



Rouven Marian  
Metternich

# Panta Rhei

Eine Reise auf dem Fluss der Evolution

Dr. rer. nat. Rouven Marian Metternich

Panta Rhei



Dr. rer. nat. Rouven Marian Metternich

# **Panta Rhei**

Eine Reise auf dem Fluss der Evolution

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische  
Daten sind im Internet über <http://dnd.d-nb.de> abrufbar

wbg Academic ist ein Imprint der wbg  
© 2021 by wbg (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), Darmstadt  
Die Herausgabe des Werkes wurde durch die  
Vereinsmitglieder der wbg ermöglicht.  
Satz und eBook: Satzweiss.com Print, Web, Software GmbH  
Umschlagsabbildung: akg-images / Pictures From History  
Gedruckt auf säurefreiem und  
alterungsbeständigem Papier  
Printed in Germany

Besuchen Sie uns im Internet: [www.wbg-wissenverbindet.de](http://www.wbg-wissenverbindet.de)

ISBN 978-3-534-40627-2

Elektronisch ist folgende Ausgabe erhältlich:  
eBook (PDF): 978-3-534-40628-9

# Inhaltsverzeichnis

(R)evolutionäre Gedanken .....	11
Raum und Zeit .....	17
Raum – Gene und Genome .....	25
DNS, Molekül des Lebens .....	25
DNS versus RNS.....	29
Von einer RNS- zu einer DNS-Welt .....	30
Das Gen, Grundbaustein des Lebens .....	33
Der Promotor, Komplexität durch Regulation .....	35
Transkriptionsfaktoren und ihr Beitrag zur Evolution .....	39
Die erste Blüte .....	45
Die Intelligenz der Tintenfische.....	46
Eine zelluläre Sinfonie.....	48
Exons und Introns – neue Wege für die Evolution .....	49
Gene als „lebende“ Mosaik .....	54
Die vielfältigen Aufgaben der Introns .....	57
Der Ursprung der Introns oder die Endosymbiontentheorie .....	60
Der Ursprung unserer Komplexität .....	62
Auf das Ende kommt es an!.....	68
Als die Chemie sprechen lernte – Der lange Weg vom Gen zum Protein .....	70
Wie aus Genen Proteine werden.....	71
Ribosomen, Übersetzer der molekularen Sprachen .....	74
Die Geschichte von der Erfindung der Proteine .....	77
Das Ur-Genom .....	80
Die Alchemie des Lebens, aus „unbelebt“ mach „belebt“.....	81
Der kosmische Ursprung unserer „Selbst“ .....	83
Von der Chemie zur Biologie .....	85
Unser aller Vorfahr.....	89
Genomische Ökosysteme und ihre Regulation .....	92
Die Ökosysteme in uns.....	93
Mehr als nur Schrott.....	94
Nicht codierende RNS (ncRNA).....	95

Lange nicht codierende RNS .....	96
microRNS, molekularer Zwerg, aber evolutionärer Riese .....	98
Viren und die Evolution .....	101
Pseudogene, die Untoten in unseren Genomen .....	104
Genome, dreidimensionale Ökosysteme .....	106
Der epigenetische Faktor .....	109
Die funktionellen Einheiten unseres Genoms .....	114
Zeit für eine Zeitreise .....	118
Zeit – Der Fluss des Lebens .....	119
Ära: Neoproterozoikum .....	124
Periode: Cryogenium, eine kalte Geburt (720–635 Millionen Jahre) .....	124
Periode: Ediacarium, der Garten Eden (635–541 Millionen Jahre) .....	127
Eine Reise ins Ediacarium .....	129
Die ersten Tiere .....	131
Der verwüstete Garten .....	134
Ära: Paläozoikum .....	136
Periode: Kambrium, die Waffenkammer der Evolution wird geöffnet (541–485,5 Millionen Jahre) .....	136
Die Panzer einer feindseligen Welt .....	137
Eine Reise ins Kambrium .....	140
Hox-Gene, der genetische Zündstoff hinter der „kambrischen Explosion“ .....	146
Periode: Ordovizium, das Leben explodiert erneut (485,4–443,4 Millionen Jahre) .....	152
Die neuen Herrscher der Meere .....	154
Die ersten Panzer unserer Ahnen .....	156
Eine Reise ins Ordovizium .....	156
Die Vervielfachung unserer Gene .....	163
Periode: Silur, das Fundament der Moderne (443,4–419,2 Millionen Jahre) .....	166
Die neuen, alten Herrscher und die ersten Schritte an Land .....	167
Das erste „Gesicht der Erdgeschichte“ .....	169
Eine Reise ins Silur .....	172
Das Fundament unserer Welt .....	177
Periode: Devon, die Kolonisierung des Landes (419,2–358,9 Millionen Jahre) .....	179
Die ersten Wälder .....	181
Die neuen Herrscher einer neuen Zeit .....	182
Der lange Marsch an Land .....	184

