

Kosmische Katastrophe im Erdaltertum

Asteroidenkollision lässt seit 470 Millionen Jahren Steine auf die Erde regnen

VON MARIO TRIELOFF, BIRGER SCHMITZ UND EKATERINA KOROKHANTSEVA



Eine riesige Kollision im Asteroidengürtel vor 470 Millionen Jahren erzeugte einen Schwarm kleinerer Bruchstücke, die zum Teil bis ins innere Sonnensystem vordrangen und innerhalb von ein bis zwei Millionen Jahren auf die Erde regneten. Sie finden sich heute als fossile Meteoriten in Sedimentgesteinen, die zu jener Zeit abgelagert wurden. Selbst heute noch ist jeder dritte die Erde treffende Meteorit auf dieses Ereignis zurückzuführen.

Nur wenige Menschen, die in einer klaren Vollmondnacht den »Mann im Mond« beobachten, sind sich darüber im Klaren, dass das »Mondgesicht« das Resultat eines der elementarsten geologischen Prozesse in unserem Sonnensystem ist: »Augen« und »Mund« sind gewaltige mit dunkler Lava gefüllte Einschlagbecken. Sie entstanden in der Frühzeit unseres Sonnensystems durch den Aufprall von Gesteinsbrocken beachtlicher Ausmaße auf den noch jungen Mond.

Als die Planeten durch Akkretion bereits ihre endgültige Größe erlangt hatten und auch unser Mond »fertig« war, durchzog ein Schwarm von übrig gebliebenem Material das innere Sonnensystem und traf viele der dort auf stabilen Bahnen wandernden Körper. Durch dieses so genannte späte schwere Bombardement (englisch: late heavy bombardment) entstanden alle großen Einschlagkrater und -becken unseres Mondes. Vor dreieinhalb Milliarden Jahren war dieser Vorgang weitgehend abgeschlossen und die Kollisionsrate in unserem Sonnensystem sank auf das heutige Maß.

Unsere Erde im Strom extraterrestrischer Körper

Immer noch treffen extraterrestrische Objekte in großer Menge auf unserem Heimatplaneten auf – täglich einige 1000 Tonnen. Durchschnittlich in Abständen

◀ Abb. 1: Im Asteroidengürtel vor 470 Millionen Jahren: Ein mehrere Kilometer großer Asteroid schlägt auf einem rund 200 Kilometer großen Kleinplaneten ein und reißt ihn dabei in Stücke. Einige der größeren Trümmer trafen wenige Millionen Jahre später die Erde und bildeten mehrere Einschlagkrater. Außerdem fielen in dieser Zeit Tausende kleinerer Meteoriten auf die Erde. Das Gemälde von William K. Hartmann zeigt eine ähnliche – hypothetische – Kollision eines dunklen »kohligen« Asteroiden mit einem helleren Asteroiden, allerdings ist das Projektil hier unverhältnismäßig groß dargestellt.

von einigen wenigen Millionen Jahren wird auch die Erde von Körpern getroffen, die mehrere hundert Meter bis hin zu mehreren Kilometern messen. Derart große Objekte werden – anders als kleine Meteoriten – kaum durch die irdische Atmosphäre abgebremst, sie schlagen mit Geschwindigkeiten zwischen elf und siebenzig Kilometern pro Sekunde auf. Dabei wird die Bewegungsenergie nahezu vollständig in Wärme umgesetzt, das Projektil verdampft vollständig und zurück bleibt nur ein riesiger Einschlagkrater.

Während die Krater auf der Erde meist nach vergleichsweise kurzer Zeit der Abtragung durch Verwitterung und Tektonik zum Opfer fallen, bleiben sie auf festen Himmelskörpern mit dünner oder gar keiner Atmosphäre (Mars, Merkur, Mond und Planetoiden) über sehr lange Zeit hinweg gut erhalten.

Sehr viel häufiger als solche großen Brocken treffen kleinere Objekte die Erde: Millimetergroße Partikel verglühen und verdampfen als Sternschnuppen in der Atmosphäre, noch kleinere Staubteilchen werden schon in den äußersten Zonen der irdischen Lufthülle vollständig abgebremst und bleiben fast unbeschädigt. Ihre Reste finden sich in der Stratosphäre ebenso wie in Tiefseesedimenten oder in Eisbohrkernen. Dort lassen sie sich einsammeln und analysieren.

Meteoriten mit Größen von wenigen Zentimetern bis Metern sind wesentlich seltener. Dennoch befinden sich in den mineralogischen Sammlungen weltweit rund 30 000 Meteoriten, die vorwiegend durch systematisches Suchen in Wüsten oder im Eis der Polkappen aufgespürt wurden. Meteoriten gelten als die »Raumsonden des armen Mannes«. Sie sind jedoch viel mehr als das, denn sie liefern uns bedeutende Informationen über die Entstehung und die Frühzeit unseres Sonnensystems.

Der Ursprung der Meteoriten

Die meisten Meteoriten sind Gesteinsbruchstücke von Asteroiden, die zu Hunderttausenden zwischen Mars und Jupiter ihre Bahn ziehen. Im Asteroidengürtel ist die »Verkehrsdichte« deutlich höher als im übrigen Sonnensystem. Es kommt häufiger zu »Unfällen«, also Zusammenstößen

ßen mit hohen Relativgeschwindigkeiten. Dabei entstehen kleinere Fragmente der einst mehrere hundert Kilometer großen Asteroiden.

