

RELIKTE

DES URSPRUNGS

RELIKTE DES URSPRUNGS

METEORITEN BRINGEN DIE ERDGESCHICHTE ZURÜCK

MARIO TRIELOFF

Die Gesteine der Erde haben vergessen, aus welchen Materialien sie vor Abermillionen Jahren entstanden sind. Um etwas über den Ursprung unseres Planeten zu erfahren, müssen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Steine untersuchen, die auf die Erde heruntergefallen sind: Meteorite haben die Erinnerung an die Geburtsstunde unseres Heimatplaneten bewahrt.

D

Die Erde ist ein Planet der beständigen Veränderung. Ein prominentes Beispiel ist der menschengemachte Klimawandel aufgrund des massiven Freisetzens von Treibhausgasen seit Beginn der Industrialisierung. Hinzu kommen natürliche Klimaschwankungen im Bereich hunderter oder auch vieler tausender Jahre, etwa der Wechsel von Warm- und Eiszeiten im Rhythmus von rund 100.000 Jahren. Solche klimatischen Variationen wirken sich auch auf die Bio- und Geosphäre aus: In Eiszeiten etwa war der Meeresspiegel deutlich niedriger, weite Teile des Ärmelkanals fielen trocken und wurden von Frühmenschen besiedelt. Große Teile Europas waren unterdessen unter Eisgletschern begraben. Noch fundamentalere Änderungen finden wir auf noch größeren Zeitskalen. Sie reichen in Zeiträume zurück, bevor es Menschen gab.

Unser Planet war lange nur von einzelligen Lebensformen bevölkert, Landpflanzen und Landtiere gibt es erst seit wenigen hundert Millionen Jahren. Die Evolution des Lebens auf der Erde wird begleitet vom Aussterben und der Geburt neuer Arten. In der Erdvergangenheit gab es mehrere Massensterben, am bekanntesten ist wohl das Aussterben der Dinosaurier und Ammoniten (Kopffüßer) am Ende der Kreidezeit. Ihr Untergang wurde eingeläutet vom Einschlag eines riesigen Meteoriten mit zehn Kilometern Durchmesser, begleitet von intensiver vulkanischer Aktivität, die in der Region des heutigen Indien kilometer dicke Lava-schichten auftürmte. Damals, vor 66 Millionen Jahren, begann die Neuzeit der Erde und das Zeitalter der Säugetiere.

Heidelberger Ionensonden-Labor

Das Heidelberger Ionensonden-Labor (HIP), das am Institut für Geowissenschaften der Universität Heidelberg angesiedelt ist, wurde im Jahr 2014 als nationales Labor für Sekundärionen-Massenspektrometrie eingerichtet. Die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Einrichtung, die in Deutschland einmalig im universitären Arbeitsbereich ist, verfügt über eine hochauflösende Ionensonde zur Bearbeitung geowissenschaftlicher Forschungsfragen und Peripheriegeräten für die prä- und post-analytische Untersuchung von Proben. Mit dem Forschungsgrößgerät können Isotopendatierungen und die Messung von Spurenelementen in extraterrestrischen und terrestrischen Gesteinen hochpräzise mit einer räumlichen Auflösung im Mikrometerbereich durchgeführt werden. Bearbeitet werden Forschungsvorhaben aus den Bereichen Kosmo- und Geochemie, Isotopengeologie, Klimatologie, Umweltstudien und Archäologie. Bewilligt wurde die Sonde im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1385 „The first 10 million years of the solar system“, das in Heidelberg koordiniert wurde.

Auf Zeitskalen von vielen Millionen Jahren ändert sich jedoch nicht nur die Tier- und Pflanzenwelt, sondern auch die Gesteinsoberfläche der Erde. Die Kontinente – und somit auch die Form der Ozeane – verschieben sich im Laufe der Jahrmillionen. Vor 250 Millionen Jahren existierte der Urkontinent Pangäa. Er umfasste alle heutigen Landmassen und brach dann durch tektonische Bewegungen auseinander. Das hat zum heutigen Erscheinungsbild der Erdoberfläche geführt. Dieser Prozess der „Kontinentaldrift“, bei der sich die Kontinente über Jahrmillionen hinweg verschieben, wird verursacht durch großräumige konvektive Gesteinsbewegungen im heißen Erdmantel. Dadurch bewegen sich nicht nur die oberhalb der Wasseroberfläche sichtbaren kontinentalen Platten, sondern auch der Ozeanboden. Bei der Kollision mit einer kontinentalen Platte sinkt er in das Erdinnere ab, begleitet von intensivem Vulkanismus. Andere Arten des irdischen Vulkanismus erzeugen neue Gesteine, beispielsweise submarine Gebirge am mittelozeanischen Rücken. Zuweilen entstehen auch neue Inseln.

