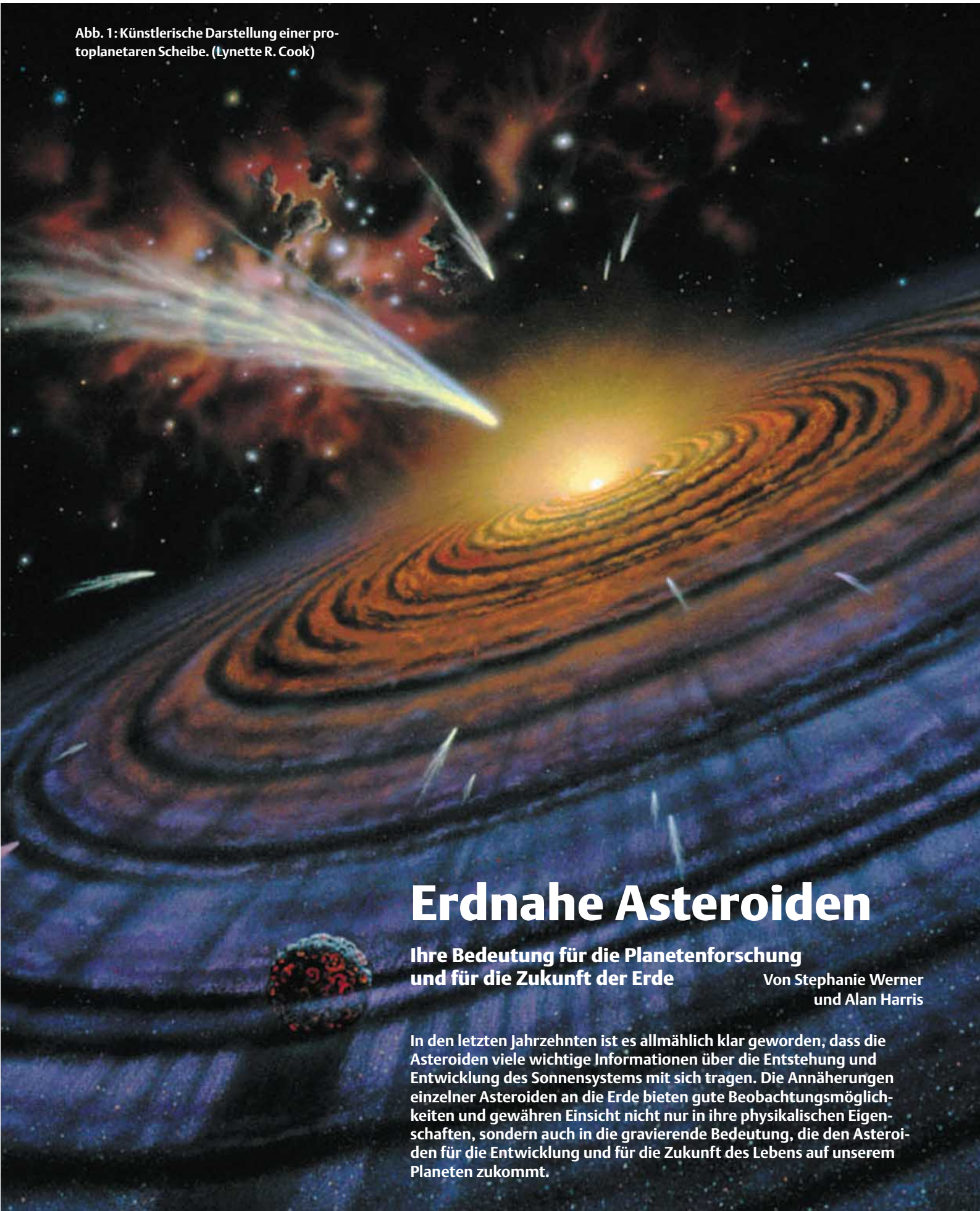


Abb. 1: Künstlerische Darstellung einer protoplanetaren Scheibe. (Lynette R. Cook)



# Erdnahe Asteroiden

**Ihre Bedeutung für die Planetenforschung  
und für die Zukunft der Erde**

Von Stephanie Werner  
und Alan Harris

In den letzten Jahrzehnten ist es allmählich klar geworden, dass die Asteroiden viele wichtige Informationen über die Entstehung und Entwicklung des Sonnensystems mit sich tragen. Die Annäherungen einzelner Asteroiden an die Erde bieten gute Beobachtungsmöglichkeiten und gewähren Einsicht nicht nur in ihre physikalischen Eigenschaften, sondern auch in die gravierende Bedeutung, die den Asteroiden für die Entwicklung und für die Zukunft des Lebens auf unserem Planeten zukommt.



## Bausteine der Planeten

Nach unseren derzeitigen Kenntnissen ist die Sonne gemeinsam mit ihren Planeten aus dem Gas und Staub einer Molekülwolke entstanden. Beim Kollaps der Wolke vor 4,6 Milliarden Jahren hat sich um die junge Sonne eine protoplanetare Scheibe gebildet. Aus der sich abkühlenden Scheibe kondensierten kleine feste Teilchen, die miteinander zusammengestoßen sind und dabei immer größere Körper, bis hin zu kilometergroßen »Planetesimalen«, gebildet haben (Abb. 1). Diese Planetesimale kann man als Bausteine der Planeten bezeichnen. Durch ihre Schwerkraft zogen sie weiteres Gas, Staub und größere Körper an und wuchsen so zu den heutigen Planeten heran. Die im heutigen Sonnensystem befindlichen Asteroiden und Kometen sind Überreste dieses Prozesses.

## Vom Asteroidenhauptgürtel zur Erde

Als NEAS (aus dem Englischen: »Near Earth Asteroids«) werden Objekte bezeichnet, deren Bahnen sie so nahe an die Erde heranführen, dass sie möglicherweise auf der Erde einschlagen können. Die meisten von ihnen haben ihren Ursprung im Asteroidenhauptgürtel, in einem Bereich zwischen Mars und Jupiter, für den nach der Titius-Bode-Regel die Existenz eines weiteren Planeten gefordert wurde. Der erste und größte Asteroid im Hauptgürtel wurde 1801 von Giuseppe Piazzi entdeckt und nach Ceres, der Göttin der Fruchtbarkeit und Schutzpatronin Siziliens, benannt. Sein Durchmesser beträgt 935 km, er läuft in einem Abstand von 2,77 AE um die Sonne. Neben (1) Ceres gibt es im Hauptgürtel zwischen 2,15 AE und 3,3 AE mehr als 10 000 weitere bekannte Kleinplaneten, deren Umlaufbahnen unter dem gravitativen Einfluss Jupiters stehen.

Im Hauptgürtel gibt es bestimmte Zonen, die Kommensurabilitäts- oder Kirkwood-Lücken, in denen sich nahezu keine Körper aufhalten: Die Umlaufbahnen innerhalb dieser Zonen stehen in bestimmten Umlaufresonanzen zu Jupiter. Ein auf einer solchen Bahn umlaufender Körper wird an gleicher Stelle immer wieder gravitativ gestört – das führt zu einer allmählichen Vergrößerung der Exzentrizität seiner Umlaufbahn und zu einer Überlagerung mit den Bahnen des Mars und der Erde. Eine solche Bahn bleibt nicht lange stabil. Bruchstücke von Kollisionen zwischen Hauptgürtelasteroiden können in solche Umlaufbahnen geschleudert werden und etwa eine Million Jahre später als erdnahe Asteroiden auftauchen.

Bis heute sind mehr als 900 NEAS bekannt. Ihre Daten sind im Minor Planet Center am Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge, USA, katalogisiert und öffentlich zugänglich. Die meisten der bekannten NEAS sind in den letzten Jahren durch gezielte und automatisierte, von amerikanischen Forschern betriebene Suchprogramme wie Spacewatch, NEAT (Near Earth Asteroid Tracking) und vor allem LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research), entdeckt worden. Bis April 1999 hat auch ein deutsch-französisches Suchprogramm namens »OCA-DLR Asteroid Survey« (ODAS) fünf NEAS entdeckt. ODAS, ein gemeinsames Projekt der Sternwarte der Côte d'Azur und des DLR, musste kürzlich wegen mangelnder finanzieller Unterstützung leider eingestellt werden. Heutzutage werden in amerikanischen Suchprogrammen fast täglich neue NEAS entdeckt. Unter diesen Objekten gibt es schätzungsweise 700 mit Durchmessern größer als 1 km (Rabinowitz et al. [2000]). Die genaue Zahl, die insbesondere für die Abschätzung des Einschlagsrisikos für die Erde große Bedeutung hat, hängt vom Zusammenhang zwischen absoluter Helligkeit und Größe der Objekte ab. Dieser setzt die Kenntnis der Oberflächenreflektivität der Objekte, d. h. ihrer Albedo, voraus. Im allgemeinen sind solche Eigenschaften von NEAS nur grob bekannt. Moderne Teleskopbeobachtungen der NEAS im optischen und infraroten Spektralbereich wie auch Radarbeobachtungen und Weltraummissionen liefern immer mehr Informationen über ihre physikalischen Eigenschaften, wie Albedo- und Größenverteilung, Zusammensetzung, Oberflächenbeschaffenheit und Struktur.

