

Monika Auweter-Kurtz

# Können wir dem Schicksal der Dinosaurier entgehen?

Ein Beitrag der Raumfahrttechnik zu unserem Überleben





Erst seit wenigen Jahren ist bekannt, welches Ereignis zum Aussterben der Dinosaurier geführt hat. Aufnahmen aus dem Weltall haben zur Klärung dieser Frage wesentlich beigetragen. Zunehmend wird man sich der Bedrohung durch andere Himmelskörper bewusst, nicht nur unter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Auch die politisch Verantwortlichen in den USA und Europa reagieren, und die Wirtschaft horcht auf. Die Überwachung unserer Umgebung, die Erforschung erdnaher Objekte und die Entwicklung effizienter Abwehrstrategien sollten in naher Zukunft zu wichtigen Gemeinschaftsaufgaben aller Menschen werden. Die Raumfahrttechnik wird hierfür eine Schlüsseltechnologie sein.

---

### **Auslöser des Artensterbens gefunden**

---

*Was ist damals, als die Dinosaurier ausstarben, eigentlich geschehen?*

Auf diese Frage gab es bis vor kurzem verschiedene Theorien, aber keine überzeugende Antwort. Klarheit über den Auslöser des großen Artensterbens am Ende der Kreidezeit konnte erst vor wenigen Jahren geschaffen werden.

1980 veröffentlichte der amerikanische Nobelpreisträger Luis W. Alvarez zusammen mit seinem Sohn Walter und mit F. Asaro und Helen Michel in Science einen Artikel, in dem sie aus der Iridiumanreicherung in einer Sedimentschicht, die dem Ende der Kreidezeit zugeschrieben wird, auf den Einschlag eines Asteroiden schlossen. Iridium, ein auf der Erde eher seltenes Element, kommt in einigen Asteroiden in relativ hohem Anteil vor. Sie schätzten ab, dass der Durchmesser des Asteroiden sechs bis 14 Kilometer betragen haben müsste und einen Krater mit 150 bis 300 Kilometern Durchmesser

hinterlassen haben sollte [1]. Der Geologe Antonio Camargo, der diese Veröffentlichung damals nicht kannte, berichtete 1981 auf einer Tagung von einem großen Krater, den er bei der Suche nach Öl in Yukatan entdeckte [2]. Ein Journalist verknüpfte die beiden Veröffentlichungen und brachte den Stein ins Rollen. Satellitenaufnahmen von Yukatan wurden ausgewertet (Abb. 1) und der Durchmesser des Chicxulub-Kraters, wie man ihn nannte, bestimmt – heute ca. 180 Kilometer. Ablagerungen aus der fraglichen Zeit wurden in weiter Umgebung sowie an den Küstenlinien eingehend untersucht. Diese Untersuchungen ergaben, dass die Schichtdicke der Ablagerungen, die weltweit ca. zwei Zentimeter beträgt, um den Krater herum besonders dick und Schockglas, das sich bei Einschlägen aufgrund von Hitze und hohem Druck bildet, häufig ist. Eine Bohrung, die im Meer in 2 600 Metern Tiefe 90 Meter tief in den Meeresboden vorangetrieben wurde, brachte Spuren eines Asteroiden und fossile Überreste vieler Tiere zutage.

---

Monika Auweter-Kurtz ■

Können wir dem Schicksal der Dinosaurier entgehen? ■

Seit den 90er Jahren ist man sich nun sicher, den Auslöser für das Aussterben der Dinosaurier zu kennen (Abb. 2). Vor rund 65 Millionen Jahren schlug ein Asteroid auf der Erde ein und schuf den Chicxulub-Krater in Mexiko. Modellrechnungen, basierend auf dem heutigen Kenntnisstand über iridiumhaltige Asteroiden und ihre Bahnen, ergaben, dass dieser Himmelskörper einen Durchmesser

von 9,5 bis 14,5 Kilometer hatte, setzt man voraus, dass er kugelförmig war. Er hat vor Yucatans Küste einen Krater hinterlassen, der damals ca. 250 bis 290 Kilometer durchmaß. Die für das katastrophale Ausmaß verantwortlichen Folgen waren Flutwellen, die heute noch an der karibischen Küstenlinie nachweisbar sind und vor allem Staubwolken, die monatelang die Erde umkreisten und Verdunkelung und Kälte bewirkten. Pflanzen und Plankton starben. Die Folge war die Ausrottung eines beachtlichen Anteils aller damals lebenden Arten. Man schätzt, dass ca. 70 Prozent aller Lebewesen umkamen und in etwa ebenso viele Arten ausstarben.

### Andere große Einschläge, von denen wir heute wissen

In der Frühzeit der Erde waren Einschläge sehr großer Himmelskörper häufig. Aufgrund der Atmosphäre unserer Erde, ihrer tektonischen Aktivitäten, der ausgedehnten Meere und der Vegetation sind nur noch relativ junge Ereignisse anhand ihrer Krater feststellbar. Durch den Einschlag werden Erdbeben und/oder große Flutwellen, so genannte Tsunamis, ausgelöst. Geologen können anhand von Gesteinsablagerungen solche Ereignisse datieren und sogar auf die Größe der Himmelskörper schließen, da das beim Einschlag eines Meteoriten verdampfte Material zu kleinen sphärischen Kügelchen, so genannten Sphäruliten, kondensiert, die sich zu Schichten ablagern. So datiert man heute beispielsweise einen großen Einschlag auf 3,47 Milliarden Jahre (Abb. 3). Die dazugehörige Sphäruliten-schicht hat eine Dicke von 20-30 Zentimetern. Hieraus kann dem Himmelskörper



Abb. 1: Lage des Chicxulub-Kraters in Yukatan, Mexiko.



Abb. 2: Künstlerische Impression des Einschlages des Chicxulub- Meteoroids.



Abb. 3: Künstlerische Impression eines Asteroidenabsturzes auf die noch junge Erde.



Abb. 4: Die Stadt Nördlingen wurde in den Rieskrater hineingebaut.



Abb. 5: Das Steinheimer Becken in unmittelbarer Nähe des Nördlinger Rieses.

per ein Durchmesser von ca. 20 Kilometern zugeordnet werden. Als er auf der Erde einschlug, gab es hier an Lebensformen wahrscheinlich nur Bakterien, die aufgrund ihrer Robustheit als Art ein solches Ereignis überleben konnten. Einige große, heute bekannte Ereignisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Erst kürzlich fand eine Forschergruppe aus Marokko und den USA heraus, dass es bereits vor rund 380 Millionen Jahren auf Grund eines Asteroiden oder Kometeneinschlags in der heutigen marokkanischen Wüste zu einer globalen Katastrophe kam, bei der ca. 40 Prozent aller damaligen Meerestierarten ausstarben.

### Nördlinger Ries und Steinheimer Becken

Erst in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde erkannt, dass das auf der schwäbischen Alb gelegene Nördlinger Ries ein Krater ist. Dieser heute 24 Kilometer durchmessende Krater wurde vor

15,1 +/- 0,1 Millionen Jahren, im Tertiär, durch einen Meteoriten von ca. 1,3 Kilometern Durchmesser verursacht. Er ist der besterhaltene Rieskrater der Erde. Der Einschlag erfolgte mit einer Sprengkraft von ca. 141 000 Megatonnen (Mt) TNT – das entspricht ca. 2 350 Wasserstoffbomben der 60 Mt-Klasse – und löschte im Umkreis von 100 Kilometern alles Leben aus (Der Energieinhalt wird üblicherweise in Sprengkraft, Tonnen (t) TNT, angegeben, eine Kilotonne (kt) TNT entspricht  $4,185 \cdot 10^{12}$  J; zum Vergleich: die Hiroshima-Bombe hatte eine Sprengkraft von 13 Kilotonnen). Gesteinsbrocken flogen 400 Kilometer bis nach Böhmen. Aufgrund der hohen Temperaturen (bis 30 000°) und hohen Drücken (einigen Millionen bar) wurden Hochdruckminerale, so genannte Tektide, gebildet, man spricht von Böhmischem Glas. In den Krater hätte damals das Matterhorn gepasst. Zunächst entstand ein See, der jedoch mit der Zeit verlandete. Vor 1 100 Jahren wurde im Krater die

Stadt Nördlingen gegründet (Abb. 4).

Trotz Erosion liegt das Ries immer noch um 150 Meter tiefer als die Umgebung.

In unmittelbarer Nähe liegt das Steinheimer Becken, das in derselben Zeit entstand (Abb. 5). Das kreisrunde Becken von Steinheim ist heute 3,8 Kilometer im Durchmesser und 120 Meter in die umgebende Albhochfläche eingetieft. In der Mitte ragt der Klosterberg auf. Der Meteorit hatte einen Durchmesser von ca. 162 Metern, sein Einschlag erfolgte mit einer Sprengkraft von 270 Mt TNT (4,5 H-Bomben). Man vermutet heute, dass beide Krater auf denselben Asteroiden zurückzuführen sind, der beim Eintritt in die Erdatmosphäre eventuell aufgrund der Schwerkraft zerbrach.

Tabelle 1: Beispiele bekannter großer Ereignisse

Alter (Jahre bzw. Daturj)	Krater	Kraterdurchmesser [km]	Himmelskörper Durchmesser	Sprengkraft [Mt TNT]
2,02 Mrd.	Vreddefort (Süd-Afrika)	200-300	14-17 km	$2,8 \cdot 10^8$
1,85 Mrd.	Sudbury (Kanada)	200-250	9 km	$2,4 \cdot 10^8$
290 Mio.	Clearwater Lakes (Kanada)	32 bzw. 22	1,6 bzw. 1,1 km	300 000 bzw. 100 000
214 Mio.	Manicougan (Kanada)	100	5 km	69 000
65 Mio.	Chicxulub (Mexiko)	180	9,5-14,5 km	100 Mio
35 Mio.	Popigai (Rußland)	100	6,8 km	$2,4 \cdot 10^7$
15,1 Mio.	Nördlinger Ries (Schwäbische Alb)	24	1,3	141 000
15,1 Mio.	Steinheimer Becken (Schwäbische Alb)	3,8	0,162 km	270
49 000	Bartinger Krater (Arizona)	1,3	30 m	2
1908	Tunguska (Sibirien)	Explosion in 5-9 km Höhe	60 - 100 m	10-15

### Barringer-Krater in Arizona

Unschwer auch heute noch als Einschlagkrater zu erkennen ist der Barringer-Krater in Arizona mit einem Durchmesser von 1,3 Kilometern und einer Tiefe von 174 Metern, der vor 50 000 Jahren im Canyon Diablo durch den Einschlag eines 30 Meter durchmessenden Eisenmeteoriten mit einer Sprengkraft von ca. zwei Mt TNT entstand (Abb. 6).

### Tunguska in Sibirien

Im Jahr 1908 trat ein Himmelskörper mit einem Durchmesser von ca. 60-100 Metern mit ca. 15 Kilometern pro Sekunde über Tunguska in Sibirien in die Atmosphäre der Erde ein und explodierte in fünf bis neun Kilometern Höhe (Abb. 7). Die Sprengkraft betrug ca. 10-15 Megatonnen (1000 Hiroshima-Bomben). Der Donner war bis nach London zu hören, die Druckwelle wurde weltweit registriert und lief mehrmals um die Erde. Es wurden ca. 2 200 Quadratkilometer verwüstet. Wäre der Himmelskörper nur wenige Minuten später in die Atmosphäre eingetreten, wäre Europa betroffen gewesen. Über einem dicht besiedelten Gebiet hätte dies den Tod von Millionen Menschen bedeutet. Da man bislang keine Meteoriten gefunden hat, wird vermutet, dass es sich um einen Kometen gehandelt hat, allerdings kann auch nicht ausgeschlossen werden, dass es ein Steinasteroid war. Man geht heute davon aus, dass Ereignisse dieser Größenordnung im Mittel alle



Abb. 6: Ein junger Krater, der Barringer-Krater in Arizona.



Abb. 7: 19 Jahre nach dem Einschlag wurde das Gebiet um Tunguska erkundet und dieses Bild aufgenommen. Man erkennt deutlich die durch die Druckwelle verursachte Ausrichtung der Stämme.

1 000 Jahre auftreten. Sollte uns in den nächsten Jahren ein solcher Himmelskörper treffen, wird es mit großer Sicherheit keine Vorwarnzeit geben, da es noch mehrere Jahrzehnte dauern wird, bis man alle gefährlichen Objekte dieser Größenordnung kennen wird. Ähnliche Ereignisse, jedoch wahrscheinlich etwas kleinerer Dimension, wurden 1930 im brasilianischen Urwald und 1935 in Britisch Guyana beobachtet.

### Asteroidenschauer

Zu Asteroidenschauern kam es 1947 in Sikote-Alin in der Nähe von Wladiwostok und 1868 in Polen. Asteroiden explodierten einige Kilometer über der Erde, und es ging ein Meteoritenschauer innerhalb einer Streuellipse nieder. Vereinzelt kam es hierbei zu Sachschäden (Abb. 8).

Die genaue Untersuchung von Satellitenaufnahmen förderte in den letzten Jahrzehnten fast 100 Krater mit Durchmessern größer als einen Kilometer zutage.

### Die erdnahen Asteroiden und Kometen

*Was sind das für Himmelskörper?*

*Woher kommen sie?*

*Was wissen wir über sie?*

### Asteroiden

Asteroiden beziehungsweise Planetoiden sind Kleinplaneten, die die Sonne zumeist



Abb. 8: Vor wenigen Jahren wurde in New York ein Asteroideneinschlag beobachtet, der diesen Schaden verursachte.

zwischen den Bahnen von Jupiter und Mars umkreisen. Vergleichsweise wenige Planetoiden sind jenseits der Neptunbahn beziehungsweise in Erdnähe anzutreffen. Man schätzt die Gesamtzahl der Planetoiden mit einem Durchmesser von mehr als einem Kilometer auf ca. eine Million. Der Übergang zu den Meteoriten ist fließend, ihre Anzahl steigt mit kleiner werdendem Durchmesser steil an (Abb. 9). Die Kleinplaneten konnten sich aufgrund der großen Anziehungskraft des Jupiters

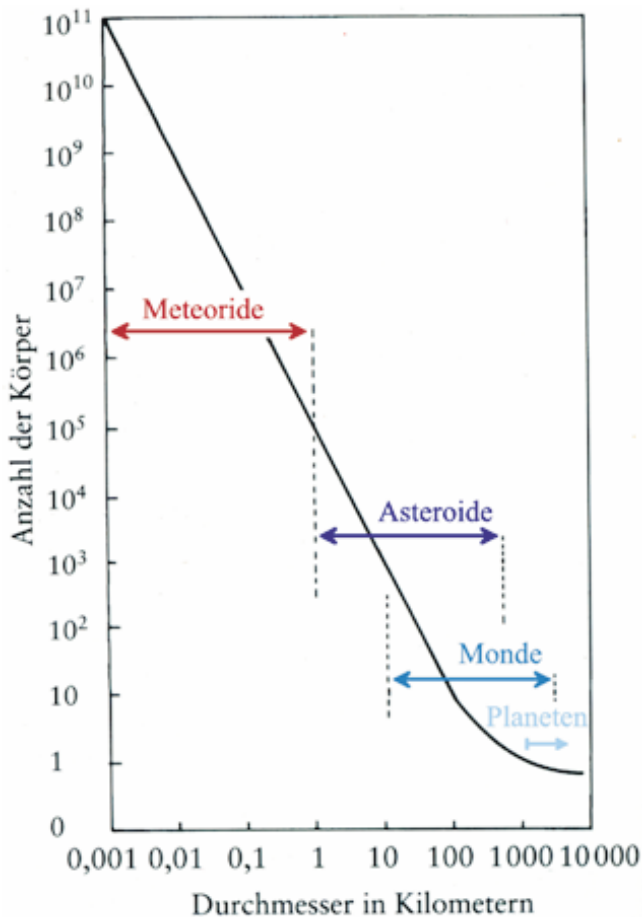


Abb. 9: Anzahl der Körper im interplanetaren Raum in Abhängigkeit ihrer Durchmesser [3].

in der Entstehungszeit des Sonnensystems nicht zu einem Planeten zusammenfinden. Immer wieder wurden im Laufe der Zeit Planetoiden aus ihrer Bahn in Jupiternähe geworfen, einige davon in Richtung Erde; sie werden als erdnahe Asteroiden bezeichnet. Die meisten von ihnen umkreisen die Sonne in derselben Bahnebene und in derselben Richtung wie die Planeten. Sie werden in drei Gruppen eingeteilt: Die Apollo-Asteroiden umkreisen die Sonne auf stark exzentrischen Bahnen und kreuzen dabei die Erdbahn. Die Aten-Asteroiden befinden sich im Wesentlichen innerhalb der Erdbahn, kommen ihr aber sehr nahe und können durch Bahnstörungen die Erdbahn kreuzen. Die Amor-Asteroiden kreuzen die Marsbahn, können jedoch durch Bahnstörungen ebenfalls in Erdnähe gelangen. Zu dieser Gruppe gehört auch der mit 40 Kilometern Durchmesser größte erdnahe Asteroid Ganymed. Man schätzt die Zahl der erdnahen Asteroiden mit einem Durchmesser größer als einen Kilometer heute auf über 1 300.

Abb. 11: „Möchtetern Monde“ sind Asteroiden, die sich mit der Erde in Resonanz befinden und uns scheinbar wie der Mond umkreisen.

#### Erdnahe Asteroiden in Resonanz mit der Erde

Einige Asteroiden umkreisen die Sonne wie die Erde mit einer Umlaufzeit von einem Jahr. Man spricht dann von einer 1:1 Resonanz ihrer Hauptbewegung. Vom Jupiter ist bekannt, dass eine Gruppe von ca. 400 Asteroiden, die Trojaner, mit derselben Geschwindigkeit auf derselben Bahn die Sonne umkreisen. Sie halten sich an den so genannten stabilen Lagrange-Punkten auf (Abb. 10).

