

# **Entstehung der Erde und des Mondes**

## **Planetengeschichte**

In unserem letzten Beitrag befassten wir uns mit der Entstehung von Sternen. Sterne bilden sich aus einer Gas- und Staubscheibe. Diese Scheibe ist auch für die Bildung von Planeten verantwortlich. In diesem Beitrag wollen wir uns mit der Entstehung unserer Erde befassen.

Während sich die Scheibe weiterdrehte, kondensierte und abkühlte, stießen die kleinen Körner des kosmischen Staubs miteinander zusammen, verklumpten durch die Anziehungskraft und wurden immer größer. Schließlich war ihre Masse groß genug, dass sie eine beträchtliche Anziehungskraft ausübten, die noch mehr winzige Materieteilchen zu ihnen hinzog und sie weiter vergrößerte, wodurch sich ihre Anziehungskraft noch einmal erhöhte. Sobald diese wachsenden Materiekörper einen Durchmesser von etwa 1 km erreicht haben, verfügen sie über genügend Schwerkraft, um sich wie "Gravitationsstaubsauger" zu verhalten und den gesamten kosmischen Staub in ihrer Bahn einzusaugen, während sie um die Sonne kreisen (Abb. 1).

# FROM NEBULA TO SOLAR SYSTEM

The cloud of dust and gas that became our Solar System started to collapse about 4.6 billion years ago. It took just 100,000 years for the Sun to form and another 10 million for the gas giants, like Jupiter, to form. The rocky planets formed after 100 million years had passed.

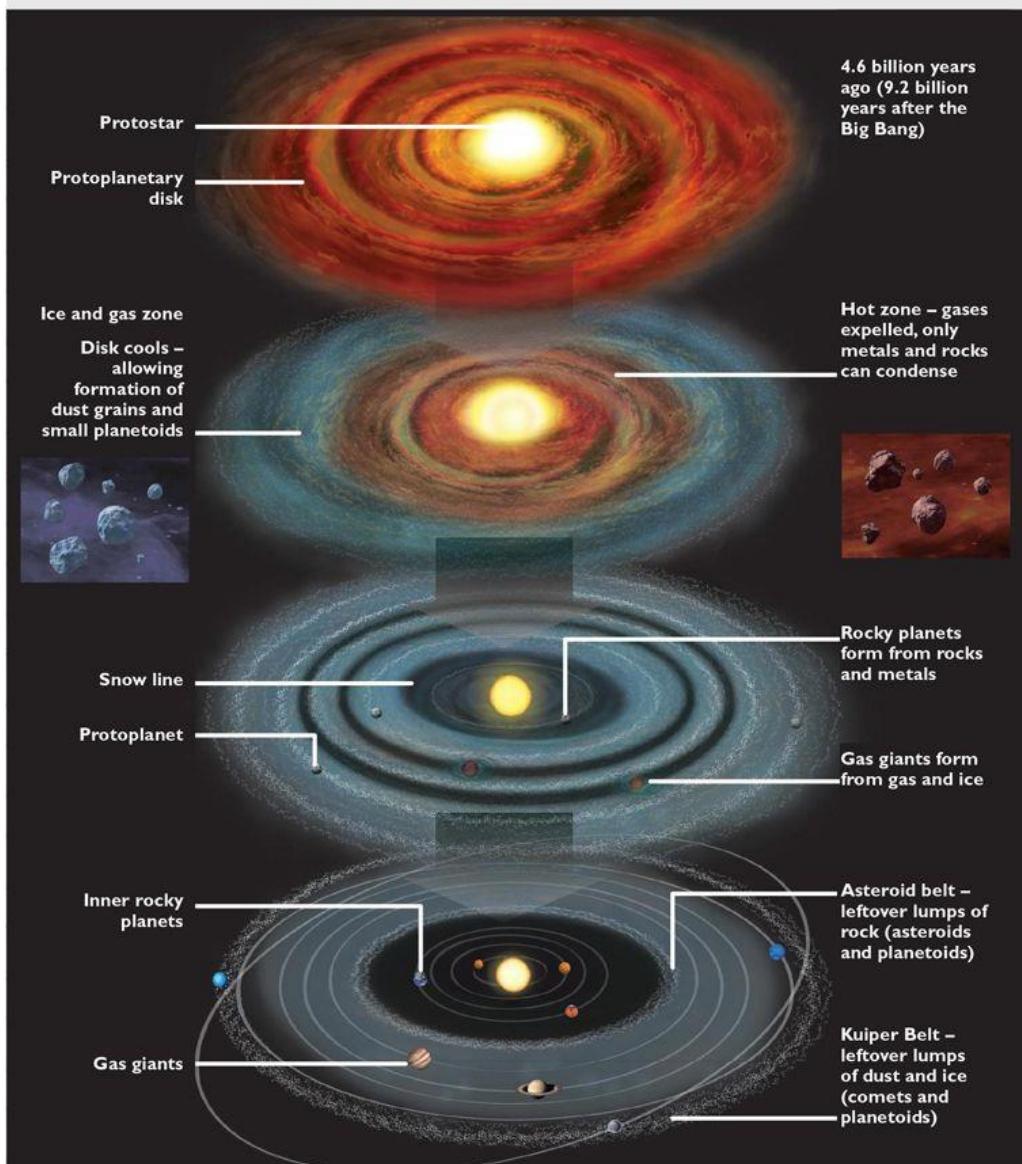


Abb. 1: Entstehung des Sonnensystems

Im Jahr 1905 bezeichneten der Geologe T. C. Chamberlain und der Astronom F. R. Moulton diese kleinen Körper als Planetesimale. Wenn diese Planetesimale immer größer werden, nimmt ihre Anziehungskraft zu, und sie ziehen immer mehr lose kosmische Trümmer an, bis sie eine klare kreisförmige Bahn oder Spur in der Sonnenscheibe bilden. Dies gilt insbesondere für die Gasriesenplaneten wie Jupiter und Saturn, die auf ihrer Umlaufbahn um das Zentralgestirn riesige ausgeprägte Bahnen bilden. Das Gleiche gilt für junge Sonnensysteme wie HL Tauri, in denen ihre eigenen Protoplaneten Spuren in ihrer Scheibe hinterlassen haben.

Inzwischen hat die Energie der entstehenden Sonne im Zentrum des Sonnensystems (99,9 % der Gesamtmasse des Sonnensystems) alles verändert. Zunächst zog die Schwerkraft der Proto-Sonne den größten Teil der Materie in der ursprünglichen

kosmischen Scheibe an. Als der solare Nebel abkühlte, entwickelte sich ein Temperaturgefälle vom Zentrum zum Rand der Scheibe, das das wachsende Sonnensystem umzuverteilen und zu formen begann. In der Nähe der Protoplane herrschten Temperaturen von über 2000 °C, und alles wurde verdampft. Während in Sonennähe schwerflüchtige Elemente und Verbindungen kondensieren konnten, wurden leichtflüchtige Gase hingegen durch die Sonnenwinde „weggeblasen“. Etwa 5 Millionen Kilometer von der Protoplane entfernt waren die Temperaturen so kühl, dass sich Gesteinskörper verfestigen konnten. Dies ist die so genannte "Gesteinslinie", an der die kleineren, inneren Gesteinsplaneten (Merkur, Venus, Erde und Mars) schließlich zusammenwachsen konnten. In diesen haben sich die Elemente Sauerstoff, Aluminium, Eisen, Nickel, Silizium, Magnesium und Calcium stark angereichert. Noch weiter draußen liegt die "Frostgrenze", wo die Temperaturen -375 °C oder weniger betragen. Dies ist kalt genug, um nicht nur flüssiges Wasser zu Eis gefrieren zu lassen, sondern auch Kohlendioxid, Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Diese charakteristische Zusammensetzung ist das auffälligste Merkmal der äußeren Planeten wie Jupiter, Saturn, Neptun und Uranus, die riesige gefrorene Gasbälle mit sehr wenig felsigem Material sind (Abb. 2).