Eine Reise ins Devon .....	191
Ein schreckliches Finale.....	197
Periode: Karbon, das Leben kehrt zurück (358,9–298,9 Millionen Jahre) .....	198
Die legendären Wälder des Karbons.....	200
Eine neue Blütezeit der Gliederfüßer.....	201
Die Eroberung des Landes geht weiter.....	203
Aus Amphibien werden Reptilien .....	205
Eine Reise ins Karbon.....	206
Die frühe Aufspaltung der Reptilien.....	212
Periode: Perm, das erste Zeitalter der Reptilien (298,9–251,9 Millionen Jahre).....	214
Die Dominanz der Reptilien .....	216
Der lange Marsch zu den ersten Säugetieren.....	218
Die innere Wärme unserer Vorfahren.....	220
Eine Reise ins Perm.....	223
Das Große Sterben .....	229
Ära: Mesozoikum .....	231
Periode: Trias, Kampf um die neue Welt (251,9–201,9 Millionen Jahre).....	231
Zurück in die Weiten der Meere.....	233
Der umkämpfte Thron Pangäas.....	237
Die Ursprünge des Stillens.....	242
Eine Reise in die Trias .....	244
Eine Katastrophe mit weitreichenden Folgen.....	251
Periode: Jura, das Zeitalter der Giganten (201,9–145 Millionen Jahre).....	253
Unruhige Meere .....	255
Das Zeitalter der Dinosaurier.....	258
Gefiederte Raubtiere .....	261
Viren und die ersten echten Säugetiere .....	264
Eine Reise in die Jurazeit.....	269
Ein Ende, das eigentlich keines ist.....	276
Periode: Kreide, der Höhepunkt einer Herrschaft (145–66 Millionen Jahre).....	276
Die neuen Meere.....	278
Die uneingeschränkten Herrscher (Pflanzenfresser).....	280
Die uneingeschränkten Herrscher (Fleischfresser) .....	283
Der Ursprung unserer Vielfalt .....	289
Eine Reise in die Kreidezeit .....	291
Das abrupte Ende einer goldenen Ära .....	298
Ära: Känozoikum .....	300

Periode: Paläogen, eine neue Weltordnung (66–23,03 Millionen Jahre) .....	300
Der mühsame Weg an die Macht .....	302
Vom gehenden Wal zu den Riesen der Ozeane .....	303
Von winzigen Überlebenden zu den neuen Herrschern der Welt .....	306
Primaten: Ein Leben in den Bäumen .....	308
Eine bunte Welt .....	309
Eine Reise ins Paläogen .....	312
Die Reise geht weiter .....	318
Periode: Neogen, eine Welt des Überflusses (23,03–2,58 Millionen Jahre) .....	319
Die neuen Herrscher der Meere .....	320
Die Riesen einer neuen Zeit .....	321
Der Weg zum modernen Menschen .....	324
Eine Reise ins Neogen .....	327
Das Finale einer langen Reise .....	333
Periode: Quartär, auf Gedeih und Verderb (2,58 Millionen Jahre bis heute) .....	334
Die letzten Riesen .....	336
Der moderne Mensch .....	337
Das sechste große Sterben .....	338
Epilog, der Blick zurück nach vorn .....	347
Quellen .....	351
Einleitung – (R)evolutionäre Gedanken .....	351
Raum – Gene und Genome .....	351
Zeit – Der Fluss des Lebens .....	354
Ediacarium .....	354
Kambrium .....	354
Ordovizium .....	355
Silur .....	355
Devon .....	355
Karbon .....	356
Perm .....	356
Trias .....	356
Jura .....	357
Kreide .....	357
Paläogen .....	358

Neogen .....	359
Quartär .....	359

Ich widme dieses Buch meiner geliebten Frau Stefanie und unseren zwei wundervollen Töchtern, auf das sie niemals vergessen, das auch sie ein Teil des grandiosesten Schauspiels im Universum sind: dem Leben.

