

- years for the radiocarbon record. *Radiocarbon* 34, 189-198.
- STUVIER M (1965) Carbon-14 content of the 18th and 19th century wood, variations correlated with sunspot activity. *Science* 149, 533-535.
- STUVIER M, BRAZIUNAS TF, BECKER B & KROMER B (1991) Late-glacial and Holocene atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ change: Climate, solar, oceanic and geomagnetic influences. *Quaternary Res.* 35, 1-24.
- STUVIER M & PEARSON GW (1992) Calibration of the radiocarbon time scale, 2500-5000 BC. In: TAYLOR RE, LONG A & KRA RS (eds) *Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective*. Springer New York, 19-33.
- STUVIER M, PEARSON GW & BRAZIUNAS T (1986) Radiocarbon age calibration of marine samples back to 9000 CAL YR BP. *Radiocarbon* 28, 980-1021.
- STUVIER M & QUAY PD (1981) zit. in: SCHWEINGRUBER FH (1983) *Der Jahrring, Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*.
- STUVIER M, QUAY PD & OSTLUND HG (1983) Abyssal water carbon-14 distribution and the age of the world oceans. *Science* 219, 849-851.
- SUESS (1955) Radiocarbon concentration in modern wood. *Science* 122, 415-417.
- TAYLOR RE, LONG A & KRA RS (eds, 1992) *Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective*. Springer New York.
- THURBER DL (1977) Radiocarbon dating. In *McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology*, Bd. 11, 300-306.
- WARREN PM (1991) The Minoan civilisation of Crete and the volcano of Thera. *J. Ancient Chronology Forum* 4, 29-39.

- years for the radiocarbon record. *Radiocarbon* 34, 189-198.
- STUVIER M (1965) Carbon-14 content of the 18th and 19th century wood, variations correlated with sunspot activity. *Science* 149, 533-535.
- STUVIER M, BRAZIUNAS TF, BECKER B & KROMER B (1991) Late-glacial and Holocene atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ change: Climate, solar, oceanic and geomagnetic influences. *Quaternary Res.* 35, 1-24.
- STUVIER M & PEARSON GW (1992) Calibration of the radiocarbon time scale, 2500-5000 BC. In: TAYLOR RE, LONG A & KRA RS (eds) *Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective*. Springer New York, 19-33.
- STUVIER M, PEARSON GW & BRAZIUNAS T (1986) Radiocarbon age calibration of marine samples back to 9000 CAL YR BP. *Radiocarbon* 28, 980-1021.
- STUVIER M & QUAY PD (1981) zit. in: SCHWEINGRUBER FH (1983) *Der Jahrring, Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*.
- STUVIER M, QUAY PD & OSTLUND HG (1983) Abyssal water carbon-14 distribution and the age of the world oceans. *Science* 219, 849-851.
- Suess (1955) Radiocarbon concentration in modern wood. *Science* 122, 415-417.
- TAYLOR RE, LONG A & KRA RS (eds, 1992) *Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective*. Springer New York.
- THURBER DL (1977) Radiocarbon dating. In McGraw-Hill *Encyclopedia of Science and Technology*, Bd. 11, 300-306.
- WARREN PM (1991) The Minoan civilisation of Crete and the volcano of Thera. *J. Ancient Chronology Forum* 4, 29-39.

H U R Z E I T R Ä U G E

Die Entstehung des Mondes – eine schwere Geburt

Die Rückkehr zum Mond nach über 25 Jahren durch die NASA-Raumsonde *Lunar Prospector* hat unseren Erdtrabanten wieder verstärkt in die wissenschaftliche Diskussion gebracht. Da die Sonde neben der Suche nach Wassereis auf den Böden tiefer Krater der Südpolregion auch Licht in die Entstehungsgeschichte des Mondes bringen soll, wird hier der aktuelle Stand der Entstehungsdiskussion zusammengefaßt.

