

Wenn wir uns mit der Frage beschäftigen wie das Leben auf der Erde entstanden ist müssen wir uns als erstes einmal um eine Definition des Gegenstands unseres Interesses bemühen. Nämlich uns fragen "was ist das - Leben?". Das ist eine scheinbar sehr einfache Frage. Aber solche Fragen haben es meist ziemlich in sich.

Das möchte ich anhand einer frei erfundenen Geschichte erläutern: Und zwar kommt ein Ufo geflogen, setzt sich nieder auf der Erd' und ihm entsteigt ein kleiner grüner Alien, der den Auftrag hat, im Universum nach Leben zu suchen. Und im Laufe seiner irdischen Recherchen sieht er zwei Dinge, die ihn sehr verwundern.

Das Erste ist ein Waldbrand. Er sieht etwas leuchtendes, wärmendes, das sich bewegt.

Bewegung ist ein sehr wichtiges Kriterium fürs Leben und dieses Etwas frisst sich da durch einen Wald. Schon unser sprachlicher Umgang mit dem Feuer suggeriert etwas Lebendiges. Außerdem ist dieses Etwas offensichtlich in der Lage, was es frisst zu verdauen, denn hinter ihm sieht der Wald ganz anders aus als davor. Es findet offensichtlich eine Art von Stoffwechsel statt. Zum dritten reagiert dieses Etwas auf die Umweltbedingungen. Findet es wenig Nahrung, so macht es sich ganz klein und geht auf Sparflamme, bis es wieder bessere Bedingungen vorfindet. Und zu guter Letzt bemerkt er, dass sich dieses Etwas fortpflanzen kann. Und zwar auf die Art, die er schon von Pilzen her kennt: durch Sporen. Die intelligenten Einwohner dieses Planeten, die er unschwer als Lebewesen klassifizieren konnte, nennen sie "Funken". Finden sie einen geeigneten Untergrund, so entstehen aus ihnen weitere Feuer. Tochterfeuer sozusagen.

All das spricht dafür, dass es sich hier um eine eigenartige Lebensform handelt. Etwas in seinem Bauche aber sagt ihm, dass dem nicht so ist. Irgendetwas passt da nicht.

Dann findet er auf einem ganz anderen Kontinent etwas ganz eigenartiges: Knollen im Boden, die aussehen wie etwas das er schon kennt: Schildkröten. Tief gefrorener Boden, und darin befinden sich diese Knollen. Sie sind tief gefroren, haben die Temperatur ihrer Umgebung, zeigen keinerlei Stoffwechsel, keine Bewegung, keine Reaktion auf Reize - gar nichts! Es sind eben völlig tote Knollen. Hier stellt sich ihm die Frage: handelt es sich um Gesteinsformationen, die von den kriechenden Tieren zur Tarnung nachgeahmt werden, Lebewesen in einem eigenartigen, ihm noch nicht bekannten Zustand, oder handelt es sich schlicht um Leichen. Um das herauszufinden packt er einige dieser Knollen zusammen mit der umgebenden Erde in eine Schachtel und nimmt sie mit in sein Raumschiff zu späterer Beobachtung. Als der nach einiger Zeit zurückkommt, um diese Knollen zu untersuchen, sind die verschwunden. Bis auf eine, die gerade beginnt, munter durch sein Raumschiff zu krabbeln. Und er hat den Rest des Tages damit zu tun diese Krabbeltiere zu suchen, die sich in den entlegensten Winkeln seines Schiffs verkrochen haben. Diese Tiere haben offensichtlich einen genialen Weg gefunden, die kalte und nährstoffarme Zeit zu überstehen, indem sie sich einfach einfrieren lassen. Das geht natürlich nicht ohne Aufwand. Sie müssen einen Stoff in ihre Zellen einbauen, der verhindert, dass das Wasser beim Gefrieren Kristalle bildet. Kristalle sind spitz und durchbohren die Zellwand. Beim Auftauen rinnen dann die Zellen einfach aus, und das war's dann für das Lebewesen. Gefriert das Wasser aber amorph, so bleiben sogar die Organellen der Zellen erhalten, und das Tier kann nach dem Auftauen munter loskrabbeln.

Aufgrund dieser beiden Erlebnisse muss er eine neue, genauere Definition von Leben finden. Zusätzlich zum Stoffwechsel, der Bewegung und Reaktion auf Umweltreize und so weiter, muss es mehr geben, das Leben ausmacht.

Erstes Kriterium: Leben ist flüssig.

Das erscheint uns auf dem ersten Blick eigenartig. Was haben wir mit Quallen gemein?

Dazu gibt es ein kleines, schmerzhaftes Experiment: wir stechen uns mit einer Nadel.

Schon beginnen wir ein wenig auszulaufen. Unfreiwillig habe ich dieses Experiment öfters wiederholt - immer mit dem gleichen Ergebnis. Wir bestehen

eben zum größten Teil aus Wasser, auch wenn wir uns recht fest vorkommen. Feuer ist gasförmig und fällt hier schon einmal raus.

Nächstes Kriterium: Leben ist ein Prozess **weit entfernt von einem Gleichgewichtszustand**.

Manche Stoffe sind in den Zellen von Lebewesen viel stärker konzentriert als in der Umgebung.

Und manche Stoffe sind in der Umgebung vorhanden, kommen aber allenfalls in Spuren im Zellinneren vor.

Die Zellen halten diesen Zustand des Ungleichgewichts aktiv aufrecht.

Nächstes Kriterium: **Leben grenzt sich von der Umgebung ab**.

Das sieht man natürlich besonders schön bei den Schildkröten und ihrem Panzer. Aber auch jede Zelle ist umgeben von einer Zellmembran, die das Auslaufen verhindert, aber manche Stoffe hinein und manche hinauslässt. Diese Abgrenzung ist notwendig, um der Tendenz der Natur, den Gleichgewichtszustand wieder herzustellen entgegenzuwirken. Auch hier kann das Feuer nicht mithalten: Es besitzt keine Haut, keine äußere Umgrenzung.

Leben besitzt außerdem einen **Datenspeicher**.

Man kann sogar sagen, dieser Datenspeicher, der die Blaupause des gesamten Organismus enthält, bedient sich des Lebewesens, um sich weiter zu entwickeln und verbreiten. Wir sind quasi nur Vehikel unseres Genoms. Die Evolution dient ja letzten Endes nur dazu, das Genom zu vervollkommen und optimal an die Lebensumstände anzupassen. Wie es dem einzelnen Individuum dabei geht ist der Natur schnurzegal. Es ist Teil eines Prozesses der aus dem Bewahren, der Veränderung und der Weitergabe des Erbmaterials besteht.

So, jetzt haben wir in groben Zügen umrissen, was Leben ungefähr ausmacht.

Stellt sich die zweite, schwierigere Frage: Wie **ist das Leben hier auf der Erde entstanden**? Und damit natürlich gleich die nächste: welche Spuren dieses Prozesses kennen wir?

Das Ganze ist ja eine ziemlich vertrackte Detektivgeschichte.

Die auffälligsten Spuren sind natürlich die heute **lebenden Zellen**. Sie sind das Endprodukt der ganzen Entwicklung. Und sie sind so komplex, auch jene der primitivsten Bakterien, dass man ihnen die Dauer dieser Entwicklung auch ansieht. Wir erkennen aber bereits zwei Bereiche, die uns im weiteren beschäftigen werden.