# (R)evolutionäre Gedanken

Evolution, dieses Wort kennen wir wohl alle und es kann vermutlich auch jeder etwas zu diesem Thema sagen. Das Wort „Evolution“ begleitet die meisten von uns schon seit der Schulzeit. Es ist mit bestimmten bildlichen Darstellungen verknüpft, die sich sofort in unser Bewusstsein schleichen, sobald wir dieses Wort hören. Vermutlich denkt der überwiegende Teil der Menschen gleich an die berühmte Darstellung der Menschheitsentwicklung, in der man in mehreren Etappen die schrittweise Entwicklung von einem gebückt laufenden Primaten hin zum aufrecht gehenden *Homo sapiens sapiens* (dem modernen Menschen) verfolgen kann. Die nächste starke Assoziation mit dem Thema Evolution ist die mit dem Gesicht eines alten Mannes – Charles Robert Darwin, der in der Öffentlichkeit zwar bekannteste Entdecker des evolutiven Charakters der Natur, allerdings nicht der alleinige. Auch ich erinnere mich, wie ich als Kind zu Weihnachten Darwins Buch über „Die Entstehung der Arten“ geschenkt bekam und wie ich mich zum ersten Mal mit der Veränderlichkeit und Anpassungsfähigkeit des Lebens beschäftigte. Bis heute lässt mich das Thema nicht los, sonst hätte ich nicht Biologie studiert und würde auch nicht an diesem Buch arbeiten.

Doch was hat mich dazu veranlasst, dieses Buch zu schreiben? Es war nicht der Mangel an Büchern zum Thema Evolution, sondern der Fakt, dass viele Bücher sich nur mit bestimmten Teilgebieten innerhalb der Evolutionsbiologie beschäftigen, wodurch meiner Meinung nach das große Ganze verloren geht. Viele dieser Bücher richten sich zudem vor allem an ein Fachpublikum und sind teilweise nicht mal für interessierte Laien verständlich geschrieben. Mit diesem Buch möchte ich versuchen, diese in der ersten Linie sprachliche Barriere zu überwinden. Schließlich wählt man durch die Sprache, die man nutzt, auch gleichzeitig, ob bewusst oder unbewusst, sein Publikum aus. Es ist schade, dass die faszinierendsten naturwissenschaftlichen Erkenntnisse den meisten Menschen nicht zugänglich sind und das nur, weil sie in einer Sprache geschrieben werden, die einem wissenschaftlichen Elfenbeinturm entspringt. Auch die Welt der Wissenschaft ist nicht gegen Narzissmus immun: So wird zwar unser Bild von der belebten Natur immer detailreicher, weil ihm grandiose Wissenschaftler unablässig neue Puzzleteile hinzufügen, allerdings werden diese Puzzlestücke häufig nicht in ein Gesamtbild eingefügt und es zählt mehr, welcher Wissenschaftler oder welches Institut mehr Teile vor sich aufgehäuft hat. In diesem Buch möchte ich die wichtigsten Teilstücke zu einem großen Bild zusammenfügen, damit die Evolution und die durch sie erreichte Komplexität des Lebens auf der Erde anders wahrgenommen wird, als dies heute leider der Fall ist.

Ein Schritt hin zu einem besseren Verständnis der Evolution ist meiner Meinung nach der Weg über bildliche Darstellungen. Beispielsweise das Bild von einem durch die „Zeit“ fließenden Strom, der ausgehend von seiner Quelle seine Fließgeschwindigkeit aus verschiedenen Kräften speist. Eine dieser Kräfte ist die klassische, von Darwin im Groben beschriebene natürliche Selektion durch Mutation. Aber es gibt noch viele andere Kräfte, welche die Fließgeschwindigkeit dieses Stroms beeinflussen können, zum Beispiel Viren, nicht codierende DNS-Abschnitte wie Introns, Genduplikationen oder die Epigenetik. Obwohl man erst seit kurzer Zeit von diesen Prozessen und Akteuren weiß, kann man die Evolution aus heutiger Sicht ohne sie nicht mehr vollständig verstehen. Denn jegliche evolutive Veränderung eines Organismus, als Anpassung an seine Umwelt, die wir mit unseren Augen wahrnehmen können, egal ob es die Entwicklung des aufrechten Gangs von Mitgliedern der Art *Homo sapiens* ist oder das Auftreten von Schnäbeln bei Vögeln, sie alle gehen auf Veränderungen der genetischen Information zurück. Das Bild eines Flusses, der ausgehend von seiner Quelle immer weiter fließt und dabei stetig neue Seitenarme ausbildet, die sich ebenfalls weiter zu immer kleineren Flüssen verästeln, beschreibt das Wesen der Evolution recht gut. Auch die Evolution des Lebens auf der Erde ging von einem Punkt aus, der als Quelle allen Lebens verstanden werden kann, und floss von diesem Punkt an wie ein Fluss durch die Zeit. Auf ihrem Weg verästelte sich die Evolution immer weiter und schuf so stetig neue Arten, die sich ihrerseits zu neuen Arten und Unterarten weiterentwickelten oder einfach ausstarben. So wie ein Fluss sehr ruhige Abschnitte aufweist, in denen das Wasser durch ein breites sandiges Flussbett treibt, verlief auch die Evolution immer mal wieder sehr ruhig, ohne größere Veränderungen, die über das Hintergrundrauschen hinausgingen. Doch diese ruhigen Abschnitte wechselten sich immer wieder mit wilden Stromschnellen und tosenden Wasserfällen ab, in denen, im Zeitraffer der Evolution gesehen, in sehr kurzen Zeiträumen bahnbrechende Veränderungen stattfanden.