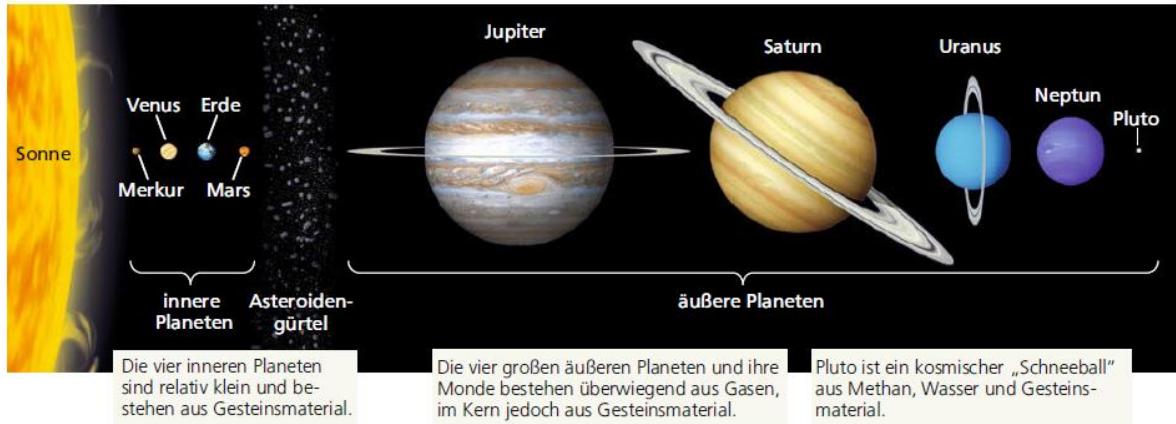


Abb. 2: Die Planeten unseres Sonnensystems

Im Jahr 2018 gelang Wissenschaftlern mit dem Very Large Telescope des Europäischen Weltraumobservatoriums im Norden Chiles das erste gute Bild eines neuen Planeten, der sich in der Entstehung befindet. Er wurde bei einem Stern namens PDS70 gefunden, der mehr als 370 Lichtjahre entfernt ist. Dieser Planet namens PDSb kondensiert noch im inneren Teil der Planetenscheibe in einer Entfernung, die etwa 22-mal so groß ist wie die Entfernung zwischen Sonne und Erde. Auf dem Bild ist deutlich zu erkennen, dass er eine kreisförmige Bahn um den Stern im Zentrum schneidet, so wie es in der Frühgeschichte unseres Sonnensystems der Fall gewesen wäre. Der Planet PDSb ist ein Gasriese, der sogar größer als Jupiter ist, so dass er sich nicht in einen felsigen, erdähnlichen Planeten wie unseren verwandeln wird. Außerdem beträgt seine Oberflächentemperatur immer noch 1200 K, er ist also noch weit davon entfernt, sich zu einem gefrorenen Gasriesen wie Jupiter abzukühlen (Abb. 3).

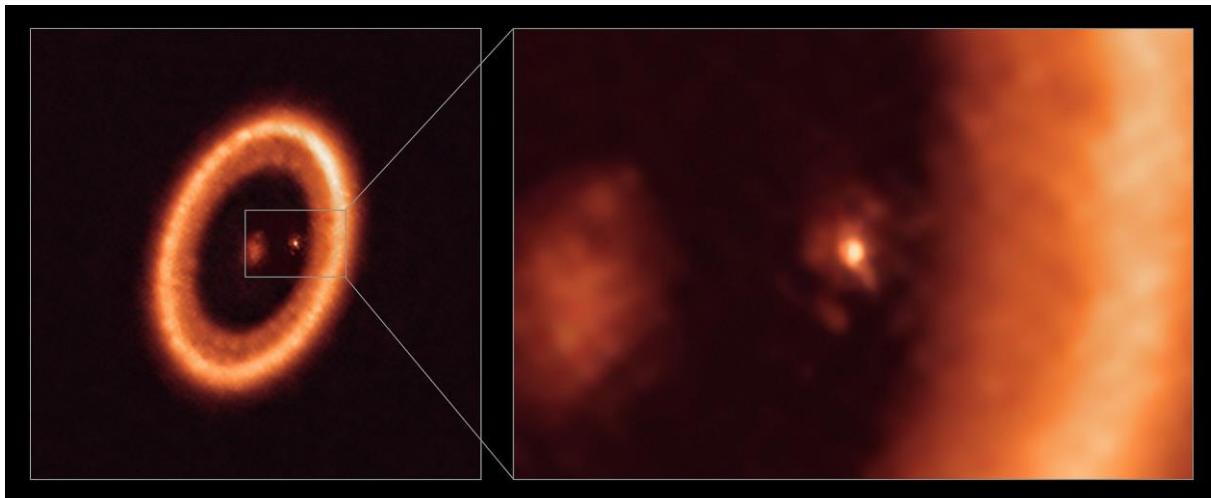


Abb. 3: Aufnahme der protoplanetaren Scheibe von PDS 70 und der beiden Exoplaneten PDS 70 b und c.

Nach 3 Millionen Jahren haben sich die Planetesimalen zu immer größeren Körpern zusammengebaut, bis sie einen Durchmesser von 100 km oder mehr erreichten und zu Protoplaneten wurden. Zu diesem Zeitpunkt reichen ihre Schwerkraft und die innere Hitze aus, um ihnen eine annähernd kugelförmige Gestalt zu geben. Ein großer Teil des losen kosmischen Staubs des frühen Sonnennebels wurde durch die Anziehungskraft der wachsenden Protoplaneten angezogen (Abb. 1).

Dann, etwa 50 Millionen Jahre nach der Entstehung des Sonnennebels, wurde eine kritische Schwelle überschritten. Die Protosonne hat genug Wärme und Energie angesammelt, um durch ihre eigene Schwerkraft zu kollabieren und die Kernfusion ihres Wasserstoffs zu Helium auszulösen. Dies ist die gleiche Reaktion, die in der Wasserstoffbombe abläuft und Fusionsreaktoren antreibt. Dank dieser Reaktion konnte die Sonne zu einem vollwertigen Stern werden, der mehr als 10 Milliarden Jahre lang brennen kann, während er das Sonnensystem mit Energie versorgt. Die Energie dieser gewaltigen Fusionsreaktion wurde zunächst in Form von großen Ausbrüchen von Sonnenwind freigesetzt, einem riesigen Strom geladener Teilchen (bekannt als Plasma), der kontinuierlich aus der Sonne strömte. Dieser erste intensive Ausbruch von Sonnenwind blies einen Großteil des restlichen kosmischen Staubs aus dem inneren Sonnensystem weg, wodurch der interplanetare Raum fast vollständig geräumt wurde und die inneren Planeten daran gehindert wurden, viel mehr Masse zu gewinnen.

Einige Planetesimalen werden nie zu Protoplaneten. Man kann in unserem Sonnensystem noch immer Überreste von Planetesimalen in Form von Asteroiden, Kometen und Meteoriten sehen. Das Studium der Meteorite – Meteore, die genügend Material enthalten, dass sie die feurige Reise durch die Erdatmosphäre überstehen und auf der Erdoberfläche niedergehen – ist eine reiche Informationsquelle über die Entstehung des Sonnensystems. Kometen – kleine Objekte, die in ausgeprägten Ellipsenbahnen um die Sonne laufen – liefern eine noch bessere Information über diesen Prozess, da sie nicht der sengenden Hitze beim Durchgang durch die Erdatmosphäre ausgesetzt waren.

## Entstehung der Erde

Aus einem dieser Protoplaneten wurde schließlich unsere Erde. Sie ist etwa 149 Millionen km von der Protosonne entfernt, eine Entfernung, die manchmal auch als „Goldlöckchen-Zone“ bezeichnet wird (Abb. 4). In dieser Entfernung ist es weder „zu heiß“ (sonst würde er zu einem überhitzen Ort wie die Venus werden, wo die Atmosphäre heiß genug ist, um Blei zu schmelzen) noch „zu kalt“ (so dass die Sonnenerwärmung so schwach ist, dass der Planet festgefroren ist wie der Mars).