Es gibt zum einen die **Proteine**. Sie sind die Arbeiter, die hereinkommende Moleküle zerlegen, in Baustoff oder Treibstoff umwandeln und dafür sorgen, dass alles, was die Zelle nicht verwenden kann wieder ausgeschieden wird. Kurz: sie sind für den Stoffwechsel und die Aktionen der Zellen verantwortlich.

Und dann gibt es die **Moleküle des Genoms**, die den Bau- und Ablaufplan des ganzen enthalten. Sie sind sozusagen die Manager, die, angepasst an die jeweilige Situation, sagen, was zu tun ist.

Neben den vielen Organellen der Zelle sind für uns dann noch die **Mitochondrien**, die Energiemanager, interessant. Sie sehen selbst aus wie eigene winzige Lebewesen, viel kleiner als die ohnehin schon kleine Zelle, und sie besitzen auch ihr eigenes Erb molekül. Es wird allgemein angenommen, dass es sich bei diesen Organellen um eine Form von Lebewesen oder Proto-Lebewesen handelt, die zuerst als Parasiten in die Zellen eingewandert sind. Das heißt sie haben sich wahrscheinlich zuerst von der Substanz der Wirtszelle ernährt, sind dann aber auf eine "Lebensweise" umgeschwenkt, die sowohl ihnen als auch den Wirtszellen geholfen hat. Das hat sie wahrscheinlich zum totalen Erfolgsmodell gemacht: keine Zelle, egal von welchem Lebewesen, kommt ohne Mitochondrien aus.

Interessant in diesem Zusammenhang sind natürlich auch die **Viren**. Sie ähneln manchen (Dauer-)Zuständen von Leben, sind aber selbst nicht

Lebensfähig, sondern brauchen einen Wirt, der für sie quasi die Drecksarbeit erledigt.

Wahrscheinlich handelt es sich bei ihnen um einen Seitenarm der Lebensentwicklung. Um Dinge also, die nie selbstständige Lebewesen geworden sind, weil es sich nicht ergeben hat und weil sie das nicht nötig hatten.

Spuren der Lebensentstehung selbst haben wir bislang noch keine gefunden. Und wir werden sie auch nicht so leicht finden. Die **ältesten Spuren des Lebens** meinen manche Forscher in 3.7 bis 3.8 Milliarden Jahre altem Gestein auf Grönland gefunden zu haben. Und diese Spuren sind natürlich keine Fossilien, sondern eine chemische Besonderheit des im Gestein enthaltenen Kohlenstoffs.

Ein Isotop des Kohlenstoffs (C^{12}) ist dort häufiger als anderswo. Das spricht für einen biogenen Ursprung, weil in Lebewesen dieses Isotop ebenfalls häufiger vorkommt. Dieses Gestein ist aber sehr alt und hat dementsprechend viel mitgemacht, sodass dieser Befund heute eher skeptisch betrachtet wird.

Fossile Befunde gibt es erst von den Spuren, die bereits fertige Lebewesen auf der Erde hinterlassen haben. Lebewesen die sich, zumindest in ihrer Lebensweise, nicht von solchen unterscheiden, die wir auch heute noch an manchen Stellen beobachten können. Die Erbauer der Gebilde waren gewohnt, keine Fressfeinde zu besitzen. Daher finden wir sie heute nur mehr in Gewässern, in denen andere Lebewesen weitgehend fehlen. Es sind Cyanobakterien, also Bakterien, die Photosynthese betreiben. Sie bauen Gebilde, die wir als Stromatolithen bezeichnen. Das sind Turm- oder pilzartige Strukturen am Meeresboden. Solche Gebilde mit einem Alter von 3.43 bis 3.47 Milliarden Jahren wurden in manchen Gesteinen gefunden und gelten als ältester gesicherter Nachweis von Leben auf der Erde. Die Bakterien selbst sind natürlich verschwunden, aber diese Formationen lassen sich kaum anders als bakteriellen Ursprungs erklären, zumal uns ja auch heute gebautes Vergleichsmaterial bekannt ist. Diese Lebewesen aber waren zwar sicher primitiv, aber bereits fix und fertig. Was davor kam, liegt im Dunklen.

Das alles führte zu einem Zustand, der mir beim Erarbeiten dieses Vortrags ziemliche Schwierigkeiten bereitet hat. Nämlich, dass es **viele verschiedene** theoretische **Ansätze** und experimentelle Ergebnisse gibt, von denen viele in verschiedene Richtungen weisen. Man kann sie verschiedenen Schulen zuordnen, aber das Gesamtbild ähnelt einem Mosaik aus wirr gesetzten Steinen. Es ist schwer, den Wald vor lauter krummen Bäumen noch zu erkennen.

Es liegt daher nahe, all dem Ungemach zu entfliehen, indem man davon ausgeht, dass das Leben gar nicht hier auf der Erde entstanden ist, sondern irgendwann, irgendwo im Weltraum und zwar auf irgendeine Weise um dann im richtigen Moment hier zu landen. Davon geht die Idee der **Panspermie** aus. Dafür aber Beweise zu finden, die einer kritischen Betrachtung standhalten ist schwierig. Man hat auch noch keine gefunden. Und meines Erachtens stellten sich dort - wo immer das auch gewesen sein möge - wahrscheinlich die gleichen Probleme, das Werden des Lebens zu erklären, wie hier auf der Erde.

Dass Dauerformen von Leben eine Reise durch den Weltraum überstehen können, wurde durch verschiedene Experimente gezeigt. Und innerhalb unseres Sonnensystems ist der Austausch von Meteoriten belegt. Man hat schon mehrere Meteoriten vom Mars und Mond gefunden, zum Beispiel. Und wahrscheinlich gibt es auch auf dem Mars Meteoriten von der Erde. Aber ein Ursprung des Lebens auf einem extrasolaren Planeten (➔ Glossar) ist doch

recht unwahrscheinlich. Und die frühe Erde, das zeigen schon verschiedene Experimente, war ziemlich sicher selbst in der Lage, Leben hervorzubringen.

Eine einfache Betrachtung ist auch geeignet, die extreme Unwahrscheinlichkeit der Entstehung des Lebens auf der Erde zu relativieren: Der Vorgang dauerte, nach Ansicht der meisten Wissenschaftler, 200 bis 600 Millionen Jahre. Nehmen wir die Mitte, also 400 Millionen. Das sind immerhin 10 Prozent des Alters des Sonnensystems. Plötzlich und aus dem Nichts ist das Leben also durchaus nicht entstanden, es hatte reichlich Zeit.

Und außerdem haben wir es hier mit **zwei Zeitskalen** zu tun, die unterschiedlicher nicht sein könnten. Eine ist die astronomische, eben diese 400 Millionen Jahre. Die andere ist die biologische, oder die präbiologische Zeitskala.

Unser wichtigstes Zeitmaß heute ist ein Tag. Zehn Millionen Jahre umfassen rund 3.5 Milliarden heutige Tage. Schon diese Zahl können wir uns nicht mehr vorstellen. Und sollte - diese Idee ist immer noch nicht vom Tisch - das Leben im Gezeitenbereich von Küsten entstanden sein, so wäre das wichtigste Zeitmaß dort der Gezeitenzyklus gewesen und der beträgt einen halben Tag. Das hieße dann: das Ganze mal zwei - und mehr als das, denn damals waren die Tage noch um einiges kürzer als heute.

