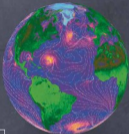


Erde



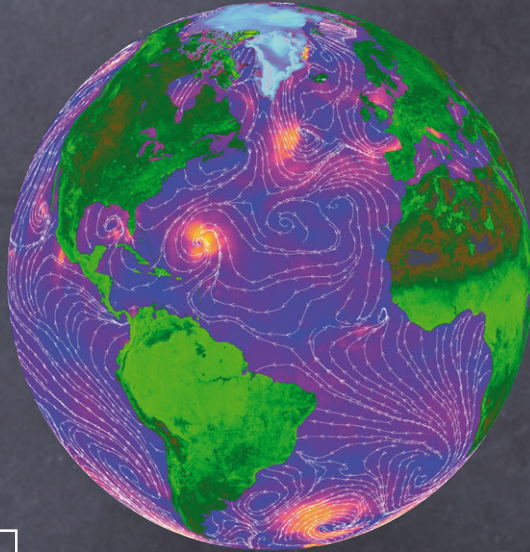
Spektrum

Sachbuch

Martin Redfern

50 **schlüssel
ideen**

Erde



Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Sachbuch

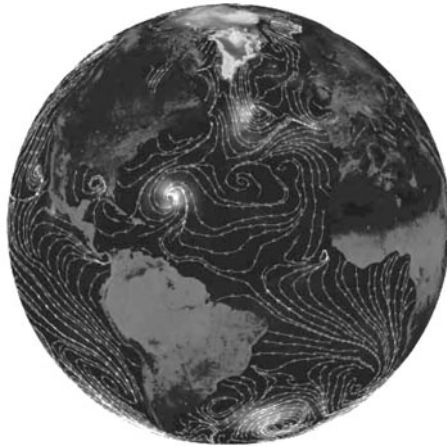
Martin Redfern

50 **schlüssel**
ideen

Martin Redfern

50 Schlüsselideen

Erde



Aus dem Englischen übersetzt von Gerd Hintermaier-Erhard



Springer Spektrum

Inhalt

Einleitung 3

DIE ANFÄNGE

01 Geburt der Erde 4
 02 Unser Begleiter, der Mond 8
 03 Die Hölle auf Erden 12
 04 Das Datierungswettrennen 16
 05 Die Geschichte dreier Planeten 20
 06 Planet des Lebens 24

VOM INNEREN DER ERDE

07 Reise zum Mittelpunkt der Erde 28
 08 Ein Blick ins Erdinnere 32
 09 Der magnetische Erdkern 36
 10 Der mobile Erdmantel 40
 11 Superplumes 44
 12 Kruste und Kontinent 48
 13 Plattentektonik 52
 14 Seafloor Spreading 56
 15 Subduktion 60
 16 Vulkane 64
 17 Erdbeben 68
 18 Gebirgsbildung 72
 19 Metamorphose 76
 20 Das Schwarze Gold 80
 21 Schätze aus der Tiefe 84
 22 Das Geheimnis der Diamanten 88

OBERFLÄCHENSYSTEME

23 Kreislauf der Gesteine 92
 24 Formung der Landschaften 96
 25 Aktualismus und Katastrophismus 100

26 Sedimentation 104
 27 Meeresströmungen 108
 28 Atmosphärische Zirkulation 112
 29 Wasserkreislauf 116
 30 Kohlenstoffkreislauf 120
 31 Klimawandel 124
 32 Eiszeiten 128
 33 Eisschilde 132
 34 Schneeball-Erde 136

DER LEBENDIGE PLANET

35 Geologische Zeiträume 140
 36 Stratigraphie 144
 37 Entstehung des Lebens 148
 38 Evolution 152
 39 Der Garten von Ediacara 156
 40 Diversifikation 160
 41 Dinosaurier 164
 42 Massenaussterben 168
 43 Anpassung 172
 44 Chemofossilien 176
 45 Anthropozän 180