Ein anderes einprägsames Bild für die Evolution als Ganzes ist für mich persönlich das eines Buches, dessen verschiedene Kapitel die unterschiedlichen Triebkräfte darstellen. So gibt es ein Kapitel, das sich mit der stetig wirkenden Mutationsrate beschäftigt, also dem klassischen Darwinismus. Dieser besagt, dass die kontinuierliche Ansammlung kleiner Unterschiede (Mutationen) über Generationen hinweg einen Transformationsprozess auslöst, der die Vielfalt der lebendigen Welt erklären kann. Doch dank moderner Forschungsergebnisse wissen wir heute vieles, was Darwin aufgrund der Beschränktheit seiner Zeit noch nicht wissen konnte, nämlich dass das Buch der Evolution noch wesentlich mehr Kapitel beinhaltet. So gibt es ein Kapitel, in dem auch der Einfluss von Viren verdeutlicht wird. Diese genetischen Parasiten sind weithin nur als Krankheitserreger bekannt, doch ihr evolutives Potenzial wird gerade erst erkannt. So macht virale DNS nach heutigem Stand mindestens 5–8 % unseres gesamten humanen Genoms aus, während die DNS „unserer“ proteincodierenden Gene nur knapp 1,5 % ausmachen. Ein weiteres Kapitel beschäftigt sich mit der Duplikation von genetischer Infor-

mation. So haben sich zu unterschiedlichen Phasen der Evolutionsgeschichte einzelne Gene oder auch ganze Genome dupliziert (verdoppelt). Diese duplizierten Bereiche konnten so zu einer innovativen Spielwiese der Evolution werden, da die „Original-“Kopien nach wie vor im Genom vorhanden waren, um ihre Aufgaben zu erfüllen. Dadurch sank der Selektionsdruck auf diese neu entstandenen Areale beträchtlich und es wurde Platz geschaffen für das Auftreten von etwaigen Veränderungen (Mutationen). Heute geht man davon aus, dass auch das menschliche Genom zu 90 % aus duplizierten Bereichen hervorgegangen ist.

Ein weiteres wichtiges Kapitel im Buch der Evolution ist das der Epigenetik. Durch diese Steuerung der vorhandenen genetischen Elemente wird es der Evolution ermöglicht, gänzlich neue und nahezu unmöglich erscheinende Wege einzuschlagen. Ein schönes Beispiel hierfür ist der Lebenszyklus eines Schmetterlings. Seine Gene oder epigenetisch ausgedrückt, die Steuerung seiner Gene, ermöglicht es ihm, so verschiedene Gestalten anzunehmen wie eine Raupe und ein Schmetterling. Angenommen, es würden Außerirdische auf unserem Planeten landen und eine Bestandsaufnahme unserer Tier- und Pflanzenwelt vornehmen, sie würden mit nahezu 100%iger Wahrscheinlichkeit eine Raupe und einen Schmetterling zwei grundlegend anderen Spezies zuordnen, denn rein optisch sind nahezu keine Ähnlichkeiten zu erkennen. Doch greifen ihre Zellen auf die identische genetische Information zurück und nur durch einen Wechsel in der Steuerung dieser Gene wird es diesem Tier ermöglicht, zwei so unterschiedliche Gestalten anzunehmen. Dank der bahnbrechenden Erkenntnisse aus dem Bereich der Molekularbiologie besitzen wir heute die Möglichkeit, ungeahnte Einblicke in das Buch der Evolution zu erhaschen. Dadurch wird es uns möglich, mehr von den Abläufen der Evolution und über gleichwohl faszinierende wie unerwartete Verwandtschaftsverhältnisse zwischen den uns bekannten Lebewesen zu erfahren. Für die Evolution gilt das gleiche wie für jedes gute Buch, man kann es nur verstehen, wenn man alle Kapitel gelesen hat, nur so erschließt sich die Komplexität hinter dem Wort „Evolution“ tatsächlich.

In jedem Buch, das die Evolution zum Thema hat, sollte der Autor sich einer wichtigen Frage stellen: nämlich der nach der Schnittstelle zwischen der abstrakten „Kraft“, die wir als Evolution bezeichnen, und dem von uns wahrnehmbaren Teil der Natur, der als evolutiv selektierbar gelten kann. Über diese Fragestellung wird innerhalb der Biologie kontrovers diskutiert, da es insgesamt drei potenzielle Ebenen der Biologie gibt, die als selektierbar gelten können. Hierarchisch betrachtet gibt es die Gruppenselektion (auf Basis von Populationen), die Individualselektion (auf Basis von Individuen) und schließlich die Genselektion, welche die Gene selbst in den Fokus der Evolution stellt. Heute weiß man, dass Evolution ein schrittweiser, additiver Prozess ist, der auf die Veränderung des Erbmaterials eines Individuums angewiesen ist. Auch wenn mehrere Individuen einer biologischen Art sich zu Gruppen oder Populationen zusammenschließen können, so besitzen diese Gruppen jedoch keine biologische Individualität und stellen damit auch keine adäquaten Ansatzpunkte für einen evolutiven Prozess dar.

