

Die junge Erde (Teil 1): Geburt und geologische Kindheit unseres Planeten.

Yvan Fischer

(für Abbildungen und mehr Details, siehe Vortragspräsentation im Mitgliederbereich der Geologie-Zirkel-Homepage: <https://geologie-zirkel-biberach.de/mitgliederbereich/>)

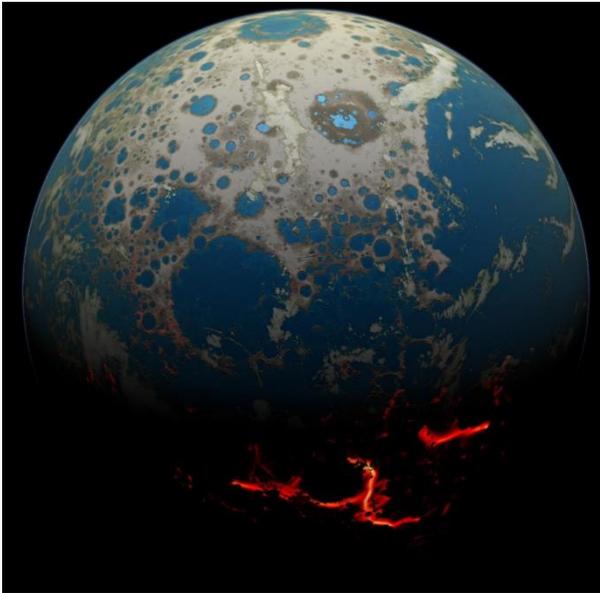


Bild: Simone Marchi/SwRI, heruntergeladen von [NASA Solar System Exploration Research Virtual Institute](#)

Einleitung

Am häufigsten beschäftigt sich die Geologie – und so auch der Geologie-Zirkel Biberach – mit dem Zeitabschnitt der Erdgeschichte, der sich von ca. 540 Millionen Jahren vor unserer Zeit bis heute erstreckt, dem sog. **Phanerozoikum**. Denn hiervon gibt es logischerweise auch die meisten Spuren in Form von Gesteinen oder Fossilien. Wie man mittlerweile weiß, reicht die Erdgeschichte aber bis vor über 4,5 Milliarden Jahre zurück. Damit stellt das Phanerozoikum lediglich die letzten 12% der gesamten Existenz unseres Planeten dar.

Der jetzige Vortrag beschäftigte sich mit der Entstehung der Erde (und des Sonnensystems) und mit den ersten ca. 500 Millionen Jahren ihrer geologischen Geschichte, einem als **Hadaikum** bezeichneten Zeitabschnitt.

Kurze Geschichte von Universum und Materie

Das Universum begann vor 13,8 Milliarden Jahren mit dem Urknall – also der Geburt von Zeit, Raum, Energie und Materie. Das Universum war bereits ca. 9,2 Milliarden Jahre alt, als unser Sonnensystem entstand. In dieser unvorstellbar langen Zeitspanne geschahen wichtige Entwicklungen, die für die Genese unseres Planetensystems essentiell waren.

Das Universum gewann (und gewinnt heute noch) nicht nur an Größe, sondern auch an Komplexität: während anfangs die uns bekannte ‚klassische‘ Materie (Atomkerne bzw. Atome) praktisch ausschließlich aus **Wasserstoff und Helium** bestand und relativ homogen verteilt war, bildeten sich unzählige Sternengenerationen (schon ab ca. 100 Millionen nach dem Urknall) und Galaxien (ab ein paar Hundert Millionen Jahren nach dem Urknall). Vor allem im viele Millionen Grad heißen Kern massenreicher Sterne entstanden durch **Kernfusion** (sog. **Nukleosynthese**) aus Wasserstoffkernen (Protonen) Heliumkerne. Gegen Ende des Sternlebens werden über verschiedene Stufen dann **schwerere Elemente** wie etwa

Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Schwefel, Silizium, Eisen, Nickel etc. durch weitere Kernfusion gebildet. Wichtig ist zu erwähnen, dass bei der Kernfusion (bis Eisen/Nickel) nicht nur neue Atomkerne geschaffen werden, sondern auch **Energie freigesetzt** wird. Diese Energie ist deshalb wichtig, weil sie einerseits während der fast gesamten Lebenszeit des Sterns einen Schwerkraft-bedingten Kollaps der Sternmaterie verhindert (und somit den Stern stabilisiert) und andererseits u.a. als elektromagnetische Wellen (z.B. sichtbares Licht) ausgestrahlt wird (was u.a. für ein insgesamt mildes, relativ stabiles Klima oder für die Photosynthese auf der Erde relevant ist).