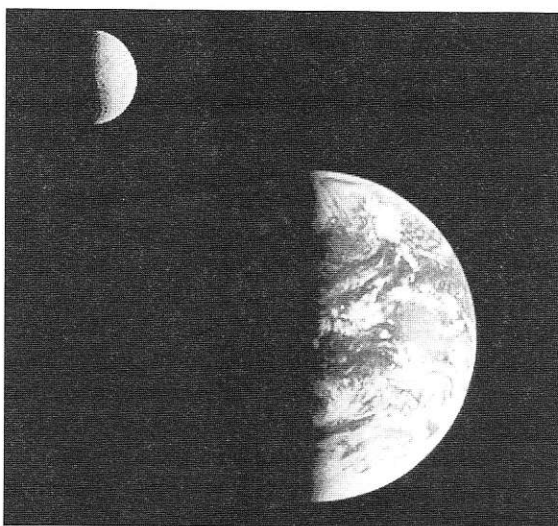
Genaugenommen hat schon im Jahre 1994 die Sonde *Clementine* des amerikanischen Verteidigungsministeriums DOD die Rückkehr zum Mond eingeleitet. Dabei stand der Test neuer Technologien im Vordergrund; man verband diesen Test

aber auch mit wissenschaftlichen Fragestellungen. Aus Radarechos wurden Hinweise auf mögliche Wassereisvorräte im Bereich der Südpolregion abgeleitet. Dort gibt es sowohl Erhebungen mit sogenanntem „Ewigem Licht“ als auch Vertiefungen mit rund vier bis sieben Kilometern unter dem lunaren „Meeresspiegel“, die nie von Sonnenlicht erreicht wurden, also in sogenannter „Ewiger Nacht“ liegen (im Atkin-Becken).

Nun hat die NASA-Sonde *Lunar Prospector* seit Januar diesen Jahres diese Spur aufgenommen. Dabei geht es um die globale Erkundung der chemischen Zusammensetzung und die Suche nach Wassereis. Diese Fragestellungen berühren insgesamt Aspekte der Mondentstehung. Da diese zunehmend enger in Beziehung zur Geschichte der Erde gebracht wird, muß das System „Erde-Mond“ oder, wegen der ungewöhnlichen Größe des Mondes, die Entstehung eines Doppelplaneten betrachtet werden. Abb. 1 zeigt, wie die Raumsonde *Galileo* sowohl die aufgehende Erde als auch den aufgehenden Mond bei ihrem nahen Vorbeiflug gemeinsam gesehen hat.

Problematik von Genese-Theorien. Themen wie die Entstehung des Universums oder unseres Planetensystems sind so komplex, daß unsere verfügbaren Mittel für schlüssige Antworten nicht hinreichend scheinen. Zwar gibt es eine Reihe plausibler Überlegungen und Interpretationsmöglichkeiten von Daten, die ein grobes Bild ermöglichen, aber

Abb. 1: Portrait der aufgehenden Erde zusammen mit dem aufgehenden Mond, wie sie die Jupiter-sonde Galileo im Jahre 1992 aus 6,2 Millionen Kilometern Entfernung gesehen hat. (NASA)



die verbliebenen Fragen sind weiterhin von elementarer Natur geblieben.

Anders sollte es sich bei dem einigermaßen überschaubaren System Erde-Mond darstellen, für welches eine recht solide Datenbasis und rund 380 Kilogramm Mondmaterial vorliegen. Um den Stand der Diskussion zu erfassen, muß auf vier kursierende Modellvorstellungen eingegangen werden, die jeweils aber nur Teilaspekte des hypothetischen Szenarios mehr oder weniger befriedigend erfassen. Wissenschaftler sind sich noch nicht sicher, wie und an welcher Stelle in unserem Planetensystem der Mond entstanden sein könnte.

