

Die wunderbare Unsicherheit unseres Genoms und der biologischen Evolution

Autor(en): **Schatz, Gottfried**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Monatshefte : Zeitschrift für Politik, Wirtschaft, Kultur**

Band (Jahr): **82 (2002)**

Heft 12-1

PDF erstellt am: **27.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-166646>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Gottfried Schatz,
geboren 1936 in
Österreich, studierte
Chemie an der Univer-
sität Graz (Promotion
1961). Er wirkte an der
Universität Wien, am
Public Health Research
Institute der Stadt New
York, an der Cornell
Universität (Ithaca,
USA) und am Biozen-
trum der Universität
Basel. Gastprofessuren
an der Harvard Univer-
sität und der Stanford
Universität. Seit der
Emeritierung (1999)
ist er Präsident des
Schweizerischen Wis-
senschafts- und Tech-
nologierates, einem
unabhängigen Berater-
gremium des Bundes-
rates.

DIE WUNDERBARE UNSICHERHEIT UNSERES GENOMS UND DER BIOLOGISCHEN EVOLUTION

Die Strukturaufklärung des menschlichen Genoms ist nicht nur eine wissenschaftliche Grosstat, sondern auch ein philosophisches Ereignis, das ohne die Werkzeuge der modernen Gentechnologie undenkbar wäre. Gentechnologie kann uns also nicht nur neue Medikamente, bessere Nahrungsmittel und grösseren Reichtum bescheren, sondern auch ein tieferes Wissen um uns selbst.

Am 26. Juni vorigen Jahres verkündeten Präsident *Bill Clinton* und Premierminister *Tony Blair* in einem gemeinsamen Fernsehauftritt, die chemische Struktur des gesamten menschlichen Genoms sei aufgeklärt. Ein Genom ist die Gesamtheit aller Erbanlagen einer Zelle, also alle ihre Gene, die in den fadenförmigen DNS-Molekülen niedergeschrieben sind.

So ganz stimmte die Ankündigung von Clinton und Blair nicht, denn die chemische Strukturaufklärung des menschlichen Genoms ist bis heute noch nicht ganz beendet, und zumindest einen Teil des verbleibenden Restes werden wir mit den heutigen Methoden gar nicht präzise analysieren können. Doch im Wesentlichen ist das Rennen beendet.

Ich möchte im Folgenden aufzeigen, wie die Biologie mit gentechnologischen Methoden in den vergangenen drei Jahrzehnten präzise Teilantworten auf uralte Fragen des Menschen gefunden hat. Fragen wie «Was ist Leben?» oder «Worin liegt die Würde eines Lebewesens?»

Biologen haben gefunden, dass belebte Materie unendlich viel komplexer ist als unbelebte Materie. Der Unterschied ist zwar nur *quantitativ*, aber so gewaltig, dass er im Prinzip die grundlegenden *qualitativen* Unterschiede zwischen unbelebter und belebter Materie erklären kann. Lebende Zellen sind die komplexeste Materie, die wir bisher im Weltall gefunden haben. Die «Komplexität» eines Objektes ist ein Mass für die Menge an Information, die für eine vollständige Beschreibung des Objekts nötig ist. Um die chemische Zusammensetzung eines einfachen Minerals in gedruckter Form zu beschreiben, braucht es vielleicht eine Buchseite. Die Information

zur Beschreibung einer lebenden Zelle ist je nach Zelltyp tausende- bis millionenmal grösser.

Die Menge an Information, mit der das Leben arbeitet, ist schwindelerregend. Beginnen wir mit einfachen Viren, die an der Grenze zwischen unbelebter und belebter Materie stehen. Sie haben keinen Stoffwechsel und sind deshalb keine Lebewesen, sondern im Wesentlichen wandernde Gene, die in lebende Zellen eindringen und sich in diesen vermehren können. Das Genom der einfachsten Viren ist gewöhnlich auf einem einzigen kleinen DNS-Ringmolekül gespeichert, enthält etwa zehn Gene und hätte in gedruckter Form auf einigen Buchseiten Platz. Ein Gen trägt normalerweise den Bauplan für ein bestimmtes Eiweiss, auch Protein genannt. Einfache Viren können also etwa 10 verschiedene Proteine produzieren.

