

1

Warum ist das Leben so kompliziert?

Bisweilen glauben wir, andere Lebewesen zu verstehen. Familienangehörige, Haustiere, BundeskanzlerInnen, Stubenfliegen, Topfblumen – sie sind alle nur Lebewesen wie du und ich, die sich ein bisschen Zufriedenheit wünschen für ihre begrenzte Lebensfrist. Wir identifizieren uns mit anderen Menschen, sogar mit nicht-menschlichen Lebewesen, und wir glauben sie zu verstehen.

Dann wieder gibt es Momente, wo wir nicht einmal die Handlungen der Angehörigen unserer eigenen Spezies begreifen können. Zum Beispiel, wenn Menschen unvollstellbar grausam, dumm, gierig, oder gleich alles auf einmal sind. Wenn die zwischenmenschliche Verständigung versagt. Wenn die Vernunft sich rar macht. Wenn Einfühlen und Mitfühlen uns plötzlich nicht mehr weiterhelfen.

Wie erklärt man Völkermord? Wie versteht man, dass Menschen verhungern, während andere im Überfluss schwelgen? Unsere mitmenschliche Solidarität und Empathie kann diese Phänomene nur beklagen, aber einleuchtende Erklärungen findet sie nicht. Warum kann das menschliche Hirn himmlische Musik oder höllische Folter ersinnen? Wir wissen es nicht.

Als Wissenschaftler, der sich überwiegend mit einfacheren Dingen beschäftigt, wundert mich dieses Versagen nicht. Lebewesen sind nun einmal extrem kompliziert. Und das menschliche Gehirn ist – zumindest solange, bis wir noch intelligenterer Außerirdische entdecken – das komplizierteste System im uns bekannten Universum.

Noch unübersichtlicher wird es, wenn sieben Milliarden Gehirne auf unkontrollierte Weise miteinander wechselwirken. Es liegt in der Natur der Sache, dass einige wenige Gehirne nicht einmal näherungsweise vorhersagen können, was aus dieser potenzierten Komplexität herauskommt. Alles ist möglich, im Schlimmen wie im Guten.

Es ist eine Ironie unserer Zeit, dass die Wissenschaften, die sich mit einfacheren Dingen beschäftigen – etwa Physik, Chemie, Astro-

nomie – im Ruf stehen, schwierig und für normale Menschen unzugänglich zu sein. Dabei ist zum Beispiel ein Stern ein überaus primitives und vorhersehbares System. AstrophysikerInnen können das Licht analysieren, das er aussendet, und dann genau vorhersagen, wie seine Zukunft verlaufen wird.

Wenn Pendel schwingen, Moleküle reagieren, Raketen ins Weltall fliegen – die verrufenen Gleichungen der harten Wissenschaften können genau beschreiben, was gerade passiert, und in vielen Fällen, außer wenn Unsicherheiten aus der Quantenwelt oder der Chaostheorie, oder menschliche Faktoren dazwischenfunken, können sie sogar die Zukunft vorhersagen. Bei lebenden Systemen ist das nicht so einfach.

Chemie, Physik, Astronomie erscheinen nur deshalb schwierig, weil wir ihre Objekte, die Atome, Moleküle, Sterne und Quasare nicht anfassen oder mit unserer Lebenserfahrung begreifen können. Biologie erscheint nur deshalb einfach, weil wir Lebewesen aus eigener Anschauung kennen und – allen gegenteiligen Erfahrungen zum Trotz – zu verstehen glauben. Doch in Wirklichkeit ist lebende Materie unvorstellbar kompliziert, und höhere Organisationsstufen des Lebens umso mehr.

Bis ins 19. Jahrhundert hat man sich damit beholfen, die Biologie als rein beschreibende Wissenschaft zu betreiben, ohne weiter nach Gründen und Mechanismen zu fragen. Damit wären wir natürlich heutzutage nicht mehr zufrieden. Mit der Sammlung, Katalogisierung und Benennung des Lebendigen haben die alten Naturforscher immerhin eine Grundlage geschaffen, auf der die Wissenschaft später aufbauen konnte.

Auseinandernehmen und Zusammenbauen

Im 20. Jahrhundert setzte die Biologie ein Heilmittel gegen die Kompliziertheit der Lebewesen ein: den Reduktionismus. Insbesondere in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts haben Biologen gnadenlos und mit überwältigendem Erfolg alle komplizierten Dinge auf einfachere Bestandteile reduziert. Sie zerlegten Organismen in Organe, Organe in Zellen, Zellen in Organellen, Organellen in Moleküle. Und damit kamen sie dann in den Bereich der gesicherten Erkennt-

nisse, denn Moleküle kann man mit physikalischen und chemischen Methoden genauestens analysieren.