Zusammenstöße zwischen kilometergroßen Asteroiden sind heute sehr selten. Kollisionen zwischen metergroßen Objekten geschehen viel häufiger, da es mehr Kleinkörper in diesem Größenbereich gibt.

Die gewaltige Schwerkraft der beiden Riesenplaneten Jupiter und Saturn stört die Bahnen der Fragmente und lenkt sie so ab, dass sie bis ins innere Sonnensystem vordringen können. Typischerweise benötigen größere Körper vom Zeitpunkt ihrer Entstehung durch eine Kollision mehrere zehn Millionen Jahre, um auf diese Weise zu Asteroiden der Amor-Klasse (ihre Mitglieder kreuzen die Marsbahn) oder der Apollo-Klasse (kreuzen die Erdbahn) zu werden (SuW 3/2007, S. 78 ff.). Für kleinere Objekte mit Durchmessern von einigen Metern wirken sich die Bahnstörungen stärker und schneller aus. Daher können diese innerhalb weniger hunderttausend oder Millionen Jahre nach der sie erzeugenden Kollision als Meteoriten auf die Erde fallen.

Die auf den Oberflächen von Erdmond, Mars und Merkur erhaltenen uralten Einschlagkrater liefern Informationen über die Einschlagrate extraterrestrischer Objekte in der Vergangenheit. Ihre Verteilung lässt erkennen, dass in den letzten 3,5 Milliarden Jahren der Zustrom von extraterrestrischem Material etwa konstant war.

Dies lässt sich nicht aus der Fallstatistik der heute eintreffenden Meteoriten ableiten, denn alle aufgefundenen Exemplare gelangten vor geologisch kurzer Zeit auf die Erde, überwiegend innerhalb der letzten zwei Millionen Jahre. Dass wir keine älteren Exemplare finden, ist auf die intensiven Verwitterungsprozesse auf unserem Planeten zurückzuführen, die Meteoriten innerhalb kurzer Zeit vollständig zerstören.

Es gibt allerdings eine sehr seltene Ausnahme: In den 1990er Jahren entdeckte eine Arbeitsgruppe unter der Leitung eines der Autoren (Birger Schmitz von der Universität Lund) die Überreste zahlreicher fossiler Meteoriten in einem schwedischen Steinbruch, eingebettet in Kalkstein aus dem Erdzeitalter des mittleren Ordoviziums (Abb. 3 und Kasten auf Seite 32). Gestein und Meteoriten sind fast eine halbe Milliarde Jahre alt. Die Häufigkeit der Fundstücke ist etwa 100-mal so groß wie es den heutigen Fallraten von Meteoriten entspricht.

Wir vermuteten bereits früh einen Zusammenhang mit einer bestimmten Meteoritenklasse, den so genannten L-Chon-

Was sind L-Chondriten?

Chondriten bestehen aus relativ primitiver Urmaterie. Die Mutterasteroiden, von denen sie abstammen, sind nicht differenziert. Auf ihnen gab es keine großräumigen Aufschmelzprozesse, somit kam es nicht – wie beispielsweise bei unserer Erde – zur Bildung eines metallischen Kerns und eines Silikatmantels beziehungsweise einer Kruste. Da die chondritischen Mutterkörper nur mäßig aufgeheizt wurden, blieben in ihnen mikrometer- bis zentimetergroße Festkörper aus der Frühzeit des Sonnensystems erhalten. Am bekanntesten sind die so genannten Chondren, das sind millimetergroße Kügelchen oder Körnchen aus ehemals geschmolzenem Gestein, die durch Aufheizprozesse im solaren Urnebel entstanden. Sie wurden nach dem griechischen Wort für Korn, chondros, benannt. Die Chondren erstarrten und wurden direkt in die sich bildenden Mutterasteroiden eingebaut. Die Chondriten unterteilt man grob in solche mit einem relativ hohen Gehalt an flüchtigen Elementen (die kohligen

Chondriten) und in die häufigeren so genannten gewöhnlichen Chondriten. Von letzteren gibt es drei Klassen, die man nach ihrem Eisengehalt und Oxidationsgrad unterscheidet: H-Chondriten (H für »High iron«, d.h. hohen Eisengehalt), L-Chondriten (L für »Low iron«, d.h. niedrigen Eisengehalt) und LL-Chondriten (LL für »Low iron, Low metal«, d.h. niedriger Eisengehalt und außerdem ist das Eisen kaum als Metall vorhanden, sondern meist oxidiert in Silikaten gebunden).

▼ Das Innere eines L-Chondriten (unten) enthüllt zahlreiche helle und dunkle rundliche Körner, die ihm nach dem griechischen Wort für Korn (Chondros) den Namen Chondrit einbrachten. Die größeren bräunlichen Flecken sind auf Verwitterung zurückzuführen. Einige naturbelassene Fragmente dieses Meteoriten (rechts) wurden in der algerischen Wüste aufgesammelt.



drüten (siehe Kasten oben). Allerdings waren die fossilen Meteoriten so stark verwittert und alteriert, dass wir mit mineralogisch-chemischen Analysen keine eindeutige Zuordnung treffen konnten. Jedoch passte das Alter der Ablagerungen (mittleres Ordovizium) gut zum relativ zuverlässig bekannten »Entgasungsalter« der heutigen L-Chondriten, welches meist bei Werten um 500 Millionen Jahre (± 40 Millionen Jahre, entsprechend einer Unsicherheit von etwa acht Prozent) liegt.

