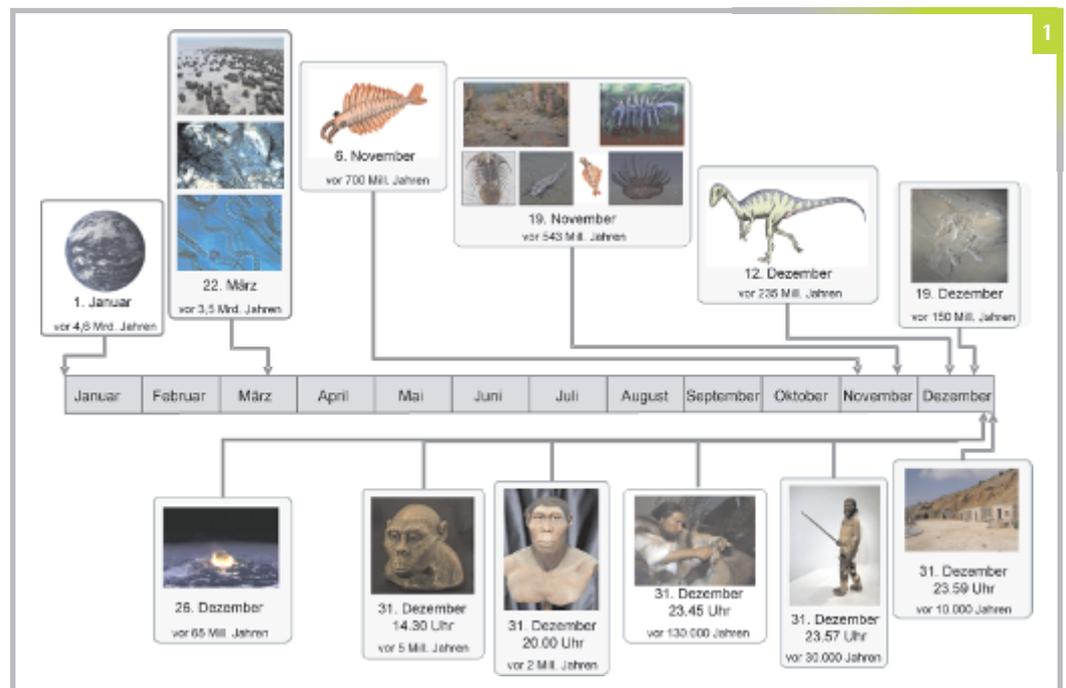


Vom Atom zum Leben

DIE CHEMISCHE EVOLUTION

Bis auf der Erde aus toter Materie das erste Leben entstand, hat es nach wissenschaftlichen Forschungen rund 1,1 Milliarden Jahre gedauert. Diesen Prozess der chemischen Evolution zeichnet ein Wissenschaftler der Leibniz Universität Hannover nach und beschreibt, wie sich das erste Leben auf der Erde vor 3,5 Milliarden Jahren entwickelt hat.



Das Alter der Erde wird auf ca. 4,6 Milliarden Jahre geschätzt. Stellt man sich die Entwicklung der Erde von der Entstehung bis zum heutigen Tag auf eine Jahresuhr übertragen vor, dann ist die Erde am 1. Januar entstanden (Abbildung 1). Erstes Leben in Form von Bakterien und Archaea datiert man auf 3,5 Mrd Jahre – es entsteht entsprechend am 22. März. Die ersten Bakterien oder Archaea mussten unter anoxischen Bedingungen – also ohne Anwesenheit von Sauerstoff – überleben. Als Kohlenstoffquelle nutzten sie CO_2 und als Energiequelle

Wasserstoff. Vor ca. 2,8 Milliarden Jahren entstanden mit den phototrophen Cyanobakterien Organismen, die die Energie aus dem Sonnenlicht nutzten und Sauerstoff über die Photosynthese produzierten. Ein extrem langsamer Prozess. Erst vor ca. 750 Millionen Jahren erreichte der Sauerstoffgehalt die 21 Prozent, die wir auch heute kennen. Das bedeutet: Erst am 6. November tauchten die ersten komplexen mehrzelligen Tiere auf unserer Erde auf. Da die Lebensbedingungen nun optimal waren, entstanden innerhalb eines vergleichsweise kurzen Zeit-

raums von 10 Millionen Jahren in der kambrischen Explosion nahezu alle Vertreter der heutigen Tierstämme.