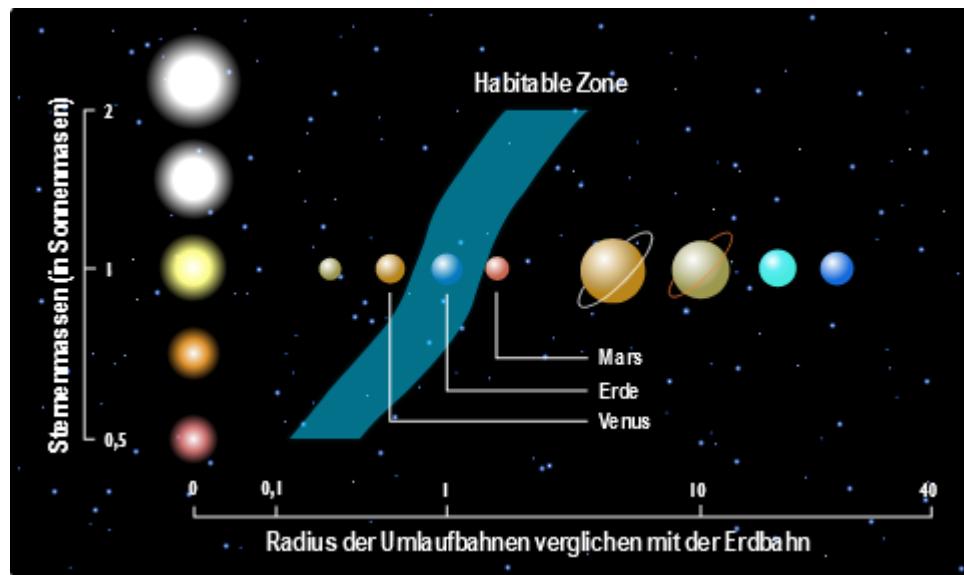
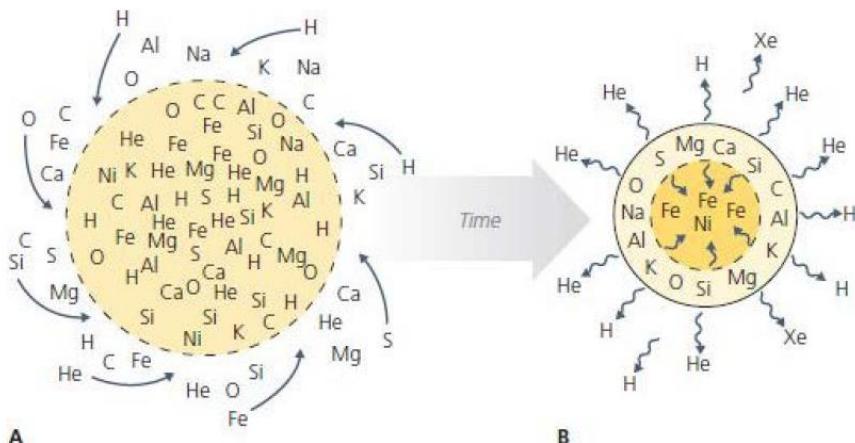
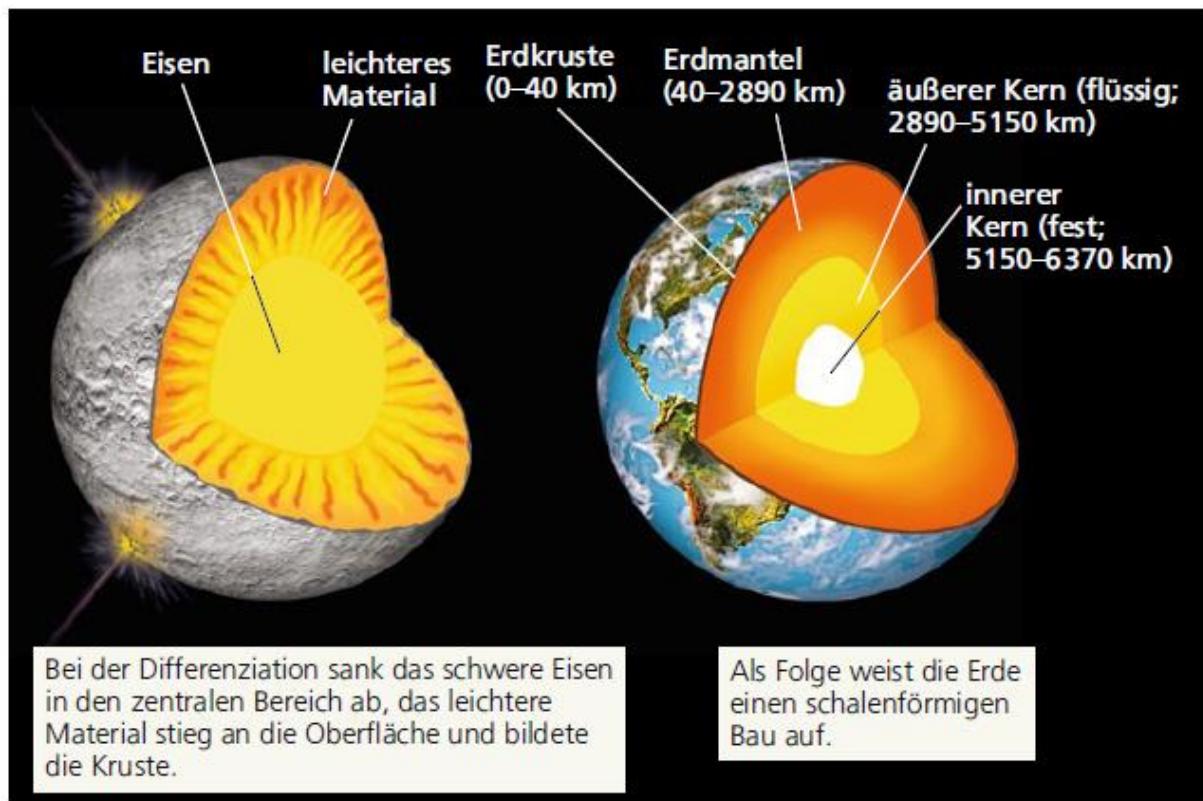


Abb. 4: Goldlöckchenzone

Bei den Temperaturen der Goldlöckchen-Zone konzentrierten sich die wirbelnden Materieklumpen und Planetesimalen, wobei sich die großen Mengen der üblichen festen Elemente (Silizium, Aluminium, Eisen, Nickel, Magnesium, Kalzium, Natrium, Kalium) mit leichteren Gasen wie Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff, Helium und vor allem Wasserstoff mischten. Als diese Elemente zum ersten Mal zusammenkamen, bildeten sie eine gut gemischte Masse mit einheitlicher Zusammensetzung in der gesamten Protoerde. Einige der schwersten Elemente, wie Eisen und Nickel, sanken aufgrund ihrer größeren Dichte in das Zentrum des Protoplaneten. Die leichten Gase, vor allem die sehr häufig vorkommenden Elemente Wasserstoff und Helium, entkamen dagegen größtenteils in den Weltraum, weil die Anziehungskraft der Erde nicht stark genug war, um sie dort zu halten (Abb. 5).

Etwa 30-60 Mio. Jahre nach der Entstehung fand die Differenzierung der Erde in Mantel und Kern statt. Dabei separierte sich der Eisen-Nickel-Kern (Verhältnis 10:1) mit einer Dichte von  $10\text{-}13 \text{ g/cm}^3$  vom Erdmantel, der eine Dichte von  $3\text{-}5 \text{ g/cm}^3$  hat (Abb.5).