Kurzum: das Leben hatte unglaublich viel Zeit, um sich zu entwickeln. Und ihm stand unser gesamter, riesiger Planet als Laboratorium zur Verfügung. Astronomisch gesehen ist er zwar eher klein, im Vergleich zu einem Bakterium oder sogar einen Menschen ist er unermesslich groß. Die Verkleinerung durch die Kartographie gibt uns zwar das Gefühl er sei überschaubar, aber geh' einmal von Wien nach Peking! Und dabei sehen wir immer nur die Landmasse. Die Erde kann aber mit Fug und Recht als Meeresplanet bezeichnet werden. (Heute beansprucht z.B. der Pazifik fast eine gesamte Halbkugel der Erde für sich!) Und das Leben ist ziemlich sicher irgendwo im Ozean entstanden. Es braucht also nicht unbedingt einen fremden "Deus ex Machina" um den Anstoß zur Entwicklung des Lebens auf der Erde zu geben.

Dennoch könnte Panspermie vielleicht eine Rolle gespielt haben oder noch spielen, wie ich am Ende des Vortrags in Science Fiction Manier eher unwissenschaftlich spekulieren werde. Fürs Erste lege ich die Panspermie aber beiseite.

Also - was ist unser Startpunkt? Eine Fülle von äußerst komplexen Lebewesen und kaum irgendwelche Spuren. Das ganze wird, so viel ist klar, eine **äußerst spekulative Geschichte** werden. Auch ohne Panspermie. Es liegt eben schon sehr lange zurück und niemand von uns war dabei.

Dementsprechend bizarr waren die **frühen Annahmen über die Lebensentstehung**.

Leben würde durch Urzeugung immer wieder aufs Neue entstehen. Einfach so. Dem hat **Pasteur** in der Mitte des 19. Jahrhunderts mit einem genial einfachen Experiment den Garaus gemacht. Er hat ein sterilisiertes Glasgefäß mit einem sterilisierten Gemisch aus Zuckerwasser und (toten) Hefezellen gefüllt und - nichts geschah. Nichts ließ sich in dem Gefäß blicken. Grund dafür war offensichtlich der zu einem liegenden S verzogene Hals des Gefäßes. Es hatte zwar Kontakt zur Außenluft, aber Austausch fand offensichtlich keiner statt. Dann brach er den Hals ab und schon bald wurde der Inhalt von Schimmel oder Hefe befallen.

Die Folge war eine Phase des Stillstands, die mehrere Jahrzehnte dauerte. Erst in den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts hat dann Alexander Oparin das Konzept der **Ursuppe** aufgebracht. Er und J.B.S Haldane gelten als die Begründer der biochemischen Theorie zur Entstehung des Lebens. Sie ist so fundamental, dass sie meist nur "**O H Theorie**" genannt wird, weil eh jeder weiß, worum es geht.

Ihren Vorstellungen zufolge bildeten sich in einer reduzierenden Atmosphäre durch chemische Reaktionen einfache organische Moleküle. Die "Monomere". Diese regneten in die damaligen Ozeane ab, wo sie sich an manchen Stellen ansammelten um durch weitere chemische Reaktionen Polymere zu bilden, aus denen in letzter Konsequenz Leben entstehen sollte. Das war einmal ein neuer, vager, aber brauchbarer Ansatz. Er bekam später den Namen "**Abiogenese**", weil bei ihm das Leben am Ende einer rein chemischen Entwicklung stand.

Und er blieb auch für einige Zeit eine nette, plausible Idee, bis er zum ersten Mal auf den Prüfstand gestellt wurde. Und das durch ein beinahe lächerlich primitiv wirkendes Experiment, das **Stanley Miller** und **Harold Urey** 1953 an der University of Chicago anstellten.

Sie verbanden zwei Glaskugeln durch zwei Glasröhren. In der unteren Kugel erhitzten sie Wasser, der Rest der Apparatur war von einem Gasgemisch gefüllt, das man damals, gemäß der O H Theorie, für die Atmosphäre der Erde zum Zeitpunkt der Lebensentstehung gehalten hat: Methan, Ammoniak und Wasserstoff.

In einer Röhre konnte Wasserdampf aufsteigen, die andere Röhre wurde gekühlt. Dort regnete dann ab, was immer sich an Reaktionsprodukten angesammelt hatte. Energie wurde dem ganzen durch zwei Elektroden in der oberen Kugel zugeführt, zwischen denen elektrische Funken zuckten. Das war's.

Und nach einer Woche hatte sich in der Anordnung eine braune teerartige Masse abgesetzt. Sie enthielt verschiedene Zucker, Aminosäuren und Nukleotide (die Bausteine von RNS oder DNS). Ein fulminanter Erfolg der O-H Theorie, allerdings mit einem gravierenden Schönheitsfehler: Die Erde besaß nie eine Atmosphäre mit der genannten Zusammensetzung. Zur Zeit der Entstehung des Lebens bestand sie hauptsächlich aus Kohlendioxid und Stickstoff. Trotzdem: dieses Ergebnis hat gezeigt, dass wir uns auch experimentell mit der Entstehung des Lebens auseinandersetzen können. Und es wurde öfter wiederholt, mit verschiedenen Gaszusammensetzungen, aber ähnlichen Ergebnissen.

Ja es gelang sogar, "**Protozellen**" zu schaffen. Sie sahen aus wie Bakterien und teilten sich sogar, gingen aber bald zugrunde und waren nichts anderes als eben winzige, hohle Kügelchen. Die Presse war darüber aber völlig aus dem Häuschen. Sie sahen einfach zu gut aus...

Die Sache kam also ins Rollen. Bevor ich auf die auf die einzelnen Aspekte und losen Enden zu sprechen komme, will ich aber erst einmal ein Bühnenbild für das Drama der Lebensentstehung entwerfen und die Akteure ein wenig unter die Lupe nehmen.

Wie sah die Erde damals aus? Kurz, könnten wir uns dorthin begeben, wir würden sie nicht erkennen. Hohe Gebirgszüge wie die Alpen - Fehlanzeige. Sie benötigen eine voll ausgebildete Tektonik um sich zu bilden. Und geformt wurden sie von extrem mächtigen Gletschern.

Gab es Ozeane? Sie muss es gegeben haben. Alle Theorien der Lebensentstehung gehen von einer Mitwirkung der Ozeane aus. Kurz nachdem sich die Kruste gebildet hatte begann es zu regnen. Und es regnete lange Zeit, ununterbrochen.

Was vielleicht fehlte, waren die **Kontinente**. Hier sind sich die Forscher uneins. Manche denken, es habe schon Kontinente gegeben, andere denken da eher an kleinere "Kontinenterln", und ziemlich wahrscheinlich ist auch, dass es sich bei der damaligen Erde um eine reine Wasserwelt gehandelt hat.

Eine frühe Form der **Tektonik**, also das bilden neuer Kruste in der Mitte der Ozeane und ihr Abtauchen unter etwaigen Kontinenten, könnte es schon gegeben haben. Sie funktioniert auch ohne Kontinente, nur anders und schlechter als heute. Das Material im Erdmantel, das mit seiner Bewegung die Tektonik bewirkt, war damals sicher schneller unterwegs als heute. Der **Mantel war auch um einiges heißer**. Von den verschiedenen Prozessen der Erdentstehung war noch einiges an Wärme übrig. Und außerdem war vor nicht allzu langer Zeit ein marsgroßer Planet mit ihr kollidiert. Und die kurzlebigeren radioaktiven Elemente waren auch noch am strahlen und heizen ihr ein.

