

Christoph Then

BIOLOGISCHE INTELLIGENZ

Über Evolution, Artenschutz
und die Gentechnik



Inhaltsverzeichnis

Über Autor und Buch	9
Einleitung	11
Kapitel 1	
Künstliches Leben und Synthetische Biologie	19
Kurze Geschichte des künstlichen Lebens	19
Mechanische Automaten	19
Jungfernzeugung	21
Die gewinnbringende »Sprache« der Gene	28
Eine erste Generation von Gentechnik-Ackerpflanzen	31
<i>Im Detail: Risiken transgener Nutzpflanzen für die Umwelt</i>	33
Unkontrollierte Ausbreitung und transgene Bäume	41
Synthetische Biologie	45
Neue Technologie, neuer Hype	45
Die künstliche Synthese von Erbgut	48
Synthetisches Leben: Top-down, Bottom-up	50
Ziele verfehlt, Erkenntnis gewonnen	53
<i>Im Detail: Was ist ein minimales Genom?</i>	54
Neue Erkenntnisse über »Das Leben«	66
Ein Ausblick: Transhumanismus	71
Kapitel 2	
Neue Gentechnik	77
CRISPR/Cas & Co.	77
<i>Im Detail: Was sind Genscheren?</i>	81
Die neue Schöpfung	90
Wie natürlich ist CRISPR/Cas?	90

Eingriff in die Evolution	91
Gentechnik-Mikroben	93
Korallen	94
Honigbienen und deren Darmbakterien	96
Bäume	97
Die giftige Monarch-Fliege	98
Die Wiederauferstehung des Mammuts	99
Gene Drives	101
Gentechnisch veränderte Viren	102
Gentechnik-Pestizide	104
Vorsorge	105
Kapitel 3	
BI, KI und die »Wunder der Natur«	108
Die Intelligenz von Viren, Kraken und Tintenfischen	108
Intelligenz löst Probleme	113
Die Intelligenz der Arten	114
Die Verkörperung von Intelligenz	116
Kompetenz ohne Verständnis	119
Vielfalt und Komplexität	120
<i>Im Detail: Genotyp-Netzwerke</i>	124
Viele Wege führen ans Ziel	127
»Wunder der Natur«	130
Inhärentes Verstehen und kognitives Verständnis	135
Kapitel 4	
Evolution	139
Aus dem Stammbaum der Kraken	139
Anmerkungen zur Evolutionstheorie	144
Die Sichtweise der Synthetischen Evolutionstheorie	145
Die Grenzen der Synthetischen Evolutionstheorie	150
Die Organisation des Genoms	153
<i>Im Detail: Die Chemie der Gene</i>	155
Ein Fazit: flexible Leitplanken im Erbgut	166

Genom und Umwelt	171
Individuelle Anpassungen	172
Entwicklung von Populationen und Arten	174
Evo-Devo	182
Die Entdeckung der Hox-Gene	183
The Arrival of the Fittest	187
Henne, Ei und Emergenz	191
 Kapitel 5	
Koevolution, Kooperation und Kommunikation	194
Wettstreit, Patchwork und Komposition	194
Gentransfer	198
Fusion	202
Kooperation	205
Kommunikation	208
<i>Im Detail: Aus der Welt der non-coding RNAs</i>	212
 Kapitel 6	
Wie entsteht das Neue?	218
Urknall	218
Zufall und Determinismus	220
Moleküle, Zellen, Organismen, Arten	223
Umwelt	227
Die Lehren der Urzelle	229
Vielfalt, Komplexität und Innovation	233
 Kapitel 7	
Biologische Demenz	238
Instrumentelle Vernunft und Neue Gentechnik	238
Die neue Schöpfung	242
Gentechnik als disruptiver Prozess	244
Das Beispiel des Marmorkrebses	251
Gefahr für den Erhalt der biologischen Vielfalt	255
Und der Klimawandel?	258

Kapitel 8	
Schutz der Lebensgrundlagen	263
Verantwortung	263
Verfügbarmachung	265
Umweltethik	268
Wissenschaft	273
Politik	277
Literatur	280

Kapitel 5

Koevolution, Kooperation und Kommunikation

»Leben ist etwas viel Umfassenderes: ein unglaublich kompliziertes Wechselspiel zwischen Materie und Energie der vielen Millionen Arten außerhalb (und innerhalb) unserer eigenen Haut. Diese fremden Wesen auf der Erde sind unsere Vettern, unsere Ahnen und ein Teil unserer selbst.« Lynn Margulis³⁰⁷

Wettstreit, Patchwork und Komposition

Es gibt viele bekannte Beispiele für die Koevolution von Organismen. Anschauliche Beispiele sind Anpassungen von Insekten an bestimmte Blütenformen und die Biologie von Pflanzen wie die lange Zunge des Tabakschwärmers und die Fähigkeit seiner Raupen, dem Gift des Nikotins zu widerstehen (siehe auch Kapitel 3). Bei diesen engen Beziehungen, die sich über Jahrmillionen entwickelt haben, können evolutive Entwicklungen gleichzeitig Folgen für mehrere Arten haben: Ändert sich die Form der Blüte, kann möglicherweise nur noch ein kleiner Teil der Population der Bestäuber diese neue Blütenform nutzen. Ist die Insektenart auf diese Pflanzenart spezialisiert, kann das einen erheblichen Selektionsdruck ausüben. Das hat auch Folgen für die Tabakpflanze: Kann der Tabakschwärmer, dessen Raupen die Pflanzen schädigen, diese nicht mehr als Futterpflanzen nutzen, verliert der Tabak seinen wichtigsten Bestäuber.

Es gibt aber auch Formen der Koevolution, die gleichzeitig verlaufen und nicht unbedingt auf Selektionsdruck durch eine Veränderung einer der beteiligten Arten beruht. Man entwickelt sich sozusagen partnerschaftlich, zum Beispiel durch einen Genaustausch wie (aber nicht nur) bei Bakterien, der sich auch über die Artgrenzen hinweg ereignen kann. Oder es entstehen dauerhafte Symbiosen und sogar hybride Lebensfor-

³⁰⁷ Margulis, 1999, Seite 139.

men, die die weitere Entwicklung gemeinsam durchlaufen. Dazu gehören Symbiosen von Pilzen und Algen in der Form von Flechten oder auch von Pilzen und Bäumen (Mykorrhiza).

Natürlich entsteht Selektionsdruck nicht nur aus Kooperation oder Symbiose, sondern auch aus Konkurrenz oder gegenseitigen Schädigungen, wenn etwa Parasiten und Krankheitserreger beständig mit den Abwehrmechanismen ihrer Wirte ringen. Die jeweiligen Effekte können sehr unterschiedlich sein. Aus diesen vielfältigen Wechselwirkungen resultiert u. a. eine wichtige Rolle von Viren für die Evolution: Viren können als Brücken zwischen den Domänen dienen und genetische Informationen über weite evolutionäre Distanzen übertragen. Zudem üben krankmachende Viren im Wettbewerb mit dem Immunsystem einen beständigen Druck auf das zelluläre Leben aus, sich weiterzuentwickeln. Die Regeln der Koevolution können chaotisch sein oder bestimmten Regeln unterliegen. Dabei bleiben in der Regel für die jeweiligen gegenseitigen Anpassungen lange Zeiträume. Aber auch schnellerer Wandel ist möglich, das Auftreten von Krankheitserregern, invasive Arten, der Klimawandel gehören zu den Faktoren, die den Selektionsdruck stark erhöhen. Häufig sind kompetitive und kooperative Netzwerke zum Austausch von Informationen, langfristige Kooperationen oder auch Symbiosen. Dabei kann sich der Inhalt der Information beziehungsweise die Funktion der biologischen Faktoren auch verändern: Genfunktionen werden von Zellen angepasst, sich selbst vermehrende genetische Elemente (*Transposonen*) werden Teil der Architektur des Gesamtgenoms, Bakterien zu fest integrierten Kraftwerken der Zellen. In vielen Fällen kann man, ähnlich wie bei der Nutzung von Genotyp-Netzwerken und epigenetischen Anpassungen, von Beschleunigungsfaktoren der Evolution sprechen, die über das hinausgehen, was man unter *Zufall und Selektion* versteht.