Vom Bakterium zum Menschen

Die einfachsten wirklichen Lebewesen sind primitive Bakterien, die nur leben können, wenn sie sich an höher entwickelte Zellen anheften. Einer dieser Parasiten ist *Mycoplasma genitalium*. Sein Genom besteht aus 580 700 Buchstaben, entsprechend einem ganzen Buch. Dieses Buch beschreibt etwa 500 Gene, was bedeutet, dass dieser primitive Parasit etwa 500 verschiedene Proteine machen kann. Das ist nahe an der untersten theoretischen Grenze, denn die einfachste lebende Zelle, die wir uns aufgrund unseres biochemischen Wissens vorstellen können, sollte mindestens 250 verschiedene Proteine haben. Eine solche «Minimalzelle» haben wir allerdings in der Natur noch nicht gefunden. Wegen seiner geringen biologischen Information kann

Mycoplasma genitalium viele seiner eigenen Zellbausteine nicht selbst fabrizieren und deshalb nicht frei leben. Selbst wenn es an der Oberfläche anderer Zellen lebt, braucht es stets alle eigenen Erbanlagen. Deshalb sind bei diesem einfachen Parasiten alle Zellen einer Population, wenn wir von seltenen Mutanten absehen, völlig identisch. Es gibt weder genetische Freiheitsgrade noch Individualität.

Auf der nächsthöheren Stufe des Lebens treffen wir frei lebende Bakterien. Deren Genom besteht aus etwa 4 Millionen Buchstaben, entsprechend 10 Büchern, in denen etwa 5000 Gene niedergeschrieben sind. Frei lebende Bakterien können also etwa 5000 verschiedene Proteine machen. Da einige dieser Proteine nachträglich noch durch Abspaltung einzelner Regionen oder durch Anheftung von Zuckern, Fettsäuren oder anderen chemischen Gruppierungen modifiziert werden können, ist die Zahl der verschiedenen Proteine in einer Bakterienzelle höher als die Zahl der Gene. Wie gross diese Diskrepanz zwischen Zahl der Gene und Zahl der verschiedenen Proteine ist, wissen wir noch nicht genau, doch hält sie sich wahrscheinlich in Grenzen. Wenn die Diskrepanz z. B. 50 Prozent wäre, könnten frei lebende Bakterien etwa 7000 bis 8000 verschiedene Proteine machen. Für ein unabhängiges Leben reicht selbst diese Information nur knapp aus, sodass auch bei frei lebenden Bakterien alle Zellen einer Population meist identisch sind. Aber nicht immer: Frei lebende Bakterien haben bereits einige Proteine, die sie nur unter bestimmten Bedingungen brauchen und durch chemische Veränderung an- oder abschalten können. Dies ermöglicht ihnen einfache ja/nein-Entscheidung. So können diese Bakterien z. B. zu einem Nahrungstoff hin- oder von einem Giftstoff wegschwimmen. Die molekularen Mechanismen dieser einfachen Entscheidungsprozesse ähneln in vieler Weise den viel komplexeren Schaltprozessen in unserem Gehirn. Bei frei lebenden Bakterien finden wir also bereits erste Anzeichen von Individualität.

Wenn wir jetzt den grossen Sprung von Bakterien zu uns selbst wagen, dann stehen wir geblendet vor dem Reichtum unseres biologischen Erbes. Unser Genom besteht aus nicht weniger als 3.2 Milliarden

.....
*Lebende Zellen
 sind die
 komplexeste
 Materie, die wir
 bisher im
 Weltall gefunden
 haben.*

.....
*Bei frei
 lebenden
 Bakterien finden
 wir also
 bereits erste
 Anzeichen von
 Individualität.*