DIE ERDE IN DER ZUKUNFT

46 Künftige Ressourcen 184
 47 Zukünftiges Klima 188
 48 Wohin geht die Evolution? 192
 49 Zukünftige Kontinente 196
 50 Das Ende der Erde 200

Glossar 204

Index 206

Einleitung

Es ist ein wunderbarer Planet, auf dem wir leben. In glücklichen Momenten bestaunen wir seine Schönheit, stehen ehrfürchtig vor seiner Großartigkeit und sind dankbar für seine Gaben. Aber die meiste Zeit unseres Lebens hasten wir geschäftig auf der Oberfläche herum und vergessen zwei wichtige Dimensionen: Tiefe und Zeit. Auf diese möchte ich in diesem Buch aufmerksam machen.

Überlegen Sie einmal, was unter Ihren Füßen liegt – nicht nur die vertraute Erde und das Gestein der Deckschichten, sondern ganz tief. So nah wie die Distanz, die viele von uns täglich pendeln, liegt ein Ort, wo noch niemand war und wo Temperatur- und Druckbedingungen herrschen, die wir uns kaum vorstellen können. In einer Entfernung, kürzer als ein Transatlantikflug, würden Sie sich in einer glühenden Welt von geschmolzenem Metall wiederfinden. Die Erde liegt nicht einfach da wie ein Betonklotz, auf dem wir herumlaufen. Sie ist ein lebendiger, dynamischer Planet. Feste Gesteinsmassen driften mit den Kontinenten, Vulkane brechen aus, und der unermessliche tiefe Erdmantel liefert langsam aber unablässig Material nach.

Auch sind die Gesteine unter der Oberfläche nicht immun gegen die Prozesse, die über ihnen stattfinden. Wasser, Luft und das Leben selbst sind in ständiger dynamischer Interaktion mit der Geologie. Ohne Ozeane gäbe es keine Kontinente, ohne Leben keine Atmosphäre und kein lebensfreundliches Klima. Die natürlichen Kreisläufe unseres Planeten haben das Leben über Jahrmilliarden gefördert. Wenn wir sie stören, dann auf eigene Gefahr.

Die andere Dimension, die sich durch das Verständnis der Prozesse auf und in unserem Planeten auftut, ist die der Zeit – nicht im Sinne von Mittagszeit oder vielleicht Lebensspanne, sondern von geologischen Zeiträumen. Wir müssen unsere Vorstellung von Zeit radikal ändern, um mit Dutzenden und Hunderten von Jahrmillionen umgehen zu können, aber nur so können wir unsere Heimat verstehen. Sodann erkennen wir, dass alltägliche Prozesse, wenn sie über geologische Zeiträume ablaufen, Bergketten aufbauen und zerstören, Ozeanbecken aufreißen und Kontinente auseinander driften lassen können. In geologischen Zeiten können neue Arten entstehen oder aussterben. Unsere menschliche Existenz – kaum eine Sekunde auf dem Zifferblatt der geologischen Uhr – hat bereits den Planeten bis zur Unkenntlichkeit verändert. Vielleicht werden wir unsere Welt ja freundlicher behandeln, wenn wir sie besser verstehen.

01 Geburt der Erde

Wir alle bestehen aus Sternenstaub. Die allerersten Wasserstoff- und Heliumatome sind beim Big Bang, dem Urknall, vor etwa 13,7 Milliarden Jahren entstanden. Durch Fusionsprozesse bildeten sich daraus in Generationen von Sternen Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff, die Bausteine unseres Körpers, ebenso Silizium, Aluminium, Magnesium, Eisen sowie alle übrigen Elemente, die unseren Planeten aufbauen.

Zeugen des Sternenstaubs Am Ende ihres Lebens blähen Sterne sich auf und sprengen ihre äußere Hülle ab. Massereiche Sterne brechen unter ihrer eigenen Last zusammen und hauchen in einer gigantischen Supernova-Explosion ihr Leben aus. Vom stolzen Stern bleibt nur noch eine Aschewolke übrig, aus der wieder neue Sterne und Planeten geboren werden, und so ist letztlich auch unser Sonnensystem entstanden. Jedes Molekül in unserem Körper besteht aus Atomen, die einst Bestandteil eines Sterns waren. Jedes Goldatom in einem Ring am Finger ist in einer Supernova entstanden.

