

Hat man das Unmögliche ausgeschlossen, muss der verbleibende Rest – wie unwahrscheinlich auch immer er sei – die Wahrheit sein.

Arthur Conan Doyle (1859–1930)

Liebe Leserin, lieber Leser,

jemandem die „Show stehlen“ kennt nicht nur der Unterhaltungssektor. Wir alle standen vor 50 Jahren noch unter dem Eindruck der ersten bemannten Mondlandung, als – weitgehend unbemerkt – ein Meilenstein bei der Erforschung des Mars erreicht wurde. Binnen Wochenfrist rückten zwei Sonden dem Mars auf die Pelle, d. h., kamen ihm bis auf 3430 Höhen-km nahe. Mariner 6 und 7 übermittelten nicht nur Bilder. Aufschlussreicher als die 200 Nahaufnahmen – Marskrater hatte bereits Mariner 4 vier Jahre zuvor entdeckt gehabt – waren die chemischen Analysen der dünnen Marsatmosphäre und der Marsoberfläche während des halbstündigen Vorbeiflugs. Das Infrarotspektrometer an Bord der Sonden entdeckte Kohlendioxid (CO_2), gasförmig und fest (Trockeneis), Kohlenmonoxid (CO), Spuren von Wasserdampf (H_2O), gefrorenes Wasser am Südpol und einen ersten Hinweis, dass Oberflächenwasser bei der Mineralbildung zugegen war: Rost! (Goethe hätte es gefreut, wurde doch das verbreitet vorkommende Eisenerz, Goethit, nach dem Mineraliensammler benannt.) Damit war klar, wie bei Venus bestimmt auch beim Mars das CO_2 die Atmosphärenchemie. Nur die irdische Lufthülle fällt chemisch aus dem Rahmen. Das Leben hält „künstlich“ das Nicht-Gleichgewicht aufrecht.

Im Herbst 1989, vor 30 Jahren, fiel die Berliner Mauer. Bereits im Spätsommer des ereignisreichen Jahres, am 25. August, schoss Voyager 2 am Neptun vorbei und Farbaufnahmen des „Berliner Planeten“¹: Sie zeigen des Meeresherrn Welt im reinsten Blau! (Dem Impuls, von einem „Berliner Blau“ zu sprechen, gibt der Kosmos-Bote lieber nicht nach. Vermutlich stimmt es nicht, und er möchte diesbezüglich keine Richtigstellungen provozieren. In der Astronomie über Farbe zu sprechen ist heikel!) Jedenfalls ward mit Neptun

¹Der Neptun war am 23. September 1846 an der Berliner Sternwarte entdeckt worden.

er zweite blaue Planet im Sonnensystem gefunden! Wie beim (eher grünlichen) Uranus stößt man in der Atmosphäre neben den beiden Urelementen Wasserstoff (H_2) und Helium (He) auch auf Methan (CH_4), letzteres zum Teil gefroren.

In der Juli-Ausgabe hatte das sich anbahnende Geschäft mit dem Mond der Wissenschaft vom Mond die Show gestolen. Das gilt es zu korrigieren. Selenologie, Mondkunde, ist nicht uninteressant, zumal sich der Mond, als ihn Menschen betraten, schnell als völlig anders erwies, als erwartet. Der Erdtrabant besteht zu einem Gutteil aus Erdmantel! Seine Geburt, vor $4\frac{1}{2}$ Milliarden Jahren – man schreibt das Zeitalter des Hadaikum – war ein Kataklusmus kosmischen Ausmaßes, weithin sichtbar. Was war geschehen? Theia, ein marsgroßer Weltenbummler, rammte die werdende Erde. Als Folge eines dezentralen Treffers entstand unser guter alter Mond. Er ist aus Erde und Theia² gemacht.

Spaß bei der Sommerloch-Lektüre wünscht wie immer
Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im August

Merkur befindet sich westlich der Sonne. Am 10. August entfernt er sich maximal weit von ihr: 19° . Er sollte kurzzeitig in der Morgendämmerung zu sehen sein, nahe dem ONO-Horizont.