Eine erfolgreiche Theorie der Entstehung des Mondes muß physikalisch plausibel sein und mindestens folgenden Randbedingungen Rechnung tragen:

- der ungewöhnlichen Größe des Mondes ($\varnothing$ Mond = 3.476 km; $\varnothing$ Erde = 12.756 km)
- dem ungewöhnlichen Drehmoment
- der im Vergleich zur Erde geringen Menge von Eisen
- dem geringen Anteil volatiler (leichtflüchtiger) Elemente beim Mond
- der guten Übereinstimmung der Sauerstoff-Isotopenverhältnisse von Erde und Mond, die auf eine gemeinsame Entwicklungsgeschichte hindeutet
- den Magma-Seen in frühen Stadien des Mondes

Bis vor rund 20 Jahren gab es drei unterschiedliche Theorien (vgl. z. B. SPUDIS 1990):

Die Abspaltungstheorie. Sie wurde zuerst von George H. DARWIN, einem Sohn von Charles DARWIN, vertreten. Danach soll sich der Mond in der Frühphase der Erdentstehung abgespalten haben, indem die Erde durch eine schnelle Rotation im Äquatorbereich einen Wulst ausbildete, der sich mit der Zeit abschnürte und dessen Material den Erdtrabanten gebildet haben soll. Dafür spricht zunächst die Tatsache, daß das Mondmaterial chemisch tatsächlich dem der Erde in mancher Hinsicht ähnlich ist.

• **Problem:** Auf dem Erdtrabanten finden sich kaum leichtflüchtige Elemente. Aber ein gewichtigeres Argument ist die Frage nach dem Drehmoment: Wie konnte die von DARWIN behauptete frühere schnelle Rotation der Erde sich zu dem heutigen 24-Stunden-Tag verlangsamen? Damit es zu einer Abspaltung eines Äquatorwulstes hätte kommen können, ist von einer Erdrotationsperiode von höchstens zweieinhalb Stunden auszugehen.

Gemeinsame Entstehung als Doppelplanet. Andere hielten es für wahrscheinlicher, daß sich Erde und Mond in einer gekoppelten Akkretion als Doppelplanet aus dem planetaren Urnebel gebildet haben.

• **Problem:** Wenn sich der Drehimpuls der Erde für die Abspaltungstheorie als viel zu klein erwiesen hatte, so ist er nun für die Theorie der Entstehung als Doppelplanet zu groß. Denn kein rechnerisches

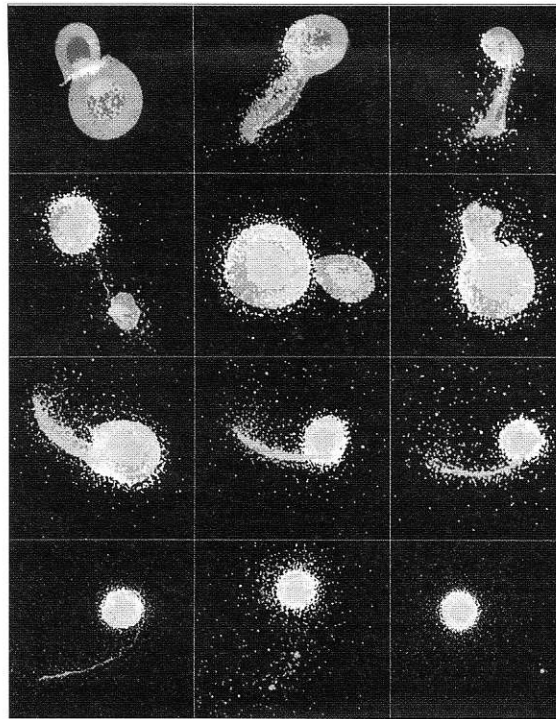


Abb. 2: Computer-Simulation des Zusammenstoßes eines Körpers mit der jungen Erde. Das in Erdnähe verbliebene Material soll nach der Kollisionstheorie zur Bildung des Mondes geführt haben. (Nach A. G. W. CAMERON, Harvard University)

