

Was uns die Mondsteine verraten haben



Die wissenschaftliche Erforschung des Mondes nach Apollo 11

Bei den Apollo-Missionen in den Jahren 1969 bis 1972 wurden insgesamt 381 Kilogramm Mondgestein zur Erde transportiert, die erstmals eine geochemische Charakterisierung des Erdtrabanten und damit auch einen Vergleich mit der Erde erlaubten. Zudem gelang es anhand der Apollo-Mondproben, Meteoriten vom Mond zu identifizieren, die unsere geochemische Datenbasis weiter vergrößern.

Von Herbert Palme

IN KÜRZE

- Alle Mondgesteine sind wasserfrei, es fehlen hydratisierte Minerale wie Amphibol, Glimmer oder Tonminerale.
- Die Isotopenverhältnisse von Mond und Erde sind identisch. Dagegen weisen der Mars und die Asteroiden in einigen Elementen andere Isotopenverhältnisse auf als Erde und Mond.
- Der Mond hat sich durch den Einschlag eines marsgroßen Protoplaneten auf der Uerde gebildet, so die derzeit bevorzugte Bildungshypothese. Diese Vorstellung steht jedoch im Konflikt mit neuen geochemischen Analysen.

Am 21. Juli 1969 um 3:51 Uhr (MEZ) setzte Neil Armstrong seinen Fuß auf den Mond – der erste Schritt eines Menschen auf einem fremden Planeten. In vollem Bewusstsein dieses historischen Augenblicks sprach Neil Armstrong, während er mit dem Fuß den Mondboden berührte, den berühmten Satz: »A small step for (a) man, a giant leap for mankind.« Damit hat er sich »in die Gruppe derjenigen eingereiht, die für alle Zeiten immer wieder zitiert werden« (Norman Mailer, 1971). Zur Frage, was Neil Armstrong genau sagte, siehe den Kasten rechts.

Aber haben wir es wirklich mit einem großen Sprung, einem »giant leap« zu tun, vergleichbar mit der Entdeckung Amerikas durch Kolumbus? Ist das der Beginn der Eroberung des Weltraums, der Errichtung von Mond- und Marsbasen? Was haben wir von dem »großen Sprung« zu erwarten? Oder ist die bemannte Raumfahrt eine Sackgasse?

Man wird heute im Rückblick die erste bemannte Mondlandung kaum als den Startpunkt für die Besiedlung des Mondes

oder anderer Planeten ansehen können. Vielleicht ist der Zeitabstand auch noch zu kurz, um das zu beurteilen. Weitere bemannte Weltraummissionen sind geplant, werden aber noch Jahre auf sich warten lassen. Abgesehen von ein paar »Idealisten«, welche die Zukunft der Menschheit an die Entwicklung der bemannten Raumfahrt knüpfen, scheint dieses Ziel unwirklicher denn je. Wir haben mit Klima und Wirtschaft andere Sorgen als Menschen auf den Mond zu schicken oder auf einem Asteroiden landen zu lassen, auch wenn Ex-US-Präsident George W. Bush den bemannten Marsflug ausgerufen hat.

Die Zukunft der bemannten Raumfahrt ist heute ungewisser denn je. Von Robotern gesammelte und zurückgebrachte Gesteinsproben reichen eigentlich für die Forschung aus. Ebenso lassen sich im Weltraum die meisten für dort geplanten Experimente, wenn nicht alle, von Automaten durchführen.

Auf der anderen Seite gibt es zurzeit eine gewisse Mondaufbruchstimmung. Neben den USA mit Clementine (1994)

Seinen Stiefelabdruck auf dem Mond
fotografierte am 21. Juli 1969 Edwin
»Buzz« Aldrin.



NASA

und Lunar Prospector (1998) beteiligen sich zunehmend auch andere Länder an zunächst nur unbemannten Mondmissionen. Die Europäer testeten mit der Raumsonde SMART-1 (2003–2006) neuartige Ionentriebwerke beim Flug zum Mond. Mit den japanischen Mondmissionen Hiten (1990) und Selene, auch als Kaguya bezeichnet (2007), und der indischen Mission Chandrayaan-1 (2008) sowie dem chinesischen Projekt Chang'e-1 (2007) sollte vor allem die technologische Reife dieser Länder demonstriert werden. Die Wissenschaft hatte allenfalls Alibifunktion. Am 18. Juni 2009 hoben mit Lunar Reconnaissance Orbiter und LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite) die jüngsten Mondmissionen der USA ab.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse des Apollo-Programms

Was von den Apollo-Mondlandungen geblieben ist, sind vor allem wissenschaftliche Ergebnisse, ungeachtet der ursprünglichen – nicht primär wissenschaftlichen – Motivation des Programms. Hier wurde

in mehrfacher Hinsicht ein großer Schritt vorwärts getan. Die Apollo-Missionen beeinflussten nicht nur die wissenschaftliche Erforschung des Mondes entscheidend, sondern lieferten auch wichtige neue Erkenntnisse für die Entwicklung des Sonnensystems insgesamt. Im Besonderen gilt dies für das Verständnis der

Entstehung und Entwicklung der inneren Planeten des Sonnensystems. Dieser Aspekt gewinnt im Hinblick auf die Entdeckung immer neuer Exoplanetensysteme zunehmend an Bedeutung.

Die wesentlichen durch die Apollo-Missionen erreichten Fortschritte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Was sagte Neil Armstrong wirklich?

Beim Betreten der Mondoberfläche passierte Neil Armstrong ein kleines Missgeschick, denn er sagte »a small step for man, a giant leap for mankind« was wenig sinnvoll ist, da es wörtlich übersetzt bedeutet »ein kleiner Schritt für die Menschen, ein großer Sprung für die Menschheit«. Eigentlich wollte er ja sagen »Ein kleiner Schritt für einen Menschen, ein großer Sprung für die Menschheit. Neil Armstrong hatte zunächst behauptet, er hätte ... »a small step for a man« gesagt, korrigierte sich aber später. Im Mitschrieb des »Apollo 11 Lunar Surface Journal«, zu finden unter history.nasa.gov/alsj/a11/a11.html, steht das »a« in Klammern »to honor Neil's intent«, wie es da heißt. Der Fehler von Armstrong zeigt natürlich, dass er mit seinen Gedanken nicht bei Sätzen für die Ewigkeit war. Die augenblickliche nicht unkritische Situation hatte seine volle Aufmerksamkeit in Anspruch genommen. Trotzdem wird Armstrongs Ausspruch richtig in die Geschichtsbücher eingehen. Jeder weiß, was gemeint ist. Man kann aber auch vermuten, dass Armstrong sich nicht besonders viele Gedanken über seinen einstudierten Satz gemacht hat.

■ **Der Mond hat kein Wasser:** Ein erstes Ergebnis der Untersuchungen von zurückgebrachten Mondproben war das fast vollständige Fehlen von gebundenem Wasser. Es gibt auf dem Mond weder Minerale der Amphibolgruppe noch Zeolithe, Glimmer oder Tonminerale, dagegen aber metallisches Eisen. Im Inneren von Kratern der Mondoberfläche existieren permanente Schattenzonen, die kein Sonnenstrahl erreicht. Das Wasser, das durch Einschläge von Meteoriten und Kometen auf der Mondoberfläche deponiert wurde, sollte sich dort sammeln. Die Fernerkundungssatelliten Clementine und Lunar Prospector fanden starke Hinweise auf Wasser in diesen Gebieten. Der eindeutige Nachweis von Wasser ist jedoch bislang noch nicht gelungen.

Selbst die sehr geringen Spuren von Wasser in den Mondgesteinen sind möglicherweise auf Kontamination in der irdischen Umgebung zurückzuführen. In jüngster Zeit fanden Forscher aber kleine Mengen von Wasser in orangen und grünen Glaskügelchen, die durch Vulkaneruptionen an die Oberfläche des Mondes gelangt sind. Hier lässt sich eine irdische Kontamination ausschließen. Vielleicht enthält das Innere des Mondes doch mehr Wasser als gewöhnlich angenommen wird.

Während des letzten bemannten Mondflugs von Apollo 17 im Dezember 1972 entstand dieses eindrucksvolle Mondpanorama. An dem etwa fünf Meter hohen gespaltenen Felsblock ist der Astronaut Harrison Schmitt zu sehen, der einzige Geowissenschaftler, der jemals den Mond betrat.