Venus und Mars halten sich zu nahe an der Sonne auf. Venus wechselt am 14. August unbemerkt die Sonnenseite. Sie wird zum Abendstern, was ihre Liebhaber aber erst ab November werden würdigen können.

Jupiter beherrscht die erste Nachthälfte. Seine Oppositionsphase endet am 11. August mit dem Stillstand. Danach bewegt er sich wieder rechtläufig bezüglich der Sterne. Saturn hinkt dem Jupiter um ein Tierkreiszeichen hinterher, was am Himmel gut zwei Rektaszensionsstunden ausmacht, und befindet sich noch in seiner Oppositionsphase. Am 12. schiebt sich der Mond vor ihn – leider nicht für uns, ist eher etwas für Antipoden, Neuseelands Nordinsel, Ozeanien . . .

Für die Nacht vom 12. zum 13. August wird das diesjährige Perseidenmaximum erwartet. Leider stört der Mond das Spektakel.

²Der Name ist zwar inoffiziell, inzwischen aber gebräuchlich.

Fällt der Mond aus dem Rahmen?

Es gibt, *absolut* gesehen, d. h. in Kilometern bzw. Kilogramm, größere Monde: Ganymed und Titan übertreffen selbst den Merkur an Ausdehnung (aber nicht an Masse). Die beiden sind 1 1/2-mal größer als unser Mond. Trotzdem ist dieser, *relativ* betrachtet, d. h. im Verhältnis zur Erde groß. Was zählt, ist die Masse. Und das Masseverhältnis 1:81 (Mond/Erde) ist groß, verglichen mit 1:12 700 (Ganymed/Jupiter) bzw. 1:4 200 (Titan/Saturn). Man spricht deshalb vom Doppelplaneten Erde-Mond. (Pluto-Charon ist diesbezüglich ein Extrem.) Was weiterhin zählt ist der Drehimpuls. Anders als bei den Mondsystemen der Riesenplaneten steckt ein Großteil des Drehimpulses beim Erde-Mond-System in der Umlaufbewegung des Mondes. All das will sagen: Unser Mond ist eine Besonderheit und sicherlich anders entstanden als die regulären Monde der jupiterartigen Planeten.

Galileo Galilei (1564–1642) hat im System der Jupitertrabanten ein Sonnensystem *en miniature* gesehen. Was seine Entstehung angeht, muss man ihm recht geben. Hier hat sich offenbar im Kleinen wiederholt, was im Großen zur Entstehung der Planeten aus einer protoplanetaren Gas-Staub-Scheibe geführt hatte.

Zur Zeit der Apollo-Mondexkursionen, also vor einem halben Jahrhundert, kursierten unter Kosmogonikern, die einen Sonderstatus des Mondes anerkannten, im wesentlichen zwei Mondentstehungshypothesen: (1) die Abspaltung- und (2) die Einfanghypothese.

Abspaltungshypothese

Am Anfang war eine sich rasch drehende Urerde. Fliehkraftbedingt und unterstützt von der Sonne, die zwei Flutberge hervorruft, löste sich ein „Batzen“ aus dem oberen Erdmantel, wurde zum Mond. Geburtshelfer soll der werdende Erdkern gewesen sein: Dadurch, dass es in der aufgeschmolzenen Urerde zur Stofftrennung kam – Schweres sank in die Tiefe, Leichtes stieg auf – verkleinerte sich ihr Trägheitsmoment³, und sie drehte sich noch schneller. (Man kennt das von den Pirouetten der Eistanzer, legen diese die Arme an den Körper.) Das Gerücht, das vom Monde hinterlassene Loch sei der

³Die Physik d r e h e n d e r Körper läuft darauf hinaus, die Masse durch das Trägheitsmoment, den Impuls durch den Drehimpuls und die Kraft durch das Drehmoment zu ersetzen.