Seit einigen Jahren sucht man nach Lagrange-Punkt-Asteroiden der Erde, bislang ohne Erfolg. 1997 entdeckte man jedoch den ersten Kleinplaneten, Cruithne, der dieselbe Umlauffrequenz um die Sonne wie die Erde hat. Die Bahnen der-

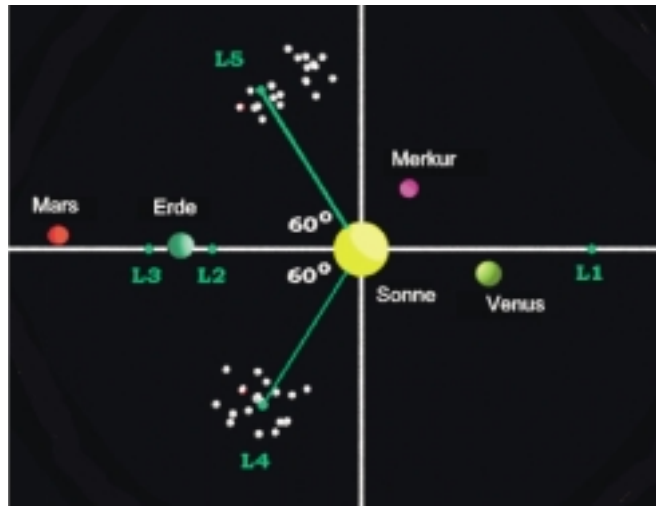
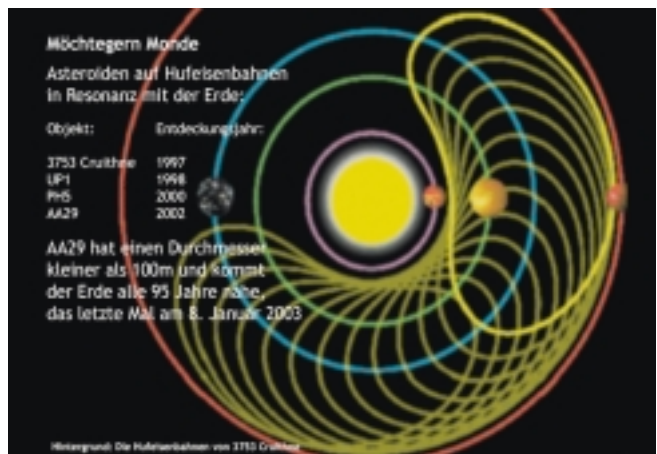


Abb. 10: Betrachtet man ein System aus zwei großen und einem kleinen dritten Körper, so kann man zeigen, dass es fünf Punkte, die so genannten Lagrange- oder Librationpunkte, gibt, an denen eine geschlossene Lösung der Bewegungsgleichungen existiert. In diesen Punkten bewegen sich die kleinen Körper derart, dass ihre Abstandsbeziehungen zu den großen Körpern konstant bleibt. Die Punkte L1, L2, L3 liegen auf der Verbindungsline der beiden Körper, L4 beziehungsweise L5 spannen gleichseitige Dreiecke mit ihnen auf. An den Punkten L1, L2, und L3 reichen kleine Störungen zum Beispiel durch andere Planeten aus, um Asteroiden abzuweichen zu lassen, an den Punkten L4 und L5 sind ihre Lagen jedoch stabil.



artiger Körper müssen nicht elliptisch sein, sie sind in der Regel kompliziert. Sie umkreisen scheinbar unsere Erde und bewegen sich zusätzlich zum Sonnenumlauf auf so genannten Hufeisenbahnen (Abb. 11). Inzwischen sind bereits mehrere solcher „Möchtetern-Monde“ bekannt. Sie sind für uns nicht gefährlich, sondern ideale Studienobjekte, da der Antriebsbedarf für eine Sonde zur Erkundung dieser Objekte relativ gering ist. Darüber hinaus wären sie auch als Rohstofflieferant für die weitere Erkundung des Sonnensystems sehr interessant.

### Erste Erkundungen der Asteroiden

Die Weltraumsonde Galileo bescherte uns 1991 im Vorbeiflug auf ihrem Weg zum Jupiter die ersten Nahaufnahmen von Asteroiden, Gaspra und Ida (Abb. 12). Asteroiden sind unregelmäßige Himmelskörper, dies führt aufgrund ihrer Rotation zu deutlichen Lichtschwankungen bei ihrer Beobachtung und ermöglicht die Bestimmung ihrer Rotationsfrequenzen und der Lage ihrer Rotationsachsen. Viele Asteroiden rotieren verglichen mit den meisten Planeten sehr schnell, sie drehen sich in drei bis 17 Stunden einmal um ihre Achse mit einer Häufung zwischen fünf und zehn Stunden. Bei einigen sind die auftretenden Fliehkräfte schon so groß, dass sie nahe am Zerreißen sind. Durch Strahlungsmessungen im visuellen und infraroten Bereich lässt sich die Albedo, also die Reflexivität der Oberfläche, bestimmen, die unter anderem hilft, ihre Größe abzuschätzen. Heute weiß man, dass etwa drei Viertel aller Planetoiden ein flaches Spektrum mit schwacher Struktur und eine geringe Albedo (0,03 bis 0,08) aufweisen. Durch eine genaue Untersuchung der Spektren von Vorbeiflügen kann man Aufschlüsse über die Zusammensetzung der Oberfläche gewinnen. Aufgrund dieser Untersuchungen und der Analyse von auf der Erde gefundenen Meteoriten wurden die Asteroiden in drei Gruppen eingeteilt: die aus dunklem kohlenstoffhaltigen Material bestehenden C-Asteroiden, die hellen steinigen silikathaltigen S-Asteroiden, die hauptsächlich aus Eisen und Nickel bestehenden, also metallhaltigen, M-Asteroiden.

Darüber hinaus hat man auf einigen Asteroiden auch andere zum Teil wertvolle Rohstoffe entdeckt, beispielsweise Eis auf dem mit 1 023 Kilometern Durchmesser größten Asteroiden Ceres, der zu den C - Asteroiden gerechnet wird. Die verschiedenen Asteroiden-Typen unterscheiden sich ganz wesentlich in ihrer Dichte, die für C - haltige Objekte bei ca. 3 400 kg/m<sup>3</sup> und für den M-Typ bei ca. 7 800 kg/m<sup>3</sup> liegt.

Als großer Schritt bei der Erforschung der erdnahen Asteroiden kann die Near-Shoemaker- Mission der NASA bezeichnet werden. Erstmals gelang ein Vorbeiflug an einem C - Asteroiden, Mathilde. Im Januar 2001 erreichte die Sonde dann ihr Zielobjekt, den Asteroiden Eros. Bereits beim ersten Überflug am 28. Januar 2001 gelangen hochaufgelöste Bilder (Auflösung 0,3m/Pixel). Aus geologischer Sicht ist Eros äußerst interessant. Seine Oberfläche ist noch weitgehend in dem Zustand wie vor 4,5 Milliarden Jahren, als das Planetensystem entstand. Die Sonde umkreiste Eros etwa ein Jahr lang. Letztendlich gelang bei dieser Mission sogar die erste Landung auf einem Asteroiden, und zwar in einem Krater. Eine Landung auf einem relativ kleinen Himmelskörper stellt aus technologischer Sicht eine große Herausforderung dar, da die Anziehungskraft so gering ist, dass die Aufschlaggeschwindigkeit sehr klein sein muss, um ein Zurückprallen zu vermeiden. Kurz vor der Landung wurden Bilder hoher Auflösung zur Erde gesendet. Die Sonde überlebte den kontrollierten Absturz mit einer Aufschlaggeschwindigkeit von ca. 1,5 - 1,8 Metern pro Sekunde und hat noch zehn Tage Daten zur Erde gesendet. Erstmals gelangen bei dieser Mission die Untersuchung der geologischen Zusammensetzung, die Bestimmung der Masse, des Magnetfeldes, der Schwerkraftverteilung und der Schwerpunktlage in erstaunlicher Güte.

### Kometen

Die Kometen entstanden weit draußen, am Rand des Planetensystems. Dort bilden sie die kugelschalenförmige so ge-

nannte Oortsche Wolke, die die Grenze unseres Planetensystems markiert. Ihr Abstand zur Sonne beträgt ca. 50 000 AE, sie reicht jedoch bis ca. 30 000 AE an die Sonne heran und erstreckt sich bis 100 000 AE ins Weltall hinaus. (Den Abstand zwischen Erde und Sonne bezeichnet man als Astronomische Einheit (AE), 1 AE = 149,6 Millionen Kilometer). Ihre Zahl wird auf mindestens einige hundert Milliarden geschätzt, ihr Durchmesser kann bis zu 100 Kilometer betragen. Kometen bestehen zumeist aus Eis und Staub, einige auch aus CO<sub>2</sub>-Eis, man bezeichnet sie daher oft als schmutzige Eisklumpen. Sie konservieren die Überreste des praesolaren Nebels. Beträgt ihre Umlaufzeit mehr als 200 Jahre, das ist bei 84 Prozent der Fall, werden sie als langperiodisch bezeichnet. Wenn ihre Bahnen gestört werden, können sie ins Innere des Sonnensystems und in Erdnähe gelangen. Erreichen diese „Wanderer zwischen den Welten“ den Jupiter, ist die Sonnenstrahlung so hoch, dass das Eis sublimiert und sich ein Schweif ausbildet. Nun kann man sie von der Erde aus entdecken. Sie befinden sich auf elliptischen Bahnen ohne Bevorzugung einer bestimmten Bahnebene oder Umlaufrichtung. Diese Ellipsen sind zumeist sehr lang gestreckt und reichen weit bis in die äußere Region des Sonnensystems hinaus. Die Sonne befindet sich in einem ihrer Brennpunkte (Abb. 13). Vom Jupiter aus sind Erdbahnkreuzer noch ca. drei bis vier Jahre zu uns unterwegs.

Eine kleine Gruppe der Kometen wurde durch die Schwerefelder der großen Planeten eingefangen, sie verlassen das Innere des Sonnensystems nicht mehr. Ihre Umlaufzeiten liegen zwischen drei



Abb. 12: Asteroid Ida mit seinem Mond Dactylus, NASA, Galileo Mission 1991.

und 20 Jahren und die Neigung ihrer Bahnen zur Ekliptik beträgt maximal  $20^\circ$ . Für Kometen mit einem Durchmesser unter 100 Meter ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie die Erde überhaupt erreichen, gering, da sie meist der Sonne so nahe kommen, dass sie in Sonnennähe vollständig verdampfen. Die Sublimationsrate kann bis zu einer Million Tonnen Wasser am Tag erreichen, da der Kometenkern aufgrund von Kohlenstoffverbindungen viel Sonnenlicht absorbiert. Die Kometenmasse nimmt also bei jedem Umlauf in Sonnennähe ab und die Bahn ändert sich dabei.

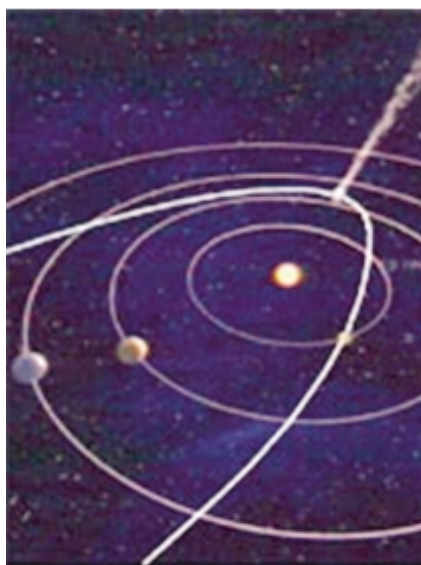


Abb. 13: Typische lang gezogene elliptische Bahn eines die Erdbahn kreuzenden Kometen.

### Erkundungen von Kometen

Über Jahrtausende hat der Halleysche Komet, der alle 76 Jahre wiederkehrt, die Menschen gleichermaßen fasziniert und verängstigt. Heute weiß man, dass sein kohlenstoffhaltiger annähernd tonnenförmiger Kern einen Durchmesser von acht und eine Länge von 16 Kilometern hat, dass er uns jedoch bis auf weiteres nicht gefährlich wird. Als er im März 1986 das letzte Mal die Ekliptik kreuzte, hatte man ihm mehrere Raumsonden entgegen geschickt. Die Sonde Giotto der ESA kam ihm am nächsten. Sie flog in weniger als 600 Kilometern am Kern vorbei. Die chemische Zusammensetzung des Gases im Kometenkopf, der so genannten Koma, und die Oberfläche des Kerns wurden untersucht. Man weiß nun, dass Halley von einer sehr dunklen Kruste aus Mineralien, Metallen, aber auch organischen Verbindungen,

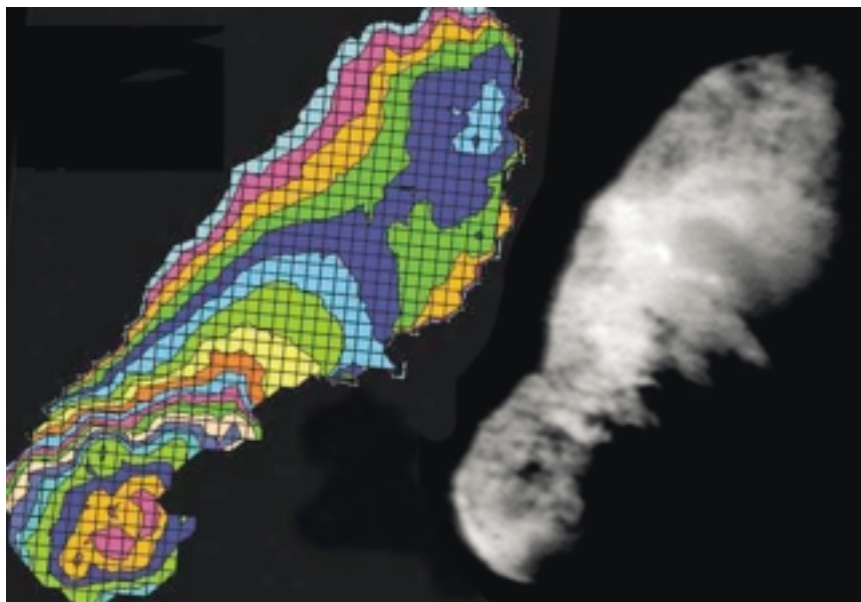


Abb. 14: Komet Borrelly mit seiner topographischen Karte, NASA Deep Space 1, September 2001.



Abb. 15: Die Rückseitenansicht unseres Mondes (Apollo 16, April 1972).

bedeckt ist, die den Kern aus Eis schützt und zu einer sehr geringen Albedo führt. Reißt solch eine Kruste in Sonnennähe durch den Druck des Wasserdampfes auf, kommt es zu so genannten Jets, die einerseits den Kometenkopf und -schweif speisen, andererseits nach dem Rückstoßprinzip eine Bahnänderung bedingen. Da diese Vorgänge exakt nicht vorhersehbar sind, sind Bahnvorhersagen für Kometen nur für kurze Zeiträume ausreichend genau.

Mit der Deep Space 1-Mission der NASA gelangen 2001 Nahaufnahmen des Kometen Borrelly, die erstmals die Erstellung einer topographischen Karte erlauben (Abb. 14).

### Einschätzung der Gefahr

Unsere Erde bewegt sich wie eine kosmische Zielscheibe um die Sonne. Vegetation, Wettergeschehen, Tektonik und nicht zuletzt unsere Atmosphäre wirken wie Radiergummis und verwischen die Spuren von Zusammenstößen. Um die Zahl der erdnahen Objekte, die uns gefährlich werden können, abzuschätzen, können wir jedoch unseren Trabanten betrachten (Abb. 15).



### Was passiert eigentlich beim Eintritt in die Erdatmosphäre?

Die Antwort auf diese Frage hängt von der Größe und der Zusammensetzung des Eintrittskörpers, aber auch ganz wesentlich von seiner Geschwindigkeit und seinem Eintrittswinkel ab. Die typische Geschwindigkeit, mit der Asteroiden in die Atmosphäre der Erde eintreten, liegt zwischen 15 und 25 Kilometern pro Sekunde (km/s). Bei Kometen kann die Eintrittsgeschwindigkeit bis zu 73 km/s betragen. Die Bewegungsenergie der Himmelskörper ist proportional zu ihrer Masse und steigt quadratisch mit ihrer Geschwindigkeit an. Sie muss spätestens beim Aufschlag auf der Erde vollständig abgebaut werden. Zunächst wird der Körper in der Atmosphäre abgebremst, dadurch kommt es zu einer starken Erhitzung der Luft in Oberflächennähe und zu großen Wärmeflüssen und Kräften auf das Objekt. Dies kann zum Auseinanderbrechen, zur Ablation und/oder zur Explosion führen. Der Rest der kinetischen Energie wird dann beim Einschlag auf die Erde freigesetzt und führt zu Erdbeben, Tsunamis und Kraterbildung sowie zum Aufschmelzen und Verdampfen von Asteroiden- und Bodenmaterial.

Wesentlich bestimmt jedoch auch der Durchmesser der Objekte ( $d$ ) das Geschehen mit, da die Schwerkraft mit  $d^3$ , der Luftwiderstand nur mit  $d^2$  ansteigt. Daher kommen Mikrometeorite, die kleiner als 100 Mikrometer sind, nicht einmal zum Glühen, sondern schweben langsam und unversehrt zu Boden. Ein Regen von solchen kleinen Objekten, meist Bruchstücke von Asteroiden oder seltener von Kometen, gehen täglich auf die Erde nieder. Größere Objekte verglühen, explodieren oder zerbrechen in der Atmosphäre. Abhängig von ihrer Masse, ihrer Zusammensetzung und Dichte, ihrer Eintrittsgeschwindigkeit und ihres Eintrittswinkels geschieht dies in unterschiedlicher Höhe. Kometen explodieren meist in hohen

Höhen, Steinasteroiden derselben Größe wesentlich weiter unten, sie zerbrechen auch oft. Eisen-Nickel-Asteroiden dagegen können schon mit geringem Durchmesser die Erde erreichen. Alle diese Objekte zusammen erhöhen die Masse unseres Planeten um durchschnittlich 40 Tonnen am Tag. Jährlich gibt es in der Atmosphäre der Erde 20 - 30 Explosionen der Kilotonnen-Klasse. Bereits die Druckwellen können große Zerstörungen hervorrufen wie beispielsweise in Tunguska. Kommt es zur Explosion über Wasser, so werden große Wellen, so genannte Tsunamis, ausgelöst. Größere Objekte – vorzugsweise bei hoher Dichte – verdampfen nicht vollständig, sie kommen als Meteorite am Boden an. Man schätzt ihre Zahl auf etwa 10 000 bis 50 000 im Jahr. Der größte bisher entdeckte Meteorit, Hoba West, wurde in Südafrika gefunden, er wiegt ca. 60 Tonnen. Zusätzlich kommt für sehr große Objekte hinzu, dass es bei Annäherung an die Erde aufgrund der Schwerkraft zu großen inneren Kräften kommt. Große Körper ( $s$ ) zerbrechen oder explodieren, wenn sie dem Zentralkörper ( $z$ ) näher als die Roche-Grenze ( $R$ ) kommen, die wesentlich vom Dichte ( $\rho$ )-Verhältnis der Körper abhängt:  $R=2,44 (\rho_s/\rho_z)^{1/3}$ . Für steinige Objekte ist dies bei ihrem Sturz auf die Erde bei einem Durchmesser größer als ca. einen Kilometer der Fall. Man vermutet daher, dass das Steinheimer Becken und das Nördlinger Ries auf einen einzigen Asteroiden zurückzuführen sind, der aufgrund der Schwerkraft bei Annäherung an die Erde in zwei Teile zerbrach.