Die Anwesenheit von Zerfallsprodukten kurzlebiger radioaktiver Isotope in alten Meteoriten verweist darauf, dass diese Elemente einer benachbarten Supernova entstammen, die wohl nur kurz vor der Entstehung des Sonnensystems explodiert ist. Und in der Tat könnte es so eine Explosion gewesen sein, die den beginnenden Kollaps des solaren Nebels auslöste.

Akkretion Sobald Gas und Staub in dem sanft rotierenden Nebel in Richtung Zentrum gezogen werden, wo sich am Ende ein neuer Stern entzünden wird, sorgt der Drehimpuls des Gebildes dafür, dass sich seine Materie zu einer Scheibe abflacht. Lange Zeit war das bloße Theorie, bis man mit immer leistungsfähigeren Teleskopen eine Reihe von Sternen-Kinderstuben entdeckte, wo sie ihre Bestätigung fand. So umgibt den Stern *Beta Pictoris* eine Scheibe aus Staub und Gesteinspartikeln, die wahrscheinlich dabei ist, sich zu Planeten zusammenzuballen. Die

Zeitleiste

4,6 Mrd. Jahre

Vermutliche Supernova-Explosion; Solarnebel beginnt zu kontrahieren

4,567 Mrd. Jahre

Alter von Chondren in Meteoriten, den ersten Feststoffen im Sonnensystem

4,54 Mrd. Jahre

Die Protoerde erreicht eine Größe, bei der Schmelzvorgänge beginnen und der Erdkern sich differenziert

4,527 Mrd. Jahre

Entstehung des Mondes

Einen fallenden Stern auffangen

Die ersten, in dem jungen Solarnebel sich bildenden festen Partikel waren Chondren. Das sind kleine Silikatkügelchen im Millimeter- bis Zentimeterbereich. Vielleicht sind sie als Schmelztröpfchen entstanden, als Silikatstaub auf etwa 1500 °C erhitzt worden war, entweder aufgrund der Nähe

zur jungen Sonne oder durch radioaktiven Zerfall. Sie finden sich in fast 80 % aller niedergegangener Meteoriten und ihr Alter ist mit hoher Genauigkeit bestimmt worden. Mit 4,567 Milliarden Jahre ($\pm 500\,000$ Jahre) sind sie die ältesten Objekte im Sonnensystem.

Entdeckung immer neuer so genannter „Exoplaneten“, die längst das halbe Tausend erreicht hat, zeigt, dass die Bildung von Planeten häufig mit Sternentstehung einhergeht.

Es ist Konsens, dass die Planeten des Sonnensystems durch Akkretion entstanden sind, d.h. durch Zusammenballung kleiner und größerer Partikel. Der Beginn dieses Prozesses ist am schwersten zu verstehen, da die Massenanziehung zu diesem Zeitpunkt noch zu gering war, um die Klumpen zusammenzuhalten; und durch die Kollisionen hätten die Brocken eher wieder zerfallen müssen. Möglicherweise verhielt sich die Zusammenballung der Partikel wie eine kinetische Flüssigkeit, in der der Zusammenhalt den gelegentlichen Ausbruch und Verlust von Materie übertraf. Sobald die relativen Geschwindigkeiten der Klumpen weit genug abgesunken waren, überwog die Kraft der Zusammenballung. Als dann die Durchmesser den Meterbereich überschritten hatten, übernahm die Schwerkraft das Regiment, so dass immer mehr Materie angezogen wurde.