Die durchschnittliche Lebensdauer eines NEA, bis er in die Sonne fällt, auf einem Planeten einschlägt oder durch einen nahen Vorbeiflug an Jupiter aus dem Sonnensystem heraus geschleudert wird, beträgt nur 10 bis 20 Millionen Jahre. Da diese Zeit viel kürzer ist als die Geschichte des Sonnensystems, muss es eine ständige Quelle zur Nachlieferung dieser Objekte geben. Neben Kollisionen im Hauptgürtel bilden auch kurzperiodische Kometen eine mögliche Quelle, da ein Komet, der sein Eis und Gas durch viele Perihelppassagen verloren hat, genau wie ein dunkler staubiger Asteroid aussehen sollte. Bis heute sind keine Beweise dafür erbracht worden, dass »tote Kometen« tatsächlich einen signifikanten Teil der gesamten NEA-Population darstellen. Einige NEAS jedoch haben Bahnen, die wie manche Kometenbahnen mit bekannten Meteorströmen korrelieren. Ein Beispiel ist der NEA (3200) Phaethon, dessen Bahn der des Geminiden-Meteorstroms sehr ähnlich ist (Abb. 2 – das Bild wurde mit dem interaktiven Web-Programm Solar System Live von John Walker

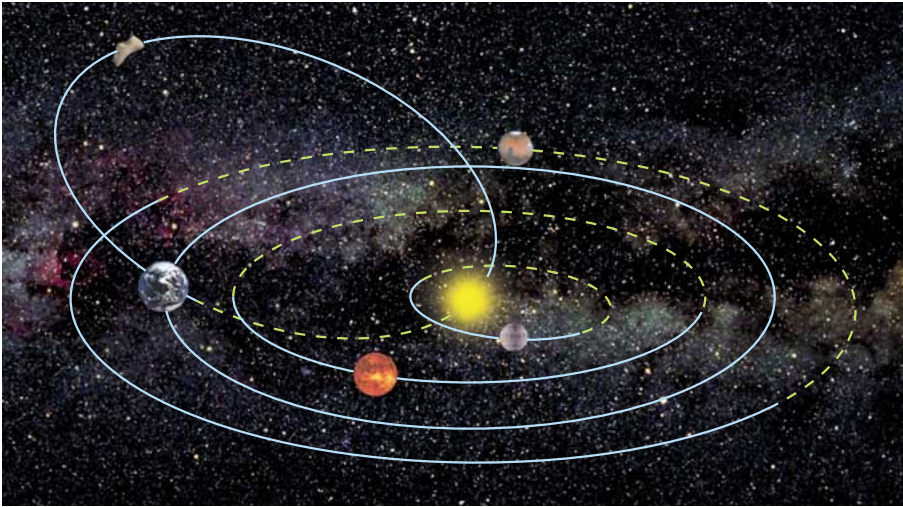


Abb. 2: Die Umlaufbahn des NEA (3200) Phaethon. Die relativen Positionen des Asteroiden und der Planeten gelten für den 13. Dezember 1999, als die Erde durch den Meteorstrom der Geminiden lief, bzw. die Bahn von Phaethon passierte. Die Teile der Umlaufbahnen unter der Ebene der Ekliptik sind grün gezeichnet.

erzeugt: <http://www.fourmilab.ch/solar/>). Untersuchungen solcher NEAS könnten wichtige Hinweise über das Endstadium und das Schicksal von Kometen ergeben.

### Physikalische Eigenschaften der NEAS

Asteroiden sind in den letzten Jahren interessante Zielobjekte für Raumfahrtmissionen geworden. Die amerikanische Mission NEAR (Near-Earth Asteroid Rendezvous) ist seit Februar 1996 unterwegs und ihr Rendezvous mit dem NEA (433) Eros hat, nach einem Fehlversuch im letzten Jahr, am 14. Februar 2000 glücklich stattgefunden. Seitdem befindet sich NEAR in einer Umlaufbahn um Eros. Zur Zeit werden spektakuläre Bilder der kraterreichen Oberfläche von Eros zur Erde gefunkt (Abb. 3). NEAR soll ein Jahr lang von seiner Umlaufbahn aus die physikalischen Eigenschaften von Eros erkunden. Eine zweite amerikanische Mission, »Deep Space 1« (DS-1), ist am 29. Juli 1999 an dem NEA (9969) Braille (1992 KD) in einem Abstand von nur 27 km vorbeigeflogen. Infrarotspektren, die DS-1 von Braille aufgenommen hat, zeigen, dass Braille eine ähnliche Zusammensetzung besitzt wie der große Hauptgürtelasteroid Vesta – was auf einen gemeinsamen Ursprung dieser zwei Asteroiden hinweist. Es ist möglich, dass der 1 bis 2 km große Braille ein Trümmerstück aus einer Kollision zwischen Vesta (oder einem gemeinsamen Mutterobjekt) und einem anderen Kleinplaneten ist. Es sind weitere kleine Asteroiden bekannt, die möglicherweise auch zur Vesta-Familie gehören. Dieses Beispiel zeigt, welche Hinweise zur inneren Struktur großer Asteroi-

den die NEAS geben können. Weltraummissionen können sehr genaue und detaillierte Informationen über Asteroiden liefern, jedoch nur für wenige ausgewählte Objekte. Für eine Analyse der Eigenschaften der Gesamtpopulation der NEAS muss auf Fernerkundung mit erdgebundenen Teleskopen zurückgegriffen werden:

Eine sehr aufschlussreiche Technik der Erkundung von NEAS ist die Radarastromie. Das Frequenzspektrum der von einem Asteroiden reflektierten Radarstrahlung ist durch den Dopplereffekt bestimmt und hängt von der Größe, der Form und der Rotationsgeschwindigkeit des Asteroiden ab. Jeder Punkt auf der Oberfläche des

Asteroiden ist unmittelbar mit einer bestimmten Laufzeit und einer bestimmten Dopplerfrequenz des reflektierten Signals verbunden. Durch raffinierte Zeitkodierung des gesendeten Signals und mittels eines komplexen Rechenverfahrens ist es möglich, aus der Kombination von sogenannten Delay-Doppler-Informationen im Radarecho eine bildliche Darstellung des Asteroiden zu konstruieren. Auf diese Weise konnten Steve Ostro am Jet Propulsion Laboratory und Kollegen von mehreren NEAS spektakuläre Radarabbildungen erzeugen. Die Stärke dieser Technik liegt in der extrem hohen räumlichen Auflösung, die im Falle von NEAS 10 bis 20 m beträgt (als Beispiel siehe Abb. 4). Radarbeobachtungen können sehr genaue Bahnparameter eines Objektes, sowie Informationen über seine Größe, Form, Oberflächenbeschaffenheit, Zusammensetzung und Rotation liefern. Ein großer Nachteil der Radarastromie besteht jedoch darin, dass man einen mehrere Hundert Kilowatt starken Sender benötigt. Da das Signal-Rausch-Verhältnis von Radarbeobachtungen mit der vierten Potenz der Entfernung abnimmt, sind detaillierte Beobachtungen nur von den wenigen Objekten möglich, die der Erde sehr nahe kommen. Zur Zeit werden solche Beobachtungen 2–3 mal pro Jahr von amerikanischen Wissenschaftlern durchgeführt. Eine Studie zu einem möglichen deutschen Radarastromie-Projekt zur Untersuchung von NEAS wurde vor einigen Jahren vom DLR-Institut für Planetenerkundung durchgeführt (Harris et al., 1997). Für eine deutschsprachige populärwissenschaftliche Darstellung der Radarastromie siehe Lemme und Harris (1998).