Die meisten erdnahen Asteroiden sind für uns ungefährlich, wobei manche für uns sogar zur Erkundung und Eroberung des Weltalls kostbare Bodenschätze liefern könnten. Einige wenige erdnahe Objekte können uns jedoch gefährlich werden.

### Wie viele gefährliche Objekte gibt es?

Untersuchungen der Mondoberfläche von der Erde aus zusammen mit Analysen der von den Apollo-Astronauten gesammelten Proben erlauben heute eine Abschätzung der Trefferhäufigkeit für die Erde. Aus einer Analyse der Krater kann die kinetische Energie der Objekte und unter Annahme einer Dichte und Geschwindigkeit auch ihr Durchmesser abgeschätzt werden. Es hat sich eingebürgert, einen äquivalenten Durchmesser zu

berechnen, dem ein Eisenasteroid mit einer Dichte von neun Kilogramm pro Liter und einer Geschwindigkeit von zehn Kilometern pro Sekunde zugrunde liegt. Zur Erweiterung der Skala in den Bereich kleiner Objekte hinein wurden Aufnahmen von militärischen geostationären Satelliten, die ursprünglich für die Überwachung und Untersuchung nuklearer Ereignisse stationiert wurden, ausgewertet. Mit ihnen werden seit Jahren zwischen 60 und 80 Prozent der Erde beobachtet. In der Zeit von Februar 1994 bis September 2002 wurden für 300 in die Erdatmosphäre eintretender Körper die ausgesandte Lichtintensität in Abhängigkeit der Zeit aufgenommen. Zur Berechnung der Durchmesser der Objekte müssten eigentlich die spektrale Intensitätsverteilung, die Eintrittsgeschwindigkeit und somit die kinetische Energie zu Beginn des Eintritts sowie Masse, Zusammensetzung und Oberflächenbeschaffenheit der Objekte bekannt sein. Alle diese Größen können jedoch nur abgeschätzt werden. Daher kann man der Lichterscheinung letztendlich nur einen effektiven Durchmesser zuordnen. Für die beobachteten Körper ergaben sich effektive Durchmesser zwischen einem und zehn Meter.

Mit dem amerikanischen Asteroiden-suchprogramm LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research) wurde der Größenbereich 10 bis 100 Meter untersucht. Den Abbildungen 16 und 17 ist zu entnehmen, dass ein hundert Meter Asteroid die Sprengkraft einer Wasserstoffbombe hat, dass es ca. eine Million Objekte dieser Größe gibt und wir alle 10 000 Jahre mit einem Einschlag dieses Ausmaßes rechnen müssen. Die Wahrscheinlichkeit eines Asteroideneinschlages ist etwa 50 Mal höher als die für einen Kometeneinschlag desselben Durchmessers.

### Welche Auswirkungen hat ein Einschlag?

Bereits relativ kleine in der Atmosphäre explodierende Objekte können zu direkten Zerstörungen durch die Druckwellen, aber auch zu Feuersbrünsten führen. Bei größeren Objekten werden Erdbeben oder Tsunamis ausgelöst. So kann ein Eisenasteroid von 80 Metern Durchmesser, der mit 30 km/s in die Atmosphäre eintritt, ein Erdbeben der Stärke 7 auf der Richterskala oder eine Wellenfront von 40 Metern Höhe an der Küste erzeugen. Es kommt zu Kraterbildung, Aufschmelzung und Verdampfung. Staubwolken

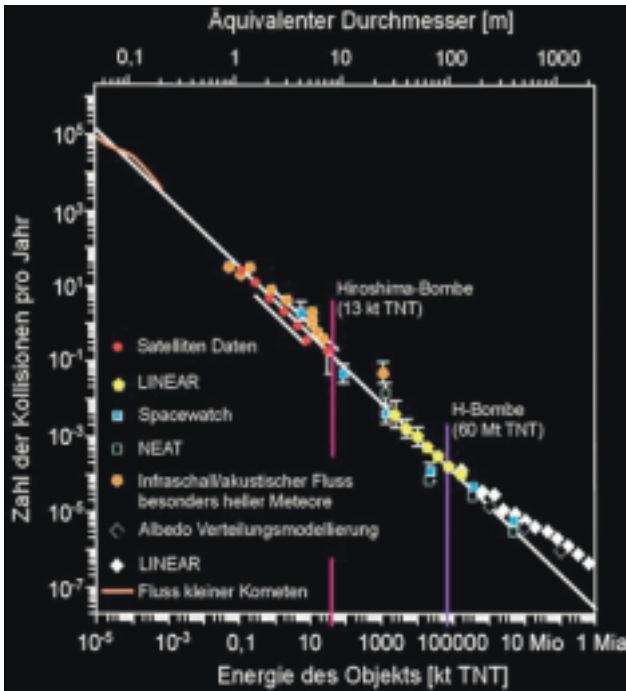


Abb. 16: Zahl der Kollisionen pro Jahr in Abhängigkeit des äquivalenten Objektdurchmessers beziehungsweise seiner zugehörigen kinetischen Energie [4].

umkreisen dann die Erde und reduzierte Sonneneinstrahlung und Kälte sind die Folgen. Bei 300 Metern Durchmesser können ganze Länder ausradiert werden. Wenn der Körper ins Meer fällt, können die Flutwellen noch Schlimmeres anrichten. Man geht heute davon aus, dass bei einem Durchmesser von 0,5 Kilometern bereits eine globale Katastrophe ausgelöst wird. Bei einem Kilometer Durchmesser muss mit der Auslöschung der Menschheit gerechnet werden.

Wie groß ist die Gefahr eigentlich?

Die Zahl der nahen Objekte mit einem Durchmesser von mindestens 0,5 Kilometern wird auf mehrere Tausend geschätzt. Von der Größenordnung ein Kilometer sind heute 600 Objekte in Erdnähe bekannt. In Tabelle 2 sind jeweils die zehn Asteroiden und Kometen aufgeführt, die uns zuletzt nahe kamen. Bei den Asteroiden muss man hierfür nicht weit in die Vergangenheit zurückblicken. Im Internet ist eine zwölfseitige Liste aller hinreichend gut bekannten Objekte veröffentlicht, die uns bis zum Jahr 2178 näher als 0,05 AE kommen: es sind ca. 350! Zum Vergleich: die Entfernung Erde-Mond beträgt 0,0026 AE.

Die Wahrscheinlichkeit, dass nächstes Jahr ein großer Asteroid mit einem Durchmesser von mindestens einem Kilometer einschlägt, muss heute mit 1:100 000 angegeben werden. Geht man von einer Lebenserwartung von 100 Jahren aus, so ist die Wahrscheinlichkeit, einen Einschlag der 1km-Klasse zu erleben, drei mal größer als 6 Richtige im Lotto, wenn man 100 Jahre lang jedes Wochenende spielt. Vor diesem Hintergrund muss alles daran gesetzt werden, Strategien zu entwickeln, um globale Katastrophen abwenden zu können.

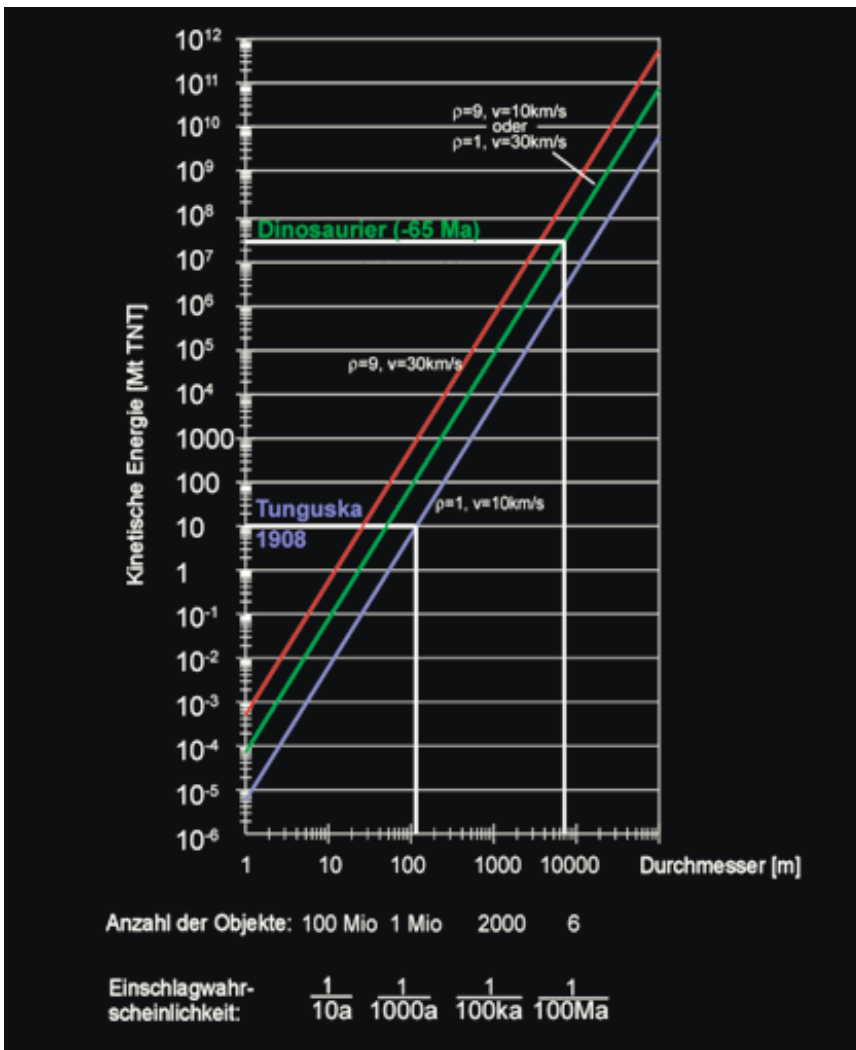


Abb. 17: Zuordnung von kinetischer Energie und Objektdurchmesser für Steinasteroiden ( $\rho=9 \text{ kg/m}^3$ ) und Kometen ( $\rho=1 \text{ kg/m}^3$ ) für zwei Geschwindigkeitsbeispiele mit Abschätzungen ihrer Anzahl und Einschlagwahrscheinlichkeit [5].

Tabelle 2

Name des Asteroiden		Entfernung in 1000 km (in Klammern Mondentfernung)		Datum der größten Annäherung		ungefährer Durchmesser des Asteroiden (in Metern)		Die zehn Asteroiden, die uns am nächsten kamen	
1994 XM1	105 (0,27)	09. Sept. 1994	10 bis 15	D/1770 L1 Lexell	5,88	1. Juli 1770			
1993 KA2	150 (0,39)	20. Mai 1992	5 bis 10	55P/1366 U1 Temple-Tuttle	8,91	26. Oktober 1366			
1994 ES1	165 (0,43)	15. März 1994	7 bis 12	C/1983 H1 IRAS-Araki-Alcock	10,14	11. Mai 1983			
1991 BA	165 (0,43)	18. Jan. 1991	7 bis 12	1P/837 F1 Halley	13,00	10. April 837			
1995 FF	434 (1,13) <sup>1</sup>	27. März 1995	13 bis 50	3D/1805 V1 Biela	14,24	9. Dezember 1805			
1996 JA1	449 (1,16)	15. Mai 1996	200 bis 400	C/1743 C1	15,17	8. Februar 1743			
1991 VG	464 (1,21)	05. Dez. 1991	5 bis 10	7P/Pons-Winnecke	15,33	26. Juni 1927			
1989 FC	690 (1,79)	23. März 1989	300 bis 600	C/1702 H1	17,01	20. April 1702			
(4581 Asclepius)				73P/1930 J1 Schwabmann-Wachmann 3	24,01	31. Mai 1930			
1994 WR12	710 (1,85)	24. Nov. 1994	110 bis 240	C/1983 J1 Sugano-Sajgusa-Fujikawa	24,44	12. Juni 1983			
1937 UB (Hermes)	733 (1,91)	30. Okt. 1937	670 bis 1500						

Name des Kometen	Entfernung in Mondentfernungen	Datum der größten Annäherung
D/1770 L1 Lexell	5,88	1. Juli 1770
55P/1366 U1 Temple-Tuttle	8,91	26. Oktober 1366
C/1983 H1 IRAS-Araki-Alcock	10,14	11. Mai 1983
1P/837 F1 Halley	13,00	10. April 837
3D/1805 V1 Biela	14,24	9. Dezember 1805
C/1743 C1	15,17	8. Februar 1743
7P/Pons-Winnecke	15,33	26. Juni 1927
C/1702 H1	17,01	20. April 1702
73P/1930 J1 Schwabmann-Wachmann 3	24,01	31. Mai 1930
C/1983 J1 Sugano-Sajgusa-Fujikawa	24,44	12. Juni 1983

Die zehn Kometen, die uns am nächsten kamen

Die zehn Asteroiden, die uns am nächsten kamen



## Suchprogramme nach Asteroiden

1973-1994	Planet-Crossing Asteroid Survey (PCAS)	USA
seit 1981	Space Watch Survey	USA, Arizona
1982-1994	Palomar Asteroid and Comet Survey (PACS)	USA
1990-1996	Anglo-Australian Near-Earth Tracking (AANEAS)	Australien
seit 1995	Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT)	USA, JPL und Air Force
seit 1995	Xinglong Observatory	China
seit 1996	Observatoire de la Côte d'Azur/ DLR Asteroid Survey (O.D.A.S.)	Deutschland und Frankreich
seit 1996	Lowell Observatory Near-Earth Asteroid Survey (LONEOS)	USA
seit 1996	Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR)	USA, Air-Force
seit 1999	Catalina Sky Survey	USA, Arizona

Seit 96 gibt es für die südliche Erdhalbkugel kein Suchprogramm mehr

Tabelle 4: Entdeckungen erdnahe Objekte in den letzten Jahren

Entdeckung	Name	Größe	Vorbeiflug	Geschätzte Distanz in Mondentfernungen
14.07.2002	2002 NY40	800m	18.08.2002	1,3
09.07.2002	2002 NT7	2km	01.02.2019	zunächst Einschlag nicht ausgeschlossen
17.06.2002	2002 MN	50-120m	14.06.2002 (unbemerkte)	ca. 1
2002	2002 ELG	0,7-1,5km	2083	0,2
12.2000	YB5	300m	01.2002 (unbemerkte)	2
2001	2001 CU11	800m	13.08.2005	ca. 1
2000	2000 GG344	30-70m	2030	Einschlagwahrscheinlichkeit: 1:500
1998	1998 WT24		16.12.2001	4,87
12.1994	1994 XM1	10m	1994	0,27

### Initiativen zur Erfassung und Untersuchung gefährlicher Objekte

*Sind alle gefährlichen Objekte bekannt?  
Wer kümmert sich um die Überwachung unserer Nachbarschaft?  
Wer sorgt für unsere Sicherheit?*

Bis heute ist nur ein kleiner Teil der Himmelskörper bekannt, die uns gefährlich werden können. Der erste erdnahe

Asteroid, 1932HA, wurde erst 1932 von dem Heidelberger Astronomen Dr. Karl Reinmuth entdeckt, der dann 1937 auch den Asteroiden Hermes entdeckte, der sich der Erde bis auf 770 000 Kilometer näherte (etwa die doppelte Mondentfernung). Das erste Asteroiden-Suchprogramm wurde 1973 in USA gestartet. Wie man der Tabelle 3 über die Suchprogramme entnehmen kann, wurde erst mit der Aufklärung der Ursache für das

Aussterben der Dinosaurier ein Bewusstsein für die Bedrohung aus dem Weltall geschaffen.

Die Kollision des Kometen Shoemaker-Levy 9 mit Jupiter 1994 machte dann die Gefahr einer größeren Öffentlichkeit deutlich. Immer häufiger werden nun Vorbeiflüge von Himmelskörpern gemeldet, die uns zum Teil näher kamen als unser Mond (Tabelle 4). Einige der durchaus großen Objekte wurden erst entdeckt, als sie sich schon wieder von der Erde entfernten. Dies hatte nun in jüngster Vergangenheit auch in Europa „politische“ Folgen: 1996 kam es zu einer Resolution des Europarates mit der Aufforderung, sich der Abwehr von Asteroiden und Kometen anzunehmen. Im selben

Jahr wurde zur Koordinierung der Erfassung und Untersuchung erdnaheer Asteroiden auf private Initiative hin eine internationale Gesellschaft gegründet, die „Space Guard Foundation“, sie wird nun von den Vereinten Nationen unterstützt, die 1999 in der Wiener Deklaration auf die Gefahr aus dem All hinwies. 2001 reagierte die „European Science Foundation“ mit einem Positionspapier. 2002 rief die Münchner Rück, eine der weltweit größten Assekuranzen, ihren Versicherungsunternehmen, sich auf einen Asteroideneinschlag einzustellen.

In den USA überlegt man derzeit beim militärischen Weltraumüberwachungskommando „US Space Command“, eine zentrale Stelle zu schaffen, bei der alle Daten über Asteroiden und Kometen gesammelt werden sollen, die der Erde gefährlich werden können. Die Initiative hat den Namen „Natural Warning Impact Clearing House Concept of Operations“. NASA und nun auch ESA haben zur Technologieentwicklung für eine effiziente Abwehr bedrohlicher Himmelskörper Studien anfertigen lassen. Notwendige Voraussetzungen einer erfolgreichen Abwehr aber sind die Früherkennung der gefährlichen Objekte und ihre Erforschung.