■ **Der Mond besitzt nur geringe Mengen an flüchtigen Elementen:** Neben Wasser sind auch die Konzentrationen leichtflüchtiger Elemente in Mondgesteinen wesentlich geringer als in irdischen Gesteinen. Elemente wie Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid, Chlor, Brom, Zink, Thallium, Blei, aber auch Natrium, Kalium, Rubidium und Cäsium zeigen in den Mondproben wesentlich niedrigere Gehalte als in vergleichbaren irdischen Proben. Warum der Mond nur so geringe Mengen an flüchtigen Elementen besitzt, hängt mit seiner Entstehung zusammen, ist aber nicht wirklich geklärt.

■ **Der Mond war am Anfang völlig oder zumindest zum größten Teil geschmolzen:** Ein zweites wichtiges Resultat der Apollo-Missionen war die Erkenntnis, dass der Mond kein primitiver, durch Zusammenballung kleiner Staubeilchen entstandener Planet ist. Vielmehr muss man annehmen, dass alle bisher untersuchten Mondsteine das Ergebnis von großräumigen Schmelz- und Kristallisationsvorgängen im Inneren des Mondes sind.

Ausgehend von der bereits mit freiem Auge erkennbaren Zweiteilung der für uns sichtbaren Mondoberfläche in dunkle und helle Bereiche ließen sich die dunklen Teile eisen- und titanreichen Basalten zuordnen, während die hellen Hochländer von aluminiumreichen Gesteinen dominiert werden. Diese helle Mondkruste enthält große Mengen an Anorthit, einem kalziumreichen Feldspat. Sie entstand, als das Magma abkühlte und sich in der Schmelze Kristalle bildeten. Da diese Kristalle eine geringere Dichte als das Magma aufwiesen, trieben sie an die Oberfläche

des ursprünglichen Magmaozeans und reicherten sich dort an. Da die Mondkruste im Mittel 30 bis 60 Kilometer dick ist, muss das in den Feldspäten befindliche Aluminium aus einem mondweiten tieferliegenden Reservoir in die Kruste extrahiert worden sein – ein wichtiger Hinweis auf globale Schmelzprozesse. Auch die Erde besitzt eine feldspatreiche Kruste; Feldspäte sind die häufigsten Minerale der kontinentalen Erdkruste und auch in der ozeanischen Kruste ziemlich häufig. Während der Anteil der Erdkruste an der Gesamtmasse der Erde nur weniger als ein Prozent beträgt, macht die Kruste beim Mond etwa zehn Prozent seiner Masse aus.

500 Millionen Jahre nach der Entstehung vor 4,56 Milliarden Jahren begann auf dem Mond die massive Eruption von Magmen, welche die riesigen Einschlagbecken der Vorderseite auffüllten. Da die lunaren Laven kein Wasser enthielten und nur einen relativ niedrigen Gehalt an Siliziumdioxid aufwiesen, waren sie extrem dünnflüssig. Sie überschwemmten große Gebiete des Mondes oft mehrfach. Auffallend waren bei den Basalten von Apollo 11 die für irdische Verhältnisse ungewöhnlich hohen Gehalte an Titan. Sie machen sich in einem großen Anteil des Minerals Ilmenit (eine Eisen-Titanoxid-Verbindung) in vielen Mondbasalten bemerkbar. Schon die Quellregion der Basaltmagmen musste erhöhte Titangehalte aufweisen. Man nimmt heute an, dass bei der Kristallisation des Magmaozeans die dichteren Eisenmagnesiumsilikate zusammen mit Eisen-Titanoxid abgesunken sind. Bei späterer Aufschmelzung dieses »Kumulates« entstanden dann die titanreichen Basalte.



»sculptured Hills«

■ **Aussagen zur globalen chemischen Zusammensetzung des Mondes:** Die Zusammensetzung des Mondes insgesamt ist trotz zahlreicher Analysen von Mondsteinen nicht gut bekannt. Es gibt bisher keine Gesteine, die auch nur annähernd die Zusammensetzung des gesamten Mondes oder des Mondmantels widerspiegeln. Dies steht im Gegensatz zur Erde, wo ursprüngliche Mantelgesteine durch tektonische Bewegungen als massive Peridotitkörper oder in Form von in Magmen eingeschlossenen Xenolithen an die Oberfläche gelangen. Die Abschätzungen über die chemische Zusammensetzung des Mondes sind somit wesentlich unsicherer als diejenigen über die Erde.

Eine Welt ohne Atmosphäre

Zum ersten Mal konnten die Forscher eine durch keine Atmosphäre geschützte Planetenoberfläche direkt untersuchen. Es bestand kurz nach den Analysen der ersten Mondproben kein Zweifel mehr, dass fast alle Mondkrater Einschlagkrater sind, was von einigen Forschern bis zuletzt in Frage gestellt worden war. Sogar die großen dunklen Mondmeere der Vorderseite sind durch Magmen aufgefüllte riesige Einschlagkrater. Das Studium von Impaktkratern im Sonnensystem erlebte durch die Apollo-Missionen einen großen Aufschwung. Die Häufung der radiometrisch bestimmten Alter der Hochlandgesteine bei 3,9 Milliarden Jahren wird von einigen Autoren mit einer zu dieser Zeit erhöhten Einschlagaktivität in Verbindung gebracht, einem »late heavy bombardment«. Ob es ein solches spätes Bombardement tatsächlich gegeben hat, ist noch nicht geklärt.

Der gesamte Mond ist von einer durch ständige Meteoriteneinschläge erzeugten, mehrere Meter dicken Staubschicht (Regolith) bedeckt. Die dominanten Gesteine der Mondoberfläche sind Impaktbrekzien, zusammengebackene mechanische Mischungen von durch Meteoriteneinschläge entstandenen Staub- und Steinkomponenten unterschiedlichster Herkunft.

Kosmische Strahlung verändert Mondgesteine

Da der Mond durch kein Magnetfeld geschützt wird, sind seine oberflächennahen Schichten der unabgeschirmten Einwirkung kosmischer Strahlung ausgesetzt. Die hochenergetische kosmische Strahlung kann dabei Atomkerne spalten und so neue chemische Elemente bilden, unter anderem zum Beispiel Edelgase oder radioaktive Isotope wie Aluminium-26. So lässt sich die Zeitdauer, die ein Stein der Höhenstrahlung ausgesetzt war, bestimmen. Diese so genannten Expositionsalter spielen bei der Datierung von Kratern eine große Rolle.

Ein ständig von der Sonne ausgehender Strom von Atomen, der Sonnenwind, wird in die Mineralkörner der obersten Schichten des Regolith implantiert. Dieser Sonnenwind macht sich vor allem in den leicht nachzuweisenden Edelgasen, insbesondere Helium-3 bemerkbar. Die Bedeutung der Oberflächenprozesse auf dem Mond lässt sich unmittelbar auf andere planetare Oberflächen ausweiten. Es gibt sogar Meteoriten, die mit Sonnenwindprodukten beladen sind und ähnlich wie der Mondstaub ihre Entstehungsgeschichte erkennen lassen.

Geophysikalische Experimente und Messungen

Der innere Aufbau des Mondes ließ sich vor allem durch die Seismometer, die bei fünf Apollo-Missionen auf dem Mond aufgestellt wurden, ermitteln. Dabei zeigte sich, dass es zu keinen größeren tektonischen Bewegungen im Inneren des Mondes kommt. Die Seismometer registrierten in der etwa acht Jahre dauernden Messzeit 1800 Meteoriteneinschläge, rund 30 kräftigere Beben in einer Tiefe von 100 Kilometern sowie 7000 sehr schwache Beben bei halbem Mondradius, die mit den durch die Erde induzierten Gezeitenkräften korreliert sind.

Viele der grundlegenden Fragen zur Struktur des Mondes sind noch ungeklärt. Gibt es überhaupt einen Mondkern, und wie groß ist er? Ist er flüssig oder fest? Die Größe eines möglichen metallischen Mondkerns wird auf Grund von Masse, Trägheitsmoment und geomagnetischen Messungen auf weniger als 400 Kilometer Durchmesser geschätzt, was zu weniger als fünf Prozent der Mondmasse führen würde.

Ist die Mondkruste einheitlich zusammengesetzt? Wie tief reichte der Magmaozean? Gibt es einen primitiven unteren Mondmantel, der niemals in Schmelzprozesse involviert war?