Bei extremen Energie-freisetzenden Ereignissen wie etwa Supernova-Explosionen entstanden darüber hinaus noch schwerere, seltenerer Elemente als Eisen/Nickel, so etwa Blei, Gold, Uran u.v.a.m. Solche heftige kosmische Ereignisse trugen (und tragen heute noch) außerdem dazu bei, dass alle durch Sterne gebildeten Elemente in den interstellaren Raum verteilt wurden/werden.

Im heutigen Universum stellen die so neu generierten Elemente (sprich: alle Elemente außer Wasserstoff und Helium, d.h. Kohlenstoff, Sauerstoff, Silizium, Eisen etc.), ca. 1% der klassischen Materie dar. Diese Elemente werden von den Astronomen – chemisch nicht ganz korrekt – pauschal als **„Metalle“** bezeichnet. Der überwiegende Massenanteil der klassischen Materie im Universum entfällt also auf Wasserstoff und Helium (75% bzw. 24%). In unserem gesamten Sonnensystem beträgt der Anteil an „Metallen“ bis zu 1,7%. Beim Aufbau der Erde wurden diese Elemente so stark angereichert, dass sie fast 100% der Masse unseres Planeten ausmachen. Mit anderen Worten: die Erde und fast alles, was heute in ihrem Inneren und an ihrer Oberfläche zu finden ist – einschließlich der Menschen! – besteht aus diesen „Metallen“ (und wenig Wasserstoff als Bestandteil von Wasser).

Interessanterweise blieb es aber im Universum nicht bloß bei der Entstehung der Elemente: im Umfeld sterbender (z.T. explodierender) Sterne bildeten (und bilden heute noch) die häufigsten Elemente auch Moleküle: so entstanden **erste Minerale** („Urminerale“) wie etwa die Silikate **Olivin** und **Calcium-reiche Pyroxene** (die heute noch wichtige Bestandteile des oberen Erdmantels sind), Edelsteine wie **Diamant** oder **Korund**, sowie andere relativ einfache Moleküle. In kühleren Bereichen des Weltraums (in Sternennähe bzw. zwischen den Sternen) entstanden/entstehen auch weitere Verbindungen wie **Wasser** (in sehr großen Mengen), aber auch Kohlenstoffverbindungen wie **CO₂**, **Methanol**, **Methan (CH₄)**, **Ameisensäure**, **Formaldehyd**, und sogar **polyaromatische Kohlenwasserstoffe** und **Aminosäuren**. Und es werden regelmäßig immer mehr Produkte dieser „Kosmochemie“ entdeckt. In der Kälte des Weltraums liegen flüchtige Moleküle wie Wasser oder CO₂ als Eis vor und sind mit dem **„Sternenstaub“** assoziiert. Sternenstaub besteht aus den o.g. wenigen Mineralen und organischen Verbindungen, sowie Eisen und Nickel und anderen Elementen. Der Staub liegt in Form von winzigen Körnchen vor, die 100- bis 1000-mal kleiner als eine Haarbreite sind (ca. 0,1-1 µm).

Entstehung des Sonnensystems

Unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, ist eine von unzähligen Milliarden Galaxien im Universum. Sie misst etwa 100.000 Lichtjahre (mit anderen Worten braucht das Licht mit einer Geschwindigkeit von ca. 300.000 km pro Sekunde 100.000 Jahre, um die Milchstraße ihrer Länge nach zu durchqueren). Sie enthält Hunderte von Milliarden Sterne, von denen unsere Sonne nur einer ist. Der von der Erde aus gesehen allernächste Stern ist Proxima Centauri, der ca. 4,2 Lichtjahre von uns entfernt ist. Zwischen den Sternen liegt der fast leere interstellare Raum. An zahlreichen Stellen der Milchstraße (und anderer Galaxien) verdichtet

sich die Materie jedoch zu sog. **Molekülwolken** (auch Nebel genannt), die aus **Gas** (Wasserstoff, Helium) und **Staub** (s.o.) bestehen. Diese Wolken waren und sind heute noch die **Geburtsstätten neuer Stern- und Planetensysteme**.