Buchstaben, entsprechend einer 50 Meter langen Bücherreihe. Es ist also tausendmal grösser als das Genom von Bakterien. Aber es ist auch viel rätselhafter. Wir können in ihm nur etwa 30000 bis 40000 Gene erkennen, also nur etwa 5–10-mal mehr als im tausendmal kleineren Genom von Bakterien. Zwischen unseren 30000 bis 40000 Genen erstrecken sich endlos lange DNS-Abschnitte, die keine erkennbare Erbinformation tragen und mehr als 95 Prozent unseres Genoms ausmachen. Doch dies ist noch nicht alles. Jede unserer Körperzellen enthält zwei Exemplare dieser 50 Meter langen Bücherreihe, ein Exemplar von der Mutter und eines vom Vater. Wie dies bei so vielen Büchern nicht anders zu erwarten ist, unterscheiden sich diese zwei homologen Bibliotheken durch Zehntausende oder Hunderttausende von kleinen Schreibvarianten und Druckfehlern, den sogenannten Mutationen. Jede dieser Mutationen kann entweder die Eigenschaften oder die Menge eines Proteins verändern. Von vielen Proteinen haben wir also gleichzeitig zwei Varianten, eine mütterliche Variante und eine väterliche Variante.

Da auch in menschlichen Zellen die meisten Gene der Bauplan für ein bestimmtes Protein sind, erhöht sich die Zahl der verschiedenen Proteine, die unsere Körperzellen theoretisch machen können, auf etwa 70000 bis 80000.

Doch unsere Zellen können mehr. Sie können bei vielen Genen die Information auf verschiedene Arten abrufen: Sie können an verschiedenen Orten im Gen zu lesen beginnen, nur einzelne Stücke des Gens lesen, oder die abgelesene Information nachträglich verändern. In vielen Fällen dürften dabei die scheinbar sinnlosen Regionen beteiligt sein, die zwischen den typischen Genen liegen und diese meist auch noch im Inneren unterbrechen. Durch diese Tricks können unsere Zellen von einem Gen bis zu einem Dutzend verschiedene Proteine machen. Dazu kommt noch die Möglichkeit, dass sie, ebenso wie Bakterienzellen, diese Proteine durch Abspaltung oder Anheften chemischer Gruppen verändern können. In unseren Zellen gibt es mindestens 1000 Proteine, die keine andere Aufgabe haben, als andere Proteine durch Anheften von Phosphorsäuregruppen zu verändern! Die meisten dieser Ver-

änderungen können wir trotz der vorhandenen Information über unser Genom noch nicht mit Sicherheit vorhersagen. Mit anderen Worten: Wir können unser Genom zwar lesen, verstehen aber den grössten Teil des Gelesenen noch nicht. Obwohl wir die chemische Struktur unseres Genoms kennen, wissen wir deshalb noch nicht, wie viele verschiedene Proteine unsere Zellen theoretisch machen können. Wahrscheinlich sind es mehrere Hunderttausend. Und dabei berücksichtige ich noch gar nicht die enorme Zahl verschiedener Antikörperproteine, welche die Zellen unseres Immunsystems machen, indem sie Teile des Genoms in schier unendlichen Variationen neu kombinieren oder auf andere Art verändern. Der Reichtum unseres Genoms liegt also nicht nur in seiner Grösse, sondern ebenso sehr in der Virtuosität, mit der unsere Zellen dieses Genom in vielen Variationen lesen können. Bakterien lesen ihr Genom; wir interpretieren unseres. Wir sind wie ein Musiker des 17. und 18. Jahrhunderts, der dank seiner Phantasie aus *einem* vorgegebenen Generalbass viele verschiedenartige Musikstücke hervorzubringen kann.

Zusammenspiel von Zellkern und Mitochondrien

Wenn wir vom menschlichen Genom sprechen, meinen wir fast immer nur das Genom, das in unserem Zellkern ist. Als junger Forscher half ich aber an der Entdeckung mit, dass wir noch ein zweites Genom besitzen, das nicht im Zellkern ist, sondern in den Verbrennungsmaschinen unserer Zellen, den sogenannten Mitochondrien. Jede unserer Zellen enthält in ihrem Inneren Hunderte bis Tausende dieser kleinen membranumhüllten Mitochondrien, die unsere Nahrung verbrennen, dabei Energie produzieren, und so als Kraftwerke unserer Zellen wirken. Im Gegensatz zum Genom des Zellkerns erben wir unser Mitochondrien-Genom nicht von beiden Eltern, sondern nur von der Mutter. Es hat zwar nur etwa 16 000 Buchstaben. Da aber eine Zelle bis zu tausend Mitochondrien haben kann und jedes Mitochondrion bis zu 50 Kopien dieses kleinen Genoms, kann eine Zelle viele Tausende Mitochondrien-Genome beherbergen. Wir wissen noch sehr wenig darü-