Diese Vorgehensweise hat uns vermutlich die größte Erkenntnis-
masse in der Kulturgeschichte der Menschheit verschafft, aber sie
lässt am Ende immer einige Fragen unbeantwortet. Die Fragen nach
dem Großen und Ganzen, nach der höheren Ebene, die nach dem
Bewusstsein sowieso. Aber der Reduktionismus tut sich auch schwer
mit komplexen Systemen aus vielen unabhängig agierenden Kompo-
nenten, die biologisch interessante Phänomene hervorbringen. Man-
che sprechen von »emergenten« Eigenschaften, die sich aus den kom-
plexen Wechselwirkungen der Komponenten entwickeln, sich aber
einer arithmetischen Vorhersage aus dem Verhalten der Einzelteile
entziehen. Kurz gefasst: Das Ganze kann mehr als die Summe seiner
Teile.

Das gilt für hinreichend komplexe Lebewesen, für Gemeinschaften
von Lebewesen, und für Ökosysteme. All diese komplizierten Netz-
werke von Wechselwirkungen zwischen Einzelteilen folgen zwar den
physikalischen Regeln, die für die Einzelteile gelten, aber ihre Ent-
wicklung ist deshalb noch lange nicht voraussehbar.

Ungefähr um die Jahrtausendwende ließ sich in der Biologie ei-
ne Trendwende erkennen. Stand das 20. Jahrhundert im Zeichen der
Zerlegung von Organismen in ihre kleinsten Einzelteile, so interes-
sierten sich zu Anfang des neuen Jahrhunderts plötzlich immer mehr
Fachkundige für das Zusammensetzen der Einzelteile, die im vergan-
genen Jahrhundert so sorgfältig präpariert, sortiert, und charakteri-
siert worden waren.

Die »neue Welle« der Biologie wollte den Reduktionismus keines-
falls verwerfen oder schlechtreden. Es ging vielmehr darum, auf sei-
nen Errungenschaften aufzubauen und die analytische Verständnis-
weise durch eine synthetische zu ergänzen. Wer ein Auto in seine
Bestandteile zerlegt, gewinnt zweifellos Einsicht in die verborgenen
Mechanismen seiner Funktion. Aber nur wer die Teile nachher auch
wieder zu einem fahrtüchtigen Vehikel zusammensetzen kann, hat
wirklich verstanden, wie es funktioniert.

Das Zusammenbauen erfolgte zunächst einmal in Computermo-
dellen. Die exponentiell ansteigende Leistungsfähigkeit der Compu-
ter ermöglichte es bereits um die Jahrtausendwende, einfache Zellen
wie etwa rote Blutkörperchen *in silico* zu simulieren. Die neue Bran-

che der Biologie nennt sich Systembiologie, da sie jedes biologische System – sei es eine Zelle, ein Organ, ein Organismus oder ein Ökosystem – holistisch in seiner Gesamtheit zu begreifen trachtet, nicht reduktionistisch als einen Haufen Einzelteile.

Denis Noble, der selbst jahrzehntelang dem Reduktionismus frönte, verfasste mit seinem 2006 erschienenen Buch *The music of life: Biology beyond the genome* eine Art Manifest der Systembiologie. Wie der Titel bereits andeutet ist seine Leitmetapher die eines Orchesters. Es kommt nicht nur darauf an, was in der einzelnen Stimme geschrieben steht, sondern auch darauf, wie die vielen verschiedenen Stimmen zusammen erklingen.

Aber auch im Labor ging es ab der Jahrtausendwende konstruktiver zu. Im Rahmen einer weiteren neuen Teildisziplin, der synthetischen Biologie, wendeten Wissenschaftler das im 20. Jahrhundert Erlernte auf die Erzeugung von Neuem an.

Es herrschte zunächst wenig Einigkeit darüber, was synthetische Biologie eigentlich ist, da verschiedene Arbeitsgruppen ihre sehr unterschiedlichen Ansätze unter dieser Flagge scheinbar in verschiedene Richtungen steuerten (siehe [1, S. 217]). Erst als sich konkrete Erfolge abzeichneten, wurde es etwas deutlicher, wohin die Reise möglicherweise gehen könnte.

Eine für die Weltgesundheit ebenso wie für die Wissenschaft wichtige Errungenschaft war die 2006 berichtete Umprogrammierung von Hefen zur Herstellung eines entscheidenden Zwischenprodukts für die Synthese des Malariamittels Artemisinin, dessen Gewinnung aus natürlichen Quellen zu kostspielig und unzuverlässig ist, um eine dauerhafte medizinische Versorgung gewährleisten zu können.

