

Exzerpt von R. König Paul Nurse: Was ist Leben? Berlin 2021

Der Titel ist von Schrödingers Werk aus dem Jahre 1944 übernommen. Aber anders als Schrödinger glaubt N. nicht, dass wir allein von der Entschlüsselung der Vererbung eine erschöpfende Antwort zu dieser Frage erwarten dürfen.

Vielmehr will er 5 zentrale Ideen der Biologie betrachten „und sie als Stufen benutzen, auf denen wir - ... – mehr Klarheit über die Frage erhalten, wie das Leben funktioniert.“ (p116)

Auch diese Ideen sind schon bekannt, aber N. will sie „auf eine neue Weise zusammenfügen“, um so „die Welt mit neuen Augen zu sehen.“ (p123)

Die 5 Ideen sind: die Zelle, das Gen, Evolution durch natürlich Selektion, Leben als Chemie und Leben als Information (p130).

1. Die Zelle

Zellen können sehr winzig und riesig sein (Ein Eigelb z.B. ist eine einzige Zelle und einzelne Nervenzellen reichen von der Basis unseres Rückgrats bis zur Spitze des großen Zehs, jede dieser Zellen kann rd. 1 Meter lang werden (p161)).

„Das Atom der Biologie ist die Zelle“ (p168). Die Zelltheorie ist knapp 200 Jahre alt. Die Geschichte der Zelle beginnt 1664 mit Robert Hooke.

„Heute wissen wir, dass Bakterien und andere Formen mikrobieller Zellen (‘Mikrobe´ ist eine allgemeine Bezeichnung für alle Mikroorganismen, die als einzelne Zellen leben können) die bei Weitem zahlreichsten Lebensformen auf der Erde sind.“ (p188)

„Ohne sie käme das Leben zum Stillstand“ (p195). Denn sie „bauen Müll ab, erneuern Böden, recyceln Nährstoffe und fangen aus der Luft den Stickstoff ein, den Pflanzen und Tiere zum Wachstum brauchen.“ (p195)

Und wir selbst haben für jede unserer ca. 30 Billionen Zellen „mindestens eine mikrobielle Zelle“, die „auf und in uns“ maßgeblich bestimmen, „wie wir Nahrung verdauen und Krankheiten bekämpfen.“ (p195)

Vor dem 17. Jh. Hatte niemand „den Hauch einer Vorstellung, dass es diese unsichtbaren Zellen geben könnte“ (p195).

1839 fassten Schleiden und Schwann ihre eigenen Arbeiten und die anderer Forscher zusammen: Wir haben gesehen, dass alle Organismen ... aus Zellen zusammengesetzt sind.“ (p202).

Damit war klar: Die Zelle ist die „fundamentale Struktureinheit des Lebens“. (p209) Das wurde noch bedeutsamer, als man erkannte, dass „jede Zelle eine eigenständige Lebensform“ darstellt, also lebendig ist.

Als Forscher die Zellteilung als Zellreproduktionsmechanismus entdeckten, war auch klar, wie Zellen entstehen. Das formulierte Virchow in dem Satz, dass jede Zelle aus einer Zelle entsteht. (p216)

„Zellteilung ist die Grundlage für Wachstum und Entwicklung aller lebender Organismen.“ (p223)

„Alles beginnt mit einer Zelle, die sich teilt und zwei Zellen hervorbringt, die verschiedene Identitäten annehmen können“ (p223). Folglich gehen alle lebenden Organismen „aus einer einzigen Zelle“ hervor.

Wegen ihrer Einfachheit verdanken wir gerade der Hefezellen, dass wir heute verstehen, warum sich die Zellen der meisten lebenden Organismen teilen. Das gilt auch für die unkontrollierte Teilung von Krebszellen (p250).

Aber auch Zellen bestehen wieder aus kleineren Komponenten. Die größten davon sind die Organellen, die von einer eigenen Membran umhüllt sind. Eine dieser Organellen ist der Zellkern, „die Kommandozentrale der Zelle“ (p250), da er in seinen Chromosomen die genetischen Anweisungen enthält, während die Mitochondrien – von denen es in manchen Zellen Hunderte gibt – die Funktion von Miniaturkraftwerken ausführen. Sie versorgen die Zelle mit Energie (p257).

Andere Räume in der Zelle übernehmen komplizierte logistische Aufgaben (p257).

Aber nicht alle lebenden Organismen bestehen aus Zellen. Wir unterscheiden zwischen Organismen, deren Zellen einen Kern haben (Tiere, Pflanzen, Pilze = Eukaryoten). Solche ohne Kern = Prokaryoten – sind entweder Bakterien oder Archaeen.

Wichtiger Bestandteil der Zelle: die äußere Membran. Sie bildet eine flexible Wand, die jede Zelle „von ihrer Umwelt trennt“ (p264) und die festlegt, was innen und was außen ist. Mit ihr widerstehen Lebensformen dem universalen Trend nach Unordnung und Chaos.

„Abgeschirmt durch ihre isolierenden Membranen können Zellen die Ordnung herstellen und aufrechterhalten, die sie für ihre Funktionsfähigkeit brauchen, während sie gleichzeitig in ihrer unmittelbaren Umgebung außerhalb der Zelle Unordnung verbreiten.“ (p264)

Trotz oder gerade wegen der Membran stehen sie in „engem Austausch mit“ ihrer Umwelt. „Alle Zellen sind in der Lage, Veränderungen ihres inneren Zustands und des Zustands der Welt um sie herum zu entdecken und auf sie zu reagieren.“ (S. 26)

Gemeinsamkeit aller Zellen: „Sie wachsen, reproduzieren sich, erhalten sich selbst und offenbaren eine gewisse Zweckbestimmtheit: das unbeirrbares Bestreben, durchzuhalten, am Leben zu bleiben und sich fortzupflanzen, komme, was da wolle“ (S. 26).