Ferdinand Hodler,
Aufstieg und Abstieg,
1894 (Detail)

ber, wie die Erbanlagen unserer Mitochondrien mit denen unseres Zellkerns zusammenspielen, aber es ist sicher, dass dieses Zusammenspiel sehr viele Kombinationen ermöglicht.

Die in unserem Genom niedergelegte Information ist so gross, dass unsere Zellen nur einen kleinen Teil davon zum nackten Überleben brauchen. Obwohl alle unsere Zellen das gleiche grosse Genom haben und Hunderttausende von verschie-

denen Proteinen machen könnten, produziert jede nur ein für sie typisches Spektrum von etwa 10 000 verschiedenen Proteinen. Deshalb unterscheiden sich unsere Körperzellen voneinander, sie sind, wie Biologen sagen, *differenziert*. Eine Leberzelle hat ein anderes Protein-Spektrum, verwendet also ein anderes Spektrum ihrer Erbanlagen, als eine Hautzelle. Erst diese Differenzierung erlaubt die Entwicklung von Lebewesen wie wir, die aus vielen verschiedenartigen Zelltypen aufgebaut sind.

Geschenk der Einmaligkeit

Unsere Gehirnzellen produzieren eine immense Zahl verschiedener Proteine, die als neurologische Schalter wirken. Umwelteinflüsse wie Training oder Wechselwirkung mit anderen Menschen scheinen die Anheftung von Phosphorsäuregruppen an diese Proteine oder auch die Produktion dieser Proteine zu beeinflussen. Das Variationspotenzial unserer Zellen steigt damit ins Unermessliche, sodass jeder von uns ein unverwechselbares Individuum ist. Dies gilt selbst für eineiige Zwillinge. Ein eineiiger Zwilling Bruder von *Boris Becker* würde zwar Boris ähnlich sehen, könnte aber ohne weiteres ein eher durchschnittlicher Tennisspieler sein. Der Informationsreichtum unseres Genoms ist die Gnade, die jedem von uns Einmaligkeit schenkt.

Der Informationsgehalt des Genoms bestimmt die Stellung eines Organismus in der Hierarchie des Lebens. Nichts ist unerbittlicher als die Tyrannei des kleinen Genoms. Es verbietet jede biologische Freiheit, jede Individualität. Je informationsreicher ein Genom, desto grösser die Freiheit, desto grösser die Möglichkeit, dass zufällige oder geplante Ereignisse während der Entwicklung eines Lebewesens zu unterschiedlichen erwachsenen Individuen führen. Je informationsreicher ein Genom ist, desto grösser ist also die Möglichkeit zur Individualität. Für mich persönlich ist der Reichtum des Genoms ein wichtiger Teil der *Würde* eines Lebewesens.

Die blosse Grösse eines Genoms ist aber kein verlässliches Mass für den biologischen Informationsgehalt. Die Genome einiger Pflanzen und Amphibien haben wesentlich mehr Buchstaben als unser Genom, haben aber trotzdem nicht mehr,

.....

Der
Informations-
reichtum
unseres Genoms
ist die Gnade,
die jedem
von uns
Einmaligkeit
schenkt.