Pazifik⁴, hält sich hartnäckig. Die Abspaltungshypothese von 1898 geht auf George Howard Darwin (1845–1912) zurück. Sir George war ein Sohn von Charles Darwin (1809–1882). Sie erklärt sowohl die geringe mittlere Dichte des Mondes als auch seine Eisenarmut. Es ist ja silikatisches Hüllenmaterial der Erde. Nicht geklärt hingegen ist der Mangel an flüchtigen Stoffen, wie Kalium, Natrium, ... Wässrige Mineralien fehlen ganz. Dafür gibt's ein Zuviel an „feuerfestem“ Zeug: Aluminium, Kalzium, Seltenen Erden. Es scheint, der Mond hat eine heiße Phase durchgemacht.

Da der Drehimpuls des Gesamtsystems Erde-Mond in guter Näherung eine Erhaltungsgröße ist, musste der heutige Bahndrehimpuls des Mondes damals im Erdkörper gesteckt haben: Der Tag dauerte fünf Stunden!

Tatsächlich waren die Tage früher kürzer. Zur Saurierzeit, also im Mesozoikum, sollen es etwa 23 (heutige) Stunden gewesen sein. Im Proterozoikum gar nur 21 Stunden. Die Erklärung liegt im Mond. Er bremst durch die Gezeiten die Erde. Irdischer Drehimpuls wird auf ihn übertragen, wird zu Bahndrehimpuls. Er entfernt sich deshalb von der Erde. Dank der Retroreflektoren (Tripelprismen⁵), die Apollo-Astronauten und sowjetische Mondmobile auf dem Mond deponiert haben, kann man dieses Sich-davon-Schleichen mittels Laserpulse direkt messen. Es sind derzeit⁶ etwa 3,8 cm im Jahr. Die Idee mit den Tripelspiegeln, hierzulande auch als „Katzenaugen“ bezeichnet, hatte nebenbei bemerkt ein Jenaer: Rudolf Straubel⁷ (1864–1943), der Nachfolger von Ernst Abbe (1840–1905) in der Führungsetage des Zeiss-Werkes.

Wir lassen nun die Zeit rückwärts laufen und bürden gedanklich der rotierenden Erde den Drehimpuls wieder auf, den sie im Laufe von Jahrmilliarden an den Mond abgegeben hat. (Dem Physiker sträuben sich die Haare! Man kann die Zeitrichtung nicht umkehren: Gezeitenreibung erzeugt Wärme!) Wir erleichtern uns die Arbeit: Die Erde bestehe aus einer inkompressiblen Flüssigkeit, 5 1/2-mal dichter als Wasser. Der Fehler, den wir damit machen, ist hinnehmbar⁸, und den Mond mit seinen störenden Gezeiten lassen wir auch aus dem Spiel. Der Vereinfachungsvorteil: Wie Drehimpuls und ellipsoidischer

⁴Der Boden des Pazifik ist vergleichsweise jung, keine 200 Millionen Jahre alt!

⁵Die Quarzglasprismen der Apollo-Reflektoren sind ein deutsches Erzeugnis.

⁶Zur Zeit recht schnell! Extrapolierte man die derzeitige Gezeitenbremsung in die Vergangenheit, dürfte der Mond kaum älter als 1,5 Milliarden Jahre sein!

⁷Für die Nazis war Straubel jemand, der seiner jüdischen Frau anhing, für die Kommunisten ein Kapitalist. So geriet der Name des begnadeten Erfinders fast in Vergessenheit.

⁸Eine homogene Erde (ohne Dichtezunahme zum Zentrum) hätte ein um 20% vergrößertes Trägheitsmoment.

Figur eines Flüssigkeitskörpers unter der Wirkung des Eigenwichts zusammenhängen, ist längst bekannt. Den Anfang machte 1742 der Schotte Colin Maclaurin (1698–1746) mit Rotationsellipsoiden, abgeplatteten Kugeln. Die Verallgemeinerung auf ein triaxiales Ellipsoid, also mit drei unterschiedlich langen Halbachsen, was kaum jemand für möglich gehalten hatte, ließ noch fast ein Jahrhundert auf sich warten. Es war ein gebürtiger Potsdamer, Carl Gustav Jacobi (1804–1851), der 1834 die nach ihm benannten dreiachsigen Ellipsoide kreierte.