Solche Systeme entstehen, so auch unser Sonnensystem vor ca. 4,6 Milliarden Jahren (präzise gesagt: ab 4,567 Milliarden Jahre vor heute), wenn innerhalb der Molekülwolken eine stärkere, **lokale Materieverdichtung** erfolgt (z.B. durch die Druckwelle einer nahen Supernova-Explosion, wie das vermutlich bei unserem Sonnensystem der Fall war). Hier kollabiert ein Teil der Molekülwolke aufgrund ihrer eigenen Schwerkraft (Materie zieht ja Materie an), auf einen zentralen Bereich hin, wo ein **Protostern** (bzw. **Protosonne**) entstehen wird. Die sich zusammenziehende Materie fängt dann an, um den Protostern herum zu rotieren und bildet aufgrund der Rotation eine abgeflachte Scheibe, die sog. **protoplanetare Scheibe**.

Im Zentrum der Scheibe befindet sich die Protosonne. Diese enthält über 99,8% der gesamten Materie des Sonnensystems. Je dichter die Materie beim Kollaps zur Protosonne wird, umso heißer wird sie. Ab einer Temperatur von ca. 10 Million Grad (Kelvin) im Kern des neuen Sterns wird die Kernfusion gezündet, d.h. Wasserstoffkerne werden zu Heliumkernen verschmolzen. Erstaunlicherweise dauerte die Entstehung der Sonne bis zur Zündung der Kernfusion **nur ca. 100.000 Jahre**, ein sehr kurzer Zeitraum gemessen an der zu erwartenden gesamten Lebensdauer unseres Zentralgestirns von ca. 10 Milliarden Jahren.

Im äußeren Bereich der protoplanetaren Scheibe kondensierte ein Großteil der verbleibenden Materie zu den **Gasriesen (Jupiter und Saturn)** bzw. **Eisriesen (Uranus und Neptun)**. Bei der Geburt von Jupiter und Saturn verdichteten sich Gase (v.a. Wasserstoff und Helium), und Staub (→ Gesteinskern der Riesenplaneten). Bei den Eisriesen Uranus und Neptun kondensierten neben Gasen (Wasserstoff, Helium) auch Eis (v.a. Wasser, Methan, Ammoniak), sowie Staub. Die Bildung der Riesenplaneten dauerte wahrscheinlich **weniger als 10 Millionen Jahre**.

Die Bildung der deutlich kleineren **Gesteinsplaneten (Merkur, Venus, Erde, Mars)** erfolgte im inneren (sonnennäheren) Teil der protoplanetaren Scheibe, aus dem Gase (Wasserstoff und Helium) und flüchtige Stoffe wie Wasser und CO₂ etwa durch Sonnenwind vertrieben worden waren. Als ‚Baumaterial‘ verblieben hier also v.a. fester Staub (z.B. Minerale, Eisen/Nickel etc., s.o.). Bei Gesteinsplaneten verlief die Zusammenballung von Materie z.T. chaotischer und heftiger, als dies bei den Riesenplaneten der Fall war. Zunächst verklumpten mikroskopisch kleine kosmische **Staubteilchen** zu sog. **Pebbles** (wörtlich "Kieselsteinen") von max. einigen Zentimetern Größe (die Bezeichnung Kieselsteine ist insofern irreführend, als diese Strukturen eher die Konsistenz von leichten Staubbällchen hatten und wohl nicht abgerundet waren). Dabei beruhte die Anziehung zwischen sanft zusammenstoßenden Staubpartikeln hauptsächlich auf elektrostatischen Kräften. Dieser Vorgang dauerte insgesamt vermutlich **weniger als 100.000 Jahre**.

Als nächstes ballten sich Pebbles zu sog. **Planetesimalen** („Bausteine von Planeten“) von ca. zehn bis hundert Kilometern Größe zusammen. Hierbei kam die Gravitation ins Spiel (und wurde umso stärker, je größer die entstehenden Körper waren). Der Prozess der Planetesimal-Bildung dauerte **weniger als eine Million Jahre**.