Abb. 3: Die erste Farbserie des erdnahen Asteroiden (433) Eros aus der Umlaufbahn von NEAR am 28. Februar 2000. Der große Krater in der Mitte des Asteroiden hat einen Durchmesser von etwa 6 km. Die Länge des Asteroiden beträgt etwa 33 km. (NASA/JHU APL).

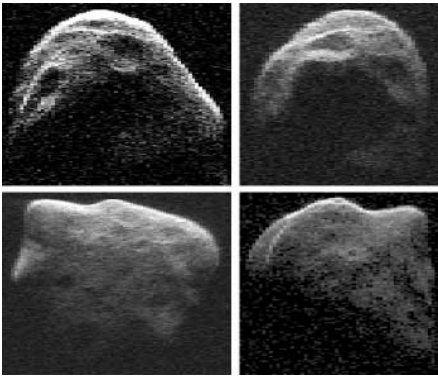


Abb. 4: Delay-Doppler-Radaraufnahmen des am 13. Mai 1999 von LINEAR entdeckten erdnahen Asteroiden 1999 JM 8, gewonnen zwischen dem 28. Juli und dem 5. August 1999 mit der 70-m-Antenne der NASA in Goldstone, Kalifornien und der 305-m-Antenne in Arecibo, Puerto Rico. Dieser kartoffelförmige Asteroid hat einen Durchmesser von ungefähr 3,5 km. Die beste räumliche Auflösung in diesen Bildern beträgt 15 m/Pixel. (Lance Benner, JPL).

Die Rotation eines nichtsphärischen Asteroiden führt zu Variationen des an seiner Oberfläche reflektierten Sonnenlichts. Beobachtungen solcher Änderungen der Helligkeit über mehrere Nächte hinweg ergeben Lichtkurven, die genaue Aussagen über die Rotationsgeschwindigkeit des Asteroiden ermöglichen (als Beispiel siehe Abb. 5: Die obere Lichtkurve beschreibt die Rotation des Objekts. Die mittlere Kurve zeigt einen Ausschnitt aus der Lichtkurve, in dem das reflektierte Licht vermutlich durch ein umkreisendes Begleitobjekt abgeschwächt wird. Die untere Kurve zeigt die Differenz zwischen den beiden anderen Kurven). Aus Messungen der Lichtkurven über längere Zeitintervalle kann man oft weitere Informationen ableiten, zum Beispiel über die Form des Objekts und die Orientierung der Rotationsachse. Eine Voraussetzung dafür ist, dass der Asteroid lange genug beobachtbar bleibt. Die Helligkeit eines erdnahen Asteroiden nimmt stark zu, wenn er sich der Erde nähert. Das Objekt bleibt aber typischerweise nur einige Wochen hell genug für detaillierte Beobachtungen, bevor es wieder für mehrere Jahre verschwindet.

Ein wichtiges Ergebnis aus der Studie der Rotationsgeschwindigkeiten erdnaher Asteroiden ist die Feststellung, dass es sehr wenige Objekte mit Perioden kürzer als zwei Stunden gibt. Der vermutliche Grund dafür ist die Struktur der NEAs. Ein Objekt, das ursprünglich ein fester Gesteinsblock war und im weiteren Verlauf seines Daseins vielleicht mehrmals mit anderen Körpern kollidierte, könnte zu einem zerrütteten Trümmerhaufen verarbeitet worden sein, d.h. zu einer allein durch die Schwerkraft

zusammengehaltenen Anhäufung von Gesteinsbrocken (»rubble pile«). Solche Objekte können Rotationsperioden, die kürzer sind als ein paar Stunden, nicht überleben – sie würden auseinanderfliegen. Daher wird vermutet, dass viele (aber nicht alle) NEAs aus solchen Anhäufungen bestehen, was für eventuelle Versuche, einen die Erde bedrohenden NEA abzuwenden, erhebliche Konsequenzen hätte: Es ist viel schwieriger, eine Lawine von einer Straße zu räumen, als einen Felsbrocken!

Die Lichtkurven einiger NEAs zeigen periodische Unregelmäßigkeiten, die mit den einfachen Schwankungen der Helligkeit eines rotierenden Objekts nicht zu erklären sind. Ein Beispiel ist wiederum (3671) Dionysus (Abb. 5), der 1997 von Wissenschaftlern des DLR-Instituts für Planetenerkundung in Berlin-Adlershof beobachtet wurde. Messungen der Lichtkurve wurden im optischen Bereich mit dem Bochumer 60-cm-Teleskop auf La Silla, Chile durchgeführt. Gleichzeitig wurde mit dem 3,8-m-UK-Infrarot-Teleskop (UKIRT) auf Hawaii seine thermische Strahlung vermessen. Einige Tage zuvor waren auch mit dem Infrared Space Observatory (ISO) im Rahmen eines Beobachtungsprogramms von Harris und Kollegen Messungen an (3671) Dionysus durchgeführt worden. Die optischen Lichtkurven zeigten ungewöhnliche plötzliche Abschwächungen des reflektierten Sonnenlichtes, die sich in Zeitabständen von genau 1,155 Tagen wiederholten. Mit hoher Wahrscheinlichkeit handelt es sich um einen Satelliten (einen Mond), der den

Hauptkörper umkreist. Bis heute steht nur für (45) Eugenia und (243) Ida, zwei Asteroiden im Hauptgürtel, auf Grund von direkten Abbildungen fest, dass sie Monde besitzen. Eugenia und Ida haben Durchmesser von 214 km bzw. 50 km. Aus den mit UKIRT und ISO gewonnenen Messungen der thermischen Strahlung ergibt sich für Dionysus ein Durchmesser von nur einem Kilometer! Wie kann es dazu kommen, dass ein so kleiner Asteroid einen Mond besitzt? Eine mögliche Erklärung ist, dass es sich in diesem Fall um einen »rubble pile« handelt. Während eines nahen Vorbeifluges an der Erde hat sich durch die gravitative Störung vielleicht ein Bruchstück vom Trümmerhaufen gelöst, ist aber zunächst an den Resthaufen gravitativ gebunden geblieben.

Die Entdeckung, dass auch kleine Asteroiden von Monden begleitet sein können, ist zwar faszinierend, aber es ist keine große Überraschung. Zahlreiche Kraterdupletts auf der Erde und auf dem Mond belegen die Tatsache, dass in der Vergangenheit viele Doppelasteroiden auf diese Körper eingeschlagen sind.

Spektroskopische Beobachtungen im optischen und im nahen Infrarotbereich geben wichtige Einblicke in die Mineralogie der Asteroiden. Anhand der Eigenschaften ihrer Spektren können die Asteroiden verschiedenen taxonomischen Klassen zugeordnet werden (Tabelle 1). Bis heute sind fast alle taxonomischen Typen, die im Asteroidengürtel vorhanden sind, mittels Reflexionsspektroskopie auch unter den NEAs identifiziert worden. Vermutlich bestehen

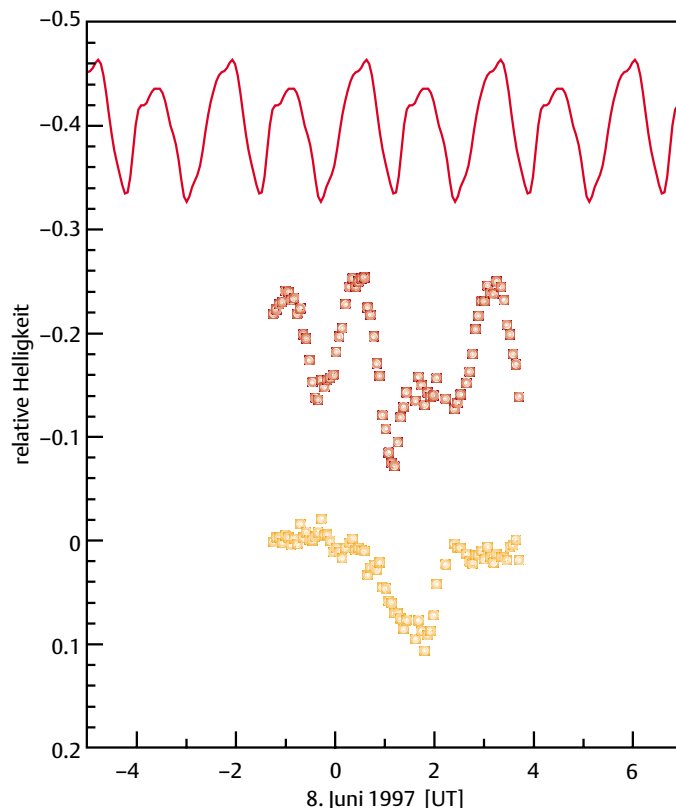


Abb. 5: Optische Daten des NEA (3671) Dionysus, aufgenommen von S. Mottola und G. Hahn im Juni 1997 mit dem Bochumer 60-cm-Teleskop auf La Silla, Chile. (S. Mottola, DLR)

Tabelle 1: Taxonomische Klassen der meisten bekannten NEAS.