Der Streit um die Figur der Erde, „Smartie“ oder „Rugbyball“ – ein Streit zwischen England und Frankreich –, war erst 1737 von dem französischen Erdvermesser (und späteren Präsidenten der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin) Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698–1759) zugunsten des „Smarties“ entschieden worden, will heißen, die Erde ist an den Polen abgeplattet, wie von Newton (1643–1727) behauptet. Sein Kontrahent in Sachen Erdfigur war Jean-Dominique Cassini (1625–1712), der für eine längliche Erde plädiert hatte, obwohl ihm 1665 die Abplattung des schnell rotierenden Jupiter an den Polen nicht entgangen war. Voltaire's (1694–1778) gehässiger Kommentar: Maupertuis habe nicht nur die Erde platt gemacht, auch die Cassinis.

Greifen wir zum programmierbaren Taschenrechner und studieren wir so ein Maclaurin Ellipsoid. Je mehr Drehimpuls investiert wird, desto stärker die Abplattung in der meridionalen Ebene. Das war zu erwarten. Unerwartet ist, dass ab einer Exzentrizität von 0,93 – das dürfte etwa der Abplattung eines Smartie entsprechen – die Rotationsrate ein Maximum erreicht. Wir halten fest: Die minimale Tageslänge einer flüssigen Erde beträgt 2 Stunden 25 Minuten! Noch exzentrischere „Linsen“ drehen sich langsamer: Je mehr Drehimpuls, desto langsamer! (Das ist natürlich der dramatischen Zunahme des Trägheitsmoments geschuldet. Je kürzer die Polachse, desto größer der Linsenquerschnitt in der Äquatorialebene. Beim Stauchen des Polabstands bleibt einer inkompressiblen Flüssigkeit nur, sich in radialer Richtung auszubreiten. Das Produkt aus Linsendicke und -querschnittsfläche ist konstant.) Es sei betont, das bisher Gesagte gilt für ein Maclaurin'sches Rotationsellipsoid. Bevor allerdings der Zustand maximaler Rotationsfrequenz erreicht wird, besorgt eine schleichende Instabilität eine Verminderung der Symmetrie. Bei einer Rotationsperiode unter 2 Stunden 39 Minuten (und einer numerischen Exzentrizität größer 0,81) ist ein dreiachsiges Jacobi Ellipsoid energetisch günstiger! Dann sind nicht nur die Längenkreise Ellipsen, sondern auch die Breitenkreise. Beschränkt man sich nicht auf Ellipsoide, werden andere Figuren möglich, birnenförmige, wie Henri Poincaré (1854–1912) 1885 herausfand.

Die kritische Rotationsdauer für flüssige „Birnen“ läge bei gut 3 Stunden. Das klingt verheißungsvoll, oder? Leider stößt unser Planet nicht in den riskant-interessanten Drehimpulsbereich vor, wo sich ein Teil der „Erdbirne“ abschnürt. Der Gesamtdrehimpuls des Systems Erde-Mond gibt das nicht her. Auch mit einverleibtem Mond(bahndrehimpuls) bliebe die Uerde ein Rotationsellipsoid *à la* McLaurin und stabil!

Einfanghypothese

Nach dem Ausflug in die Welt rotierender Flüssigplaneten nun das Begräbnis der einst populären Einfangtheorie. Sie starb mit der ersten Analyse von Mondgestein. Und dabei war es ein Verfechter der Einfangtheorie gewesen, Harold Clayton Urey (1893–1981), der die NASA davon überzeugt hatte, sich dem Monde zuzuwenden. Dieser sei der „Rosettastein“ des Sonnensystems, so des Kosmochemikers⁹ Überzeugung!