Der Verdacht lag also nahe, dass es sich bei den fossilen Meteoritenresten um L-Chondriten handelt. Meteoriten dieser Klasse haben einen gemeinsamen Ursprung, das heißt sie stammen von einem einzigen, ehemals großen Mutterasteroiden ab.

Altersbestimmung durch Isotopenmethoden

Eine der Methoden zur Altersbestimmung von Meteoriten benutzt die zwar niedrigen, aber generell vorhandenen Gehalte an Edelgasen in den Mineralen der Meteoriten. Ein wichtiges Datum erhält man über das »Entgasungsalter«. Hierunter versteht man das Alter, das mit Hilfe spezieller radioisotopischer Methoden bestimmt wird. Edelgase sind sehr flüchtige Stoffe. Werden Gesteine im Laufe ihrer Geschichte auf einige hundert Grad aufgeheizt oder gar aufgeschmolzen, so treten die Edelgase aus ihnen aus. Kühlt ein entgastetes Gestein dann wieder ab, so sammeln sich durch Zerfall radioaktiver Elemente wieder Edelgase darin an. Beispielsweise entsteht das Isotop Argon-

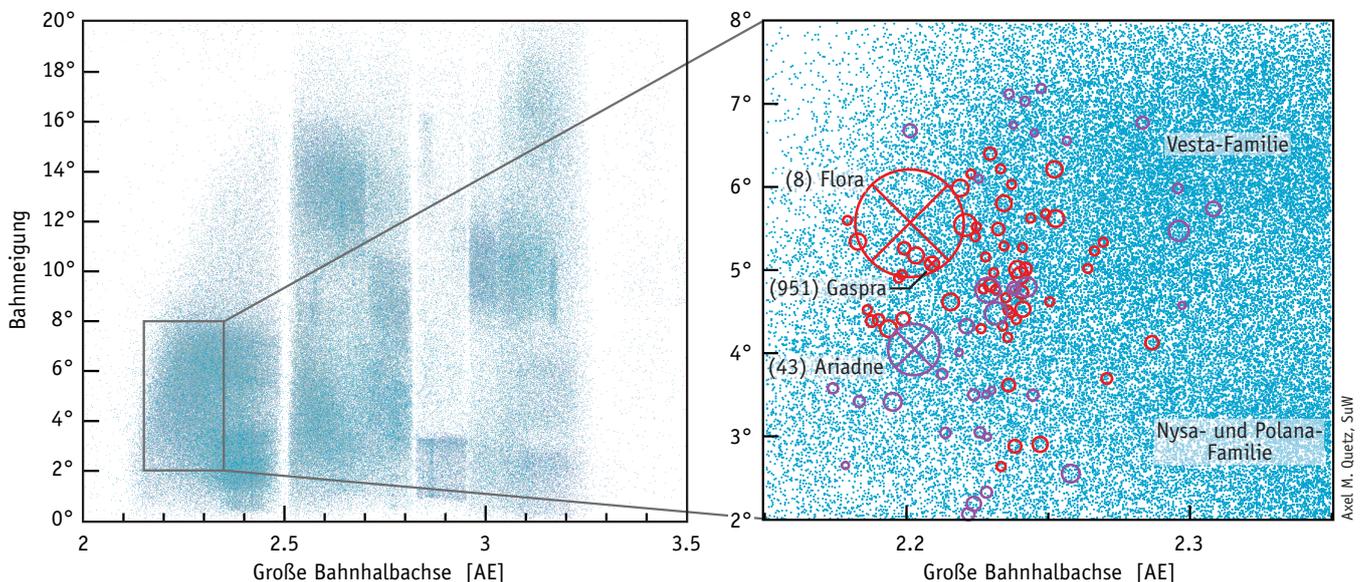


40 (^{40}Ar) aus dem Zerfall von Kalium-40 (^{40}K) und das Isotop Helium-4 (^4He) aus dem Zerfall von Uran und Thorium. Aus der Menge der Edelgasisotope und des zugehörigen »Mutternuklids« lässt sich mit Hilfe des radioaktiven Zerfallsgesetzes die Zeit seit der letzten vollständigen Entgasung berechnen. Dieser Zeitabschnitt definiert das so genannte Entgasungsalter. Die vor diesem Entgasungsereignis liegende Geschichte wird von dem untersuchten Gegenstand »vergessen«. Die Bestimmung solcher Entgasungsalter ist eine Spezialität des Isotopen-Chronologie-Labors in Heidelberg (siehe Kasten auf Seite 34).

Viele Meteoriten sind seit Abschluss der Planetenbildung im Sonnensystem niemals wieder erhitzt worden und weisen Entgasungsalter um 4,5 Milliarden Jahre auf. Einige jedoch wurden durch heftige Kollisionen im Asteroidengürtel stark aufgeheizt. Dabei gingen ihre primären Gehalte an Edelgasen verloren und die Isotopenuhr wurde sozusagen auf Null zurückgestellt. Mit anderen Worten: Die Edelgas-Datierungsmethoden geben den Zeitpunkt der Kollision des Meteoritenmutterkörpers, des Asteroiden, an.