Mit enormem Aufwand schleusten Forscher in Kalifornien einen kompletten neuen Stoffwechselweg in die Hefen ein, der – ausgehend von einer neuen Abzweigung im normalen Hefe-Stoffwechsel – in vier Synthesestufen das gewünschte Produkt Artemisininsäure liefert. Diese kann dann mit einfachen chemischen Verfahren in das Malariamittel umgewandelt werden.

Inzwischen hat die industrielle Anwendung dieses Verfahrens bereits begonnen. Im April 2013 eröffnete die französische Pharmafirma Sanofi in Garessio in Italien die erste Produktionsstätte für Artemisinin, die mit demselben Prinzip arbeitet, obwohl Sanofi für die letzten Schritte der Synthese eigene Verfahren entwickelte. Sanofi will

bereits 2014 eine Jahresproduktion von 50 bis 60 Tonnen erreichen, was etwa ein Drittel des weltweiten Bedarfs abdeckt.

Andere Forscher demonstrierten die Möglichkeiten der synthetischen Biologie mit Modellprojekten, indem sie zum Beispiel Darmbakterien mit eigenen Blinklichtern ausstatteten. Mit solchen Spielereien gibt sich der Genom-Pionier Craig Venter natürlich nicht ab, der die Schrotschussmethode zur Sequenzierung mikrobieller Genome einführte und dann mit seinem privat finanzierten Konkurrenzprojekt zur Erstsequenzierung des menschlichen Genoms weltberühmt wurde. Für ihn bedeutet synthetische Biologie nicht weniger als neues Leben zu erschaffen. Seinem Team konnte im Jahre 2010 eine neue Bakterienart mit einem vollständig synthetischen Genom präsentieren. Zwar handelt es sich bei dem Genom im Wesentlichen um eine chemische Abschrift des Genoms einer bekannten Art, bereichert nur um einige Markierungen und Gimmicks, aber Venter betont gerne, dass es sich bei dieser Errungenschaft um die »Schöpfung« einer neuen Lebensform handelt.

Ein weiterer Wissenschaftszweig, der ähnliche Ambitionen hegt, ist die Kybernetik. Biomimetische Maschinen und einfache Roboter gibt es ja bereits seit Jahrzehnten, aber dank der Fortschritte beim Verständnis der Biologie auf der Ebene ihrer Bausteine und neuerdings auch auf der Systemebene, und auch dank der Fortschritte in der Halbleitertechnik ist die Herstellung von Robotern, die immer überzeugender lebendig wirken, sowie von funktionellen und nützlichen Hybriden aus biologischen und technischen Systemen inzwischen möglich. Die Frage ist nur, welche Arten von Robotern und Hybriden wirtschaftlich überlebensfähig und gesellschaftlich akzeptabel sein werden. Auf diese Frage werden wir im letzten Kapitel dieses Buches zurückkommen.

Global denken

Lebende Organismen sind so schwierig, dass wir erst jetzt wirklich beginnen können, sie zu begreifen. Noch komplizierter wird die Sache allerdings, wenn wir Gemeinschaften von Organismen und deren Wechselwirkung mit ihrer Umwelt betrachten. Dies ist Aufgabe der Ökologie, und die hat natürlich im Groben bereits eine Vorstellung

davon, wie die diversen Lebensformen in einem Geflecht von Wechselwirkungen zusammenhängen, aber was genau passiert, wenn eine Art aus dem System herausgenommen wird, oder eine in dem betrachteten Gebiet nicht einheimische Art neu eingeführt wird, das lässt sich nicht immer vorausberechnen.

Veränderung liegt in der Natur der Biologie – Arten evolvieren, passen sich an ihre Umweltbedingungen an, spalten sich in neue Arten auf, sterben aus. Neu hinzugekommen ist allerdings der auf globaler Ebene Chaos stiftende Beitrag des Menschen. Wir treiben Handel rund um die Welt, transportieren Pflanzen und Tiere, manchmal absichtlich, oft unbeabsichtigt, auf andere Erdteile, tragen zur Verbreitung von Krankheitskeimen bei, und bringen auf diese Weise ökologische Gleichgewichte mit einer Reichweite und Geschwindigkeit durcheinander, auf die die Natur nicht eingestellt ist.