Mondgestein ist irdischem Gestein chemisch verblüffend ähnlich, sogar was die Isotopenverhältnisse¹⁰ anbelangt. Angesichts der ansonsten großen Unterschiede im Sonnensystem¹¹ – so kann die Herkunft gewisser Meteorite (vom Mars, der Vesta etc.) aufgrund ihres isotopischen „Fingerabdrucks“ zweifelsfrei festgestellt werden! – ist die Ähnlichkeit verstörend. Ein Fremder, der mir aufs Haar gleicht, kann unmöglich völlig fremd sein! Der eingefangene Zwergplanet müsste demnach im gleichen heliozentrischen Abstand wie die Erde aus dem solaren Urnebel auskondensiert sein. Doch halt! Dann sollte er auch eisenreich wie die Erde sein, was der Mond nicht ist . . .

Und noch etwas spricht gegen den Einfang: Ein Körper, der von weit her kommt, muss, sofern er nicht direkt mit der Erde kollidiert oder anderweitig, beispielsweise durch (Gezeiten)Reibung, an Energie verliert, wieder ins Weite entschwinden, so will es die Himmelsmechanik – es sei denn, ein Dritter ist mit von der Partie, einer, der Energie aus dem System hinwegträgt. Ein Einfang wird damit noch unwahrscheinlicher.

⁹Der Begriff *cosmochemistry* geht auf H. C. Urey zurück.

¹⁰Zentral sind die stabilen Sauerstoffisotope ¹⁶O, ¹⁷O, aber auch andere Isotope wie Kalium ³⁹K und ⁴¹K sowie die Titanisotope ⁴⁷Ti und ⁵⁰Ti sind bekannte Marker. Ist Radioaktivität im Spiel, erlauben Isotopenhäufigkeiten die Bestimmung des Alters. Nach der Uran-Blei- und Lutetium-Hafnium-Uhr hat der Mond wenigstens 4,51 Milliarden Jahre auf dem Buckel. Das Sonnensystem war keine 60 Millionen Jahre alt, da gab es ihn bereits.!

¹¹Zumindest zwischen dem inneren und dem äußeren Sonnensystem hatte es in der Bildungsphase keine Angleichung der chemischen und Isotopen-Verhältnisse gegeben.

Theia

Für Sir Arthur wäre es nur logisch gewesen: Eingedenk des „Unmöglichen“ wandten sich Kosmogoniker um 1975 dem „Unwahrscheinlichen“ zu. Man sprach vom *giant impact*. Die Schöpfer der Kollisionstheorie waren Nordamerikaner. Zwei Teams traten an: William K. Hartmann und Donald R. Davis sowie Alastair G. W. Cameron (1925–2005) und William R. Ward (1944–2018). Theoretisches Rüstzeug war die Planetesimal-Hypothese des Sowjetrussen Viktor Sergeevich Safronov (1917–1999). Der Kosmos-Bote dachte damals bei sich, jetzt wird gar schon der Zufall bemüht! (Die Reserviertheit war allgemein. Das Ganze stand im Geruch einer *ad-hoc*-Hypothese. Das änderte sich ab 1984.) Wissenschaft ist vernünftigerweise konservativ und der Sonderfall, die Ausnahme eigentlich nicht ihr Ding¹². Dass in einer komplexen Welt Katastrophen in Gestalt „wilden“ Zufalls der Normalfall sind, hatte sich noch nicht herumgesprochen. Und dabei traf's den Zeitgeist. „Katastrophismus“ als Erklärungsmuster lag in der Luft: in der mathematischen Physik (Singularitäten, Kaustiken), der Geologie (Kreide-Tertiär-Malheur samt Sauriersterben), der Evolutionsbiologie (Floren-/Fau-nenschnitt), der Ökonomie (Aktienmärkte) etc. Kurz, man hatte sich andernorts, wo es stets nicht-linear zugeht, bereits an „Katastrophenszenarien“ gewöhnt gehabt. Und im Falle des Mondes sollte sich schließlich sogar zeigen, dass bei dem Tohuwabohu, wie es vor 4,5 Milliarden Jahren herrschte, ein Zusammenstoß der Erde mit einem Protoplaneten gar nicht so unwahrscheinlich gewesen sein kann. Hatte es nicht zuvor vieler *impacts* bedurft, um überhaupt die Erde durch Akkretion, d. h. Aufsammeln von Material, auf Planetengröße anwachsen zu lassen? Der fatale Zusammenstoß mit Theia¹³, einem Geschoss groß wie Mars, wobei der Mond entstand, war lediglich der letzte einer Einschlagserie, der entscheidende. Damit am Ende das erwünschte Erde-Mond-System zustande kam, mussten allerdings gewisse Einstellungen, insbesondere Geschossmasse und Einfallswinkel, genau „eingehalten“¹⁴ werden! Kurz: Das Problem ist nicht die Unwahrscheinlichkeit eines Zusam-