Entscheidend für die Existenz der Zelle: die Gene

2. Das Gen

„Das Vorhandensein von Ähnlichkeiten zwischen Eltern und Nachkommen ist ein definierendes Merkmal aller lebenden Organismen“ (S. 29).

Es war Gregor Mendel, der als erster etwas Licht in die Geheimnisse der Vererbung brachte. Mit seinen Erbsenexperimenten wurde er zum Wegbereiter der Ideen, die dann zur Entdeckung jener Erbräger führten, die wir heute Gene nennen (S. 30).

Aber schon vor Mendel sammelten die „frühen Pioniere der Vererbungslehre“ viele faszinierende Hinweise. Aber keinem gelang es, eine plausible Erklärung für die genetischen Vorgänge bei der Vererbung in Pflanzen vorzuschlagen (S. 30). Mit Mendels Erbsenforschungen wurde der Schleier endlich gelüftet (S. 31). Für einige seiner Experimente verwendete er 10000 verschiedene Erbsenpflanzen (S. 31).

Er leitete daraus die These ab, dass der männliche Pollen und die weiblichen Samenanlagen in den Erbsenblüten 'Elemente' enthielten, die mit den Merkmalen der Elternpflanzen verknüpft waren. (S. 31) Wenn diese Elemente durch Befruchtung zusammenkämen, würden sie die Merkmale der nächsten Generation beeinflussen. Aber M. wusste nicht, worum es sich bei diesen Elementen handelte. (S. 32)

Zur gleichen Zeit wie Mendel untersuchte Biologe Darwin Pflanzenkreuzungen an Löwenmäulchen. Er beobachtete ähnliche Zahlen, machte sich aber darüber keine weiteren Gedanken. Mendels Forschung wurde von den Zeitgenossen kaum zur Kenntnis genommen. Erst Anfang des 20. Jhs wurde die Genetik geboren (S. 33). Es zeigte sich, dass Mendels Folgerungen nicht nur für Erbsen, sondern für alle sich sexuell reproduzierenden Arten – von der Hefe bis zum Menschen. Jedes ihrer Gene liegt als Paar vor, sie haben jeweils eins von ihren beiden biologischen Eltern geerbt. Inzwischen hatte man eine klare Vorstellung von der Zellteilung.

Fleming beobachtete „Fäden“, die sich teilten, das waren die Chromosomen (S. 34), wobei man später beobachtete, dass die erste Zelle jedes gerade befruchteten Embryos vier Chromosomen enthält: zwei von der Eizelle und zwei von der Samenzelle (S. 34).

Erbsenpflanzen haben 14 Chromosomen in jeder Zelle, Menschen 46 und die eines bestimmten Schmetterlings 400 (S. 34).

Chromosomen übertragen Gene sowohl zwischen Generationen sich teilender Zellen als auch zwischen den Generationen ganzer Organismen. (S. 35)

1944 identifizierte der Biologe Oswald Avery die Substanz, aus der Gene basten. Es war zwar bekannt, dass die Chromosomen DNA enthielten, aber „die Forscher meinten bis dahin, die DNA sei zu einfach und langweilig, um für ein so komplexes Phänomen wie die Vererbung verantwortlich sein zu können.“ (S. 37)

Jedes Chromosom der Zelle „besitzt in seiner Mitte „ein einzelnes, durchgehendes DNA-Molekül, das sehr lang werden und hunderte oder Tausende von Genen enthalten kann. Das menschliche Chromosom Nr. z.B. enthält einen Strang von 13000 verschiedenen Genen,

zöge man es lang, wäre es über 8 cm lang (S. 37). Alle 46 Chromosomen hätten eine Länge von mehr als 2 m (S. 37).

Durch eine wundersame Faltung passt das alles in eine Zelle, die nur einen Durchmesser von einigen Tausendstel mm hat (S. 37). Alle DNA-Fäden in unserem Körper zusammen wären 20 Mrd. km lang!! (S. 37)

Gene bestehen also aus DNA. Von hier aus ließen ich Gene als chemische Gegebenheiten verstehen: „stabile Anordnungen von Atomen, die den Gesetzen der Physik und Chemie gehorchten.“ (S. 38) Aber erst mit der Entdeckung der DNA-Struktur 1953 setzte das neue Zeitalter der Genetik und Biologie wirklich ein.

Das waren drei Forscher in London und zwei in Cambridge, die die entscheidenden Forschungen und Schlussfolgerungen durchführten.

Die beiden entscheidenden Schritte, die das Erbmateriale absolvieren muss, um den Fortbestand des Lebens zu sichern:

1. Die DNA muss die Informationen verschlüsseln, die Zellen und ganze Organismen brauchen, um zu wachsen, am Leben zu bleiben und sich zu reproduzieren.
2. Sie muss sich verlässlich und exakt selbst replizieren (kopieren), damit jede neue Zelle und jeder neue Organismus einen vollständigen Satz der genetischen Anweisungen erbt. (S. 39)

Die Helixstruktur der DNA erklärt diese beiden Funktionen.