#### Wie sieht es mit der Früherkennung aus?

Man darf sich durch die Vielzahl der Suchprogramme nicht täuschen lassen, ihre finanzielle Ausstattung ist sehr gering. Zudem gibt es seit 1996 für die südliche Erdhalbkugel kein Suchprogramm mehr. Ziel derzeitiger Suchprogramme ist lediglich, bis 2008 90 Prozent aller Asteroiden, die einen Durchmesser von 300 Meter oder größer haben, zu erfassen. Nicht eingeschlossen in derzeitige Suchprogramme sind Kometen sowie kleinere Objekte, die jedoch lokal und zum Teil auch global durchaus zu großen Zerstörungen führen können. Nicht einmal nach großen Kometen mit langen Umlaufperioden wird derzeit gesucht. Wenn sie von der Erde aus entdeckt werden, ist es für Abwehrmaßnahmen allerdings ohnehin viel zu spät.

Ferner ist auch eine Überwachung der Bahnen gefährlicher Objekte nötig, da diese sich aufgrund der relativ geringen Masse der Objekte leicht ändern können. Eine Bahnänderung kann durch die Begegnung mit anderen Himmelskörpern sowie durch Sublimation oder Jet-Bildung in Sonnennähe hervorgerufen werden und ist selten im Voraus berechenbar. Eine systematische Bahnüberwachung aller bekannten Objekte wird jedoch derzeit nicht durchgeführt. Amateure haben diese Aufgabe teilweise übernommen.

Für die Erfassung kleiner Objekte und die Früherkennung von Kometen ist eine Überwachungsstation im Weltraum – auf dem Mond oder an einem der Lagrange-Punkte des Systems Erde-Sonne – erforderlich, da die Atmosphäre der Erde die Lichtausbeute deutlich reduziert (Abb. 18). Einige Wellenlängen-Bereiche werden sogar ganz ausgeblendet. Dies ist vor allem für die Ermittlung der Zusammensetzung der Objekte von Bedeutung. Durch eine Station im Weltraum würde daher die Bestimmung der Zusammensetzung des Objekts deutlich erleichtert und selbst schwach leuchtende Objekte sowie Objekte in Sonnennähe könnten entdeckt werden. Darüber hinaus wäre man unabhängig von der Tageszeit, der Atmosphäre und dem Wetter.

#### Konzept zur Früherkennung gefährlicher Objekte

In den USA wurde in den letzten Jahren eine Studie mit Namen CASP (Comet / Asteroid Protection System) durchgeführt mit dem Ziel, aufzuzeigen, wie ein System zur Früherkennung und Abwehr gefährlicher Objekte aussehen könnte [8]. Diese Studie hat klar gezeigt, dass eine Beobachtungsstation im Weltall unbedingt erforderlich ist. Wichtigstes Ziel muss die frühzeitige Erkennung erdnaheer Asteroiden und Kometen mit kleinen Umlaufzeiten sein. Frühzeitig heißt, dass sie bereits einige Umläufe vor dem Erreichen der Erde entdeckt werden müssen. Die Erkennung der Objekte muss die genaue Bestimmung ihrer Bahn und ihre physikalische Charakterisierung beinhalten, um die Objekte mindestens klassifizieren zu können. Bei kleinen Objekten sollte die Vorwarnzeit wenigstens für eine Evakuierung des voraussichtlichen Einschlaggebietes ausreichen. Ferne Kometen sollten bereits weit von der Erde entfernt erkannt werden, jedoch leuchten sie erst in Sonnennähe. Eine exakte Bestimmung ihrer Bahn ist erst sehr spät möglich, da die Ausbildung des Schweifes zu einer erheblichen Bahnänderung führen kann.

Auslegungskriterien für ein Beobachtungssystem in der CAPS-Studie waren,

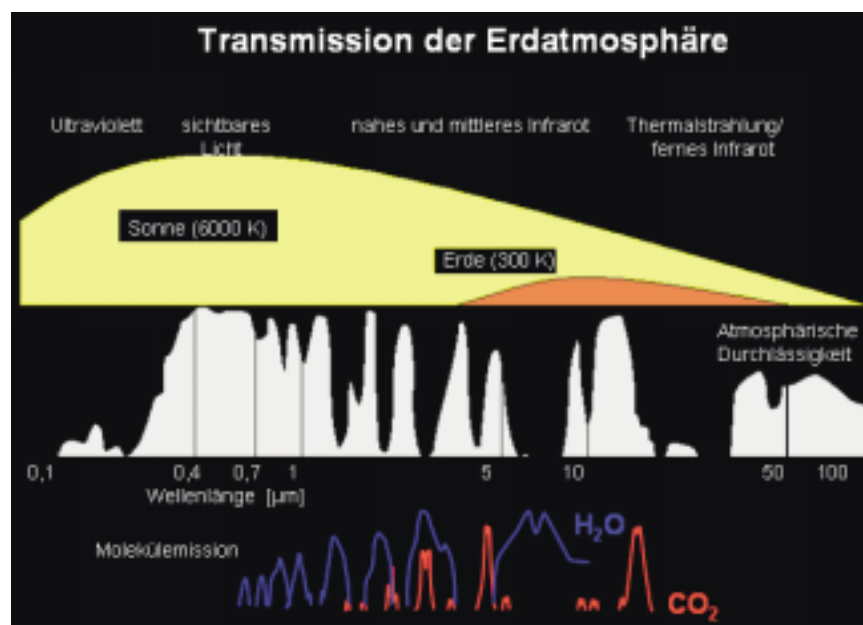


Abb. 18: Die Emission eines Himmelskörpers hängt wesentlich von seiner Temperatur ab. Das Emissionsmaximum der Sonne mit einer Temperatur von ca. 5700 °C liegt im sichtbaren Bereich, während die wesentlich kältere Erde bei höheren Wellenlängen abstrahlt. Die Atmosphäre der Erde lässt nur einen Teil der Sonnenstrahlung durch, ganze Wellenlängenbereiche werden vollständig herausgefiltert. Dies behindert oder verhindert sogar die Ermittlung der Zusammensetzung strahlender Objekte, wie anhand der Emissionen der Wasser- und Kohlendioxidmoleküle verdeutlicht wird.

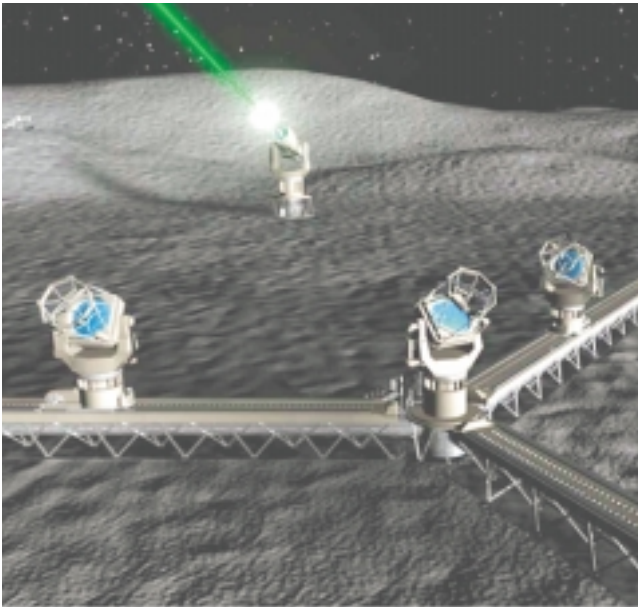


Abb. 20: Zerstörung eines Asteroiden durch eine Explosion, künstlerische Impression.

Abb. 19: Früherkennungssystem auf dem Mond [8].

dass ein 1 km-Objekt mindestens in einer Entfernung von fünf AE und Objekte von 50 Metern Durchmesser in 0,2 AE erkannt werden müssen. Das System sollte einmal im Monat den gesamten Himmel absuchen, um Vorwarnzeiten von ca. einem Jahr für ein großes Objekt und von ca. einem Monat für kleine zu erreichen.

Ein Früherkennungssystem, das diesen Anforderungen gerecht werden soll, braucht als Herzstück ein hoch auflösendes Teleskop mit großer Apertur, ausgestattet mit sehr schnellen und empfindlichen Detektoren zur Untersuchung eines großen Spektralbereichs (UV-IR). Die erforderliche hohe Auflösung kann nur erreicht werden, wenn man eine interferometrische Anlage aufbaut, bei der die Detektoren mehrere 100 Meter voneinander entfernt sind (Abb. 19). Zur genauen Bahnbestimmung sind Laserentfernungsmesser erforderlich. Der Stand der Technik ist für den Aufbau einer solchen Anlage heute noch nicht ausreichend, der Entwicklungsaufwand ist jedoch überschaubar. Sie könnte entweder auf eine heliozentrische Bahn gebracht werden, zum Beispiel in einen Librationspunkt Erde-Sonne, oder in eine Planeten- oder Mondumlaufbahn. Eine weitere Möglichkeit ist die Stationierung auf dem Mond an einem der Pole oder auf der der Erde abgewandten Seite.

### **Möglichkeiten zur Abwehr von Katastrophen**

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten der Abwehr einer Katastrophe: die Ablenkung des Objektes oder

seine Zerstörung. Im Folgenden werden für beide Abwehrstrategien in der Diskussion befindliche Szenarien vorgestellt.

#### **Zerstörung des Objektes**

Eine Zerstörung des Objektes kann je nach Größe und Zusammensetzung durch den Aufprall eines Geschosses oder durch eine Detonation zum Beispiel einer Wasserstoffbombe in Objektnähe oder auf dessen Oberfläche hervorgerufen werden (Abb. 20). Nachteil beider Methoden ist, dass eine Vielzahl von Bruchstücken entsteht. Allein die zuverlässige Vorhersage der Anzahl großer Bruchstücke und ihrer Massen ist sehr schwierig und erfordert detaillierte Kenntnisse über den inneren Aufbau des Planetoiden. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten der Objekte kann man jedoch davon ausgehen, dass auch die Bruchstücke größtenteils die Erde treffen werden. Daher kommt diese Methode nur für kleine Objekte infrage, bei denen man sicherstellen kann, dass alle Bruchstücke kleiner als 50 Meter sind und sie somit keinen nennenswerten Schaden anrichten können. Bei großen Objekten wird man eine Sprengung vermeiden und stattdessen versuchen, sie aus ihrer Bahn abzulenken. Für eine Bahnablenkung ist zudem wesentlich weniger Energie erforderlich und die Vorausberechnung der neuen Bahn weitaus sicherer.

#### **Ablenkung des Objektes**

Generell kann man sagen, dass eine Ablenkung umso einfacher ist, je kleiner die Masse des Objektes ist und je mehr Zeit

noch zur Verfügung steht. Die erforderliche Geschwindigkeitsänderung hängt jedoch auch von der Bahn und der Geschwindigkeit des Objektes ab. Eine vergleichsweise kleine Geschwindigkeitsänderung reicht aus, wenn es gelingt, das Manöver in großer Entfernung durchzuführen (Abb. 21). Die für die Bahnablenkung erforderliche Kraft steigt mit der Masse des Objektes, mit seiner Geschwindigkeit und der Kürze der noch verfügbaren Zeit. Wichtig ist, dass die Kraft im Schwerpunkt ansetzt, damit man nicht durch Veränderung der Rotation unnötig Energie und Impuls vergeudet. Die Kraft sollte ferner auf eine möglichst große Fläche verteilt angreifen, um ein Zerbrechen des Objektes zu verhindern.

Bei den Ablenkungsverfahren versucht man einerseits den Impulssatz auszunutzen, der besagt, dass in einem abgeschlossenen System die Summe aller Impulse erhalten bleibt. Andererseits soll möglichst viel der eingesetzten Energie in gerichtete Bewegungsenergie für die Bahnänderung verwandelt werden. Es gibt grundsätzlich viele Möglichkeiten, eine Bahnänderung zu erreichen. Die aussichtsreichsten, aber auch einige ausgefallene, jedoch interessante, Varianten werden im Folgenden beleuchtet.

**Gerichteter Ausstoß von Asteroiden- oder  
 Kometenmaterial**

Wesentlich geringer ist der Transportbedarf, wenn man Material des Objektes selbst gerichtet abstößt, um den zur Bahnänderung nötigen Impuls zu erzeugen. Hierzu ist zu allererst Energie erforderlich. Aufgrund des niedrigen Druckes kommt es in der Regel nicht zur Verflüssigung und Verdampfung, sondern das Material geht direkt vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand über, es sublimiert. Zur Berechnung der Sublimati-

onsrate ist die Kenntnis der Oberflächenschichten des Objektes erforderlich. Es gibt wieder verschiedene Möglichkeiten, ans Ziel zu kommen: man kann ein Geschoss einsetzen, eine Detonation herbeiführen, das Sonnenlicht ausnutzen oder einen Laser zum Einsatz bringen.

Einsatz eines Geschosses

Lässt man ein Geschoss mit hoher Geschwindigkeit auf das abzulenkende Objekt treffen, sollte es Ziel sein, dass es seinen Impuls und seine Energie möglichst

**Erzeugung eines Rückstoßes durch den Ausstoß von Materie**

Die Idee ist hierbei, Material ( $m_m$ ) mit möglichst hoher Geschwindigkeit ( $v_m$ ) gerichtet auszustößen und so eine Geschwindigkeitsänderung ( $\Delta v_o$ ) des Objektes ( $m_o$ ) zu erzeugen (Abb. 22). Man kann dazu einen Raketenantrieb einsetzen, bei dem Treibstoff ausgestoßen wird oder man sorgt für einen gerichteten Ausstoß von Material des Objektes selbst.

**Einsatz eines Raketenantriebes**

Will man eine Rakete zur Bahnablenkung einsetzen, muss man bedenken, dass sie samt Treibstoff zum Asteroiden befördert, dort gelandet und verankert werden muss (Abb. 22). Der Transportbedarf ist hoch, insbesondere, wenn der Treibstoff von der Erde aus mitgenommen wird. Rakete, Treibstoff und Transferfahrzeug müssen mit mehreren Großraketen in eine Erdumlaufbahn gebracht, dort zusammengebaut und betankt werden. Zur Bereitstellung einer ARIANE-V-Rakete in einer erdnahen Umlaufbahn wären mehr als 17 Starts einer Saturn-V-Rakete erforderlich (Abb. 39). Dann muss die Rakete mit einem Minimum an Treibstoff zu ihrem Zielobjekt transportiert werden. Hierfür ist ein schubstarkes Transferfahrzeug erforderlich. Eine Landung ist aufgrund der geringen Schwerkraftwirkung kleiner Objekte nicht einfach und muss vollautomatisch erfolgen. Zur sicheren Verankerung ist zudem die Kenntnis der Beschaffenheit des Objektes in Oberflächennähe nötig. Für kleine Asteroiden bis zur 100m-Klasse ist es durchaus denkbar, eine Rakete einzusetzen, wenn genügend Vorlaufzeit zur Verfügung steht. Gerade bei kleinen Objekten ist die Vorwarnzeit jedoch oft sehr kurz, vor allem bei Beobachtung von der Erde aus. Daher müsste die Rakete bereits transportbereit im Weltraum stationiert sein und das Manöver in Erdnähe durchgeführt werden.

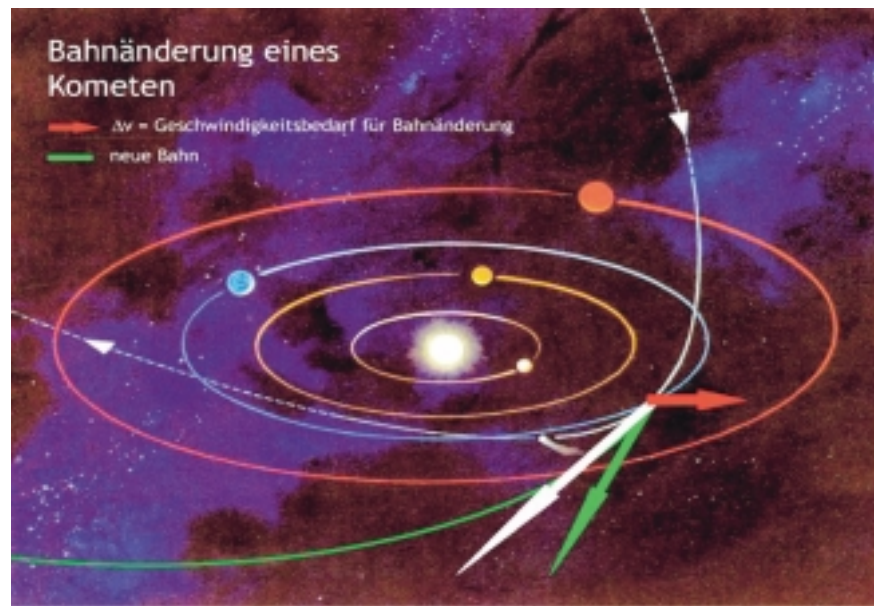


Abb. 21: Geschwindigkeitsbedarf zur Bahnänderung.

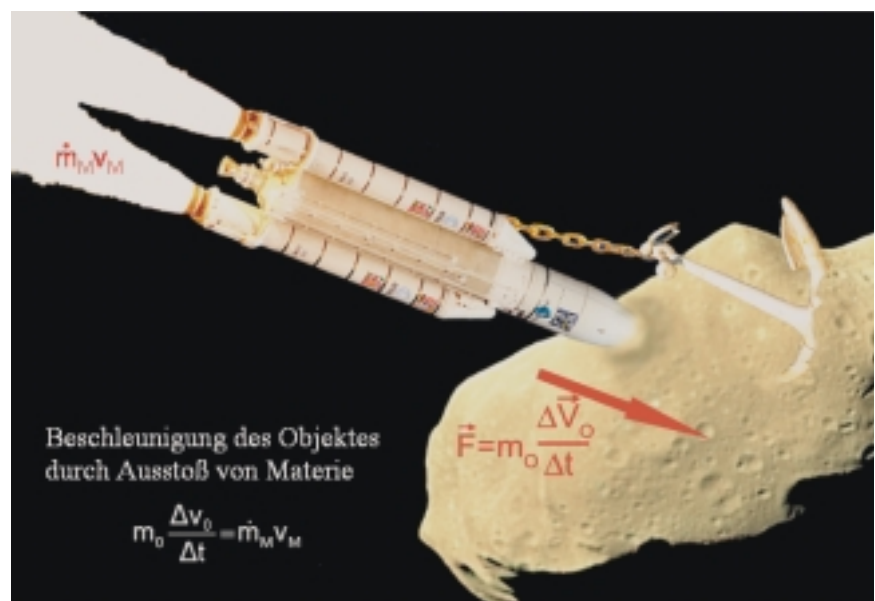


Abb. 22: Einsatz einer Rakete zur Abwehr eines Asteroiden, künstlerische Impression.