In den Mineralen der L-Chondriten finden sich sehr häufig deutliche Hinweise auf Veränderungen durch eine Asteroidenkollision [1, 2]. Diese Einwirkung

▼ Abb. 2: Scatter-Diagramm der bis Anfang April bekannten 333 615 Asteroiden. Auf den Bereich 2 bis 3,5 AE und Bahnneigung kleiner gleich 20° entfallen 92,4 %. Man erkennt die Kirkwood-Lücken bei 2,5 AE (3:1-Resonanz mit Jupiter), 2,82 AE (5:2) und 2,96 AE (7:3). Im rechten Ausschnitt sind die aus der Kollision hervorgegangenen Trümmer (8) Flora und (951) Gaspra eingetrag.



Fossile Meteoriten in Schweden

Im mittleren Ordovizium vor 470 Millionen Jahren waren die Landmassen völlig anders als heute verteilt, der Urkontinent Pangäa hatte sich noch nicht gebildet. Die Blütezeit der Dinosaurier stand erst noch bevor. Das heutige Baltikum und Skandinavien bildeten einen Mikrokontinent, der auf gleicher geographischer Breite wie heute lag, allerdings auf der Südhalbkugel. Diese Landteile waren durch ein großes kontinentales Flachmeer bedeckt. In diesem lagerten sich Sedimente mit Raten von wenigen Millimetern pro Jahrtausend ab, woraus später dann Kalkstein entstand.



Google Earth/SuW



Birger Schmitz

- ▶ Ein Blick in den Thorsberg-Steinbruch bei Kinnekulle in Schweden zeigt mehrere Abbaustufen, im Hintergrund sind bereits fertige Kalksteinplatten zu sehen.
- ◀ Der Thorsberg-Steinbruch bei Kinnekulle befindet sich in Mittelschweden nahe dem Vänern-See.

Im Thorsberg-Steinbruch bei Kinnekulle im heutigen Schweden (Bilder oben und links) wird dieser dekorative Stein seit 900 Jahren abgebaut. Die Graphik rechts zeigt eine 3,2 Meter dicke Ablagerungssequenz aus diesem Steinbruch mit unterschiedlich dicken Lagen aus Kalkstein. Anhand von Mikrofossilien und den bekannten Sedimentationsraten lässt sich abschätzen, dass diese Sequenz innerhalb von ein bis zwei Millionen Jahren abgelagert wurde.

wird im Fachjargon Impaktmetamorphose genannt. Das Vorkommen bestimmter Hochdruckminerale und ihre chemische Zusammensetzung erlauben Rückschlüsse auf Spitzendrücke und -temperaturen der Impaktmetamorphose sowie auf die anschließenden Abkühlraten. Daraus kann man folgern, dass während der Kollision der Spitzendruck über rund eine Sekunde aufrechterhalten wurde. Das spricht dafür, dass der an der Kollision beteiligte Einschlagkörper mehrere Kilometer groß war, der getroffene Mutterasteroid der L-Chondriten dagegen eher mehrere hundert Kilometer.

Obwohl die Kollision sehr energiereich war, entwich jedoch bei kaum einem L-Chondriten das vor diesem Ereignis vorhandene Edelgas ^{40}Ar vollständig. Es finden sich immer noch Reste aus der Zeit vor dem Impakt, das so genannte reliktsche ^{40}Ar . Es lässt sich nicht von demjenigen ^{40}Ar unterscheiden, das erst nach der Impaktmetamorphose durch den Zerfall von ^{40}K entstand. Dadurch

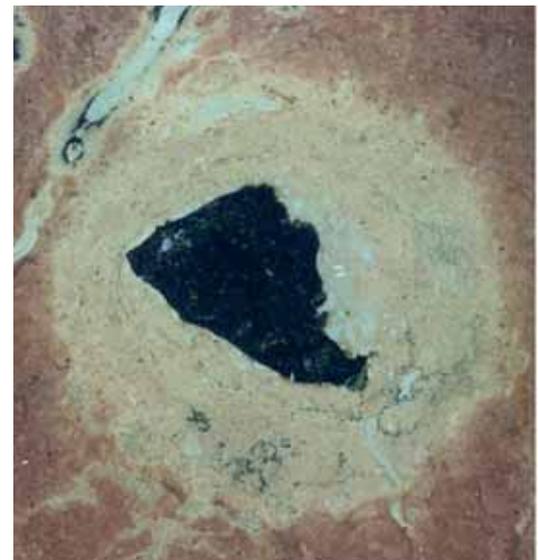
wird das Kollisionsalter zu hoch berechnet.