Vor 235 Millionen Jahren – inzwischen haben wir den 12. Dezember – treten die ersten Dinosaurier auf. Eine Woche später – vor 150 Millionen Jahren die ersten Vögel. 85 Millionen Jahre später führt ein riesiger Meteoriteneinschlag im Bereich des heutigen Golfs von Mexiko zum Aussterben der Dinosaurier. Erst vor 5 Millionen Jahren, das heißt am 31. Dezember gegen 14.30 Uhr tauchen die ersten affen-

artigen Vorfahren des Menschen auf. Vor 2,5 Millionen Jahren – pünktlich zur Tageschau – betritt endlich ein erstes aufrecht gehendes Lebewesen der Gattung Mensch – der *Homo erectus* – die Bühne. Ihm folgt vor 130.000 Jahren der Neandertaler, gefolgt vor etwa 30.000 Jahren (3 Minuten vor Mitternacht) von *Homo sapiens sapiens*. Der Mensch trat erst sehr spät ins Rampenlicht, das erste Leben ist aber schon vor 3,5 Milliarden Jahren entstanden. Es dauerte 1,1 Milliarden Jahre, bis sich aus toter Materie Leben entwickelte. Man spricht auch von der Chemischen Evolution, die zu einem gemeinsamen Urahn des Lebens (Last Universal Common Ancestor, LUCA) führte. Alles

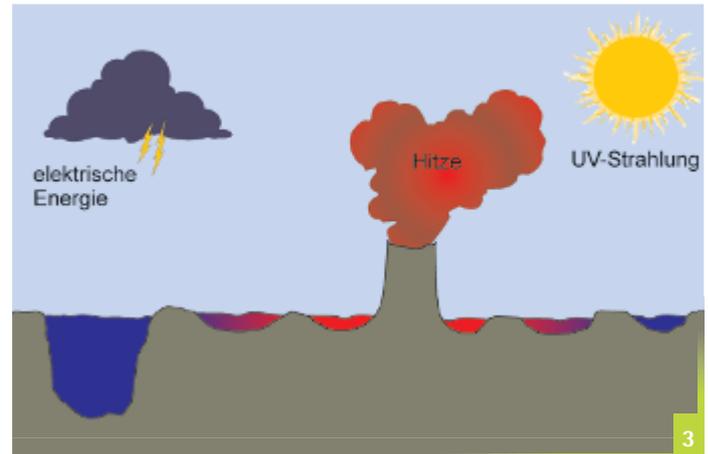
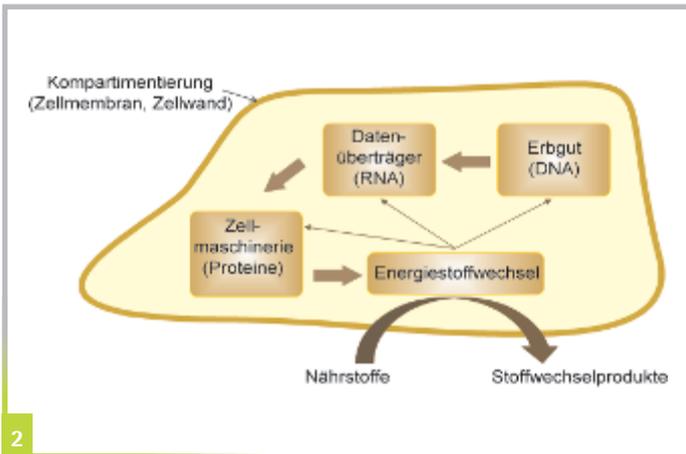
Wann waren die Voraussetzungen für das Entstehen des Lebens gegeben? Nach der Entstehung der Erde entwickelte sich erst langsam eine Gasatmosphäre durch den auftretenden Vulkanismus. Die Gashülle bestand vermutlich aus Wasserdampf, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Methan. Durch die hohe UV-Einstrahlung wurde die anaerobe Gasatmosphäre weiter verändert, Stickstoff, Kohlenmonoxid, aber auch gasförmige Blausäure und andere reaktive Substanzen entstanden. Das erste Leben entstand, ohne dass Sauerstoff vorhanden war.