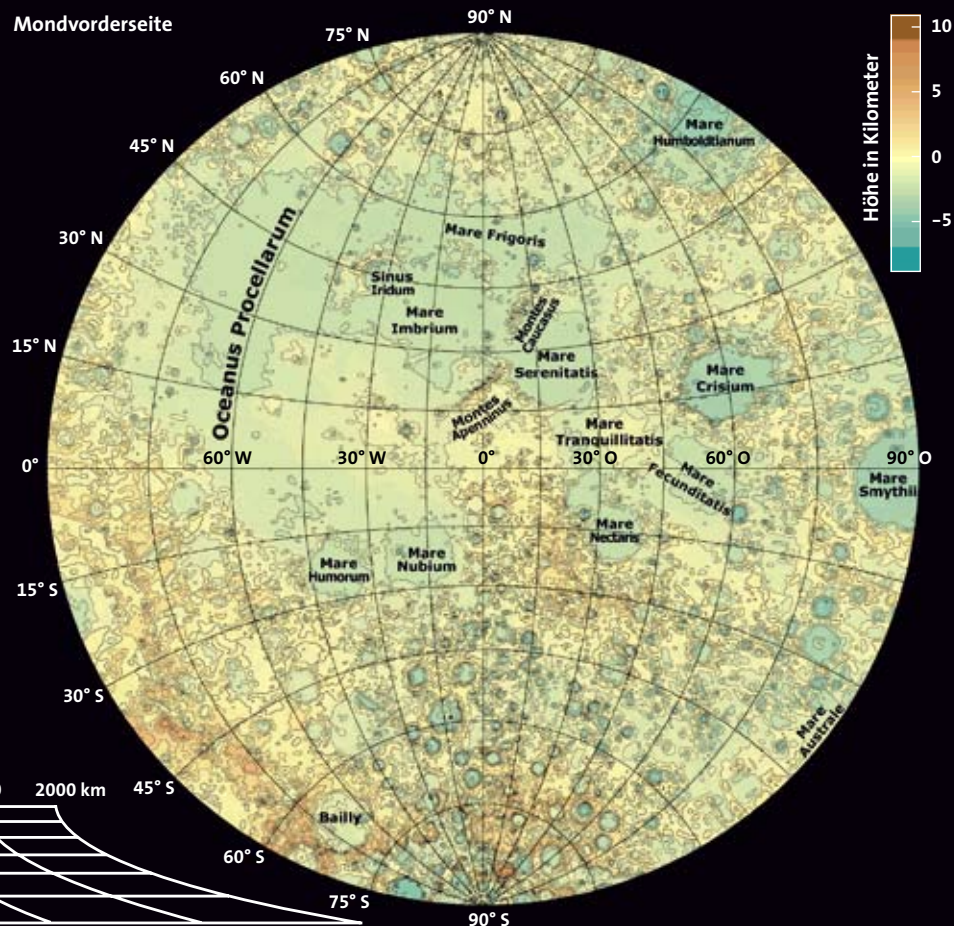
Aus Wärmeflussmessungen, wie sie bei Apollo 15 und 17 durchgeführt wurden, lassen sich im Prinzip die Gehalte von Thorium und Uran im Mondinneren feststellen. Beide Elemente sind radioaktiv und liefern bei ihrem Zerfall Wärmeenergie. Andere Wärmequellen gibt es nicht. Problematisch ist, dass der Wärmefluss an Stellen bestimmt wurde, die, wie man heute weiß, anomal hohe Konzentra-



östliches Massiv

südliches Massiv

Mit Hilfe des Laserhöhenmessers der japanischen Mondsonde Kaguya wurde diese präzise Karte der Mondtopografie aufgenommen, der sechs Millionen Messpunkte auf der Oberfläche zugrunde liegen. Die Höhenlinien sind im Abstand von einem Kilometer gezeichnet, die Genauigkeit der Höhenmessung beträgt fünf Meter. Der Unterschied zwischen Mondvorderseite (links) und Mondrückseite (rechts) tritt deutlich hervor. Auf der Vorderseite dominieren die durch Lava aufgefüllten »Mondmeere«, die deshalb recht glatt sind, während auf der Mondrückseite fast nur Einschlagkrater sichtbar sind.



tionen an Thorium und Uran besitzen. Somit gilt der gemessene Wärmefluss nicht als repräsentativ für den gesamten Mond.

Die Messungen der magnetischen Eigenschaften von Mondsteinen zeigten, dass der Mond einmal ein der heutigen Erde vergleichbares Magnetfeld besessen haben muss. Das heutige Magnetfeld des Mondes ist jedoch um mehr als einen Faktor 100 geringer als das der Erde.

Die bei den verschiedenen Apollo-Missionen aufgestellten Reflektoren erlauben eine genaue Bestimmung des Abstands von Erde und Mond mit Laserstrahlen. Heute ist der Mond auf Grund der Gezeitenwechselwirkung mit der Erde 1,5 Meter weiter von uns entfernt als zur Zeit der Apollo-Missionen. Dafür verlangsamte sich in dieser Zeit die Rotationsperiode des Blauen Planeten um 0,6 Millisekunden.

Die geringen Mengen an Mondproben, welche die NASA an die Forscher verteilt hatte, führten zu einem starken Wettbewerb. Um Mondmaterial zu erhalten, stellte die Raumfahrtbehörde große Anforderungen an die Qualität der Analysen. Sie führte ständig Vergleiche der Analyseergebnisse verschiedener Labore durch, und wer »schlechte« Analysen publizierte, be-

kam keine Mondproben mehr. Auf diese Weise erhöhte sich infolge der Untersuchungen von Mondproben auch die Qualität chemischer und isotopischer Analysen von nichtlunaren Gesteinen wesentlich. Dieses Nebenergebnis lässt sich gar nicht hoch genug einschätzen.

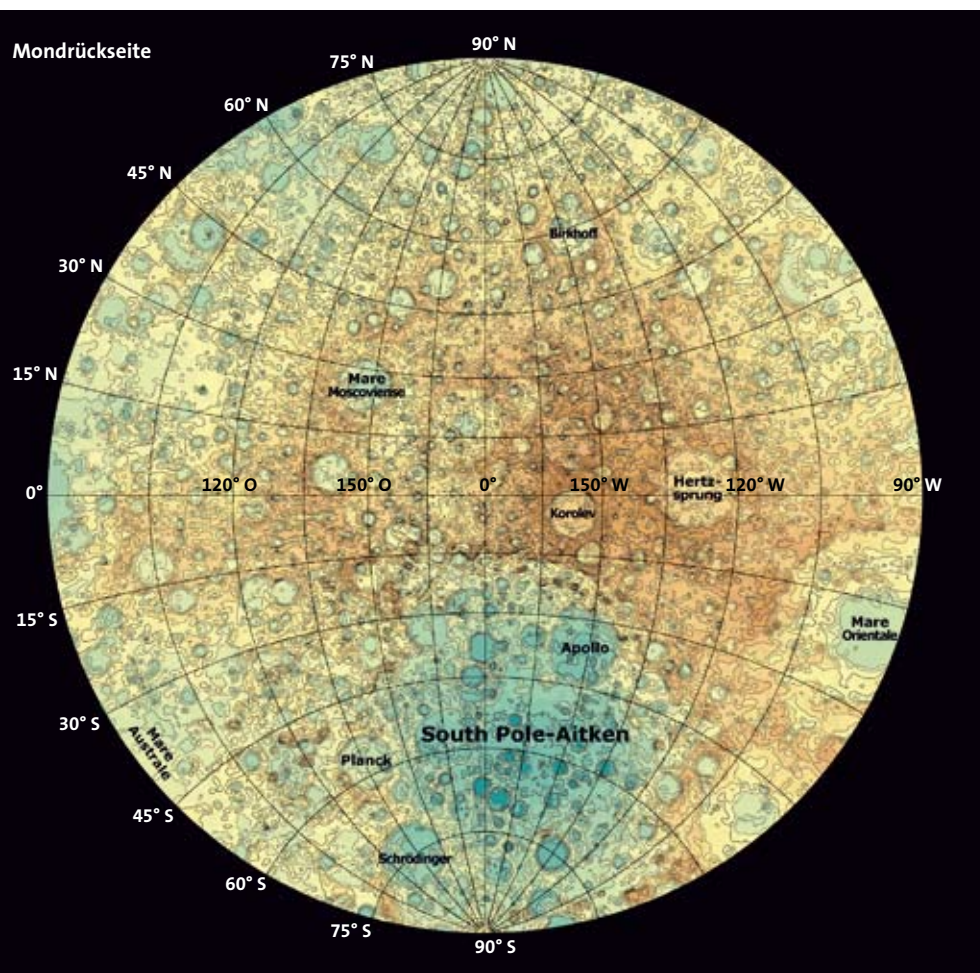
Die Mondforschung nach den Apollo-Missionen

In den Jahren nach den Apollo-Missionen waren es besonders zwei Aspekte, die weitere Fortschritte in der Mondforschung ermöglichten: Erstens die Entdeckung von antarktischen Mondmeteoriten und später auch von Mondmeteoriten aus der Sahara und anderen Wüsten. Zweitens die Ergebnisse der globalen Mondfernerkundungssatelliten Clementine und Lunar Prospector, die umfangreiche Daten über die Oberfläche des Mondes, insbesondere auch über die Rückseite und die Polgebiete, lieferten.