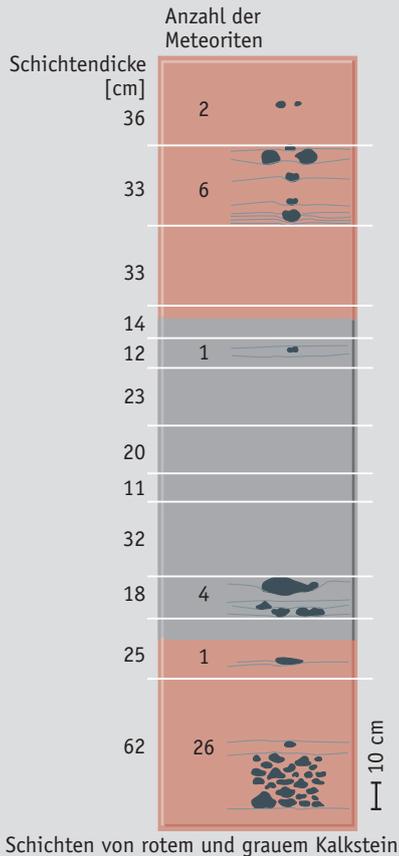
Das Identifizieren des reliktschen ^{40}Ar ist das Hauptproblem und die Hauptfehlerquelle bei der Altersbestimmung mit der von uns angewandten ^{40}K - ^{40}Ar -Methode. Wie wir weiter unten zeigen, gibt es aber eine Methode, nach welcher der Gehalt an reliktschem ^{40}Ar einigermaßen zuverlässig abgeschätzt werden kann.

Im Herbst des Jahres 2004 führte eine Autorin dieses Berichts (Ekaterina Korochantseva) in Heidelberg Messungen im Rahmen eines Projekts der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch. In ihrem Gepäck befanden sich Bruchstücke eines Meteoriten aus der Wüste von Oman, eines L-Chondriten mit dem Namen Ghubara. Die Untersuchung verschiedener Fragmente ergab Alter um 500 Millionen Jahre, was in Einklang mit bisherigen Beobachtungen stand.

Teilweise berechneten wir aber auch Alter, die wesentlich höher waren als das Gesamtalter des Sonnensystems, also mehr als 4,5 Milliarden Jahre. Das kann

nur auf hohe Gehalte an reliktschem ^{40}Ar zurückgeführt werden. Bei genauerer Analyse stellte sich heraus, dass das Verhalten von reliktschem ^{40}Ar falsch interpretiert worden war. Bislang wurde angenommen, dass es sich dabei um zuvor vorhandenes ^{40}Ar handelte, das bei der kollisionsbedingten Aufschmelzung und Erwärmung so gut wie gar nicht im Gestein mobilisiert wurde, sondern meist dort verblieb, wo es durch ^{40}K -Zerfall ent-





Birger Schmitz/Reinhold Henkel



Birger Schmitz

1952 fanden Arbeiter im Rödbrottet-Steinbruch (Jämtland) eine Kalksteinplatte mit einer kuriosen »Verunstaltung«, aber erst 1979 erkannte man, dass diese ein fossiler Meteorit war, der dann »Brunflo« genannt wurde. 1988 wurde ein zweites Exemplar identifiziert. Bei einer systematischen Suchaktion im Thorsberg-Steinbruch in den 1990er Jahren fanden wir (Birger Schmitz und Mitarbeiter) mehr als 40 weitere fossile Meteoriten [4].

▲ Sören und Stig Thor, zwei Mitbesitzer des Steinbruchs und Mario Tassinari (ein Mitinitiator der Suchaktion, Mitte) zeigen eine Kalksteinplatte mit einem fossilen Meteoriten.

▲ Eine dreieinhalb Meter lange Schichtenfolge aus dem Thorsberg-Steinbruch enthüllt zahlreiche, schwarz gezeichnete Meteoritenbruchstücke in den unterschiedlichen Schichten.

In der Graphik links ist ihre detaillierte Verteilung innerhalb der Kalksteinschichten zu sehen. Außerdem fanden wir in den Kalkschichten zahlreiche kleine Körner des Minerals Chromit, die ebenfalls

extraterrestrischen Ursprungs sind. Chromit ist besonders beständig gegen Verwitterungsprozesse und konnte daher seine ursprüngliche chemische Zusammensetzung weitgehend bewahren. Die Elementverhältnisse von Magnesium, Aluminium und Titan ähneln den Chromiten in LL- oder L-Chondriten, eine eindeutige Zuordnung ist allerdings nicht exakt möglich.

standen war. Wir fanden jedoch heraus, dass das reliktsche ^{40}Ar in Ghubara sehr wohl mobilisiert wurde und sich aus seinen Wirtsmineralen entfernte. Die Mobilisierung war dann aber doch nicht so stark, dass dieses ^{40}Ar das Gesteinsgefüge verlassen konnte, sondern es wurde kurz darauf von einem der Nachbarminerale wieder eingefangen und blieb daher zu wesentlichen Anteilen in der Probe erhalten [3].

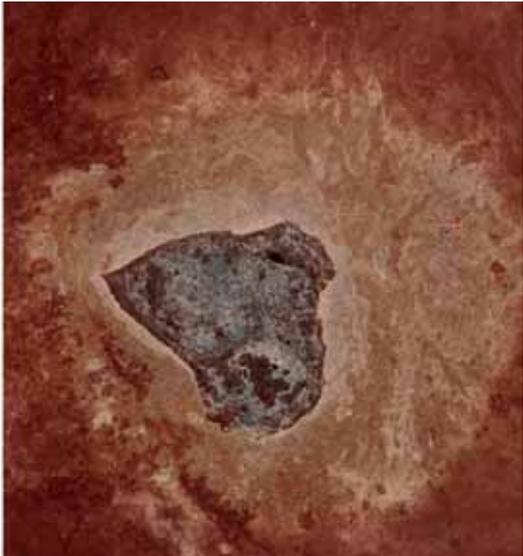
Das ist ein kleiner, aber entscheidender Unterschied, denn in der kurzen Zeitspanne während dieses Vorgangs konnte sich dieses ^{40}Ar mit einem anderen vorher bereits vorhandenen Argonisotop (^{36}Ar) mischen. Dabei wurde es »isotopisch markiert«. Der nicht verdampfte Anteil an ^{40}Ar lässt sich errechnen, wenn man die Menge des vor der Kollision ursprünglich vorhandenen ^{36}Ar in den Gesteinen feststellen kann. Dies ist prinzipiell möglich. Wenn man auf diese Weise das reliktsche ^{40}Ar bestimmt hat, kann man das Entgasungsalter exakt berechnen [3].

