

Die Bildung der Erde

Diese Serie befasst sich mit der Bildung der Erde aus einer Staubmasse und wie die Erde am Anfang ausgesehen haben mag. Hierfür gibt es auf der Erde selbst kaum mehr Hinweise - sie wurden durch die aktiven Plattenbewegungen an der Erdoberfläche "ausradiert". Die Bildung der Erde - vom Staub zum Planeten mit einem getrennten metallischen Kern - dauerte „nur“ etwa 50 Millionen Jahre (nur 1% des Gesamtalters der Erde).

Eine zweite Serie, "die Junge Erde", knüpft zeitlich an diese an und stellt die erste Hälfte der Erdgeschichte dar. Sie basiert auf den Hinweisen, die wir in irdischen Gesteinen finden können.

Bild 1 Wie alt ist unsere Erde?

Die Erde ist 4.560.000.000 Jahre alt, anders ausgedrückt $4,56 \times 10^9$ Jahre oder 4,56 Gigajahre (Ga). Wir wissen, dass die Erde ungefähr 4560 Millionen Jahre alt ist, obwohl es keine irdischen Gesteine mit diesem Alter gibt. Dieses fast unvorstellbar hohe Alter wird durch Meteoriten angezeigt, welche mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit gleichzeitig mit der Erde gebildet wurden. Um ein Alter überhaupt zu beziffern, benutzt man die chemisch messbaren Relikte aus dem radioaktiven Zerfall. Diese Methoden sind in einer anderen Foliensammlung „*Altersbestimmung und Radioaktivität*“ detailliert dargestellt. Kurz gesagt: man benutzt die natürlichen Äquivalente der Prozesse, die in Atomkraftwerken zur Energieumwandlung künstlich angeregt werden. In der Natur laufen ähnliche radioaktive Prozesse bei verschiedenen Elementen über extrem lange Zeiträume ab – viel zu langsam, um energetisch von Bedeutung zu sein oder für Lebewesen gefährlich zu werden.

Bild 2 Planet aus Sonnenstaub

Unser Sonnensystem, einschließlich die Sonne und alle Planeten, war vor 4650 Millionen Jahre nur eine riesige Staubwolke. Diese Zeit entspricht nicht dem Urknall, der noch einige tausend Millionen Jahre zurücklag. Beim Urknall wurden lediglich Wasserstoff (H) und Helium (He) gebildet. Weitere Elemente wurden durch die Verbrennung dieser beiden Elemente in „Sonne“ gebildet. Auf der Erde und woanders in unserem Sonnensystem können wir jetzt 90 verschiedene Elemente erkennen. Viele davon (jene die schwerer als Eisen sind) können nicht in Sonne gebildet werden, schon gar nicht in unserer Sonne, welche, am galaktischen Maßstab gemessen, als sehr klein gilt. Daher wissen wir, dass die Staubwolke (Solarnebel), die zu unserem Sonnensystem geführt hat, den Überresten einer Supernova entspricht. Die schweren Elemente sind also während der Explosion eines noch älteren Sterns gebildet worden.

Bild 3 Die Erde im Sonnensystem

Die Erde ist der dritte Planet von neun. Zusammen mit Merkur, Venus und Mars ist sie einer der terrestrischen Planeten, die in relativ geringer Entfernungen die Sonne umkreisen. Weiter außerhalb fängt mit Jupiter der Raum der Gasplaneten an. Obwohl wir die Planeten als groß betrachten, machen sie alle zusammen weniger als 2% der Gesamtmasse des Sonnensystems aus. Der Rest steckt in der Sonne selbst! Weder die Erde noch ein anderer Planet haben die gleiche chemische Zusammensetzung wie die Sonne, sondern sie bestehen hauptsächlich aus Gesteinen und Metallen (Terrestrische Planeten/Innere Planeten) oder aus Gasen (Gasplaneten/Äußere Planeten). Wieso gibt es diese Unterschiede zwischen den Planeten?

Während der Bildung der Planeten wurde das Material in der Staubwolke „sortiert“. Diese Sortierung ist auf den Temperatur- und Druckabfall mit zunehmender Entfernung von der Sonne zurückzuführen. Zentral, also in Nähe zur „Ur-Sonne“, waren sowohl Temperatur als auch Druck wegen der großen Materialmengen erhöht. Dies stand im starken Kontrast zum kalten Weltall außerhalb des frühen Sonnensystems. Während dieser Situation entstand ein Wind, der sogenannte Solarwind, der die kleinen festen Partikel und Gase von der Sonne wegtrieb. Die Sonne selbst erlebte diese Fraktionierung der Elemente nicht - ihre Zusammensetzung entspricht der des gesamten Sonnensystems.