Klasse	Mineralogie	Typischer Albedobereich
C	Kohlenstoffreich; organische Moleküle; Silikate	0.04–0.1
S	Eisen- und magnesiumhaltige Silikate	0.1 –0.3
M	Metallhaltig; Eisen, Nickel	0.12–0.25
V	Vesta-ähnlich: eisen- und magnesiumhaltige Silikate	0.2 –0.45
E	Magnesiumhaltige Silikate mit Eisen und Nickel	0.4 –0.60

weitaus die meisten NEAS aus silikatreicher, steinartiger und metallhaltiger Materie (Klasse S). Einige haben sehr dunkle Oberflächen, was auf Mäntel aus kohlenstoffhaltiger organischer Materie hindeutet (Klasse C); auch die Kerne alter Kometen würden vermutlich in diese Kategorie gehören. Es gibt auch NEAS, die anscheinend hauptsächlich aus Metallen wie Eisen und Nickel bestehen und eine verhältnismäßig hohe Reflektivität aufweisen (Klasse M). Diese Asteroiden stammen vermutlich aus dem Kern eines durch Kollisionen zerstörten differenzierten Objektes. Die optische Albedo  $p_V$  eines Asteroiden erlaubt Rückschlüsse auf seine mineralogische Zusammensetzung und ist mit dem taxonomischen Typ eng verbunden. Dunkle Objekte der Klassen C haben z.B. eine Albedo  $p_V < 0.1$  (was bedeutet, dass weniger als 10 % des einfallenden Lichtes reflektiert werden). Die Albedowerte der Objekte der Klasse S liegen dagegen zwischen 0.1 und 0.3. Die Bestimmung der Albedo ist eine wichtige Voraussetzung für die zuverlässige taxonomische Klassifikation eines Asteroiden und kann zusammen mit den Bahnparametern Hinweise auf seine Herkunft im Sonnensystem geben.

### Die Bestimmung von Größe und Albedo

Außer aus den obengenannten wissenschaftlichen Gründen ist die Bestimmung der Albedo- und Größenverteilung der NEAS auch für die Schätzung des Risikos, das diese Objekte für die Erde darstellen, von großer Bedeutung. Die photometrisch gemessene reflektierte Sonnenstrahlung eines Asteroiden hängt von seiner heliozentrischen und geozentrischen Entfernung ( $r$ ,  $d$ ), dem Durchmesser und der Albedo des Objekts ab. Wenn  $r$  und  $d$  durch himmelsmechanische Berechnungen bekannt sind, lässt sich durch optische Beobachtungen allein nur das Produkt aus Querschnitt und Albedo ableiten, d.h. Durchmesser im Quadrat mal Albedo. Die beiden Parameter Durchmesser und Albedo können einzeln bestimmt werden, wenn zusätzliche Beobachtungen der Wärmestrahlung des Objekts im Infraroten vorhanden sind. Da ein im Optischen helles Objekt (d.h. ein Objekt mit einer hohen optischen Albedo) verhält-

nismäßig kalt ist und daher weniger Wärmestrahlung emittiert als ein dunkles Objekt, kann man aus Messungen der Infrarotstrahlung mit Hilfe eines physikalischen Modells ein zweites, unabhängiges Verhältnis zwischen Durchmesser und Albedo ableiten. Auf diesem Verfahren beruhen fast alle bisher bestimmten Werte der Größe und der Albedo von Asteroiden.

Das gebräuchliche »Standard Thermal Model« (STM), das ursprünglich für Studien an den großen Hauptgürtelasteroiden entwickelt wurde, soll für Asteroiden gelten, die sehr langsam rotieren sowie eine geringe thermische Trägheit und eine sphärische Form haben. Die Temperatur auf der Modelloberfläche hat ein Maximum an dem Punkt, der direkt unter der Sonne liegt, und nimmt zum Terminator hin bis auf null ab. Auf der sonnenabgewandten Seite wird die Temperatur auf 0K gesetzt, so dass dort keine Wärmestrahlung entsteht. Obwohl dieses Modell eher unrealistisch ist, kann es oft erfolgreich eingesetzt werden, wie ein Vergleich der Ergebnisse mit Radarbeobachtungen und anderen Messverfahren zeigt. In den 80er Jahren wurde aufgrund dieser Methode ein umfassender Katalog der Durchmesser und der Albedowerte von etwa 2000 größtenteils dem Hauptgürtel zugeordneten Asteroiden erstellt, die mit dem Infrared Astronomical Satellite (IRAS) beobachtet worden waren.

In einem zweiten einfachen Modell ist die Temperaturverteilung vom Längengrad auf dem Objekt unabhängig: Die Temperatur hat ihr Maximum am Äquator und fällt zu den Polen hin auf null ab. Dieses Modell (Fast Rotating Model, FRM) wird für Asteroiden angewendet, die schnell rotieren und/oder eine hohe thermische Trägheit besitzen. Die Wärmeabstrahlung der sonnenabgewandten Seite wird in diesem Fall berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Rotationsachse senkrecht zur Ebene Sonne-Erde-Asteroid steht.

In den letzten zehn Jahren ist klar geworden, dass weder das STM noch das FRM zuverlässige Werte für Albedo und Durchmesser der NEAS liefert. Für viele NEAS gibt das STM Albedowerte, die nach der spektroskopischen Klassifikation zu hoch sind. Das FRM liefert in manchen Fällen realistischere Albedowerte, in anderen Fällen jedoch Werte, die offensichtlich zu niedrig sind. Ein we-

sentlicher Grund ist vermutlich die Größe der NEAS. Wenn die Mehrzahl dieser Objekte als Bruchstücke aus Kollisionen zwischen verhältnismäßig großen Hauptgürtelasteroiden entstanden ist, dann sind sie wahrscheinlich felsige Körper, die keine staubige Oberfläche haben wie der Mond oder große Asteroiden. Im Gegensatz zu NEAS können große Körper durch ihre verhältnismäßig starke Schwerkraft Staub und kleine Bruchstücke, die bei den vielen Einschlägen entstanden sind, halten. Da die thermische Trägheit von Staub gering ist, haben die Hauptgürtelasteroiden vielleicht deswegen andere thermische Eigenschaften als NEAS.

Es gibt detaillierte und genaue Modelle (»thermophysical models«), die ursprünglich für besonders gut beobachtete Hauptgürtelasteroiden entwickelt wurden und genaue Angaben der Lage der Rotationsachse, der thermischen Trägheit, der Form des Objekts und der Oberflächenrauigkeit benötigen, welche für NEAS jedoch normalerweise unbekannt sind.

Ein weiteres Problem ist der Mangel an Beobachtungsdaten für NEAS im thermischen Infrarot. Im Vergleich zu den bekannten Hauptgürtelasteroiden sind NEAS kleine Objekte, die von der Erde aus meist nur für kurze Zeit (Tage oder Wochen) während eines nahen Vorbeiflugs beobachtbar sind. Außerdem sind Messungen in diesem Spektralbereich von der Erdatmosphäre stark beeinflusst und daher oft von unzureichender Qualität. Deswegen beziehen sich die meisten veröffentlichten Ergebnisse auf Beobachtungen bei nur einer Wellenlänge (normalerweise 10  $\mu\text{m}$ ). In solchen Fällen ist es unmöglich, für einen NEA das optimale Thermalmodell zu finden und zuverlässige Werte für die physikalischen Parameter zu berechnen.