Insbesondere frühe Lebensformen wie Bakterien und Archaeen zeigen ein hohes Ausmaß an Genaustausch, das zu einem regelrechten Genom-Patchwork führen kann. Das führt auch zu Schwierigkeiten bei der Unterscheidung und Klassifizierung bestimmter Arten. Man spricht deswegen auch von Galaxien, nach denen Bakterien oder Archaeen sortiert werden, d. h. Gruppen von Einzellern, die Anteil an einem Pool von genetischen

Elementen haben, die aktiv oder passiv ausgetauscht werden können. Und EvolutionsbiologInnen sprechen oft nicht von einem *Baum des Lebens*, bei dem sich eine Art aus einer anderen entwickelt hat, sondern eher von einem *Busch des Lebens*. Dieser hat sich nicht nur aus einer Urzelle, sondern aus mehreren »ersten Zellen« entwickelt, deren Evolution von Anfang an auf dem kooperativen Austausch genetischer Informationen beruhte.³⁰⁸ Diese Patchwork-Evolution wird auch von GentechnikerInnen bemüht. Sie weisen auf die Bedeutung des horizontalen Gentransfers in der Natur hin und stellen ihn auch mit der technischen Übertragung von Genen bei Pflanzen und Tieren auf eine Stufe. Dieser Vergleich ist interessant, führt aber in die Irre, wenn außer Acht gelassen wird, dass die Evolution u. a. auch Regeln und Mechanismen für den Genaustausch entwickelt hat. So zeigt sich beispielsweise an Gräsern (s. u.), dass es im Laufe ihrer Evolution bei vielen Arten zu einem Genaustausch gekommen ist, der aber offensichtlich von verschiedenen Faktoren beeinflusst wurde.³⁰⁹ Insgesamt erschwert diese Patchwork-Evolution den GentechnikerInnen aber eher, ihre Ziele zu erreichen. Die instrumentelle Vernunft des Labors braucht möglichst einfache Regeln und klar definierte Funktionen. Gen- und Stoffwechselnetzwerke, deren Funktion von der jeweiligen Konstellation abhängig sein kann, sind da wenig hilfreich.

Anstelle von definierten Elementen und fixierten Funktionen schafft die Koevolution komplizierte »Kompositionen« (zusammengesetzte Einheiten), deren Funktionalität an Tonfolgen in der Musik erinnert. Jeder Ton muss am richtigen Platz sitzen, damit die Gesamtkomposition funktioniert, aber für jeden Ton gibt es (theoretisch) unendlich viele passende Orte. Dieser Vergleich könnte weitergeführt werden: Töne stellen Zusammenhänge her. Noten sind Zeichen mit einer Bedeutung, die physikalisch definiert ist. Töne können aber in jedem Kontext eine unterschiedliche Funktion einnehmen. Sie wirken nicht nur an einer bestimmten Stelle (in der jeweiligen Folge der Töne, im jeweiligen Akkord), sondern auch für das gesamte Werk, insbesondere wenn sie falsch gespielt werden. Die

308 Siehe Koonin/Wolf 2014.

309 Hibdige et al., 2021.

Zusammenhänge werden von KomponistInnen, dem Instrument, den MusikerInnen, dem Orchester, dem Rhythmus und der Physik der Töne gemeinsam erzeugt und gestaltet. Ähnlich vielschichtig erscheint die Phylognese der Urzellen in komplexen Systemen. Anschaulich werden auch die Probleme von Eingriffen in die jeweiligen Kompositionen: Gerade weil Töne so unterschiedliche Funktionen haben, ist der Zusammenhang, in dem sie ihre Bedeutung entfalten, entscheidend. Sie können weit schwerer ausgetauscht werden als einzelne Wörter oder auch Sätze: Wird ein einzelner Ton geändert, muss das entweder so erfolgen, dass bestimmte Klangregeln beachtet werden oder aber der Kontext angepasst wird. Die einfache Regel lautet: In einer Komposition können Töne nicht nach dem Zufallsprinzip getauscht werden. Ähnliche Regeln scheinen auch für die Evolution zu gelten, wobei aber die von der Evolution hervorgebrachten Arten keine KomponistInnen, AutorInnen oder DesignerInnen haben.

Dazu kommt im Falle der Evolution auch eine gegenseitige Beeinflussung der Evolution, die nicht über den Austausch von Genen oder die Selektion bestimmter Lebensformen erfolgt: Zwischen den Arten können biologisch aktive Moleküle ausgetauscht werden, die (wechselseitig) in die Genregulation der anderen Art eingreifen und so Einfluss auf deren Interaktionen mit der Umwelt und ihre weitere Entwicklung nehmen. Hier spielt u. a. die RNA eine wichtige Rolle.

Die Beobachtung der vielfältigen Wechselwirkungen von Vielzellern und Einzellern, Parasiten und Wirten, Symbionten und Endosymbionten führte zum Begriff des Holobionten bzw. des Hologenoms. Damit wird ein Organismus in einen festen Zusammenhang mit seiner eng assoziierten Umwelt gesetzt. So heißt es beispielsweise in einer Veröffentlichung, die 2012 zum Thema »microbial genomics challenge Darwin« erschien:³¹⁰

»The hologenome theory considers an organism and all of its associated symbiotic microbes (parasites, mutualists, synergists, amensalists) as a result of symbiopoiesis. Microbes, helminths, that are normally understood as parasites are cohabitants and they have cohabited

310 Salvucci, 2012.

with their host and drive the evolution and existence of the partners. Each organism is the result of integration of complex systems. The eukaryotic organism is the result of combination of bacterial, virus, and eukaryotic DNA and it is the result of the interaction of its own genome with the genome of its microbiota, and their metabolism are intertwined (as a ›superorganism‹) along evolution.«

In diesen Interaktionen von Molekülen, Zellen, Organismen und Arten zeigt sich, wie entscheidend die Entwicklung und Zunahme der Biologischen Intelligenz für die Evolution und die weitere Entfaltung der biologischen Vielfalt ist.

Gentransfer

Die Forschung des Biologen Carl Woese (1928–2012) führte in den 1980er-Jahren zu einer neuen Systematik der Klassifizierung der Lebensformen: Lange Zeit galten alle einzelligen Lebensformen ohne Zellkern (*Prokaryoten*) als Bakterien. Nachdem Woese aber Unterschiede im Aufbau der Ribosomen (siehe auch Kapitel 1) entdeckt hatte, unterteilte man die Prokaryoten in zwei *Domänen*: Bakterien und Archaeen. Aus der Arbeit von Woese musste man folgern, dass diese Einzeller nicht direkt miteinander verwandt sind bzw. nicht auf eine gemeinsame Ursprungsformen zurückgehen (zumindest hat man diese noch nicht entdeckt). Bakterien und Archaeen sind also möglicherweise unabhängig voneinander entstanden. Trotz dieser Trennung in unterschiedliche Domänen mit getrennten Stammbäumen fanden sich aber sehr viele Gene, die sowohl in Archaeen als auch Bakterien vorkommen. Bei manchen Arten stammen rund 20 Prozent der Gene aus der jeweils anderen Domäne. Horizontaler Gentransfer spielt also zumindest auf der Ebene der einzelligen Prokaryoten eine entscheidende Rolle. Dies führte zu einem Konzept der Wurzeln des Lebens (*Rhizome of Life*), das die Zusammensetzung der Gene eines Genoms aus verschiedenen Herkünften erforscht.³¹¹

