



Der Geologe Harrison Schmitt war der erste Wissenschaftsastronaut der US-Raumfahrtbehörde NASA und der bislang letzte Mensch auf dem Mond. Während der Apollo-17-Mission sammelte er zahlreiche Gesteinsproben.

NASA / EUGENE A. CERNAN

PLANETOLOGIE

WIE ENTSTAND DER MOND?

Ein gewaltiger Einschlag auf der jungen Erde lieferte das Baumaterial für unseren Trabanten? Neue Forschungsergebnisse lassen Zweifel an diesem LehrbuchszENARIO aufkommen. Planetologen suchen nun nach alternativen Erklärungen.



Rebecca Boyle ist Wissenschaftsjournalistin in Saint Louis, Missouri.

» spektrum.de/artikel/1527657

Am 13. Dezember 1972 ging der Apollo-17-Astronaut Harrison Schmitt auf einen Felsbrocken im Mare Serenitatis zu, um dort Proben zu nehmen. Der Geologe zog eine Harke durch den pudrigen Staub auf der Mondoberfläche und packte einige wenige Zentimeter große Steine ein. Ein Stück Troktolith erhielt die Katalognummer 76536 – und einen Platz in den Geschichtsbüchern.

Denn dieser Stein lieferte zusammen mit weiteren Felsbrocken wichtige Hinweise zum Ursprung des Mondes. Seit vier Jahrzehnten liest sich dessen Geschichte in zahlreichen Lehrbüchern und Ausstellungen wie folgt: Unser Trabant entstand nach einer katastrophalen Kollision zwischen der jungen Erde und einem marsgroßen Himmelskörper. Die Forscher nennen diesen heute Theia, nach der griechischen Göttin, die den Mond Selene geboren hat. Ins All geschleuderte Trümmer des Zusammenpralls verfestigten sich schließlich zu dem großen Begleiter, der heute unsere Erde umkreist.


Doch neuere Messungen an Troktolith 76536, einer weiteren an derselben Stelle gesammelten Probe mit der Nummer 76535 und an anderen Steinen vom Mond haben zu Zweifeln an dieser Geschichte geführt. Eine wachsende Anzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen zeigt, dass die allgemein akzeptierte Hypothese von einem gigantischen Einschlag nicht so gut zu den vorliegenden Indizien passt wie gedacht. Wenn Theia die Protoerde getroffen hätte und aus den Bruchstücken der Kollision der Mond entstanden wäre, dann sollte er den Simulationen zufolge vor allem aus Materie Theias bestehen. Doch der Mond ähnelt in dieser Hinsicht nicht dem marsähnlichen Objekt, als das sich die Forscher Theia vorstellen – sondern er gleicht nahezu exakt der Erde.

Mit dieser Diskrepanz konfrontiert, haben sich die Planetologen auf die Suche nach neuen Ideen für die Ent-

stehungsgeschichte des Mondes gemacht. Die offensichtlichste und vielleicht einfachste Lösung: Möglicherweise besteht der Mond tatsächlich aus Theia-Materie, aber Theias Zusammensetzung war nahezu identisch mit jener der Protoerde. Das würde allerdings an unserem Verständnis des frühen Sonnensystems rütteln. Eine zweite Erklärung wäre, dass der gewaltige Aufprall die unterschiedlichen Zusammensetzungen ähnlich gründlich durchmischt hat wie ein Rührgerät die Zutaten eines Kuchens. Das setzt entweder einen Einschlag mit außergewöhnlich hoher Energie voraus oder eine ganze Serie von Aufprällen, die jeder für sich kleine Monde produzierten, welche schließlich zu einem großen verschmolzen. Einer dritten Theorie zufolge könnten Erde und Mond eine Reihe

AUF EINEN BLICK NEUE BIOGRAFIE DES MONDS

- 1** Lange Zeit waren Astronomen davon überzeugt, unser Mond sei nach einer katastrophalen Kollision zwischen der jungen Erde und einem etwa marsgroßen Himmelskörper entstanden.
- 2** Genauere Untersuchungen von Gesteinsproben sowie verbesserte Computersimulationen passen allerdings nicht mehr zu diesem einfachen Modell.
- 3** Komplexere Ansätze gehen von vielen kleineren Einschlägen aus oder von einer bislang hypothetischen Struktur aus verdampftem Gestein.