.....

sondern sehr wahrscheinlich weniger genetische Information. In diesen extrem grossen Genomen sind entweder lange Abschnitte verdoppelt, oder bis zu 99 Prozent der DNS ist ohne erkennbare genetische Information, oder eine Zelle speichert bis zu sechs Exemplare ihres ganzen Genoms. Eine Maus hat wahrscheinlich ungefähr gleich viel DNS und gleich viel Gene wie ich und ich glaube kaum, dass meine Überlegenheit gegenüber einem Schimpansen, falls sie überhaupt existiert, sich auf einige Schlüsselgene gründet, die mir grössere Vorhirnlappen, aufrechten Gang und eine differenzierte Sprache schenken. Wenn ich einen Schimpansen in seine Schranken verweisen möchte, kann ich mich nicht einfach mit der Zahl meiner Gene brüsten. Unser Genom hütet so manches Geheimnis, das wir noch ergründen müssen.

Chaostheorie – ein Anfang

Die Informationsfülle unseres Genoms hat hohe philosophische Brisanz. Sie eröffnet uns neue Möglichkeiten, um nachzudenken, wie unsere Individualität, Entscheidungsfreiheit und Würde mit der Tatsache vereinbar sind, dass jeder von uns letztlich eine biochemische Maschine ist. Diese intellektuelle Herausforderung hat viele grosse Denker beschäftigt, bis herauf zu *Henri Bergson*. Die Überlegungen dieser Denker haben heute viel von ihrer Überzeugungskraft verloren, denn keiner von ihnen konnte ahnen, wie komplex die Materie ist, aus der wir bestehen. Alle uns bekannten Naturgesetze gelten nur innerhalb bestimmter Grenzen; ausserhalb dieser Grenzen versagen sie. *Newtons* mechanische Gesetze, die Gesetze der Thermodynamik und selbst das Axiom der Kausalität versagen in der Welt subatomarer Teilchen oder im Bereich der Lichtgeschwindigkeit. Warum sollte Ähnliches nicht für unsere Zellen gelten, deren Komplexität so viel grösser ist als alles, was wir bisher gekannt haben? Es könnte durchaus sein, dass wir beim quantitativen Studium unserer Zellen neue Gesetze entdecken, die nur für hochkomplexe Systeme gelten. Die heutigen Ansätze zur Chaostheorie sind sicher nur ein Anfang. Wer weiss, wohin uns die Chaostheorien der kommenden Jahrhunderte noch führen werden?

Unsere Zellen sind so komplex, dass wir sie als Gesamtsystem mit unseren heutigen Methoden noch nicht präzise analysieren können. Wir Biologen stehen vor einer neuen verschlossenen Tür und keiner von uns weiss, was sie verbirgt.

Unsere Zellen tragen aber auch Information, die weder im Genom des Zellkerns noch im Genom der Mitochondrien zu finden ist. Diese Information ist nicht in DNS-Fäden niedergeschrieben, sondern in den Strukturen der Zelle, wie z. B. den Mitochondrien. Man kann diese Information nur verstehen, wenn man die Geschichte des Lebens auf unserer Erde kennt.

Reise in die Frühzeit des Lebens

Seien Sie herzlich willkommen im Jahre 4000 Millionen vor Christus und blicken Sie um sich. Unsere Erde ist erst 600–700 Millionen Jahre alt und deshalb noch viel aktiver und dramatischer als heute. Sie hat sich bereits genügend abgekühlt, sodass sich die ersten Meere gebildet haben, aber diese Meere sind noch viel wärmer als unsere heutigen. Die Atmosphäre hat noch kein Sauerstoffgas. Deshalb kann sich auch keine Ozonschicht bilden, welche die Erdoberfläche vor den Ultraviolettstrahlen der Sonne abschirmt. Durch die hohe Temperatur, durch die intensiven Ultraviolettstrahlen, durch die vielen aktiven Vulkane und durch gewaltige und häufige Gewitter haben sich während den vorausgegangenen Hunderten von Millionen Jahren aus Mineralstoffen, aus Wasser und aus den Gasen der Atmosphäre organische Substanzen gebildet und in den Meeren angereichert. Heute würden diese organischen Stoffe sehr schnell wieder durch Sauerstoff oder durch Bakterien und andere Lebewesen abgebaut werden. Aber wir sind im Jahr 4000 Millionen vor Christus, und es gibt auf unserer Erde weder Sauerstoffgas noch Leben. Die im Meer gelösten organischen Stoffe reagieren chemisch miteinander und bilden immer kompliziertere Substanzen.