Auftrennung Die Schwerkraft, die Wärme des radioaktiven Zerfalls und die durch Kollisionen erzeugte Reibungswärme führten zu Schmelzprozessen, wobei die schweren Elemente wie Eisen und Nickel nach unten sanken, um im Zentrum des Protoplaneten einen Kern zu bilden, der in etwa Kugelform besaß und zwischen Dutzenden und Hunderten von Kilometern Durchmesser hatte. Dieser Himmelskörper

4,42 Mrd. Jahre

Älteste Mineralkörner der *Apollo*-Proben

4,404 Mrd. Jahre

Älteste, auf der Erde gefundene Minerale. Möglicher Hinweis auf Wasser

4,28 Mrd. Jahre

Älteste erhaltene Gesteine, möglicherweise von einem Tiefseeschlot, Fundort Hudson Bay (Kanada)

3,85 Mrd. Jahre

Älteste erhaltene Sedimentgesteine, Fundort Grönland

Chemiebaukasten der Sterne

Sterne sind Fusionsreaktoren. Wie in einer Wasserstoffbombe verschmelzen die im Universum häufigsten Elemente – Wasserstoff und Helium – zu schwereren Elementen. Die dabei frei werdende Energie lässt die Sterne strahlen. Sterne mittlerer Größe erzeugen die für das Leben wichtigen Elemente Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und auch die anderen häufigen Elemente der Erde wie Silizium, Aluminium, Kalium, Natrium, Calcium und Magnesium. Mit zunehmendem Alter entlässt der Stern diese Elemente ins All. Manche Sterne

produzieren so viel Kohlenstoff, dass sie von Rußwolken umgeben sind. Der Endpunkt der Elemententwicklung ist Eisen. Je schwerer das Element, umso mehr Energie kostet es den Stern. Sobald das Innere eines Sterns in Eisen übergegangen ist, endet die Fusion. Die Schwerkraft übersteigt den Strahlungsdruck und der Stern kollabiert. Zeitgleich zerreißt es den Stern in einer gewaltigen Explosion, bei der alle Elemente entstehen, die schwerer als Eisen sind – bis hin zum Uran.

per war wohl in der Lage, verbliebene Reste an Staub und Fragmenten anzuziehen, aus denen sich weitere Protoplaneten bilden konnten. Kollisionen zwischen diesen Objekten dürften zwar seltener, aber wesentlich heftiger gewesen sein.

Sonnenwind Wahrscheinlich dauerte es nur rund 10 000 Jahre, bis so viel Materie zusammengedrückt worden war, dass Temperaturen erreicht waren, bei denen Fusionsreaktionen einsetzten und die Sonne zu scheinen begann. Die Folge war ein starker Sonnenwind von Partikeln, der durch das junge Sonnensystem „wehte“. Es ist anzunehmen, dass er jegliche Atmosphäre aus Wasserstoff und Helium von den Planeten wegfegte, um blanke Gesteinsoberflächen zu hinterlassen. Der Großteil an Gasen sammelte sich in größerer Entfernung von der Sonne, um die Gasriesen Jupiter und Saturn zu bilden. Flüchtliges Material wie Methan und Wasserdampf kondensierte noch weiter draußen. Daraus entstanden die Eisplaneten am Rand des Systems: dem Pluto ähnliche Kleinplaneten, Eismonde, Objekte des Kuipergürtels sowie die Kometen.

Ein neuer Planet Die junge Erde „wuchs“ heran. Ihr Inneres war zu diesem Zeitpunkt größtenteils geschmolzen, im Zentrum lag ein Metallkern und darüber ein einfacher Silikatmantel. Als etwa 40 Prozent heutiger Masse erreicht waren,

bewirkte die zunehmende Gravitation, dass auch zunehmend atmosphärische Gase zurückbehalten wurden, während gleichzeitig ein vom Erdkern erzeugtes Magnetfeld die Strahlung der Sonne abschirmte und die junge Atmosphäre schützte. Letztere enthielt hauptsächlich Stickstoff, Kohlendioxid und Wasserdampf.