311 Siehe Koonin/Wolf, 2012.

Der horizontale (oder auch laterale) Gentransfer zwischen den Einzellern ist dabei nicht auf den bereits seit längerer Zeit bekannten Austausch von *Plasmiden* beschränkt: Plasmide sind kleine, in der Regel ringförmige, sich selbst vervielfältigende doppelsträngige DNA-Moleküle, die insbesondere in Bakterien vorkommen, aber nicht in deren Chromosomen integriert sind. Plasmide können verschiedene Gene enthalten, z. B. solche, die eine Resistenz gegenüber Antibiotika vermitteln können. Bakterien können mithilfe von Plasmiden genetische Informationen in Form von DNA-Abschnitten direkt austauschen. So können sich beispielsweise Resistenzen gegen Antibiotika rasch ausbreiten. Offensichtlich spielen auch andere Möglichkeiten des Genaustausches eine große Rolle, wie zum Beispiel die Aufnahme von DNA, die nach dem Zerfall von Zellen freigesetzt wird. Bakterien haben verschiedene Mechanismen entwickelt, um direkt Gene aus ihrer Umwelt aufnehmen zu können. Dabei können Gene, die aus anderen Einzellern stammen, in der Regel leichter integriert werden als DNA-Abschnitte von Pflanzen oder Tieren. Die Zusammensetzung und die spezifische Struktur der DNA weisen bei Einzellern, Pflanzen und Tieren jeweils Unterschiede auf, die einen direkten Gentransfer zwischen den Arten bzw. Domänen erschweren können. Trotzdem findet er auch statt. Dieser Genaustausch erfolgt bei Bakterien keineswegs nur passiv. Vielmehr haben Einzeller (bzw. Prokaryoten) auch Mechanismen entwickelt, die es ihnen ermöglichen, über Vesikel bestimmte Gene aktiv an ihre Umwelt abzugeben, die dann von anderen Einzellern aufgenommen werden können.³¹² Neben der Weitergabe von Plasmiden scheint dies eine zusätzliche Möglichkeit zu sein, die die Evolution bei Prokaryoten hervorgebracht hat, um genetische Vielfalt zu schaffen. Entsprechende Gene können nach horizontalem Gentransfer in die Chromosomen der Bakterien integriert werden. Wie man in den Untersuchungen zum Minimalgenom herausgefunden hat, kann dieser Austausch (Genaufnahme und Genverluste) bestimmten Regeln unterliegen (siehe auch Kapitel 1). Dabei scheinen Genverluste häufiger als der Erwerb neuer Gene.

312 Siehe Koonin/Wolf, 2012.

Die Weitergabe von genetischer Information in Vesikeln gibt es aber auch bei *Eukaryoten* und *Metazoen* (vielzelligen Lebewesen). Bei Säugetieren befördern Vesikel (*Exosomen*) einen Gentransfer zwischen den Zellen. Tritt ein Strangbruch an der DNA auf, kann DNA aus den Vesikeln auch in das Erbgut übernommen werden.³¹³ Möglicherweise spielen die Exosomen auch eine Rolle bei Forschungsergebnissen, die zeigen, dass die DNA, über die Nahrung aufgenommen, in das Körpergewebe von Mäusen und insbesondere in das Innere von Leukozyten gelangen kann.³¹⁴ Dabei fand sich die fremde DNA auch im Genom der Milz der Mäuse.³¹⁵ Die DNA fand sich auch im Gewebe der Nachkommen, vermutlich wurde sie über die Plazenta (und nicht über die Keimzellen) weitergegeben.³¹⁶ Die Wissenschaftler diskutieren, ob die Aufnahme der DNA Teil einer Immunreaktion ist. Horizontaler Gentransfer wurde auch zwischen Fischarten beschrieben.³¹⁷

Auch bei Würmern (Nematoden), Käfern und Gräsern wurde festgestellt, dass horizontaler Gentransfer aus anderen Gräsern und aus Mikroben stattfindet. Dabei spielt möglicherweise die Nahrungsaufnahme bzw. bei Pflanzen der Austausch mit Wurzelbakterien eine entscheidende Rolle. Ob und wie entsprechende Gene im Erbgut überdauern und welche Funktion sie haben, ist dann eine Frage der Selektion innerhalb der jeweiligen Populationen und deren weiterer Evolution. So haben Käfer sich im Laufe der Evolution wohl mehrfach die Gene von Einzellern angeeignet, die sie für den Abbau pflanzlichen Materials benötigen.³¹⁸ Auch im Erbgut von Weißen Fliegen (Tabakschildläusen), die an Pflanzen saugen, wurden Gensequenzen aus Pflanzen identifiziert.³¹⁹

Untersuchungen an Gräsern zeigen, dass es im Laufe ihrer Evolution bei vielen Arten zu einem Genaustausch gekommen ist. Von 17 unter-

313 Ono et al., 2019.

314 Schubbert et al., 1994.

315 Schubbert et al., 1997.

316 Schubbert et al., 1998.

317 Graham/Davis, 2021.

318 McKenna et al., 2019.

319 Xia et al., 2021.

suchten Arten konnte bei 13 ein lateraler Genaustausch festgestellt werden, der offensichtlich von verschiedenen Faktoren beeinflusst wurde. So zeigte sich der Gentransfer bei nah verwandten Arten häufiger, ließ sich in einigen Fällen aber auch bei weit entfernten Arten feststellen.³²⁰ Bereits zuvor war bekannt, dass es zwischen parasitär lebenden Pflanzen und ihren Wirten ebenfalls öfter zu einem lateralen Gentransfer kommt.³²¹

Der häufigste Grund für horizontalen Gentransfer sind vermutlich Viren. Insbesondere das Erbgut von sogenannten *Retroviren* (d.h. Viren, die über das Enzym der reversen Transkriptase verfügen, mit dem sie ihre RNA in DNA übersetzen können) findet sich in der DNA von allen mehrzelligen Organismen, auch bei Säugetieren. Deren Erbgut besteht bis zu 50 Prozent (bei Pflanzen sogar mehr) aus Elementen, die aus Viren stammen und sich selbst vermehren konnten, sogenannten Transposonen.³²² Die integrierten Transposonen sind oft inaktiviert und integraler Bestandteil der Architektur des Genoms und dessen Regulation (siehe auch Kapitel 4). Sie bilden bei vielen Organismen sogar einen wesentlichen Anteil der Struktur des Genoms. Sie können auch zu einem Treiber der Evolution werden.³²³ Sie sind insbesondere an der Bildung von miRNA beteiligt, die bei epigenetischen Prozessen eine große Rolle spielen.³²⁴

Längst nicht alle Viren haben eine direkt krank machende Wirkung auf andere Organismen. Je stärker der Mensch aber in Naturbereiche vordringt, in denen es über eine Million noch unentdeckter Viren geben soll, desto größer wird das Risiko, dass Viren bei Menschen auch neue Pandemien auslösen, weil unsere Spezies nicht an diese »exotischen« Viren angepasst ist.³²⁵