Die Suche nach Zeugen

Ein wesentliches Ziel geowissenschaftlicher Forschung ist es, eine Antwort auf die Frage zu finden, wann und wie unser Heimatplanet entstanden ist. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts war das Alter der Erde unbekannt, Schätzungen reichten von einigen zehn Millionen Jahren bis hunderte von Millionen Jahren. Mit der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität ging eine neue Messmethode einher, die radioaktive Zerfallsprodukte nutzt, um das Alter von Gesteinen zu bestimmen.

Lange war es das Problem, Urgesteine der Erde zu finden, die den ständigen Zyklus des Werdens und Vergehens überstanden haben. Nur wenige Landgebiete überdauerten länger als drei Milliarden Jahre lang die tektonischen Bewegungen, den Vulkanismus und nicht zuletzt den Prozess der Gesteinsverwitterung. Die ältesten Zeugnisse der frühen Erde sind winzige Körner des Minerals Zirkon, die bis zu vier Milliarden Jahre alt sind. Sie stellen aber nur ein Minimalalter der Erde als Ganzes dar. Und sie repräsentieren nicht die ursprüngliche chemische oder mineralogische Zusammensetzung des

„Nach heutigem
Kenntnisstand gibt es
auf der Erde keine Reste
des Urmaterials, aus dem
sich unser Heimatplanet
einst bildete.“

„Meteorite sind Zeitzeugen der frühesten Geburtsstunde unseres Sonnensystems: Sie bewahren die Erinnerung an Prozesse vor 4,5 bis 4,6 Milliarden Jahren.“

Urmaterials, aus dem die Erde sich bildete. Nach heutigem Kenntnisstand gibt es auf der Erde keine Reste dieses Urmaterials: Die Gesteine der Erde haben ihre Erinnerung an ihren Ursprung vergessen.

Ein uraltes Relikt

Kennen Sie den „Mann im Mond“? In einer klaren Vollmondnacht kann man mit etwas Fantasie erkennen, dass der Mond einem Gesicht gleich auf uns herabschaut. Die dunklen Partien, die man Augen, Nase und Mund zuordnen könnte, sind riesige Einschlagskrater, verfüllt mit dunkler Lava.

Alle großen Einschlagskrater des Mondes entstanden vor unvorstellbar langer Zeit in einem Zeitraum von 3,7 bis 4,5 Milliarden Jahren vor heute. Sie sind also älter als die meisten irdischen Gesteine. Mit dunkler Lava wurden sie später aufgefüllt, so dass der Mond einem Beobachter seit circa drei Milliarden Jahren fast unverändert erscheint – im Unterschied zu unserem Heimatplaneten, auf dem sich die Kontinente bis heute gegeneinander verschieben und das Antlitz der Erde ändern.

Dass die Mondoberfläche sich kaum verändert hat, ist hauptsächlich auf zwei Umstände zurückzuführen: Zum einen hat der Mond keine Atmosphäre, keine Wetterphänomene und keine Verwitterungsprozesse, die seiner Oberfläche zusetzen könnten. Zum anderen besitzt der Mond keine nennenswerte innere Wärme. Seine tektonische Aktivität ist deshalb nur sehr bescheiden und reicht nicht aus, das Erscheinungsbild seiner Oberfläche zu verändern. Beide Umstände haben ihre Ursache in der geringen Größe des Mondes: Kleine Körper können aufgrund ihrer geringen Schwerkraft keine gasförmigen Elemente und Verbindungen halten, außerdem kühlen sie schneller aus und werden tektonisch inaktiv. Unser Mond ist ein für uns alle sichtbares uraltes Relikt direkt vor unserer kosmischen Haustür: Er bewahrt die Erinnerung an die Frühphase des Sonnensystems vor etwa vier Milliarden Jahren.