- Datenübertragung: Alle Leitersprossen bestehen aus Verbindungen, die sich zwischen Paaren chemischer Moleküle (Nukleotidbasen) bilden. Diese Basen kommen in 4 Formen vor: Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin = A,T,G,C. Die Reihenfolge, in der die 4 Basen entlang der Sprosse auftreten, entspricht dem informationshaltigen Code, so wie die Buchstabenkette eines Satzes einen bestimmten Sinn ergibt (S. 39). Diese Botschaft kann die Anweisung sein, ein Pigment herzustellen, das die Augenfarbe eines Menschen bestimmt, eine Erbsenblüte violett ist, etc. Die Zelle nimmt solche Botschaften von der DNA auf, „indem sie diesen genetischen Code ´liest´ und die Information umsetzt.“ (S. 39)
- Dann die Aufgabe, „exakte Kopien der DNA anzufertigen, damit die gesamte genetische Information von einer Zellgeneration an die nächste weitergegeben werden kann.“ Dabei kann sich nur die Base A mit T und G nur mit C paaren. Jeder Strang der Doppelhelix kann als Vorlage für die Herstellung einer exakten Kopie des ursprünglichen Strangs dienen.

Gene weisen also Zellen an, wie sie bestimmte Proteine herzustellen haben. Und Proteine leisten die Hauptarbeit in der Zelle: die meisten Enzyme, Strukturen und Funktionen der Zelle bestehen aus Proteinen (S. 41).

Dazu müssen die Zellen zwischen zwei Alphabeten übersetzen: dem vierbuchstabigen DNA, da auch den ´Buchstaben A,T, G und C besteht und dem komplizierteren Alphabet der Proteine, das 20 verschiedene Aminosäuren umfasst. Wie die Zellen die Übersetzung in das letztere schaffen, war lange unbekannt. Der Code wurde erst Ende der 1960er und Anfang der 1970er Jahre geknackt (S. 41).

Die Codeknacker fanden heraus, „dass die vier Buchstaben des DNA-Alphabets auf jedem Strang der DNA-Leiter zu dreibuchstabigen ‘Wörtern’ arrangiert sind, wobei die meisten dieser Kurzwörter einer bestimmten Aminosäure, dem Baustein eines Proteins, entsprechen.“ (S. 41)

So weist das DNA-Wort GCT die Zelle an, die Aminosäure Alanin einem neuen Protein hinzuzufügen, während TGT nach einer Aminosäure namens Cystein verlangt. (S. 41)

„Man kann sich ein Gen als eine Sequenz von DNA-Wörtern vorstellen, die zur Herstellung eines bestimmten Proteins erforderlich ist.“ (S. 42) So enthält z.B. das Gen beta-Globin seine entscheidenden Informationen in Form von 441 DNA-Buchstaben, die zu 147 3-buchstabigen Wörtern angeordnet sind. Die werden von der Zelle in ein 147 Aminosäuren langes Proteinmolekül übersetzt (S. 42).

Mit dem Verständnis des genetischen Codes wusste man, wie die statischen, in den Genen gespeicherten Anweisungen in aktive Proteinmoleküle verwandelt werden können, die für den Bau und die Funktion lebender Zellen sorgen. Von nun an konnte man „müheles Gensequenzen beschreiben, interpretieren und verändern“ (S. 42). Das Gen war „eine Kette von DNA-Nukleinbasen, die ein Protein mit bestimmten Funktionen in der Zelle codierte.“ (S. 43)

Dann lernte man, Gene in Chromosomen zu entfernen und einzufügen. Z.B. wurden die Chromosomen von E.-coli-Bakterien so verändert, dass sie das menschliche Gen enthielten, das den Blutzucker regulierende Protein Insulin codiert. Die so gen-veränderten Bakterien produzierten dann kostengünstig hinreichende Mengen des für Menschen nutzbaren Insulins (S. 43).

Dem Briten Fred Sanger gelang es dann, die Art und die Abfolge (Sequenz) aller ein Gen konstituierenden Nukleotidbasen zu bestimmen (S. 44) Er erhielt 2 Nobelpreise (S. 44).

Ende des 20. Jh. ließ sich das ganze Genome – d.h., der vollständige Gensatz oder das gesamte in einer Zelle oder einem Organismus vorhandene genetische Material – sequenzieren. „Alle drei Milliarden DNA-Buchstaben des menschlichen Genoms wurden erstmals 2003 mehr oder weniger vollständig sequenziert.“ (S. 44)

Besonders wichtig war dabei die Liste der rd. 22.000 Proteine codierenden Gene, die allen Menschen gemeinsam sind und die die Basis unseres Erbgutes bilden (S. 44).

„Jedes Mal, wenn sich eine Zelle teilt, müssen alle Gene auf allen Chromosomen im Inneren der Zelle zunächst kopiert und dann gleichmäßig zwischen den beiden Tochterzellen aufgeteilt werden.“ (S. 46)

All das geschieht im sog. Zellzyklus, der – wie das ganze Leben – auf hochkomplexen chemischen Reaktionen beruht (S. 45), die selbst wieder von den Genen kontrolliert werden (S. 46).

Zu Gen-Mutationen kommt es, wenn die DNA-Sequenz eines Gens verändert, neu geordnet oder entfernt wird (S. 47). „Man schätzt, dass es im Durchschnitt bei jeder Ihrer Zellteilungen

zu drei geringfügigen Mutationen kommt“ = Fehlerquote 1 bei 1 Mrd. kopierter DNA-Buchstaben. Das ist sehr wenig.

Manchmal sind sie nützlich, oft nicht. So kann die Veränderung eines Buchstabens, d.h. die Veränderung in einer einzigen DNA-Base dazu führen, dass ein Kind die Blutkrankheit Sichelzellenanämie entwickelt (S. 46).