¹²Antoine de Saint-Exupéry (1900–1944) meinte einst, es gäbe „nur eine Wissenschaft von den Dingen, die sich wiederholen.“

¹³Theia, eigtl. Thia, ist der Name einer Titanin. Sie gebar dem Hyperion, ihrem Bruder, u. a. eine Tochter, genannt Selene, die Mondgöttin der alten Griechen.

¹⁴Darüber sollte man sich nicht zu sehr wundern angesichts der Tatsache, dass es ohne den Mond uns und die Selenologie vermutlich gar nicht gäbe. Der Mond verhindert ein chaotisches „Schlingern“ der Rotationsachse der Erde und damit verhängnisvolle Klimakapriolen wie beim Mars.

menstoßes. Das Problem ist, dass der Stoß genau sitzen muss. Er muss heftig genug sein, damit ein Mond entsteht, der respektabel ist, aber gleichzeitig auch nicht zuviel an Drehimpuls übertragen. (Falls es tröstet: Jedem Ereignis, dem wir Bedeutung beimessen, erweist sich im *N a c h h i n e i n* als extrem unwahrscheinlich.)

Beim „Großen Spritzer“ (*Big Splat*) wurden einige Mondmassen eisenarmen Materials aus dem oberen Erdmantel und von der Theia verdampft, wobei feste Körper mitgerissen und in eine Erdumlaufbahn gelangten. Leicht flüchtige Bestandteile, solche mit niedrigem Siedepunkt, machten sich „aus dem Staube“, was ihre Unterhäufigkeit im Mondstoff erklärt. Der Rest kondensierte. Die heiße Trümmerscheibe um die glutflüssige Erde weitete sich radial durch Umverteilung von Drehimpuls rasant aus. Aus Scheibenmaterial jenseits der sog. Roche-Grenze¹⁵ bildete sich in kürzester Frist der Mond. Dabei ging's heiß her. Auch der Mond begann als glutflüssiger Ball. Was aus Theias Eisenkern wurde? Er versank in den Erdkörper, verschmolz mit dem Ni-Fe-Erdkern. Die Erde besteht fast zu einem Drittel aus Eisen!

Die Eisenarmut des Mondes ist elegant erklärt, nicht aber eine geradezu unheimliche Koinzidenz: Da ein Gutteil des Mondes von der Theia stammt, müsste sich das im isotopischen Fingerabdruck widerspiegeln – es sei denn, beide, Geschoss wie Zielscheibe, bestünden aus dem gleichen Material. An solch einen Zufall will so recht niemand glauben. So war man erleichtert, vor Jahren aus Göttingen zu vernehmen, dass sich Erde und Mond bezüglich der Häufigkeitsverhältnisse der drei stabilen Sauerstoffisotope ¹⁶O, ¹⁷O und ¹⁸O wenigstens ein bisschen unterschieden. Die „Isotopenkrise“ scheint überwunden. Gleichwohl bereitet die frappante Ähnlichkeit von Erde und Theia weiterhin Unbehagen.