Der Urstoff unseres Sonnensystems

Der Mond ist kein Rekordhalter, was seine geringe Größe angeht. Es gibt in unserem Sonnensystem wesentlich kleinere Monde, etwa Phobos und Deimos, die beiden Monde

des Mars, oder zahlreiche kleinere Monde um die Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Darüber hinaus gibt es noch kleinere Körper konzentriert in zwei Bereichen unseres Sonnensystems: zum einen weit außen die Ursprungsregion der Kometen, sowie zwischen Mars und Jupiter der Asteroidengürtel.

Die Asteroiden stellen das ursprüngliche Baumaterial der Planeten dar. Einige von ihnen sind in ihrer fast vollständigen Größe von hunderten bis tausend Kilometer Durchmesser erhalten. Andere sind durch Kollisionen fragmentiert, es gibt zahlreiche Bruchstücke von ihnen in jeglicher Größe, bis hin zu Mikrometer kleinen Staubteilchen. Metergroß sind die Fragmente dieser Kollisionen, die als „Meteorite“ auf die Erde gelangen. Sie können im Labor untersucht werden.

Ähnlich wie unser Mond sind Asteroiden zu klein, um eine Atmosphäre zu halten. Ihre magmatische und tektonische Aktivität war – wenn je vorhanden – auf ihre Entstehungsphase beschränkt und daher schnell beendet. Viele dieser Kleinkörper wurden niemals heiß genug, um Gestein



PROF. DR. MARIO TRIELOFF leitet seit dem Jahr 2008 die Forschungsgruppe Geo- und Kosmochemie sowie seit 2014 das Ionensonden-Labor am Institut für Geowissenschaften der Universität Heidelberg. Von 2010 bis 2019 war er Sprecher des DFG-Schwerpunktprogramms 1385 „The first 10 million years of the solar system“. Er war beteiligt an den NASA-Missionen Stardust und Cassini, wofür er den NASA Group Achievement Award erhielt, und ist federführend beteiligt an der „Destiny“-Mission zum Asteroiden Phaethon. Schwerpunkte von Mario Trieloffs Forschung sind die Entstehung von Kleinkörpern im Sonnensystem sowie die Entstehung der Erde und ihrer Atmosphäre.

Kontakt: mario.trieloff@geow.uni-heidelberg.de

in ihrem Inneren zu verändern: Wie überdimensionale Kühlschränke bewahren sie das Gedächtnis der Frühphasen der Planetenentstehung. Sie beherbergen die ältesten, unveränderten Objekte des Sonnensystems: Einschlüsse, die reich an Kalzium und Aluminium sind und ein Alter von 4,567 Milliarden Jahren haben, oder Gesteinskügelchen, sogenannte Chondren, die nur wenig jünger sind. Der chemische Stoffbestand der Gesteine mit kalzium- und aluminiumreichen Einschlüssen und der Chondren entspricht dem Material, aus dem sich die Erde und andere Planeten bildeten.

Meteorite eignen sich auch, um die frühesten grundlegenden Prozesse auf Gesteinskörpern nachzuvollziehen. Manche der Kleinkörper – die Mutterkörper der sogenannten kohligen Chondrite – sind reich an flüchtigen Stoffen, darunter bis zu einige Prozent Kohlenstoff. Diese Kleinkörper wurden zumindest so warm, dass sich im Gestein enthaltenes Wasser eis verflüssigte und mit den Stoffen aus der Umgebung reagierte. Dabei bildeten sich wasserhaltige Minerale, Karbonate und komplexe organische Verbindungen, darunter Aminosäuren und Nukleinbasen. Der Eintrag solcher Verbindungen durch Meteoritenschauer auf die frühe Erde könnte eine Rolle als Keimzelle der frühesten chemischen Bausteine des Lebens gespielt haben.

Ein Beispiel für einen kohligen Chondriten ist der im Jahr 2019 bei Flensburg auf die Erde gefallene „Flensburger Meteorit“. Analysen im Heidelberger Ionensonden-Labor ergaben, dass dieser Meteorit die ältesten Karbonate im Sonnensystem enthält, sie sind viele hunderte von Millionen Jahre älter als bekannte irdische Karbonate. Die Analysen zeigten, dass flüssiges Wasser und komplexe Kohlenstoffverbindungen in einigen Gesteinskörpern schon drei Millionen Jahre nach der Bildung erster kleiner Festkörper im Sonnensystem vorhanden waren. Somit sind Meteorite Zeitzeugen der Geburtsstunde unseres Sonnensystems und bewahren die Erinnerung an Prozesse vor 4,5 bis 4,6 Milliarden Jahren.