Ebenso wichtig ist auch die Wechselwirkung der Lebewesen mit der Geosphäre, also mit den unbelebten Komponenten des Gesamtsystems Erde. Das Überleben der Arten hängt von geeigneten Klimabedingungen ab, und geologische Katastrophen wie Vulkanausbrüche, Fluten, etc. können es gefährden. Auch hier gilt, dass Veränderungen (und auch das gelegentliche Aussterben von Arten) zum normalen Ablauf gehören, aber wir Menschen haben das Tempo der Änderungen und Artenverluste dramatisch beschleunigt.

Auch in der Vergangenheit hat sich die Zusammensetzung der Atmosphäre geändert, aber nie so drastisch in so kurzer Zeit wie sie sich gegenwärtig ändert, da wir drauf und dran sind, den Kohlendioxidgehalt zu verdoppeln. (Im Mittelalter enthielt die Atmosphäre rund 280 ppm Kohlendioxid, im Sommer 2013 hat die seit den 1960er-Jahren in Hawaii durchgeführte Messung erstmals 400 ppm erreicht.) Lässt man die rund dreieinhalb Milliarden Jahre der Geschichte des Lebens auf der Erde im Zeitraffer ablaufen, so ändert sich die Zusammensetzung der Atmosphäre, das Klima, und auch die Oberfläche der Kontinente dramatisch – allerdings immer auf einer Zeitskala, die in Jahrtausenden zählt statt in Tagen.

Zur Zeit der Dinosaurier war unser Planet sehr viel wärmer als heute und hatte auch einen ausgeprägteren Treibhauseffekt dank höherer Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre. Dementsprechend war der Meeresspiegel deutlich höher und es gab keine Eiskappen in den Polargebieten. Erst vor gut 30 Millionen Jahren kühlte sich die

Erde soweit ab, dass sich die heute vorhandene dauerhafte Eisschicht auf Antarktika etablieren konnte.

Geologische Ereignisse wie Klimaschwankungen, Meteoriteneinschläge und ungewöhnlich heftige Vulkanausbrüche haben auch immer wieder die Biosphäre in Mitleidenschaft gezogen und massenhaftes Artensterben verursacht. Auch heute erleben wir Klimawandel und Artensterben – der Unterschied ist nur der, dass der Wandel um mehrere Größenordnungen schneller verläuft als bisher, und dass wir Menschen ihn ausgelöst haben.

Wie die Geologen Jan Zalasiewicz und Mark Williams in ihrem Buch *The goldilocks planet: The 4 billion year story of Earth's climate* nach einer Zeitraffer-Analyse der Wandlungen des Erdklimas folgern: »Wir schaukeln gerade das Boot, das in der Vergangenheit eine fatale Neigung zum Kentern gezeigt hat.« Und natürlich ist es bislang das einzige Boot, auf dem die Menschheit in einem überwiegend lebensfeindlichen Weltall überleben kann.

Das Leben verstehen lernen

Merke: Das Leben ist eine scheußlich komplizierte und unübersichtliche Angelegenheit. Wer als wissenschaftlich interessierter Mensch solche Komplikationen vermeiden will, beschäftigt sich mit reiner Mathematik, die ist noch sauber und ordentlich, notfalls mit Physik oder gerade eben noch Chemie.

So erging es auch mir – vor den Unwägbarkeiten des Lebens fand ich Zuflucht in Mathematik, Physik, Chemie. Erst als die »Moleküle des Lebens« (so hieß ein Sonderheft von *Spektrum der Wissenschaft* Mitte der 1980er) meine Aufmerksamkeit fanden, dämmerte es mir, dass die Grenze des genau Erfassbaren sich mit der Zeit verschiebt. Die Biologie, die sich zu Zeiten meiner Großeltern noch auf das Beschreiben und Katalogisieren von Orchideen und ähnlich deskriptive Unternehmungen kapriziert hatte, war inzwischen eine molekulare Wissenschaft geworden.

Gerade die Botanik zeigt, wie verschieden man die Wissenschaft vom Leben angehen kann. Botaniker des 19. Jahrhunderts sammelten Blüten, Blätter und Samen in Herbarien und ordneten sie Arten und Gattungen zu. Das ist zweifellos wichtig und wir werden im nächsten Kapitel sehen, dass es heute noch der Wissenschaft dient, aber es

zählt nicht gerade zu den Dingen, die einen Chemiker in Verückung bringen könnten.