Abb. 23: Abwehr durch Beschuss.

vollständig überträgt (Abb. 23). Man möchte nicht mit dem Objekt Billard spielen, obwohl man dann eine höhere direkte Impulsübertragung erzielen könnte. Ziel ist, dass das Geschoss stecken bleibt und so seine ganze Bewegungsenergie zur Sublimation von Objektmaterial abgibt. Dadurch kommt es zu einem zusätzlichen Rückstoßeffekt. Schon bei einer Aufprallgeschwindigkeit von zehn Kilometern pro Sekunde ist die Energie pro Masse um den Faktor 4 größer als der Energieinhalt des Treibstoffes einer chemischen Rakete. Zur Auslegung des Geschosses hinsichtlich erforderlicher Masse und Geschwindigkeit und zur Auswahl des Zielgebietes, insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung einer Sprengung, muss man für den Einsatz eines Geschosses vor allem die mechanischen Eigenschaften und die Masse des Objektes, seine Zusammensetzung und Dichte sowie die Dichteverteilung kennen.

Erste Erfahrungen mit dem Beschuss eines Kometen wird man bei der Mission „Deep Impact“ sammeln können. Eine amerikanische Kometensonde mit einem Geschoss an Bord wird voraussichtlich im Juli 2005 gestartet. Hauptziel dieser Mission ist die Erforschung des Inneren des Kometen Temple 1. Dieser Komet rotiert relativ langsam und ist auf einer Bahn, die eine hohe Einschlaggeschwindigkeit des 500 kg Kupfergeschosses verspricht. Obwohl die kürzeste Entfernung seiner Bahn von der Erde immer noch 0,5 AE - also die halbe Entfernung zur Sonne - beträgt, wird man den Einschlag nicht nur von der Muttersonde aus, sondern auch von der Erde aus beobachten können. Das Geschoss wird ein Loch der Größe eines Fußballfeldes erzeugen. Für

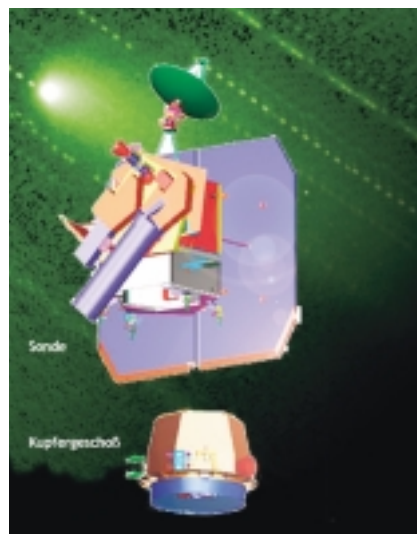


Abb. 24: Mission „Deep Impact“ zur Untersuchung des Inneren des Kometen Temple 1.

Kupfer hat man sich entschieden, da es eine hohe Dichte aufweist und seine eigenen Emissionslinien und die seiner Reaktionsprodukte bei der Untersuchung des ausgestoßenen Materials relativ wenig stören. Neben der Bestimmung der Zusammensetzung im Inneren wird man auch auf die mechanischen Eigenschaften zurück schließen können (Abb. 24).

#### Erzeugung einer Detonation

Verursacht man eine Detonation einer Nuklearbombe auf der Oberfläche oder in Oberflächennähe des bedrohlichen Objektes, so kann man im Vergleich mit der chemischen Rakete einen um mehrere Größenordnungen höheren Impuls übertragen. Aber Vorsicht ist geboten! Ein monolithischer Körper könnte zerbrechen und ein loser Steinhaufen würde kaum

abgelenkt werden. Es wäre wie bei einem Faustschlag in einen Sandsack: der Haufen wird deformiert und ein Großteil der Energie nicht als kinetische Energie übertragen. Der Bedarf an Startkapazität ist auch für diesen Fall hoch. Die Positionierung solcher Waffen in Erdnähe wirft jedoch darüber hinaus politische Probleme auf.

#### Ausnutzung des Sonnenlichtes

Die Idee, das Sonnenlicht mit einem Spiegelsystem einzufangen, wurde erstmals 1993 von Melosh und Nemchinov publiziert [9]. Das Sonnenlicht wird mit einem Spiegel gesammelt, umgelenkt und auf den Planetoiden konzentriert, so dass lokal eine hohe Wärmestromdichte erreicht wird und Asteroidenmaterial sublimiert (Abb. 25). Das heiße Gas wird in den Weltraum expandiert. Dabei kommt es zu relativ hohen Gasgeschwindigkeiten (ca. 1 km/s) und es kann somit ein Schub erzeugt werden. Nennenswerte Sublimation erfordert Temperaturen von mindestens 2000°C. Die Sublimationswärme von steinigen Asteroiden (Silikaten) liegt bei ca. 15 MJ/kg, für Kometen (Eis) bei ca. drei MJ/kg (Megajoule pro Kilogramm). Bei der Auslegung des Systems müssen Rotation des Objektes und Wärmeleitung in der Oberfläche mit berücksichtigt werden. Daher sind Wär-



meflüsse von einigen zehn, besser einigen hundert Megawatt pro Quadratmeter ( $\text{MW}/\text{m}^2$ ) nötig. Grundsätzlich kann man für kleine Asteroiden eine ausreichende Ablenkung erzielen, wenn das System mehrere Jahre in Betrieb ist. Große Spiegel werden für große Teleskope entwickelt. Eine Antennenstruktur mit 14 Metern Durchmesser wurde von der NASA bereits 1996 erfolgreich erprobt.



Abb. 26: Hochleistungslaser zur Objektabwehr, künstlerische Impression.

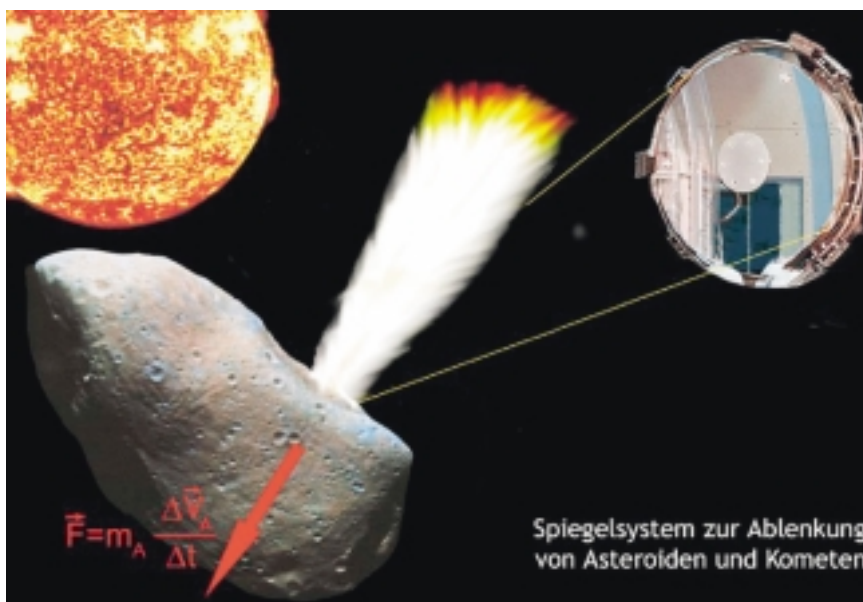


Abb. 25: Spiegelsystem zur Asteroidenablenkung, künstlerische Impression.

An der TU Dresden wurde von Völker in seiner Diplomarbeit unter sehr optimistischen Annahmen die spezifische Spiegelmasse betreffend abgeschätzt, dass man einen typischen Steinasteroiden mit einem Kilometer Durchmesser mit einem 1,5 km-Spiegel pro Jahr Betriebszeit um zehn Erdradien ablenken könnte, sofern dieser sich in einer Entfernung von einer AE zur Sonne befindet [10]. Hierzu wäre eine Systemmasse von 50 Tonnen erforderlich. Diese Masse hätte fast eine einzige Saturn-Rakete in einen erdnahen Orbit befördern können (Abb. 39). Außer Acht gelassen wurde bei dieser Abschätzung jedoch, dass sich der Verdampfungspunkt zum Beispiel durch die Rotation des Asteroiden bewegt, dass aufgrund

der Verdampfung mit erheblicher Verschmutzung des Spiegels gerechnet werden muss und dass Abschattungseffekte nicht zu vermeiden sind. Diesen Problemen könnte man jedoch mit einem System von vielen Spiegeln begegnen.

Insgesamt erscheint dieser Ansatz sehr komplex. Zudem ist eine genaue Kenntnis der Bewegung des Objektes und insbesondere eine Abstimmung mit seiner Rotation erforderlich, also eine maßgeschneiderte Lösung, für die man meist keine Zeit haben wird.

#### Einsatz eines Hochleistungslasers

Ersetzt man Sonnenlicht und Spiegel durch ein Lasersystem, so ist man im Prinzip beim Vorschlag der amerikanischen

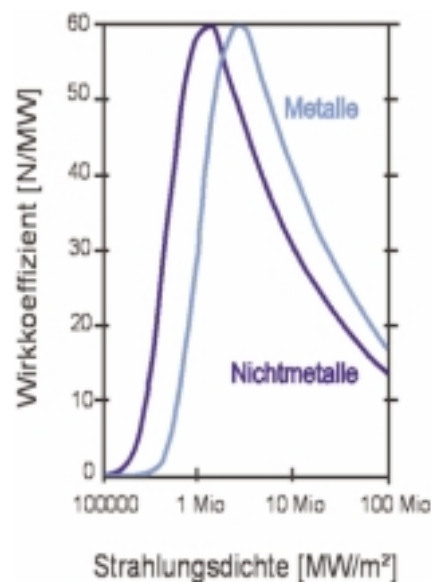


Abb. 27: Wirkkoeffizient als Funktion der Leistungsdichte für einen fünf Nanosekunden-Laserpuls [5].

CAPS-Studie [8]. In dieser Studie wurde zur Ablenkung ein gepulstes Lasersystem vorgeschlagen, mit dem Asteroidenmaterial von der Oberfläche ablatiert wird (Abb. 26). Das abgetragene Material expandiert ins Vakuum und ruft als Reaktion eine Schubkraft hervor. Da dieser Vorschlag besonders aussichtsreich erscheint, wird er nun näher betrachtet.

Abhängig von Pulsdauer und Material des Objektes gibt es eine optimale Leistungsdichte, bei der man mit dem Laserpuls den höchsten Schub erzeugen kann. Das Verhältnis von erreichtem Schub zu aufgewendeter Laserleistung ist ein Maß für die Effizienz der Maßnahme und wird als Wirkkoeffizient bezeichnet. In Abbildung 27 ist dieser Wirkkoeffizient für

zwei Fälle dargestellt. Ist die Strahlungsdichte an der Oberfläche zu gering, wird nicht ablatiert, der Wirkkoeffizient ist null. Ist die Wärmeleitung im Material beispielsweise bei großem metallischem Anteil im Material hoch, so ist die erforderliche Leistungsdichte groß. Wählt man jedoch die Leistungsdichte zu hoch, wird das Material ionisiert. Das kostet Energie, die nicht in Schubstrahlenergie verwandelt werden kann, der Wirkkoeffizient nimmt erheblich ab. Die Höhe des Maximums des Wirkkoeffizienten hängt bei genauerer Betrachtung darüber hinaus vom sublimierenden Material ab. Andererseits steigt die optimale Leistungsdichte bei Verkleinerung der Pulsdauer mit  $1/(\text{Pulsdauer})^2$  an. Die erforderliche Laserenergie, um ein bestimmtes Objekt, das sich auf Kollisionskurs befindet, um einen Erdradius abzulenken, hängt im Wesentlichen von der Bahn des Körpers, seiner Entfernung beim Eingriff, von seiner Zusammensetzung und Dichte ab. Die erforderliche Geschwindigkeitsänderung nimmt mit abnehmendem Abstand zu.

Zugleich muss die Laserleistung noch zusätzlich erhöht werden, da weniger Zeit zur Ablenkung zur Verfügung steht. Insgesamt steigt die erforderliche Laserleistung daher nahezu mit  $1/(\text{Abstand})^2$ . Für einen steinigen Asteroiden ( $\rho=3000 \text{ kg/m}^3$ ) und einen typischen Kometen mit langer Umlaufzeit ( $\rho=200 \text{ kg/m}^3$ ) wurden für einige Beispiele die erforderlichen Energien abgeschätzt. Sie sind in Abbildung 28 in Abhängigkeit des Objektdurchmessers aufgetragen. Zieht man noch zusätzlich Abbildung 29 heran, in der für verschiedene Laserleistungen die an das Objekt übertragbare Energie über der Laserbetriebsdauer aufgetragen ist, kann ein Abwehrsystem ausgelegt werden. Für einen 200 Meter-Asteroiden (A1) ist bei einer Vorwarnzeit von sechs Monaten schon ein zehn MW-Laser ausreichend, für einen 1 km-Asteroiden (A2) hingegen müssen es schon einige Gigawatt (GW) mittlere Laserleistung sein. Will man dagegen einen 200 km-Kometen (K) weit genug ablenken, kann man dies schon mit einem Megawatt erreichen.

Die Vorwarnzeiten werden nicht ausreichen für Entwicklung, Bau, Qualifikation und Positionierung eines Lasersystems, das an ein bestimmtes Objekt optimal angepasst ist. Daher muss man mit einem einzigen Lasersystem für verschiedenartige Objekte in unterschiedlicher Entfernung gerüstet sein. Das Lasersystem muss hierfür ausreichend groß di-

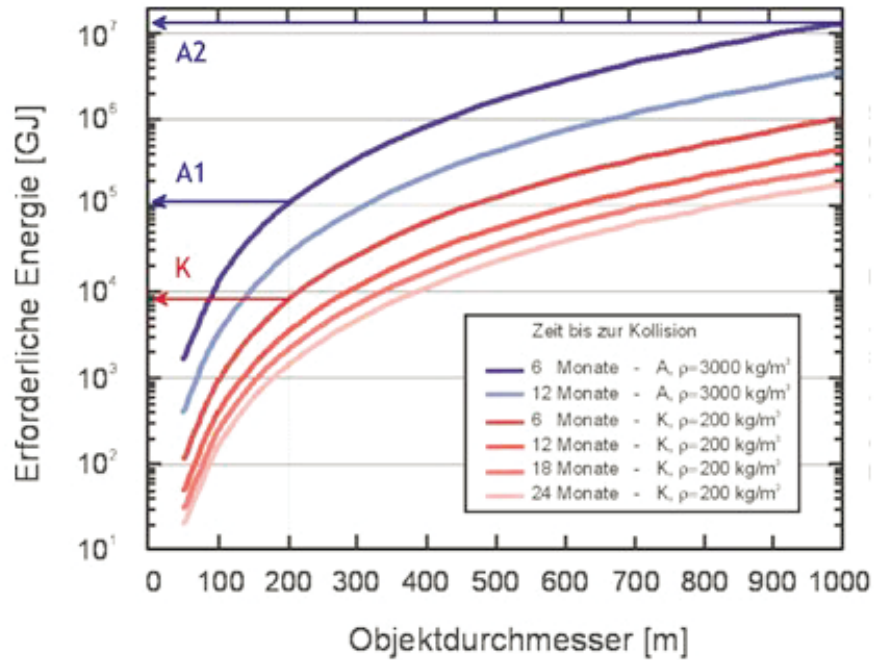


Abb. 28: Zur Ablenkung um einen Erdradius erforderliche Energie in Abhängigkeit vom Objektdurchmesser und des Beginns der Maßnahme [8].

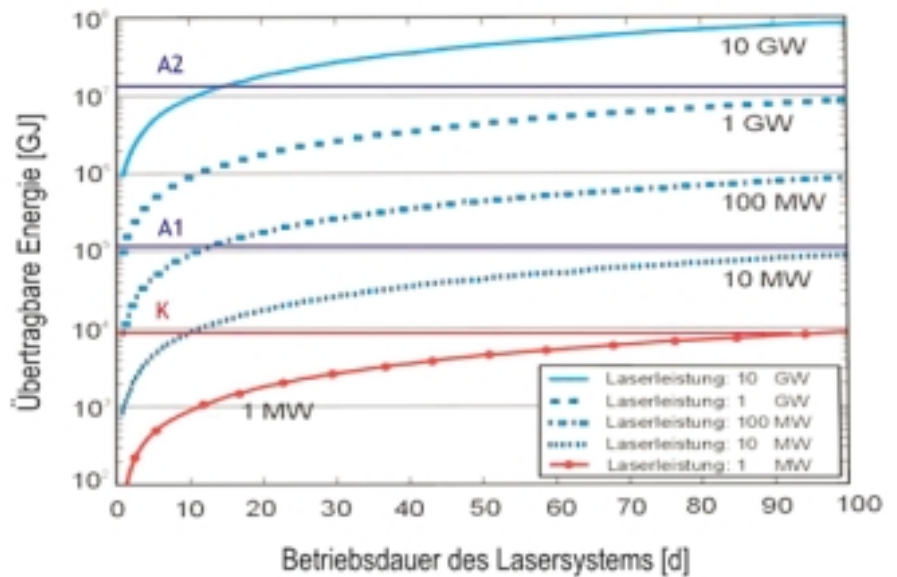


Abb. 29: Übertragbare Energie in Abhängigkeit von der Laserbetriebsdauer [8].

mensioniert werden und über eine adaptive Optik verfügen.