Was es also ganz sicher gegeben hat war **Vulkanismus**. Das Gestein der Erdkruste ist ein äußerst gutes Dämmmaterial. Das kann jeder bestätigen, der auf einem relativ jungen Lavastrom herum gestapft ist, bei dem man in den Spalten noch die Lava glühen sehen kann. Und der Boden ist warm, aber so, dass man gefahrlos drauf gehen kann.

Durch die Bildung der Kruste war die Wärme im Inneren der Erde gefangen und so schmolz sich die heiße Lava einfach durch Mantel und Kruste ins Freie.

Das tut sie heute noch, aber in einem extrem kleineren Ausmaß.

Größere Kontinente hat es also vermutlich keine gegeben, was es aber ziemlich sicher gab waren vulkanische Inselgruppen, wie heute z.B. Hawaii. Und wegen des heftigen damaligen Vulkanismus waren sie wahrscheinlich auch um einiges häufiger als heute. Und langgestreckter, weil sich die Kruste schneller über die Hot Spots, in denen heißes Material aus dem Mantel hochstieg, bewegte.

Und was wahrscheinlich immer noch vorkam waren die **Einschläge** größerer Planetesimale. Sie konnten so energiereich sein, dass sie die Ozeane verdampften und es tausende Jahre brauchte, bis sich alles wieder normalisiert hatte. Es kann also gut sein, dass das Leben mehrmals einen Anlauf nehmen musste, bis es sich letztlich wirklich entwickeln konnte.

Freundlich und wohnlich war diese Welt nicht. Vielleicht stürzten auch noch zeitweise sintflutartige Regengüsse vom Himmel. Der Ursprung des Lebens fiel jedenfalls in die Sturm und Drang Periode der Erdentstehung.

Wenn ich mir ein **Bild von der damaligen Erde** machen will, so stelle ich mir einen flachen, schwarzen Felsenstrand vor, an dem ein brauner Ozean schwappt, während am Horizont, oder vielleicht auch direkt hinter mir, Vulkane Lava speien.

Schwarz ist der Strand deshalb, weil die helleren Gesteine ein Produkt der Tektonik sind, die es damals sicher noch nicht in ihrer heutigen Form gab. Was an Gestein vorhanden war, war Basalt. Und der ist eben schwarz.

Braun war der Ozean, weil er jede Menge organischer Moleküle enthielt. Ob mehr oder weniger, ob er eher dünnflüssig oder schleimig war, darüber gehen die Meinungen auseinander.

Über die Farbe des Himmels konnte ich nichts in Erfahrung bringen. Ich gehe aber davon aus, dass er eher wolkenverhangen gewesen sein wird. Also eher grau.

So ist's, ein turbulenter, wilder, "lebensfeindlicher" Planet. Das war unsere Erde zur Zeit der Lebensentstehung. Leben, wie wir es heute kennen, hätte es damals wahrscheinlich schwer gehabt. Aber damals hatten auch noch keine empfindlichen Zellen sondern robustere Moleküle das Sagen.

Aber **woher kamen diese Moleküle, bzw. ihre Grundstoffe?** Sie waren wahrscheinlich schon vorhanden, als sich unsere Sonne und Erde noch nicht gebildet hatten, sondern als bloße Staubwolke durchs Weltall schwebten. Organische Moleküle wurden zuhauf in Materiewolken zwischen den Sternen oder um Sterne herum gefunden. Und das waren nur jene, die wir beobachten konnten.

Sozusagen, die Spitze des Eisbergs. Es ist anzunehmen, dass sich viele Moleküle auf den interstellaren Staubkörnern bilden und auch dort bleiben. Dort können sie aber von uns nicht entdeckt werden. Daher sind zum Beispiel die Kometen für uns so wichtig, weil sie Material enthalten, das sich seit der Bildung des Sonnensystems kaum verändert hat.

Staub war im frühen Sonnensystem in Mengen vorhanden, und jedes Staubkorn war wahrscheinlich von einer Schicht aus organischen Molekülen umgeben. Anders als größere Körper kollidieren Staubkörner nicht katastrophal mit der Erde, sondern werden sanft abgebremst und schweben langsam zu Boden. Der Staub bei uns zu Hause stammt zu einem gewissen Teil aus dem Weltraum. Und er könnte uns sehr viel sagen über die Entstehung des Sonnensystems, und sicher auch über das Leben hier auf der Erde. Daher sind nicht nur Kometensonden wie Rosetta unterwegs, sondern auch solche, die Staub einfangen.

Außerdem ist anzunehmen, dass die Kometen und Asteroiden, die in der Erdatmosphäre explodierten, auch eine Fracht organischer Moleküle an Bord hatten. Um die Grundstoffe und spätere Akteure bei der Lebensentstehung brauchen wir uns also keine Sorgen zu machen.

Bleibt immer noch die letzte und ganz knifflige Frage, wie denn nun das Leben wirklich entstanden ist. Und hier müssen wir im Grund genommen eigentlich immer noch passen. Es gibt wie gesagt viele Befunde und viele theoretische Ansätze, aber kein wirklich stimmiges, vollständiges großes Bild. Im großen Mosaik fehlt immer noch die Mehrzahl der Steine, aber immerhin beginnen sich bereits Umriss abzuzeichnen.

Eine Möglichkeit, herauszufinden was und wer am Anfang stand, ist, **die Entwicklung des Genoms** zurückzuverfolgen. Im Erbmaterial sind bestimmte Sequenzen enthalten, die bei manchen Arten auftreten, bei anderen aber nicht.

Arten, die später entstanden sind haben gewisse Gensequenzen geerbt, bei Arten, die früher entstanden sind, fehlen sie naheliegender Weise. So können wir uns langsam in die Vergangenheit vortasten, wie wir das auch bei Baumringen tun.

Das Ergebnis: die drei großen Bereiche der Biosphäre: die Bakterien, die Archäe, die früher Archäobakterien hießen, und die Eukarioten haben alle einen gemeinsamen Vorfahren. Wie der ausgesehen haben kann wissen wir nicht. Wir kennen aber seinen Namen: LUCA ;-). Das heißt "**Last Common**

Universal Ancestor", der letzte gemeinsame Vorfahre also. Und er liebte es heiß.

Je näher wie dem gemeinsamen Ursprung aller Arten kommen, umso häufiger werden die hitzeliebenden Organismen. Und im Ursprung gibt es nur mehr solche, die hohe Temperaturen zum Überleben brauchen.

Das verführte manche Forscher dazu, den Ursprung des Lebens in die Tiefen des Ozeans zu verlegen. Zu vulkanischen am Meeresgrund, wo "**schwarze Raucher**" heißes, mit Mineralien beladenes Wasser speien.

Sie werden von Wasser gespeist, das durch Ritzen in der vulkanisch aktiven Kruste in die Tiefe sickert, von Lava erhitzt wird, und durch die Schlotte wieder zurück in den Ozean strömt. Unterwegs hat es einiges an Mineralien aufgenommen, die beim Kontakt mit dem kalten Wasser des Ozeans abgeschieden werden und die Schlotte, oder, in fein verteilter Form, den "Rauch" bilden. Um die schwarzen Raucher herum befinden sich heute Inseln des Lebens, deren Nahrungskette auf Schwefel verarbeitenden Bakterien beruht. Und die mögen es natürlich heiß, denn das emporschießende Wasser hat eine Temperatur von mehreren hundert Grad Celsius.