**Figure 7.7** Earth's elemental distribution. A. When the earth first condensed, it was a random mixture of the common elements in the solar system, especially gases like hydrogen and helium but also rarer materials like oxygen, aluminum, silicon, magnesium, iron, calcium, sodium, carbon, sulfur, and other elements. More material was continually drawn into this swirling mass by gravity. B. When the earth melted due to the excess heat from several sources, the elements separated out by density and the earth developed layers. The lightest gases (H, He) were too light to be held in by the earth's weak gravity and escaped. The heaviest elements (Fe, Ni) sank to the center. Those less dense solid elements that remained (Si, Al, O, Ca, Na, Mg, K, and some Fe) were left behind to form the mantle.

Abb. 5: Differenzierung der Erde in Schichten und Mantel

Die einfache Ablagerung durch die Schwerkraft allein reicht nicht aus, um die Differenzierung der Erde in die einzelnen Schichten zu erklären, mit einem Eisen-Nickel-Kern, der von einem silikathaltigen Gesteinsmantel umgeben ist. Um die Erde vollständig in Schichten mit völlig unterschiedlicher Zusammensetzung aufzuteilen, braucht man genügend Wärme, um den gesamten Planeten zu schmelzen. Dadurch würde fast das gesamte dichte Eisen und Nickel in das Zentrum der Schwerkraft sinken, während die weniger dichten Silikate obenauf schwimmen würden. Woher kam

diese ganze Hitze? Es gibt mehrere mögliche Quellen. Die frühe Protoerde war voller instabiler Elemente, die radioaktiv zerfielen.

Beim radioaktiven Zerfall wird eine enorme Menge an Wärme freigesetzt, etwa 50 % der Wärme wird in der ersten Halbwertszeit freigesetzt. Alle wichtigen radioaktiven Elemente, die sich heute in der Erde befinden, wie Uran-238, Uran-235, Rubidium-87 und Kalium-40, befanden sich in ihrer ersten Halbwertszeit und waren zu Beginn der Erdentstehung viel häufiger vorhanden, so dass ihre Wärmeproduktion am größten war.

Es gibt jedoch auch Meteoriten wie den kohlenstoffhaltigen Chondriten, die aus der Frühzeit des Sonnensystems stammen, als sich die Erde gerade bildete. Sie deuten darauf hin, dass ein anderes Element für den Großteil der Wärmeerzeugung verantwortlich sein könnte. Diese Meteoriten enthielten ungewöhnliche Mengen des seltenen Isotops Magnesium-26, das als Tochterprodukt des radioaktiven Zerfalls von Aluminium-26 entsteht. Aluminium-26 zerfällt sehr schnell, mit einer Halbwertszeit von nur 700.000 Jahren, so dass nichts von dem ursprünglichen Aluminium-26 der Erde übriggeblieben ist. In der frühen kondensierenden Protoerde war es jedoch offenbar sehr reichlich vorhanden, so dass es das wichtigste Element beim Schmelzen der Erde gewesen sein muss.

Bei der frühen Kondensation der Uerde blieb noch viel kosmischer Schutt übrig, so dass die Erde unter ständigem Meteoritenbeschuss stand (Abb.6). Der Einschlag eines Meteoriten stellt eine enorme Menge an kinetischer Energie dar, die sich beim Aufprall auf die Erde in Wärmeenergie umwandelt. Die Datierung der Meteoriteneinschlagskrater auf dem Mond deuten darauf hin, dass das frühe Sonnensystem immer noch einem intensiven Bombardement ausgesetzt war, das erst vor etwa 3,9 Milliarden Jahren abflaute. Zu diesen Einschlägen gehörte auch derjenige, bei dem ein Stück des Erdmantels abgesprengt wurde und so den Mond bildete. Die Erde hätte also durch die Einschläge von Gesteinsbrocken aus dem Weltraum zusätzliche Wärme abbekommen. Als die Eisen- und Nickelbrocken in den Erdkern sanken, setzten sie eine Menge potenzieller Energie frei. Wie jede andere Energieform kann auch die potenzielle Energie nicht vernichtet werden, sondern muss in eine andere Energieform, nämlich Wärme, umgewandelt werden.



Abb. 6: Erde unter ständigem Meteoritenbeschuss

Im Inneren der Erde herrschen starke Gravitationskräfte, die nicht nur den Druck, sondern auch die Temperatur erhöhen. Dies reicht aus, um viele der Materialien zu schmelzen, aus denen schließlich der Erdmantel entstand. Dies ist auch der Grund, warum der äußere Eisen-Nickel-Kern der Erde flüssig ist. Als schließlich die dichtesten Materialien der Erde zum Zentrum hin abzusinken begannen, veränderten sie auch den Drehimpuls der Erde. Wäre die Erde so klein wie ein Eiskunstläufer, würde sie sich dadurch schneller drehen. Die Erde ist jedoch zu massiv, um auf diese kleine Drehimpulsänderung zu reagieren, doch die Energieänderung muss irgendwo hingehen - also wird sie in Wärme umgewandelt. Am Ende dieses Prozesses, vor etwa 4,5 Milliarden Jahren, hatte die Erde ihre diskreten Schichten aus einem Eisen-Nickel-Kern und einem magnesium-silikatreichen Mantel. Es war noch zu heiß, um eine Kruste an der Außenseite abkühlen zu lassen, so dass die Erde nur zwei primäre Schichten hatte.

## Entstehung des Mondes

Seit Tausenden von Jahren starren die Menschen auf den Mond und fragen sich, woraus er besteht und wie er entstanden ist. Es gab alle möglichen lächerlichen oder albernen Ideen, wie z. B. die Vorstellung, dass der Mond aus Käse bestehe, aber nur wenige ernsthafte Hypothesen wurden von der wissenschaftlichen Gemeinschaft vorgeschlagen. Die Ideen lassen sich in drei große Kategorien einteilen:

Die Einfangtheorie (Abb. 7) postuliert eine unabhängige Entstehung des Mondes in einer anderen Region des Sonnensystems. Bei einer nahen Begegnung mit der Erde wurde er gravitativ eingefangen. Mit dieser Hypothese lässt sich der große Dichteunterschied zwischen Erde und Mond gut erklären, allerdings nicht die große chemische und isotopische Ähnlichkeit. Es gibt noch weitere Probleme mit dieser Hypothese: Zum einen befindet sich die Umlaufbahn des Mondes um die Erde fast in der gleichen Ebene wie die Erdbahn um die Sonne (nur  $5^\circ$  von unserer Ebene um die Sonne abweichend), und er bewegt sich in der gleichen Richtung wie die Erde, was unwahrscheinlich wäre, wenn ein Objekt, das in einem anderen Winkel aus dem Weltraum kommt, eingefangen würde. Eine solche Umlaufbahn würde höchstwahrscheinlich in jeder beliebigen Ebene um die Erde schwingen, außer in der Ebene des Erde-Sonne-Systems. Wenn ein großer Körper durch die Schwerkraft eingefangen wird, kommt es außerdem entweder zu einer Kollision oder das Objekt fliegt mit einer veränderten Umlaufbahn zurück ins All. Damit der Mond langsam von der Schwerkraft der Erde eingefangen werden und ohne Kollision oder Flucht in der Umlaufbahn bleiben konnte, musste die Erde damals eine sehr dichte Atmosphäre haben, die sich viel weiter ausdehnte als heute, um Reibung und Widerstand zu verursachen und das Objekt zu verlangsamen. Es gibt keine Anhaltspunkte dafür, dass die Erdatmosphäre damals so viel dicker war. Wäre der Mond ein exotisches Objekt, das von der Schwerkraft der Erde eingefangen wurde, so würde sich seine Zusammensetzung radikal von der der Erde unterscheiden. Nachdem die Apollo-Missionen Proben zurückgebracht hatten, konnten Wissenschaftler, die das Mondgestein untersuchten, dies testen, die die chemische und isotopische Ähnlichkeit zum Erdgestein bestätigten.