Künstlerische Darstellung einer Synestia, einer zum Rand hin dicker werdenden Scheibe aus verdampftem Gestein. Aus einem derartigen Gebilde könnte der Mond entstanden sein.

MIKE ZENG (ZAOEYO.COM) FÜR QUANTA MAGAZINE

seltsamer Metamorphosen sowie dramatische Änderungen ihrer Umlaufbahnen und Rotationsgeschwindigkeiten durchlaufen haben – eine Herausforderung für bisherige Modelle zur Planetendynamik.

Früher waren Zusammenstöße an der Tagesordnung – doch wie sahen die Kollisionspartner aus?

Um zu verstehen, was am vielleicht bedeutendsten Tag der Erdgeschichte wirklich geschehen ist, hilft ein Blick auf die Situation im frühen Sonnensystem. Vor etwa viereinhalb Milliarden Jahren lag um die Sonne eine heiße, reifenförmige Wolke aus Trümmern. Sie wirbelten herum, kühlten ab und formten durch einen noch nicht ganz verstandenen Prozess erste Verdichtungen, dann Planetesimale und schließlich größere Planeten. Zwischen den Gesteinskörpern kam es immer wieder zu heftigen Zusammenstößen, bei denen sie erneut komplett zerschmettert wurden (siehe »Aufruhr in der Kinderstube«, **Spektrum** März 2017, S. 44). Unsere besten Computermodelle sagen: Um im Verlauf dieses kosmischen Billardspiels unseren heutigen Mond zu erhalten – von seiner Größe über die Eigendrehung bis zu der Rate, mit der er sich von der Erde allmählich entfernt –, muss ein etwa marsgroßer Körper mit der Erde zusammengeprallt sein.

Die ersten geochemischen Untersuchungen am Troktolith von Apollo 17 und an anderen Proben unterstützten dieses Szenario. Das Mondgestein musste aus einem Magmazoan stammen, wie er nur durch einen großen

Einschlag entstanden sein kann. Troktolith würde darauf treiben wie ein Eisberg im Südpolarmeer. Auf der Grundlage dieser physikalischen Bedingungen folgerten die Wissenschaftler zunächst, der Mond bestünde aus der Materie von Theia. Doch hiermit gibt es ein Problem.

Im frühen Sonnensystem verdampften die Himmelskörper durch heftige Zusammenstöße immer wieder, und ihre Bestandteile sammelten sich in unterschiedlichen Regionen des Sonnensystems an. Durch die Hitze der Sonne entwichen leichtere Elemente in weiter entfernt liegende Gebiete. So bildete sich im inneren Sonnensystem ein Überschuss an schweren Isotopen heraus, das heißt an Varianten von Elementen, die zusätzliche Neutronen enthalten. In größerer Entfernung hatte das Gestein einen höheren Anteil an Wasser und leichteren Atomen. Deshalb können Wissenschaftler heute an der Isotopenzusammensetzung ablesen, aus welcher Region des Sonnensystems ein Objekt kommt. Diese Abweichungen sind ausgeprägt genug, um sich zur Klassifizierung von Planeten und Meteoriten zu eignen. Bereits unser Nachbar Mars unterscheidet sich stark von der Erde, und seine Meteoriten lassen sich durch den Vergleich dreier Sauerstoffisotope identifizieren.