Angesichts dieser Probleme ist am DLR-Institut für Planetenerkundung ein modifiziertes STM (Near-Earth Asteroid Thermal Model, NEATM) entwickelt worden. Dieses Modell liefert Ergebnisse, welche die Infrarotdaten besser beschreiben. Bis jetzt konnten damit die Albedowerte und Durchmesser von mehr als 15 NEAS neu berechnet werden (siehe z.B. Harris 1998; Harris et al. 1998). Durch das Anpassen des Modells an den beobachteten Spektralverlauf wird ein Modellparameter  $\eta$  optimiert. Durch diesen Parameter wird eine Korrektur der angenommenen Temperaturverteilung auf der Oberfläche vorgenommen. Das bedeutet, dass das NEATM, im Gegensatz zum STM und FRM, die thermische Trägheit, Rotationsgeschwindigkeit und Oberflächenbeschaffenheit eines Asteroiden implizit berücksichtigt. In manchen Fällen, besonders wenn Beobachtungen bei großen Phasenwinkeln durchgeführt wurden, sind die mit dem NEATM berechneten Albedo-Wer-

te um einen Faktor 2 niedriger als beim STM und stehen im Einklang mit den auf Grund der Spektralklassifikation erwarteten Werten. Wenn die Rotationsgeschwindigkeit bekannt ist, kann mit Hilfe des Parameters  $\eta$  Information über die thermische Trägheit des Objekts abgeleitet werden. Für eine bestimmte Rotationsgeschwindigkeit nimmt  $\eta$  mit der thermischen Trägheit zu.

Abb. 6 demonstriert an Hand von Beobachtungen mit dem Infrarotteleskop UKIRT auf Hawaii, welche Genauigkeit mit dem NEATM erreichbar ist. Für den erdnahen Asteroiden (433) Eros (Abb. 6a) ergibt sich ein mittlerer Durchmesser von 23.6 km, in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus früheren Radar- und anderen Untersuchungen, darunter die ersten Ergebnisse der NEAR-Mission. Der Fehler beträgt maximal 12%. Die Infrarotdaten deuten auf eine thermische Trägheit von Eros hin, die nicht mehr als das dreifache jener des Mondes beträgt. Das heißt, dass die Oberfläche von Eros wahrscheinlich teils staubig, teils felsig ist.

Infrarotspektrophotometrische Daten des NEA (3200) Phaethon (Green et al, 1985), die mit NEATM neu analysiert wurden (Abb. 6b), zeigen, dass die Temperaturen auf der sonnenzugewandten Seite des Objekts viel niedriger sind als die vom STM erwarteten Werte. Mit Berücksichtigung der 3.6-stündigen Rotationsperiode heißt

das, dass das Objekt eine verhältnismäßig hohe thermische Trägheit hat – angesichts der zu erwartenden Eigenschaften toter Kometen, wie einer porösen staubigen Oberfläche, spricht das gegen die Vermutung, dass Phaethon ein toter Komet ist (siehe oben). Die aus diesen Daten berechnete Albedo beträgt 0.11, für einen Kometenkern etwas höher als erwartet. Der resultierende Durchmesser beträgt 5.1 km. Trotzdem bleibt die rätselhafte Verbindung dieses Objekts mit dem Meteorstrom der Geminiden! Vielleicht können nicht nur Kometen, sondern auch Asteroiden, z. B. nach einer Kollision, eine Spur von Staub und Trümmern hinterlassen.

### Das Problem der Größenverteilung

Die Größenverteilung der erdnahen Asteroiden lässt sich nicht genau angeben, da die Population unvollständig bekannt ist. Mit zunehmender Entfernung von der Erde werden immer weniger NEAS mit immer geringeren absoluten Helligkeiten von Suchprogrammen erfasst. Die absolute Helligkeit ist sowohl vom Durchmesser als auch von der Albedo des jeweiligen Körpers abhängig. Will man die Größenverteilung der erdnahen Asteroiden abschätzen, so muss man die Einschränkungen der Such-

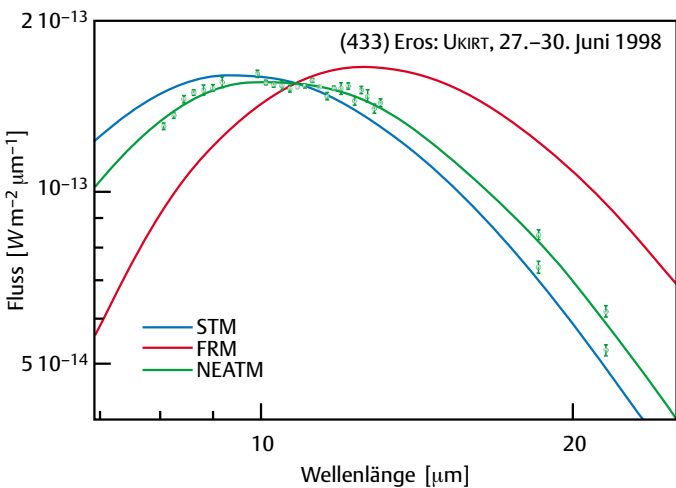
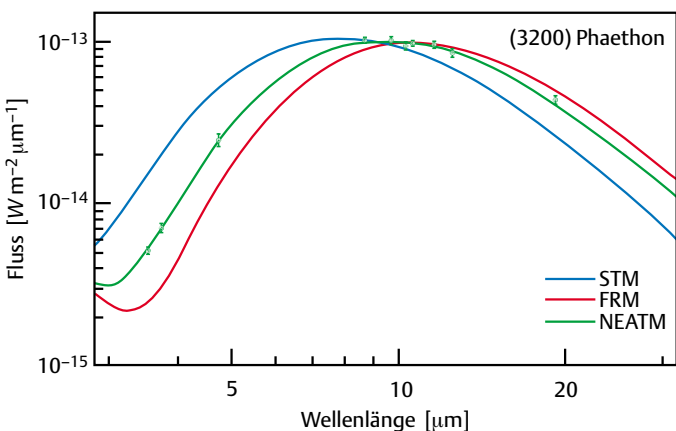


Abb. 6: a) Berechnete thermische Spektren von (433) Eros, angepasst an Infrarotdaten: Modellberechnungen mit dem STM, dem FRM und dem NEATM. Das NEATM mit  $\eta = 1.07$  beschreibt den Verlauf des gemessenen thermischen Kontinuums am besten.



b) Berechnete thermische Spektren zu Infrarotdaten von (3200) Phaethon (Green et al., 1985). Das NEATM mit  $\eta = 1.6$  beschreibt den Verlauf des thermischen Kontinuums am besten.

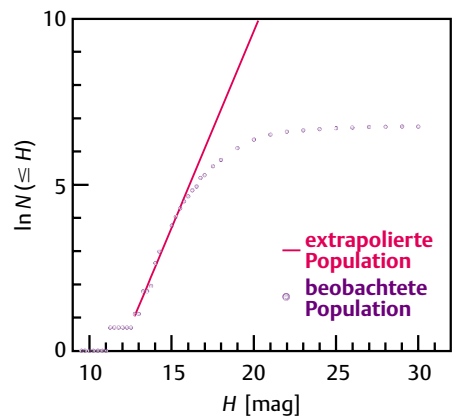


Abb. 7: Die Verteilung der kumulativen Anzahl  $N$  der NEAS als Funktion der absoluten Helligkeit  $H$ . Die blauen Punkte zeigen den Verlauf für die bekannte Population. Die rote Linie ist eine Extrapolation über den Bereich hinaus, in dem die Population vollständig bekannt sein sollte ( $H < 15$ ), und stellt eine Schätzung der Verteilung der Gesamtpopulation dar (siehe Poveda et al. 1999).

programme wie auch die Verteilung der Albedowerte berücksichtigen.