Mindestens 500 = 10% der Gene sind an dem Zellzyklus von Spaltheife beteiligt (S. 48). Aber nur wenige davon kontrollieren diesen Zyklus. (S. 48f.)

„Das Leben kann nicht ohne Gene existieren: Alle Zellen Und Organismen einer neuen Generation müssen die für Wachstum, ihre Funktion und Reproduktion erforderlichen genetischen Anweisungen erben.“ (S. 52)

„Die DNA-Sequenz der weit überwiegenden Mehrheit der 22000 Gene, die unsere Zellen kontrollieren, ist fast vollständig identisch mit denen aller anderer Menschen“ (S. 53). Auch mit denen unserer Vorfahren. Will sagen:

„Unsere Genome, deren jedes drei Milliarden DNA-Buchstaben lang ist, weisen unabhängig von Geschlecht, Ethnizität, Religion und sozialer Schicht eine enorme Ähnlichkeit auf.“ (S. 53). Einige Gen-Varianten teilen wir allerdings nur mit unseren Verwandten, andere sind nur uns selbst eigen (S. 53). Sie beeinflussen unserer typisches körperliches Erscheinungsbild, unsere Gesundheit und unser Denken (S. 53).

„Die Genetik ist von zentraler Bedeutung für unser aller Leben, sie prägt unsere Identitätsgefühl und unsere Weltsicht.“ (S. 54)

„Alle Individuen werden mit einer relativ kleinen Zahl von neuen genetischen Varianten geboren, die in der Regel zufällig entstehen und nicht mit einem der biologischen Eltern geteilt werden.“ Das erklärt, warum der Einzelne unverwechselbar ist und lebende Arten nicht unveränderlich bleiben (S. 55).

„Das Leben ist ständig mit Experimenten, Innovationen und Anpassungen beschäftigt, während es die Welt verändert, und sich die Welt, von der es umgeben ist, verändert.“ (S. 55)

3. Evolution durch natürliche Selektion

Bedeutendster Evolutionsforscher: Darwin (S. 59).

Schon Aristoteles und im 18. Jh. Lamarck sahen Verwandtschaften zwischen Tieren und letztere hier die Anpassung am Werke (S. 60). Aber Darwin machte setzte sich systematischer und wissenschaftlicher mit de Evolution auseinander. (S. 62) Er brachte dabei den Mechanismus der natürlichen Selektion ins Spiel (S. 62).

Natürliche Evolution basiert auf genetischen Veränderungen, die bei der Reproduktion Vorteile verschaffen, so dass die Träger der Varianten in den nächsten Generationen einen größeren Prozentsatz der Population ausmachen (S. 62).

Darwin hat dieses Konzept als Erster vollständig und überzeugend dargelegt (S. 63).

Schon lange vorher nutzten Menschen diese Erkenntnisse in der künstlichen Selektion – z.B. in der Züchtung (S. 63).

Die natürliche Selektion führt zum Überleben der Fittesten (S. 64).

Zur Evolution kann es nur kommen, wenn lebende Organismen 3 entscheidende Merkmale aufweisen:

1. Sie müssen sich fortpflanzen können
2. Sie brauchen ein Vererbungssystem (S. 65), durch das die Merkmale des Organismus während der Reproduktion kopiert und vererbt werden können (S. 65).
3. Muss dieses Vererbungssystem variabel sein und diese Variabilität auch vererbt werden können.

Zudem müssen lebende Organismen sterben, damit dieser Prozess richtig funktionieren kann.

„Die drei notwendigen Merkmale ergeben sich unmittelbar aus dem Konzept der Zelle und des Gens. Alle Zellen reproduzieren sich während des Zellzyklus, und alle Zellen haben ein Erbsystem, dessen auf den Chromosomen liegende Gene während der Mitose und der Zellteilung kopiert und vererbt werden.“ (S. 66)

Variationen kommen durch Mutationen zustande, die sich entweder aus Koierfehlern oder Zell-schädigungen ergeben (S. 66)

Diese Fehlerrate „ist der eigentliche Motor der natürlichen Selektion. „Ist sie zu hoch, entartet das Genom“, ist sie zu gering, verringert sich die Aussicht auf evolutionäre Veränderung.“ (S. 66).

Zudem: Wenn wir die Gene de Eltern als Kartenspiel betrachten, werden an die „Nachkommen unterschiedliche genetische ‘Blätter’ ausgegeben.“ (S. 67)

-viele andere Organismen erzeugen Variationen, indem sie DNA-Sequenzen direkt zwischen verschiedenen Individuen ‘verschieben’(S. 67) = horizontaler Gentransfer, der Bakterien resistent gegen Antibiotika machen kann.

Konsequenz aus der Idee der natürlichen Selektion: Alles Leben ist durch Abstammung „mit allem anderen Leben verbunden“ (S. 67). Deshalb sind wir Menschen mit allen anderen Lebensformen verwandt. Experimentell konnte gezeigt werden, dass „mit hoher Wahrscheinlichkeit ... alle Tiere, Pilze oder Pflanzen ihren Zellzyklus auf die gleiche Weise kontrollieren.“ (S. 71)

Die natürliche Selektion „vollzieht sich auch auf der Zellebene in unserem Körper.“ (S. 72)
Nötig dazu sind nur Reproduktion, Vererbung und eine gewisse Variabilität des Vererbungssystems (S. 73).

Diese Selektion kann scheinbar sehr zweckbestimmt sein, braucht dazu aber keine übergeordnete Intelligenz eines Schöpfers (S. 73).