Eine Asteroidenkollision vor 470 Millionen Jahren

Mit den korrigierten Ergebnissen für das reliktsche ^{40}Ar bestimmten wir für mehrere L-Chondriten erheblich präzisere und konsistentere Alterswerte als bislang bekannt. Für den Zeitpunkt der Impaktmetamorphose fanden wir einen Wert von 470 ± 6 Millionen Jahre. Auch das Alter der Sedimentgesteine, welche die fossilen Meteoriten beherbergten, ermittelten wir unter Zuhilfenahme geologischer Datierungen präzise, es liegt bei 467 ± 2 Millionen Jahren.

Aus den Altersdaten und den petrologischen Beobachtungen an den L-Chondriten lässt sich eine Modellvorstellung für deren Entwicklung ableiten: Eine der größten bekannten Kollisionen im Asteroidengürtel zerriss vor 470 Millionen Jahren einen mehrere hundert Kilometer großen Kleinplaneten. Dabei wurden die Gesteine beider Asteroiden von sekundenlangen, gewaltigen Stoßwellen durchdrungen. Diese erreichten Spitzendrücke von mehreren hundert Kilobar, entspre-

◀ Abb. 3: Diese beiden fossilen Meteoriten aus dem Thorsberg-Steinbruch in Schweden sind rund eine halbe Milliarde Jahre alt. Beide sind von einem hellen, mehrere Zentimeter breiten Saum umgeben. Er entstand lange nach ihrer Ablagerung durch chemische Reaktionen mit dem Umgebungsgestein.



Birger Schmitz

Isotopendatierung mit Argon-40 und Kalium-40

Die Abbildung unten zeigt eine dünn geschliffene polierte Scheibe des Meteoriten Ghubara, aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop. Zu sehen sind größere Kristalle in einer feinkörnigeren Grundmasse. Kalium-40 (^{40}K), das Mutterisotop von Argon-40 (^{40}Ar), ist in dieser feinkörnigen Grundmasse konzentriert (blaue Punkte).

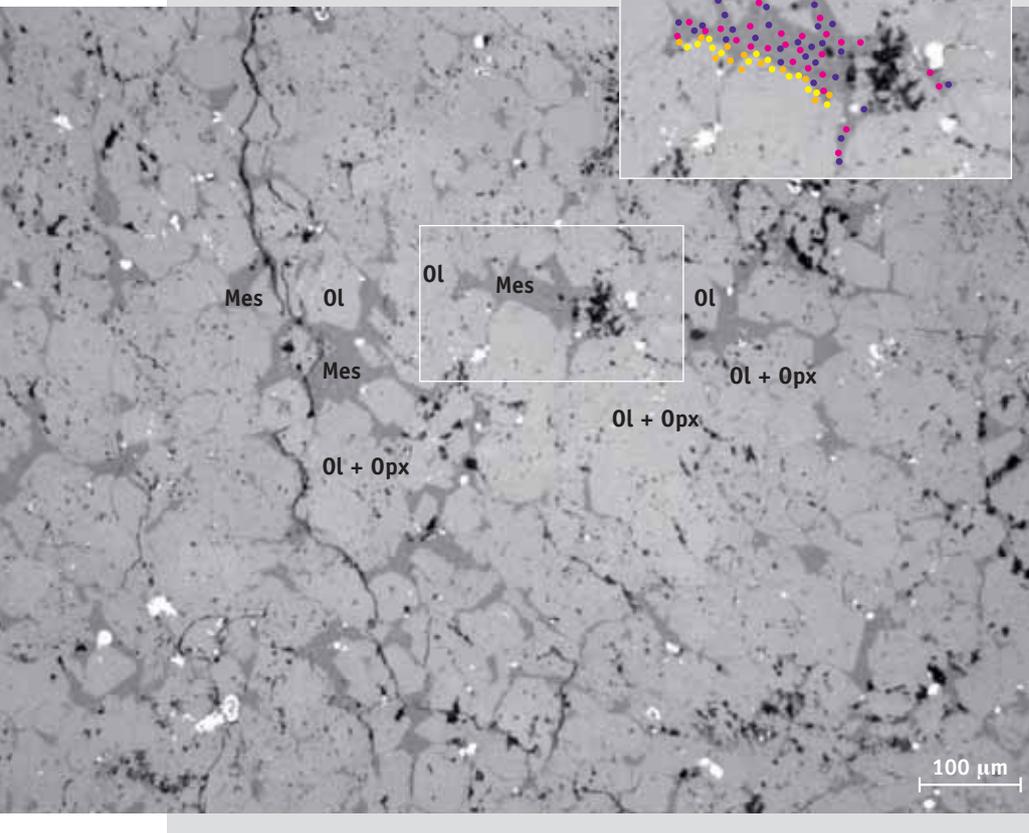
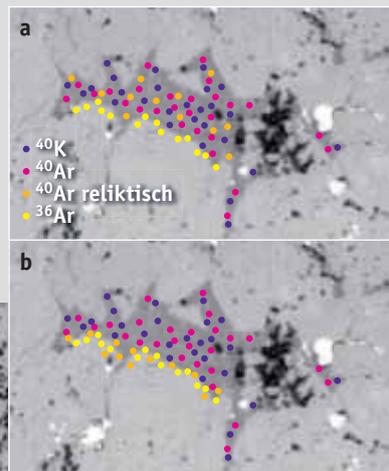
Seit der Impaktmetamorphose vor 470 Millionen Jahren sammelt sich darin auch immer mehr ^{40}Ar an (rote Punkte). Zusätzlich findet sich unvollständig entgast (reliktisches) Argon-40 aus einer früheren Epoche des Mutterkörpers der L-Chondrite (orange) aus der Zeit vor der Impaktmetamorphose. Es lässt sich jedoch anhand der Korrelation mit einem leichteren Isotop, ^{36}Ar (gelb), identifizieren, da es durch dieses isotopisch »eingefärbt« ist (hier orangefarben dargestellt). Dies ist nur möglich, weil während der Asteroidenkollision sowohl bereits vorhandenes ^{40}Ar als auch ^{36}Ar gleichzeitig mobilisiert wurden.