Als Ausweg aus der „Isotopenkrise“ haben sich findige Leute was einfallen lassen:

1. Bei der Theia könnte es sich um einen Erdtrojaner gehandelt haben, der, unbehelligt durch die Protoerde, nahe dem Lagrange-Punkt L_4 bzw. L_5 herangewachsen ist, bis er irgendwann aus der Parkbahn um $L_{4/5}$ geworfen und auf Kollisionskurs ging. Beide Lagrangepunkte haben exakt den gleichen Sonnenabstand. Dort entstandene Himmelskörper wären erklärtermaßen isotopenchemisch erdähnlich.

¹⁵Benannt nach dem französischen Mathematiker und Astronomen Édouard Roche (1820–1883). Innerhalb der Roche-Grenze würde ein „Geröllhaufen“ durch Gezeitenkräfte zerlegt, ein Mond könnte sich nicht bilden.

2. Erde wie Mond haben sich später ein „Furnier“ aus der gleichen Materialquelle zugelegt. Die Erde war zum Zeitpunkt des Theia-Einschlags keineswegs fertig. Vom Wasser wissen wir, dass es später nachgeliefert wurde, wie auch gewisse Edelmetalle, die heute so herumliegen. (In der glutflüssigen Phase der Erde wären Schwermetalle wie Gold, Platin und Iridium schlicht in die Tiefe abgetaucht und einen Preziosenhandel hätte es nie gegeben.)
3. Der Mond könnte sich ja tatsächlich von der Urerde abgespalten haben, nachdem der Theia-Einschlag diese in super-schnelle Rotation versetzt hatte.

Die Kollisionstheorie ist keine faule Ausrede! Zusammenstöße müssen an der Tagesordnung gewesen sein. Sie wird gestützt durch Computersimulationen¹⁶, welche die Ereignisse von damals minutiös und *en detail* nachvollziehbar machen. Insbesondere gelingt es, das Schicksal chemischer Elemente nach dem Einschlag rechnerisch zu verfolgen. (Geophysik und Geochemie sind in diesem Geschäft gleichberechtigte Partner!) Im Lichte dieser numerischen Simulationen erlaubt die Analyse von Mondgestein Rückschlüsse auf Ereignisse, die über vier Milliarden Jahre zurückliegen. Wie ist Rekonstruktion möglich? Indem man die Verläufe von möglichst vielen Stoßszenarien konstruiert. Irgendwann kommt der Ur-Doppelplanet Erde-Mond „richtig“ heraus. Man muss bloß an den Stoßparametern „herumspielen“.

Narben der Schöpfungsfrühe

Der Mond ist nicht das unbeschriebene Blatt, von dem H. C. Urey schwärmte. Er wurde heiß zusammengeschweißt. Ein Magmazocean umgab ihn, zum unentgeltlichen Stofftrennen: Das Schwerste landete zuunterst, oben schwamm die Schlacke. Ein kleiner dichter eisenreichen Kern ist umgeben von Mantel und Kruste. Die Vielzahl von Einschlagkratern kündigt heute noch von dem „schweren Beschuss“ (*Late Heavy Bombardment*¹⁷ (LHB)) vor ungefähr 3,9 Milliarden Jahren, ausgelöst vermutlich durch eine 2:1-Bahnresonanz der

¹⁶Es handelt sich um sog. *Smoothed-Particle Hydrodynamics* (SPH). Dabei werden die beteiligten Körper in bis zu Hunderttausend Einzelteile zerlegt, deren Wechselwirkungen (mit der unmittelbaren Umgebung und dem Ganzen) und weiteres Schicksal im Rechner verfolgt wird.

¹⁷Inzwischen ist fraglich, ob es diese Episode je gab. Man sei, heißt es, dem „Fallout“ eines einzigen Ereignisses auf den Leim gegangen, dem Einschlag eines 250-km Brockens, der das rechte „Auge“ des Mondgesichts schuf, das Regenmeer (Mare Imbrium).

beiden Planetenriesen Jupiter und Saturn. Damals wurde das Sonnensystem von übriggebliebenem Planetenbaumaterial (Planetesimals) „gesäubert“. Auf der Erde sind die Spuren des Beschusses längst getilgt. Wir haben Plattentektonik, Wind und Wetter ...