4. Leben als Chemie – Ordnung aus Chaos

Die Idee, das Leben Chemie *ist*, wurde im Zuge der Erforschung der Fermentation geboren, dem Prozess, durch den der einfache Mikroorganismus Hefe bei der Herstellung von Bier und Wein Alkohol erzeugt.“ (S. 78)

Lavoisier erkannte als erster: „Fermentation ist eine *chemische Reaktion*, die der der Zucker des anfänglichen Traubensaftes in den Alkohol des abschließenden Weins umgewandelt wird.“ (S. 80)

Pasteur erkannte dann ein halbes Jahrhundert später, dass das entscheidende Ferment der „Mikroorganismus Hefe“ sei (S. 81). „Chemische Reaktionen sind eine Lebensäußerung der Zelle“ lautete seine prägnante Zusammenfassung (S. 81).

In den Zellen lebender Organismen laufen gleichzeitig hunderte oder tausende chemische Reaktionen gleichzeitig ab. Diese Reaktionen konstruieren die Moleküle des Lebens, die die Bestandteile und Strukturen von Zellen bilden. Außerdem bauen sie Moleküle ab, um Zellkomponenten zu recyceln und Energie freizusetzen.

Stoffwechsel ist die Gesamtheit von chemischen Reaktionen, die in einem lebenden Organismus stattfinden. „Er ist die Grundlage aller Aktivitäten von Lebewesen – Erhaltung, Wachstum, Organisation und Reproduktion ... Stoffwechsel ist die Chemie des Lebens.“ (S. 82)

Enzyme sind Katalysatoren, d.h. sie fördern und beschleunigen chemische Reaktionen. Für das Leben sind sie extrem wichtig. Leben lässt sich am besten durch chemische Reaktionen verstehen, „die von Enzymen katalysiert werden.“ (S. 82)

Die meisten Enzyme bestehen aus Proteinen, die von der Zelle als lange, katzenartige Moleküle (Polymere) hergestellt werden.

„Diese Polymere bestehen im Prinzip aus den Atomen von nur fünf chemischen Elementen. Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Phosphor“ (S. 83) Zentral dabei der Kohlenstoff. Weil er vielseitiger (anbindbar) ist als die anderen Elemente.

„Jedes Protein ist ein Polymer auf Kohlenstoffbasis, dabei werden kleinere Aminosäuremoleküle angefügt“, so dass eine Kette entsteht (S. 84)

Das Leben verwendet 20 verschiedene Aminosäuren. Einige haben positive oder negative Ladungen, andere werden von Wasser angezogen oder abgestoßen etc. (S. 85). Nach der Zusammensetzung entfalten sich die Proteinpolymere dreidimensional.

Dadurch können Zellen Enzyme herstellen, die exakt mit den chemischen Substanzen übereinstimmen (S. 85). Enzyme wieder zerlegen/bilden Moleküle, transportieren Komponenten und Nachrichten zwischen den Zellregionen etc. Das Innere einer Zelle ist ein 'brodelnder Aufruhr chemischer Aktivitäten' (S. 86) „Die Menge der chemischen Reaktionen“ großer Industrieanlagen „nimmt sich daneben mehr als bescheiden aus.“ (S. 87)

In jeder Sekunde wickeln diese Enzyme „Millionen von chemischen Reaktionen ab“. Sie können dabei jedes einzelne Atom „mit einem Maß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit kontrollieren, von dem ein Chemieingenieur nur träumen kann.“ (S. 87)

Diese Reaktionen brauchen dabei keine unterschiedlichen Temperaturen – wie in großen Industrieanlagen – müssen aber voneinander getrennt werden, denn sie dürfen sich nicht stören. Und das alles auf dem engen Raum einer Zelle. (S. 88) Dafür sorgt die sog. Kompartimentierung, also die Einrichtung von Unterumwelten, die zwar getrennt arbeiten aber Kontakt zueinander haben – wie in Städten die unterschiedlichen Funktionsbereiche oder im Körper die verschiedenen Organe. Ähnlich bei Zellen:

Die äußere Membran trennt die Zellinhalte von der Umwelt. In der Zelle sind die größten Kompartimente „die membranumhüllten Organellen, etwa der Kern und die Mitochondrien.“ (S. 90)

Mit Hilfe von Techniken wie der Kristallstrukturanalyse oder Kryoelektronenmikroskopie kann man „beobachten, wie Enzyme mit den chemischen Substanzen wechselwirken, die sie während einer Reaktion ‘bearbeiten‘“ (S. 90) Diese Substanzen heißen Substrate. Diese Wechselwirkungen werden vom Rest der Zelle abgeschirmt, damit sie extrem präzise ablaufen können: „Enzyme und ihre Substrate fügen sich ineinander wie die Teile eines winzigen dreidimensionalen Puzzles“ (S. 91).

„Biologen bezeichnen diese vielfältig wechselwirkenden chemischen Prozesskaskaden als Stoffwechselwege.“ Sie ähneln Fließbändern in einer Fertigungshalle. Jedes Stadium muss abgeschlossen sein, bevor das nächste beginnt.

Enzyme kopieren auch „die DNA mit enormer Genauigkeit“. Es sind quasi „verschwindend kleine Molekularmaschinen ..., die extrem präzise und verlässlich arbeiten.“ (S. 92)

Bestimmte Proteine fungieren als Molekularmotoren, die z.B. Komponenten nach bestimmten Routen innerhalb der Zelle bewegen. Quasi auf einem Schienennetz in der Zelle. (S. 92)

„Die Kombination der winzigen Effekte einzelner Proteine, die zahllos in vielen Zellen zusammenwirken, hat in der makroskopischen Wirklichkeit Konsequenzen, die wir alle sehen können“, wenn und dass unsere Muskeln z.B. uns zum Laufen befähigen (S. 92)

Proteingruppen können sich auch noch zu größeren als den Enzym- und Molekularmaschinengrößen zusammenschließen.