Auf den nächsten Seiten erfahren wir, wie die Akkretion weiterging bis hin zum Einschlag eines Großkörpers, der zur „Geburt“ des Mondes führte. Als die junge Erde allmählich abkühlte, konnte an ihrer Oberfläche erstmals flüssiges Wasser existieren. Während ein Teil des Wassers wohl aus den Vulkanen stammte, erreichte sehr viel Wasser mit den aus Eis bestehenden Kometen sowie mit den Gesteinen der Meteoriten und Asteroiden die Erde. Diese bis heute andauernde Stoffzufuhr könnte man als „Rest-Akkretion“ bezeichnen. In klaren dunklen Nächten sieht man häufig Sternschnuppen. Dies sind kleine Festpartikel, die in der Reibungshitze der Atmosphäre verglühen – größere schaffen es bis zum Erdboden. Obwohl die meisten sehr klein sind, addiert sich ihre Masse auf jährlich zwischen 40 000 und 70 000 Tonnen und es setzt sich der Prozess fort, der zur Bildung der Erde führte.

02 Unser Begleiter, der Mond

Als die Erde junge 20 Millionen Jahre alt war, ereilte sie der katastrophalste Einschnitt in ihrer Geschichte. Mit rund 48 000 km/h kollidierte sie mit einem anderen Protoplaneten von ungefähre Marsgröße! Der Einschlag ließ die Erde schmelzen, gleichzeitig aber erhielt sie einen Begleiter, der die Jahreszeiten stabilisierte und dem Leben Entfaltung bot: der Mond.

Lange Zeit wurde spekuliert, wie der Mond entstanden sein könnte. Noch bevor sich die Theorie der Kontinentaldrift durchsetzen konnte, glaubten einige, dass sich das Material für den Mond an der Stelle des heutigen Pazifiks von der Erde gelöst hätte. Andere meinten, er wäre in ähnlicher Weise wie die Planeten als Protomond durch Akkretion entstanden oder die Erde hätte ihn durch ihre Schwerkraft beim Vorbeiflug eingefangen. Nichts davon ließ sich jedoch mit seinen Bahndaten in Einklang bringen.

Ganz die Mutter Der Wahrheit näher kam man erst, als *Apollo*-Astronauten die ersten Mondproben mitbrachten. Die Mondgesteine glichen verblüffend den Basalten und Mantelgesteinen der Erde. Die „DNA-Profil“ von Mond und Erde waren identisch.

Computersimulationen halfen den Forschern, neue Theorien zur Mondentstehung zu formulieren. Ein anderer Protoplanet könnte sich an einem so genannten Lagrange'schen Punkt vor oder hinter unserem Planeten entwickelt haben, in etwa gleicher Entfernung zu Erde und Sonne. Bezog er seine Materie aus demselben Staubring des Sonnennebels, würde es erklären, warum er die gleiche Zusammensetzung wie die Erde hatte. Als er größer wurde, geriet seine Umlaufbahn ins Ungleichgewicht und kollidierte mit der Erde. Sein (inoffizieller) Name lautet Theia, nach einer Titanin der griechischen Sagenwelt, der Mutter der Mondgöttin Seline.

Zeitleiste

4,527 Mrd. Jahre

Zeitpunkt, an dem etwa der den Mond hervorbringende Impakt geschah

4,42 Mrd. Jahre

Ältestes Mineralkorn des Mondgesteins

4,36 Mrd. Jahre

Ältestes Mondgestein

Kosmischer Crash Theia war mit etwa 16 km/s unterwegs, als sie in einem gewaltigen Feuerball in die Erde einschlug. Innerhalb Sekunden fegten unglaubliche Druckwellen die Atmosphäre weg. Unmittelbar danach verdampfte Theias Mantel sowie Teile der Erde und wurden in das All geschleudert. Auch ein Großteil von Theias Metallkern umkreiste die Erde und vereinigte sich in einem zweiten Impakt mit dem irdischen Kern. Der Rest verflüchtigte sich, einen Feuerschweif geschmolzenen Gesteins hinter sich herziehend, in den Raum hinaus. All das passierte an einem Tag. Aus der Ferne betrachtet, musste es ein unglaubliches Szenario gewesen sein.

