem System herausgeschlagen wird. Dieses trägt eigenen Impuls aus dem System heraus. Das Interessante ist nun, dass Material natürlich vorwiegend nach hinten entweicht – vorne ist ja der Mond. Es gibt also einen Verstärkungseffekt, und hierfür gibt es bisher nur Modelle, die für unter-

schiedliche Beschaffenheit des Asteroiden unterschiedliche Wirkungen voraussagen. Der Verstärkungsfaktor, β genannt, liegt je nach Modell und Mondbeschaffenheit zwischen 1 und 5. Daher darf man sehr gespannt sein, welche Auswirkung auf die Umlaufbahn nach dem Zusammenstoß mit DART wirklich gemessen wird. Im Extremfall dürfte sich die Umlaufzeit um eine ganze Stunde verkürzen. Es gibt auch noch eine andere Möglichkeit: die Sonde durchschlägt den Mond. Das wird zwar nicht für wahrscheinlich, aber durchaus für möglich gehalten. Diese Erkenntnisse sind äußerst wichtig für die Dimensionierung einer Raumsonde, wenn einmal eine tatsächliche Abwehrmission gestartet werden sollte.

Eine ganz wesentliche Herausforderung der Mission ist natürlich, den Mond zuverlässig und mittig zu treffen. Etwa ab 45 Minuten vor dem Aufprall wird dazu das autonome Navigationssystem an Bord von DART übernehmen. Mittels der eingebauten Kamera DRACO, die auch die einzige Nutzlast ist, wird DART zwischen Mond und Didymos unterscheiden können und die notwendigen Korrekturmanöver selbsttätig ausführen. Die Kamera wird bis 5 Sekunden vor dem Aufprall auch Bilder an die Bodenstation senden.

Von der Erde aus messen kann man im Wesentlichen die Änderung der Umlaufzeit. Was auf dem Didymos-Mond tatsächlich passiert, das bleibt zunächst fast unbekannt. DART hat einen Cube-Sat (LICIACube), also einen sehr kleinen Zusatzsatelliten, mit an Bord, der einige Tage vor dem Einschlag von DART abgekoppelt wird. Er soll den Einschlag verfolgen. Da er jedoch dieselbe Relativgeschwindigkeit zum Mond hat wie DART, schießt er sehr schnell an diesem vorbei und wird nur recht wenig in Erfahrung bringen können. Aber die ESA hat, nach einigem Hin und Her, inzwischen die Hera-Mission auf den Weg gebracht, die leitend von OHB System in Bremen entwickelt und umgesetzt wird. Ursprünglich sollte ein ESA-Satellit vor Ort im Orbit um das System kreisen, wenn der Einschlag erfolgt. Das war die Mission AIM (Asteroid Impact Mission). Aufgrund anderer Prioritäten kam das nicht so richtig ins Laufen und wurde dann eingestellt, aber Hera wird ähnliche Erkenntnisse liefern, nur eben nicht live beim Einschlag dabei sein. AIM hätte aus Sicherheitsgründen auch einen Abstand von etwa 100 km einhalten müssen, also auch nicht die vollen Details erfassen können. Nun gibt es die genannte Mission AIDA. Unter diese Kollaboration fallen die beiden Satelliten DART und Hera, aber auch der genannte Cube-Sat LICIACube mit DART und die Cube-Sat Juventas und Milani mit Hera. Heras Hauptaufgabe ist die fotografische Untersuchung, also die Kartierung der Einschlagstelle, sowie die präzise Massenbestimmung des Mondes. Die Modelle sagen unterschiedliche Formen, Größen und Tiefen des Kraters voraus, und zur Verfeinerung der Modell-

rechnungen reicht die alleinige Messung der Wirkung nicht aus. Man muss sehen, in welcher Form sich der Krater gebildet hat und welche Masse genau getroffen wurde, um eine vernünftige Modellkorrelation vornehmen zu können.