Stellen wir uns beispielsweise ein Rudel Löwen vor, das in der afrikanischen Savanne lebt und aus 20 verschiedenen Tieren besteht. Jedes dieser 20 Tiere innerhalb des Rudels unterscheidet sich genetisch betrachtet von jedem anderen, auch wenn sie nah genug miteinander verwandt sind, um sich paaren zu können und fruchtbaren Nachwuchs zu zeugen. Diese genetischen Unterschiede können sich sehr facettenreich manifestieren, zum Beispiel durch verschiedene Verhaltensweisen. So sind einige Löwen aggressiver oder mutiger, während wieder andere sich eher vorsichtig durch die Welt bewegen. Manche Löwen besitzen einen schnelleren Stoffwechsel oder sind einfach bessere Läufer als andere. Es sind gerade diese Unterschiede, die unser Löwenrudel vom Rennen um die kleinste evolutiv selektierbare biologische Einheit ausschließen. So ist es leicht sich vorzustellen, dass ein starker wie auch immer gearteter Selektionsdruck, zum Beispiel eine langanhaltende Dürre, einzelne Individuen innerhalb der Population begünstigen würde, während andere daran zugrunde gehen. Wenn wir das Bild von der Dürre gedanklich weitermalen, kann man davon ausgehen, dass verhältnismäßig kleine Individuen mit dieser Situation besser zurechtkommen als große. Denn die kleineren brauchen weniger Wasser und Nahrung und können vielleicht auch noch schneller rennen als die größeren, was sie mit Sicherheit zu erfolgreicheren Jägern macht. Gerade zu Zeiten von Dürren ist jeder einzelne Jagderfolg essenziell, nicht nur für das eigene Überleben, sondern auch für das Überleben der gesamten Population. Durch all diese Vorteile würden diese kleineren, erfolgreicherer Individuen sich auch häufiger paaren können und damit den Anteil ihrer (erfolgreichen) Gene im Genpool ihrer Population erhöhen.

Dieses Gedankenexperiment zeigt uns, dass Populationen keine festen Gebilde darstellen, sondern sich ständig und vor allem willkürlich ändernde Zusammenschlüsse von Individuen sind und damit auch keine evolutiv selektierbare biologische Einheit darstellen können. Damit wären wir bei der zweiten Hierarchieebene angekommen: der Individualselektion. Hier gilt streng genommen das gleiche Prinzip wie bei der Gruppenselektion. Doch warum ist das so? Nun, ein individuelles Tier oder eine Pflanze mag für uns oberflächlich betrachtet wie ein eigenständiges Geschöpf wirken, das man nicht mehr in kleinere Teile aufspalten kann. Tatsächlich aber sind sie alle (einschließlich Sie, die dieses Buch lesen, und ich, der dieses Buch schreibt) das Produkt von Genen, welche sich zu Genomen zusammengetan haben, um unsere Körper als eine Art Gefäß zu konstruieren. Dieses Gefäß kann man gut und gerne als Überlebensmaschine bezeichnen, denn die alleinige Aufgabe, die unseren Körpern zukommt, ist der Erhalt und die Weitergabe der genetischen Information, die uns erschuf. Damit sind unsere Körper eine Art manifestiertes, genetisches Echo, das durch die Aktivität unserer Gene erzeugt wird und sich durch die (meistens sexuelle) Weitergabe selbst erhält.

Das mag für uns zunächst befremdlich klingen, da wir es gewohnt sind, einzelne Menschen, Tiere oder Pflanzen als die kleinste biologische Einheit zu betrachten, die sich eigenständig verhalten und sich durch sexuelle Reproduktion selbst erhalten. Doch eben aufgrund der se-