Forscher aus der Schweiz und den USA maßen 2001 mit Hilfe fortschrittlicher Massenspektroskopie die Isotopenverhältnisse von Troktolith 76536 sowie von 30 weiteren Mondproben. Das Verhältnis der Sauerstoffisotope war von dem der Erde nicht zu unterscheiden. Inzwischen haben andere Geophysiker außerdem die Isotope von

Titan, Wolfram, Chrom und vielen weiteren Metallen auf der Erde und auf dem Mond verglichen. Bei allen waren die Werte nahezu identisch.

Mond und Erde ähneln sich also stärker gedacht. Demnach aber muss der Mond aus geschmolzenem Material der Erde entstanden sein. »Das allgemein anerkannte Modell befindet sich in einer ernsten Krise«, resümiert Sarah Stewart von der University of California in Davis die neuen Ergebnisse. Stewart hat versucht, die notwendigen physikalischen Umstände – die Kollision mit einem Himmelskörper einer bestimmten Größe und Geschwindigkeit – mit den jüngsten geochemischen Daten in Einklang zu bringen. Gemeinsam mit Matija Ćuk, der heute am kalifornischen SETI Institute tätig ist, schlug sie 2012 ein neues Modell für die Entstehung des Mondes vor. Laut diesem rotierte die junge Erde rasant – ein Tag war nur zwei oder drei Stunden lang – als Theia mit ihr zusammenstieß. Die Kollision erzeugte eine Scheibe um die Erde, ähnlich den Ringen um Saturn. Diese kühlte ab und verdichtete sich allmählich zum Mond.

Neuer Mitspieler im Wettbewerb der Modelle: Eine riesige Wolke aus verdampftem Gestein

Selbst die Rechenleistung von Supercomputern reicht nicht aus, um diesen Prozess vollständig zu simulieren. Aber zumindest grundsätzlich könnte ein Aufprall auf einen derart schnell rotierenden Planeten einen großen Teil Theias zerstören, ausreichend Elemente beider Körper durchmischen und genug Materie ins All auswerfen, um eine Erde und einen Mond mit ähnlichen Isotopenverhältnissen zu erschaffen.

Die Hypothese kann jedoch nur richtig sein, wenn es einen weiteren Effekt gab, der die Drehung der Erde auf ihren heutigen Wert abgebremst hat. Stewart und Ćuk argumentierten, bestimmte Bahnresonanzen könnten zu einem Transfer des irdischen Drehimpulses auf die Sonne geführt haben. Später schlug Jack Wisdom vom Massachusetts Institute of Technology noch eine Reihe alternativer Ideen vor, um Drehimpuls aus dem Erde-Mond-System abzuführen.

Doch keine dieser Überlegungen war vollkommen zufrieden stellend. Die Modelle konnten weder die Bahn des Mondes noch seine chemische Zusammensetzung hinreichend erklären. 2017 präsentierte dann Stewarts Student Simon Lock von der Harvard University ein neues Bild. Es basierte auf einer bis dahin unbekannten, spektakulären planetarischen Struktur.