Darüber hinaus werden mit Hera aber weitere wissenschaftliche Untersuchungen des Systems erfolgen. Hera hat Zeit zur Untersuchung. Im Gegensatz zu DART wird Hera das Didymos/Dimorphos System begleiten, also die Relativgeschwindigkeit auf nahezu null reduzieren. Das erfordert eine andere Bahn zum Erreichen des Ziels, und deshalb wird Hera auch deutlich länger unterwegs sein. Heras Instrumente sind zuerst eine Kamera, die auf einer Entwicklung von Jena Optronik für eine andere Mission (Mission Extension Vehicle) basiert, sowie eine schon fluggetriebene Hyperspektralkamera (Hyperscout) von Cosine Research aus Leiden. Da es sich nicht um Neuentwicklungen handelt, ermöglicht dies eine relativ schnelle Realisierung von Hera. Außerdem an Bord sein werden ein Laser-Höhenmesser und eine Infrarotkamera zur Temperaturkartierung. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Partikelgrößen und Oberflächenbeschaffenheit ziehen. Die präzise Massenmessung, auch Dichteunregelmäßigkeiten im Inneren, werden im Prinzip durch die Kommunikationsverbindung mit dem Satelliten möglich: durch Laufzeitmessung erhält man den Abstand, durch Dopplerverschiebung die Relativgeschwindigkeit des Satelliten. Beides wird mit den berechneten Bahnen verglichen, die Abweichungen erlauben dann die Ermittlung der tatsächlichen Massenverteilung. Diese Messungen werden noch durch die der zwei kleinen Cube-Sats ergänzt, die Huckepack bei Hera mitreisen und im System dann abgekoppelt werden. Die Abkopplung wird man ebenfalls verfolgen können, dazu ist eine „Spacecraft Monitoring Camera“ installiert. DART startet bereits demnächst (Zwischen November 2021 und Februar 2022) und wird dann im späten September 2022 sein Ziel erreichen. Hera kommt erst viel später mit einem Start in 2024 und einer Ankunft im System Ende 2026. Mindestens 6 Monate sollen dann Untersuchungen laufen.

Es gab übrigens schon einmal einen gewollten Sondereinschlag (mancher wird sich vielleicht erinnern), und zwar auf einen Kometen: 2005 wurde ein 370 kg schwerer Kupferblock von der Sonde „Deep Impact“ auf Kollisionskurs mit dem Kometen Tempel 1 gebracht. Hier wurde aber ein anderes Ziel verfolgt: mehr über die Zusammensetzung des Kometen zu erfahren, und zwar durch Untersuchung des aufgewirbelten Materials. Eine Bahnänderung konnte nicht gemessen werden, dies war auch nicht beabsichtigt. Auch unser Mond ist malträtiert worden: LCROSS schlug dort 2009 ein, damit man in der Auswurfwolke nach Wasser suchen konnte.