Berechnungen der NASA ergaben, dass bei einer Laserpulslänge von fünf Nanosekunden (ns) ein Wirkkoeffizient von ca. 50 Newton (N)/MW erzielt werden kann. Eine ausreichend sichere Ablenkung eines 1 km-Eisenasteroiden könnte dann mit einer mittleren Laserleistung von 200 GW über 40 Tage hinweg erreicht werden. Diese Laserleistung liegt jedoch um mehr als fünf Größenordnungen über der heute verfügbaren Lasertechnologie. Das leistungsstärkste Laser-

system, das derzeit entwickelt wird, ist ein chemischer MW-Laser für den Einsatz in Kampfflugzeugen. Diese von der US-Airforce in Auftrag gegebene Entwicklung eines so genannten ABL-Systems (Air Born Laser) lässt für die Abwehr ei-

nes Himmelskörpers Hoffnungen aufkommen, da das ABL-System ebenfalls für den rauen Betrieb geeignet sein muss, also mechanische Lasten bei einem Raketenstart eventuell überstehen kann und gleichfalls einer adaptiven Optik bedarf. In der CAPS-Studie wird vorgeschlagen, sich zunächst ein kleineres Übungsobjekt auszusuchen und ein System dafür im Weltraum zu erproben. Bleiben beispielsweise noch 20 Tage Zeit für die Einwirkung des Lasers zur Abwehr eines 80 m-Eisenasteroiden, der eine Geschwindigkeit von 30 km/s besitzt, so könnte ein Lasersystem mit einer mittleren Leistung von 56 MW wie folgt aussehen: ein gepulster Laser (500 nm, zehn Pikosekunden (ps)) mit einer Laserpulsenergie von 14 MJ wird mit vier Hertz (Hz) betrieben.

Für die Positionierung des Lasersystems gibt es mehrere Möglichkeiten, deren Vor- und Nachteile kurz beleuchtet werden. Eine Positionierung auf der Erde erscheint vorteilhaft, da der Transport in den Weltraum entfällt. Man muss somit weder mit Systemmasse sparen noch muss das Lasersystem den Startlasten einer Rakete standhalten. Entscheidet man sich nicht für einen chemischen Laser, so könnte die immense erforderliche Leistung durch einen weltweiten Verbund großer Kraftwerke erbracht werden. Die Kühlung des Lasersystems könnte mit Wasser erfolgen. Allerdings müssten mehrere Lasersysteme über die Erde verteilt aufgebaut werden, um das Objekt trotz Erdrotation rund um die Uhr bearbeiten zu können.

Politisch gesehen ist dies ein großer Vorteil, da das Vorhaben so nur als gemeinsame Leistung der Erdbewohner durchgeführt werden kann. Dem stehen allerdings große Nachteile entgegen. Will man das Lasersystem auf der Erde betreiben, ist eine adaptive Optik unabdingbar nötig. Studien haben gezeigt, dass dann

neben der Absorption durch die Atmosphäre (Abb. 18) auch Turbulenzen in der Atmosphäre berücksichtigt werden müssen. Diesen Problemen muss man sich allerdings auch für das ABL-System stellen. Ein schwerwiegender Nachteil ist jedoch, dass das System aufgrund der Strahlaufweitung durch Raman-Streuung erst in Erdnähe eingesetzt werden kann, also im allerletzten Moment. Dies bedeutet neben einem besonders großen Geschwindigkeitsbedarf eine ungeheure Belastung für alle Betroffenen.

Als bessere Lösung ist somit die Positionierung eines Lasersystems im Weltall anzusehen. Günstig hierfür erscheinen die stabilen Lagrange-Punkte des Systems Sonne und Erde oder der Mond, da in beiden Fällen kein ständiger Antriebsbedarf besteht, um die Position zu halten. Auf dem Mond sind ebenfalls mindestens fünf Standorte nötig, um das Objekt verfolgen zu können. Der Mond erscheint jedoch noch aus anderer Sicht vorteilhaft. Der durch den Ausstoß eines Photonenstrahls hoher Dichte erzeugte Rückstoß spielt aufgrund der großen Masse des Mondes keine Rolle. Außerdem ist man bei der Kühlung der Lasersysteme nicht ausschließlich, wie sonst im Weltraum, auf Wärmeabstrahlung angewiesen, man kann Ressourcen des Mondes nutzen. Die gegebenenfalls erforderliche elektrische Energie könnte ebenfalls mittels Laser von der Erde übermittelt oder aus einem Mondkraftwerk bezogen werden. Da der Mond vergleichsweise nahe ist, ist der Aufwand für Transport, Aufbau und Wartung relativ gering. Entscheidet man sich das Früherkennungssystem betreffend ebenfalls für diesen Standort, erscheint eine bemannte Mondstation rentabel, die auch andere Zweige der Astronomie beflügeln könnte. Ein weiterer Vorteil der Stationierung im Weltall ist, dass man das Objekt schon weit von der Erde entfernt ablenken kann, wenn die erforderliche Geschwindigkeitsänderung noch vergleichsweise klein ist. Auch kann noch nachgearbeitet werden, wenn die Bahn oder die Zusammensetzung fehlerhaft ermittelt wurden. Allerdings hat man bei großen Entfernungen mit der Strahlaufweitung zu kämpfen. Für diese Fälle muss man ein System von phasengekoppelten Lasern aufbauen, um eine Apertursynthese durchführen zu können, da bereits bei einer Entfernung von einer AE ein Drei-Kilometer-Spiegel erforderlich wäre, um ein kleines Objekt überhaupt noch zu treffen. Aus gleichem Grund ist

eine kurze Laserwellenlänge vorteilhaft, da der Fleckdurchmesser proportional zur Wellenlänge ist.

Entscheidet man sich für einen der stabilen Lagrange-Punkte (Abb. 10), um das Geschehen weiter von der Erde wegzubringen, muss der Rückstoß durch den Laserbetrieb mit Antrieben kompensiert werden. Besonders schwierig wird jedoch das Management der großen Abwärmen, da die Laserwirkungsgrade auch für große Laser gering sind. Für die Abstrahlung von einem Megawatt sind bei 30°C ca. 3 000 m<sup>2</sup> Radiatorfläche erforderlich. Da sich die Objekte der Erde von allen Seiten nähern können, müsste man in den Lagrange-Punkten L4 und L5 Lasersysteme stationieren. Gegen diese Dopplung hilft, die Station zum großen Raumschiff auszubauen und dem Objekt soweit wie möglich entgegenzuziehen. Man benötigt hierfür dann elektrische Raketenantriebe, die sich durch relativ hohen Schub und große Treibstoffausstoßgeschwindigkeit von einigen zehn Kilometern pro Sekunde auszeichnen, um das Objekt möglichst weit von der Erde entfernt bearbeiten zu können und die dafür erforderlichen Treibstoffmenge möglichst gering zu halten. Die für den Laserbetrieb installierte Leistungsversorgung könnte dann für den Raketenantrieb mitgenutzt werden. Ein Mindestabstand zum Objekt muss eingehalten werden, um sicher zu stellen, dass die empfindliche Optik nicht verschmutzt wird.

Bei einer Stationierung auf dem Mond beträgt die Signallaufzeit bereits 1,3 Sekunden und bereitet Schwierigkeiten bei der Systemsteuerung von der Erde aus. Wählt man eine Raumschifflösung, so ist ein autonomer Betrieb unabdingbar erforderlich. Bereits in 1 AE Entfernung ist die einfache Signallaufzeit auf 8,3 Minuten angewachsen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Lasersystem große Vorteile hat, da es für eine große Klasse von Objekten eingesetzt werden kann und eine genaue Kenntnis des Objektes und seiner Eigenschaften zwar für eine optimale Anpassung des Systems erforderlich ist, man sich jedoch bei kleinen erdfernen Objekten auch in gewissen Grenzen eine Vergeudung von Energie erlauben kann. Darüber hinaus kann sich das Lasersystem auch während seiner Schlafphase bereits nützlich machen. Es kann beispielsweise zur Räumung wichtiger Umlaufbahnen von Weltraumschrott eingesetzt werden. Auch an das Einfangen von Asteroiden zur Rohstoffge-

winnung wurde bereits gedacht. Durch eine internationale Kooperation bei Entwicklung, Positionierung und Betrieb des Lasersystems und der Wahl einer Betriebswellenlänge, bei der die Transmission der Erdatmosphäre möglichst gering ist, kann das Risiko eines Missbrauches minimiert werden.

### Bahnänderung durch Impulsübertragung von Photonen

Da Licht auch Teilchencharakter hat, also aus Photonen besteht, die nicht nur Energie, sondern auch einen Impuls übertragen können, kann durch die Veränderung der Wärmeabstrahlung, des Reflexions- oder des Absorptionsvermögens eines Objektes ein Schub erzeugt werden, der eine Bahnänderung des Objektes zur Folge hat. Oder man lässt das Objekt einfach im Sonnenlicht davon segeln. Diese Möglichkeiten werden im Folgenden kurz beleuchtet.

#### Veränderung der thermischen Emission

Yarkovski, ein polnischer Ingenieur, hat Anfang des 20. Jahrhunderts beschrieben, wie es durch ungleichmäßige Erwärmung eines kleinen Flugobjektes zu einer Schubkraft kommen kann [11]. Bei der thermischen Emission von einer Oberfläche wird ein Impuls übertragen, der in etwa senkrecht zur Oberfläche (OF) gerichtet ist und proportional zu abgestrahlter Wärme zunimmt. Die abgestrahlte flächenspezifische Wärme ( $q_{OF}$ ) steigt ihrerseits mit der vierten Potenz der Temperatur der Oberfläche ( $T_{OF}$ ) und proportional zu ihrem Emissionsgrad ( $\epsilon_{OF}$ ) an:  $q_{OF} = \sigma \epsilon_{OF} T_{OF}^4$ .

Die Stefan-Boltzmann Konstante  $\sigma$  hängt nur von Fundamentalkonstanten der Physik ab und kann daher nicht beeinflusst werden. Durch gezielte Veränderung des Emissionsgrades oder/und der Oberflächentemperatur kann jedoch eine ungleichmäßige Abstrahlung erreicht werden (Abb. 30). Dies hat dann eine resultierende Kraft auf den Körper zur Folge, es wird also ein Schub erzeugt. Dieser Effekt ist nach Yarkovski benannt. Um den Schub berechnen zu können, benötigt man eine detaillierte Kenntnis des Objektes. Daten wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Rauigkeit, Albedo, Emissionsgradverteilung, Rotationsgeschwindigkeit, Lage der Rotationsachse, Bahndaten insbesondere zur Berechnung der Sonnenbestrahlung, gilt es zu ermitteln.

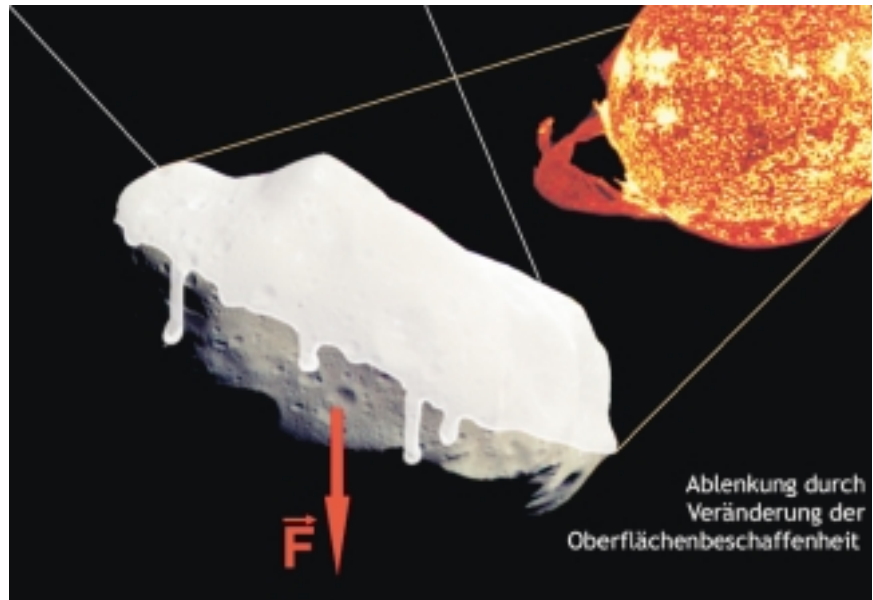


Abb. 30: Ablenkung durch Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit, künstlerische Impression.

#### Veränderung des Reflexionsvermögens

Vergrößert man zum Beispiel den Reflexionsgrad für das einfallende Sonnenlicht des Objektes auf der der Sonne zugewandten Seite durch „Besprühen mit weißer Farbe“, so kann durch die erhöhte Impulsübertragung durch die reflektierten Photonen ebenfalls eine Bahnänderung des Objektes erreicht werden. Da die Albedounterschiede relativ groß sein können (Mond: 0,07, Basalt 0,05, jedoch weißer Schnee: 0,9), erscheint hier ein merklicher Effekt erzielbar. Wichtige Voraussetzungen hierfür sind jedoch darüber hinaus sehr lange Zeiten in Sonnennähe und ein großes Verhältnis von Reflexionsfläche zur Masse des Objektes. Vorteilhaft ist, dass das Reflexionsvermögen bereits durch das Ausbringen einer sehr dünnen Schicht vergrößert werden kann (kleiner als ein Millimeter). Zusätzlich wird dadurch jedoch auch der Emissionsgrad und somit insgesamt die Wärmebilanz des Objektes verändert. Hierdurch ist zur Berechnung der Ablenkung wiederum eine detaillierte Kenntnis des Objektes wichtig.

#### Veränderung des Absorptionsvermögens

Zur Vergrößerung des Absorptionsvermögens beispielsweise durch Ausbringen einer Staubschicht ist hingegen wesentlich mehr Volumen erforderlich. Die Schicht müsste relativ dick sein, etwa einen Zentimeter, daher entsteht ein großer Transportbedarf. Auch bei dieser Methode werden Emissionsgrad und Thermalhaus-

halt mit verändert, da das Verhältnis aus Emissions- und Absorptionsgrad stets konstant bleibt.

Die durch Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit erreichbare Bahnänderung  $\Delta r$  wurde in [11] abgeschätzt. Die Bahnänderung ist proportional zum Quadrat der verbleibenden Flugzeit und umgekehrt proportional zum Radius des Objektes. Für das Beispiel des Himmelskörpers 1566 Ikarus mit einem Kilometer Durchmesser wurde als Unterschied zwischen einem glatten Stein und einer porösen Regolith-Oberfläche errechnet, dass in 100 Jahren eine Bahnänderung von 1 400 Kilometern erzielt werden kann. Hat man 300 Jahre Zeit zu warten, ergibt sich aufgrund der quadratischen Abhängigkeit fast der zehnfache Wert, was bereits ausreichend wäre, einen Treffer abzuwenden. Für einen kleineren Körper mit 300 Metern Durchmesser erzielt man hingegen in 100 Jahren bereits 4 700 Kilometer Bahnabweichung. Um die Oberfläche ei-

So verfolgenswert und risikolos diese Methoden auch erscheinen, so muss man doch zusammenfassend feststellen: will man die Impulsübertragung von Photonen ausnutzen, so braucht man eine genaue Kenntnis des Objektes und mindestens 100 Jahre Zeit!

### Auswahl einer geeigneten Abwehrstrategie

Vor dem Eingriff ins Geschehen mit dem Ziel, einen Himmelskörper abzuwehren, steht das frühzeitige Erkennen der Gefahr. Da für die Auswahl der richtigen Abwehrstrategie die noch zur Verfügung stehende Zeit von ausschlaggebender Bedeutung ist, sind Früherkennungssystem und Abwehrstrategie eng miteinander verknüpft.

*Wenn die Vorwarnzeit kurz ist, also nicht mehr als einige Jahre beträgt,* kann man nur Systeme einsetzen, die bereits im Weltraum stationiert sind oder sofort gestartet werden können. Eine maßgeschneiderte Lösung ist nicht möglich. Es muss eine große Beschleunigung erzielt werden. Das System muss mit wenigen „Basisdaten“ erfolgreich sein und schnell positioniert werden können. Das heißt, man ist auf einen schubstarken Antrieb angewiesen. Auf höchste Zuverlässigkeit muss Wert gelegt werden, da für einen zweiten Versuch die Zeit meist nicht ausreichen wird.

*Wenn die Vorwarnzeit mehr als zehn Jahre beträgt,*

ist man immer noch auf existierende Technologien angewiesen. Allerdings sind bei Verwendung eines existierenden Systems mehrere Versuche möglich. Wenn man mit der Entwicklung sofort beginnt, kann man ein maßgeschneidertes System bauen. Zeit für politisches Gerangel und eine unsichere Finanzierung hat man jedoch nicht.

*Wenn man mehrere Jahrzehnte Vorwarnzeit hat,*

sollte man sich trotzdem sputen, da man sonst die Zahl der Möglichkeiten wieder beschränkt. Die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien ist möglich. Man sollte mehrere Richtungen verfolgen und möglichst schnell politische und finanzielle Klarheit schaffen.

*Wenn man mehr als hundert Jahre Zeit hat,*

kann man erst einmal einen Wettbewerb ausschreiben! Dieser Fall ist jedoch eher unwahrscheinlich.

*Unsere Situation heute ist dadurch gekennzeichnet,*

dass wir nicht einmal alle großen erdnahen Objekte mit kurzen Umlaufzeiten kennen und kein Frühwarnsystem haben; also gefährliche Objekte meist erst erkennen, wenn sie an uns bereits – bisher zum Glück – vorbeigerast sind. Wir sind auf eine Abwehr in keiner Weise vorbe-

nen Zentimeter dick mit Staub zu beschichten, würden ca. 4 000 Tonnen Staub erforderlich sein. Dies hätte allein einen Transportbedarf zur Folge, zu dessen Deckung 90 Saturn 5-Raketen von der Erde aus starten müssten. Eine ausreichende Albedoänderung könnte eventuell bereits mit einem Zehntel der Masse erreicht werden. Möglich wäre auch, die Oberfläche in einer Tiefe von einigen Zentimetern mit konventionellen Sprengstoffen zu zerbröseln. Allerdings nur theoretisch, da der Körper dabei aufgrund seiner geringen Schwerkraft einen Teil dieser Oberfläche verlieren würde. Denkbar ist hingegen das Wegsprengen poröser Oberflächenschichten, so vorhanden.

#### Befestigung eines Solarsegels

Die Idee, das unerwünschte Objekt einfach davon segeln zu lassen, hat Charme! (Abb. 31) Für kleine Objekte ist grundsätzlich der Einsatz eines großen Solarsegels zur Bahnablenkung möglich. Der solare Strahlungsdruck auf das Segel, hervorgerufen durch die Reflexion des Sonnenlichtes, ist bei einem hoch reflektierenden Segel groß genug, diese Methode ins Auge zu fassen. Die erzielbare Beschleunigung des Objektes ist proportional zur Segelfläche und umgekehrt proportional zu seiner Masse. Zu beachten ist jedoch, dass sie mit dem Abstand zur Sonne quadratisch abnimmt. Solarsegel sollten also grundsätzlich möglichst groß, möglichst leicht und hoch reflektierend sein. Für große Objekte oder in Sonnenferne stellen sie keine Alternative dar. Entfaltbare Sonnensegel werden derzeit für den Antrieb von interplanetaren Weltraumsonden entwickelt und erprobt [12]. Auch diese Methode ist ungefährlich und erscheint vergleichsweise einfach. Die Himmelskörper rotieren jedoch, was eine adäquate Befestigung nahezu unmöglich macht.