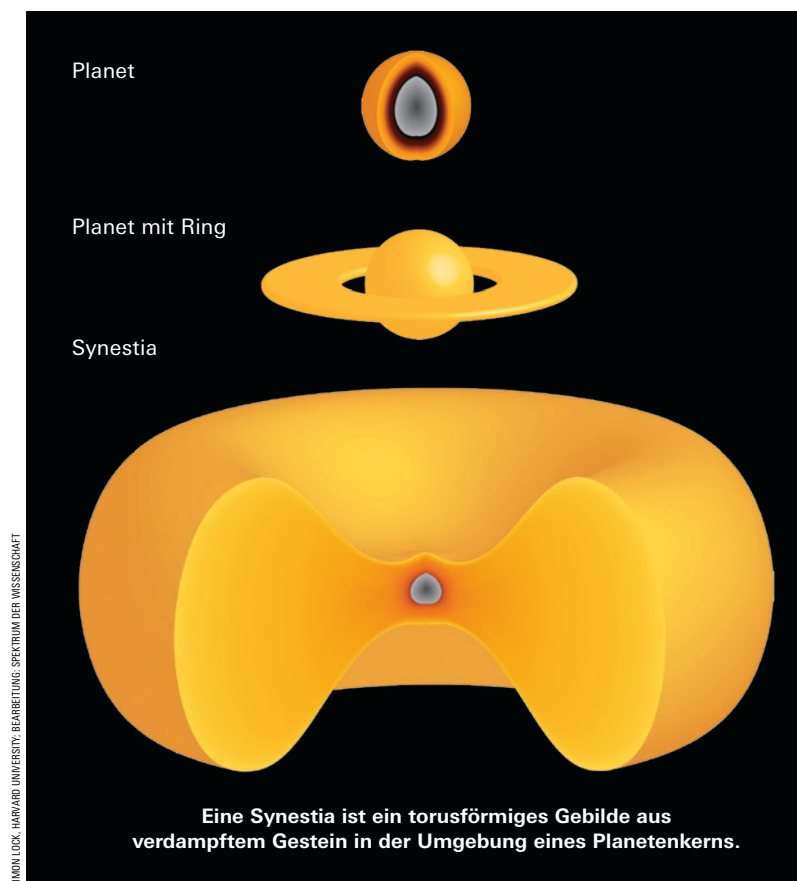
In diesem Szenario verdampfen die junge Erde und Theia vollständig und bilden eine aufgeblähte Wolke in Form eines dicken, ringähnlichen Objekts. Das Gebilde rotiert extrem schnell und erreicht seine »Korotationsgrenze«, die maximale Geschwindigkeit, mit der sich ein Körper drehen kann, ohne zerrissen zu werden. Die Wolke nimmt eine charakteristische Form ein, bei der eine breite Scheibe eine flachere innere Region umschließt. Entscheidend dabei: Beide sind nicht voneinander entkoppelt, wie es etwa bei den Saturnringen und auch bei früheren Modellen der Mondentstehung der Fall ist, sondern sind miteinander verbunden.

In dieser Struktur herrschen höllische Bedingungen. Es gibt keine feste Oberfläche, nur Wolken aus Gesteinsdampf, in denen sich überall Tropfen aus flüssigem Gestein bilden. Lock zufolge beginnt der Mond darin zu wachsen, bevor der Dampf abkühlt und schließlich das Erde-Mond-System hinterlässt.

Da die Struktur so ungewöhnlich ist, musste sie nach Ansicht von Lock und Stewart auch einen besonderen Namen haben. Nach einer Reihe von Versuchen einigten sie sich auf »Synestia« aus der griechischen Vorsilbe »syn« für »zusammen« und Hestia, der griechischen Göttin des Herdfeuers und der häuslichen Ordnung. Insgesamt soll die Bezeichnung für »verbundenes Gefüge« stehen.

Lock und Stewart haben ihre Arbeiten zu Synestias auf Tagungen von Planetenforschern präsentiert. Die Fachkollegen zeigten sich zwar interessiert, aber nicht überzeugt. Vielleicht weil niemand bisher eine solche Erscheinung gesehen hat – im Gegensatz zu den vergleichsweise langlebigen Ringen, von denen es viele im Sonnensystem gibt, und zu den protoplanetarischen Scheiben, die Astronomen im Kosmos beobachten können. Lock ist dennoch zuversichtlich: »So erklären wir die Eigenschaften des Mondes und überwinden dabei die Hürden, vor die uns das alte Modell derzeit stellt.«

Unter den Satelliten der Planeten des Sonnensystems ist der einzige Begleiter der Erde etwas Besonderes. Merkur und Venus besitzen gar keine Monde, unter anderem weil sie sich so nahe an der Sonne befinden; deren



Anziehungskraft destabilisiert etwaige Bahnen um die Planeten. Mars hat mit Phobos und Deimos zwei kleine Trabanten, bei denen es sich um eingefangene Asteroiden handeln könnte oder ebenfalls um Trümmer von Einschlägen. Die großen Gasplaneten besitzen gleich Dutzende von Monden – einige aus Gestein, andere aus Eis, manche aus beidem.