Das vertraute Mondantlitz ist geprägt von den dunklen Maria. Die „Mondmeere“ zeugen aber nicht vom Neptunismus! Plutonismus war am Werk. Letztmalig vor zweieinhalb, drei Milliarden Jahren stieg aus dem Mondmantel basaltisches titanreiches Magma auf und ergoss sich über die lunaren Tiefebenen, die darunterliegende Kraterlandschaft unter sich begrabend. Seit dieser Episode ist der Mond „geologisch“ so gut wie tot. Um diese Zeit scheint auch der Dynamo im Mondinnern seine Tätigkeit eingestellt zu haben. Das großräumige Magnetfeld verschwand.

Der unsymmetrische Mond

Wieso wendet der Mond uns stets die eine Seite nur zu? *G e b u n d e n e* Rotation beruht auf einer Unsymmetrie der Massenverteilung¹⁸. Global gesehen unterscheidet sich des Mondes Rückseite deutlich von der Vorderseite. Die Kruste ist dort dicker und helles Hochland (Terra) – die „Schlacke“! – dominiert. Große Maria, wie sie für die Vorderseite typisch sind, fehlen. Asteroiden konnten den Gesteinspanzer dort nicht durchschlagen, Lava ihn von unten nicht aufschmelzen. Lokal machen sich die eher kreisförmigen „Meere“ als Orte von Schwereanomalien bemerkbar. Man spricht von Massekonzentrationen, sog. Mascons, vermutlich verursacht von einer kilometerstarken schweren Lavadecke. Das alles hat zur Folge, dass der geometrische Mittelpunkt des Mondes nicht mit dem Schwerpunkt (Massemittelpunkt) übereinstimmt. Die Differenz macht keine zwei Kilometer aus, wobei der Masseschwerpunkt der Erde näher ist als der Figurenmittelpunkt.

Die ersten Fotos der Mondrückseite erreichten uns vor nicht ganz 60 Jahren. Als am 7. Oktober 1959 die sowjetische Mondsonde Lunik 3 (Luna 3) den Mond umflog und erstmals Funkbilder der uns abgewandten Seite übermittelte, war das eine Riesensensation. Oberflächenformationen wie „Moskauer Meer“ und „Ziolkowskij“ waren in aller Munde.

¹⁸Um den Mond gravitativ im Zaum zu halten bedarf es eines Hebelarms. Die Längsachse des Mondes zeigt in etwa zur Erde und ist in dieser Lage gefangen.

Ausblick

Die 7 1/2 Zentner Bodenproben, die zur Erde gelangten¹⁹, stammen von 4% der Mondoberfläche und sind beileibe nicht repräsentativ. Die Bandbreite an Gesteinen ist größer. Es gibt Mondgegenden, wo zu landen man wohlweislich bislang unterließ: So fehlt der Vergleich mit Mondmaterial von der Rückseite und aus höheren Breiten, insbesondere von den Polen²⁰. Dort kann im Dauerdunkel Wassereis, geliefert von einschlagenden Kometen und Asteroiden oder niedergeschlagen aus einer extrem dünnen temporären Wasserdampf-atmosphäre, den Zeitläuften getrotzt haben, was für Mondkolonisten aber auch für angehende Marsreisende wichtig werden könnte. Von besonderem Reiz ist die Südpolregion, gibt es doch dort eine riesige Delle von 2 1/2 Tausend Kilometern Durchmesser zu bestaunen, die größte Impaktstruktur im Sonnensystem – das 4,3 Milliarden Jahre alte Südpol-Aitken-Becken.

¹⁹Hinzu kommen Mondmeteorite, die insbesondere auf Antarktika oder in Wüstenregionen gefunden werden.

²⁰Landungen nahe der Pole standen zuoberst auf H. C. Ureys Wunschliste der Apollo-Landeplätze!