Abb. 7: Einfangtheorie

Die zweite Hypothese, die „Doppelplanet-Hypothese“ (Abb. 8) kann diese chemische Ähnlichkeit erklären. Dieses Szenario, das erstmals von dem Astronomen George Darwin (Sohn von Charles Darwin) Ende des 19. Jahrhunderts vorgeschlagen wurde, besagt, dass der Mond aus der ursprünglichen, sich schnell drehenden undifferenzierten Erdmaterie entstanden ist. Während dieser schnellen Drehung flog geschmolzenes Erdmaterial ins All und bildete den Mond. Einige Astronomen schlugen sogar vor, dass das Becken des Pazifischen Ozeans ein Überbleibsel dieses Ereignisses ist. Dieses Szenario schien viele Jahre lang plausibel, obwohl die Plattentektonik in den 1960er Jahren gezeigt hatte, dass das Pazifikbecken keine alte Narbe ist, sondern von sehr jungen Laven bedeckt ist, die meist weniger als 140 Millionen Jahre alt sind. Darüber hinaus kann das „Doppelplanet-Modell“ den Dichteunterschied und den viel zu kleinen Kern des Mondes nicht erklären.

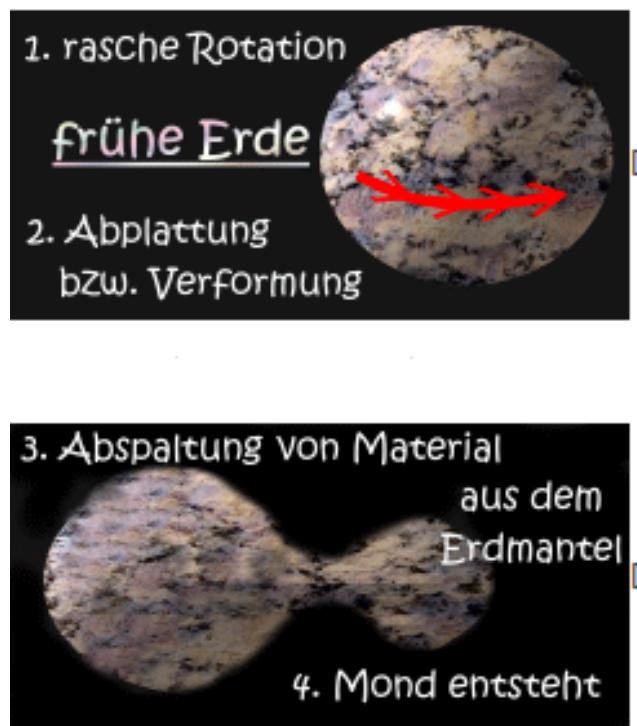


Abb. 8: Doppelplanet-Hypothese

Die Kollision-Hypothese (Abb. 9) kann aber sowohl die chemische Ähnlichkeit wie auch den Dichteunterschied erklären: Gemäß dieser Hypothese kollidierten am Ende der Kern-Mantel-Differenzierung die Protoerde und ein marsgroßer Planet (Theia). Dieses Ereignis wird als „Giant Impact“ bezeichnet. Dabei wurde die Erde bis tief in den Mantel aufgerissen und in ihrer Rotation stark beschleunigt. Ein Teil des durchmischten Mantelmaterials von Protoerde und Theia wurde in die erdnahen Umgebungen geschleudert. Daraus bildete sich der chemisch und isotopisch ähnliche Mond. Das Kernmaterial von Theia vereinigte sich zum größten Teil mit dem der Protoerde, weshalb der Mond einen für seine Größe viel zu kleinen Kern und eine zu geringe Dichte hat. Diese Hypothese setzt voraus, dass die Kernbildung auf der Erde zum Zeitpunkt des Giant Impact bereits weit fortgeschritten oder schon abgeschlossen war.

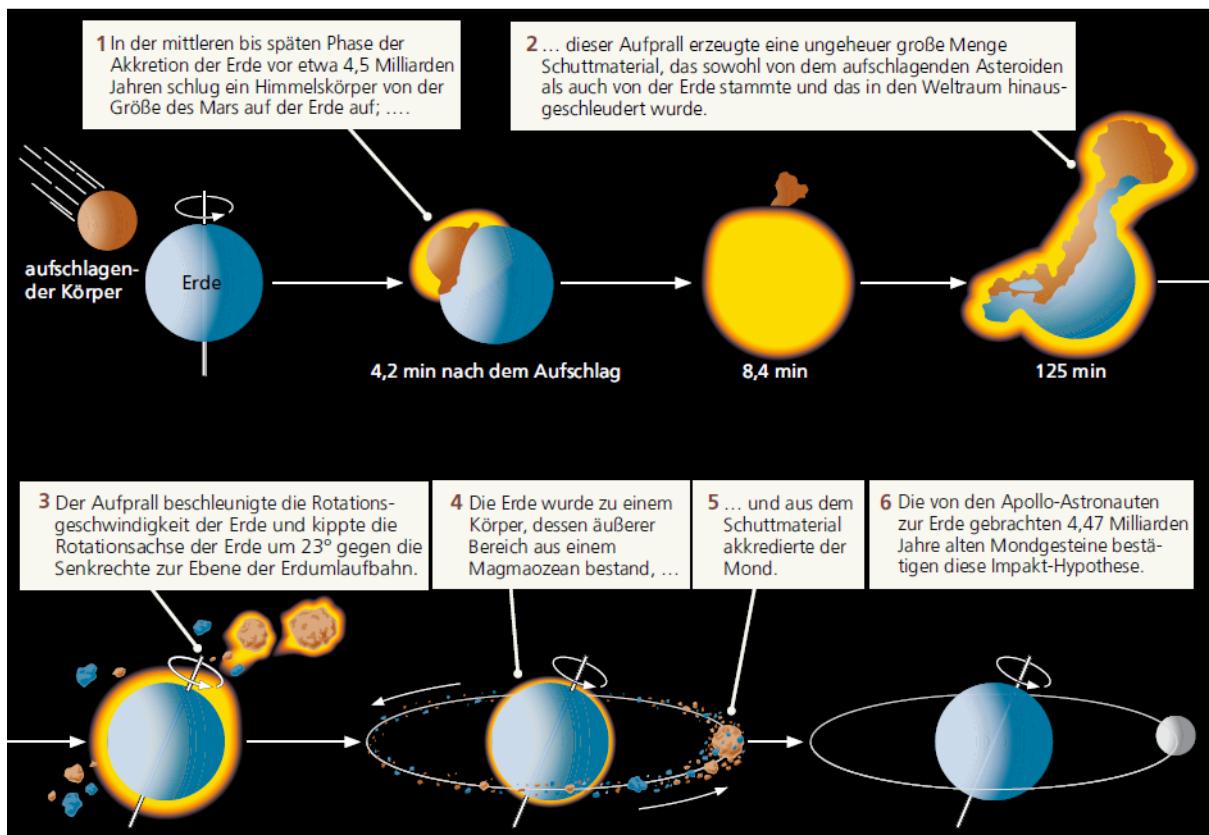


Abb. 9: Kollision-Hypothese

Das Mondgestein, das von Apollo 11 bis Apollo 17 mitgebracht wurde, ähnelte in seiner Zusammensetzung nicht der frühen Erde. Es handelte sich auch nicht um eine exotische Zusammensetzung, als wären sie ein von der Schwerkraft eingefangener Körper von außerhalb der Erde gewesen. Stattdessen bestanden sie aus einer Form von kalziumplagioklasreichem Gabbro, bekannt als Anorthosit, und seinem vulkanischen Äquivalent, der bekannten schwarzen Lava, bekannt als Basalt. Mit anderen Worten, ihre Zusammensetzung ähnelte sehr stark der des oberen Mantels, wo die Laven, die als Basalt auf dem Meeresboden oder in Vulkanen ausbrechen, ihren Ursprung haben. Wenn der Mond fast vollständig aus Material wie dem des Erdmantels besteht, mit sehr wenig Eisen oder Nickel, wie sie im Erdkern vorkommen, dann muss er ein Stück des Erdmantels sein, das sich gebildet hat, nachdem sich die Uerde in einen Kern aus Eisen und Nickel und den Mantel aus Silikatmineralien getrennt hatte. Mit anderen Worten: Der Mond entstand, nachdem die Erde abgekühlt und zusammengewachsen war und sich ihre Schichten differenziert und getrennt hatten.