Unerlässlich für die Entstehung des Lebens ist aber das

diese Einschläge auf die Erde gelangt. Allein das auf der Erdoberfläche vorhandene Phosphat stammt aus phosphorhaltigen Mineralien, die ihren Ursprung in Meteoriten haben. Flüssiges Wasser existierte schon vor 4,3 Milliarden Jahren, wie man heute basierend auf der Entdeckung von Wasserspuren in Zirkonkristallen, die durch Vulkanismus entstanden sind, weiß.

Nach unserem heutigen Verständnis von Leben müssen wir uns überlegen, wann die komplexen Bausteine des Lebens wie die Aminosäuren für die Herstellung von Proteinen oder die für den DNA- oder RNA-Aufbau nötigen Basen (Guanin, Cytocin, Adenin,

Abbildung 1
Der Zeitraum von der Entstehung der Erde bis heute, auf eine Jahresleiste übertragen



was folgte, wird der biologischen Evolution zugeschrieben (siehe Abbildung 2).

Wie aber ist vermutlich das Leben entstanden? Vereinfacht ausgedrückt: Für das Leben sind die Reproduzierbarkeit, die Weitergabe des Erbguts, die Anpassung an äußere Lebensbedingungen und ein eigenständiges Energie- und Synthesystem nötig. Der LUCA muss schon diese Prinzipien des Lebens erfüllt haben. Ein vereinfachtes Schema des Lebens, wie wir es heute kennen, ist in Abbildung 3 dargestellt.

Vorhandensein von flüssigem Wasser. Die große Menge an Wasser, die wir heute auf der Erde haben, muss, wie man heute weiß, aus dem Weltall gekommen sein. Vom Beginn der Erde bis vor ca. 3,8 Milliarden Jahren fand ein heftiges Bombardement von Meteoriten, Kometen und Asteroiden auf die Erde statt. Diese Himmelskörper, die bis zu 40 Prozent aus Wasser bestehen, hatten Durchmesser von bis zu 3 km. Darüber hinaus sind noch verschiedenste andere Substanzen oder gar hoch komplexe organische Verbindungen über

Thymin, Uracil) vorhanden waren. Die DNA ist Träger des Erbguts, die RNA ist der Informationsüberträger, der für die Bildung von Proteinen aus den Aminosäuren wichtig ist. Das erste Leben muss also aus einem Gemisch dieser Bausteine entstanden sein. Schon Charles Darwin sprach von: »... some warm little pond, with all sorts of ammonia and phosphoric salts, light, heat and electricity present, so that protein compound was chemically formed ...«.

Die Chemiker Miller und Urey bewiesen Anfang der 50er Jah-

Abbildung 2
Der prinzipielle Aufbau einer Zelle

Abbildung 3
Die Erde als universelles Experimentierfeld bei der chemischen Evolution

re in einem einfachen Experiment, dass sich eine Vielzahl dieser Bausteine und speziell die Aminosäuren in einem einfachen Versuch herstellen lassen. In einem Glaskolben ahmten sie die frühe Erdatmosphäre durch eine Mischung von Wasserdampf, Methan, Ammoniak, Wasserstoff und Kohlenmonoxid nach. Elektrische Entladungen führten die nötige Reaktionsenergie zu. Nach kurzer Zeit entstand eine Vielzahl von

zess. Berechnungen ergaben, dass es viele Milliarden Jahre dauern würde, bis ein Protein aus 100 Aminosäuren die richtige dreidimensionale Struktur einnehmen würde.