Schließlich kollidierten Planetesimale (von denen es im inneren Sonnensystem vermutlich Hunderte bis Tausende gab) untereinander in z.T. heftigen Zusammenstößen, die manche dieser Gesteinsbrocken zu Bruchstücken zerstörten (die wir heute noch im Asteroidengürtel

jenseits der Umlaufbahn von Mars sehen können). Manche Kollisionen führten aber zur Bildung von größeren Objekten, die man schon als **Planetenembryos** bezeichnen kann. Größere Körper konnten erfolgreicher als kleinere zusätzliches Material (Planetesimale und verbleibende Pebbles) anziehen und wuchsen so zu Planeten heran. Kleinere Planeten wie der **Mars** (der etwa 11% der Erdmasse besitzt) bildeten sich innerhalb von **ca. 5 Millionen Jahren**, während die **Erde grob 30-60 Millionen Jahre** brauchte, um (fast) ihre endgültige Größe zu erreichen. In diesem Zeitraum wurden Kollisionen bzw. Einschläge allmählich weniger häufig (weil beim Wachsen der Planeten das umherfliegende Material ‚verbraucht‘ wurde). Es sei aber darauf hingewiesen, dass heute noch regelmäßig Meteoriten auf die Erde fallen (z.B. 1-Kilometer-große Objekte im Durchschnitt ca. alle 500.000 Jahre).

Die frühe Zeit der Erde (Hadaikum)

Wie oben dargestellt, ist die Bildung der Gesteinsplaneten ein stufenweiser Vorgang. Deshalb ist es nicht möglich, einen sehr präzisen Zeitpunkt für die ‚Geburt‘ der Erde oder für den Beginn des ersten Zeitabschnitts der Erdgeschichte, das Hadaikum, anzugeben. Als vertretbare Annäherung kann man aber sagen, dass das **Hadaikum von ca. 4,56 bis ca. 4,0 Milliarden Jahre vor heute** – also ca. 560 Millionen Jahre – gedauert hat. Dabei war seine erste Phase sicher von zahlreichen, z.T. gewaltigen Einschlägen geprägt. Die Energie dieser Einschläge, sowie der Zerfall radioaktiver Isotope (z.B. Uran), führten dazu, dass zumindest ein Teil der jungen Erde (die man nach der römischen Göttin **Tellus** genannt hat) im geschmolzenen Zustand vorlag. Dies war insofern wichtig, als dadurch schwerere Elemente wie Eisen und Nickel Richtung Erdmittelpunkt sinken konnten, wo sie den Erdkern bildeten, während leichteres Material wie Silikate die oberen Hüllen des Globus (Erdmantel und später auch die Erdkruste) formten. Dieser Prozess wird **gravitative Differenzierung** genannt und erfolgte im Wesentlichen innerhalb von **weniger als 10 Millionen Jahren**. Durch die relativ schnelle Abkühlung der Erde muss zumindest die Erdkruste innerhalb weniger Jahrillionen fest geworden sein. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die **heutige Erde** insgesamt **ein Festkörper** ist, mit Ausnahme (i) des äußeren Erdkerns (dessen Strömungen für das Erdmagnetfeld verantwortlich sind) und (ii) einzelner kleiner Bereiche im obersten Erdmantel wie z.B. Magmakammern unter Vulkanen (es gibt heute also keinen Magmaozean unter der Erdkruste!).

Ungefähr 30 bis 60 Millionen Jahre nach Beginn der Erdentstehung ereignete sich ein besonderer Zusammenstoß, bei dem ein etwa Mars-großes Objekt – **Theia** genannt – mit Tellus kollidierte. Dabei wurde Theia zerstört und wurde in den jungen Erdmantel integriert, schleuderte aber auch einen Teil des Erdmantels als geschmolzenes Gestein in den Erdborbit, wo dieses Material rasch (größtenteils in vielleicht nur ca. 100 Jahren!) zum **Mond** kondensierte. Anfangs war die Umlaufbahn des Mondes viel näher an der Erde (ca. 25.000 – 75.000 km) im Vergleich zu heute (384.000 km), was unseren Trabanten am Himmel damals sicher viel größer erscheinen ließ. Aufgrund der Kollision mit Theia waren Erdmantel und -kruste sicher für eine Weile wieder flüssig.