Als Theia (der griechische Name für die Mutter der Mondgöttin Selene) die Erde mit einem Einschlag schräg traf, wurde Material seitwärts von der Erde in die Umlaufbahn geschleudert. Die Energie dieses Aufpralls wäre unglaublich gewesen! Billionen Tonnen Material wären verdampft, und die Temperatur der Erde wäre auf 10.000 °C angestiegen. Sobald diese Trümmer die Erde zu umkreisen begannen (in einem Zehntel der Entfernung, in der sich der Mond heute befindet), hätten sie sich allmählich zusammengeballt und wären im Laufe von etwa 1000 Jahren zum Urmond zusammengewachsen.

Die Hitze der eigenen radioaktiven Mineralien hätte später Teile des Mondes vollständig umgeschmolzen, und der größte Teil des Mondes wäre in der gleichen Zusammensetzung wie der Erdmantel geblieben, während das Schmelzen auch riesige Ausbrüche basaltischer Lavaströme verursachte, die die Magma-Ozeane bildeten, die heute die dunklen "Meere" auf der Mondoberfläche bilden. In der Zwischenzeit hat der Mond einen winzigen Eisenkern mit einem Durchmesser von nur 330-350 km, von dem man annimmt, dass er ein Überbleibsel des Kerns von Theia ist, der nach der Kollision zurückgeblieben ist; der größte Teil von Theias eigenem Eisen-Nickel-Kern muss dem Erdkern beigemengt worden sein.

Wann ist das alles passiert? Auch hier geben die Mondgesteinsproben die Antwort. Mit radiometrischen Datierungsmethoden haben viele Labors Mondgestein datiert. Die meisten sind mindestens 4 Milliarden Jahre alt, was darauf hindeutet, dass sich die Oberfläche des Mondes schon früh gebildet und seitdem kaum verändert hat. Schließlich gibt es auf dem Mond keine der Kräfte, die die Erdoberfläche verändern: Er hat keine Atmosphäre, kein Wasser, keine Verwitterung und keine Plattentektonik. Die einzigen größeren Veränderungen an seiner Oberfläche sind riesige Einschläge, die Krater hinterlassen haben, und die meisten Kratertrümmer wurden auf ein Alter von mehr als 3,9 Milliarden Jahren datiert, d. h. die meisten Einschläge fanden früh statt und seitdem ist nicht viel passiert.

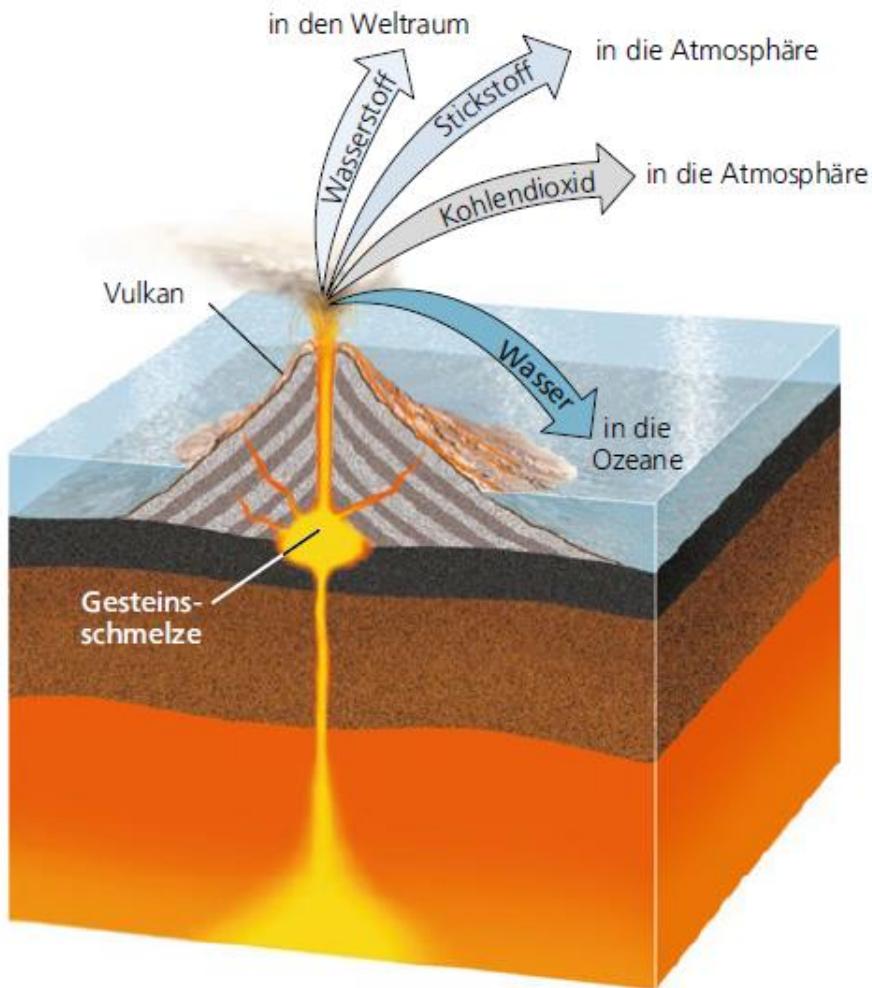
Die ältesten Gesteinsdaten des Mondes aus der Zeit vor dem Einschlag liegen derzeit bei 4,44 Milliarden Jahren. Das ist viel jünger als die Meteoriten, die auf die Entstehung des Sonnensystems zurückgehen. Der Mond ist also definitiv jünger als die Ereignisse, aus denen das Sonnensystem und die Erde entstanden sind, sowie die Schmelz- und Differenzierungsepisode, die den Erdkern vom Erdmantel trennte. Seit dem ursprünglichen Vorschlag der Hypothese des Rieseneinschlags hat die Analyse von Mondgestein viele weitere Indizien erbracht, die den Ursprung des Mondes aus dem Erdmantel unterstützen. Nahezu alle geochemischen Isotope, die seit der Entdeckung des Mondgesteins untersucht wurden, haben gezeigt, dass der Mond und der Erdmantel die gleiche chemische Zusammensetzung haben.

Die Existenz eines großen Mondes als Begleiter der Erde hat mehrere Konsequenzen: Mond und Erde sind gravitativ aneinander gebunden. Am Anfang war der Mond vermutlich nur etwa 80 000 km entfernt, während er heute 384 000 km weit entfernt ist. Bedingt durch die Nähe, wirkten zu Beginn enorme Gezeitenkräfte, die möglicherweise 100 mal stärker waren als heute. Dadurch wurde dem Erdmantel viel Energie zugeführt und verhinderte dessen rasche Auskühlung. Die Gezeitenreibung wirkte aber auch auf den Mond, wodurch er seine Eigenrotation verlor und sich langsam entfernte. Auch auf der Erde verlangsamte sich die Rotation, und der Erntag verlängerte sich von etwa 8 Stunden auf heute 24. Der Gezeitenreibung verdanken wir das starke Erdmagnetfeld sowie Ebbe und Flut in den Ozeanen. Durch die Existenz eines kurzfristig trockenfallenden und danach wieder überfluteten Küstenstreifens wurde vermutlich die Evolution in Richtung Festlandsbesiedlung stimuliert.