Erst gegen Ende der neunziger Jahre haben Forscher wie der Biologe Jack Szostak und der Chemiker James Ferris andere Wege zur Entstehung des Lebens beschrieben. Sie nahmen an, dass die Erde ein riesiges Experimentierfeld war, bei

gen Wechsel zwischen warmen und kalten Bereichen änderte sich auch die Durchlässigkeit der Vesikelmembranen. Niedermolekulare Substanzen können ohne Probleme in erwärmte Tröpfchen wandern und sind beim Abkühlen in den Vesikeln eingeschlossen.

Jack Szostak zeigte in beeindruckenden Experimenten, dass RNA-Bausteine durch einfache chemische Reaktionen aus der Uratmosphäre gebildet werden können. Er bewies, dass sich die einzelnen Bausteine einfach miteinander verknüpfen, also polymerisieren und sich ohne Probleme vermehren lassen. Man nimmt an, dass nach dem Zufallsprinzip in verschiedenen Vesikeln unterschiedliche RNA-Stränge entstanden, sich vervielfältigten und als Informationen in die Fetttröpfchen eingeschlossen blieben. Sie konnten aufgrund ihrer Länge auch erwärmte Tröpfchen nicht mehr verlassen. Da man heute weiß, dass die RNA auch katalytisch aktiv ist, erscheint es wahrscheinlich, dass sich bestimmte RNA-Sequenzen besonders schnell vermehrten: Sie waren anderen überlegen. Bedenkt man, dass auf der gesamten Erdoberfläche solche Reaktionen unter verschiedensten Bedingungen abliefen, wird klar, dass an einigen Stellen ideale Bedingungen für die chemische Evolution herrschten: Komplexere Informationen in Form von RNA entstanden, vervielfältigten sich und waren anderen RNA-Vesikeln überlegen.

Durch die Tonminerale in den Fetttröpfchen existieren in einigen auch so genannte Eisenschwefelcluster, die wie chemische Fabriken Reaktionen beschleunigten oder gar die Bausteine des Lebens selbst herstellen konnten. Sie boten einen weiteren Evolutionsvorteil. Zu diesem Zeitpunkt entstanden auch – wie wir heute wissen – die ersten Ei-