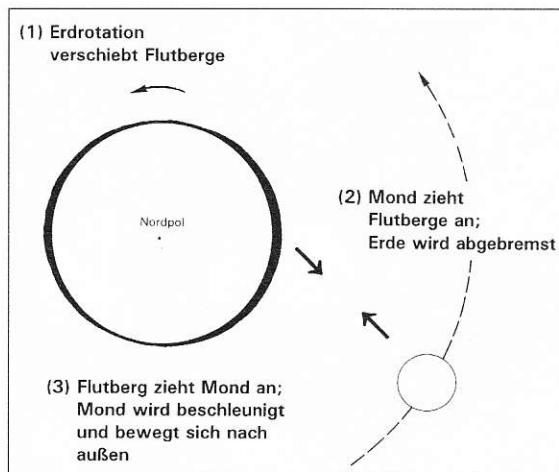
risches ZuwachsmodeLL kann ein so großes Drehmoment für einen aus einer Urwolke sich bildenden Planeten erklären. Zudem spricht das weitgehende Fehlen leichtflüchtiger Elemente auf dem Mond gegen eine solche Parallel-Entstehung. Zusätzlich sollte für beide Körper eine vergleichbare Dichte erwartet werden; tatsächlich ist die Dichte des Mondes mit $3,3 \text{ g/cm}^3$ deutlich geringer als die Dichte der Erde ($5,5 \text{ g/cm}^3$).

Einfangtheorie. Nach dieser Vorstellung soll der Mond an einer ganz anderen Stelle im Planetensystem entstanden sein. Von dort aus soll er sich irgendwie auf die Erde zubewegt haben und letztlich, als er ihr zu nahe kam, von deren Gravitationskräften eingefangen und auf eine Umlaufbahn gezwungen worden sein. Damit ließen sich die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung beider Himmelskörper erklären.

• **Problem:** Wie können die frappierenden Ähnlichkeiten zwischen der Häufigkeit der drei Sauerstoffisotope ^{16}O , ^{17}O und ^{18}O auf dem Mond und auf der Erde erklärt werden, wenn sie sonst mit keinem der Verhältnisse anderer Planeten zusammenpassen? Zudem erscheint es extrem unwahrscheinlich, daß die Erde einen Körper von der Größe des Mondes durch ihre Gravitation hätte abbremsen und einfangen können.

Die Problematik dieser Theorien über die Entstehung des Mondes wurde in vollem Umfang erst durch die Untersuchung der von den Apollo-Missionen mitgebrachten Gesteinsproben deutlich, so daß als heute aktuelle Hypothese nur die Kollisionstheorie (s. u.) in der Diskussion bleibt. Doch

Abb. 3: Flutberge liegen nicht auf der Linie Erde – Mond. Dies führt mit der Zeit zu einer Abbremsung der Erde. Die Kräfte veranlassen den Mond, sich von der Erde zu entfernen.



auch hier wirft eine detailliertere Betrachtung neue Fragen auf.

Kollisionstheorie. Die von W.K. HARTMANN entworfene und unter Führung von A.G.W. CAMERON vom Center for Astrophysics in Cambridge, Massachusetts weitergeführte Hypothese besagt, daß der Mond durch den Zusammenstoß eines Körpers mit der Protoerde entstanden sein könnte. Seit Mitte der achtziger Jahre wird diese Theorie von den meisten Planetenforschern favorisiert. Demnach kollidierte ein Körper von der Größe des Mars mit der noch jungen Erde. In beiden Protoplaneten sollen die schweren Elemente bereits zum Zentrum abgesunken gewesen sein. Dies läßt eine Computersimulation (Abb.2) erkennen, die auch die Größenverhältnisse der Stoßpartner verdeutlicht. Die Bildfolge der Simulation zeigt die Ablösung von Mantelmateriale im Zuge eines streifenförmigen Aufpralls und läßt erkennen, wie das ausgeworfene Material sich später zum Mond geformt haben könnte. Dabei soll das schwere Kernmaterial – vorwiegend Eisen – zur Erde zurückgefallen sein, womit seine geringe Menge auf dem Mond zu erklären wäre. Diese Theorie ist in der Lage, die Befunde der Mondprobenuntersuchungen hinreichend einzuordnen, und steht zudem nicht im Kon-

flikt mit der Erdrotation. Die Rotation ist demnach durch den Zusammenprall wesentlich bestimmt worden, etwa vergleichbar mit einer angeschossenen Billardkugel. Die Ähnlichkeiten und Unterschiede des Materials von Erde und Mond lassen sich aus der Mischung von Erdmantelmateriale und Restmateriale des Eindringlings erklären. Das Fehlen volatiler Elemente auf dem Mond wäre das Ergebnis der Verdampfung beim Kollisionsprozeß.