## **Formierung der Kruste und Ozeane**

Dem Giant Impact kommt für die Entwicklung der frühen Erde eine entscheidende Bedeutung zu. Die Erschütterung dieses Einschlags zerrüttete die Erde bis tief in den Erdmantel und heizte sie gleichzeitig extrem auf. Es bildete sich ein glutflüssiger Magmaziozean mit Oberflächentemperaturen von über 2000 °C und intensiver Konvektion. Die starke Gezeitenreibung des jungen Systems Erde–Mond heizte die Erde zusätzlich auf. Dadurch entgaste sie einen großen Teil ihres Wasser- und Kohlendioxids aus dem Mantel in eine sehr dichte Protoatmosphäre. In den nächsten etwa 30–60 Mio. Jahren kühlte die Oberfläche dann langsam auf etwa 1000 °C ab. Es bildete sich auf der Erdoberfläche eine erste peridotitische bis basische Kruste, die allerdings wegen ihrer hohen Dichte nicht stabil war. Wasserdampf und CO<sub>2</sub> bildeten weiterhin eine extrem dichte Atmosphäre. Der Wasserdampf-Partialdruck wird auf > 200 Bar, der P CO<sub>2</sub> auf 50–200 Bar geschätzt. Damit hatte die frühe Atmosphäre den 250–500-fachen Druck der heutigen Erdatmosphäre.

Im Zeitraum von 100–400 Mio. Jahren nach dem Giant Impact kühlte die Erdoberfläche auf eine Temperatur von unter 200 °C ab. Aufgrund des hohen Drucks der Atmosphäre begann nun Wasserdampf zu kondensieren und ein vermutlich Jahrtausende anhaltender Dauerregen setzte ein; er bildete den Protoozean (Abb. 10).



**Abb. 9.6** Durch Vulkanausbrüche gelangten in der Frühzeit der Erdgeschichte große Mengen Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoff in die Atmosphäre und Ozeane. Der leichtere Wasserstoff verflüchtigte sich in den Weltraum

Abb. 10: Entstehung der Ozeane

Jahrzehntelang gingen die meisten Geologen davon aus, dass die Abkühlung der Erdkruste zu langsam war, als dass sie viel früher als vor etwa 4,0 Milliarden Jahren hätte stattfinden können. Die meisten waren der Meinung, dass die Erde nach ihrer Entstehung 500-600 Millionen Jahre brauchte, um sich unter den Siedepunkt von Wasser abzukühlen.

Im Jahr 2014 machten Wissenschaftler dann eine verblüffende Entdeckung in einigen Sandkörnern aus Australien. Genauer gesagt handelte es sich um eine Handvoll Sandkörner aus Zirkon (Zirkoniumsilikat oder  $ZrSiO_4$ ) aus einem viel jüngeren Sandstein in den Jack Hills in Westaustralien (Abb. 11). Jedes einzelne Körnchen kann mit Uran-Blei-Methoden datiert werden, so dass sich eine Streuung des Alters ergibt. Die ältesten Körner ergeben jedoch ein Alter von 4,374 Milliarden Jahren, das von John Valley und seinen Kollegen im Jahr 2014 bestätigt und neu datiert wurde. Der derzeitige Rekordhalter für das älteste Krustenmaterial der Erde (d. h. kein Meteorit oder Mondgestein) liegt somit bei 4,4 Milliarden Jahren. Mit diesen Sandkorndaten kommen wir dem Alter von Mondgestein und Meteoriten immer näher, aber zwischen

4,4 Milliarden und 4,56 Milliarden klafft immer noch eine Lücke von etwa 160 Millionen Jahren.

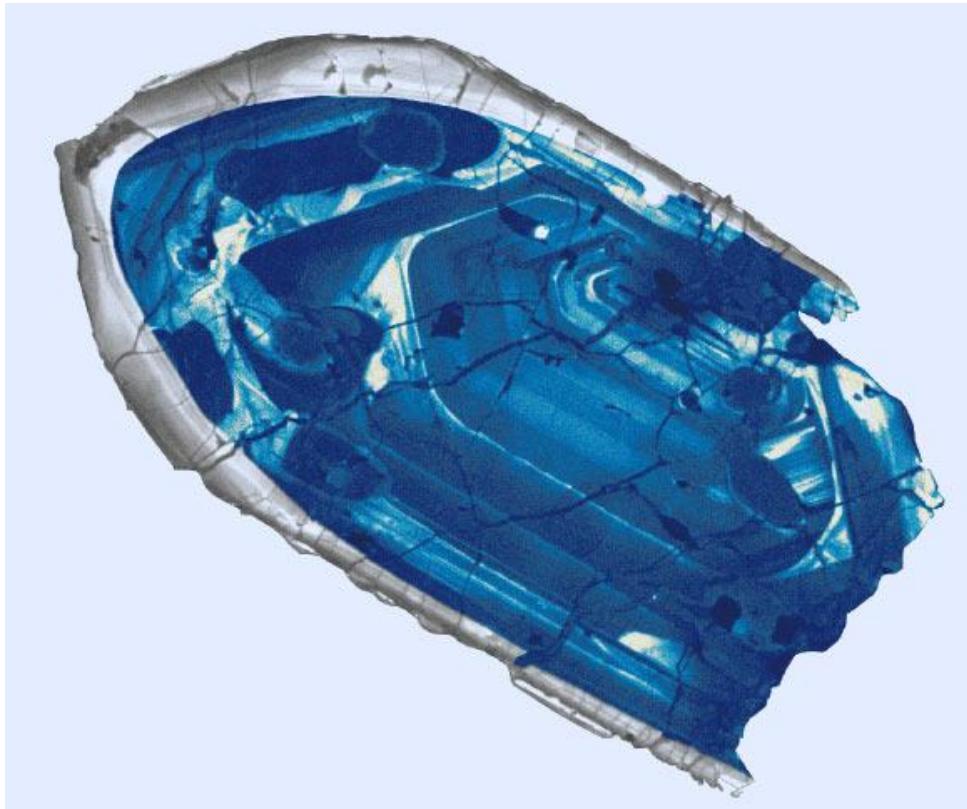
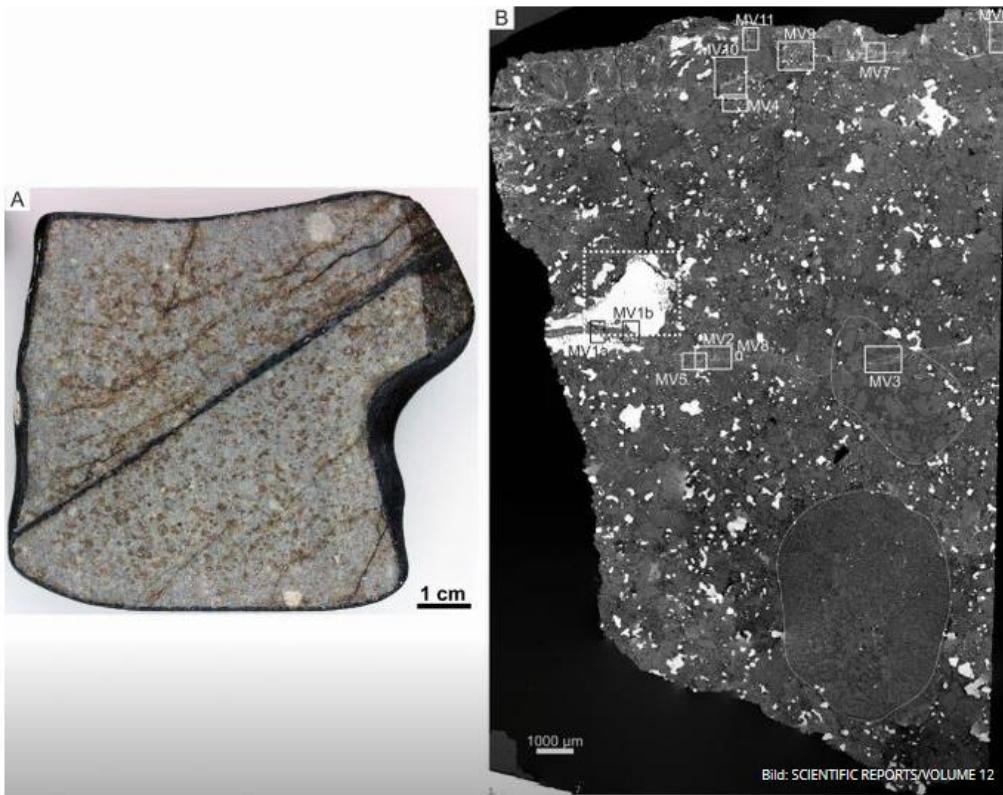


Abb. 11: Zirkon-Kristalle aus Jack Hills.