Ein erheblicher Anteil des ausgeworfenen Materials fiel zur Erde zurück, aber es blieb genug übrig, um einen hell leuchtenden Ring entlang des irdischen Äquators zu bilden. Nachdem er abgekühlt war, kondensierte er zu Festpartikeln, die sich in den folgenden Dekaden zum Mond zusammenfügten. Einige der Überraschungen, die die Zusammensetzung des Mondgesteins bereit hielten, können erklärt werden, wenn man das Silikatgestein im Vakuum verdampft und kondensieren lässt.

Ein zweiter Mond Möglicherweise hat der Mond während seiner Akkretion nicht alle Materie eingesammelt. Es gibt Vermutungen darüber, dass gleichzeitig ein zweiter Mond mit etwa 1000 km Durchmesser entstanden war und für einige Millionen Jahre die Erde umkreiste, ehe er sich letztlich in einem „sanften“ Aufprall mit dem (heutigen) Mond vereinte. Wenn dieser Impakt auf der heute abgewandten

Eugene Shoemaker (1928–1997)

Gene Shoemaker war einer der ersten Mondgeologen. Er untersuchte den Meteoritenkrater in Arizona und zog daraus den Schluss, dass die meisten Mondkrater durch Meteoriteneinschlag und nicht durch Vulkane entstanden waren. Er hoffte auf eine Astronautenkarriere, kam aber aus medizinischen Gründen nicht zum Zug.

Trotzdem wuchs ihm eine wichtige Rolle zu, indem er die *Apollo*-Landepunkte auszusuchen und die Astronauten zu trainieren hatte. Nach seinem tödlichen Unfall setzte 1999 die Mondsonde *Lunar Prospector* ein paar Gramm seiner Asche auf dem Mond aus.

4,1–3,9 Mrd. Jahre

Große Meteoritenschauer erzeugen die kreisförmigen *Maria*

3,6 Mrd. Jahre

Der Mondkern erstarrt und das Magnetfeld bricht zusammen

3,1 Mrd. Jahre

Letzte größere Basalteruptionen in den *Maria*

Seite des Mondes stattfand, könnte dies auch deren um 50 km dickere Kruste sowie den leicht abweichenden Chemismus der beiden Seiten erklären.

Als die Mondkruste zu erstarren begann, wurden bestimmte Elemente zwischen Kruste und Mantel eingeschlossen. Dazu zählten große Mengen Kalium (K), Seltene Erden (REE = *rare earth elements*) und Phosphor (P), was zu dem Begriff des KREEP-reichen Magmas führte. Im Falle der Akkretion eines weiteren kleinen Mondes auf der erdabgewandten Seite dürfte Material der aufgeschmolzene Seite bis zur uns zugewandten Seite gepresst worden sein und sie mit KREEP-Material angereichert haben.

Kurze Tage, klare Nächte Theias Einschlag hat die Erdrotation vermutlich beschleunigt. Die Tageslänge unmittelbar nach dem Impakt betrug nur fünf Stunden und hat sich seither beständig verlängert. Der neugebildete Mond dürfte zunächst viel näher um die Erde gezogen sein und er erschien rund 15 Mal so groß wie heute – eine spektakuläre Erscheinung wäre er gewesen, hätte man damals auf der rotglühenden Erdoberfläche gestanden. Auch die Gezeitenkräfte hätten ganz anders an der Erde gezerrt, wenngleich keine Meere existierten, die das Phänomen gezeigt hätten. Andererseits zog und drückte der Mond an dem subkrustalen Magma und erhöhte dadurch die vulkanische Aktivität, sobald er vorbeizog.

Seitdem hat sich der Mond durch die Einwirkung der Gezeitenreibung immer weiter entfernt. In wenigen Millionen Jahren fixierte die Gravitation der Erde den Mond dergestalt, dass er uns immer dieselbe Seite zuwendet. Lasermessungen, welche die von den *Apollo*-Missionen zurückgelassenen Reflektoren nutzen, zeigen, dass sich der Mond jährlich um 3,8 cm entfernt.