Derzeit sind mehr als 900 erdnahe Asteroiden bekannt. Ihre kumulative Verteilung als Funktion der absoluten Helligkeit  $H$  ist in Abb. 7 dargestellt ( $H$  ist die Helligkeit eines Asteroiden in Magnituden, wenn er in Opposition steht, bezogen auf die Entfernung von 1 AE zur Erde und zur Sonne).  $N$  ist die Anzahl der Asteroiden, die heller als  $H$  sind. Es wird davon ausgegangen, dass die hellsten Objekte ( $H < 15$  mag) alle entdeckt sind. Eine Extrapolation dieses Teils der kumulativen Verteilungskurve führt zu einer Schätzung der Gesamtpopulation der NEAS (rote Linie in Abb. 7). Da der Verlauf der Verteilungskurve der Gesamtpopulation noch sehr unsicher ist, kann diese einfache Methode nur zu groben Schätzungen führen. Aus der Verteilungskurve der Gesamtpopulation lässt sich ihre Größenverteilung über den Ausdruck  $D = 1329 p_V^{-1/2} 10^{-H/5} \text{ mag km}$  ableiten (siehe Harris, 1998), wobei  $p_V$  die optische Albedo ist. Dabei trifft man auf ein entscheidendes Problem, nämlich, dass die resultierende Anzahl  $N(D)$  der Asteroiden mit Durchmesser größer als  $D$  sehr stark von der angenommenen Albedo abhängt. Da die Albedowerte nur von sehr wenigen NEAS bekannt sind und etwa zwischen 0.04 und 0.6 liegen können (siehe Tabelle 1), ist allein aus diesem Grund eine genaue Schätzung des Risikos, das die Gesamtpopulation der NEAS für die Erde darstellt, gegenwärtig unmöglich. So hängt es von der Albedo bzw. von der Zusammensetzung der Population der erdnahen Asteroiden ab, wieviele Objekte größer als ein Kilometer sind, welches als der Grenzdurchmesser für die globale zerstörerische Wirkung eines Einschlags gilt. Je niedriger die angenommene Al-

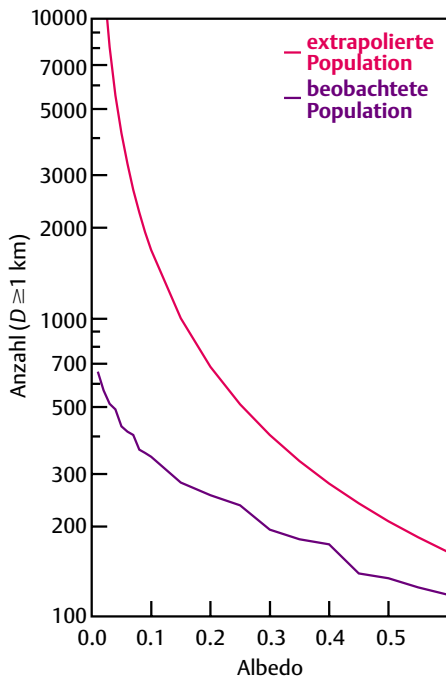


Abb. 8: Abhängigkeit der Anzahl der NEAs mit Durchmesser  $\geq 1$  km von der angenommenen Albedo. Die blaue Kurve zeigt die Häufigkeiten für die bekannte Population, die rote Linie beschreibt die gleiche Abhängigkeit für die geschätzte Gesamtpopulation.

bedo, desto mehr große Objekte gibt es. Abb. 8 zeigt diese Abhängigkeit. Wichtig ist nicht nur die richtige Zuordnung der Albedo zu einer bestimmten taxonomischen Klasse, sondern, da nicht von einer homogenen Population auszugehen ist, die relative Stärke der Klassen. So würde das Verhältnis der beiden häufigsten Klassen C und S zueinander auch auf die geschätzte Größenverteilung Einfluss haben. Eine neue Studie von Rabinowitz et al. (2000), die die Helligkeitsabhängigkeit der Entdeckungseffizienz des NEAT-Suchprogramms genau berücksichtigt, deutet auf eine Gesamtpopulation der Objekte mit Durchmessern  $>1$  km von  $700 \pm 230$  hin. Dieser Wert ist etwas kleiner als frühere Schätzungen.

### Visitenkarten von NEAs auf der Erde

Glücklicherweise ist die Erde von einer relativ dichten Atmosphäre umgeben, die sie vor den kleineren und häufigsten Objekten schützt. Abhängig von ihrer Zusammensetzung und Größe verglühen sie als Sternschnuppen oder Feuerbälle. Nur metallische Körper erreichen die Erdoberfläche auch als sehr kleine Objekte (cm-Bereich). Beispielsweise ist der etwa 1 km große Meteorokrater in Arizona von einem etwa 30 m großen Asteroiden aus Eisen und Nickel erzeugt worden. Erst ab einem Durchmesser von über 50 m haben Ge-

schosse aus dem All deutliche Auswirkungen auf die Atmosphäre und Biosphäre der Erde – zum Beispiel das Tunguska-Ereignis (siehe unten). Je größer die Objekte, desto seltener und unwahrscheinlicher ist deren Einschlag, aber um so verheerender sind die Folgen (Tabelle 2). Die Abschätzungen der Einschlagswahrscheinlichkeit basieren entweder auf Studien der NEA-Population und ihrer dynamischen Entwicklung (wie in Tabelle 2) oder auf Kraterzählungen auf der Erde, dem Mond und anderen terrestrischen Planeten (z. B. Neukum und Ivanov, 1994).

Die frühe Entstehungsgeschichte der terrestrischen Planeten dagegen ist durch die Einschläge der Planetesimale stark geprägt. In der Phase des »heavy bombardment« (vor 4.5–3.8 Milliarden Jahren) trugen diese Objekte zum Wachstum der Protoplaneten bei. Neben der Akkretion von Material ist auch Massenverlust auf Einschläge zurückzuführen, so ist die Entstehung des Mondes möglicherweise dem Einschlag eines marsgroßen Protoplaneten auf die junge Erde zu verdanken. Die Projektile verdampfen beim Einschlag weitestgehend, dabei können sowohl Wasserdampf als auch Kohlenstoffdioxid freigesetzt und eine Grundlage für die heutige Atmosphäre gelegt worden sein. Heute tritt die zerstörende Wirkung der Einschläge in den Vordergrund.

Die Größen-Häufigkeits-Verteilung der Einschlagskrater auf der Erde zeigt, wie nicht anders zu erwarten, einen ähnlichen Verlauf wie die der Asteroiden. Die Kraterverteilung auf der Erde (Abb. 9) erweckt allerdings den Eindruck, dass es sich nicht um einen statistischen Prozess handelt, doch stellt die vermeintliche Anhäufung auf den Kratonen (den ältesten Gebieten der Kontinente, bis zu 3.5 Milliarden Jahre alt) nur den kumulativen Effekt des hohen Alters dar. Dass in den ozeanischen Gebieten nahezu keine Kraterspuren gefunden wurden, liegt einerseits daran, dass dies die jüngste Oberfläche ist (maximal 200 Millionen Jahre), und andererseits daran, dass bei einer durchschnittlichen Wassertiefe von 4700 m ein relativ großes Projektil (um 5 km) kaum Spuren hinterlassen würde, die mit den an Land üblichen geophysikalischen Verfahren wie Magnetik oder Gravi-

metrie leicht zu kartieren wären. Eine Ausnahme bilden seismische Methoden, die aber großflächig angewendet zu teuer sind. Die einzigen Zeugnisse von Einschlägen in den zwei Drittel der Erdoberfläche bedeckenden ozeanischen Gebieten sind die durch impaktinduzierte Tsunamis auf den Kontinenten abgelagerten Sedimente.

Auf dem Land sind Krater morphologisch relativ einfache Strukturen. Sie zeigen sich meistens als schalenförmig umrandete Vertiefungen. Daher stammt auch ihre Bezeichnung aus dem Griechischen:  $\kappa\rho\alpha\tau\eta\rho$  (Krater), eine Schale bestimmter Form. Die spezielleren Eigenschaften variieren neben der Größe der Krater mit dem Substratmaterial, dem betroffenen Planeten und dem Alter. Die Durchmesser der Krater reichen von einigen  $0.1 \mu\text{m}$  (die in atmosphärelöser Umgebung durch kosmischen Staub erzeugten Mikrokrater) bis zu einigen 1000 km. Letztere werden durch entsprechend große Projektile hervorgerufen, die größten nennt man Multiring-Becken.

Krater werden wegen ihrer Gestalt üblicherweise in zwei Klassen eingeteilt, deren Eigenschaften direkt vom Durchmesser abhängen: einfache, die eine dem oben beschriebenen Bild entsprechende Form aufweisen, und jene, deren Struktur komplexer ist.