Dieselben winzigen Zirkonsandkörner enthielten noch mehr Überraschungen. Sie lieferten nicht nur die ältesten bekannten Daten, sondern als Wissenschaftler das Verhältnis der beiden in ihnen gefundenen Sauerstoffisotope analysierten, fanden sie Hinweise auf die frühe Hydrosphäre. Diese Zirkone enthielten Sauerstoffisotope, die darauf hindeuteten, dass die Erde bereits vor 4,4 Milliarden Jahren flüssiges Wasser auf ihrer Oberfläche hatte! Vor dieser Entdeckung waren Geologen immer davon ausgegangen, dass die Erde lange brauchte, um aus ihrem geschmolzenen Zustand vor 4,56 Milliarden Jahren abzukühlen. Die Jack-Hills-Zirkone stellen diese Annahme jedoch auf den Kopf. Wenn sie wirklich auf das Vorhandensein von flüssigem Wasser auf der Erde vor 4,4 Milliarden Jahren hindeuten, dann brauchte die Erde nur etwa 160 Millionen Jahre, um von ihrem geschmolzenen Zustand auf einen Zustand unterhalb des Siedepunkts von Wasser abzukühlen. Diese Indizien deuten auch darauf hin, dass es in dieser Zeitspanne nicht so viele Meteoriteinschläge gegeben haben kann, sonst wären die Ozeane immer wieder verdampft.

Woher kam aber das Wasser der frühen Erde? Traditionell dachten Geologen, dass es sich um Wasser handelte, das im Erdmantel eingeschlossen war, als dieser abkühlte, und das allmählich durch Vulkane in einem Prozess entweicht, der Entgasung genannt wird (Abb. 10). Doch in letzter Zeit stimmen chemische Analysen von außerirdischen Objekten mit der Chemie der Erdozeane überein (insbesondere kohlenstoffhaltige Chondritenmeteoriten). Dies deutet darauf hin, dass in den Trümmern des frühen Sonnensystems (von denen die Chondrite Überbleibsel sind)

viel Wasser eingeschlossen war (Abb.12). Das Gleiche gilt für Mondgestein, das heute nicht viel Wasser enthält, aber bei der Entstehung des Sonnensystems offenbar feuchter war. Wenn das so ist, dann wurde die Erde mit bereits vorhandenem Wasser geboren, als sie abkühlte und kondensierte. Die Oberflächentemperatur musste nur unter 100 °C sinken, damit das Wasser die ersten Ozeane bilden konnte.



Im "Kakowa Meteoriten", der 1858 in Rumänien eingeschlagen hat, wurden nun Spuren von Wasser entdeckt. Rechts sind die Schmelzadern zu sehen.

Abb. 12: Chondriten

Eine Erklärung, die wir ausschließen können, sind Kometen. Obwohl Kometen oft als "schmutzige Schneebälle" bezeichnet werden, weil sie hauptsächlich aus Wassereis und Staub bestehen, zeigen chemische Analysen von vier Kometen, dass sich ihre Geochemie stark von der des Erdwassers unterscheidet. Damit kann die populäre Vorstellung, dass Kometen auf die frühe Erde einschlügen und zu ihren Ozeanen verschmolzen, verworfen werden.

Bei der Ozeanbildung wurden wasserlösliche, flüchtige Bestandteile der Atmosphäre ausgewaschen und lösliche Niederschläge auf der Erdoberfläche gelöst. Sie reicherteten sich als Salze (z. B. NaCl) im Ozean an. Da der Wasserdampf nun überwiegend im Ozean gebunden war, ging der Druck in der Atmosphäre zurück. Der P CO<sub>2</sub> lag aber wahrscheinlich noch immer bei 50–200 Bar. Der Ozean bedeckte vermutlich den größten Teil der Erdoberfläche, lediglich kleine, inselförmige Festlandareale ragten heraus.

Durch die Verdunstung des Ozeanwassers und dessen erneuten Niederschlag begann der Wasserkreislauf. Verwitterung und Sedimentbildung setzten langsam ein. Wasser,

das in Risse und Spalten der basischen bis peridotitischen Kruste eindringen konnte, hydratisierte Minerale wie Olivin und Pyroxen zu wasserhaltigem Serpentin und Chlorit mit geringerer Dichte (Abb.13). Dadurch wurde die Kruste leichter und konnte länger an der Oberfläche verbleiben als die kurzlebige Peridotitkruste. Zu den ältesten Krustengesteinen gehören neben den erwähnten Jack Hills Kristallen auch die Greenstone Belts (Grünsteingürtel), dessen älteste Formationen in Kanada ca. 4,3-4,4 Mrd. Jahre alt sind.



Abb. 13: Bildung von Serpentin-Mineralen aus Olivinen

Bei der Subduktion der Kruste wurde Wasser durch die abtauchenden Krustenteile in den Erdmantel gebracht, sie bewirkten eine Verringerung der Viskosität und eine intensivierte Konvektion im Mantel. Nach und nach konnte aus peridotitischem Magma basaltisches und schließlich granitoides Magma differenzieren und so eine dauerhafte Kruste bilden. Heute liegen die Granitoide als hochmetamorphe Gneise vor, die vermutlich als SiO<sub>2</sub>-reiche Magmen in die Grünsteingürtel eingedrungen sind oder sich um sie herum anlagerten.

Der auf diese Weise beginnende Prozess der Bildung kontinentaler Kruste dauerte sehr lange. Die Hauptkrustenbildungsphase lag vermutlich zwischen 3-1 Mrd. Jahren vor heute. Ab dem Phanerozoikum halten sich Krustenbildung und Krustenrecycling in dem Mantel fast die Waage. Heute bedeckt die basaltische, ozeanische Kruste etwa 60 %, die granitische, kontinentale Kruste etwa 40 % der Erdoberfläche.

Hier haben wir sie nun: die frühe Erde mit ihrem Mond. Sie hat einen Erdkern aus Eisen und Nickel, es bildeten sich die Erdkruste und die Ozeane. Leben gab es zu Beginn der Erdentstehung noch nicht. Bevor wir dieses erkunden, werden wir uns im nächsten Beitrag mit einigen weiteren physikalischen Bedingungen der Erde

auseinandersetzen: dem Magnetfeld der Erde, der Entstehung der Plattentektonik und der Kontinente und den Grundlagen des Klimas der frühen Erde.

## Literatur

- Bahlburg, H. & Breitkreuz, C. (2017): Grundlagen der Geologie, 5.Auflage. Springer Verlag
- Bennett, J. Donhaue, M., Schneider, N., Voit, M. (2020): Astronomie die kosmische Perspektive. Pearson Verlag, 9. Auflage
- Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017): Press/Siever Allgemeine Geologie, 7. Auflage, Springer Verlag
- Hubmann, B. & Fritz, H. (2019): Die Geschichte der Erde. marixverlag
- Oschmann, W. (2016): Evolution der Erde. Utb
- Pincock, S., Frary, M. (2009): Ursprung des Universums für Dummies. Wiley VCH Verlag, 1. Auflage
- Prothero, D. (2021): The Evolving Earth. Oxford University Press
- Prothero, D. & Dott, (2004): Evolution of the Earth, Seventh edition. McGrawHill,
- Valley, J. & Reinhard, David & Cawosie, Aaron & Ushikubo, Takayuki & Lawrence, F & Larson, David & Kelly, Thomas & Snoeyenbos, David & Strickland, Ariel. (2015). Presidential Address. Nano-and micro-geochronology in Hadean and Archean zircons by atom-probe tomography and SIMS: New tools for old minerals. American Mineralogist. 100. 10.2138/am-2015-5134.