Im Jahre 1969 brachte eine japanische Expedition neun ungewöhnlich aussehende Steine aus der Antarktis zurück, die alle später als Meteoriten identifiziert wurden. Damit hatte sich eine neue, ergiebige Quelle für Meteoriten aufgetan. Jährliche

Expeditionen vor allem aus den USA und Japan konnten inzwischen mehr als 20000 Meteoriten in der Antarktis einsammeln. Ein seltsam aussehender, mit einer grünlichen Schmelzkruste überzogener Stein wurde im Jahr 1981 von einer amerikanischen Expedition mehr oder weniger zufällig mitgenommen. Der Geowissenschaftler Brian Mason von der Smithsonian Institution in Washington sah sich einen Dünnschliff an und erkannte sofort, dass es sich um ein Stück Mond handeln musste, denn das Gestein war ein buntes Gemisch aus Gesteinsbruchstücken, die in einer feinkörnigen Matrix eingebettet waren. Derartige Proben hatten auch die Apollo-Astronauten vom Mond mitgebracht. Dieser erste Mondmeteorit mit einer Masse von 31,5 Gramm erhielt die Bezeichnung ALHA 81005, wobei die ersten zwei Ziffern das Fundjahr angeben und ALHA für die Region Allan Hills steht (Bild rechts oben).

Eigentlich hatten die Japaner in der Antarktis mit dem Meteoriten Yamato 791197 bereits zwei Jahre zuvor einen Mondmeteoriten gefunden, doch sie erkannten erst nach der Identifizierung des Mondmeteoriten aus den Allan Hills, dass es sich dabei um ein Stück Mond handelt.



Der erste auf der Erde erkannte Mondmeteorit mit dem Namen ALHA 81005 wurde im Jahr 1981 in der Antarktis gefunden. Es ist eine so genannte Brekzie, ein aus unterschiedlichen Gesteinsbruchstücken zusammengesetztes Gestein.

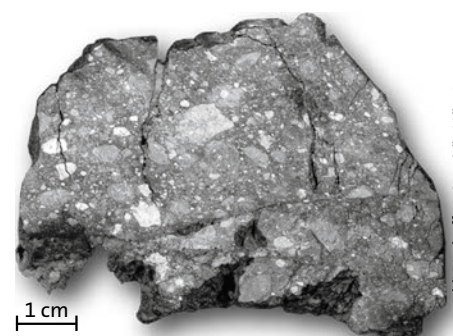
Dieser etwa sechs Zentimeter große Mondmeteorit mit der Bezeichnung Dhofar 911 wurde in der omanischen Wüste bei Dhofar während einer systematischen Meteoritensuche entdeckt. Er ist hier noch in Fundlage zu sehen.

Mondmeteoriten wurden durch kräftige Meteoriteneinschläge auf dem Mond mobilisiert und auf die Erde geschleudert. Es sind inzwischen mehr als 60 Mondmeteoriten bekannt. Der größte hat immerhin eine Masse von 13,5 Kilogramm. Die Reisedauer der Meteoriten vom Mond zur Erde lässt sich aus der Häufigkeit kosmogener, das heißt durch kosmische Strahlung gebildeter, Atomkerne ermitteln. Sie reicht von weniger als tausend Jahren bis hin zu etwa zehn Millionen Jahren.

Da die Ursprungsorte der Mondmeteoriten gleichmäßig über die Mondoberfläche verteilt sein sollten, müsste etwa die Hälfte dieser Meteoriten von der Rückseite des Mondes stammen. Dadurch erhalten wir Aufschluss über die Chemie, die Mineralogie und die Alter der Gesteine der Rückseite des Mondes. Ein Vergleich mit den Apollo-Proben zeigt, dass die Gesteine an den Apollo-Landestellen nur für einen kleinen Teil der Mondkruste repräsentativ sind. Untersuchungen an Mondmeteoriten enthüllen auch ein wesentlich größeres Spektrum in chemischer Zusammensetzung und Altersverteilung. So wurde jüngst das Erstarrungsalter eines meteoritischen Mondbasalts zu 2,7 Milliarden



Der Mondmeteorit Dar al Gani 262 aus der libyschen Wüste ist eine typische Mondbrekzie, eine verfestigte mechanische Mischung unterschiedlichster Komponenten. Ähnliche Gesteine findet man in der Umgebung irdischer Einschlagkrater.



Jahren bestimmt, fast eine halbe Milliarde Jahre jünger als die jüngsten Basalte der Apollo-Missionen. Offensichtlich war der Mond zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig erstarrt.

Clementine und Lunar Prospector

Schon die ersten Bilder der Rückseite des Mondes, im Oktober 1959 von der russischen Sonde Luna 3 aufgenommen, zeigten einen wesentlich geringeren Anteil an dunklen »Mondmeeren« als die uns vertraute Vorderseite. Die gängige Erklärung für das Fehlen von Marebasalten an der Rückseite ist die größere Krustendicke der Rückseite, die verhinderte, dass aus der Tiefe aufsteigende Magmen die Mondoberfläche erreichen konnten.

Clementine flog im Jahr 1994 zum Mond und kartierte auf ihrer polaren Umlaufbahn 95 Prozent der Mondoberfläche. Sie fand durch Radarmessungen Hinweise auf Wasser in den Schattengebieten von Kratern. Die Sonde Lunar Prospector war mit einem Neutronen- und einem Gamma-Spektrometer ausgestattet und beobachtete in den permanenten Schattenzonen des Mondes eine Reduktion des epithermalen Neutronenflusses, ein Hinweis auf die Anwesenheit von Wasserstoffatomen im Gestein (siehe hierzu den Artikel zur Marssonde Phoenix ab S. 40 in diesem Heft). Die Mission von Lunar Prospector endete mit dem gezielten Einschlag der Sonde in einer Gegend des Südpols, in der man Wasser vermutete. Die Forscher hofften, als Folge des Einschlags eine wasserdampfreiche Wolke nachweisen zu können. Das Ergebnis war negativ und der Nachweis von Wasser auf dem Mond ist somit noch nicht eindeutig erbracht (siehe Weblink am Schluss des Artikels).

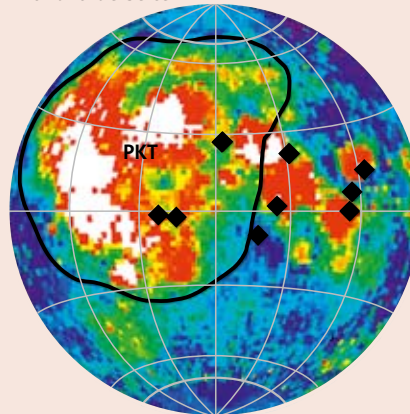
Lunar Prospector bestimmte mit seinen Instrumenten auch die globale Verteilung einiger chemischer Elemente auf der Mondoberfläche. Besonders gut funktioniert das für das radioaktive Thorium-232, das bei seinem Zerfall eine hochenergetische Gammastrahlung aussendet, die sich zuverlässig messen lässt. Auch die Verteilung von Eisen wurde von Lunar Prospector ermittelt. Alle Messungen wurden mit den im Labor erhaltenen Daten von Apollo-Proben kalibriert.