Plötzlich wurde mir klar, dass diese winzige hübsche, blaue Erbse die Erde war. Ich spreizte einen Daumen ab, kniff ein Auge zu – und der Daumen verdeckte die ganze Erde. Und doch fühlte ich mich nicht wie ein Riese, sondern klein, ganz klein.

Neil Armstrong

Zerstörer und Beschützer Möglicherweise gab es schon ansatzweise primitive Lebensformen, bevor der Crash passierte. Wenn es so war, wurden sie komplett ausgelöscht und es musste eine Weile vergehen, ehe Vulkanismus und aufschlagende, aus Eis bestehende Meteoriten wieder für einen Neustart von Atmosphäre und Hydrosphäre sorgten. Aber die Geburtswehen und der erzwungene Aufschub waren es wert. Ohne Mond gäbe es keine Gezeiten, auch die Erdachse wäre instabil – sie würde in unsteten Intervallen ihre Lage ändern, würde zum Beispiel mit einem Pol zur Sonne weisen und damit eine ganze Erdhälfte in permanente Dunkelheit tauchen. Ja, und nicht zuletzt müssten wir auf dieses vielbesungene „Objekt“ am Nachthimmel verzichten...

Suche nach Wasser

Nach Abschluss der *Apollo*-Missionen gab es in der Erforschung des Mondes eine lange Unterbrechung. Erst in jüngerer Zeit erreichten mehrere unbemannte Sonden erneut den Mond – vornehmlichstes Ziel: die Suche nach Wasser. *Lunar Prospector* wies in der Umgebung beider Pole reichlich Wasserstoff nach und stieß Spekulationen an, dass sich in Schattenbereichen der Krater Wassereis erhalten hätte. Im Jahr 2009 ließen die Amerikaner die Sonde *US LCROSS* in einen Krater nahe des Südpols abstürzen, wobei eine Staub-

wolke aufgewirbelt wurde (allerdings kleiner als erwartet), die etwa 155 kg Wassereis in Form kleiner Kristalle enthielt. Die indische Sonde *Chandrayaan 1* konnte mithilfe von Radar unter der Mondoberfläche nahe des Nordpols Wassereis nachweisen. Diese Entdeckungen könnten durchaus wichtig sein, da dadurch für künftige Missionen Treibstoff etwa für Brennstoffzellen und vielleicht auch Wasser für geplante Siedlungen verfügbar wäre.

03 Die Hölle auf Erden

Während der ersten 700 Millionen Jahre war die Erde alles andere als ein angenehmer Ort. Nicht umsonst trägt dieses Äon den Namen Hadäikum, nach dem griechischen Hades (Hölle). Es war eine Zeit permanenter Meteoriteneinschläge und Vulkanausbrüche. Zeitweise bestand die komplette Erdoberfläche aus flüssigem Magma. Es gab keinerlei Atmosphäre, die Ozeane waren verdunstet und Wasser existierte nur in Dampfform. So war er nun mal, der Beginn der Erdgeschichte.

Eine kurze Geschichte des Mondes Vor 4 Milliarden Jahren war das junge Sonnensystem ein höchst gefährlicher Ort. Mit dem Verschmelzen der kleineren Objekte wurden die Einschläge zwar seltener, aber heftiger. Diese Episode ist bekannt unter dem Begriff des „Großen Meteoritenschauers“, der bis vor etwa 3,85 Milliarden Jahre anhielt. Spuren dieses Dauerfeuers haben sich auf der Erdoberfläche kaum erhalten, ganz im Gegensatz zur wenig verwitterten Oberfläche des Mondes.

