

In Ihrem Artikel „Einschlag auf Dimorphos“ im Heft 12/2022 berichten Sie von einer NASA-Mission, bei der der Asteroid Dimorphos durch den Einschlag der Raumsonde Dart abgebremst wurde. Durch folgende physikalische Betrachtungen kann man ein besseres Verständnis dieses Experiments bekommen:

$$m_{\text{Dart}} = 570 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Dimorphos}} = 4,8 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

$$v_{\text{Dart}} = 6,15 \text{ km/s}$$

Die Geschwindigkeitsänderung des Asteroiden Dimorphos wurde verursacht

a) durch den Impulsübertrag der Raumsonde

$$\Delta v_1 = v_{\text{Dart}} \cdot m_{\text{Dart}} / m_{\text{Dimorphos}} = 0,7 \text{ mm/s}$$

b) durch den Impuls des ausgestoßenen Materials

$$\Delta v_2 = v_{\text{ausg}} \cdot m_{\text{ausg}} / m_{\text{Dimorphos}}$$

Die von der Raumsonde übertragene kinetische Energie beträgt

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{Dart}} \cdot v_{\text{Dart}}^2 = 1,08 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

Diese Energie wurde umgewandelt in

- Erwärmung des Asteroiden
- Ausstoßung von Material der Menge  $m_{\text{ausg}}$  und der mittleren Geschwindigkeit  $v_{\text{ausg}}$

Annahme: 80 % der Energie ging in das ausgestoßene Material

$$E_{\text{ausg}} = 0,8 \cdot E_{\text{kin}} = 8,6 \cdot 10^9 \text{ J} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{ausg}} \cdot v_{\text{ausg}}^2$$

Es kann nun sein, dass eine kleine Materialmenge mit hoher Geschwindigkeit oder eine größere Materialmenge mit moderater Geschwindigkeit ausgestoßen wurde. Dies macht aber einen entscheidenden Unterschied. Die Abbremsung des Asteroiden ist viel effektiver, wenn die ausgestoßene Masse groß und die Ausstoßgeschwindigkeit moderat ist, wie man an der folgenden Tabelle sieht:

Mittlere Geschwindigkeit des ausgestoßenen Materials $v_{\text{aus}}$	daraus berechnete Ausstoßmasse $M_{\text{ausg}}$	Veränderung der Geschwindigkeit von Dimorphos Komponente $\Delta v_2$
3 km/s	1,9 Tonnen	1,18 mm/s
1,8 km/s	5,4 Tonnen	2,04 mm/s
1 km/s	17 Tonnen	3,5 mm/s
300 m/s	188 Tonnen	11 mm/s

Es stellt sich nun die Frage, welche Zeile dieser Tabelle zum Dart-Experiment passt.

**Einen ersten Hinweis** gibt die Aussage in Ihrem Artikel, dass die Staubwolke nach einer Stunde die Größe des Erddurchmessers erreicht hat. Daraus lässt sich die mittlere Geschwindigkeit des ausgestoßenen Materials abschätzen:

$$V_{\text{ausg}} = r_{\text{Erde}}/t = 6300 \text{ km} / 1 \text{ Std} = 1,75 \text{ km/s}$$

Ein Blick in obige Tabelle zeigt, dass damit  $\Delta v_2$  etwa bei 2 mm/s liegt.

**Als zweites** kann man die beobachtete Änderung der Umlaufzeit von Dimorphos betrachten:

vor dem Einschlag  $T_0 = 11 \text{ Std. } 54 \text{ Min}$

nach dem Einschlag  $T_1 = 11 \text{ Std. } 25 \text{ Min}$

Die Bahn von Dimorphos um den größeren Asteroiden Didimos ist kreisförmig. Durch den Einschlag der Raumsonde Dart wird daraus eine schwach ausgeprägte Ellipse.

Der Abstand zwischen den beiden Asteroiden beträgt 1100m.

Große Halbachse vor dem Einschlag  $a_0 = 1100 \text{ m}$

Nach dem 3. Keplerschen Gesetz ergibt sich dann

$$\text{Große Halbachse nach dem Einschlag } a_1 = a_0 * (T_1 / T_0)^{2/3} = 1070 \text{ m}$$

In „[de.wikipedia.org/wiki/Zweikörperproblem](http://de.wikipedia.org/wiki/Zweikörperproblem)“ findet man die folgende Formel, die einen Zusammenhang zwischen der großen Halbachse und der Energie der sich umkreisenden Körper beschreibt:

$$E = E^{\text{kin}} + E^{\text{pot}} = - G * m_1 * m_2 / 2/a$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{s}^2 \quad \text{Gravitationskonstante}$$

$$m_1 = m_{\text{Dimorphos}} = 4,8 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

$$m_2 = m_{\text{Didimos}} = 5,2 \cdot 10^{11} \text{ kg}$$

$$a = \quad \text{vor Einschlag } a_0 = 1100 \text{ m} \quad \text{nach Einschlag } a_1 = 1070 \text{ m}$$

Am Scheitelpunkt der Ellipsenbahn gilt

$$E^{\text{pot}}_1 = E^{\text{pot}}_0 \quad (\text{Am Scheitelpunkt erreicht Dimorphos vor und nach dem Einschlag dieselbe Höhe.})$$

$$E^{\text{kin}}_1 < E^{\text{kin}}_0 \quad (\text{Am Scheitelpunkt ist Dimorphos nach dem Einschlag langsamer.})$$

Aus diesen Angaben kann man nun die Geschwindigkeitsveränderung von Dimorphos berechnen mit dem Ergebnis:  $\Delta v_{\text{Dimorphos}} = 2,74 \text{ mm/s}$

Diese Geschwindigkeitsänderung setzt sich zusammen aus

$$\Delta v_1 = 0,7 \text{ mm/s} \quad \text{verursacht durch den Impulsübertrag der Raumsonde}$$

$$\Delta v_2 = 2,04 \text{ mm/s} \quad \text{verursacht durch den Rückstoß des ausgestoßenen Materials}$$

Die Analyse der expandierenden Staubwolke und die Analyse der geänderten Umlaufzeit passen also gut zusammen.

Die Abbremsung eines Asteroiden funktioniert also umso besser, je größer die ausgestoßene Materialmenge ist, wobei es akzeptabel ist, dass die Geschwindigkeit des ausgestoßenen Materials dabei dann eher moderat ist.

Solange keine echte Bedrohung eines Asteroideneinschlags bekannt ist, erscheint das Ganze als eine Spielerei von Weltraumbegeisterten. Sollte aber eines Tages doch ein Asteroid auf Kollisionskurs entdeckt werden, so wird es dramatisch. Es kann gut sein, dass man sich mit dem Umlenken dieses Asteroiden am Rande des technisch Machbaren bewegen wird. Dann ist es wichtig, jede Möglichkeit der Optimierung zu nutzen.

Ziel bei der Gestaltung des Aufprallkörpers muss es sein, eine möglichst große Materialmenge vom Asteroiden auszuwerfen. Man kann dem Aufprallkörper den Charakter einer Gewehrkegel, einer Schrotladung oder eines Dampfstrahlers geben. Zudem ist zu berücksichtigen, wie die Oberfläche des Asteroiden aufgebaut ist – Geröll oder glatte harte Oberfläche.