xuellen Vermischung bei der Reproduktion können Individuen per definitionem auch keine Kopien ihrer selbst erzeugen, um diese für die Zukunft zu bewahren. Um noch einmal auf unsere dürregeplagten Löwen in der Savanne Afrikas zurückzukommen: So haben wir bereits festgestellt, dass vor allem kleinere Löwen unter diesen Bedingungen Vorteile genießen, die ihnen helfen zu überleben und sich zu vermehren. Doch was geben diese erfolgreichen Tiere an die nächste Generation weiter, um diese positiven Eigenschaften zu erhalten? Ihre kleineren Körper? Ihren schnellen Stoffwechsel? Ihre langen Beine? Nein, natürlich nicht, sie tragen eben jene Gene in die nächste Generation, die ihnen geholfen haben zu überleben und eben diese körperlichen Eigenschaften auszubilden. Gene für geringere Körpergröße, Gene für einen effizienteren Stoffwechsel und Gene, die ihnen erlauben schneller zu laufen. Schließlich sind alle Merkmale eines Tieres oder einer Pflanze, die wir sehen oder abmessen können und die ihrem Träger das Leben und Überleben erleichtern, nichts anderes als ein physisches Echo der Aktivität bestimmter Gene.

Ich denke durch diese Gedanken erschließt sich uns langsam, dass einzelnen Lebewesen nicht die Rolle für die natürliche Selektion zukommt, wie wir es lange dachten. Wie wir heute wissen, existiert auch so etwas wie ein „Individuum“ streng genommen gar nicht. Da jede Pflanze und jedes Tier, einschließlich des Menschen, ein eigenes Ökosystem darstellt, das Tausende von verschiedenen Arten beherbergt, von denen sie abhängig sind, um überhaupt existieren zu können. Um hier einmal etwas konkreter zu werden, wähle ich ein kurzes Beispiel, das uns Menschen betrifft. Der Mensch besitzt schätzungsweise 23 000 Gene, die in Protein übersetzt werden können und Teil unseres Genoms sind. Aber ist das wirklich das gesamte genetische Material, das unsere Existenz beeinflusst? Die Antwort auf diese Frage ist ganz einfach: nein. Genau genommen ist es nicht einmal ein Bruchteil der Gene, die unsere Körper enthalten. Moderne Schätzungen besagen, dass wir, wenn wir die Gene aller Bakterien, Pilze und Viren, die ein Teil unseres Körpers sind, zusammennehmen, auf eine Zahl von circa 8 Millionen kommen. Ausgeschrieben wirkt diese Zahl sogar noch erstaunlicher: 8 000 000. Diese enorm große Zahl von artfremden Genen soll uns nicht nur beeindrucken, nein sie soll viel mehr als pures Erstaunen auslösen. Sie zeigt uns, dass wir keine Individuen im klassischen Sinne sind, sondern regelrechte Ökosysteme. Und ein Ökosystem kann niemals die kleinste von der Evolution selektierbare Einheit darstellen.

Da wir nun zu der kleinsten biologischen Einheit um das Rennen nach der Wirkebene der natürlichen Selektion kommen, möchte ich an dieser Stelle auf den renommierten Evolutionsbiologen Richard Dawkins verweisen. Dessen Konzept eines Genselektionismus ist nach heutigem Wissenstand das einzige, das sich mit modernen Erkenntnissen deckt. Denn nur die Gene können als die kleinste biologische Einheit gesehen werden, die in einem zeitlichen Fluss, von einer Generation an die nächste weitergegeben und, gelenkt von der natürlichen Selektion, einer kontinuierlichen Qualitätskontrolle unterzogen werden. Vor allem aber, weil

nur sie einem Zustand der Unsterblichkeit nahekommen und damit sogar in evolutiven Zeiteinheiten eine Relevanz haben, während die Lebenserwartung eines Individuums höchstens eine Generation beträgt.

In den Augen eines Genetikers sind Individuen, ihre Körper und sogar ganze Arten, egal ob Mensch, Löwe oder auch Eiche, keine stabilen Einheiten. Sie alle existieren nur für einen verhältnismäßig kurzen Zeitraum und sind bedingt durch die Evolution einem ständigen Wandel unterworfen. Sie ähneln eher den Wellen des Ozeans, welche sich auflösen und neu entstehen und deren Form durch äußere Bedingungen wie Windstärke und den physikalischen Eigenschaften des Wassers bestimmt wird. So wird auch die Form individueller Körper durch äußere Bedingungen und die Vorgaben der DNS bestimmt. Damit sind sie nichts als temporäre Gebilde, nicht stabil genug, um über Zeiträume hinweg zu bestehen, welche für die Evolution erforderlich sind. Ich werde im Laufe dieses Buches versuchen, unseren Blick auf die individuellen Körper aller Lebewesen zu ändern, da sie nur unter den uns vertrauten Zeiteinheiten eine festgelegte Form zu haben scheinen. Wenn wir uns unsere Körper nun in einem Zeitraster vorstellen und in unsere eigene Evolutionsgeschichte zurückreisen, verschwimmen die anscheinend klaren Grenzen unserer Körper. Sie erscheinen eher wie eine zähe Flüssigkeit und haben nur noch wenig mit den festen Strukturen gemein, die sie uns vormachen zu sein. Wenn wir nun diese Zeitreise antreten oder anders ausgedrückt, uns in ein Boot setzen und den Fluss der Evolution vom Seitenarm des *Homo sapiens* aus bis hin zur Quelle herunterfahren, sehen wir, wie unsere Körper sich ständig verändern. Dort, wo eben gerade noch ein uns bekannter menschlicher Körper war, sehen wir auf einmal einen haarigen Primaten, der eher einem Schimpansen gleicht. Je näher wir in Richtung Quelle kommen, verändern sich unsere Körper immer weiter. Hin zu kleinen, auf allen vieren laufenden Säugetieren, hin zu Reptilien, hin zu Amphibien, die gerade den Weg aus dem Wasser hinter sich gebracht haben, hin zu Fischen, bis unsere Körper sich schließlich zu einzelligen Lebewesen reduziert haben.