Aus diesen Daten ergab sich ein neues, wesentlich detaillierteres Bild der Zusammensetzung der Mondoberfläche. Im Kasten auf dieser Seite ist die Verteilung der Elemente Thorium und Eisen auf der

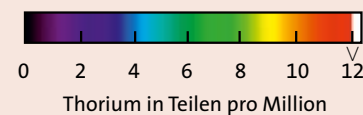
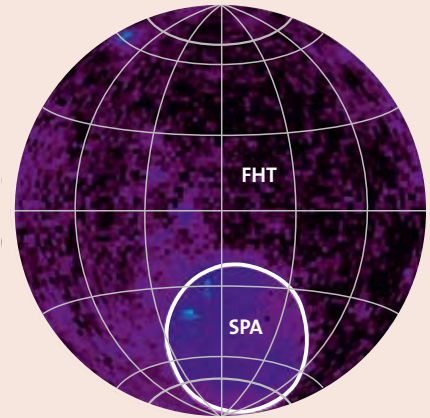
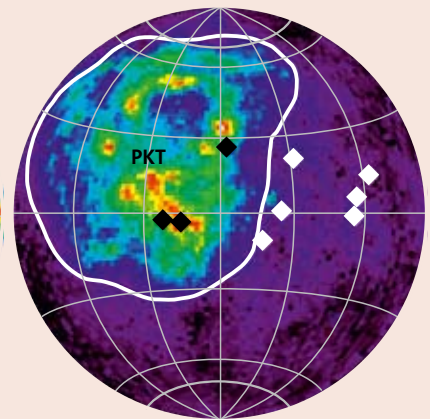
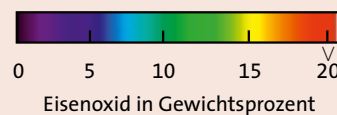
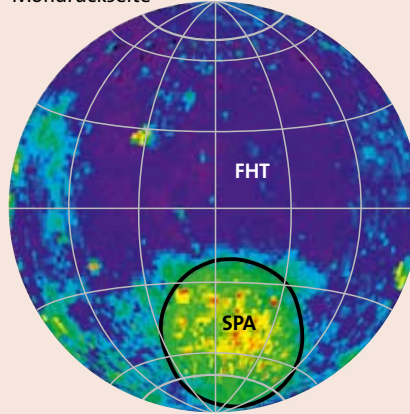
Verteilung wichtiger Stoffe auf der Mondoberfläche

Wie Eisenoxid (FeO) und Thorium über die Vorder- und Rückseite des Mondes verteilt sind, wurde aus den Daten der US-Raumsonde Lunar Prospector ermittelt. Auf den Karten lassen sich drei größere Bereiche identifizieren: Das Procellarum-KREEP-Terrain (PKT) mit hohen Gehalten an Thorium und FeO liegt im Nordwesten der Vorderseite. Das Feldspatreiche Hochland-Terrain (FHT) mit niedrigen Thorium- und FeO-Gehalten umfasst den größten Teil der Rückseite und größere Teile der Vorderseite und repräsentiert die helle feldspatreiche Kruste. Die South-Pole-Aitken-Impaktstruktur (SPA) ist mit einem Durchmesser von 2500 Kilometern das größte Einschlagbecken des Mondes. Die Gehalte an Thorium und FeO liegen zwischen denen der beiden anderen Komponenten. Die Gesteine des Kraterbodens könnten Komponenten des Mondmantels enthalten. Die Rauten sind die Landeplätze der Apollo- und Luna-Missionen.

Mondvorderseite



Mondrückseite



Jeffrey Gillis-Davis (University of Hawaii) / SuW-Grafik

Vorder- und Rückseite des Mondes dargestellt. Auf Grund solcher Verteilungsmuster werden heute drei in Chemie und Mineralogie wesentlich unterschiedliche Gebiete definiert:

1. Das Procellarum KREEP Terrain (PKT) im Nordwesten der Vorderseite weist hohe Konzentrationen von Thorium und Eisenoxid (FeO) auf. Das Element Thorium repräsentiert die KREEP-Komponente mit

hohen Konzentrationen von Kalium, Seltenen Erden (Rare Earth Elements, REE) und Phosphor. Zu dieser KREEP-Komponente gehören noch andere Elemente wie Barium, Rubidium, Cäsium etc. Alle diese Elemente werden auf Grund ihrer Ladung und/oder ihres Ionenradius bei der Kristallisation eines Magmas nicht in die Hauptsilikatminerale eingebaut und erreichen deshalb in den zurückbleibenden Restschmelzen hohe Konzentrationen.

Die KREEP-Komponente repräsentiert die Restschmelze der globalen Monddifferentiation, also der Entstehung von Mondkruste, Mantel und einem eventuellen Kern. Während die schweren Eisen-Magnesium-Silikate nach der Kristallisation zum Boden des Magmaozeans sanken und die leichteren Feldspäte nach oben schwammen, sammelte sich die spurenelementreiche Restschmelze unterhalb der feldspatreichen Kruste an. Durch größere Einschläge im Bereich des Oceanus Procellarum (PKT im Kasten links) wurde sie über den nordwestlichen Teil der Vorderseite des Mondes verteilt. Die hohen FeO-Gehalte lassen sich auf zahlreiche eisenreiche Lavaflüsse in demselben Bereich des Mondes zurückführen.

2. Den Hauptteil des Mondes nimmt die **FHT-Komponente** ein, das Feldspat-reiche Hochland-Terrain, ein Gebiet, das mehr als 60 Prozent der Mondoberfläche ausmacht und sich chemisch durch niedrige Gehalte an Thorium und Eisen auszeichnet. Das ist die typische von der Erde aus zu beobachtende helle Hochlandkruste, im Wesentlichen ein Produkt der Kristallisation des lunaren Magmaozeans.

3. Eine dritte Komponente ist die **SPA-Komponente**, benannt nach dem größten

lunaren Einschlagbecken, der South-Pole-Aitken-Struktur mit einem Durchmesser von 2500 Kilometern. Im Kasten links ist zu sehen, dass die Gehalte an Thorium und Eisen höher sind als im normalen Mondhochland, aber niedriger als im Oceanus-Procellarum-Gebiet (PKT). Wenig ist über die Gesteine der SPA-Struktur bekannt. Man vermutet, dass die Kruste im Inneren des Kraters sehr dünn und vielleicht sogar mit Mantelgesteinen vermischt ist. Größere, vom Sonnenlicht abgeschirmte Teile der Struktur sind gute Kandidaten für die Existenz von Wasser.

Heute steht der Mond als differenzierter Himmelskörper im Vordergrund des wissenschaftlichen Interesses. Die Mondforschung versteht sich als Teil der vergleichenden Planetologie, einer neuen Wissenschaft, die versucht, Gemeinsamkeiten in der Struktur von Oberfläche, Aufbau und innerer Entwicklung größerer planetarer Körper zu erkennen. Ähnliche geologische Prozesse wie in der Frühgeschichte des Mondes muss es auch auf anderen Planeten gegeben haben. Ein Schlüsselwort ist hier der Begriff des »Magmaozeans«, eines Meers von Schmelze, ein nahezu vollständig aufgeschmolzener Planet, der durch großräumige

Differenzierungsprozesse bei der Abkühlung seine heutige Struktur erlangt hat. Ein solches Stadium hat nach moderner Auffassung jeder größere Planet und somit auch die Erde vermutlich sogar mehrfach durchlaufen.

Die Entstehung des Mondes

Schon seit Längerem vermuten die Planetenforscher, dass der im Vergleich zu seinem Mutterplaneten sehr große Mond aus einer riesigen Kollision hervorging. Dabei stieß ein etwa marsgroßer Protoplanet mit der Erde zusammen und der Mond bildete sich aus der entstehenden Wolke von Gas und Schmelze. Die Einschlaghypothese ist vor allem geophysikalisch begründet, kann aber auch einige geochemische Eigenschaften des Mondes erklären:

■ Der bekannte Gesamtdrehimpuls des Erde-Mond-Systems lässt sich zwanglos durch entsprechende Wahl der Einschlagparameter ableiten.

■ Die Einschlaghypothese fügt sich gut in den Rahmen des Gesamtbilds der Entstehung der vier Planeten des inneren Sonnensystems ein.

■ Die chemische und isotopische Zusammensetzung des Impaktors ist unbekannt. Sie kann bis zu einem gewissen Grad pas-

IHRE VORTEILE ALS ABONNENT VON **STERNE UND WELTRAUM**

Als Abonnent erhalten Sie **Sterne und Weltraum** zum Vorzugspreis von nur € 85,20 (ermäßigt auf Nachweis € 64,-) inkl. Versandkosten Inland.