Bild 4 Kondensation der Elemente

Welche Elemente mit diesem Wind nach außen geweht werden, ist von ihrer Kondensationstemperatur abhängig. Wir sind es gewöhnt, dass sich z.B. während Abkühlung Wasserdampf bei 100°C zu flüssigem Wasser und schließlich bei 0°C zu festem Eis umwandelt. Die Elemente wandelten sich jedoch aus der Gasphase direkt in feste Materie um, ohne einen flüssigen Zustand zu durchlaufen. Die Ursache liegt beim geringen Druck im Weltall - dort würde auch Wasser keine Flüssigkeit bilden. Wie Wasser hat jedes Element eine charakteristische Temperatur bei der es erstarrt. Dies führte zuerst zur Bildung von einigen Metallen und Oxidmineralen wie Aluminium- und Kalziumtitanat (aus den "refraktären Elementen" - rot in Bild 4) bei Temperaturen von 1700 bis 1400 K (etwa 1400-1100°C). Auch diese Temperaturen sind niedriger wegen des geringeren Drucks, der ungefähr nur ein Zehntausendstel des atmosphärischen Drucks betrug. Zwischen 1400 und 1300 K kondensierten die häufigen Elemente Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Silizium (Si) zusammen mit Sauerstoff (grau und orange). Der Hauptteil des Wasserstoffs, Heliums, Stickstoffs und Kohlenstoffs, der sich nicht in der Sonne befand, blieb bis unter 400 K gasförmig (hellblau in Bild 4) und wurde aus dem inneren Sonnensystem vom Solarwind herausgetrieben. Dort bildeten sich die großen Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun aus Eis dieser flüchtigen Elemente, da die Temperaturen für ihre Kondensation hier niedrig genug gewesen sind.

Die terrestrischen Planeten entsprechen in ihrer Zusammensetzung weitestgehend dem grau-orangen Bereich aus Bild 4: Sie haben Metallkerne und Silikatgesteine als Mantel und Kruste.

Bild 5 Planetesimale und Akkretion

Die Akkretion der Planeten aus dem Solarnebel ist von Wissenschaftlern mit ihrer Vorstellung und dem Verständnis der Bewegung von Molekülen in Gaswolken modelliert worden. Ein sich drehender Solarnebel (Bild 5) kühlt ständig ab und ein kleiner Anteil, der nicht in die Sonne hineingezogen wird, kondensiert Schritt für Schritt von Innen nach Außen. Nachdem das Material fest wird, kommt es zur Kollision von immer größer werdenden Teilen, so dass sich "Planetesimale" (kleine Protoplaneten) bilden. Die Kollisionen gehen weiter, bis schließlich wenige große Planeten übrig bleiben. Diese sind zum Schluss sehr effektiv beim gravitativen Einsaugen des Restmaterials. Die gesamte Akkretionsgeschichte bis zur Bildung der großen Planeten wird auf nur 40 Millionen Jahre, oder nur 1% des Alters der Erde geschätzt.

Bild 7 Schalenbau der Erde

Während der Akkretion der Erde stieg der Druck im Erdinneren und damit auch die Temperatur. Es trennte sich ein Erdkern (hauptsächlich aus Eisen und Nickel bestehend), der wegen seiner höheren Dichte zum Zentrum wanderte. Was übrig blieb, war der Erdmantel, der vorwiegend aus Magnesium, Silizium und Sauerstoff besteht. Diese Trennung von Kern und Erdmantel ist jenes Ereignis, das mit einem Alter von 4560 Millionen Jahren datiert wird. Die Erdkruste trennte sich erst später und über einen viel längeren Zeitraum vom Mantel ab.

Bild 7 Mantelgestein

Wir besitzen nur sehr wenige Proben vom Erdmantel und keine vom Erdkern. Das Bild zeigt Bruchstücke sogenannter "Xenolithe", welche in einer Basaltlava eingeschlossen sind. Solche Mantelfragmente kommen aus maximal 250 km Tiefe empor, fast nichts im Vergleich mit den 2900 km Gesamttiefe des Erdmantels. Mehr über diese Boten aus dem Erdinneren ist in der Foliensammlung "*Diamant und Erdmantel*" zu finden. Xenolithe von allen Kontinenten belegen, dass der Erdmantel im Vergleich mit der Erdkruste sehr einheitlich in seinem Mineralbestand und seiner chemischen Zusammensetzung ist.