Unterstützung bekommt diese Idee von den **zweitältesten Fossilien** früherer Lebewesen. Sie stammen aus Australien und es handelt sich bei ihnen um eine Art von Fäden, die sich kaum anders als biogen erklären lassen. Zumindest ist man sich darüber im Moment ziemlich einig. Sie wurden in schwefelhaltigen Ablagerungen gefunden, was einen vulkanischen Ursprung nahe legt.

Dass "LUCA" hitzeliebend war, bedeutet noch lange nicht, dass er auch der erste Organismus war der hier entstanden ist. Vielleicht hat es eine Katastrophe gegeben, wie so oft in der Geschichte des Lebens auf der Erde, die nur hitzeliebende Organismen überlebt haben. Das heißt auch: der älteste Organismus, der überlebt hat muss nicht der älteste sein der hier gelebt hat.
Daher: willkommen zurück am Start!

Und im bekannten Wust von Einzelergebnissen und Ideen. Bevor wir also in die Tiefe gehen und den Wald vor lauter Bäumen nicht mehr sehen können, sollten wir versuchen, Gemeinsamkeiten der verschiedenen Ansätze zu suchen.

Eine Idee sticht dabei sofort heraus. Es gibt einen Prozess der - meiner Meinung nach - mit ziemlicher Sicherheit vom frühesten Beginn der Abiogenese bis heute eine entscheidende Rolle spielt. Hier haben wir quasi einen roten Faden, an dem wir uns festhalten können, und das ist die **Autokatalyse**.

Was ist das? Katalysatoren im Auto? Nicht ganz. Katalysatoren sind Elemente oder Moleküle, die eine chemische Reaktion beschleunigen und begünstigen, ohne am Ende selbst verändert worden zu sein. Platin zum Beispiel in den bekannten Abgaskatalysatoren der Autos. Es verbraucht sich nicht, hilft aber den Ausstoß an Stickoxiden zu verringern. Katalysatoren sind also eine feine Sache.

Autokatalysatoren sind Katalysatoren, die eine chemische Reaktion fördern, deren Endergebnis eine Kopie ihrer selbst darstellt. Am Ende hat man also zwei von ihrer Sorte. Diese Kopie beginnt natürlich ihrerseits sofort, Kopien von sich herzustellen. Und mit jeder neuen Kopie gewinnt der Prozess an Fahrt.

Heute stellt zum Beispiel die Verdoppelung der DNS bei der Zellteilung einen solchen autokatalytischen Prozess dar. Das anfängliche DNS Molekül bleibt unverändert erhalten, es hat sich aber eine Kopie gebildet, die bei der Teilung in die neue Zelle wandert.

Zu Beginn des Lebens werden die Moleküle wahrscheinlich recht einfach gestrickt und kurz gewesen sein. Und einen der wahrscheinlichen Hauptakteure finden wir auch in modernen Zellen: RNS - die Ribonukleinsäure. Die DNS unterscheidet sich von ihr dadurch, dass in ihr eine Sauerstoffgruppe fehlt (Daher die Bezeichnung "Desoxi...") Und die RNS besitzt die Eigenschaft, sowohl Daten zu speichern als auch als Enzym wirken zu können. Letzteres ist in den heutigen, modernen Zellen wichtig. Ersteres könnte am Beginn des Lebens eine besondere Rolle gespielt haben.

RNS wird also wahrscheinlich autokatalytisch tätig gewesen sein. Vielleicht auch in Form von zwei Molekülen, die sich gegenseitig darin unterstützten, ein Molekül zu bilden, das aus einer Kombination von ihnen beiden bestand, mit einer Solltrennstelle dazwischen.

Die Wirkung der Autokatalyse ist dramatisch. Aus jedem Reaktionszyklus gehen zwei Moleküle hervor. Das ursprüngliche und die Kopie. Und beide gehen natürlich sofort daran, wieder Kopien von sich selbst herzustellen. Das führt zu einer Kettenreaktion und einem Exponentiellen Wachstum.

Was das bedeutet kann man sich am besten anhand einer Legende verdeutlichen: Der Erfinder der Schachspiels konnte vom begeisterten Herrscher, dem er es vorgeführt hatte, verlangen, was er wolle. Und er wollte scheinbar nicht viel. Ein Korn am ersten der 64 Felder des Schachbretts. Und auf jedem weiteren doppelt so viel wie auf dem vorigen. Also 2, 4, 8, 16 und so weiter. Er wurde vom Herrscher ob seiner Bescheidenheit gescholten ... heute wird aber meines Wissens mit all der heutigen Technik in einem Jahr nicht genug Getreide produziert, um diese scheinbar so bescheidene Forderung zu erfüllen.

Der "Schmäh" dabei ist eben die Verdoppelung. 2 mal 2 ist nicht viel. 2 mal 65536 aber schon - und da sind wir erst bei Feld Nummer 17! Und mit jedem Schritt wird's mehr und mehr. Kurzum: Hat ein Molekül die Fähigkeit erworben, autokatalytisch zu wirken, wird es binnen Kurzem das gesamte lokale Volumen dominieren.

Wann die **RNS** ins Spiel gekommen ist, wird noch diskutiert. Manche meinen schon ganz am Beginn der Lebensentstehung, andere meinen, eher später. Wir werden einen solchen Zeitplan noch kennen lernen.

Wann auch immer, die Autokatalyse spielte sicher einen wichtigen Part bei der Lebensentstehung. Damals war aber der Kopiermechanismus aber sicher nicht so genau wie heute. Es sind Fehler passiert - Mutationen des Ausgangsmoleküls. Und damit hatte man dann nicht mehr eine, sondern zwei Sorten autokatalytischer Moleküle, oder mehr. Und die konnten logischer Weise nicht anders, als um die Ressourcen an Ausgangsmaterialien wett zueifern. Das brachte dieser Prozess so mit sich. Und damit begann, ebenfalls ganz früh in der Entwicklung des Lebens, ein zweiter Prozess, und auch er zieht sich wie ein roter Faden durch die Geschichte des irdischen Lebens: Die **Evolution**.

Ab da galt nämlich: Was und wer sich getreuer und effizienter kopieren bzw. fortpflanzen konnte, wurde zur dominanten Spezies. Und das gilt bis heute. Und im Zellkern steckt immer noch ein Molekül - die DNS. Wir können uns selbst durchaus als bloßes Werkzeug dieses Moleküls sehen, das ständig

bestrebt ist, sich weiter zu vervollkommen. Nicht, weil es das möchte, sondern weil es nicht anders geht.

Die Evolution blieb aber sicher nicht auf die Informationsmoleküle beschränkt. Als Proteine begannen, letztendlich im Verbund Stoffwechsel zu betreiben, ergab sich für sie die gleiche Situation. Wie auch immer die Entwicklung ausgesehen hat, die letztendlich zum Entstehen des Lebens führte, sie kam sicher nicht ohne Evolution aus.

Eine weitere wichtige Rolle dürfte **das Substrat** gespielt haben, auf dem sich alles abspielte. Wir haben schon bei der Frage nach dem Ursprung der "Akteure" gehört, dass chemische Reaktionen viel besser funktionieren, wenn sie auf einer festen Oberfläche passieren. Die damals vorherrschende Oberfläche war jene von Basaltfelsen, wie sie heute noch auf Hawaii vorkommen.