Einfache oder simple Krater zeichnen sich durch parabolisch geschnittene, schalenförmige Vertiefungen aus. Im Schwerfeld der Erde zeigen sie sich als Minima. Frische simple Krater sehen sich auf den verschiedenen planetaren Körpern sehr ähnlich. Bei ihnen liegt das Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser zwischen 1:5 und 1:3. Die Durchmesser reichen vom cm-Bereich bis zum Durchmesser von 90 km des Pan-Kraters auf dem Jupitersatelliten Amalthea. Bohrungen an einfachen Kratern wie dem Brent-Krater in Kanada zeigen, dass der scheinbare Kraterboden von einer Brekzienlinse unterlagert ist. Sie besteht aus brekziertem (zerschmettertem) Plattformgestein und grenzt direkt an das im wesentlichen unbewegte (autochthone), aber zerrüttete Grundgestein. Ihr Material ist, den Schmelzanteil ausgenommen, vorrangig ungeschockt. Die schockmetamorphischen Effekte beschränken sich vor allem auf den Kratergrund, dort wird ein maximaler Schockdruck von etwa 25 GPa erreicht, der mit der Tiefe abnimmt. Diese schockmetamorphischen Effekte sind auch Beweis dafür, dass es sich wirklich um Krater extraterrestrischen Ursprungs handelt und nicht um Vulkankrater.

Mit wachsendem Durchmesser, gemessen am Kraterand, erhöht sich die Komplexität des Kraterinneren. Dieser Übergang ist von der Gravitationsbeschleunigung des jeweiligen Planeten abhängig und lässt sich

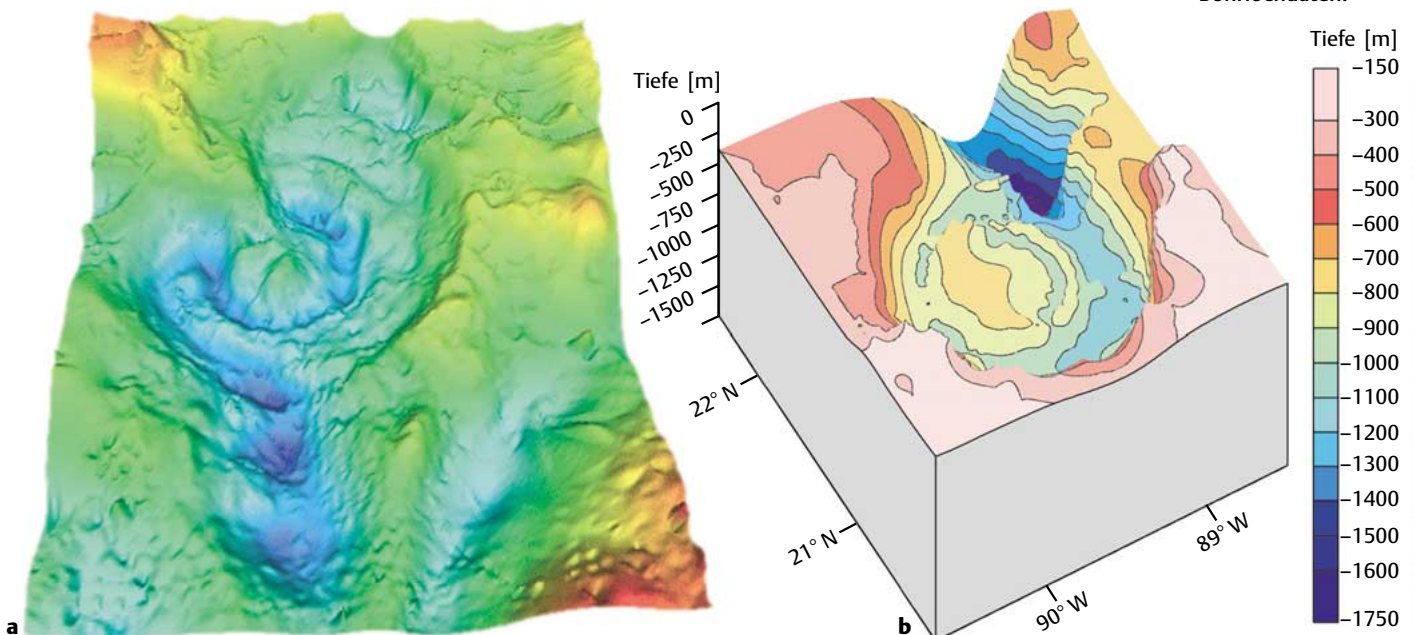
Tabelle 2: Mittlere Intervallzeit zwischen Impakteinschlägen auf die Erde. (Nach Poveda et al. 1999; Shoemaker et al. 1990)

Durchmesser $d$ des NEAs [m]	Intervall [Jahre] (für Durchmesser $\geq d$ )	Vergleichbares Ereignis
10	0.8 bis 8	Feuerball
60	100 bis 600	Tunguska
100	250 bis 1700	
1000	$7 \cdot 10^4$ bis $2 \cdot 10^5$	
10000	$2.5 \cdot 10^7$ bis $7 \cdot 10^7$	K/T-Limit



Abb. 9: Impaktkraterverteilung auf der Erdoberfläche. (Geological Survey of Canada)

Abb. 10 a) Schwereanomalie (nach Bouguer) des Chicxulub-Kraters (Buck Sharpton, LPI Houston). b) Paläotopographie des Chicxulub-Kraters, modelliert von Jörg Ebbing, FU Berlin (1999) aus der in (a) gezeigten gravimetrischen Anomalie unter Zuhilfenahme seismischer und Bohrlochdaten.



im Tiefe-Durchmesser-Diagramm, nach R. J. Pike auch Pike-Diagramm genannt, als Knickpunkt exakt bestimmen. Das Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser ist für größere Krater (abhängig von der Komplexität der inneren Struktur) bedeutend kleiner.

*Komplexe Krater* unterscheiden sich morphologisch von einfachen durch terrassierte Wände, einen ebenen Boden und entweder eine zentrale Aufwölbung (Peak) oder Peakringe, die sich eindeutig innerhalb des Kraters ausbilden. Dies steuert dazu bei, dass das Verhältnis von Tiefe zu Durchmesser geringer wird. Komplexe Krater sind die zweite Klasse einer Größen-Morphologie-Sequenz. Voraussetzung für ihre Entstehung ist ein hydrodynamisches Verhalten der Gesteinsplattform während des Impaktprozesses. Der Kratergrund wölbt sich

schon auf, bevor der Krater vollständig ausgehöhlt ist. Während sich der Kratergrund hebt, bricht die Kraterwand ein und es bilden sich die typischen Terrassen. Abhängig vom Durchmesser »friert« die zentrale Aufwölbung bei kleineren Kratern ein, bei größeren fällt sie in sich zusammen und bildet ähnlich den Wasserringen, die einfallende Tropfen hinterlassen, einen oder mehrere Ringe, die Peakringe.

Ein besonderes Beispiel für einen komplexen Krater ist der Chicxulub-Krater auf der Halbinsel Yucatan in Mexiko. Er zeichnet sich in der derzeitigen Topographie nicht ab und ist aufgrund seiner geophysikalischen Signaturen (Schwere und Magnetik) entdeckt worden. In der Bouguer-Schwereanomalie sieht man besonders schön die komplexe innere Struktur des

Kraters (Abb. 10a). Die Entdeckung dieses auf der Erde vermutlich größten Einschlagskraters (geschätzter Durchmesser zwischen 165 bis 300 km) trug zu dem in den letzten Jahren gewachsenen Interesse an NEAs bei. Dieser Krater ist die Narbe des Einschlags eines etwa 10 bis 15 km großen Objektes, der vor ca. 65 Millionen Jahren mehr als 70% aller damaligen Tier- und Pflanzenarten, darunter die Dinosaurier, ausgelöscht haben soll. Das Einschlagsgebiet des Kraters, das heutzutage halb auf dem Festland und halb im Schelfbereich des Golfs von Mexiko liegt, wurde bei seiner Entstehung von einer einige hundert Meter mächtigen Wassersäule bedeckt. Als Ergebnis einer 3D-Schweremodellierung ist ein Bild der Kreide/Tertiärgrenze (K/T-Grenze) und damit der Paläotopographie entstanden (Abb.



10b). Die Morphologie des Kraters erscheint geglättet, was auf Erosion durch an der Küste reflektierte Tsunamis (Backwash-Effekte) zurückzuführen wäre.