Heute denken wir bei Pflanzen an interessante Wirkstoffe wie Nikotin, Aspirin oder das Krebsmedikament Taxol. Wir können die Entwicklung eines Samens zur Pflanze, zur Knospe, zur Blüte und letztendlich zur Frucht im Zeitraffer filmen und sehen so die genetisch programmierten Abläufe der Entwicklungsbiologie in einer Deutlichkeit vor Augen, die bei uns Säugetieren, die wir die interessantesten Veränderungen in der Gebärmutter verstecken, bei weitem nicht so leicht zu erreichen ist. (Und übrigens: Warum schmücken wir unsere Wohnungen mit den Geschlechtsorganen von Pflanzen, während wir unsere eigenen um Himmels willen bloß gut bedeckt halten müssen? Der Umgang des Menschen mit der Biologie ist manchmal sehr mysteriös.)

Wir können die Evolution des Ginkgo-Baums studieren, einer Gattung, welche den ersten und den letzten Dinosauriern Schatten bot. Warum ist der Ginkgo immer noch da, obwohl die Pflanzenwelt doch inzwischen modernere Fortpflanzungsmethoden (Blüten und Früchte) erfunden hat und seine Urzeit-Genossen ausgestorben oder bis zur Unkenntlichkeit verändert sind? Näheres dazu steht in Kapitel 15.

Allein die Pflanzen bieten uns so vielerlei, das über die reine Formenvielfalt und -schönheit hinausgeht. Sie produzieren Duftstoffe, Aromen, Toxine, psychoaktive Substanzen, sie entwickeln sich, co-evolvieren mit den Menschen (und anderen Tieren), die ihre Früchte essen, sie haben springende Gene und betreiben Photosynthese, sie verbrauchen das Kohlendioxid, von dem wir Menschen viel zu viel in die Atmosphäre pusten, kurzum, auch für die exakten Wissenschaften gibt es bei den Pflanzen viel zu untersuchen. Und natürlich ebenso bei den Tieren, und bei den Mikroben.

Als ich im Jahre 1993 als Doktorand in physikalischer Biochemie damit anfang, regelmäßig wissenschaftsjournalistische Beiträge zu schreiben, waren diese meist in der Welt der Moleküle angesiedelt. Natürlich kamen auch Pflanzen, Tiere, sogar Menschen vor, aber nur als Kulisse, als Rahmen für die Abenteuer der Moleküle des Lebens, als Träger von Genen und Reaktionsräume für Enzyme. Vor allem spielte sich die Handlung in der fremdartigen, aber für unser Leben so wichtigen Größenordnung der Nanometer ab, in der Welt, die ich den Nanokosmos nannte.

Bakterien waren von Anfang an dabei, aber höhere Lebewesen und ihre komplexen Gemeinschaften kamen erst langsam hinzu. Für einen Chemiker liegen ja diese Welten erst einmal weit entfernt. Allerdings gibt es, unter anderem dank der oben aufgezeigten Entwicklungen der Systembiologie und synthetischen Biologie, immer mehr Verbindungen zwischen den einst so streng getrennten Disziplinen und ihren parallelen Ebenen.

Interdisziplinäre Forschung ist seit Ende des 20. Jahrhunderts ein wichtiges Schlagwort geworden. Die Biologie verwendet heute ganz selbstverständlich auch Methoden der Mathematik, Physik und Chemie. Damit öffnet sie sich gleichzeitig auch für die Wissbegierigen, die sich nicht ganz so sehr für das Sammeln von Blümchen und Schmetterlingen, sondern mehr für Zahlen und Gleichungen interessieren.

Im Laufe dieser Entwicklung haben sich auch Themen aus der organismischen Biologie und der Ökologie in meine Artikel eingeschlichen. Diese Themen sind ja auch im Zusammenhang mit den globalen Umweltproblemen, die wir Menschen so frohgemut erzeugen und verschärfen, überaus wichtig. WissenschaftlerInnen rechnen ganz ernsthaft nach, ob wir die Artenvielfalt unseres Planeten überhaupt noch angemessen erfassen können, bevor wir sie auslöschen.

Deshalb kommt hier, im Zeichen des Waschbärs, eines putzigen Tierchens, das allerdings in Europa ein von Menschen eingeschleppter Fremdling ist und zur Plage zu werden droht (Kapitel 8), eine Zusammenstellung von biologischen und ökologischen Geschichten, die sich mit den faszinierenden Fähigkeiten der Organismen und der Komplexität ihrer Gemeinschaften befassen.

Diese Dinge sind kompliziert, zugegeben, aber da wir Menschen mit unserem explosiven Wachstum die komplexen biologischen Zusammenhänge unseres Planeten durcheinanderbringen, müssen wir diese auch verstehen, um größere Schäden zu vermeiden. Als Belohnung winken flüchtige Augenblicke, in denen wir glauben können, das Leben zu verstehen.