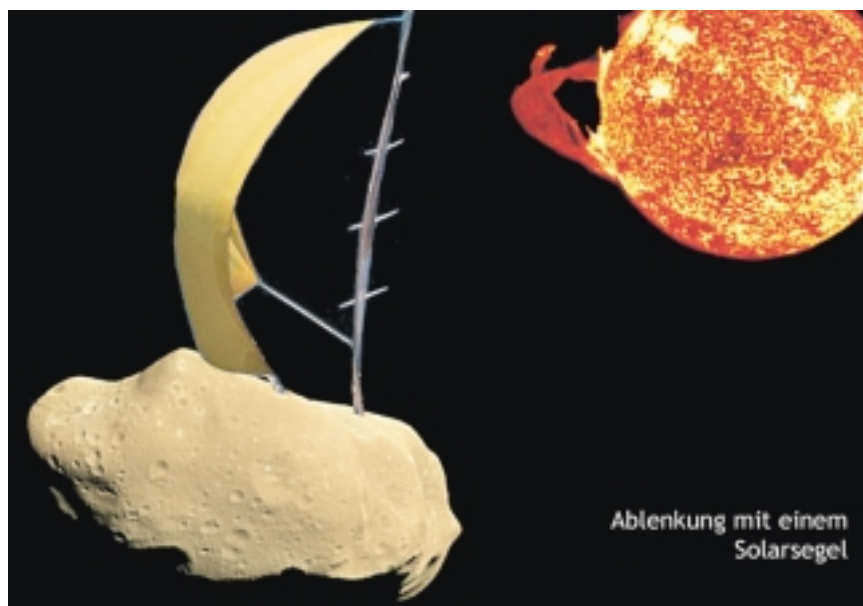


Abb. 31: Ablenkung mit einem Solarsegel, künstlerische Impression.

reitet, müssten Zuständigkeiten klären, Finanzmittel bereitstellen und geeignete Technologien einsatzbereit machen. Dass uns die hierfür erforderliche Zeit im Ernstfall bleibt, ist unwahrscheinlich.

## Erforschung der Objekte

Grundsätzlich ist es für den Erfolg der Abwehrmaßnahme und zur Minimierung des dafür erforderlichen Aufwandes von entscheidender Bedeutung, das Objekt eingehend zu erforschen.

### Was müssen wir eigentlich über die Objekte wissen?

Für eine erfolgreiche und effiziente Abwehr sind unabhängig von der Strategie vor allem die Kenntnis der Bahndaten des Objektes, seine Form, seine Masse, die Schwerpunktlage aber auch seine Rotationsfrequenz und die Lage der Rotationsachse wichtig. Zur Bestimmung des Schwerpunktes muss man die Zusammensetzung und Dichteverteilung kennen. Für viele der Abwehrmöglichkeiten ist es darüber hinaus von großer Bedeutung, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen und die Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere ihre optischen Eigenschaften zu kennen (Abb. 32).

### Was wissen wir überhaupt über diese Objekte? Wie können wir uns die benötigte Datenbasis beschaffen?

Selbst für schon bekannte Objekte ist eine frühzeitige genaue Bahnvorhersage schwierig, da ihre Masse relativ gering ist und sie daher im Vorbeiflug an der Sonne, an Planeten oder ihren Monden und an anderen Planetoiden schon in großer Distanz stark abgelenkt werden. In Sonnennähe kommen dann bei Kometen Bahn- und Masseänderung aufgrund von Sublimation und Jetbildung erschwerend hinzu. Hierdurch verändern sich auch fast alle anderen interessanten Größen. Unregelmäßige Form und Oberflächenbeschaffenheit der Himmelskörper führt in der Beobachtung zu Lichtschwankungen, aus denen man die Rotationsfrequenz und bei großen Objekten, die uns nahe kommen, auch die Lage der Rotationsachse ermittelt kann. Aus solchen Beobachtungen weiß man, dass die Rotationsperiode der meisten Objekte zwischen drei und 17 Stunden liegt. Aus der Unter-

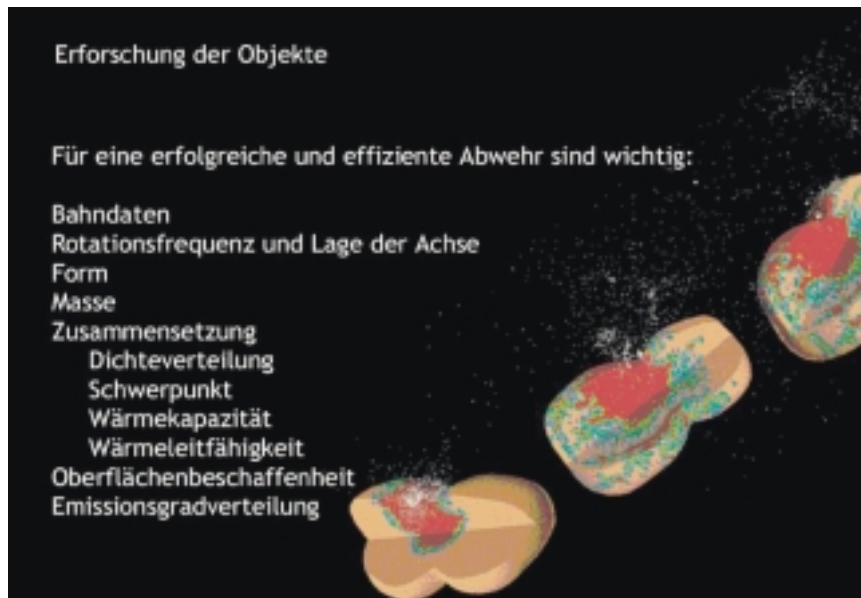


Abb. 32: Erforderliche Datenbasis zur erfolgreichen Abwehr.

suchung der Strahlung kann auf die Oberflächenbeschaffenheit und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse durch die Erforschung von Meteoriten auf ihre Zusammensetzung geschlossen werden. Dies erlaubt eine Klassifizierung der Objekte. Doch solange wir keine Sonde hinschicken, ist uns nur ihre Oberfläche direkt zugänglich. Für viele der möglichen Abwehrmaßnahmen ist jedoch die Kenntnis der Zusammensetzung und Dichteverteilung im Innern für den Erfolg von ausschlaggebender Bedeutung. Vor diesem Hintergrund sind alle derzeit in Ausführung, in Vorbereitung und in Planung befindlichen Weltraummissionen zur Erforschung von Asteroiden und Kometen hoch interessant.

Zur detaillierten Untersuchung der Objekte ist die Entwicklung und Erprobung automatischer Landung, Verankerung, Probenentnahme und Rückführung voranzutreiben. Wertvolle Erfahrungen wurden bereits während des Apollo-Programmes gesammelt. Erkenntnisse über das Innere der Kometen und Asteroiden können von den Missionen Deep Impact (Abb. 24) und Rosetta (Abb. 33) erhofft werden.

### Ist es möglich, auf einem Planetoiden zu landen und Material zur Erde zurückzubringen?

Die Materialrückführung von einem Planetoiden ist aus verschiedenen Gründen auch heute noch ein schwieriges Unterfangen. Es sind hierfür Technologien erforderlich, die in den letzten Jahren erar-

beitet wurden und erst teilweise erprobt werden konnten. Um das Jahr 1985 hatte man in Europa ehrgeizige Pläne zur Erforschung von Asteroiden und Kometen. Man wollte mit einer einzigen Mission auf einem Planetoiden landen und Material zur Erde zurückbringen. Geplant war damals, die NASA hierfür als Partner zu gewinnen. Dies ist zunächst auch gelungen und führte zu einer gemeinsamen Studie. Die Mission wurde nach dem Rosettastein am Nil benannt, da man sich von dieser Mission, wie ehemals bei der Entzifferung der Hieroglyphen, einen Durchbruch erhoffte, dieses Mal allerdings in der Frage nach dem Ursprung des Lebens auf unserer Erde. In der Missionsbegründung der 80er Jahre spielten die Erkenntnisse, die man durch solche Missionen im Hinblick auf eine Katastrophenabwehr gewinnen kann, keinerlei Rolle. Dieser Aspekt wird in der mehr als

Ein nicht zu unterschätzendes Problem stellt auch die Landung dar, da ein Asteroid nur eine relativ geringe Schwerkraft aufweist. Das Manövrieren wurde mit der Near-Shoemaker Sonde erfolgreich erprobt, die Erprobung einer Landung sollte ursprünglich dann mit Rosetta, einer ESA-Mission, erstmals erfolgen. Aber mit Near-Shoemaker konnte am Ende der Mission ein erster kontrollierter Absturz durchgeführt werden, den die Sonde, die dafür nicht ausgelegt war, überlebte (Abb. 35).

Da die Signalübertragung zur Erde sehr lang ist, muss der ganze Betrieb solcher Missionen automatisch ablaufen.

Dies stellt zusätzlich eine große Herausforderung dar und soll bei der Rosetta-Mission der ESA eingehend erprobt werden. Rosetta wird voraussichtlich im März 2004 auf den Weg zu seinem Erkundungsobjekt, dem Kometen 67/Churyumov-Gerasimenko, gebracht werden, den es zehn Jahre später erreicht (Abb. 33). Besonderes Augenmerk bei dieser Mission liegt in der Untersuchung der Aktivität des Kometen.

Eine weitere große Herausforderung ist die Entwicklung einer Rückkehrkapsel, da diese vom Asteroiden kommend mit sehr hoher Geschwindigkeit in die Erdatmosphäre eintritt. Diesen Teil erprobt die

60 Seiten umfassenden Studie nicht einmal erwähnt. Programmatische Schwierigkeiten der ESA und finanzielle Probleme der NASA haben 1992 dazu geführt, diesen Plan abzuspecken. Man entschloss sich, getrennte Wege zu gehen und kleine Schritte zu machen. Rosetta wurde so zu einer Kometen-Erkundungsmission ohne Materialrückführung, die von der ESA alleine durchgeführt wird und auf europäischer Technologie basiert (Abb. 33).

Der Antriebsbedarf für eine Landung und anschließende Rückkehr zur Erde ist generell so hoch, dass nur bei Mitführung äußerst geringer Nutzlast, sparsamster Instrumentierung und sehr günstiger Konstellation sowie langer Missionsdauer eine derartige Mission mit chemischen Triebwerken durchgeführt werden könnte. In der Regel ist eine solche Mission nur mit elektrischen Antrieben durchzuführen. Hierbei kommt es weniger auf die Missionsdauer als auf die Treibstoffersparnis zugunsten der Nutzlast an. Daher sind für diese Missionen Ionentriebwerke zu bevorzugen, da mit ihnen die für das Erzielen einer möglichst großen Nutzlastmasse optimale Treibstoffausstoßgeschwindigkeit erreicht werden kann. Für ein Ionentriebwerk mit Xenon als Treibstoff sind für diese Missionen ca. 30 km/s optimal. Ein für solche Missionen geeigneter Ionenantrieb wurde zusammen mit autonomer Navigation bei der „Deep Space Mission 1“ der NASA zwischen 1998 und 2001 erfolgreich erprobt (Abb. 34). Der Schub von Ionentriebwerken ist jedoch relativ gering und wächst nur proportional zum Schubstrahlquerschnitt an, daraus resultieren lange Schubzeiten. Auch am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart (IRS) wird im Rahmen des nationalen Ionentriebwerk-Programmes RIT (Radiofrequenz-Ionen-Triebwerk) an der Verbesserung der Lebensdauer solcher Triebwerke gearbeitet.

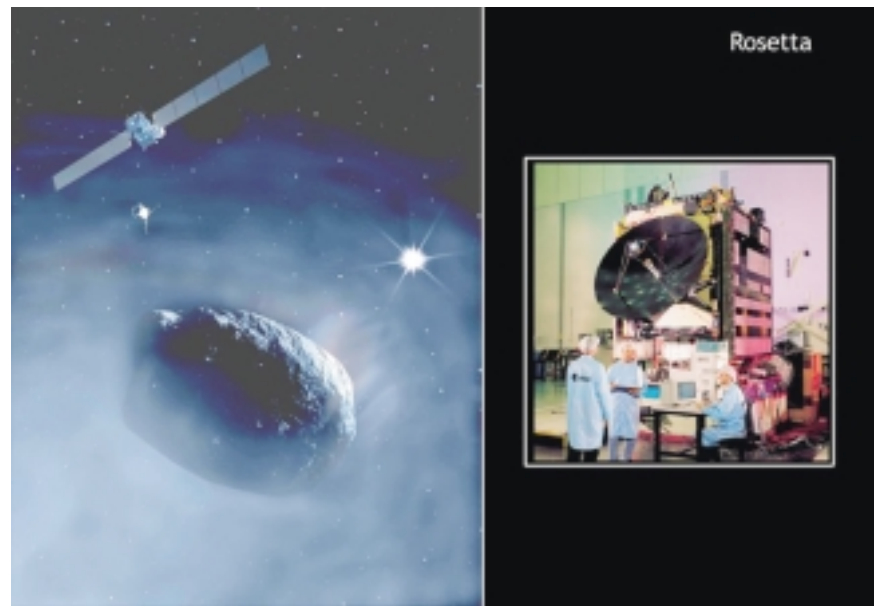


Abb. 33: Rosetta-Mission der ESA zur Erkundung des Kometen 67/Churyumov-Gerasimenko.

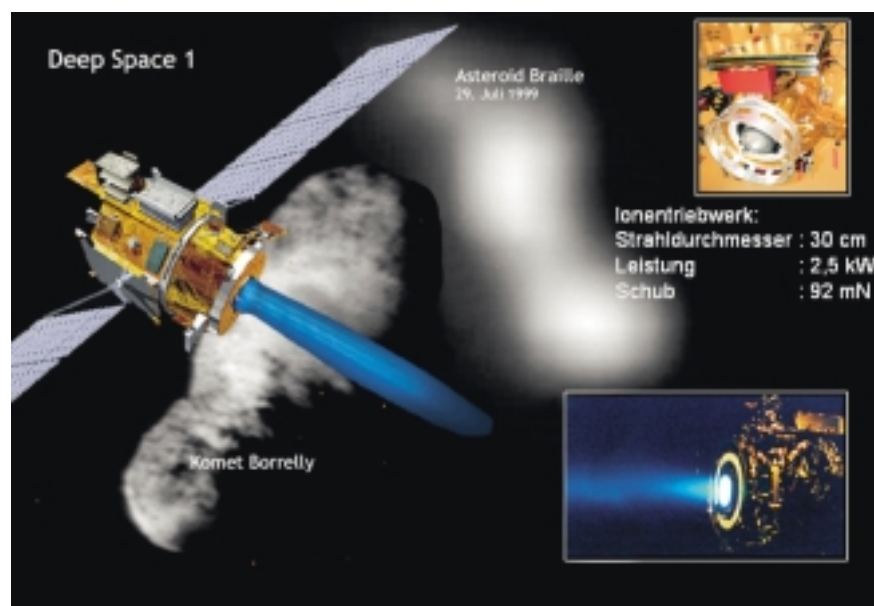


Abb. 34: Deep Space Mission 1 der NASA zur Erprobung eines Ionenantriebes.

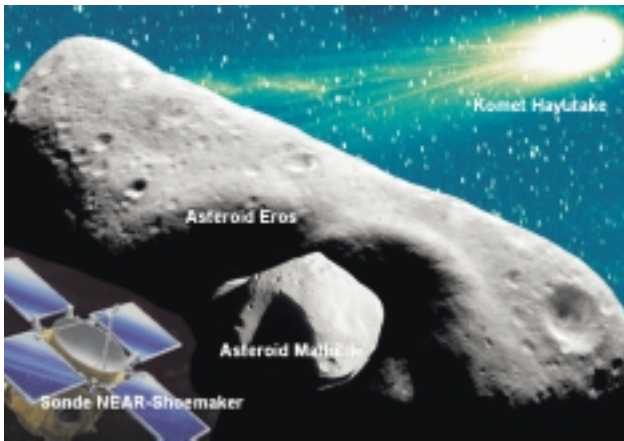


Abb. 35: Near-Shoemaker Mission der NASA zur Erkundung der Asteroiden Eros und Mathilde und des Kometen Hayutake.

NASA nun bei der Mission „Stardust“ (Abb. 36). Diese Sonde ist seit Februar 1999 unterwegs und wird im Januar 2004 den Schweif des Kometen Wild-2 erreichen. Sie wird Schweifmaterial einsammeln und bereits 2006 zur Erde zurückbringen. Die 45 kg schwere Rückkehrkapsel wird mit einer Geschwindigkeit von 12,5 km/s in die Atmosphäre der Erde eintreten und muss mit einem effizienten Hitzeschild vor dem Verglühen geschützt werden.

In Japan ist man sehr viel ehrgeiziger als in Europa oder in den USA. Das japanische Institut für Weltraumwissenschaft (ISAS) hat dieses Jahr eine Sonde, MUSES-C, gestartet, die 2005 auf dem Asteroiden 1989 SF36 landen, Material aufnehmen und 2007 zur Erde zurückkehren wird (Abb. 37). Sie haben hierfür alle erforderlichen Technologien eigenständig entwickelt und werden sie bei dieser Mission erproben. Die Untersuchung und Qualifikation von Hitzeschildmaterialien ist ein wichtiger Forschungsschwerpunkt am IRS (Abb. 38),[13]. Das IRS hat einzigartige Testanlagen aufgebaut, in denen man die sehr hohe Wärmelast beim Wiedereintritt der Sonde erzeugen kann. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des IRS haben an der Qualifikation des Hitzeschuttschildes mitgewirkt und sehen der Mission daher mit besonderem Interesse entgegen.