### Auswirkungen eines Einschlags von »Global killer«-Format

Ein weiteres Phänomen hat das öffentliche Interesse an den Asteroiden geweckt: der spektakuläre Einsturz des zerrissenen Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter im Juli 1994. Die Einzelteile des Kometen SL-9 besaßen Durchmesser von etwa 1 km, was für einen Einsturz auf die Erde die Grenzgröße zu einer globalen Katastrophe ist. Ein Objekt erzeugt, während es die Erdatmosphäre durchquert, eine Schockwelle mit Überschallgeschwindigkeit. Ist der atmosphärische Widerstand zu groß, so explodiert das Objekt (größenabhängig) vor seinem Aufprall. Eine solche Explosion kann ganze Landstriche verwüsten, die Druckwelle induziert an der Erdoberfläche noch weit entfernt messbare Erdbebenwellen. Beispiel für Einschläge dieser Art ist das Tunguska-Ereignis von 1908 in Zentral-sibirien, einer der wenigen beobachteten Einschläge, bei dem ein etwa 50 m großer Asteroid (oder Komet) in ca. 8 km Höhe explodierte. Dabei wurden Energien frei, die mit dem explosionsartigen Ausbruch des Vulkans Mt. St. Helens 1980 in den USA vergleichbar sind. Es wurde ein Gebiet zerstört, etwa doppelt so groß wie das Stadtgebiet Berlins. Ein kleiner kosmischer Körper kann eine große Stadt zerstören. Ein Einschlag im Ozean würde ein noch größeres Gebiet betreffen, da entstehende Tsunamiwellen von den Küsten bis weit ins Landesinnere vordringen.

Das beim Einschlagsprozess verdampfende Material des Projektils und der Plattform trägt wesentlich zur andauernden, globalen Katastrophenwirkung eines Impaktes bei. Die Auswirkung des Gesteinsdampfes auf das Klima, die Photosynthese und die Sichtweite hängt vor allem vom submikron-großen Staubgehalt in der Stratosphäre ab. Die Ejekta von sehr großen Einschlägen verteilen sich sofort (todbringend) auf ballistischen Bahnen über den ganzen Planeten. Die Staubwolke verbreitet sich global und verändert die optische Dicke der Atmosphäre. Folglich verringert sich die durchschnittliche Temperatur an der Erdoberfläche wegen der verminderten Sonneneinstrahlung. Die Folge ist der sogenannte Impaktwinter, der etwa sechs Monate anhält. Die Staubpartikel sind danach aus der Atmosphäre »herausgewaschen« oder einfach herabgerieselt. Neben der Temperatur verringert sich durch die geringere Sonneneinstrahlung auch die Photosyn-

these, also die Umwandlung von CO<sub>2</sub> zu O<sub>2</sub>, und damit der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre. Abgesehen davon ist schon ein großer Teil der Pflanzenwelt durch weitreichende Waldbrände zerstört. Zusätzlich ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre allein durch den Einschlag in eine eventuell karbonathaltige Plattform erhöht, was zu einem Treibhauseffekt führen könnte. Beide Auswirkungen, Impaktwinter und Treibhauseffekt, können zusammenwirkend den globalen hydrologischen Kreislauf der Erde (Verdampfen – Abregnen) anhalten und die Überlebenschancen drastisch verringern.

Zusätzlicher Schaden entsteht durch »sauren Regen«, das Herabregnen von zumindest NO-haltigem Regen (Salpetersäure), der schon beim Durchgang des Projektils durch die Atmosphäre entsteht und bei allen anderen impaktinduzierten Wechselwirkungen mit der Luft (Schmelzbildung, Gesteinsdampf u. ä.) erhöht wird. Dadurch wird sämtliches Oberflächenwasser zu einer korrosiven sauren Flüssigkeit. Das in der Atmosphäre verbleibende NO zerstört die vor UV-Strahlen schützende Ozonschicht, was erst zum Tragen kommt, wenn das Sonnenlicht von Staubpartikeln ungehindert zur Erdoberfläche gelangt (»UV-Frühling«).

Diese Auswirkungen eines Einschlages ergeben sich aus der Interpretation des an der K/T-Grenze beobachteten globalen De-sasters – sie veranschaulichen den auf dem Umweg über die Atmosphäre global wirkenden Einfluss eines zunächst lokal begrenzten Ereignisses.

Die Debatte über die Zerstörungskraft eines Asteroideneinschlages fand mit der Vermutung von L. Alvarez, dass ein Einschlag durch einen extraterrestrischen Körper das Massensterben an der K/T-Grenze verursacht haben könnte, ihre Erneuerung. Heute hätte ein K/T-ähnliches Ereignis zerstörerische Wirkung auf unsere Zivilisation und unser Ökosystem. Eine genaue Vorhersage der Konsequenzen lässt sich aus den Veränderungen an der K/T-Grenze ableiten. Fest steht, dass impaktinduziertes Massensterben in der Vergangenheit aufgetreten ist und auch in Zukunft geschehen kann. Durch das Aussterben verschiedener Arten konnten sich neue etablieren, so auch die Säugetiere und mit ihnen der Mensch. Basierend auf den Überlegungen zum K/T-Massensterben ist folgendes Szenario mit seinen Auswirkungen auf unser Ökosystem möglich:

Nach dem Abklingen der direkten Folgen, wie monatelange Dunkelheit, kontinentweite Waldbrände, saurer Regen und möglicherweise Tsunamis, beginnt das Ökosystem Erde sich zu erholen. Viele Arten sind ausgestorben, die Population der Überlebenden ist stark dezimiert. Nur diejenigen, die sich schnell an die neuen Um-

weltbedingungen anpassen konnten, vor allem kleine Fleisch- und Allesfresser, die sich von den Überresten ernähren, sowie einige Insekten und Vögel, haben Chancen zu überleben. Es wird einige Millionen Jahre dauern, bis sich das Ökosystem stabilisiert hat. Das Überleben der Menschen ist höchstens dann möglich, wenn sie ihre landwirtschaftliche Infrastruktur wieder aufbauen können. Garantiert ist es dadurch durchaus nicht.

Dies macht deutlich, dass, obwohl die Wahrscheinlichkeit eines solchen Einschlages auch in geologischen Zeitskalen gering ist, entschiedene Anstrengungen unternommen werden sollten, diese »worst-case«-Szenarien abzuwehren. Hierfür ist eine genaue Charakterisierung der erdnahen Objekte, zu denen neben den hier betrachteten Asteroiden auch die Kometen gehören, erforderlich. □

### Literatur

- Für weiterführende fachliche Informationen siehe Gehrels (1994) und für eine deutschsprachige populärwissenschaftliche Darstellung der Abwehrmöglichkeiten der NEAs siehe Gritzner (1999).
- Ebbing, J., Die Struktur des Chicxulub-Impaktkraters in Yucatan/Mexiko – Eine 3D-Schweremodellierung, Diplomarbeit, Universität Kiel, 1999.
- Gehrels, T. (Hrsg.): Hazards Due to Comets and Asteroids. Arizona Press, Tucson 1994.
- Green, S. F., Meadows, A. J., Davies, J. K.: Infrared observations of the extinct cometary candidate minor planet (3200) 1983 TB. Mon. Not. R. Astron. Soc. **214**, 29–36, 1985.
- Gritzner, C.: Kometen und Asteroiden. Aviatic Verlag GmbH, Oberhaching, 1999.
- Harris, A. W.: A thermal model for near-Earth asteroids. Icarus **131**, 291–301, 1998.
- Harris, A. W., Davies, J. K., Green, S. F.: Thermal infrared spectrophotometry of the near-Earth asteroids (2100) Ra-Shalom and 1991 EE. Icarus **135**, 441–450, 1998.
- Harris, A. W., Lemme, C., Gerdes, E. M., Wiedemann, K., Neukum, G.: First results of the DLR planetary radar initiative. Planet. Space Sci. **45**, 607–609, 1997.
- Lemme, C., Harris, A. W.: Echo aus dem All. Bild der Wissenschaft, Juni, 1998.
- Neukum, G., Ivanov, B. A.: Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data. In: Gehrels, T. (Hrsg.): Hazards Due to Comets and Asteroids. Seiten 359–416. Arizona Press, Tucson 1994.
- Poveda, A., Herrera, M. A., Garcia, J. L., Curioica, K.: The diameter distribution of Earth-crossing asteroids. Planet. Space Sci. **47**, 679–685, 1999.
- Rabinowitz, D., Helin, E., Lawrence, K., Pravdo, S.: A reduced estimate of the number of kilometer-sized near-Earth asteroids. Nature **403**, 165–166, 2000.
- Shoemaker, E. M., Wolfe, R. F., Shoemaker, C. S.: Asteroid and comet flux in the neighborhood of the Earth. In: Sharpton, V. L., Ward, P. D. (Hrsg.): Global Catastrophes in Earth History. Geological Society of America Special Paper **247**. Seiten 155–170, 1990.