Nach etwa 200 Millionen Jahren bilden sich dann aus diesen komplizierten Substanzen die ersten lebenden Zellen. Wie dies geschah, werden wir wohl nie mit Sicherheit wissen. Aber wir sind ziemlich sicher, dass sich diese ersten primitiven

.....

*Das noch
junge Leben
musste mit einer
gewaltigen
Energiekrise
kämpfen.*

.....

Lebewesen von den organischen Stoffen ernährten, die es bereits in den Meeren gab. Der Stoffwechsel dieser ersten Lebewesen war wohl ähnlich wie der von heutigen Hefezellen, die in einem Weinfass Zucker zu Alkohol abbauen. Ebenso wie Hefezellen im Weinfass brauchten diese ersten Lebewesen kein Sauerstoffgas. Das war wichtig, denn es gab ja noch keines.

Als sich das Leben immer mehr ausbreitete, verbrauchte es die im Meer gelösten organischen Stoffe. Das noch junge Leben musste mit einer gewaltigen Energiekrise kämpfen. Wir wissen nicht genau, wann diese Krise eintrat, aber sehr wahrscheinlich starb ein grosser Teil der damaligen Lebewesen wieder aus.

Sonnenlicht als Energiequelle

Doch dann entwickelte sich ein Lebewesen, welches Sonnenlicht als Energiequelle verwenden konnte. Dies war wohl das wichtigste Ereignis in der Entwicklung des Lebens auf unserer Erde. Zum ersten Mal hatten lebende Zellen eine unbegrenzte Energiequelle zur Verfügung. Diese neuen Lebewesen vermehrten sich fast ungehemmt und überwucherten den Erdball. Noch heute, nach 3000 Millionen Jahren, finden wir ihre Spuren als gewaltige versteinerte Hügel in unseren Meeren.

Doch die nächste Katastrophe folgte bald. Die Verwendung von Sonnenlicht als Energiequelle setzte als Abfallprodukt Sauerstoffgas aus dem Meerwasser frei. Dieses Sauerstoffgas entwich aus dem Wasser in die Atmosphäre und reicherte sich dort langsam, aber stetig an. Sauerstoffgas ist aber für lebende Zellen ein Gift, weil es viele wichtige Zellbestandteile durch Oxidation zerstört. Durch diese globale Umweltverschmutzung mit giftigem Sauerstoffgas gab es wiederum eine ökologische Katastrophe: Die meisten Lebewesen, vielleicht mehr als 99 Prozent aller Arten, starben aus.

Einige wenige Lebewesen entwickelten jedoch Schutzmechanismen gegen Sauerstoffgas und konnten sich in der neuen Atmosphäre vermehren. Viele dieser Mechanismen schützen unsere Zellen noch heute, vor allem die Zellen in unserer Lunge. Das Leben erholte sich wieder und setzte seinen Siegeszug auf der Erde fort. Die Erdoberfläche war nun wieder voll

von lebenden Zellen und von organischen Stoffen, die beim Tode dieser Zellen wieder freigesetzt wurden. Bald bestand ein Fünftel der Atmosphäre aus Sauerstoffgas, das zur Gänze von lebenden Zellen stammte.

Schliesslich entwickelten sich Zellen, die organische Stoffe mit Sauerstoffgas verbrannten und die dabei freiwerdende Energie zum Leben verwendeten. Die ersten atmenden Zellen waren entstanden. Diese atmenden Zellen waren also Parasiten, die vom organischen Abfall anderer Zellen lebten. Sie waren aber sehr erfolgreich, denn sie konnten auch in der Nacht wachsen und sich dort vermehren, wo es kein Sonnenlicht gab.