Das Gesteinsgedächtnis entschlüsseln

Gesteinsalter werden mithilfe der Zerfallsprodukte natürlicher radioaktiver Isotope bestimmt, die meist nur in Mineralen messbar sind, deren Korngröße wenige Mikrometer beträgt. Entsprechend groß sind die Anforderungen an die Technik, aus solch kleinen Körnern Isotope herauszulösen und mit ausreichender Präzision zu messen. Dies können weltweit nur wenige Instrumente leisten, eines davon ist die Heidelberger Ionensonde. Dieses 5,2 Millionen Euro teure Gerät ist in Deutschland einmalig im universitären Arbeitsbereich. Es wurde in einem vom Institut für Geowissenschaften koordinierten DFG-Schwerpunktprogramm bewilligt und ist auf Antrag verfügbar, um nationale und internationale Projekte umzusetzen.

Der fein fokussierte Ionenstrahl der Ionensonde schlägt Teilchen aus Gesteinsoberflächen heraus, die sodann massenspektrometrisch gemessen werden. Zur Altersbestimmung eignen sich beispielsweise Zerfallsprodukte des Elementes Blei. Sie stammen aus dem Zerfall des natürlichen Urans. Die Anwendungen der Heidelberger Ionensonde erstrecken sich nicht allein auf die Altersbestimmung, sondern auch auf Messungen des Verhältnisses von Sauerstoff- oder Kohlenstoffisotopen, beispielsweise, um Klimasignale in Stalagmiten zu messen (siehe den Beitrag von Sophie Warken ab Seite 100).

Reisen in die Vergangenheit

Anstatt auf die Erde gefallene Gesteinsbruchstücke zu beforschen, kann man auch Raumsonden in den Weltraum senden, um dort Kleinkörper zu untersuchen, Proben von ihnen zu entnehmen und zur Erde zurückbringen. Solche Proben können mit hochspezialisierten Instrumenten in irdischen Laboren untersucht werden. Derartige Missionen sind sehr aufwändig und teuer und daher selten. In den letzten Jahren hat die Raumsonde „Stardust“ Aufsehen erregt: Als bislang einzige Mission hat sie kometare und interstellare Staubteilchen zur Erde zurückgebracht und dabei die heterogene und ursprüngliche Natur des kometaren Materials dokumentiert.

RELICTS OF THE BEGINNING

METEORITES BRING BACK EARTH'S HISTORY

MARIO TRIELOFF

The Earth undergoes constant change. Climate change is a prominent example; however, on geological time scales there are more fundamental transformations. Plate tectonics and volcanism are caused by convection processes in the Earth's mantle. These processes, along with weathering, limit the age of rocks, of which only a few types are older than 3 billion years.

In contrast, almost all rocks on the Moon are older; in fact, many of the impact craters on the Moon's surface date back to at least 3.8 billion years. Their age is related to the small size of the Moon, which has no atmosphere and negligible tectonic activity.

Other small bodies in the Solar System include comets and asteroids – remnants of the initial phase of planet formation 4.6 billion years ago. Their igneous activity – if any – was limited to the first few million years of their existence. However, many asteroids escaped significant heating, preserving the oldest cm-sized objects that formed in the Solar nebula 4.567 billion years ago.

Asteroid fragments that fall to Earth as meteorites carry the memory of planet formation and of the Earth's origin. The information preserved within them can be accessed by means of isotope analyses using large secondary ion mass spectrometers like the Heidelberg Ion Probe (HIP). Such analyses reveal early fluid activity on small bodies, accompanied by the formation of complex compounds like amino acids and nucleobases which may have played an important role in the prebiotic chemistry of Earth.