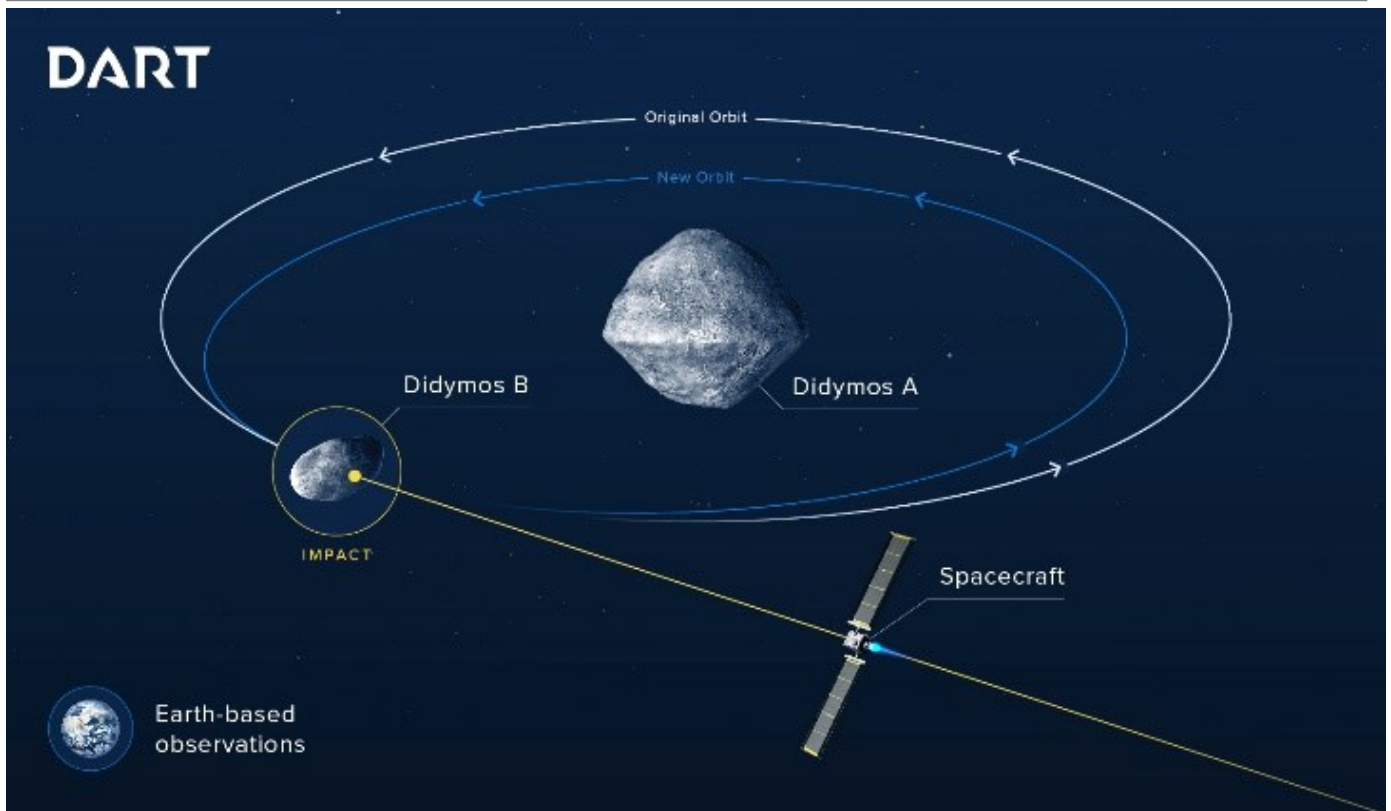


Abb. 2: Die DART Mission. © NASA/Johns Hopkins APL

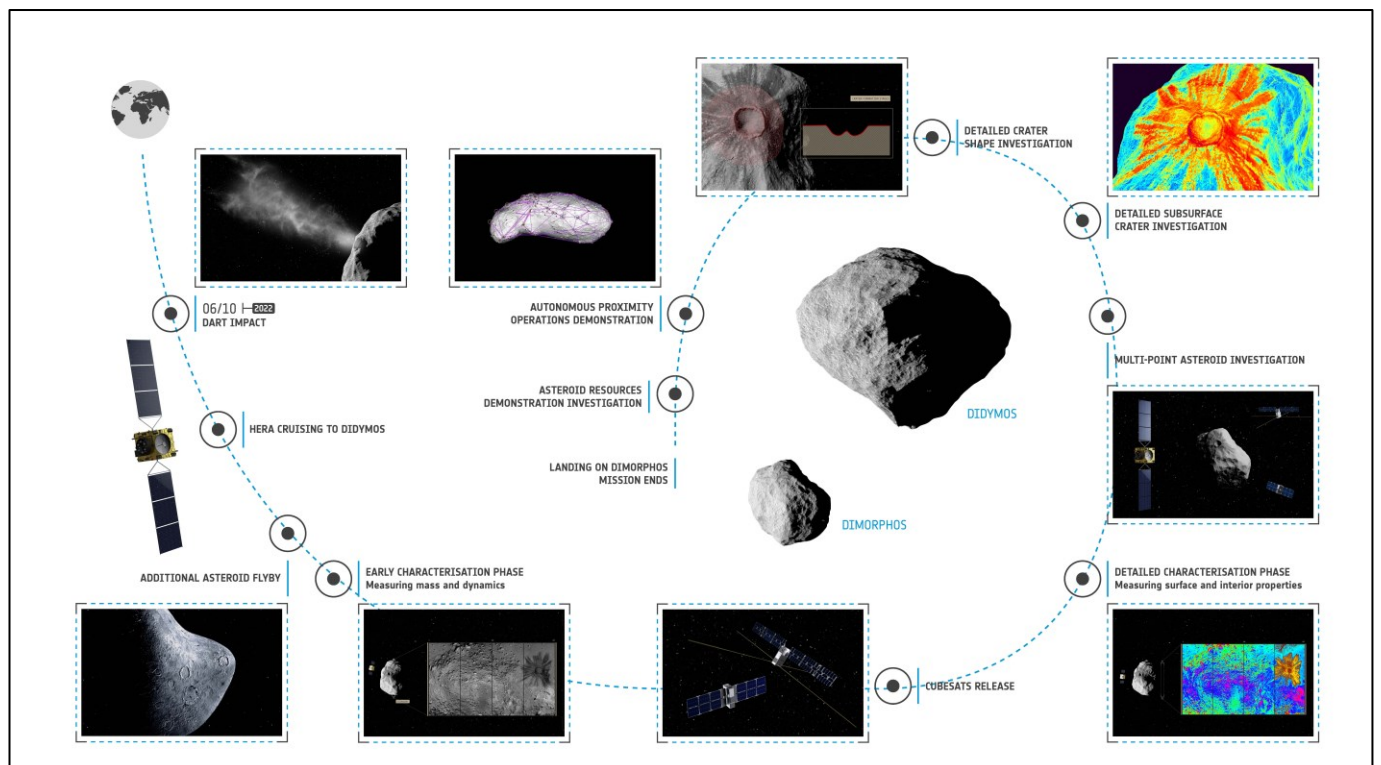


Abb. 3: Die Hera-Mission. © ESA, CC BY-SA 3.0 IGO