320 Hibdige et al., 2021.

321 Siehe z. B. Vogel et al., 2018.

322 Vicient/Casacuberta, 2017; Wilson et al., 2007; Yoshida et al., 2017.

323 Quadrana et al., 2019; Mikkelsen et al., 2007; Palazzo et al., 2014.

324 Lisch/Bennetzen 2011; Piriyaoponga et al., 2007.

325 Krumenacker Thomas (2020) Zoonosen: Das Pandemiezeitalter muss nicht kommen, Süddeutsche Zeitung, 30. Oktober 2020.

Fusion

Die Entstehung des Zellkerns, von Mitochondrien und Chloroplasten beruht ebenso wie die Entstehung von Geißeltierchen auf Kooperationen, die zu dauerhaften *Endosymbiosen* geführt haben: Einzellige Organismen sind zu komplexeren Zellen verschmolzen, aus denen sich dann noch komplexere Mehrzeller entwickelt haben. Sie beruhen auf Fusionsprozessen zwischen verschiedenen Lebensformen, die in der Kombination so erfolgreich waren, dass sich diese als Einheiten herausgebildet haben, deren weitere Evolution gemeinsam verläuft.³²⁶ Überall in den Zellen von Pflanzen und Tieren (Menschen) finden sich deutliche Spuren des Erbguts der Einzeller: Die Zellkerne der Eukaryoten könnten aus einer Fusion von Archaeen und Bakterien entstanden sein.³²⁷ Rein bakterielles Genom ist in den *Mitochondrien* zu finden, die als Kraftwerke der Zellen dienen und auch an der Mobilisierung des Immunsystems beteiligt sind. Sie verfügen über eigene DNA, die sich unabhängig von der des Zellkerns vermehrt. Sie sind in den Zellen beweglich und können sich wie Waggons aneinanderkoppeln. Es wird angenommen, dass sie von Bakterien stammen, die in die Zellen eingewandert sind oder von diesen aufgenommen wurden und zu dauerhaften Kooperationspartnern wurden, die gegenseitig aufeinander angewiesen sind.³²⁸ In den Mitochondrien laufen die biochemischen Prozesse ab, die ursprünglich von Bakterien zur Gewinnung von Energie aus ihrer Umwelt entwickelt wurden und bei Eukaryoten zum Aufbau komplexer Zellsysteme benötigt werden. Tiere benötigen für diese Art der Energiegewinnung die Aufnahme von Nahrung (sie sind heterotroph).

Durch die Aufnahme von *Cyanobakterien* entstanden die *Chloroplasten*, die sich ähnlich wie die Mitochondrien selbst im Zytoplasma vermehren können und ebenfalls der Energiegewinnung dienen. Diese Zellen wurden zum Ausgangspunkt der Entstehung von Algen bzw. Flechten und Pflanzen. Pflanzen benötigen für diese Art der Energiegewinnung nur Sonnenlicht (autotroph).

³²⁶ Siehe Margulis, 1999.

³²⁷ Siehe Kutschera, 2015.

³²⁸ Siehe oben.

Ebenfalls durch *Endosymbiose* entstanden Organismen, *Geißeltierchen*, die sich mithilfe von Zellfäden (Geißeln) aktiv fortbewegen können. Auch die *Chromatophoren* (farbige Zellen in der Haut) der Oktopoden sind aus Endosymbiosen entstanden, ebenso wie die grüne Farbe von Meeresschnecken, die ihre Energie aus Sonnenlicht beziehen können.

Diese Geschichte der wechselseitigen und mehrfachen Symbiosen, die insbesondere von Lynn Margulis (1938–2011) erstmals wissenschaftlich untersucht wurde,³²⁹ lässt sich sowohl anhand des Erbguts als auch anhand der Zellmembranen und der biologischen Eigenschaften der verschiedenen Komponenten nachvollziehen. Zudem gibt es verschiedene Übergangsformen bzw. Organismen, die als Zwischenstadien angesehen werden können, wie Darmparasiten mit zwei Zellkernen (*Giardia*) oder Geißeltierchen (*Euglena*) mit und ohne *Chloroplasten*.³³⁰ Die interzellulären Symbiosen sind also die Voraussetzung für die Entstehung von Algen, Pilzen, Pflanzen und Tieren.

Durch die Fusion einfacherer Lebensformen ergaben sich Synergien und komplexe Organismen, die weit über das hinausgehen, was sich aus den einzelnen Bestandteilen hätte vorhersagen lassen. Dabei führt dieses Patchwork aus ursprünglich autonomen Lebensformen zu überraschenden Effekten: So kann man die Größe von Hühnern über die Selektion der DNA ihrer Mitochondrien züchterisch beeinflussen. Dabei verlaufen die Veränderungen des Phänotyps im Vergleich zur Selektion über die DNA des Zellkerns wesentlich schneller.³³¹ Signale, die von Chloroplasten unter Lichteinfluss an den Zellkern geschickt werden, beeinflussen die Genregulation und das Spleißen der Gene: Die Chloroplasten liefern nicht nur Energie, sondern produzieren Signale, die den Pflanzen ihre Reaktionen auf wechselnde Umweltbedingungen erleichtern.³³² Durch diese Fusionen können so entstandene Systeme auf die Erinnerung an die ursprünglichen Problemlösungen zurückgreifen, die beispielsweise Cyanobakterien eine

329 Siehe Margulis, 1999.

330 Siehe Kutschera, 2015.

331 Alexander et al., 2015.

332 Godoy-Herz et al., 2014.

Energiegewinnung aus Sonnenlicht ermöglichen. Die evolutionären Fortschritte, die durch die Symbiosen erreicht werden, lassen sich aber nicht aus der Summe der fusionierten Elemente vorhersagen.

Ein besonderes Beispiel für Evolution durch Symbiogenese sind Flechten: Diese bestehen aus festen Lebensgemeinschaften von Schlauchpilzen (*Ascomyceten*), Ständerpilzen (*Basidiomyceten*) und Algen oder auch Cyanobakterien.³³³ Aufgrund der biologischen Eigenschaften von Pilzen, die sie befähigt, Wasser zu speichern, gelang diesen schon in einer frühen Stufe der Evolution der Gang auf das Land, wo sie zum Wegbereiter von Pflanzen wurden. In der Form von Flechten können sie gleichzeitig Sonnenlicht (*Autotrophie*) und organisches Material (*Heterotrophie*) für Energiegewinnung und Zellaufbau nutzen.

Pilze gehen in Form von *Endophyten* und *Endomykorrhiza* auch feste Kooperationen mit Pflanzen ein und können mit diesen über die Zellzwischenräume fest verwachsen. Orchideen brauchen Pilze zudem, um aus Samen wachsen zu können: Der Mykorrhiza-Pilz dringt in die Keime ein, versorgt diese mit Nährstoffen und breitet sich von dort mit den Wurzeln aus.

Die dadurch ermöglichten Fortschritte in der Evolution zeigen, dass jede Stufe der Entwicklung ihre eigene Dynamik entfaltet. Beruhend auf den Regeln der negativen Entropie, organisiert sich Leben so, dass der unmittelbare Einfluss physikalischer Gesetze und chemischer Regeln in den Hintergrund tritt und biologische Prozesse mehr und mehr Gestaltungskraft gewinnen. Diese zunehmende Autonomie des Lebens gegenüber seinen ursprünglichen physikalischen und chemischen Grundlagen wurde u. a. im Zusammenhang mit dem Vitalismus so gedeutet, dass es eine *Lebenskraft* gebe, die sich in ihren Gesetzmäßigkeiten von denen der Physik und Chemie unterscheiden lässt. Eine derartige Lebenskraft ist aber nicht nötig: Leben entwickelt und organisiert sich stufenweise und erlangt durch das Lösen von Problemen zunehmende Freiheitsgrade gegenüber den unmittelbaren Einflüssen der Umwelt. Dabei werden die Gesetzmäßigkeiten von Physik und Chemie aber nie infrage gestellt.