Im Vergleich dazu fällt der irdische Trabant durch seine Größe und seine physikalischen Eigenschaften aus dem Rahmen. Der Mond besitzt etwa ein Prozent der Masse der Erde. Die Summe der Massen aller Monde beträgt bei den äußeren Planeten dagegen weniger als ein Zehntel Prozent ihres jeweiligen Planeten. Zudem steckt ein Großteil des Gesamtdrehimpulses des Erde-Mond-Systems in der Bahnbewegung. Bei den äußeren Planeten liegt dieser Anteil jeweils bei weniger als einem Prozent.

Möglicherweise ist der Mond nicht von Anfang an so massig gewesen. Die von Kratern überzogene Oberfläche des Erdtrabanten zeugt eindrücklich von einem lebenslangen Bombardement. Warum also sollten wir annehmen, dass ein einziges Ereignis den Mond aus der Erde herausgebrochen hat? Ebenso könnten viele Einschläge allmählich den heutigen Mond aufgebaut haben, vermutet Raluca Rufu, Planetenforscherin am Weizmann Institute of Science in Rehovot, Israel.

Vielleicht waren sich die Erde und Theia doch ähnlicher als gedacht

In einer 2016 veröffentlichten Arbeit behauptet sie, der heutige Mond der Erde sei nicht ihr ursprünglicher Begleiter. Vielmehr sei er das Ergebnis tausender – oder zumindest dutzender – Einschläge. Rufus Simulationen zeigen Projektile, die aus verschiedenen Richtungen und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf die Erde treffen. Sie erzeugen jeweils Scheiben, aus denen sich »Moonlets« bilden, kleine Monde. Diese unterschiedlich alten Moonlets verschmelzen schließlich miteinander. Rufus Fachkollegen haben den Vorschlag wohlwollend aufgenommen. Robin Canup, eine Astrophysikerin am Southwest Research Institute und eine der renommiertesten Expertinnen für Kollisionstheorien, hält den Ansatz für wert, sich näher damit zu beschäftigen. Weitere Tests sind jedenfalls nötig: Rufu will herausfinden, ob solche Moonlets gebunden rotiert wären wie der heutige Mond, also der Erde stets die gleiche Seite gezeigt hätten. Das nämlich würde eine Verschmelzung der Himmelskörper erschweren.

Andere Forscher haben sich inzwischen einer weiteren, sehr einfachen Erklärung für die geochemischen Übereinstimmungen von Mond und Erde zugewendet. Vielleicht

sind all die neuen physikalischen Modelle, von Synestias bis zu Moonlets, völlig überflüssig – wenn sich nämlich das Material weitgehend gleicht, weil bereits Theia der Erde ähnelte.

Der Mond ist nicht das einzige Objekt im Sonnensystem, das in seiner Zusammensetzung der Erde gleicht. Gesteinsproben wie Troktolith 76536 teilen ihr Sauerstoffisotopenverhältnis mit einer als Enstatit-Chondrite bezeichneten Art von Meteoriten. Sie stammen aus einer wärmeren, sonnennäheren Region – sind also in der Umgebung der Erde entstanden. Vielleicht verschmolzen einige solcher Felsbro-

Warum sollte ein einziges Ereignis verantwortlich sein? Ebenso könnten viele Einschläge allmählich den Mond aufgebaut haben

cken zur Erde, aus anderen bildete sich Theia. Die Enstatit-Chondriten wären dann der übrig gebliebene Schutt.

Das zumindest behauptete Nicolas Dauphas, Geophysiker an der University of Chicago, Anfang 2017. Die meisten Gesteinsbrocken, aus der die Erde entstand, seien Meteoriten des Enstatit-Typs gewesen. Und für alle anderen Körper, die sich in derselben Region gebildet haben, gelte das ebenfalls. Der Ausgangsstoff der Planeten in dieser Region war genau das Material, das wir nun im Mond und in der Erde finden, und die beiden Körper ähneln sich, einfach weil sie aus der gleichen Substanz hervorgegangen sind.