Bild 8 Zonierte Erde und Meteoriten

Bild 9 Meteoriten und Asteroide

Weitere Informationen über den Tiefenbau der Erde sind indirekt aus Meteoriten zu gewinnen, die auf die Erde gefallen sind. Die meisten Meteoriten weisen ein Alter von 4600 Millionen Jahren auf, was heißt, dass sie seit der Akkretion der Planeten weitgehend unverändert geblieben sind. Es gibt verschiedene Klassen von Meteoriten, die dem Schalenbau von terrestrischen Planeten ähnlich sind, nämlich eisenreiche sowie steinige Meteoriten. Eine frühere Hypothese besagte, dass die Meteoriten verschiedene Bruchstücke vom Kern und Mantel eines ehemaligen Planeten repräsentieren, der bei einem riesigen Impakt auseinander geschlagen wurde. Jetzt denkt man, dass die meisten Meteoriten aus dem Asteroidengürtel kommen. Dieser Bereich liegt zwischen Mars und Jupiter (Bild 3) und besteht aus mehr als 20.000 Körper in Größen bis zu einem Viertel des Mondes. Untersuchungen der Isotopenzusammensetzung von Meteoriten belegen, dass Asteroiden nie zu einem einzigen Planeten gehört haben.

Bild 10 Eisenhaltige Meteoriten

Bild 11 Steinmeteoriten, Chondrite

Die verschiedenen Meteoritenarten können als Teile des Kerns und/oder des Mantels von Planetesimalen oder als erstarrte Teile des Solarnebels interpretiert werden. Manche Eisenmeteoriten bestehen aus großen Metallkristallen (z.B. Bild 10 links) und gelten als Analogon für den Erdkern. Dieses Material besteht zu etwa 90 % aus Eisen und Nickel, was mit der abgeleiteten Dichte des Erdkerns in Einklang steht. Demzufolge ähneln viele Eisenmeteoriten unserem Erdkern. Die meisten Steinmeteoriten beinhalten vorwiegend die Minerale Olivin und

Pyroxen und ähneln folglich dem Erdmantel (vgl. Bild 7). Eine weitere Klasse, die Chondrite (Bild 11 links), scheinen aus zusammengedrücktem festgewordenem Solarnebel zu bestehen. Die primitivsten Vertreter enthalten sowohl refraktäre als auch flüchtige Komponenten, welche die ganze Spannbreite der Kondensationsreihe darstellen (Bild 4).

[Bild 12 Mond : Bezug zur Erde](#)

[Bild 13 Krater auf dem Mond](#)

Der Mond erlaubt uns, weitere Geheimnisse der Frühgeschichte der Erde zu entschlüsseln. Von den Mondlandungen zwischen 1969 und 1972 stehen Wissenschaftlern einige Mondgesteine zur Verfügung, welche aus der Zeit von vor 4000 Millionen Jahren stammen. Auf der Erdoberfläche sind aus dieser Zeit keine Gesteine überliefert. Die Ursache für diesen Unterschied ist die Plattentektonik: Plattenbewegungen auf der Erde haben die frühe Erdkruste zerstört und den Mantel neu durchmischt. Durch Kraterbildung auf dem Mond und Schätzung ihrer relativen Alter wissen wir, dass die Kollisionen mit kleinen Meteoriten und Planetesimalen bis 3900 Millionen Jahre vor heute weiterging - die Spätfolgen der Akkretion.

[Bild 14 Fernerkundung auf dem Mond](#)

[Bild 15 Hochländer und Mare](#)

[Bild 16 Gesteinsarten auf dem Mond](#)

Aus einer Zusammenstellung von Fernerkundungsaufnahmen der Mondoberfläche (Bild 14) und Erkenntnissen aus der chemischen Analyse von zur Erde gebrachten Mondgesteinen (Bild 15-16), kann folgendes Bild vom Mondaufbau gezeichnet werden. Auf der Mondoberfläche kommen zwei Arten von Gesteinen vor: (1) Die Hochländer (pink in Bild 14) bestehen aus feldspatreichen Gesteinen, die älter als 4000 Millionen Jahre sind. Sie sind mit vulkanischem Material zusammengeklebt (Bild 16). (2) Die Mare bestehen aus vulkanischer Basaltlava, die deutlich jünger ist, aber trotzdem noch sehr alt im Vergleich mit den meisten Erdgesteinen. Die Mondgesteine belegen, dass Vulkanaktivität auf dem Mond in der Zeit zwischen 4600 und 3100 Millionen Jahren verbreitet war, aber danach erloschen ist.

Diese Erkenntnisse sind wichtig, sowohl für die Genese des Mondes als auch für die Frühgeschichte der Erde, da keine irdischen Gesteine diese späten Bombardements und die frühen plattentektonischen Prozesse überlebt haben. Die Anorthosite (Feldspatgesteine) der Terrae sind als Kruste eines Magmazoceans zu erklären, jedoch fehlt auf der Erde jeder Hinweis auf sie.