333 Spribille et al., 2016.

Kooperation

Synergien zwischen unterschiedlichen Lebensformen, die zu noch besseren und vielfältigeren Problemlösungen führen, lassen sich nicht nur in den fixierten Lebensgemeinschaften der Symbiogenese beobachten, sondern auch in wesentlich flexibleren Systemen. Menschen sind ein gutes Beispiel für diese Symbiosen: Die Zahl ihrer Bewohner im Darm und auf der Haut übersteigt die Anzahl ihrer Körperzellen. Pflanzen und Tiere sind über ihr assoziiertes Mikrobiom auf vielfältige Weise und sehr eng mit ihrer Umwelt verbunden. Das Mikrobiom des Darms sorgt für den Aufschluss der Nahrung, produziert zudem zusätzliche lebenswichtige Stoffe und biochemische Moleküle, die uns ernähren, gesund erhalten oder auch krank machen. Störungen des Mikrobioms werden u. a. in Zusammenhang mit Darmentzündungen, Depressionen, Ängstlichkeit, Fettleibigkeit, Autismus, Allergien und Erkrankungen der Atemwege gebracht. Im Rahmen von Projekten wie dem *Human Microbiome Project* versucht man diese Zusammenhänge zu erforschen.³³⁴

Unser Mikrobiom erben wir mit unserer Geburt, es geht bei der Geburt von der Mutter auf das Baby über und ist für jedes Individuum typisch. Gleichzeitig ist es aber auch austauschbar beziehungsweise veränderbar: Je nach Nahrung, Umwelt und Gesundheitszustand ändert sich wechselseitig auch die Zusammensetzung unserer mikrobiologischen Gesellschafter. Diese Wandelbarkeit kann für unsere Gesundheit ein großer Vorteil sein: Bei manchen chronischen Krankheiten wird deswegen versucht, die Darmflora von gesunden Menschen auf die Patienten zu übertragen beziehungsweise vorbeugend sicherzustellen, dass es zu einer ausreichenden Übertragung des Mikrobioms von der Mutter auf ihr Neugeborenes kommt.³³⁵ Aber auch das Erbgut des Hosts (Mensch oder Tier) ist ausschlaggebend für die Zusammensetzung des Mikrobioms. Das zeigt sich bei Untersuchungen an Fadenwürmern, Mäusen, Wiederkäuern und Geflügel: So wurden bei Hühnern unter gleichen Umweltbedingungen, aber bei unterschiedlichen Zuchtzielen nach 50 Generationen auch sehr

334 Proctor, 2011.

335 Chang/Neu, 2015.

unterschiedliche Mikrobiome festgestellt. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer *Phylosymbiosis*, Pflanzen und Tiere entwickeln sich als Holobionten: »Thus, the microbiome isn't a random assembly of microbes derived from the environment, but rather there has been a selection on maintaining specific host–microbiota interactions over time. The authors term this relationship between the microbiome and host evolution ›phylosymbiosis‹.«³³⁶

Bei Pflanzen übernehmen vor allem Symbiosen mit Organismen, die an und zwischen den Zellen der Wurzeln leben, diese Funktion. Manche Pflanzen wie Bohnen verfügen über besondere mikrobiologische Gesellschafter, die in »Knöllchen« leben, die von den Pflanzen an ihren Wurzeln gebildet werden und Stickstoff aus der Luft binden können. So können sie bestimmte Probleme mit nährstoffarmen Böden lösen. Die mit den Pflanzen an den Wurzeln vergesellschafteten Mikroben werden *Mykorrhiza* genannt. Besonders wichtig sind hier die Pilze, man unterscheidet *Ektomykorrhiza* (die um die Wurzeln herum wachsen) und *Endomykorrhiza*, die in die Zellzwischenräume der Wurzeln hineinwachsen können. Die daran beteiligten Pilze vernetzen Bäume auch untereinander und stellen einen stetigen Austausch von Nährstoffen und biochemischen Informationen sicher. Ist dieses Netzwerk intakt, ist auch der Wald insgesamt widerstandsfähiger. WissenschaftlerInnen aus British Columbia stellten eine Korrelation zwischen der Menge der Mykorrhiza und dem Wachstum und der Gesundheit von Bäumen fest.³³⁷ Das Netzwerk der Pilze dient im Wald zwischen den Bäumen sowohl dem Austausch von Nährstoffen als auch der Information über Umweltbedingungen (wie dem Auftreten von Schädlingen).³³⁸ Auch dabei beeinflusst die Genetik der Pflanzen die Zusammensetzung ihres Mikrobioms, während die Bodenorganismen auf vielfältige Art und Weise Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen und ihre Gesundheit nehmen.³³⁹

336 Zitiert aus Richardson, 2017, siehe auch Brooks et al., 2016.

337 Tina Baier (2020) Netzwerker im Wald, Süddeutsche Zeitung 20.10.2020.

338 Beiler, 2010.

339 Cheng et al., 2019.

Ein besonders große Rolle spielt die Zusammenarbeit von »festen freien« Symbionten bei Korallen. Wie bereits dargestellt, handelt es sich dabei um komplexe zusammengesetzte Organismen, bei denen Mehrzeller (der eigentliche Körper der Korallen oder auch die Polypen) in Symbiose mit Algen und anderen Mikroorganismen wie Bakterien und Archaeen zusammenleben, die die Stoffe produzieren, die für die Korallen zum Leben und Überleben notwendig sind. Rosenberg und Zilber-Rosenberg beschreiben, wie die Symbiosen zur genetischen Vielfalt der Korallensysteme und ihrer evolutionären Entwicklung beitragen.³⁴⁰ Demnach kann sich die Zusammensetzung der assoziierten Mikroorganismen unter geänderten Umweltbedingungen spontan verändern und so innerhalb gewisser Grenzen auch die Anpassung der Korallen an den Klimawandel unterstützen. Gerade angesichts des Sterbens der Korallenriffe wird aber auch die Überforderung der biologischen Systeme sichtbar: Das Leben kann das Problem des vom Menschen gemachten raschen Klimawandels nur eingeschränkt kompensieren. Wie viele Arten dies überleben können und wie groß die Verluste an biologischer Vielfalt sein werden, hängt entscheidend davon ab, ob wir es schaffen, den Klimawandel zu bremsen.

Die Forschung der letzten Jahrzehnte zeigt also die Bedeutung der verschiedenen Kooperationsarten und Patchworkformen des Lebens wie Symbiosen, Symbionten und Endosymbionten immer deutlicher. Organismen und Zellen sind in ihren Bestandteilen ein Kompositum aus Zellkernen, Mitochondrien, Chloroplasten, Geißeln. Jenseits dieser in Fusionen fixierten Kombinationen bieten flexible Kooperationen zwischen Einzellern und Mehrzellern eine Erweiterung der Aktionsspielräume, um zu überdauern und sich zu entwickeln.

Bei *Holobionten* und ihrem *Hologenom* potenziert das »gemeinsame« Erbgut, das über die verschiedenen Arten verteilt ist, die Möglichkeiten, Probleme zu lösen, und kann dabei auch je nach Bedarf auf wechselnde Kooperationen setzen. Die Kommunikation, der Austausch von Information innerhalb des Netzwerkes der Holobionten, spielt dabei eine entscheidende Rolle und zeigt, wie komplex und passgenau die Interaktionen

340 Rosenberg/Zilber-Rosenberg, 2016.

zwischen den verschiedenen Lebensformen sind. Die unterschiedlichen Formen der Biologischen Intelligenz sind wesentliche Treiber der Evolution und auch die Grundlage für zukünftige Anpassungsvorgänge.