Ich bin mir im Klaren, dass diese Definition von Evolution für viele Menschen grundlegend neu und ungewohnt ist, doch ich bin mir sicher, am Ende dieser Reise wird sie unser Bild des Lebens auf der Erde verändert haben. An dieser Stelle ist wichtig zu verstehen, dass unsere Körper, genauso wie die Körper aller anderen Lebewesen, nichts als temporäre Gebilde sind, die sich im Laufe der Zeit immer wieder neu anpassen, um ihrer Aufgabe bestmöglich nachzukommen: das Überleben der Gene zu sichern.

Um gewissen Kritikern vorzugreifen, möchte ich betonen, dass ich mich des Öfteren einer sehr bildhaften Sprache bedienen werde, um abstrakte und sehr komplexe Abläufe verständlich darzustellen. Dazu gehört ebenfalls, dass ich geist- und verstandlosen Molekülen gewisse, uns vertraut vorkommende Emotionen oder Absichten unterstellen werde, um deren chemisches Verhalten zu erklären. Ich bin mir selbstverständlich über die Tatsache im Klaren, dass Gene nicht „bewusst“ miteinander konkurrieren oder dass Proteine wie die Natrium-Kalium-

ATPase (Natrium-Kalium-Ionenpumpe) kein „bewusstes“ Interesse an der Aufrechterhaltung eines elektrochemischen Gradienten zwischen dem Zytoplasma und der Zellumgebung haben. Trotzdem werde ich mich dieser Sprache bedienen, da sie die beobachtbaren Abläufe innerhalb der Natur am besten erklären kann.

## Raum und Zeit

Ich werde Sie in diesem Buch mitnehmen auf eine Reise durch Raum und Zeit, entlang des genetischen Flusses der Evolution. Was meine ich damit? Die räumliche Komponente der Evolution stellen für mich die Körper aller Lebewesen auf der Erde dar, denn sie sind es, die durch die stetig wirkende Kraft der Evolution kontinuierlicher Veränderung unterworfen sind. Wir werden uns allerdings auf unserer Reise nicht nur auf die Körper als solche konzentrieren, sondern wir werden bis zu den kleinsten Einheiten des Lebens vordringen, den Zellen und Molekülen, aus denen all unsere Körper bestehen. Auf unserer Reise durch die Zellen selbst werden wir auf jenes Molekül stoßen, das komplexes Leben auf der Erde erst möglich gemacht hat und dem es bis heute in Form und Funktion komplett unterworfen ist: die Desoxyribonukleinsäure oder kurz DNS. Die DNS ist ein Riesenmolekül, dessen Länge den Durchmesser einer Zelle um das Millionenfache überschreitet und das nur dank einer komplexen dreidimensionalen Struktur überhaupt in einer Zelle Platz findet.

Um das einmal zu verdeutlichen, stellen wir uns einfach das Genom des *Homo sapiens* vor. Dieses hat eine Länge von circa 1,80 Metern, während eine durchschnittliche menschliche Zelle nur zwischen 6 und 7,5 Mikrometer (millionstel Meter) misst. Die Aufgabe, dieses schier endlos lange Molekül in eine so kleine Zelle zu packen und dabei gleichzeitig seine überlebenswichtigen Funktionen zu erhalten, würde wahrscheinlich jeden Ingenieur in den Wahnsinn treiben. Wie sie wahrscheinlich schon gehört haben, schweben die Gene auch nicht frei durch unsere Zellen, sie haben sich zu riesigen Molekülketten vereinigt, die wir heute als Chromosomen bezeichnen. Diese Chromosomen liegen in einem ganz bestimmten Zellkompartiment, dem sogenannten Zellkern oder Nukleus. Die Anzahl der Chromosomen unterscheidet sich bei den meisten Tier- und Pflanzenarten extrem, und schwankt zwischen 2 (Pferdespulwurm) und 1320 (gewöhnliche Natternzunge), der Chromosomensatz der Menschen liegt bei nur unauffälligen 46.