David Stevenson, Planetenforscher am California Institute of Technology, befasst sich bereits seit 1974 mit der Entstehung des Mondes – dem Jahr, in dem die Theia-Hypothese erstmals präsentiert wurde. Er sieht in Dauphas' Behauptung den wichtigsten Beitrag zur aktuellen Debatte, denn sie löse ein Problem, mit dem sich die Geochemiker seit Jahrzehnten herumplagen. »Er geht die Sache quantitativ an, indem er sich die Ausgangselemente der Erde anschaut«, sagt Stevenson. »Von da aus kann er die Entstehungsgeschichte rückwärts abspielen, und dabei nehmen dann die Enstatit-Chondriten eine wichtige Rolle ein.«

Doch nicht alle Forscher sind von dieser Idee überzeugt. Fragen etwa zum Isotopenverhältnis von Elementen wie Wolfram blieben offen, betont Stewart. Wolfram-182 ist ein Tochterelement von Hafnium-182, weshalb sich das Verhältnis von Wolfram zu Hafnium zur Altersbestimmung nutzen lässt. Im Lauf der Entwicklung von Erde und Mond hätten sich die Metalle unterschiedlich stark in den jeweiligen Kernen und den silikatischen Mänteln verteilen müssen – doch den bislang genauesten Messungen zufolge ist das Wolfram-Hafnium-Verhältnis der beiden Himmelskörper gleich. Dauphas erkennt dieses Problem in seiner Veröffentlichung an: »Sehr spezielle Koinzidenzen wären nötig, damit zwei Körper mit heute derart übereinstimmenden Zusammensetzungen entstehen.«



Mehr Wissen auf Spektrum.de

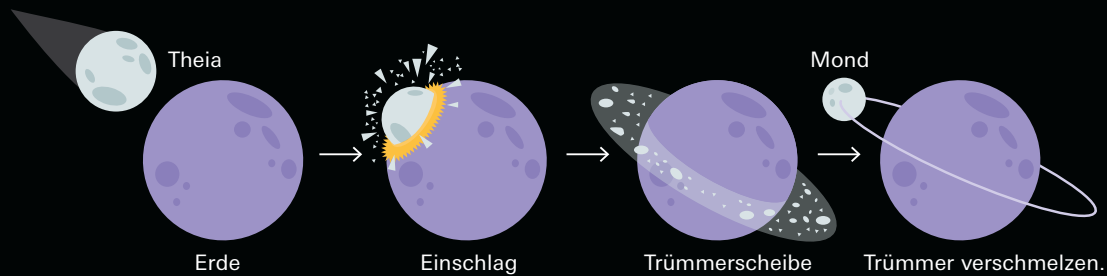
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/der-mond](https://www.spektrum.de/t/der-mond)

Vier Rezepte für unseren Mond

Angesichts präziserer Messungen und leistungsfähigerer Computersimulationen entwickeln Planetenwissenschaftler immer wieder neue Szenarien, wie unser Trabant entstanden sein könnte.