Kommunikation

Wie beschrieben, kann das Mikrobiom als ein gemeinsames Netz des Lebens verstanden werden, das alles umgibt und in engem Austausch mit Pflanzen, Tieren und Menschen steht. Dieses Netzwerk entwickelt sich gemeinsam durch Koevolution und steht in wechselseitiger Beziehung, die für beide Seiten Vorteile bedeutet. Das Mikrobiom ist ein Vermittler zwischen organischer und anorganischer Welt und nimmt eine Schlüsselfunktion für die Gesundheit von Mensch Tier und Pflanze ein. Die Organismen, die in diesem Netz verbunden sind, tauschen keineswegs nur Nährstoffe aus, sondern jede Menge Informationen, kleine biologisch aktive Moleküle wie volatile Botenstoffe, die auf biochemische Rezeptoren wirken. Dazu gehören die Lockstoffe von Blüten oder Signalstoffe, die über die Luft oder auch über Flüssigkeiten, über einzelne Tropfen oder das Wasser von Seen, Flüssen und Meeren ausgetauscht werden. So finden sich nicht nur kooperierende Partner, sondern auch Opfer und Beute. Dazu dienen passgenaue Moleküle, die oft direkt auf die Neuronen der Empfänger wirken und Wechselwirkungen auslösen, die für das Netzwerk in seiner Gesamtheit entscheidend sind: eine Sprache zwischen den Arten, die ohne Wörter und Bedeutungen auskommt und auf der Struktur von Molekülen beruht, die über Jahrtausende der Evolution geformt und in ihrer Information definiert wurden. Dazu gehören unter anderem auch pflanzliche Hormone wie *Strigolactone*, die von den Pflanzen dazu verwendet werden, um das Netzwerk der Mykorrhiza an die Wurzeln zu binden, das umgekehrt auch von Pflanzenparasiten genutzt werden kann, um sich über die Wurzeln in den Pflanzen einzunisten.³⁴¹ Die komplexen Interaktionen mit den Bodenorganismen verändern die Transkription der Gene, die Produktion der Proteine und von Phytohormonen in den Pflan-

341 Akiyama et al., 2010; siehe auch Foo et al., 2019.

zen und tragen über die epigenetische Prägung auch erheblich zur Immunantwort von Pflanzen bei.³⁴²

Bei der Erforschung dieser Zusammenhänge wurde in den letzten Jahrzehnten immer klarer, dass es auch biologisch aktive Moleküle gibt, die zwischen den Arten ausgetauscht werden und nicht über Rezeptoren auf den Zellen wirken, sondern in die Zellen gelangen und direkt in deren Genregulation eingreifen können: kleine, oft doppelsträngige RNA-Moleküle, die nicht für Proteine codieren und deswegen als *non-coding* RNAs (ncRNAs) zusammengefasst werden und über die Mechanismen der RNA Interferenz wirken können (RNAi). Entdeckt wurden diese Moleküle bei Experimenten an Fadenwürmern (Nematoden).³⁴³ Man fand so heraus, wie die Würmer die Aktivität ihrer Gene über RNAi-Prozesse steuern. Damit hatte man wichtige regulatorische Faktoren identifiziert, die auch bei Pflanzen und Säugetieren (Menschen) entscheidend für die Regulation der Gene sind und unter anderem während der Embryogenese eine zentrale Rolle spielen (siehe Kapitel 4). RNA ist aber auch in der Kommunikation zwischen Organismen und über die Artgrenzen hinaus ein wichtiger Faktor: Die Fadenwürmer nehmen die ncRNA aus ihrer Umwelt auf, und auch diese externe RNA wirkt sich auf die Genaktivität der Würmer aus: Zum Beispiel können sich Pflanzen so gegen Wurzelbefall durch Nematoden wehren. Damit entdeckte man zuvor völlig unbekannte Kommunikationswege, die nicht nur zwischen den Arten, sondern auch über die sogenannten Domänen (Bakterien, Archaeen, Eukaryoten) hinaus funktionieren.³⁴⁴ Die verschiedenen Domänen des Lebens sind phylogenetisch weit voneinander entfernt. Sie teilen aber nicht nur die gleiche Form der Speicherung von Information (DNA), sondern auch gemeinsame Moleküle für deren Austausch (RNA). Dank ihrer gemeinsamen Herkunft aus »der Urzelle« können sie auch als stark unterschiedliche Lebensformen weiterhin Informationen austauschen, die eine wechselsei-

342 Alonso et al., 2019.

343 Fire et al., 1998.

344 Zhou et al., 2017.

tige Beeinflussung von Verhaltensweisen, Entwicklung und Überlebensfähigkeit ermöglichen.

Die Mechanismen und Moleküle, die im Körper zwischen den Zellen als Mittel der Regulierung dienen, finden sich also auch in der Umwelt als Mittel der Kommunikation zwischen den Organismen. Dabei kann sie auch zwischen den Individuen innerhalb der Art ausgetauscht werden: ncRNA wird beispielsweise über die Muttermilch an die Nachkommen verabreicht. Welche Funktion sie dabei genau erfüllt, ist nicht ganz geklärt.³⁴⁵ Aber die RNA-Sprache funktioniert eben nicht nur innerhalb der Arten: Pflanzen geben über ihre Wurzeln ncRNA ab, die auf ihre assoziierten Mikroben einwirken. Umgekehrt können Pflanzenparasiten und andere Pflanzenschädlinge damit auch ihre Wirte manipulieren.³⁴⁶ Pflanzliche ncRNA, die über das Futter an Bienenlarven verfüttert wird, soll deren Entwicklung zu Arbeiterinnen beeinflussen.³⁴⁷ Aus einem anderen Forschungsprojekt geht hervor, dass Bienen über den Darm bestimmte ncRNA aus Pflanzen aufnehmen können, die dann wiederum in die Genregulation der Bienen eingreifen können.³⁴⁸ Erforscht wurden die miRNA von Sonnenblumen und einer Ziziphus-Art (*Ziziphus spina-christi*). Es fanden sich elf RNA-Moleküle, die mit der Aktivität von Dutzenden von Bienengenen interferieren können. Diese betreffen wichtige Lebensfunktionen wie das Erkundungsverhalten und die Entwicklung der Brut. Ähnliche Mechanismen könnten auch bei vielen anderen Insektenarten (und nicht nur dort) eine Rolle spielen, wurden bisher aber nicht erforscht. Es zeigt sich, dass die Interaktionen zwischen Tieren und Pflanzen wesentlich komplexer sind als bisher bekannt. Die WissenschaftlerInnen schreiben: »In summary, these results provide evidence of cross-species regulation function of miRNA between honeybee and flowering host plants, exten-

345 Siehe auch Davalos et al., 2019.

346 Westwood/Kim, 2017; Weiberg et al., 2013.

347 Zhu et al., 2017; Han/Luan, 2015.

348 Gharehdaghi et al., 2021.

ding our understanding of the molecular interactions between plants and animals.«³⁴⁹

So herrscht unter anderem im Darm ein beständiger Austausch von Informationen, der auf die Genregulierung der beteiligten Akteure einwirkt: ncRNA, die von den Darmzellen produziert wird, beeinflusst die Genregulation der Darmmikroben und Darmparasiten und damit ihre Vermehrung und Stoffwechselfunktionen. Aber auch umgekehrt greift ncRNA, die von Mikroben und Parasiten im Darm oder im Blut produziert wird, in die Genregulation von Tieren und Menschen ein.³⁵⁰

Diese artübergreifenden Wechselwirkungen sollen auch für Anwendungen in der Gentechnik genutzt werden: Pflanzen wurden per Gentechnik dazu gebracht, ncRNA zu produzieren, die auf die Larven des Wurzelbohrers (eine Käferart) toxisch wirken: Diese im Boden lebenden Larven richten im Maisanbau erheblichen Schaden an. Sie nehmen beim Fressen an den Wurzeln der Pflanzen auch die zusätzliche, gentechnisch veränderte RNA auf und sollen in ihrer weiteren Entwicklung gehemmt werden.³⁵¹ In Versuchen an Bienen wurden deren Darmbakterien dazu gebracht, ncRNA zu produzieren, die dann in die Lymphe der Insekten gelangt, von dort bis ins Gehirn transportiert wird und somit das Verhalten der Bienen beeinflussen kann. In weiteren Experimenten produzierten die gentechnisch veränderten Darmbakterien ncRNA, die von Parasiten wie der Varroa-Milbe zusammen mit der Lymphe der Bienen aufgenommen werden und die dann diese Parasiten über RNAi dezimieren soll.³⁵² Auch bei Säugetieren wurden bereits Experimente mit gentechnisch veränderten Bakterien und Hefen durchgeführt, die im Darm ncRNA produzieren, die in die Körperzellen aufgenommen werden kann und u. a. im Rahmen medizinischer Anwendungen ihre Wirkung entfalten soll.³⁵³