Vor 2000 bis 3000 Millionen Jahren gab es also auf unserer Erde drei Hauptarten von Lebewesen. Alle drei Arten waren das, was wir heute Bakterien nennen: Sie hatten nur ein kleines Genom und deshalb weder Individualität noch die Möglichkeit, komplizierte vielzellige Organismen zu bilden. Die erste Art dieser Lebewesen gewann Energie aus dem Sonnenlicht. Die zweite Art verbrannte oder, wie wir sagen, veratmete die Überreste dieser Lebewesen. Und die dritte Art konnte weder das eine noch das andere, sondern baute wie die ursprünglichen primitiven Lebewesen organische Stoffe ab, ohne dafür Sauerstoffgas zu benötigen. Diese dritte Art war wahrscheinlich zunächst wenig erfolgreich, weil sie eine veraltete Energieproduktion verwendete.

Erfolg einer zufälligen Symbiose

Doch gerade diesen rückschrittlichen Zellen der dritten Art gelang dann vor etwa 1500 Millionen Jahren ein Meisterstück: Sie fingen sich atmende Bakterien ein und hielten diese in ihrem Inneren gefangen. Die eingefangenen Bakterien produzierten nun für die Wirtszelle Energie durch Atmung. Als Gegenleistung bot die Wirtszelle den eingefangenen Bakterien eine schützende Umgebung. Diese Symbiose war offenbar für beide Partner von Vorteil. Der neue Zelltyp, der durch Verschmelzung zweier Lebewesen entstanden war und deshalb zwei Genome besass, vermehrte sich und konnte zum ersten Mal komplizierte vielzellige Pflanzen und Tiere bilden. Im Verlauf der folgenden 1500

.....
*Jede unserer
 Körperzellen
 ist also durch die
 Verschmelzung
 zweier
 unabhängiger
 Lebewesen
 entstanden.*

Millionen Jahre gewöhnten sich die eingefangenen atmenden Bakterien an ihre schützende Umgebung und gaben den grössten Teil ihres Genoms an das Genom der Wirtszelle ab. Deshalb konnten sie bald nicht mehr ausserhalb dieser Wirtszelle leben. Sie wurden zu den Verbrennungsmaschinen unserer Körperzellen, den Mitochondrien.

Jede unserer Körperzellen ist also durch die Verschmelzung zweier unabhängiger Lebewesen entstanden. Das kleine Genom unserer Mitochondrien ist der Rest, der vom Genom der einst frei lebenden und dann eingefangenen Bakterien noch übrig ist.

Als wir das kleine Genom der Mitochondrien entdeckten, fragten wir uns, warum es überhaupt existiert. Es gibt in der Tat keinen *logischen* Grund dafür. Heute wissen wir, dass der Grund *geschichtlich* ist. Eine rein zufällige Symbiose zweier Lebewesen war vor 1½ Milliarden Jahren erfolgreich und hat sich in modifizierter Form bis zum heutigen Tag erhalten.

Jetzt können Sie verstehen, weshalb unsere Mitochondrien auch genetische Information tragen, die nicht in der DNS ihres Genoms gespeichert ist. Die Mitochondrien unserer Zellen entstehen immer noch, ebenso wie ihre Bakterienvorfahren, nur durch Wachstum und Teilung bereits vorhandener Mitochondrien. Die Mitochondrien-Bausteine werden zwar in unserer Zelle aufgrund von Information produziert, die im Genom des Zellkerns und der Mitochondrien niedergeschrieben ist. Diese Bausteine können aber nur an einem bereits vorhandenen Mitochondrion korrekt zusammengebaut werden. Jedes Mitochondrion ist also eine Schablone oder Matrize. Ohne diese Matrize werden die Mitochondrien-Bausteine zwar fabriziert, irren aber ziellos in der Zelle umher und werden schliesslich wieder zerstört. Sollte also eine Zelle alle ihre Mitochondrien verlieren, könnte sie keine neuen mehr bilden und müsste sterben. Da jedes Mitochondrion eine Schablone oder Matrize ist, repräsentiert es strukturelle Information, die nicht in der DNS unserer Genome niedergeschrieben ist. Diese Schablonen-Information muss von Generation zu Generation vererbt werden, ist also *genetische* Information. Wie viel Schablonen-Information in den Strukturen der

.....
*Die in
 unserem Genom
 niedergelegte
 Information ist
 so gross,
 dass unsere
 Zellen nur einen
 kleinen Teil
 davon zum
 nackten Über-
 leben brauchen.*

Mitochondrien liegt, ist schwer abzuschätzen. Sie ist aber für das Leben unserer Zellen genau so notwendig wie die, welche in den DNS-Fäden unserer beiden Genome gespeichert ist.