Unter www.astronomie-heute.de/plus finden Sie weitere Vorteile:

- Ihren persönlichen Mitgliedsausweis zum Herunterladen mit zahlreichen Vergünstigungen bei vielen wissenschaftlichen Einrichtungen, Museen und Filmtheatern
- kostenlosen Onlinezugriff auf das Heftarchiv von **Sterne und Weltraum**
- einen monatlichen Bonusartikel und den Zugriff auf das Archiv mit allen bisher erschienenen Bonusartikeln
- kostenlose Downloads verschiedener Hefte der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
- das **spektrumdirekt**-Premiumabo zum Vorteilspreis
- ein vergünstigtes Produkt des Monats

Ein riesiger Einschlag lässt den Mond entstehen

Die favorisierte Hypothese zur Bildung des Mondes lässt den Erdtrabanten aus der Kollision der Ureide mit einem etwa marsgroßen Protoplaneten hervorgehen. In der hier dargestellten numerischen Simulation wird anhand von 100 000 Zellen die Entwicklung der Temperatur (obere Bildreihe) und die Herkunft der Teilchen (untere Bildreihe) verfolgt. Der Impaktor bewegt sich waagrecht von rechts nach links und kollidiert mit etwa zehn Kilometer pro Sekunde streifend mit der Erde (jeweils linke Teilbilder). Die nicht zentrale Kollision ist notwendig, um auf die Erde den nötigen Drehimpuls zu übertragen.

Bei der Kollision bildet der Mantel des Impaktors nach einigen Umläufen um die Erde ein scheibenförmiges Gebilde aus Gas, Schmelze und Steinen, aus dem dann innerhalb eines Jahres der Mond entsteht. Der Metallkern des Impaktors stürzt schon kurz nach dem Impact auf die Erde und verbindet sich mit dem Erdkern.

In der oberen linken Abbildung ist die Maximaltemperatur, welche die Teilchen später erreichen werden, in der Anfangskonfiguration dargestellt. Das heißt: Die Teilchen, die ursprünglich im Südwesten des Impaktors lagen (rote Teilchen), werden beim Impact auf etwa 10 000 Kelvin erhitzt. Die grünen Bereiche des Impaktors, die nicht direkt mit der Erde kollidieren, werden weitaus weniger heiß.

Die Abbildungen in der unteren Reihe verdeutlichen das spätere Schicksal der Teilchen des Impaktors und der Erde. Die gelben Teilchen repräsentieren die Teilchen des Impaktors, die nach etwa 25 Stunden in der die Erde umgebenden Scheibe enden. Sie sind das Muttermaterial des Mondes. Es lässt sich gut erkennen, dass der größte Teil der Materie des späteren Mondes, rund 80 Prozent, aus dem Material des Projektils stammt. Dieses Ergebnis zeigte sich auch schon bei früheren Simulationen mit geringerer Auflösung und ist für die heute weitergeführte Diskussion über die Gültigkeit der Kollisionshypothese entscheidend. Die roten Teilchen in den Abbildungen der unteren Reihe wurden so stark beschleunigt, dass sie das Erde-Mond-System verlassen. Die blauen Teilchen enden auf der Erde. Das mittlere Bild unten ist eine Vergrößerung des Impaktors. Man erkennt deutlich, dass die am geringsten erhitzten Teilchen die Hauptmasse des späteren Mondes ausmachen.

Die Abbildungen ganz rechts zeigen die Erde und den Impaktor etwa 20 Minuten nach dem Impact. Der größte Teil des Mondes entsteht aus weniger stark erhitztem Material an der Vorderseite des Impaktors. Die Temperaturverteilung im Bild oben rechts ist nur für einen schmalen Bereich angegeben.

send gewählt werden und stellt somit keine große Einschränkung für das Modell dar.

Neuere numerische Simulationen zur Mondentstehung von Robin Canup am Southwest Research Institute in Boulder (Colorado) beginnen mit etwa 100 000 Zellen, die über die Erde und den Impaktor gleichmäßig verteilt sind. Der Einschlag ist streifend, Impaktor und Mond treffen mit einer Geschwindigkeit von etwa zehn Kilometern pro Sekunde aufeinander. Es wird das Schicksal jeder Zelle rechnerisch verfolgt (siehe Kasten oben).

Das geochemisch wichtigste Ergebnis derartiger Simulationen ist die Tatsache, dass der heutige Mond zu rund 80 Prozent aus dem Material des Mantels des Impaktors bestehen sollte. Das erklärt sofort den auffallendsten Unterschied zwischen Erde und Mond: Der Mond hat eine Gesamtdichte von 3,32 Gramm pro Kubikzentimeter, die Erde dagegen ist mit 5,53 Gramm pro Kubikzentimeter wesentlich dichter. Das ist auf den Erdkern aus Eisen und Nickel zurückzuführen, der 32 Prozent des Volumens der Erde ausmacht. Der Mondkern, falls es ihn gibt, erreicht eine maximale Größe von fünf Prozent des Mondvolumens. Der Eisengehalt der Gesamterde beträgt etwa 31 Prozent, für den Mond lie-

gen die Abschätzungen zwischen acht und zwölf Prozent. Die Kollisionshypothese kann den geringeren Eisengehalt des Mondes leicht erklären, da ja die Hauptmasse des Mondes aus dem eisenarmen Mantel des Impaktors bezogen wird.

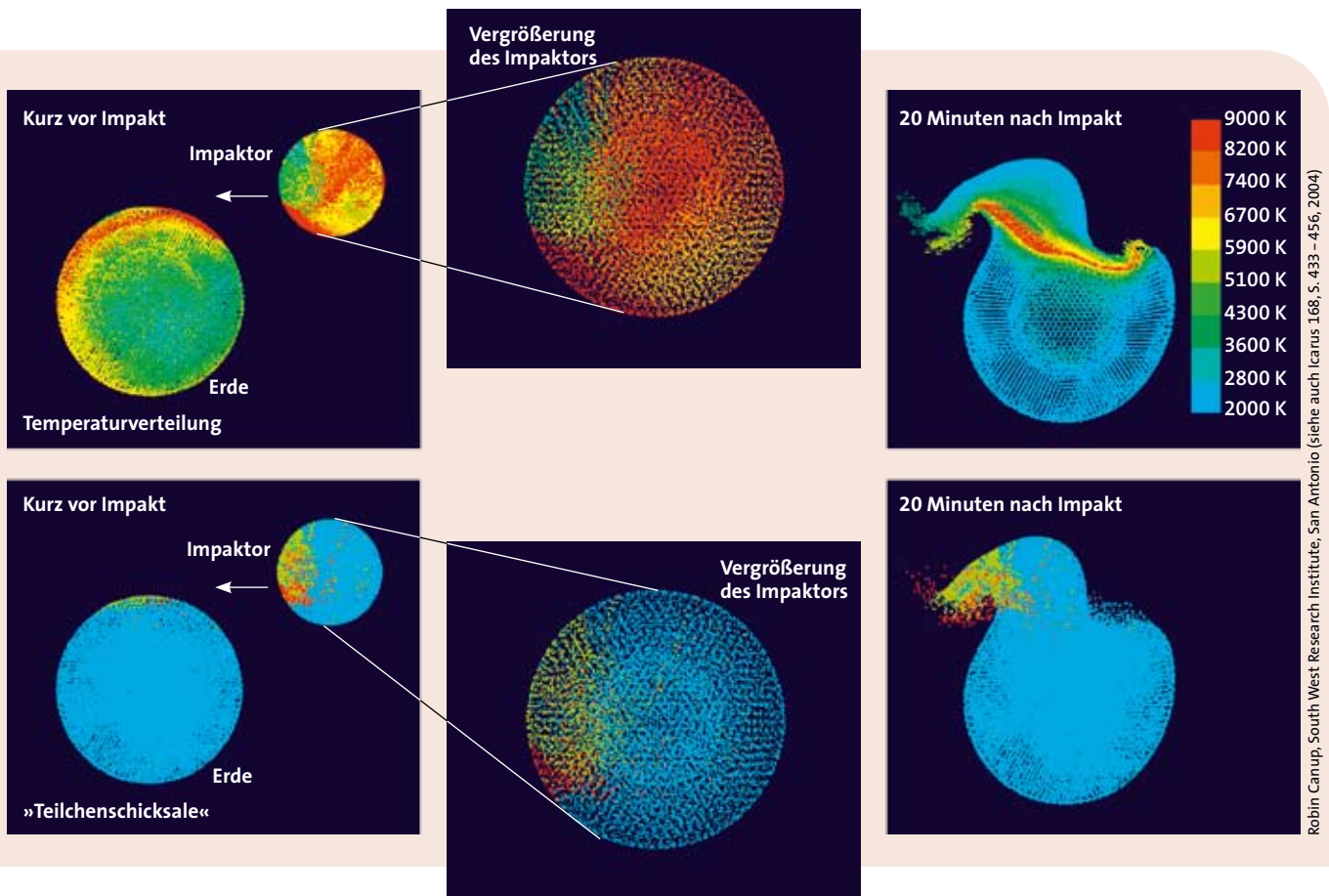
Die Einschlaghypothese für die Mondentstehung wird heute von den meisten Wissenschaftlern akzeptiert und erfreut sich großer Popularität. Doch der Erfolg der Einschlaghypothese ist primär auf die offensichtlichen Mängel der übrigen Mondentstehungshypothesen zurückzuführen. Es ist die Hypothese mit den wenigsten Problemen. Andere Hypothesen, wie die Abspaltung des Mondes von einer rasch rotierenden Erde nach George Darwin, oder dass die Erde den Mond einfing, oder dass sich Erde und Mond gleichzeitig aus einem gemeinsamen Reservoir bildeten, sind aus den verschiedensten Gründen nicht sehr plausibel (siehe Weblink am Ende des Beitrags).