Sidney Fox von der Florida State University nahm 1958 Brocken von einem Vulkankegel in Hawaii, vermischte sie mit Aminosäuren, sterilisierte alles und steckte es in einen Glasofen. Danach hatte sich die Lava mit einem dicken schmierigen Film überzogen, und als er sie in sterilisiertes Wasser eintauchte, kam eine dicke, braune Flüssigkeit heraus. Die Aminosäuren hatten sich zu etwas zusammengeschlossen, was er "Proteinoid" nannte. Also kein "echtes" Protein, aber etwas ähnliches und verwandtes. Und das bildeten kleine, hohle Kügelchen, **"Mikrosphären"** genannt. Sie verhielten sich ähnlich wie Bakterien und konnten sich auch teilen, waren aber doch nur hohle Kügelchen. Trotzdem war die Reaktion der Presse und der Kollegen enthusiastisch. Ein Wissenschaftler meinte gar, es wäre bald möglich, eine lebende Zelle zu erzeugen.

Der Grund für die Euphorie war ziemlich klar. Diese Kügelchen verhielten sich einfach so, wie wir es von Bakterien gewohnt sind. (Was den Rückschluss zulässt, dass das Zusammenklumpen von Bakterien nicht von ihnen gesteuert, sondern nur benutzt wird.)

Soviel zu den einzelnen Ingredienzien. Ein **Standardmodell**, so lückenhaft es auch sein mag, gibt es leider nicht. Das war die große Problematik beim Zusammenstellen dieses Vortrags. Versuchen wir, allen Unsicherheiten zum Trotz, ein halbwegs plausibles Bild von den Abläufen zu zeichnen:

Die ersten beiden Schritte kennen wir bereits: Die Bildung von **Monomeren**, aus denen sich in der weiteren Folge **Polymere** gebildet haben.

Diese Polymere bildeten ein Netzwerk verschiedener chemischer Reaktionen aus,

reagierten mit einander, wandelten sich um, und so weiter.

Dann wurde diese Mixtur aus Molekülen von einer **Membran** eingeschlossen, die sie konzentrierte und durch die Stoffwechselprodukte ausgeschieden werden konnten.

Nach und nach haben sich Moleküle gebildet, die einen effizienten **Stoffwechsel** aufrecht erhalten konnten. Dann kam der Auftritt der **"Infopolymere"**, grober Vorläufer der RNS. Sie führten dazu, dass sich diese Vorläufer der Zellen auch recht und schlecht **fortpflanzen** konnten. Dieser Mechanismus wurde immer mehr verfeinert, bis schließlich die "echte" **RNS** auf der Bildfläche erschien.

Die Proteine entwickelten sich und ihre enzymatischen Eigenschaften ebenfalls weiter. Sie übernahmen dabei wichtige Teile der Umwandlung der RNS-Information in Kopien ihrer selbst oder anderer Proteine. Schließlich wurde die RNS in ihrer Funktion als Speichermolekül durch die **DNS** ersetzt. Irgendwann in diesem Ablauf vollzog sich der Wandel von bloßer Chemie zur Biologie.

Das ist einmal ein erster, grober Wegplan. Vieles bleibt aber noch völlig im Dunkeln. Zum Beispiel natürlich wieder das Treffen und der Beginn der Zusammenarbeit von Proteinen und Informationsmolekülen. Es bleibt noch völlig unerklärt.

Und wie die Kodierung der Proteinstruktur in eine Abfolge von Teilmolekülen der rNS zustande kam ist auch völlig unklar. Schließlich ist natürlich auch der genaue Zeitplan, bzw. die Reihenfolge der einzelnen Schritte unklar. Wie viel ist gleichzeitig geschehen, welche Parallelentwicklungen hat es gegeben?

Es braucht wahrscheinlich noch eine Reihe von Genieblitzen, bis wir die Entstehung des Lebens halbwegs plausibel nachvollziehen können. Viele lose Enden sind aber kein Grund zu verzweifeln, ganz im Gegenteil. Wir stehen vor einem chaotischen Haufen von Bauklötzen. Jetzt beginnt der lustvolle und interessante Prozess, aus ihnen etwas Vernünftiges aufzubauen. Leicht wird es nicht sein, schnell wird es auch nicht gehen, aber mit jedem Durchbruch werden wir Fahrt aufnehmen.

Jetzt stellt sich als Letztes noch die Frage, **wo sich das alles abgespielt haben könnte**. Wie gesagt, die ganze Erde stand als riesiges Laboratorium zur Verfügung. Und sie bot viele verschiedene Plätzchen, an denen sich das Leben in aller Ruhe entwickeln konnte.

Einen Ort haben wir bereits kennen gelernt: **Hydrothermale Quellen** am Meeresboden. Sie sind heiß und voller Mineralien. Die Hitze, die heute eigentlich nur von Bakterien halbwegs vertragen wird, war zu Beginn sicher kein Problem. Moleküle halten um einiges mehr aus als fertige Organismen. Sidney Fox hat sich seine "Mikrosphären" ja auch erkocht. Und Schwefel und Eisen, die in der Nähe von Vulkanen immer vorkommen, könnten eine entscheidende Rolle als Katalysatoren gespielt haben. Schwefel-Eisen-Oberflächen helfen auch mit, Aminosäuren zu synthetisieren. Und an einem solchen Ort hätte es "LUCA" sicher sehr gut gefallen.

In einer Arbeit werden eher die **Spalten und Klüfte von Unterwasservulkanen** als Brutstätte des Lebens angesehen. Sie sind voneinander getrennt, stehen aber doch ein wenig in Verbindung. Hohlräume sind sicher auch vorhanden, und vor allem jede Menge Basaltflächen, an denen sich die Reaktionen abspielen konnten.

Vulkane sind ja ständig in Bewegung. Das Eindringen von Lava bläht sie auf, ein Ausbruch lässt sie wieder in sich zusammenfallen. Dazu kommt der Druck der aus der Lava entweichenden Gase. All das führt zu einer Fülle von Spalten, die von Wasser durchflossen werden, in dem allerlei Substanzen gelöst sind. Ein besseres Laboratorium kann man sich kaum vorstellen.

Die "**warmen kleinen Tümpel**", von denen Charles Darwin gesprochen hat, sind aber auch durchaus nicht aus dem Rennen. Sie haben den Vorteil, dass bei ihnen die Entwicklung zyklisch abgelaufen ist. Jede Flut brachte neues Ausgangsmaterial und verteilte die Reaktionsprodukte auf die umliegenden "Reaktionsgefäße", und mit jeder Ebbe begann ein neuer Prozess der Konzentration (Verdampfung!) und der neuen Reaktionen. Basalt als Katalysator war natürlich auch hier vorhanden.

Er bildete ja die Wände der "Reaktionsgefäße" und bot durch seine poröse Struktur sogar ein System von Hohlräumen an, das weniger stark vom Gezeitenwechsel beeinflusst wurde. Die Strahlung der Sonne stand auch zur Verfügung. Außerdem befanden sich diese Strände sehr oft auf vulkanischen Inseln, wo vulkanische Exhalationen die Brühe mit brauchbaren Ingredienzien anreichern konnten. Und die Gezeiten damals lassen sich sicher nicht mit jenen heute vergleichen. Die Erde rotierte erstens um

einiges schneller, sodass sie schneller auf einander folgten, und zweitens war der Mond noch um einiges näher. Wahrscheinlich waren das, verglichen mit heutigen Gezeiten, schon eher kleinere Tsunamis.

Aber nicht nur (tropische) Strände sind als Ursprung des Lebens denkbar, auch das totale Gegenteil: **polares Eis**! In der Kälte geht alles langsamer, das stimmt schon, aber dafür passieren bei den Reaktionen auch weniger Fehler.