Stolz und Demut

Nichts ist am Menschen grossartiger als sein Wissen um die eigene Geschichte. Nie zuvor konnten wir so weit in diese zurückblicken wie jetzt. Die Dramatik dieser Geschichte übersteigt unsere Vorstellungskraft. Die lebendige Substanz ist auf unserem Planeten seit fast 4000 Millionen Jahren nie zur Ruhe gekommen. Unermüdlich experimentiert sie mit sich selbst, unermüdlich sucht sie neue Wege. Ihre Experimente sind oft kühn. Die meisten von ihnen sind Fehlschläge und führen entweder in biologische Sackgassen oder ökologische Katastrophen. Doch jede dieser

.....

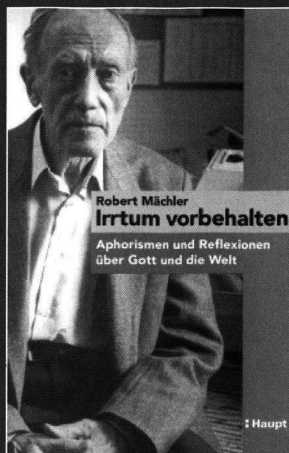
*Jede dieser
Katastrophen
war nur
ein Tor zu immer
komplizierteren
und höher
entwickelten
Lebensformen.*

.....

Katastrophen war nur ein Tor zu immer komplizierteren und höher entwickelten Lebensformen. Die schier unbegrenzte Risikobereitschaft der Evolution und ihr spektakulärer Erfolg zeigen uns eindrücklich die Widerstandsfähigkeit und die dynamische Stabilität der lebendigen Substanz. Man kann es auch umgekehrt sehen: Die Stabilität der lebenden Substanz ist das Resultat von Risikobereitschaft, Informationsreichtum und Flexibilität. Unsere menschlichen Gemeinschaften könnten davon viel lernen!

Was uns die magischen Augen der Genomforschung zeigen, ist also Grund zu Stolz und Demut zugleich. Stolz, weil uns das Feuer der Evolution gestählt hat und der Reichtum unseres Genoms uns Individualität schenkt; und Demut, weil wir aus zwei Lebewesen entstanden sind und trotz unserer Individualität nur Teil eines grösseren Ganzen sind. ♦

Hauptsachen



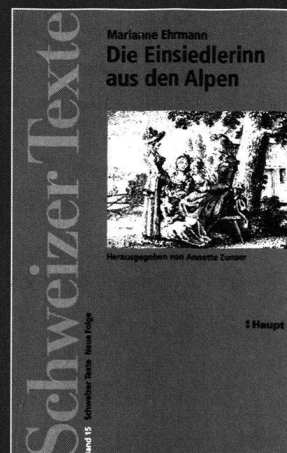
123 Seiten,
Ln. mit Schutzumschlag,
€ (D) 16.–/CHF 26.–
ISBN 3-258-06388-5

Robert Mächler

Irrtum vorbehalten

Aphorismen und Reflexionen über Gott und die Welt
Hrsg. von Gabriele Röwer

«Robert Mächler war ein Unzeitgemässer. Am eindrücklichsten ist seine unbedingte selbstkritische Redlichkeit.» (Fredy Lerch, WoZ)



341 S., 4 Abb., geb.,
€ (D) 29.90/CHF 48.–
ISBN 3-258-06344-3

Marianne Ehrmann

Die Einsiedlerin aus den Alpen

Hrsg. von Annette Zunzer
(Schweizer Texte. Neue Folge. Bd. 15)

«Voll Feuer, Kraft und Wärme, und mit dem unverkennbaren Gepräge eines selbstdenkenden Kopfes»: die erste Schweizer Frauenzeitschrift, die von einer Frau in Eigenverantwortung herausgegeben wurde.

Verlag Paul Haupt Bern • E-Mail: verlag@haupt.ch • www.haupt.ch

Haupt