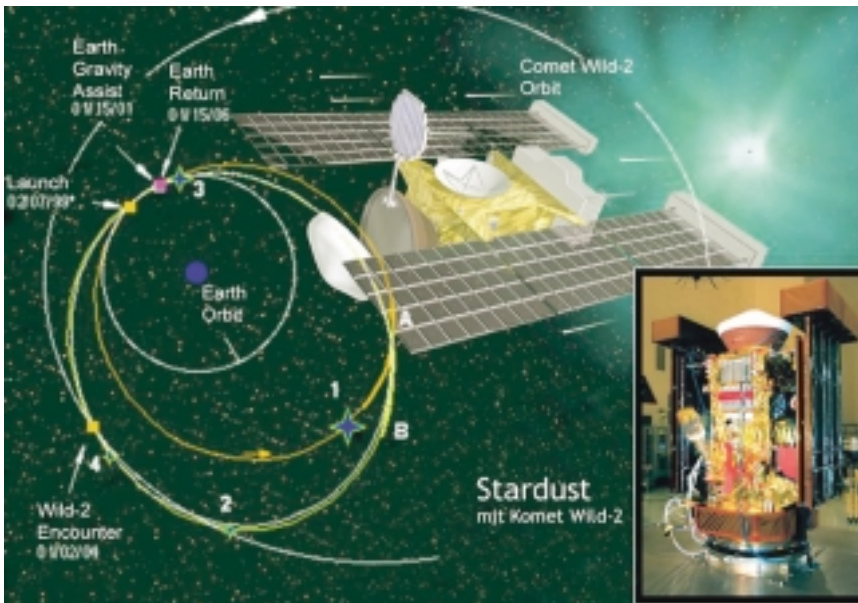


Abb. 36: Stardust Mission der NASA zum Kometen Wild-2.

### Entwicklungsbedarf

*Welche Technologien sind verfügbar, welche müssen entwickelt und erprobt werden?*

Als verfügbare Technologien zur Abwehr von Objekten können derzeit nur chemische Großraketen und Nuklearwaffen angesehen werden, sie müssten jedoch für den Einsatz im Weltall weiter entwickelt werden. Die Entwicklung von Hochleistungslasern inklusive adaptiver Optiken erscheint sinnvoll. Vor diesem Hintergrund sind auch die Planungen großer Energieversorgungsanlagen für den Weltall von Bedeutung.



Abb. 37: Japanische Asteroiden-Rückkehrmission Muses-C.



Jede der angesprochenen Abwehrmöglichkeiten wirft jedoch für einen Einsatz im Weltall ein großes Transportproblem auf. Die bereits erprobten großen Trägerraketen sind in Abbildung 39 dargestellt. Man erkennt, dass ihre Transportkapazitäten in einen niedrigen Erdborbit (LEO: „Low Earth Orbit“) beziehungsweise einen geostationären Orbit (GEO) für diesen Einsatz relativ gering sind. Die Startkapazitäten erlauben darüber hinaus derzeit nur wenige Raketenstarts im Jahr. Die größte Rakete, die Mondrakete Saturn 5, wurde das letzte Mal vor 30 Jahren eingesetzt. Der Transportbedarf für Stationierung, Aufbau, Betrieb und Wartung von Früherkennungs- und Abwehrsystem im Weltall macht daher zunächst die Entwicklung neuer, weitgehend wiederverwendbarer Transportsysteme in einen erdnahen Orbit erforderlich. Das Institut für Raumfahrtsysteme (IRS) der Universität Stuttgart beteiligt sich auf vielfältige Weise an nationalen, europäischen, amerikanischen und japanischen Entwicklungsprogrammen und Versuchsträgern für wiederverwendbare Raumtransportsysteme von der Erde in den erdnahen Weltraum (Abb. 40), [14].

Die Erfahrungen beim Aufbau und Betrieb der großen internationalen Raumstation sind im Hinblick auf Früherkennungs- und Abwehrsysteme äußerst wertvoll. Ohne Menschen im Weltraum sind große Stationen, die über lange Zeiten betriebsbereit gehalten werden müssen, kaum denkbar.

Für den Transport der Erkundungsbeziehungsweise Abwehreinrichtungen beispielsweise zum Mond oder einer anderen Stationierungsposition müssen wiederverwendbare Transferfahrzeuge entwickelt und Treibstoffressourcen im Weltall erschlossen werden. Der Einsatz schubstarker Plasmaantriebe erscheint sinnvoll. Bereits 1999 wurde von der US-Airforce ein thermisches Lichtbogentriebwerk im Hinblick auf den Einsatz zum Antrieb eines Orbittransferfahrzeugs erfolgreich erprobt (Abb. 41), [15]. Am IRS wird seit Jahrzehnten, teilweise in Zusammenarbeit mit den USA, an der Entwicklung schubstarker Plasmaantriebe gearbeitet (Abb. 42), [17].



Abb. 38: Qualifikation von Hitzeschutzschilden am IRS.



Abb. 39: Raumtransportsysteme zum Transport von der Erde in den Weltraum.

Wird sich Europa an der Sicherung unserer Zukunft beteiligen?

Bislang waren die interplanetaren Missionen der ESA ausschließlich durch wissenschaftliche Neugier motiviert. Dies hat sich nun geändert. Im Juli 2002 beauftragte die ESA sechs Forschergruppen mit der Erarbeitung von Vorstudien für Weltraummissionen zum Schutz unserer Erde, deren Ergebnisse im Januar 2003 vorgestellt wurden.

Als wichtiges Ziel wird die möglichst frühe Erfassung auch kleinerer Objekte angesehen, die sich uns vom inneren Sonnensystem aus nähern. Es handelt

sich dabei zumeist um Asteroiden, die den Aten-Asteroiden zugeordnet werden. Von der Erde aus ist eine Überwachung dieser Region kaum möglich, da schwach leuchtende Objekte wegen der Sonnenstrahlung kaum detektierbar sind. In zwei der Studien wird daher vorgeschlagen, Teleskope zur Überwachung im inneren Sonnensystem zu platzieren. Die Studie „Earthgard 1“ zieht in Erwägung, das Teleskop als zusätzliche Nutzlast der ESA-Sonde BepiColombo, die zum Merkur aufbrechen wird, mitzugeben. In der Studie „EUNEOS“ soll eine eigene Sonde die Sonne auf einer Bahn knapp innerhalb der Venusbahn umrunden. Man könnte

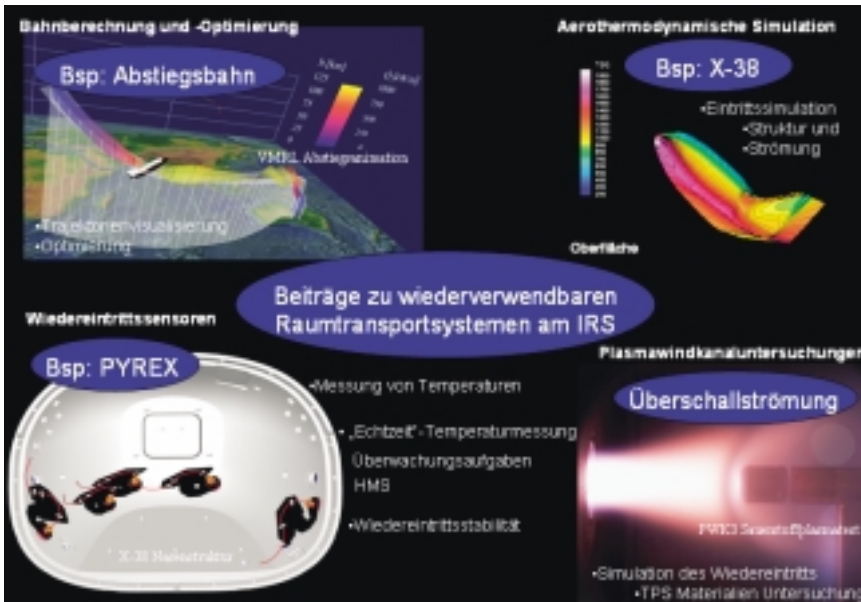


Abb. 40: Forschung an wiederverwendbaren Raumtransportsystemen am IRS.

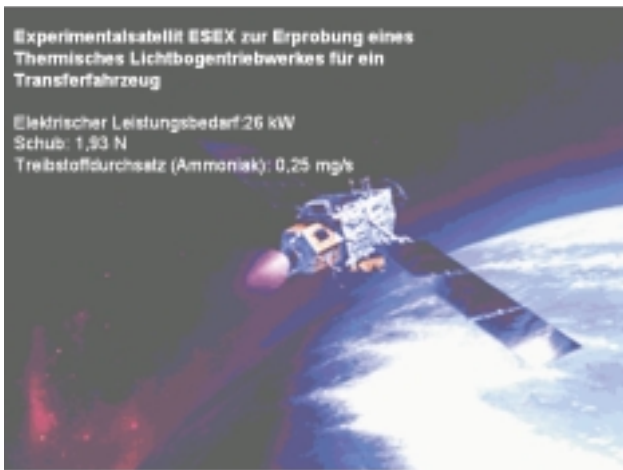


Abb. 41: Erprobungsmission eines Plasmaantriebes für ein Transferfahrzeug.



Abb. 42: Elektrische Raumfahrtantriebe für Transferfahrzeuge am IRS.

so innerhalb von fünf Jahren 80 Prozent aller Objekte größer 300 Meter innerhalb der Erdbahn erfassen und von der Sonde und der Erde aus verfolgen, um ihre Bahnen und somit das Gefahrenpotential genau zu bestimmen.

Weitere drei Studien befassen sich mit der Erforschung bekannter Objekte, um das Basiswissen über erdnahe Objekte zu erweitern. Zum einen wird vorgeschlagen, im Weltall ein System zur Fernerkundung zu installieren, mit dem die Größe, Zusammensetzung und Oberflächenbeschaffenheit möglichst vieler Objekte ermittelt werden können. In der Studie „SIMONE“ wird eine Flotte von fünf kostengünstigen, mit Ionentriebwerken angetriebenen Mikrosatelliten erwogen, mit denen fünf ganz verschiedenartige Objekte aus der Nähe erkundet werden sollen. Mit der Sonde „ISHTAR“ beabsichtigt man, neben der möglichst genauen Bestimmung der Masse, Dichte und Oberflächenbeschaffenheit insbesondere mittels Radartomographie das Innere eines Objektes zu erforschen.

Einen Einstieg in die Entwicklung von Technologien zur Abwehr gefährlicher Körper hat die Studie „Don Quijote“ zum Ziel. Es soll untersucht werden, ob man einen Asteroiden durch Beschuss ablenken kann, ohne ihn zu zerstören. Hierzu wird vorgeschlagen, die Raumfahrzeuge Sancho und Hidalgo zu einem Asteroiden zu schicken. Hidalgo soll als Projektil mit hoher Geschwindigkeit von rund zehn Kilometern pro Sekunde auf einen kleinen, ca. 500 Meter durchmessenden Asteroiden aufprallen und damit seine Bahn leicht verändern. Sancho soll vor der Attacke seismographische Sensoren abwerfen und während des Ereignisses das Zielobjekt umkreisen und das Ereignis aus sicherer Distanz beobachten (Abb. 43). Zusätzlich könnte auch ausgeworfenes Material eingesammelt und zur Erde zurückgebracht werden. Alle sechs Vorstudien sind hoch interessant. Die ESA arbeitet daraus derzeit einen Vorschlag für die nächste europäische Ministerratskonferenz zur Weltraumforschung.

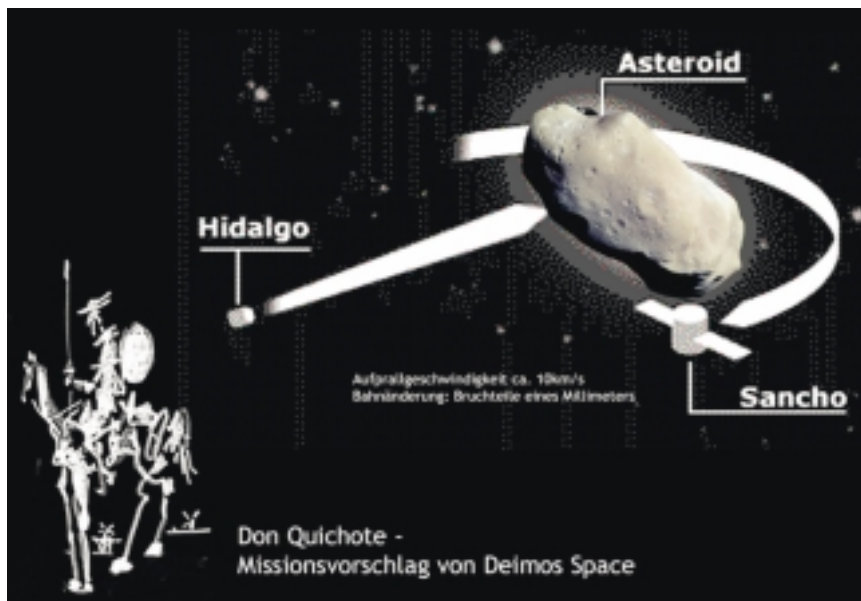


Abb. 43: Missionsvorschlag „Don Quijote“ zur Erprobung der Objektabwehr mittels Geschoss.

- [8] D. Mazanek, C. Roithmair und J. Antol, „Comet/Asteroid Protection System (CAPS): A Space-Based System Concept for Revolutionizing Earth Protection and Utilization of Near-Earth Objects“, IAC-2-IAA 13.4/Q.5.1.01, 53rd International Astronautical Congress, Houston, Texas, 2002
- [9] H.J. Melosh und I.V. Nemchinov, „Solar Asteroid Diversion“, NATURE, Vol. 366, S. 21-22, 1993
- [10] L. Völker, „Konzeption von Solarspiegelsystemen zur Bahnänderung von NEOs“, Institut für Luft- und Raumfahrt, TU Dresden, Diplomarbeit, ILR-RSN-G-02-01, 2002
- [11] J.N. Spitale, „Asteroid Hazard Mitigation Using the Yarkovsky Effekt“, Science Vol. 269, S. 77, April 2002
- [12] W. Seboldt und B. Dachwald, „Solar sails for near-term advanced scientific deep space missions“, Proceedings of the 8th International Workshop on Combustion and Propulsion, Pozzuoli, Italy, 2002
- [13] M. Auweter-Kurtz, „Plasma Source Development for the Qualifikation of Thermal Protection Materials for Atmospheric Entry Vehicles at IRS“, VACUUM 65, S. 247-261, 2002
- [14] „Basics and Technologies for Two-Stage to Orbit Vehicles“, Final Report of the Collaborative Research Centers 253, 255 and 259, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH, Dezember 2003
- [15] D.R. Bromaghin et al, „Electric Propulsion Space Experiments (ESEX) - On-Orbit Results“, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 39, No. 2, März-April 2002, S. 177-186
- [17] M. Auweter-Kurtz und H. Kurtz, „High Power and High Thrust Density Electric Propulsion for In-Space Transportation“, Proceedings of the Tenth International Workshop on Combustion and Propulsion, La Spezia, Italy, 2003

## Zusammenfassung

Wenn wir uns darüber einig sind, dass unser blauer Planet schützenswert ist, dann sollten wir heute die Initiative dazu ergreifen!

Wir sind in der Lage, in wenigen Jahrzehnten ein effektives Schutzsystem aufzubauen.

Dazu bedarf es

- der weiteren Erkundung erdnahester Asteroiden und Kometen
- des Aufbaus eines Frühwarnsystems im Weltraum
- der Entwicklung eines Abwehrsystems und seiner Stationierung
- leistungsfähiger, kostengünstiger, wiederverwendbarer Transportsysteme in erdnahe Umlaufbahnen
- Transferfahrzeuge zum Transport großer Lasten im Weltall und hierfür der Entwicklung neuer schubstarker Antriebe und der Erschließung von Treibstofflagern außerhalb der Erde.

Diese Aufgabe muss als Herausforderung aller Erdenbürger verstanden werden, zu der alle entwickelten Staaten beitragen können und müssen. Nicht aus

Gründen des Finanzbedarfs, der durchaus von den USA alleine gestemmt werden könnte, sondern aus Sicherheitsgründen muss sich Europa an dieser Aufgabe, vor allem an der Entwicklung und Erprobung sensibler Technologien, angemessen beteiligen.

## Literatur

- [1] L.W.Alvarez, W. Alvarez, F. Asaro und H.V.Michel, „Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary boundary extinction“, Science 208, S. 1108, 1980
- [2] Glen Penfield and Antonio Camargo, Veröffentlichung in Sky and Telescope Magazine, S. 249, März 1982
- [3] Kenneth R. Lang und Charles W. Whitney, „Planeten-Wanderer im All“, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1993
- [4] P. Brown, R.E. Spalding, D.O. ReVelle, E. Tagliaferri und S.P.Worden, „The flux of small near-Earth objects colliding with Earth“, NATURE, Vol. 420, 21 November 2002
- [5] J. Campbell, L. Smalley und D. Boccio, „Laser Prevention of Earth Impact Disasters“, IAF-01-C.2.09, 53rd International Astronautical Congress, Houston, Texas, 2002
- [6] Christian Grizner, „Kometen und Asteroiden – Bedrohung aus dem All?“, Aviatic Verlag GmbH, Oberhachingen, 1999. (Dieses Buch gibt einen guten populärwissenschaftlichen Überblick zum Thema)
- [7] Abteilung Geographie im Institut für Kulturwissenschaften und ihrer Didaktik, Universität Kiel



**Prof. Dr.-Ing.  
Monika Auweter-Kurtz**

---

Die gebürtige Stuttgarterin studierte von 1969 bis 1975 Physik an der Universität Stuttgart, wurde dort 1985 promoviert, habilitierte sich im Mai 1991 mit einer Arbeit über „Lichtbogenantriebe für Weltraumaufgaben“ und übernahm im Juni 1992 die Professur für „Raumtransporttechnologie“ am Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart. Neben ihrer Tätigkeit als Gutachterin für Fachzeitschriften und Mitgliedschaften beziehungsweise ehrenamtlichen Tätigkeiten in nationalen und internationalen Vereinigungen war Monika Auweter-Kurtz bis 1997 Frauenbeauftragte der Universität Stuttgart und von Oktober 1996 bis Dezember 1998 Landessprecherin der Frauenbeauftragten der Universitäten in Baden-Württemberg. Seit März 2000 ist sie wissenschaftliche Direktorin der National Space Development Agency of Japan mit beratender Tätigkeit im Bereich Raumtransportfahrzeuge. Im September 2002 übernahm Prof. Monika Auweter-Kurtz die Leitung der Abteilung „Raumtransporttechnologie“ am Institut für Raumfahrtssysteme.