Und Eis ist ein Festkörper, wie Basalt. Was dort die Blasen und Hohlräume sind, sind hier die Spalten und Klüfte. Schon durch das Gefrieren des Meerwassers wurden die organischen Moleküle in den verbliebenen Tümpeln konzentriert.

Der Gefrierpunkt der organischen Brühe war sicher tiefer als jener von reinem Eis, sodass sich die Ursuppe auf dem Eis immer weiter verdickte. Und öfter war sie wahrscheinlich sogar von einer Eisschicht bedeckt. Die "Reaktionsgefäße" entsprachen also fast genau den heutigen Glaskolben. Sie ließen die Sonnenstrahlung durch, hielten das Innere aber ziemlich unter Verschluss. Die Spalten schufen aber natürlich doch wieder eine gewisse Verbindung zwischen den Tümpeln. Wir können uns den gesamten Eiskörper daher wieder als riesiges Laboratorium aus Gefäßen und Verbindungen vorstellen. Und in den Spalten bot sich sogar die Möglichkeit zu Reaktionen zwischen den festsitzenden und vorbeischwimmenden Molekülen.

Es bot sich hier also eine sehr komplexe Umgebung: Überspülung durch Wellen, Isolation durch Gefrieren der obersten Schicht und ein System aus Verbindungen.

Und wieder gilt natürlich: Uns, als ursprünglichen Steppenbewohnern, erscheint eine Eislandschaft eher unwirtlich zu sein. Für Moleküle kann sich das ganz anders darstellen. Stribling und Miller haben zum Beispiel mit Monomeren versetztes und mit Salzen angereichertes Wasser auf -18°C gekühlt und als Resultat kurze RNS Stücke erhalten.

Wir sehen, es werden viele verschiedene Möglichkeiten angedacht. Das Thema bleibt weiterhin spannend. Vor allem, weil wir jetzt ja begonnen haben, **im ganzen Sonnensystem** nach Leben Ausschau zu halten. Was bedeuten unsere Erkenntnisse in dieser Hinsicht?

Nun, Eis mit Spalten gibt es nicht nur bei uns auf der Erde. Die großen **Monde des Jupiter** haben auch genug davon. **Io** fällt wegen der starken Aufheizung durch die Gezeiten aus. Auf ihr geht es einfach zu turbulent zu.

Europa aber zeigt schon durch die Struktur ihrer Oberfläche, dass es dort unter dem Eis einen Ozean gegeben haben muss oder noch gibt. Und auch bei den anderen Eismonden gehen die Wissenschaftler davon aus, dass sie in ihrem Inneren Ozeane beherbergen. **Ganymed** wahrscheinlich sogar deren vier, jeweils durch Eisschichten getrennt.

Und die Geysire auf dem **Saturnmond Enceladus** weisen auch darauf hin, dass er in seinem Inneren einen Ozean beherbergt. Es kommt da ja nicht auf die Entfernung zur Sonne an, sondern allein auf die Temperatur und die gelösten Salze. Und Wärme bietet mechanische Energie genauso wie der Sonnenschein.

Das bedeutet aber auch, dass Leben nicht einmal an die Nähe zu einem Stern gebunden ist. Die "**habitablen Zonen**" - also jene Bereiche in Planetensystemen, in denen die Strahlung des Sterns ausreicht, Wasser flüssig zu halten - die wir bis vor wenigen Jahrzehnten als einzigen Ort im Weltall angesehen haben, an dem Leben entstehen kann, haben Geschwister bekommen.

Es ist durchaus möglich, dass auf Monden der "Free Floaters", also Planeten, die aus einem Planetensystem rausgeflogen sind und seitdem frei durch die Galaxis driften, ebenfalls Leben existiert. Fernab von den Sternen, in ewiger Dunkelheit. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Monde eines Planeten den Rauswurf desselben mitmachen ohne sich selbst ins Weltall zu verabschieden, ist schwer abzuschätzen aber sicher gegeben.

Und diese Überlegungen gelten nur für Leben, das auf Wasser basiert. Vielleicht finden wir einmal auf dem Saturnmond Titan Leben, das Methan als Lösungsmittel benutzt. Auszuschließen ist das nicht. Und wenn wir bedenken, dass chemische Reaktionen bei den dort herrschenden Temperaturen extrem langsam vor sich gehen, besteht durchaus die Möglichkeit, dass wir etwaiges Leben dort nicht einmal als solches erkennen.

Irgendwann, in ferner Zukunft, werden wir, so hoffe ich, einmal feststellen, dass das gesamte Weltall nur so vor Leben wimmelt.

Zu guter Letzt möchte ich jetzt noch zu der anfangs erwähnten Science Fiction Vision zurückkommen:

Sollten wir uns nicht selbst eliminieren und daher unsere Entwicklung noch einige tausend Jahre so weiterlaufen, müssten wir eigentlich in der Lage sein, selbst als "Panspermisten" in Erscheinung zu treten. Dazu müssten wir Raumsonden entwickeln, die völlig autonom und intelligent agieren können... (Da sind wir im Moment dran.) ...und die mehrere tausend Jahre fehlerfrei funktionieren. (Davon sind wir noch weit entfernt.)

Außerdem müssten wir auch in der Lage sein, bestimmte Stufen der Lebensentstehung zu synthetisieren. Also Molekülgruppen oder Vorstufen von Organismen, die robust genug sind, eine Fahrt durch den Weltraum zu überstehen, und vital genug, um sich in vielen verschiedenen Umgebungen zu entfalten. Molekülen sollte das nicht schwer fallen. Am Planeten angekommen, könnte dann die Sonde entscheiden, ob sie sich selbst und unser Material zerstört, weil dort die Lebensentstehung schon am köcheln ist, oder ob sie unsere Lebensfracht freilässt und eine neue Evolution anstößt. Das klingt zwar recht utopisch, wenn wir aber bedenken, was wir in den letzten 60 Jahren erreicht haben, so scheint es mir durchaus möglich zu sein.

Und damit kommen wir wieder zur Panspermie. Wenn wir das vielleicht können, müssten es Zivilisationen anderswo im Weltraum eigentlich auch gekonnt haben. Und vielleicht finden wir irgendwann einmal die Reste eines fremden Raumschiffs in einer uralten Felsformation... Das ist wirklich extrem unwahrscheinlich. Völlig ausschließen können wir es aber auch nicht.

Wahrscheinlicher ist aber, dass wir uns solche Sonden sparen können, weil wir draufkommen werden, dass Leben ohnehin überall dort zu sprießen beginnt, wo es nur den Funken einer Möglichkeit dazu vorfindet.

Wie dem auch sei: Leben ist bei aller Robustheit eine extrem kostbare Fracht, und wir sollten alles unternehmen um es zu schützen und zu verbreiten. Im Moment beginnen wir gerade, für den hiesigen lebenstragenden Planeten die Verantwortung zu übernehmen. Wahrscheinlich schon etwas zu spät, auf jeden Fall ziemlich spät. Und wenn wir immer mehr Fähigkeiten, die allein wir zu beherrschen glaubten, zumindest qualitativ ans Tierreich verlieren, so bleibt uns doch diese eine Rolle erhalten, die wir jetzt langsam wahrnehmen (müssen): Nur wir, und wirklich nur wir alleine, sind die Hüter dieses Planeten und des Lebens auf ihm. Das kann

uns (leider) kein Tier abnehmen. Je früher wir alle das begreifen, desto besser. Leicht wird es nicht sein, aber wir haben keine andere Wahl als uns dieser Herausforderung zu stellen, wenn wir weiter hier (über)leben wollen.