Instead of analysing meteorites in terrestrial laboratories, space missions can study small bodies in situ. Cosmic dust detectors onboard the Cassini space probe discovered a subsurface ocean and high-molecular organic compounds on Saturn's moon Enceladus, while the next-generation dust particle analyser aboard the *Destiny+* mission will examine cosmic dust particles related to the asteroid Phaethon, as well as various comets and the interstellar medium in the years to come. ●

PROF. DR MARIO TRIELOFF has headed the “Geo- and Cosmochemistry” research group at Heidelberg University’s Institute of Earth Sciences since 2008 and the Heidelberg Ion Probe lab since 2014. From 2010 until 2019 he was spokesperson of the DFG Priority Programme 1385 “The first 10 Million Years of the Solar System”. He contributed to NASA’s Stardust and Cassini missions, for which he received the NASA Group Achievement Award, and is among the leading researchers of the Destiny+ mission to the asteroid Phaethon. Mario Trierloff’s research interests are the formation of small bodies in the Solar System, as well as the formation of Earth and its atmosphere.

Contact: mario.trierloff@geow.uni-heidelberg.de

“Many small bodies never grew hot enough to change the rock contained inside: like oversized refrigerators, they retain the memory of the early phases of planet formation.”

Alternativ gibt es die Möglichkeit, kosmische Staubteilchen direkt vor Ort mit Geräten der Raumsonde zu untersuchen. Die Analyse der chemischen Zusammensetzung ist technisch sehr anspruchsvoll, insbesondere weil das Gewicht von auf Raumsonden mitreisenden Geräten auf wenige Kilogramm begrenzt ist. Miniaturisierte Varianten von Massenspektrometern waren bislang nur auf wenigen Sonden unterwegs, beispielsweise auf der ESA-Mission Rosetta oder der Mission Cassini. Unter Federführung Heidelberger Wissenschaftler hat die Mission Cassini vor Ort Eisteilchen des Saturnmondes Enceladus untersucht und einen Wasser-ozean unter der Eiskruste des Mondes entdeckt. Es wurde zudem gezeigt, dass es auf Enceladus hochkomplexe organische Verbindungen gibt, die wahrscheinlich auf Reaktionen des Ozeanwassers mit dem Gesteinskern des Saturnmondes zurückzuführen sind.

Im Jahr 2025 wird die nächste Generation solcher Staubdetektoren als eines der drei Hauptinstrumente auf der „Destiny+“-Mission starten, einer Kollaboration der japanischen und deutschen Raumfahrtagenturen. Das Hauptziel der Sonde ist der Asteroid Phaethon, einer der Kleinkörper, die die Erdbahn kreuzen und der Erde gefährlich nahe kommen können. Im Dezember jeden Jahres prasseln kleinste, bis zu Millimeter große Staubteilchen auf die Erde und erzeugen so den Sternschnuppenschauer der Geminiden: Es handelt sich um Fragmente von Phaethon, die dieser verloren hat und die sich entlang seiner Bahn verteilen.

Voraussichtlich im Jahr 2030 wird die Sonde Staubpartikel von Phaeton während ihres Vorbeifluges messen können und uns neue Daten von einem Urkörper liefern. Die Messzeit ist keineswegs auf den kurzen Vorbeiflug beschränkt. Während der mehrjährigen Flugzeit wird der Staubdetektor die meiste Zeit aktiv sein und Staubteilchen verschiedenster Quellen messen, darunter interplanetare Staubteilchen verschiedener Kometen und Asteroiden sowie nicht zuletzt auch interstellare Staubteilchen.

Bei diesen Staubteilchen handelt es sich um eine besondere Form kosmischer Materie außerhalb unseres Sonnensystems: Sie stammen aus dem Raum zwischen den Sternen. Nur einmal zuvor konnten solche Teilchen chemisch direkt analysiert werden: Es handelte sich um 36 Teilchen, detektiert während des 13-jährigen Aufenthaltes der Raumsonde Cassini im Saturnsystem. Die „Destiny+“-Mission wird hier neue Maßstäbe setzen, sowohl im Hinblick auf die Anzahl der analysierten Teilchen – voraussichtlich einige hundert – als auch hinsichtlich der Qualität der Massenspektren. Diese Staubteilchen sind im wahrsten Sinne des Wortes Sternstaub – das Gedächtnis der Sterne. ●

„Viele Kleinkörper wurden niemals heiß genug, um Gestein in ihrem Inneren zu verändern: Wie überdimensionale Kühlschränke bewahren sie das Gedächtnis der Frühphasen der Planetenentstehung.“