Da wären z.B. die Ribosomen, also jene Proteingruppen, in denen Proteine hergestellt werden (S. 93). „Ribosomen sind größer als typische Enzyme“ (S. 93).

Zur Produktion der Proteine müssen die Ribosomen den Code spezifischer Gens lesen „und ihn in das zwanzigbuchstabile Proteinalphabet übersetzen.“ (S. 93) Dazu verwendet sie RNA, die dient als Bote und heißt darum mRNA (messenger RNA). „Das Ribosom verwendet die mRNA als Vorlage zur Herstellung des Proteins, in dem sie Aminosäuren in der vom Gen vorgegebenen Reihenfolge zusammenfügt.“ Es braucht ca. 1 min., um ein Protein aus ca. 3000 Aminosäuren zusammenzubauen.

Die viel größeren Organellen der Zelle sind mit einer eigenen Lipidmembran umhüllt. Zentral ist dabei jene Organelle, die wir als Kern bezeichnen. Jeder Kern macht ca. 10% des Zellvolumens einer weißen Blutzelle aus. Auf diesem unglaublich winzigen Raum ist eine vollständige Kopie der gesamten DNA einschließlich aller 22000 Gene zusammengedrängt (S. 94). 2 m lang, wenn man sie zu einer geraden Linie auseinanderfaltet.

Die Mehrheit aller Lebensformen bezieht ihre Energie von der Sonne. Dafür sorgt der Chloroplast, eine weitere unentbehrliche Organelle. In Tierzellen kommt sie nicht vor, nur in Zellen von Pflanzen und Algen. In ihnen findet die Photosynthese statt: „jene Gruppe von chemischen Reaktionen, die mithilfe der Energie aus dem Sonnenlicht Wasser und Kohlendioxid in Zucker und Sauerstoff verwandelt.“ (S. 95)

„Die für die Photosynthese erforderlichen Enzyme sind in den zwei Membranschichten angeordnet, die einen jeden Chloroplasten umgeben. Jede Zelle in den Grashalmen Ihres heimischen Parkes beherbergt rund hundert dieser fast kugelförmigen Organellen“. (S. 95) Das in diesen Organellen steckende Protein Chlorophyll ist für das Grün verantwortlich. „Es absorbiert Energie aus den blauen und roten Anteilen des Lichtspektrums, so dass es nur die grünen Wellenlängen reflektiert.“ (S. 95)

Pflanzen, Algen u d einige Bakterien verwenden den von ihnen hergestellten Zucker, auch als Rohstoff, um andere Moleküle herzustellen, die sie zum Überleben brauchen. Zudem produzieren sie Zucker und Kohlenhydrate, die andere Lebewesen brauchen (S. 95). So stammt auch der Kohlenstoff, der für jeden Teil unseres Körpers so entscheidend ist, letztlich aus der Photosynthese (S. 96). „Den Anfang macht das Kohlendioxid, das von den chemischen Reaktionen der Photosynthese aus der Luft genommen wird.“ (S. 96)

„Zum ersten Mal scheint das Leben vor ungefähr 3,5 Milliarden Jahren in Erscheinung getreten zu sein, ... Das waren einzellige Mikroorganismen, die ihre Energie vermutlich aus geothermalen Quellen bezogen.“ (S. 96).

„Sobald die Mikroorganismen die Fähigkeit zur Photosynthese entwickelten, vermehrten sie sich im Laufe von Jahrtausenden derart, dass die Sauerstoffkonzentration in der Atmosphäre anstieg.“ Dann kam es vor 2-2,4 Mrd. Jahren zu großen Sauerstoffkatastrophe: die meisten Kleinlebewesen wurden dadurch ausgelöscht. Der Rest zog sich zurück oder passte sich an und lernte die Zellatmung, mit er den Sauerstoff nutzen, um Energie aus Zuckern, Fetten und Proteinen freizusetzen (S. 97)

Wesentlich an diesem Prozess beteiligt sind die Mitochondrien in den Zellen. Zellen, die viel Energiebrauchen, enthalten darum viele Mitochondrien. In den Herzzellen z.B. nehmen sie 40% des Raums ein. (S. 97) Dabei wird der Photosyntheseprozess umgekehrt: Die „von den Mitochondrien kontrollierte chemische Reaktionsreihe findet sehr geordnet und stufenweise statt, damit nicht zu viel Energie verloren geht und kein reaktiver Sauerstoff und keine Elektronen entweichen, die den Rest der Zelle schädigen könnten.“ (S. 97)

Die Energiegewinnung in den Mitochondrien beruht auf der Bewegung von Protonen: diese strömen – nachdem sie hinter den ‘Membrandamm’ gepumpt wurden, - zurück ins Zentrum der Organelle, wobei sie durch Proteinkanäle gelenkt werden, die die durch den Rückfluss

der geladenen Teilchen erzeugte Energie in Form von sehr energiereichen chemischen Bindungen speichern.“ (S. 99)

„Die winzigen Proteinstrukturen, die in den Mitochondrien die Aufgabe von ‘Turbinen’ übernehmen, sehen tatsächlich ein wenig wie die echten Turbinen in Wasserkraftwerken aus“. (S. 99) Deren molekularer Minirotor stellt die wichtige chemische Bindung durch Produktion des Moleküls ATP her, und zwar im rasenden Takt von 150 Reaktionen pro Sek. (S. 99)

„ATP ist die universelle Energiequelle des Lebens“ (S. 99). Jedes ATP-Molekül speichert Energie wie eine winzige Batterie.