Was passierte im weiteren Verlauf des Hadaikums? (also von ca. 4,5 bis 4,0 Milliarden Jahre). Forscher vermuten, dass z.T. noch große Einschläge stattgefunden haben, diese aber seltener wurden (vielleicht mit Ausnahme einer Periode zwischen 4,1 und 3,9 Milliarden Jahren vor unserer Zeit). Wie sah die Erdoberfläche aus? Zeitweise waren durch Meteoriteneinschläge zumindest Bereiche der Erdkruste geschmolzen und es gab aufgrund der noch großen Hitze im Erdinneren starken Vulkanismus. **Die ältesten Erdgesteine**, die man bisher gefunden hat, stammen vom Ende des Hadaikums: so z.B. der 4,03 Milliarden

Jahre alte **Acasta-Gneis** (aus Nordwest-Kanada) oder sogar Fragmente eines von der jungen Erde stammenden Meteoriten, der bei der **Apollo 14 Mission** auf dem Mond gefunden wurde! (ca. 4,1-4,0 Milliarden Jahre alt). Interessanterweise zeigen diese Funde, dass es damals auf jeden Fall bereits kontinentale Kruste gab (also nicht nur ozeanische, SiO₂-arme basaltische Kruste, sondern auch differenzierte, mit SiO₂ angereicherte kontinentale Gesteine); die Bildung kontinentaler Kruste weist indirekt auf das Vorhandensein von flüssigem Wasser – ja sogar Ozeane – an der Erdoberfläche hin. Möglicherweise noch älter (aber noch nicht zu 100% gesichert) sind Gesteinsproben aus dem **Nuvvuagittuq Grünstein-Gürtel** (aus dem Norden Quebecs), 4,32 – 4,41 Milliarden Jahre alt, die ebenfalls Hinweise auf eine bereits verdickte kontinentale Kruste liefern.

Spektakuläre neue Beobachtungen der letzten 20 Jahre stellen das Bild einer Höllenwelt im frühen Hadaikum z.T. in Frage: in den Australischen **Jack Hills** wurden **Zirkon-Kristalle** gefunden und von vielen Gruppen eingehend analysiert, was Folgendes zeigte: (i) diese Kristalle waren bis zu **4,4 Milliarden Jahre alt** (die ältesten bisher gefundenen Erdminerale überhaupt); (ii) verschiedene Aspekte dieser Kristalle weisen eindeutig auf die **Existenz einer kontinentalen Kruste** hin; (iii) und, fast noch überraschender, es gab **an der Oberfläche** damals **bereits flüssiges Wasser**.

Die Gesamtheit der bisherigen Erkenntnisse der Planetenforschung ergibt also folgendes Bild vom Hadaikum: Zweifelsohne haben besonders in der Anfangsphase noch häufige Einschläge (zusammen mit Radioaktivität im Erdinneren) einen Teil der Erde und ihre Oberfläche zu einem flüssigen Magmaozean gemacht. Eine Höllenwelt eben. Andererseits zeigen neuere Forschungsergebnisse, dass je nach Zeit und Ort selbst im relativ frühen Hadaikum (vor 4,4 Milliarden Jahren) zumindest Teile der Erdoberfläche mit flüssigem Wasser bedeckt waren. Eine Wasserwelt...

Zusammenfassung

Der Entstehung unserer Erde ging eine wichtige, Jahrtausende lange Entwicklung des Universums voraus, bei der in Sternen die Bausteine unseres Planeten (Elemente), und anschließend im interstellaren Raum erste Minerale, Wasser und möglicherweise für die Entstehung des Lebens wichtige organische Verbindungen gebildet wurden. In einer Molekülwolke innerhalb unserer Galaxie entstand aus Gas und Staub vor ca. 4,6 Milliarden Jahren unser Sonnensystem und als Teil davon u.a. die Gesteinsplaneten wie die Erde. Die Anfangsphase der Erdgeschichte war sicher von z.T. gewaltigen Kollisionen mit Planetesimalen und einer großen Hitze im Erdinneren und an der Oberfläche geprägt. Jedoch zeigen neuere Befunde, dass auch schon relativ früh im Hadaikum (ab ca. 4,4 Milliarden Jahren) zumindest zeit- und stellenweise flüssiges Wasser an der Erdoberfläche existierte. Eine große Frage bleibt: wie und wann entstand das Leben? Mit dieser Frage wird sich 2024 ein weiterer Vortrag beschäftigen...

Wie dem auch sei, die moderne Wissenschaft hat uns gezeigt, dass wir – die Erde, die Menschen – letzten Endes aus Sternenstaub bestehen.