Ergebnisse neuerer Untersuchungen. Allerdings wird dieses einigermaßen plausibel klingende Bild durch neue Forschungsergebnisse empfindlich gestört. So hat Robin CANUP, University of Colorado in Boulder, darauf hingewiesen, daß der erforderliche Stoßpartner bis zu dreimal so massiv wie Mars hätte sein müssen (HECHT 1997). Ein Marsgroßer Körper als Eindringling würde zur Bildung einer flachen Scheibe aus Trümmern des Auswurfmaterials um die Erde führen, die sich über mehrere Erdbahnradien hinaus ausdehnen würde. Darin käme es im Laufe der Zeit zur Ausbildung von kleinen Moonlets, die wiederum im Laufe von tausenden bis zehntausenden von Jahren in einer Entfernung von 3,5 Erdbahnradien zu einem einzelnen Mond koagulieren könnten. Allerdings steht wegen der weiten Streuung der Trümmer und wegen der langen Bildungsphase nur 20 – 50% der ursprünglichen Scheibenmasse für die Mondbildung zur Verfügung. Der Rest soll in der Zwischenzeit auf die Erde zurückgefallen sein.

Selbst wenn es diesen großen Planeten in Erdnähe gegeben haben sollte und damit ausreichend viel Scheibenmateriale erzeugt worden wäre, müßte das Erde-Mond-System als Ergebnis dieser Kollisionskatastrophe ein um mehr als Faktor zwei größeres Drehmoment haben. Einen Mechanismus zum Abführen des Drehmoments zu finden, ist sicher nicht einfach.

Auswirkung rotierender Stoßpartner. Simulationen zeigten, daß nur dann genügend Materiale über die Roche-Grenze (etwa 2,9 Erdradien = ca. 18.500 Kilometer) hinaus beschleunigt wird, wenn der Einschlag streifend und mit einem Drehimpulsübertrag erfolgt, der nahezu doppelt so groß ist, wie der Drehimpuls des heutigen Erde-Mond-Systems (bei frontalem Zusammenstoß ist der Drehimpulsübertrag null). Innerhalb der Roche-Grenze kann sich wegen der starken Gezeitenkräfte kein großer Körper bilden.

Shigeru IDA, Robin CANUP und Glen STEWART von der University of Colorado in Boulder (IDA et al. 1997) zeigten in Simulationsexperimenten, daß in unterschiedlichen Staubscheiben der Mond jeweils knapp jenseits der Roche-Grenze entstand. Da der Mond heute aber durchschnittlich mehr als 380.000 Kilometer von der Erde entfernt ist, muß er von ihr weggewandert sein. Dies erscheint zumindest nicht unmöglich, da die Gezeitenrei-

Tab. 1: Bewertungstabelle für die Mond-Entstehungstheorien nach Kriterien von John A. WOOD vom Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge.
1 = beste Übereinstimmung
6 = Kriterium durchgefallen
– = keine Angabe möglich (unvollständige Arbeit)
() = Werte sind nach WOOD kein entscheidendes Kriterium

Bewertungsparameter	Abspaltung	Gekoppelte Akkretion	Einfang	Kollision
Masse des Mondes	4	2	2	–
Drehmoment Erde-Mond	6	6	3	2
Fehlen volatiler Elemente	2	3	3	2
Fehlen lunaren Eisens	1	4	6	–
Übereinstimmung mit Sauerstoffisotopen der Erde	1	1	2	2
Möglichkeit für Magma-Seen	1	3	4	1
Physikalische Plausibilität	6	3	4	1
Übereinstimmung für Spurenelemente für Mantel	(4)	(4)	(3)	(3)
Gesamtbewertung	3,1	3,2	3,2	1,9