Die Entstehung der inneren Planeten des Sonnensystems

Die Vorgänge, die zur Entstehung unseres Sonnensystems führten, sind heute zumindest qualitativ verstanden. Das Ausgangsmaterial für die Sternentstehung sind interstellare Molekülwolken, die durch ihre eigene Schwerkraft instabil wer-

den und kollabieren. Lokale Kontraktionen führen zu Protosternen, die von Scheiben aus Staub und Gas umgeben sind. Fast die gesamte Materie dieser rotierenden Akkretionsscheiben endet schließlich unter Abgabe von Drehimpuls im jeweiligen Zentralgestirn. Der kleine Teil an Materie, der zurückbleibt – in unserem Sonnensystem rund 0,13 Prozent der Gesamtmasse – bildet das Ausgangsmaterial für die Planeten und die kleineren Körper wie Asteroiden.

Im weiteren Verlauf sammeln sich mikrometergroße Teilchen, Kondensationsprodukte des sich abkühlenden solaren Nebels, in der Zentralebene der Akkretionsscheibe. Sie wachsen dort durch Zusammenstöße zu zentimetergroßen Objekten heran, die sich dann durch weitere Kollisionen zu meter- beziehungsweise kilometergroßen Körpern entwickeln. Planeten mit Massen von bis zu etwa 10^{23} Kilogramm, rund zwei Prozent der Erdmasse, entstehen durch rasche Akkretion lokalen Materials. Auf diese Weise konzentriert sich das Material der Akkretionsscheibe, das ursprünglich gleichmäßig in einer dünnen Scheibe ringförmig um die Sonne verteilt war, in 50 bis 100 Protoplaneten, die »Embryos« genannt werden. Dieser Prozess dauert etwa 100 000 Jahre. Wechselseitige gravitative Störungen der Umlaufbahnen der Em-



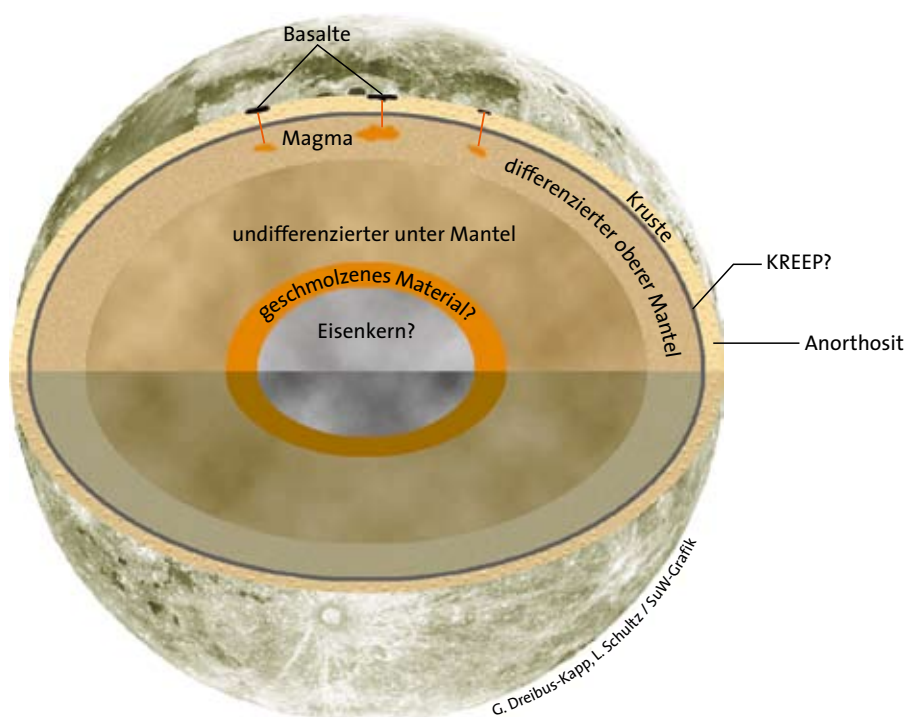
bryos führen zu Bahnüberlappungen, die weitere Kollisionen zur Folge haben. Das führt schließlich zur Bildung der inneren Planeten des Sonnensystems. In dieser zweiten Stufe, die etwa 10 Millionen bis 100 Millionen Jahre dauert, mischt sich Material aus unterschiedlichen heliozentrischen Entfernungen. So können nach diesem Modell durchaus mehrere Embryos zum Erdaufbau beitragen, die wei-

ter außen im Asteroidengürtel entstanden sind. Die hier geschilderten Vorstellungen gehen im Wesentlichen auf Arbeiten von Viktor S. Safranov und George Wetherill zurück und wurden später von John Chambers, Alessandro Morbidelli und anderen verfeinert. Eine detaillierte Übersicht des derzeitigen Wissensstands über die Planetenentstehung findet sich im Artikel »Aufregende neue

Planetenwelten« in »Sterne und Welt- raum« 6/2009, S. 32 – 43.

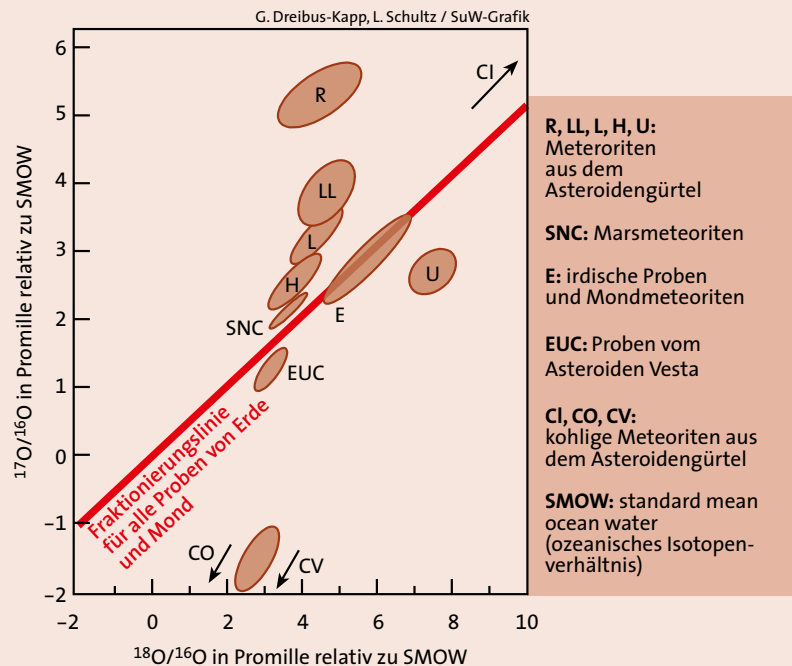
Ein Rieseneinschlag, in dessen Folge der Mond entsteht, wäre dann ein durchaus normaler Vorgang in der Wachstumsphase der inneren Planeten – vielleicht der letzte große Einschlag in der Geschichte der Erde. Nach diesem Einschlag hätte die Erde ihre heutige Größe erreicht.