Die großen dunklen Flecken, die uns der Mond heute zeigt, gehen auf dieses letzte „Große Bombardement“ zurück. Es sind dies die *Maria*, die lunaren „Meere“. Kein Schiff hat sie je durchkreuzt, obwohl sie flüssig waren – Seen aus glutflüssiger Lava. Sie sind die Folge großer basaltischer Eruptionen aus dem Mondinneren in den riesigen, durch Meteoriteneinschläge entstandenen Becken. Wegen ihres flachen Reliefs waren sie ideale Landeplätze für die *Apollo*-Landefähren. Die daraus mitgebrachten Proben waren im Vergleich zu irdischen Standards alt. Selbst die jüngsten Lavabrocken aus den *Maria* sind immer noch 3,1 Milliarden Jahre alt. Die trockene, gaslose Mondoberfläche hat Merkmale überliefert, die auf der Erde längst verschwunden wären.

Uralte Oberfläche Die helleren Bereiche um die *Maria* und ein Großteil der erdabgewandten Seite sind lunare Hochländer mit den ältesten Gesteinen, älter als alle Gesteine der Erde. Viele sind durch die nachfolgenden Impakttereignisse zerrüt-

Zeitleiste

4,45 Mrd. Jahre

Beginn der Krusten-
erstarrung

4,404 Mrd. Jahre

Ältestes datiertes Mineral Korn

4,28 Mrd. Jahre

Vermutetes Alter der
Gesteine des Nuvvuagittuq-
Grünsteingürtels

tet und verändert. Dennoch gibt es helle Bereiche, die zu den Resten der primordiales, also ersten Kruste des Mondes zählen. Die Astronauten von *Apollo-15* fanden ein Stück davon und nannten es „Genesis-Gestein“. Es besteht aus Anorthosit, das sich vermutlich während des Kristallwachstums im schmelzflüssigen Magma gebildet hatte. Sein Alter lag bei 4,1 Milliarden Jahre, jünger als erwartet. Proben, die *Apollo-16* mitbrachte, waren 4,36 Milliarden Jahre alt, aber auch sie sind jünger als das vermutete Alter der ältesten Mondkrustengesteine. Das älteste Mineralkorn vom Mond ist ein Zirkonkristall mit 4,42 Milliarden Jahre.

Reichtümer vom Himmel Obwohl die Einschlagkrater auf der Erde als Folge des letzten „Großen Meteoritenschauers“ längst verschwunden sind, verraten chemische Spuren, dass diese Episode stattgefunden haben muss. Als sich der Metallkern der Erde in das Zentrum abgesondert hatte, riss er die meisten Schwermetalle mit sich, die sich leicht in Eisen „lösen“ – unter anderem Gold, Platin und Wolfram. Praktischerweise tritt Wolfram nur in zwei Isotopen, W-184 und W-182, auf. Bei der Bildung des Erdkerns wurde nahezu das gesamte Wolfram dem Mantel entzogen. Danach existierte dort nur noch eine einzige Wolframquelle, die des radioakti-

Das älteste Gestein?

Sobald der Schnee in dieser abgelegenen Tundra an der Ostseite der Hudson Bay im nördlichen Quebec auftaut, sieht man die anstehenden Gesteine. Einige sind sehr alt. Don Francis und Jonathan O'Neill von der McGill University hofften darauf, hier im so genannten Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel 3,8 Milliarden Jahre alte Gesteine zu finden. Doch als die Wissenschaftler an der Carnegie Institution die neuesten Datierungsverfahren anwende-

ten, ergab sich ein Gesteinsalter von 4,28 Milliarden Jahre, und die Überraschung war groß. Sie hatten die ältesten Gesteine gefunden, die bis ins Hadäikum zurückreichen. Fast alle Gesteine des Aufschlusses sind umgewandelte Vulkangesteine, aber man fand auch Bändereisenerze – Gesteine, die in der Umgebung untermeerischer Hydrothermalquellen entstanden sind und deren Bildung wohl die Mitwirkung dort lebender Bakterien erforderte.

4,031 Mrd. Jahre

Alter des Acasta-Gneises

3,8 Mrd. Jahre

Ende des „Großen Meteoritenschauers“ und des Hadäikums