349 Gharehdaghi et al., 2021.

350 Weiberg et al., 2015; Buck et al., 2014; LaMonte et al., 2012.

351 Bachmann et al., 2013.

352 Leonard et al., 2020.

353 Xu et al., 2016; Zhang et al., 2014.

Im Detail: Aus der Welt der *non-coding* RNAs

Die Vielfalt der *non-coding* (nc) RNA-Moleküle ist extrem. Je nach Ort der Genese und Wirkungsweise durchlaufen sie unterschiedliche komplexe Prozesse der Entstehung, der Wirkungsentfaltung und des Abbaus. Viele Forschungsarbeiten versuchen, Ordnung und Übersicht in diese unglaublich ausdifferenzierten Moleküle und ihre fein austarier-ten Funktionen zu bringen. Hier ein kurzer Überblick:³⁵⁴

Je nach ihrer Entstehung (Biogenese) und Wirkungsweise unter-scheidet man mehrere Arten von ncRNA, die oft als doppelsträngi-ges Molekül vorliegen: U.a. unterscheidet man miRNA (microRNA) und siRNA (*short interfering* RNA). Während Aufbau und Funktion der miRNA von ihrer genetischen Vorlage (DNA) dominiert werden, sind siRNAs in ihrem Aufbau und Funktion unbestimmter, diese hängen ganz wesentlich von der Bearbeitung durch weitere Enzyme ab. Neben die-sen Gruppen gibt es aber auch noch andere Moleküle, wie zum Beispiel besonders lange oder ringförmige ncRNA.

Damit ncRNAs ihre Wirkung entfalten können, sind u.a. zwei Grup-pen von Enzymen wichtig: DICER-Enzyme schneiden die RNA-Stücke so, dass sie ihre spezifische biologische Struktur erhalten, Argonauten-enzyme sorgen dann dafür, dass die RNA an ihrem Zielort in den Zellen wirksam werden kann. Dabei greift die ncRNA so in die Genregulierung ein, dass bestimmte Gene nicht in Proteine oder andere RNA-Moleküle umgesetzt werden können, oder sie sorgen dafür, dass bereits vorhan-dene »Genprodukte« wieder abgebaut werden. Der Grundmechanismus beruht dabei auf einer Paarung der RNA-Moleküle mit ihren passenden Zielmolekülen, die aus DNA oder RNA bestehen können. Dadurch wer-den die Zielmoleküle in ihrer Funktion blockiert oder so verändert, dass sie rascher abgebaut werden. So kann die Funktion von Genen blockiert werden, was dazu führt, dass in der Folge auch die Wirkung anderer Gene verstärkt oder verringert werden kann.

Diese Mechanismen sind bei Pflanzen, Insekten und Säugetieren ähn-lich, weisen aber auch Unterschiede auf. So können ncRNA-Moleküle bei

354 Angelehnt an Davalos et al., 2019.

Pflanzen im Laufe ihrer Entstehung durch mehrstufige Prozesse stärker in ihrer Struktur und Funktion verändert werden, als dies bei Säugetieren der Fall ist. Zudem weisen miRNAs bei Pflanzen oft biochemische Veränderungen auf (*Methylierung*), die sie gegen raschen Abbau schützen können.

Allen Prozessen der RNAi ist aber gemeinsam, dass sie auf passgenauen Strukturen beruhen, Übereinstimmungen in der Struktur der ncRNA und ihrer Zielsequenz auf der Ebene der RNA oder DNA. Auf diesem einfachen Mechanismus beruht ein universeller Austausch von Information, Kommunikation und wechselseitiger Beeinflussung der Lebensformen, der uns ständig umgibt, der uns aber bis vor wenigen Jahren verborgen geblieben ist und bis heute längst nicht in allen Details erforscht und verstanden ist.

Passgenaue Übereinstimmungen von Molekülen und Rezeptoren finden sich beispielsweise oft zwischen Pflanzen und Tieren. Einzelne pflanzliche Moleküle könnten sogar in Dutzende von Stoffwechselabläufe im menschlichen Körper eingreifen. Heil- und Nahrungspflanzen und deren miRNA werden konkrete therapeutische Effekte u. a. bei Tumorerkrankungen, Stoffwechselstörungen, viralen Infektionen, Entzündungsprozessen und Immunreaktionen zugeschrieben.³⁵⁵ Welche biologischen Wirkungen sich aber tatsächlich ergeben, ist oft noch unklar. So findet sich in Brokkoli eine spezifische ncRNA (*miR-159*), die das Wachstum von Brustkrebszellen hemmen sollen. In chinesischen Arzneimitteln (Honeysuckle, Geißblatt) wurde ncRNA (*miR-2911*) entdeckt, die besonders gut gegen einen Abbau im Darm geschützt scheint und zu den medizinischen Wirkungen der Pflanzen beitragen könnte. Die *miR-168a*, die in vielen Nahrungspflanzen enthalten ist, könnte antidiabetisch wirken. Viele dieser RNAs überstehen die Zubereitung von Lebensmitteln und Arzneipflanzen (Verarbeitung, Kochen, Aufbewahrung).

Die Barrieren zwischen den Zellen, zwischen Darm und Organen sind normalerweise hoch: Nur bestimmte Stoffe können hier passieren. Des-

355 Li et al., 2021.

wegen nahm man längere Zeit an, dass ncRNA kaum den Weg von der Pflanze in die Zellen von Mensch und Tier finden würde. Dabei stützte man sich u. a. auf Versuche mit synthetischer RNA, die »nackt« verabreicht wurde und in dieser isolierten Form rasch abgebaut wird. Doch inzwischen sind mehrere Mechanismen beschrieben, die helfen können, die Barrieren zu überwinden: Wie bereits mitgeteilt, ist pflanzliche ncRNA durch biochemische Veränderungen (Methylierung) besonders gegen Abbau geschützt. Zudem enthalten pflanzliche Zellen Nanopartikel, die von den Zellen aufgenommen werden können, ohne sich dabei zu verändern, und als »Fähre« für RNA (und andere biologisch wirksame Moleküle) dienen. Tatsächlich fanden sich bei mehreren Untersuchungen vielfältige ncRNA aus Pflanzen im Blut von Tieren und Menschen, ohne dass immer ganz klar ist, wie diese tatsächlich aufgenommen wurde.

Ein wichtiger Mechanismus, den Moleküle wie ncRNA nutzen können, um von Zelle zu Zelle zu gelangen, sind kleine Vesikel (Exsomen), Bläschen, die u. a. aus Bestandteilen der Zellwände gebildet werden und die Moleküle umschließen, sie zugleich schützen und so von anderen Zellen wieder aufgenommen werden können. Derartige Vesikel finden sich überall in Flüssigkeiten zwischen den Zellen, in Blut, Lymphe, Milch. Es ist bekannt, dass ncRNA und andere biologisch aktive Stoffe so ganz generell und in großem Maßstab zur Kommunikation zwischen den Zellen beitragen: Im Fall von Viruserkrankungen können sie dazu beitragen, dass Zielgene von Viren deaktiviert werden. Immunzellen scheiden miRNA aus, um in das Wachstum von Krebszellen einzugreifen. Und bei neuronalen Erkrankungen finden sich bestimmte miRNAs, die über Exosomen ausgeschieden werden (und auch Prionen, die an degenerativen neuronalen Prozessen beteiligt sind), in den Vesikeln. Gleichzeitig dienen Vesikel auch dem Austausch von Informationen bzw. biologisch aktiven Molekülen zwischen einzelligen Lebewesen wie dem Gentransfer (s. o.).