Aufgrund ihrer identischen chemischen Eigenschaften (beide Isotope gehören zum Edelgas Argon) wurden beide gleichermaßen wieder von Mineralen eingefangen (Bildausschnitt b, rechts). Wäre das reliktische ^{40}Ar nicht ausreichend mobilisiert worden, um sich mit ^{36}Ar zu mischen (Bildausschnitt a, rechts), so könnte man es nicht von

demjenigen ^{40}Ar unterscheiden, das sich in den 470 Millionen Jahren seit dem Zusammenstoß in den Gesteinen durch radioaktiven Zerfall ansammelte.

^{36}Ar wiederum lässt sich in meteoritischen Proben nicht leicht messen, denn durch die Kosmische Strahlung wird während dieser langen Zeitspanne eine weitere ^{36}Ar -Komponente produziert.

▼ Eine dünn geschliffene, polierte Scheibe des Meteoriten Ghubara wurde hier mit einem Rasterelektronenmikroskop fotografiert. In den Mineralen Olivin (Ol), Orthopyroxen (Opx) und der glasartigen so genannten Mesostasis (Mes) sind kleine Mengen des Edelgases Argon eingeschlossen, die durch den Impakt mobilisiert wurden. Zu weiteren Details siehe Text.



chend dem statischen Druck im Erdinneren in rund 2000 Kilometer Tiefe. Die Gesteine wurden so hoch erhitzt, dass sie teilweise aufschmolzen.

Nach der Kollision wurden durch Schwerkraftstörungen kleine und große Trümmer in Richtung Erde abgelenkt. Sie bewirkten, dass für etwa ein bis zwei Millionen Jahre etwa hundert Mal so viele Meteoriten wie in der Gegenwart auf die Erde fielen [5, 6].

Die Einschlagrate kilometergroßer Bruchstücke war in den nachfolgenden zwanzig Millionen Jahren ebenfalls erhöht: Unter den irdischen Einschlagkratern gibt es acht große Impaktstrukturen, deren Alter in einem Bereich von 450 bis 470 Millionen Jahren sehr nahe beieinander liegen. Offenbar bildeten sich innerhalb dieser kurzen Zeitspanne viermal so viele Einschlagkrater wie statistisch zu erwarten. Die Krater heißen Neugrund (Estland), Granby (Schweden), Ames (Oklahoma, USA): 470 Millionen Jahre; Kärö (Estland), Tvären (Schweden), Lockne (Schweden): 455 Millionen Jahre; Slate Islands (Ontario, Kanada), Calvin (Michigan, USA): 450 Millionen Jahre.

Die Energie solch großer Einschläge ist beträchtlich und hat deshalb sehr wahrscheinlich globale Auswirkungen. So entsteht beispielsweise ein 30 Kilometer großer Krater wie Slate Islands in Kanada durch eine Impaktexplosion, deren Energieumsatz etwa dem von 100 Millionen Hiroshima-Bomben entspricht. Dabei schlägt ein Objekt von der Größe des Feldbergs im Schwarzwald mit einer Geschwindigkeit von rund 50000 Stundenkilometern auf der Erde ein.

Infolge der Kollision war auch der Eintrag von kosmischem Staub in die Erdatmosphäre für mehrere Millionen Jahre deutlich erhöht. Heute ist nur etwa die Hälfte aller Staubpartikel in der oberen Atmosphäre, die dort lange verweilen können, extraterrestrischen Ursprungs. Damals jedoch war dessen Menge wohl etwa hundert Mal so groß wie heute. Wie sich dies auf das Klima der Erde auswirkte, ist noch nicht bekannt. Im mittleren bis späten Ordovizium entwickelten sich jedoch viele neue Pflanzen- und Tierarten.