So stellt sich nach derzeitigem Erkenntnisstand aus der seismischen Erkundung der innere Aufbau des Mondes dar: Einer etwa 50 Kilometer dicken Kruste folgt ein wahrscheinlich differenzierter oberer Mantel mit einer Mächtigkeit von 500 Kilometern. An ihn schließt sich möglicherweise ein unterer undifferenzierter Mantel an, der bis in eine Tiefe von 1000 Kilometern reicht. Darunter könnte sich eine dünne geschmolzene Zone befinden. Ob im Innersten des Mondes ein Eisenkern mit einem Durchmesser von 400 Kilometern existiert, ist derzeit nicht geklärt.



Sauerstoffisotopendiagramm

In diesem Diagramm werden die Sauerstoffisotopenverhältnisse gegeneinander aufgetragen. Auf der roten Linie liegen die Werte für irdische Gesteine und Mondproben. Physikalische Prozesse wie Kondensation und Verdampfung verschieben die Isotopenverhältnisse entlang dieser Fraktionierungslinie. Der Mars, der durch die SNC-Meteoriten (Shergotty, Nakhla, Chassigny) repräsentiert wird, weist eine andere Sauerstoffisotopenzusammensetzung als Erde und Mond auf, weit außerhalb der Fehlergrenzen. Die übrigen Buchstaben repräsentieren verschiedene Meteoritengruppen aus dem Asteroidengürtel. Jede besitzt ihr eigenes Reservoir, aus dem der Sauerstoff bezogen wurde. Mond und Erde bildeten sich entweder aus demselben Sauerstoffreservoir oder das Proto-Mondmaterial wurde mit terrestrischem Sauerstoff isotopisch equilibriert.



Geochemische Probleme der Kollisionshypothese

In den letzten Jahren äußerten manche Forscher jedoch Zweifel an diesen Modellvorstellungen. Die ausschlaggebenden Argumente stammen aus hochpräzisen Isotopenmessungen. Dies möchte ich an Hand des Sauerstoffs kurz erläutern: Das chemische Element Sauerstoff besitzt drei Isotope: ^{16}O mit 99,756 Prozent aller Sauerstoffatome, das seltene ^{17}O mit 0,039 Prozent und ^{18}O mit 0,205 Prozent. Als Standard dient die mittlere Isotopenzusammensetzung von Ozeanwasser, SMOW (standard mean ocean water). Abweichungen vom Ozeanwasserverhältnis werden als δ in Promille angegeben.

In Sauerstoffisotopendiagrammen wird gewöhnlich $\delta^{18}\text{O}$ gegen $\delta^{17}\text{O}$ aufgetragen (siehe Kasten oben). Bei physikalischen Prozessen wie Verdampfung und Kondensation verschieben sich die Sauerstoffisotope so, dass der Effekt bei ^{18}O etwa doppelt so groß ist wie bei ^{17}O . Alle Proben eines Reservoirs liegen deshalb auf einer so genannten Fraktionierungslinie. Im Kasten ist sie für die Erde dargestellt. Die meisten Meteoriten liegen nicht auf dieser Linie, sie haben also ihren Sauerstoff aus einem anderen Reservoir bezogen.

Sehr genaue Messungen von Uwe Wiechert heute an der FU Berlin zeigten nun, dass die Sauerstoffisotopie der Erde und des Mondes völlig identisch ist, wie im Kasten angedeutet. Wenn der Mond zum

größten Teil aus Impaktormaterial besteht, müsste er die Sauerstoffisotopie des Impaktors besitzen. Das ist aber bei der großen Variation der Sauerstoffisotopie im Sonnensystem sehr unwahrscheinlich.

In den letzten zwei Jahren wurde die Isotopie von Chrom und Titan sehr genau gemessen. Wieder zeigte sich, dass Erde und Mond identisch sind, während sich die meisten Meteoriten sowie der Mars von Mond und Erde unterscheiden. Das scheint Hypothesen, die für Erde und Mond dasselbe Reservoir annehmen, zu bestärken. Vielleicht ist die Verwandtschaft von Erde und Mond doch größer als gedacht. Ein Aufgeben der Einschlagshypothese zur Mondentstehung führt auch zu Zweifeln am Standardmodell der Planetenentstehung.

Dave Stevenson und sein Mitarbeiter Kaveh Pahlevan vom California Institute of Technology versuchen, die identischen Isotopenzusammensetzungen verschiedener Elemente von Mond und Erde mit einer Equilibrierung in der Frühphase der Mondentstehung zu erklären. Dabei ist die Erde nach dem Einschlag von einer heißen Gas-hülle aus verdampftem irdischem und Impaktormaterial umgeben, in der die Elemente durch Vermischung eine gleichartige Isotopenzusammensetzung erreichten, das heißt equilibrierten. Die Modelle sind kompliziert und nicht unbedingt überzeugend.

Die entscheidende Frage, die es in nächster Zukunft zu klären gilt, ist einfach: Gibt es Elemente mit unterschiedlicher isoto-

pischer Zusammensetzung auf der Erde und auf dem Mond? Bisher wurden keine gefunden. Für die Entstehung des Mondes reduziert sich das auf die Frage: Ist der Mond ein Verwandter der Erde oder nur ihr Nachbar, das zufällige Produkt einer Kollision mit einem fremden Planeten?

Während diese Messungen im Labor auf der Erde durchgeführt werden, sind für zukünftige Mondmissionen vor allem zwei Aspekte von Bedeutung. Die Untersuchung des Mondes mit seismischen Methoden ist ungenügend. Die innere Struktur des Mondes und vor allem die Frage nach der Existenz eines Mondkerns müssen geklärt werden. Die South-Pole-Aitken-Struktur muss besser untersucht werden, da sie möglicherweise Aufschlüsse über bisher unbekannte Schichten des Mondes gibt. ☺

Weblinks und weitere Artikel zum Thema:
www.astronomie-heute.de/artikel/998803



HERBERT PALME studierte in Wien Mathematik und Physik und war von 1971 bis 1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz. Von

1994 bis 2008 war er Professor für Mineralogie und Geochemie an der Universität zu Köln, seit 2008 ist er ehrenamtlicher Mitarbeiter in der Sektion Meteoritenforschung des Forschungsinstituts und Naturmuseums Senckenberg.

Ihr preiswerter Hersteller für astrofotografisches Zubehör

ASTROFOTOGRAFISCHE TELESKOP

Orion[®] 8" f/8
Ritchey-Chrétien
Astrograph Teleskop

#8958

Neu!

M17, Swan Nebula –
Orion Image

ASTROFOTOGRAFISCHE KAMERAS

Orion[®] StarShoot[™]
Pro V2.0 Deep Space
Color CCD

#52085

Neu!



ORION
STARSHOOT-PRO
DEEP SPACE
COLOR IMAGING CAMERA
V 2.0

Leo Trio – Orion Image

ASTROFOTOGRAFISCHES ZUBEHÖR



Neu!

Orion[®]
SteadyPix[™] Deluxe
Kamera-Halterung

#52061

IC5070, Pelican Nebula – Orion Image

ASTROFOTOGRAFISCHES ZUBEHÖR

Orion[®] Deluxe
Off-Axis Guider

#5521

Neu!

NGC 2264 Nebula Complex – Orion Image

ASTROFOTOGRAFISCHE FILTER

Orion[®] 2" SkyGlow[™]
Astrofotografischer Filter

#5561



M3, Globular Cluster – Orion Image

ASTROFOTOGRAFISCHE KAMERAS

Orion[®] StarShoot[™]
AutoGuider

#52064



STARSHOOT[™]
AUTO GUIDER

IC5146, Cocoon Nebula – Orion Image

AUTORISIERTE
ORION
HÄNDLER

Teleskop-Service Ransburg GmbH

85640 Putzbrunn-Solalinden b. München
Keferloher Marktstraße 19 C
Web: www.teleskop-service.de
Phone: 089-1892870

O.S.D.V. Goettker/Pietsch GmbH

Lohdielsweg 6, D-59457 Werl
Web: www.osdv.de
Phone: 0049(0)2922/91090-64 or 65

Astroshop.de/Nimax-GmbH

Otto-Lilienthal-Str.9, D-86899 Landsberg am Lech
Web: www.astroshop.de
Phone: 08191-94049-1