Innerhalb der Organismen kann die ncRNA über weite Distanzen zwischen den Zellen »reisen«. In Pflanzen scheint es dafür sogar besondere Mechanismen zu geben: Wird bestimmte ncRNA in den Wurzeln gebildet, kann sie bis in die Blüten gelangen. Dabei wird sie nicht unbedingt

von Zelle zu Zelle transportiert, sondern, angeregt über Signalkaskaden, in den entsprechenden Zellen neu gebildet. Zudem stehen Pflanzen über ihre Wurzeln und deren Netzwerk von Bodenorganismen (Mykorrhiza) in ständigem Austausch mit anderen Pflanzen und erhalten so u. a. Informationen über Schädlinge und Veränderungen der Umwelt, bevor sie selbst davon betroffen sind.

Zwischen Mensch, Tier und Pflanze spielen die Darmmikroben eine Schlüsselrolle bei der Weitergabe der Moleküle: Sie zersetzen die Pflanzenzellen, in denen die ncRNA in hohen Konzentrationen vorhanden ist, und vermitteln den Stoffaustausch mit Blut und Organen. Die Aufnahme von ncRNA aus Pflanzen durch Darmbakterien beeinflusst die Zusammensetzung der Darmflora und deren Wirkung auf den Körper.³⁵⁶ Damit ergeben sich neue Perspektiven für die Ernährung und deren Auswirkungen auf den Körper von Tier und Mensch: Unsere Gesundheit und unser Verhalten werden von der eigenen Darmflora beeinflusst. Dabei erhält unser Mikrobiom über die Nahrung und über Kontakt mit anderen Mikrobiomen auch ständig neue Informationen aus der Umwelt und gibt diese an uns weiter. Dieses Dreieck von Nahrung, Mikrobiom und Umwelt ist komplex und für das Verständnis von Gesundheit, Nahrung und Umwelt entscheidend.³⁵⁷

Die Kommunikation und die Kooperation in der Welt der Holobionten sind erstaunlich vielfältig.

Und trotz dieser Vielfalt herrscht kein Wirrwarr von Sprachen wie beim »Turmbau zu Babel«, sondern ein zielgenauer Austausch, der lebenserhaltende Kooperation und die weitere Koevolution ermöglicht. Je größer die Komplexität, desto größer die Synergien und die Optionen, um Probleme zu lösen und sich weiterzuentwickeln. Die Grundlage für diese »Ordnung« des Lebendigen ist der gemeinsame Ursprung. Es sind sozusagen die Urzellen, deren Nachkommen sich in einem kontinuierlichen Informationsaustausch befinden und deren unterschiedliche Lebensfor-

356 Teng et al., 2018.

357 Spinler et al., 2018.

men nicht nur miteinander im Wettstreit stehen, sondern auch passgenau kooperieren, kommunizieren und gemeinsam »lernen«. Dabei wächst ihre Problemlösungskompetenz und die der belebten Natur inhärente Biologische Intelligenz in ihrer Gesamtheit.

Was bedeutet diese neu entdeckte enge Vernetzung der biologischen Vielfalt mit ihrer Umwelt für unseren Umgang mit den Grundlagen des Lebens? Im 20. Jahrhundert hatte man gehofft, mit der Entdeckung der DNA alle Fragen der Biologie beantworten zu können. Zwar hat die Entschlüsselung des genetischen Codes tatsächlich einen Quantensprung unseres Verständnisses der Natur ermöglicht. Aber die DNA ist eben kein Herrschaftsmolekül, das alle anderen Prozesse steuert, wie man zunächst dachte. Sie steht nicht über der Komplexität des Lebens, sondern ist ein Teil von ihr. Die Vielfalt der belebten Natur und die Lebensvorgänge der Organismen können nicht auf die Ebene der DNA reduziert bzw. auf dieser Ebene verstanden werden. Ähnlich passgenau, wie die Abläufe in der Zelle organisiert sind, gibt es auch eine genau orchestrierte Kooperation und Kommunikation zwischen den Organismen und ihrer Umwelt. Eines baut auf dem anderen auf. Obwohl sich bestimmte Abläufe in der Evolution auch wiederholen können,³⁵⁸ ist die künftige Entwicklung in ihrer Gesamtheit aber nur sehr begrenzt aus der bisherigen Erfahrung oder aus den einzelnen Bestandteilen der biologischen Systeme ableitbar.

Stanislaw Lem beschreibt in seinem Science-Fiction-Klassiker »Solaris« (1968) einen Planeten, der um zwei Sonnen kreist, eine rote und eine blaue. Seine Beschreibung des Planeten und seiner Sonnen erinnert an die Art und Weise, wie Organismen und ihre Umwelt sich gegenseitig in ihrer Entwicklung beeinflussen.³⁵⁹ Der Planet kann entgegen aller physikalischen Gesetzmäßigkeiten seine Bahn zwischen den beiden Sonnen stabil halten. Offensichtlich vollbringt der Ozean die beständigen Kurskorrekturen. Die WissenschaftlerInnen finden bald heraus, dass diese Kurskorrekturen nicht auf Zufall beruhen können. Der Planet steuert seine Bahn aktiv. Möglicherweise verfügt der Ozean über eine Art Bewusstsein. Er

358 Siehe bspw. Shubin, 2021.

359 Siehe auch Then, 2008.

schafft ganze Welten in emporsteigenden Materieknospen, sogenannte Symmetriaden.

»Wir beobachten einen Krümel des Prozesses, das Beben einer einzigen Saite in einem Symphonieorchester von Super-Riesen, und nicht genug damit, wir wissen – aber wir wissen nur, ohne zu begreifen –, dass gleichzeitig über und unter uns, in gestreckten Abgründen, außerhalb der Grenzen unseres Blicks und unserer Vorstellungskraft Unmengen, Millionen simultaner Umgestaltungen vor sich gehen, wie Noten miteinander verbunden durch den mathematischen Kontrapunkt. (...) Um hier irgend etwas wirklich zu sehen, müsste man weglaufen, in irgendeine ungeheure Ferne zurücktreten – aber in der Symmetriade ist ja alles Innenraum, Vermehrung, die Lawinen von Geburten auswirft, unaufhörliche Gestaltung, wobei die Gestaltung zugleich das Gestaltende ist. (...) Jede Augenblickskonstruktion mit ihrer Schönheit, die sich jenseits der Grenzen des Blicks vollendet, ist hier Mitkonstrukteur und Dirigent aller anderen, die gleichzeitig geschehen; diese wiederum wirken modellierend an jener mit. Eine Symphonie – gut, aber eine, die sich selbst schafft ...«³⁶⁰

360 Lem, 2006, Seite 161/162.

Die Neue Gentechnik, Instrumente wie die Genschere CRISPR/Cas und die künstliche Synthese von Genen eröffnen die Möglichkeit zur radikalen Veränderung des Erbguts und tiefe Eingriffe in die biologische Vielfalt. Parallel zur Entstehung der neuen Technologien müssen wir auch unser Verhältnis zur Natur neu denken. Ein Schlüsselbegriff für die Bestimmung eines neuen Verhältnisses zwischen Mensch und Natur kann der Begriff »Biologische Intelligenz« (BI) werden, der hier erstmals im Zusammenhang mit Evolution, Artenschutz und Gentechnik eingehender diskutiert wird.

Christoph Then informiert über die Fakten und Hintergründe und regt eine kritische und informierte Auseinandersetzung mit der Gen- und Biotechnologie an. Er plädiert für wesentlich höhere Schutzstandards im Umgang mit den Grundlagen des Lebens. In diesem Zusammenhang schlägt er einen neuen Naturvertrag vor, der gentechnischen Eingriffen in die biologische Vielfalt klare Grenzen setzen soll.

Christoph Then ist Geschäftsführer von Testbiotech e. V., einem unabhängigen Institut für Folgenabschätzung von Gen- und Biotechnologie. Testbiotech bewertet die verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse aus der Perspektive des Schutzes von Mensch, Umwelt und Natur.