„Die meisten Bestandteile der Nahrung, die Sie zu sich nehmen, werden am Ende in den Mitochondrien Ihrer Zellen verarbeitet, die die darin enthaltene Energie zur Herstellung riesiger Mengen ATP verwenden.“ Sie produzieren pro Tag eine Menge an ATP, „die Ihrem Körpergewicht entspricht! ... Das Leben verdankt seine Energie ATP.“ (S. 100)

Bakterien sichern ihren Energiezufluss dadurch, dass sie Protonen aktiv durch eine äußere Membran pumpen, Eukaryoten benutzen dazu „das Mitochondrium“ (S. 100).

Wir sehen: Eine Zelle besteht aus einem vielschichtigen und sich wandelnden Netz von organisierten und miteinander verbundenen Mikro-Umgebungen (S. 101).

Als Schalter und Regulator des Zellzyklus fungiert das Protein cdc2 (S. 101ff.)

„Letztlich entsteht das Leben aus den relativ einfachen und sattem bekannten Regeln chemischer Anziehung und Abstoßung sowie des Knüpfens und Lösens molekularer Bindungen.“ (S. 104)

5. Leben als Information – Als Ganzes funktionieren

Information nimmt einen zentralen Platz in der Existenz aller Lebewesen ein. (S. 107)

„Lebende Organismen können nur dann effektiv als komplexe, organisierte Systeme funktionieren, wenn sie ständig Informationen über die Außenwelt und ihre inneren Zustände sammeln und verwerten“, d.h. in Handlungs-Entscheidungen münden lassen (S. 107).

„Eng verknüpft mit ihrer Abhängigkeit von Information ist die Zweckmäßigkeit im Handeln von Lebewesen.“ (S. 108)

In der Physik macht es keinen Sinn, über Zwecke zu reden, wohl aber in der Biologie – d.h. wenn es um Lebewesen geht. Denn lebende Organismen „erhalten und reproduzieren sich selbst, sie wachsen und sie reproduzieren sich. Das sind zweckmäßige Verhaltensweisen, die sich im Zuge der Evolution entwickelt haben, weil sie die Aussichten von Lebewesen erhöhen, ihren grundlegenden Zweck zu verwirklichen, ... den eigenen Fortbestand und den ihrer Nachkommen zu sichern.“ (S. 108)

„Zweckmäßiges Verhalten ist ein definierendes Merkmal des Lebens, aber es ist nur möglich, wenn lebende Systeme als Ganzes operieren.“ (S. 108) Schon Kant definierte in der KdU,

dass „lebende Organismen organisierte, zusammenhängende und sich selbst regulierende Wesen“ seien, „die selbst über ihr Schicksal entschieden.“ (S. 109)

„Nur durch Informationsmanagement kann die Zelle in der extremen Komplexität ihrer Operationen Ordnung bewahren und damit ihren höchsten Zweck erfüllen: am Leben zu bleiben und sich zu reproduzieren.“ (S. 109)

D.h. um richtig zu arbeiten, „müssen die vielen chemischen Reaktionen, die innerhalb der lebenden Zelle ablaufen, miteinander kommunizieren und sich aufeinander abstimmen.“ (S. 109)

„Wie ein Schmetterling Informationen über die Welt sammelt und anhand dieses Wissens sein Verhalten verändert, bewerten Zellen fortwährend die chemischen und physikalischen Verhältnisse in ihrem Innern und in ihrer Umgebung, um auf Basis dieser Information ihren inneren Zustand zu regulieren.“ (S. 110)

In vielen lebenden Zellen finden Systeme Anwendung, die genauso funktionieren, wie Watts Fliehkraftregler. Z.B. um Prozesse der Homöostase zu regulieren, so dass z.B. Temperatur, Flüssigkeitsvolumen und Blutzucker gleichbleiben. (S. 111).

Informationsverarbeitung in der DNA geschieht per Gen, das ja nichts anderes als eine lineare (vierbuchstabige) Info-sequenz darstellt.

Lineare Info-übertragung findet auch in den Wörtern und Sätzen der Alltagssprache oder den Programmen der Computer statt.

Informationen werden hier digital gespeichert, d.h. durch „verschiedene Kombinationen einer kleinen Anzahl von Zeichen oder Ziffern (engl. *digits*)“ (S. 112). Die engl. Sprache nutzt 26 verschiedene Zeichen (Buchstaben), Computer den Binärcode 1 und 0, die Zeichen der DNA sind die vier Nukleinbasen. „Digitalcodes haben den großen Vorteil, dass sie sich leicht von einem Codierungssystem in ein anders übersetzen lassen. Bei Zellen geschieht das, wenn sie den DNA-Code in RNA und dann in Proteine übersetzen. Das heißt, sie wandeln genetische Informationen in einen physischen Vorgang“ (S. 112).

Anders als in der IT-Welt muss die genetische Information nicht auf einen anderen physischen Datenträger gespeichert werden: das DNA-Molekül **ist** die Information. (S. 112)

Andere wichtige Eigenschaft der DNA: sie kann sich selbst und damit die in ihr steckenden Informationen sehr exakt kopieren (S. 113) „Einige Gensequenzen haben unermessliche Zeiträume durch eine ununterbrochene Reihe von Zellteilungen überstanden. Große Teile des genetischen Codes, ..., sind in allen Organismen gleich – egal, ob es sich um Bakterien, Archaea, Pilze, Pflanzen oder Tiere handelt. (S. 113) Die Kerninformation ist in diesen Genen „vermutlich seit drei Milliarden erhalten geblieben.“ (S. 113)

„Die Doppelhelix erklärt, warum die Chemie des Lebens nur dann einen Sinn ergibt, wenn sie unter dem Aspekt der Information betrachtet wird.“ (S. 113)

Auch bei der Genregulation (dass also Zellen Gene an- und ausschalten) spielt die Information eine entscheidende Rolle.