Wir vermuten, dass die große Biodiversifikation mit den Klimaveränderungen im Gefolge des kosmischen Bombardements in dieser Zeit zusammenhängen könnte. Damit hätte diese gewaltige Kollision, also ein Ereignis weit draußen jenseits der Umlaufbahn des Mars, unsere irdische Biosphäre bedeutend beeinflusst.

Andere größere Bruchstücke der damaligen Kollision durchziehen noch

▶ Abb. 4: Der Asteroid (951) Gaspra ist rund 19 Kilometer lang und wurde 1992 von der Raumsonde GALILEO aufgenommen. Er gehört zur Flora-Asteroidenfamilie, die vor rund einer halben Milliarde Jahren durch einen Zusammenstoß im Asteroidengürtel entstand. Er könnte ein Bruchstück der Kollision sein, aus der die Meteoriten des Typs L-Chondrit hervorgingen. L-Chondriten fallen auch noch heute in großer Zahl auf die Erde.



NASA/JPL

heute unser Sonnensystem. Bei der so genannten Flora-Familie, einer der großen bekannten Asteroidenfamilien – zu Familien fasst man Asteroiden mit sehr ähnlichen Bahnelementen zusammen – könnte es sich um die Trümmer aus der damaligen Kollision handeln [7].

Der bekannteste Vertreter dieser Familie ist der Asteroid (951) Gaspra, den 1992 die Raumsonde GALILEO auf ihrem Weg zum Jupiter aus rund 5300 Kilometer Abstand fotografierte. Von dieser Asteroidenfamilie sind zurzeit mehr als 800 Mitglieder bekannt.

Berechnungen zur Entwicklung ihrer Bahnelemente zeigten, dass sie von einem ehemals rund 200 Kilometer großen Asteroiden stammen, der vor weniger als einer Milliarde Jahren zerstört wurde. Das passt zum Kollisionsalter der Materie der L-Chondriten.

Von einem oder mehreren Bruchstücken der damaligen Kollision, vielleicht Asteroiden, die Gaspra sehr ähnlich sind, wurden in den letzten Millionen Jahren und auch heute noch durch kleinere Einschläge zentimeter- bis metergroße Kör-

per abgetrennt, die als Meteoriten auf der Erde niedergehen, die heutigen L-Chondriten. Sie zeichnen auch noch heute für ein Drittel aller Meteoritenfälle verantwortlich.

In diesem Sinne ist ein Großteil der heute auf der Erde ankommenden Meteoriten ein Nachhall der kosmischen Kollision vor 470 Millionen Jahren. Frühe Zeugen dieser Katastrophe aber wurden in den ordovizischen Kalksteinen wie in einer Zeitkapsel konserviert und blieben uns bis heute erhalten. □

Danksagung: Die Arbeiten wurden gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der Klaus Tschira Stiftung gGmbH sowie dem Forschungszentrum Geesthacht (GKSS).



Mario Trieloff ist Privatdozent am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg. Sein Forschungsschwerpunkt sind Datierungen mittels Radioisotopen. Er verfasste unter an-

derem Arbeiten zur Datierung von Impaktkratern und zur Entstehung der ersten Planetesimale im Sonnensystem. 2005 erhielt er den Victor-Moritz-Goldschmidt-Preis der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft.



Birger Schmitz ist Professor für Geologie an der Universität Lund. Nach seiner Promotion war er wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Luis Alvarez in Berkeley, Kalifornien, und erforschte den Asteroidenimpakt an der Kreide-Tertiär-Grenze.



Ekaterina Korochantseva ist Doktorandin am Mineralogischen Institut der Universität Heidelberg und dem Vernadsky Institut für Geochemie in Moskau.

Ihr Thema ist die Mineralogie und Argon-40-Argon/39-Datierung von Meteoriten verschiedener Herkunft.

Weiterführende Literatur

- [1] Mario Trieloff: **Die Bausteine der Planeten – Die Entwicklung der Asteroiden im frühen Sonnensystem.** SuW 10/2003, S. 26 ff.
- [2] Alan E. Rubin: **Was heizte die Planetoiden auf?** Spektrum der Wissenschaft 8/2005, S. 60 ff.
- [3] Ekaterina V. Korochantseva, et al.: **L chondrite asteroid breakup tied to Ordovician meteorite shower by multiple isochron ^{40}Ar - ^{39}Ar dating:** Meteoritics and Planetary Science **42**, S. 113–130 (2007).
- [4] P. Thorslund und F.E. Wickman: **Middle Ordovician chondrite in fossiliferous limestone from Brunflo, central Sweden.** Nature **289**, S. 285–286 (1981).
- [5] P.R. Heck, et al.: **Fast delivery of meteorites to Earth after a major asteroid collision.** Nature **430**, 323–325 (2004)
- [6] B. Schmitz, B. Peucker-Ehrenbrink, M. Lindström und M. Tassinari: **Accretion rates of meteorites and cosmic dust in the early Ordovician,** Science **278**, S. 88–90 (1997).
- [7] D. Nesvorný, A. Morbidelli, D. Vokrouhlický, W.F. Bottke und M. Broz: **The Flora Family: A case of the dynamically dispersed collisional swarm?** Icarus **157**, 155–172 (2002)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter: www.suw-online.de/artikel/872283