[Bild 17 Die Impakt-Hypothese](#)

Die chemische Ähnlichkeit von Mond und Erde ist damit erklärbar, dass beide ursprünglich aus demselben Material gebildet wurden. Zu einem späteren Zeitpunkt während der Akkretion, nachdem sich Kern und Mantel in der Erde getrennt hatten, ist die Erde mit einem anderen Himmelskörper zusammengestoßen. Dieser entsprach in seinem Gewicht etwa 10 % der Erdmasse, also ähnlich groß wie der Mars. Als Folge dieser Kollision ist ein Grossteil des Erdmantels

weggeschleudert worden und ein Teil davon bildete den Mond. Eine solche Kollision ist mit einem Supercomputer modelliert worden (Bilder 19-20), was zeigte, dass die zwei Kerne wahrscheinlich verschmolzen sind und den heutigen Erdkern bilden. Diese Hypothese kann erklären, warum der Kern des Mondes nur etwa 5 % seiner Masse ausmacht.

Die freigewordene Energie führte zur Aufschmelzung des Mondes und auch mehrerer hundert Kilometer des Erdmantels. Bei diesem Szenario sollten Erde und Mond also eine ähnliche geologische Frühgeschichte gehabt haben: Beide besaßen geschmolzene Oberflächen und einen tiefen globalen Magmaozean. Somit ist zu erwarten, dass die erste nicht mehr vorhandene Erdkruste ähnlich wie die lunare Terrae beschaffen war.

Bild 18 Barringer-Krater

Die eindrucksvollste Form eines Meteoritenkraters auf der Erde besitzt der Barringer-Krater im östlichen Arizona (USA), der seine schöne Impaktstruktur dem jungen Alter (25.000 Jahre) und der Wüstenumgebung in Arizona verdankt. Dieser etwa 1,5 km breite Krater wurde von einem Meteoriten mit nur 50 m Durchmesser verursacht. Auf der Erdoberfläche sind zwar wesentlich größere Krater bekannt, jedoch sind diese meistens älter und daher nicht so gut erhalten.

Bild 19 Impakt-Berechnungen 1

Bild 20 Impakt-Berechnungen 2

Die Bilder 19 und 20 zeigen Computer-Berechnungen einer Kollision der jungen Erde mit einem anderen Planeten, etwa gleich gross wie der Mars. Die Zeitpunkte für die Bilder sind in Sekunden nach dem Impakt angegeben, so dass das letzte Bild, die beinaheige Zerstörung der Erde, nur etwa eine halbe Stunde nach dem Impakt liegt. Kern und Mantel vom Impaktor und von der Proto-Erde sind unterschiedlich gefärbt, so dass man die Mischung des Materials sehen kann. Die zwei Kerne vereinen sich weitgehend ($t = 1600-2003$ Sekunden) und bilden den künftigen Erdkern. Mantelmaterial von beiden Körpern wird "weggespritzt" und führt später zur Mondbildung. Wissenschaftler diskutieren noch, in welchem Verhältnis sich Material aus der Erde und aus dem Impaktor im gegenwärtigen Mond befindet.

Bild 21 Magmaozean (Vulkanbild)

Bild 22 Pancake ice tectonics

Die letzten zwei Bilder betrachten die Erdoberfläche nach der großen Kollision und der Bildung des Mondes. Zwei Analogien mit heutigen irdischen Prozessen erlauben uns eine Vorstellung davon, wie es zu der ersten Kruste und den Kontinenten auf der Erde kam. Dieses Bild der Erde beschränkt sich wahrscheinlich auf die Zeit zwischen 4500 und 4350 Millionen Jahre vor heute.

Bild 21 zeigt einen Lavasee auf Hawaii, der als Modell für einen abkühlenden Magmaozean fungieren kann: Der Krater wird während einer Eruption mit Lava gefüllt, die dann langsam abkühlt und fest wird. So entsteht auf dem Magmaozean eine Gesteinskruste analog wie auf dem Lavasee in Bild 21: Hier hat die Erde eine feste Oberfläche, aber in der Tiefe ist der Mantel noch völlig geschmolzen. Teile der Kruste bewegen sich quasi als "Platten" auf den darunter liegenden

Konvektionszellen im Mantel bzw. im Lavasee. Die Platten verhalten sich jedoch nicht wie bei heutigen plattentektonischen Vorgängen: Sie sind vorrangig abhängig von den Mantelbewegungen und nicht von anderen Oberflächenplatten (siehe Foliensammlung "*Plattentektonik*"). Kollisionen zwischen zwei solcher Platten führen nicht zur Topologie einer Subduktionszone, sondern können die Platten gegeneinander verkippen oder einander überschieben. Sie verhalten sich demnach wie Eisschollen auf einem Meer (Bild 22).

[Bildquellen und Informationen zu: Sonnensystem, Akkretion und Mond:](#)

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

<http://solarsystem.dlr.de/RPIF/bestand.shtml>

<http://www.barringercrater.com/>

<http://www.lpi.usra.edu/pub/publications/slidesets/impacts.html>

<http://www.lpl.arizona.edu/outreach/origin/t1204.html>

<http://spacelink.nasa.gov/Instructional.Materials/Multimedia/NASA.Pictures.Photographs.and.Images/>