Nur so kann man die Entstehung des Menschen z.B. aus einem Embryo erklären, denn alle Zellen im Embryo enthalten denselben Satz von 22000 Genen“, aber die Hautzellen schalten anderen ein/aus als z.B. die in der Niere. (S. 114)

„Tatsächlich geht man davon aus, dass nur rund viertausend Gene oder ein Fünftel Ihres gesamten Gensatzes angeschaltet sind und von all den verschiedenen Zelltypen Ihres Körpers für die Aktivitäten verwendet werden, die sie brauchen. Die restlichen werden lediglich gelegentlich angeschaltet“ (S. 114).

Genregulation führt auch dazu, dass je nach Lebensphase völlig verschiedene Geschöpfe zustande kommen – s. die Metamorphosen des Zitronenfalters.

So gibt es Proteine, die Gene dadurch ab- oder anschalten (S. 115), dass sie sich in der Nähe des zu regulierenden Gens andocken und dieses Gen an sich binden.

Nurse sah und sieht die Zelle nicht nur als chemische Maschine, sondern auch als „logisches und datenverarbeitendes System, das seine Existenz und Zukunft der Fähigkeit zum effizienten Umgang mit Information verdankt.“ (S. 119)

DNA-Sequenzierungen, die vor 20 Jahren Jahre dauerten, macht man heute „an einem Tag“ (S. 119).

Manche Module der Gen-Informationsverarbeitung arbeiten als „negative Rückkopplungsschleifen“ – ähnlich dem Watt'schen Fliehkraftregler (S. 120).

„Pflanzen haben in ihren Blättern Zellen, die mithilfe eines oszillierenden Netzes von Genen und Proteinen das Verstreichen der Zeit messen, und damit der Pflanze ermöglichen, den Beginn eines neuen Tages zu antizipieren. So kann sie die Gene anschalten, die für die Photosynthese erforderlich sind, bevor das erste Licht auf sie fällt. Andere Oszillatoren gehen an und aus, weil Zellen untereinander kommunizieren.“ (S. 121)

All das geschieht, ohne dass wir darüber nachdenken müssen.

Die Computerhardware ist normalerweise statisch und starr. Die Verdrahtung von Zellen und Organismen dagegen „ist fließend und dynamisch, weil sie mit biochemischen Stoffen arbeitet, die in der Lage sind, mithilfe von Wasser in die Zellen zu gelangen und sich zwischen verschiedenen Zellkompartimenten oder Zellen hin-und herzubewegen. ... Zellen verknüpfen ihre verschiedenen Komponenten durch Nasschemie miteinander.“ (S. 124) Das gilt auch für das Gehirn „diesen hochkomplexen biologischen Urcomputer“ (S. 124).

In der Biologie werden die Module, die für die Kommunikation sorgen als „Signalwege“ bezeichnet. Hormone, die in die Blutbahn geschüttet werden, sind ein Beispiel dafür. Aber es gibt noch viel mehr davon – es kann dabei auch um sehr viel komplexere Informationen gehen als nur An/Aus bzw. ja/nein (S. 125).

Weiter wichtig, dass Zellen für den Informationsprozess auch Infos speichern können müssen, also 'zelluläre Erinnerungen' aufweisen. (S. 126) Geht z.B. im Zellzyklus etwas schief, muss das registriert und weitergeleitet werden.

Mit Epigenetik ist eine Gruppe von chem. Reaktionen gemeint, durch die Zellen weitgehend dauerhaft an- oder abgeschaltet werden (S. 127).

Sie machen das mit Hilfe chem. Marker, die an DNA oder Proteinen andocken (S. 127). Manchmal übertragen sich diese Marker auch von den Eltern auf die nächste Generation.

Auch die Art, wie sich der Körper eines Lebewesens im Raum entwickelt, folgt den Vorgaben der (genetischen) Informationsverarbeitung (S. 128)

Wie sich diese räumliche Ordnung entfaltet, ist eine der schwierigen Fragen der Biologie (s. 129) (und so ganz noch immer nicht geklärt).

Embryonen z.B. erzeugen die Information, die sie brauchen, um eine undifferenzierte Zelle oder Zellgruppe in einen hochstrukturierten Organismus zu verwandeln, indem sie chemische Gradienten herstellen.“ Diese liegen in höherer/niedrigere Konzentration vor, so dass für die Zelleausbreitung strukturierende Grenzsignale gesetzt werden (S. 130).

Sydney Brenner: „Mathematik ist die Kunst des Vollkommenen. Physik ist die Kunst des Optimalen. Biologie ist, infolge der Evolution, die Kunst des Zufriedenstellenden.“ (S. 133)
Will sagen: die Lebensformen, die durch natürliche Selektion überleben, funktionieren, sind aber nicht unbedingt besonders effizient und einfach (S. 133).

Die „Bedeutung des Informationsbegriffs für das Leben geht weit über die Zelle hinaus.“ (S. 135)

Entscheidend dabei: die Umwandlung der Information in Wissen, das hilft, „zu überleben, zu wachsen, sich fortzupflanzen und sich weiterzuentwickeln.“ (S. 138)