Glossar:

Archäen, Bakterien, Eukarioten, die drei Bereiche des Lebendigen: Die **Archäen** sind ziemlich urtümliche, einzellige Lebewesen die natürlich keinen Zellkern besitzen. Früher hießen sie, wie gesagt, Archäobakterien, weil man sie wegen ihres Aussehens für primitive Bakterien hielt. Jetzt zeigen Unterschiede im Erbmateriale ganz deutlich, dass sie sich von den Bakterien unterscheiden.

Sie waren wahrscheinlich früher häufiger. Heute sind die Bakterien verbreiteter und die Archäen sind hauptsächlich dort zu finden, wo es extrem heiß oder sauer oder salzig ist.

Bakterien besitzen ebenfalls keinen Zellkern und sind ebenfalls einzellig.

Sie sind, wie die Archäen, mikroskopisch klein. Wir kennen sie hauptsächlich als Krankheitserreger (Salmonellen!), ohne sie könnten wir aber nicht existieren.

Eukarioten besitzen im Gegensatz zu den vorher genannten einen Zellkern. Im Kern befindet sich, gut geschützt, das Erbmateriale.

Sie stellen die komplexesten Lebewesen auf dem Planeten dar. Manche sind einzellig geblieben, manche aber bilden mehrzellige Organismen - wie zum Beispiel wir Menschen. Interessanterweise scheinen sie sich nicht von den komplexeren Bakterien, sondern von den primitiveren Archäen abgespalten zu haben.

Biogen

sind Moleküle oder Isotopenverhältnisse wie jenes auf Grönland dann, wenn sie von Lebewesen erzeugt wurden. Der Sauerstoff in unserer Atmosphäre ist zum Beispiel biogen, weil von Cyanobakterien und Pflanzen erzeugt.

Der vom Menschen verursachte steigende CO₂ Gehalt der Erdatmosphäre ist also eigentlich auch biogen. In diesem Fall sprechen wir aber eher von "**anthropogen**", also von "vom Menschen verursacht", weil wir uns immer vom Rest der Lebewesen abheben wollen.

Enzyme

sind Proteine, die als Katalysatoren wirken. Sie fördern bestimmte chemische Reaktionen und halten so den z.B. Stoffwechsel am Laufen.

Erdkruste, Erdmantel, Erdkern, der innere Aufbau der Erde:

Die Erde ist in etwa aufgebaut wie eine Zwiebelschale.

Im Zentrum befindet sich der **Kern**. Er besteht aus den schweren Elementen Eisen und Nickel und ist teilweise flüssig.

Darum herum befindet sich der **Erdmantel**. Er besteht aus dem Material, das nach der Bildung des Kerns übrig geblieben ist, also Gestein. Es ist nicht fest, aber auch nicht ganz flüssig. Man nennt diesen Zustand "plastisch verformbar". In Momentaufnahmen scheint das Gestein fest zu sein. Im größeren Zeitrahmen fließt es aber wie eine Flüssigkeit.

Ganz außen befindet sich die **Kruste**. Sie ist aus dem leichtesten Material des Erdmantels entstanden. Darum "schwimmen" auch die Kontinente

wie Eisberge ohne unterzugehen. Und darum zwingen sie auch die von den Strömungen im Mantel getriebene dichtere, schwerere Meereskruste unter ihnen abzutauchen.

Extrasolare Planeten

sind Planeten, die um ferne Sterne kreisen oder frei durch die Galaxis driften. Wir haben schon viele dieser Planeten gefunden. Sie scheinen ein allgegenwärtiges "Ungeziefer" des Weltalls zu sein. Ihre Entdeckung und Erforschung wird immer noch stark von den Grenzen der rezenten Messtechnik geprägt (echte Erdzwillinge konnten bislang nicht entdeckt werden), aber mit dem steigenden Stand der Technik werden die Befunde immer genauer.

Das Genom, Gene:

Darunter verstehen wir die Gesamtheit der Erbmoleküle in den Zellen. Also alles, das es an DNS dort so gibt. Es ist in Untereinheiten strukturiert, die Gene. Sie enthalten das Molekül in "aufgewickelter Form".

Isotope:

Das sind Unterarten von chemischen Elementen. Sie stehen am gleichen Ort im Periodensystem, unterscheiden sich aber durch ihr Gewicht. Chemisch sind sie (fast) völlig identisch. **Kohlenstoff 13**, das häufigste Isotop des Kohlenstoffs lässt sich nicht so leicht von Lebewesen handhaben, wie Kohlenstoff 12.

Daher verwenden sie bevorzugt dieses leichtere Isotop des Kohlenstoffs.

Monomere:

Von der O H Theorie vorgeschlagene einfachere Moleküle, die sich aus einfachsten Grundstoffen wie Methan bilden. Ihrerseits bilden sie die Bausteine der größeren und komplexeren Polymere.

Organellen

sind quasi die Organe der Zellen. Sie stellen die Energieversorgung sicher, wie die Mitochondrien, speichern Nährstoffe, oder scheiden die Stoffwechselprodukte wieder aus.

Polymere:

Komplexe Moleküle, die sich aus einfacheren Bausteinen, den Monomeren, zusammensetzen. Ein Beispiel: Proteine. Sie setzen sich aus Aminosäuren zusammen.

Reduzierend

ist eine Atmosphäre dann, wenn sie einen hohen Anteil Brennstoffen besitzt. Methan zum Beispiel, oder Wasserstoff, wie die Atmosphäre des Jupiter. Das Gegenteil davon ist die heute Atmosphäre der Erde: sie ist oxidierend, da sie zu einem Fünftel aus Sauerstoff besteht. Die Atmosphäre der Venus ist neutral, sie besteht aus den eher reaktionsträgen Gasen Stickstoff und Kohlendioxid.

Tektonik:

Ein komplizierter Prozess, der von der Bewegung des Erdmantels angetrieben wird. Diese verschiebt die Kontinente und schleppt die dünne Meereskruste mit sich mit. In der Mitte der Ozeane entsteht dauernd neue Kruste, wandert an deren Rand, wo sie unter den leichteren Kontinenten nach unten abgelenkt wird und durch den Mantel Richtung Kern wandert. Während dieser Wanderung werden Gesteine mit niedrigem Schmelzpunkt aufgeschlossen und bahnen sich ihren Weg bis zur Erdoberfläche. Darum gibt es zum Beispiel um den Pazifik herum den sogenannten "Feuergürtel" aus Vulkanen.

Für das Leben hat die Tektonik eine wichtige Funktion: sie entzieht der Oberfläche in der Meereskruste abgelagerte organische Materie, die sie später durch die Vulkane, meist in Form von CO₂, wieder ausspeit.

Anders hätte die Erde die (hypothetische und umstrittene) Phase des "Schneeballs Erde" nicht überstanden. Einige Forscher meinen, dass die Erde zu einer bestimmten Zeit in Ihrer Entwicklung von Pol zu Pol mit Eis und Schnee bedeckt war. Das hätte das Ende des Lebens auf ihr bedeuten können. Die Vulkane haben mit dem von ihnen ausgestoßenen Kohlendioxid den Treibhauseffekt angeheizt und damit dem ganzen ein Ende bereitet. Wie gesagt, höchst umstritten und hypothetisch, aber es wird dabei die Wichtigkeit der Tektonik anschaulich aufgezeigt.