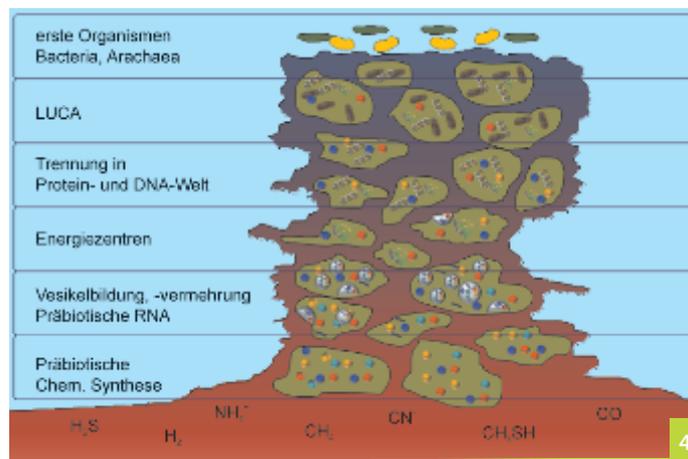


Abbildung 4
Der »Black Smoker« als Ort der chemischen Evolution

organischen Molekülen. Weitere Experimente anderer Wissenschaftler zeigten, dass prinzipiell alle Aminosäuren, aber auch andere Moleküle wie Fettsäuren und Alkohole, gebildet wurden. Deswegen war man der Meinung, dass die Entstehung des Lebens aus dieser Ursuppe möglich war. Man nahm an, dass aus den Aminosäuren Eiweiße – also Proteine – gebildet wurden, die dann in der Lage waren, kompliziertere Reaktionen zu katalysieren, Erbinformationen in Form von DNA zu speichern und die Ablesung der Erbinformation in die Informationswelt der RNA zu katalysieren. Schnell zeigte sich, dass dies ein Trugschluss war. Selbst wenn die Bindung zwischen den Aminosäuren einfach erfolgen sollte, wäre die räumliche Anordnung der einzelnen Aminosäuren in einem Protein ein langwieriger Pro-

dem in unzähligen Segmenten die anorganischen Substanzen bei verschiedenen Temperaturen, verschiedenen Drücken und durch Energiezufuhr durch UV-Strahlung, Radioaktivität, elektrischen Entladungen und Stoßwellen miteinander reagieren konnten. Die Reaktionen fanden in der Atmosphäre, im Wasser auf der Erdoberfläche oder unterirdisch statt (siehe Abbildung 3). Sie zeigten, dass einfache Substanzen wie Fettsäuren leicht gebildet werden und zusammen mit Tonmineralien fetttröpfchenartige Gebilde (Vesikel) bilden. Diese wachsen, indem sie neu hergestellte Fettsäuremoleküle »aufsaugen«. In einer Strömung, beispielsweise zwischen kalten und warmen Bereichen, teilen sich die Vesikel und wachsen dann durch das Aufnehmen weiterer Fettsäuremoleküle erneut an. Durch den ständi-

weiße aus der RNA. Sie machten die Eisenschwefelcluster löslich. Diese Vesikel konnten auch an anderen Orten einen effizienten Energiestoffwechsel aufrechterhalten und alle nötigen Bausteine der Vesikel selbst erzeugen. Abgeschlossen wurde dieser chemische Evolutionsprozess durch die Speicherung aller RNA-Informationen in der hoch kondensierten DNA-Einheit, die robust und stabil die Erbinformationen speichern konnte. Ein solches System war dem LUCA schon sehr ähnlich.

Wo ist das alles geschehen? Man geht davon aus, dass diese komplexen Vorgänge an Orten abgelaufen sind, die den uns

heute bekannten »Black Smoker« am Ozeangrund entsprechen. Das sind hydrothermale Quellen am Boden der Ozeane, die wie Schornsteine aus Röhren oder schwammartigen mineralischen Strukturen gebildet sind und aus denen heiße Sedimentwolken austreten. Am Meeresgrund sind sie heiß, weiter oben kühlen sie auf Wassertemperatur ab. Wie in Abbildung 4 zu sehen, befindet sich am Fuße der »Black Smoker« sozusagen die Basissynthese der Bausteine des Lebens aus anorganischen Substanzen. In der nächsten Schicht haben vermutlich die besten Bedingungen für die Bildung von Vesikeln geherrscht, in der Schicht darü-

ber die idealen für die Bildung von RNA. In den darüber liegenden Schichten könnten sich die Vesikel weiterentwickelt haben, Eiweiße und DNA wurden gebildet, aus den Vesikeln entstand dann irgendwann der LUCA.

Jede einzelne Schicht mag für eine jeweilige Evolutionsstufe typisch gewesen sein. Natürlich wird die Entwicklung nicht in einem Smoker allein abgelaufen sein – in einer übergroßen Zahl von Versuchsplätzen wird irgendwo der ideale Evolutionsraum für den LUCA gewesen sein. Alles, was dann folgte, war schlicht nichts anderes als die biologische Evolution.



Prof. Dr. Thomas Scheper

Jahrgang 1956, ist Professor am Institut für Technische Chemie an der Leibniz Universität Hannover. Seine Forschungsschwerpunkte sind Bioprozesstechnik, Bioanalytik, Enzymtechnik und Tissue Engineering. Kontakt: scheper@iftc.uni-hannover.de