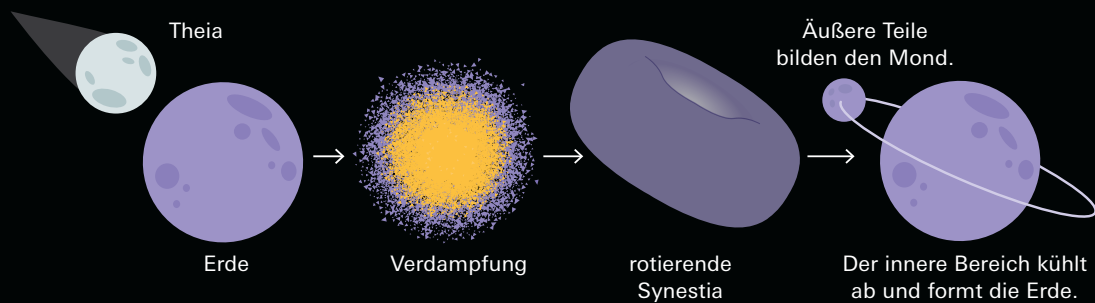
1 DER GROSSE EINSCHLAG

Ein etwa marsgroßer, felsiger Himmelskörper namens Theia kollidierte mit der Protoerde. Der Einschlag erzeugte eine Trümmerscheibe um die junge Erde, aus der sich der Mond bildete. Diese Theorie wurde bereits in den 1970er Jahren entwickelt und galt lange Zeit als wahrscheinlichste Variante. Neuere Untersuchungen weisen jedoch auf Probleme hin: Computersimulationen zufolge sollte der Mond hauptsächlich aus Materie von Theia bestehen; geochemisch ist der Mond aber aus nahezu dem gleichen Material aufgebaut wie die Erde.



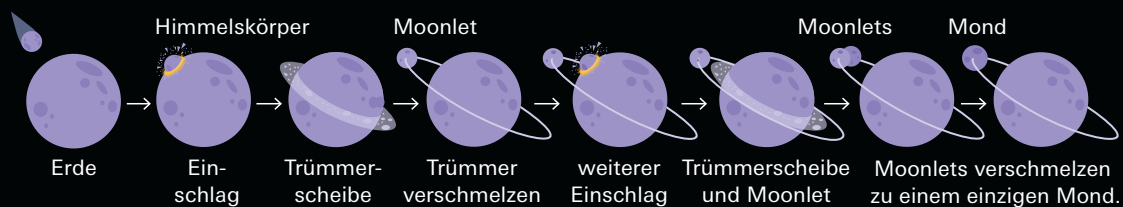
2 SYNESTIA

Vielleicht traf Theia die Erde mit so großer Energie, dass beide Körper komplett verdampften und eine bisher hypothetische Struktur erzeugten, eine »Synestia«. In dieser rotierenden Wolke aus heißen Trümmern wäre die Materie von Theia und der Erde gründlich durchmischt worden.



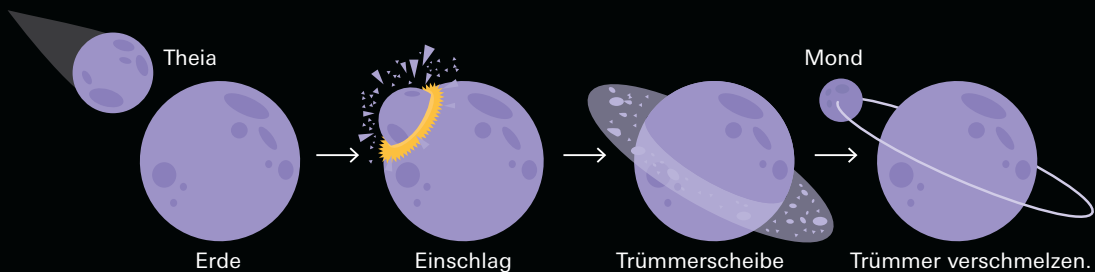
3 KLEINE MONDE

Statt eines einzigen großen Einschlags könnte es viele kleinere gegeben haben. In diesem Modell erzeugt jeder Körper, der mit der Erde zusammenstößt, eine Trümmervolke, aus der sich ein kleiner Mond – ein Moonlet – bildet. Die Moonlets prallen aufeinander und verschmelzen.



4 ZWILLINGSKOLLISION

Vielleicht besaß Theia von vornherein die gleiche Zusammensetzung wie die junge Erde. Das allerdings zieht einiges in Zweifel, was wir heute über die Entstehung von Planetensystemen zu wissen glauben.



Sarah Stewart und ihr Student Simon Lock meinen, der Mond könnte aus einer Wolke verdampften Gesteins hervorgegangen sein. Sie vermuten solche – bislang hypothetischen – Strukturen auch an anderen Stellen im All.



UC DAVIS

Unseren ständigen himmlischen Begleiter besser zu verstehen, ist bereits für sich genommen ein faszinierendes Forschungsprojekt. Aber seine Geschichte ist nur ein Kapitel in einem größeren Epos. »Ich sehe es als Fenster in das frühe Sonnensystem: Was geschah, als sich die terrestrischen Planeten bildeten?«, erklärt David Stevenson.

Vielleicht liefern Synestias die Antwort auf diese Frage. Lock und Stewart vermuten, im frühen Sonnensystem seien zahlreiche solcher aufgeblähten Wolken verdampften Gesteins entstanden, als Protoplaneten immer wieder aufeinanderprallten und schmolzen. Die Erforschung von Synestias könnte also dabei helfen, auch die Entwicklung anderer Planetensysteme zu verstehen.

Weitere Gesteinsproben vom Mond und von der Erde, insbesondere aus den Mänteln der beiden Körper, würden den Geochemikern mehr Daten liefern. Untersuchungen könnten zeigen, ob die Sauerstoffisotope überall gleich häufig auftreten – oder ob verschiedene Isotope gewisse Regionen bevorzugen. »Die Aussage, Erde und Mond seien bezüglich der drei stabilen Sauerstoffisotope nahezu identisch, steht und fällt mit unseren Annahmen über den Aufbau der beiden Himmelskörper«, stellt Stevenson fest.

Komplexe Computersimulationen zum jungen Sonnensystem führen oft zu neuen Feinabstimmungen der Theorien über die Planetenbildung und liefern Hinweise darauf, wo die Planeten herkommen und auf welchen Bahnen sie gewandert sind. Immer mehr Wissenschaftler hinterfragen, ob uns ausgerechnet der Mars hilft, die Geschichte besser zu verstehen. Denn möglicherweise ist er an anderer Stelle entstanden als die Erde, Theia und die Enstatiten. Der Mars, so Stevenson, ist vielleicht gar nicht so ein gutes Beispiel für einen Gesteinsplaneten. Viele Mondforscher meinen stattdessen, bessere Antworten ließen sich auf der Venus finden. Dieser Planet ist bezüglich Größe und Masse nahezu ein Zwilling der Erde. Vielleicht gilt das

auch für die Zusammensetzung ihres Gesteins, und möglicherweise hat die Venus in ihrer Jugend einen Mond besessen und wieder verloren. Doch das sind nur Vermutungen. »Wenn wir eine Gesteinsprobe von der Venus hätten, könnten wir die Mondentstehung einfacher nachzeichnen. Aber leider steht so eine Mission gegenwärtig bei niemandem auf der Prioritätenliste«, sagt Lock.

Solche Einblicke sind also nicht zu erwarten, und ebenso fehlen Labore, in denen sich die unvorstellbaren Drücke und Temperaturen der Kollisionen aus dem frühen Sonnensystem nachstellen ließen. So bleibt den Wissenschaftlern nur, weiter neue Modelle zu entwickeln und durchzurechnen – und damit die Geschichte der Mondentstehung immer wieder zu revidieren. ◀

QUELLEN

Čuk, M., Stewart, S.T.: Making the Moon from a Fast-Spinning Earth: A Giant Impact Followed by Resonant Despinning. In: *Science* 338, S. 1047–1052, 2012

Dauphas, N.: The Isotopic Nature of the Earth's Accreting Material Through Time. In: *Nature* 541, S. 521–524, 2017

Lock, S.J., Stewart, S.T.: The Structure of Terrestrial Bodies: Impact Heating, Corotation Limits and Synestias. In: *Journal of Geophysical Research: Planets* 122, S. 950–982, 2017

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »What Made the Moon? New Ideas Try to Rescue a Troubled Theory« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