Das Genom ist ein weiterer wichtiger hierarchischer Begriff innerhalb der Genetik und beschreibt die Gesamtheit der als DNS vererbaren Information eines Lebewesens. Wie entscheidend das Genom als Ganzes für die Funktionalität einer Zelle, eines Organismus und damit auch für das Leben als solches ist, hat man erst vor Kurzem begriffen. Ein Genom ist weit mehr als nur die Summe seiner proteincodierenden Gene, schließlich machen diese

(wieder am Beispiel von uns Menschen) nur circa 1,5 % unserer gesamten DNS aus, was im Umkehrschluss bedeutet, dass über 98 % unserer DNS andere Aufgaben und Funktionen hat. Trotz dieser enormen Größe und Komplexität besteht DNS nur aus vier verschiedenen Bausteinen, den sogenannten Nukleotiden (A – Adenin, T – Thymin, G – Guanin, C – Cytosin). Durch die Aneinanderreihung dieser vier Nukleotidbausteine kann eine nahezu unendliche funktionelle und auch räumliche Komplexität erreicht werden. Wir werden auf unserer Reise die wichtigsten Aufgaben, Besonderheiten und viele Interaktionspartner der DNS kennenlernen, um uns ein genaueres Bild von der chemischen Sinfonie machen zu können, die uns alle am Leben erhält.

Die zeitliche Komponente unserer Reise wird uns zu den Ursprüngen des Lebens auf der Erde führen, zu eben jenem nicht eindeutig definierbaren Zeitpunkt der Erdgeschichte, an dem aus Chemie Biologie wurde. Wir werden uns anschauen, wie die anfängliche chemische Evolution in der sogenannten „Ursuppe“ entstand und dazu führte, das komplexes, biologisches Leben entstehen konnte und das alles auf diesem kleinen, unauffälligen Gesteinsplaneten, den wir Erde nennen. Dieser Planet, der einen verhältnismäßig kleinen Stern (unsere Sonne) umrundet und der selbst am Rande eines kleinen Armes einer durchschnittlichen Spiralgalaxie gelegen ist, die allein schon rund 200 Milliarden Sterne besitzt und nur eine von schätzungsweise 100 Milliarden Galaxien im beobachtbaren Universum darstellt. Wir stehen auch heute erst am Anfang, wenn es darum geht, die komplexen Interaktionen in der Welt der Naturgesetze zu verstehen, denn sie offenbart ihre Geheimnisse nur selten freiwillig. Sowohl in der Welt der Astrophysik als auch in der der Biologie müssen Menschen mithilfe komplizierter Messverfahren und hypothetischen Gedankenexperimenten die für uns und unsere Augen unsichtbare Welt der Natur offenlegen, um sie verstehen zu können.

Da wir nun schon beim Thema Astrophysik sind, fällt es mir schwer, auf eine kleine Anekdote zu verzichten, in der es um eine Hypothese geht, die die Entstehung unseres Universums selbst auf einen evolutiven Prozess zurückführt. Sie stammt von dem theoretischen Physiker Lee Smolin (hier möchte ich besonders auf sein Buch „Warum gibt es die Welt“ hinweisen), im Zentrum dieser Theorie stehen schwarzen Löcher. Diese faszinierenden Anomalien der Raumzeit, die entstehen, wenn Sterne mit einer minimalen Ausgangsmasse von drei Sonnen „sterben“ und schließlich unter ihrer eigenen Masse kollabieren. In ihrer unmittelbaren Umgebung, sprich hinter dem sogenannten „Ereignishorizont“, entsteht eine so starke Gravitation, dass keine Information, also weder Licht noch Radiowellen, es verlassen kann. Nach Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie verformt ein schwarzes Loch aufgrund seiner Masse die Raumzeit so stark, dass die physikalischen Gesetze, wie wir sie kennen, die Ereignisse hinter dem „Ereignishorizont“ nicht mehr beschreiben können. Und hier greift die Theorie von Lee Smolin, die besagt, dass in einem schwarzen Loch neue „Tochter“-Universen entstehen, die den Großteil ihrer Eigenschaften von dem jeweiligen „Mutter“-Universum vererbt bekommen, sich

allerdings geringfügig in ihren für sie gültigen Naturgesetzen von dem „Mutter“-Universum unterscheiden.

In einem evolutiven Prozess würden dann Universen nach Langlebigkeit und „Reproduktionserfolg“ (sprich der Fähigkeit, neue schwarze Löcher zu erzeugen) selektiert werden und sich so in der kosmischen „Population“ durchsetzen.

Auch wenn diese Hypothese, abgesehen von mathematischen Berechnungen, wohl nie abschließend bestätigt werden kann, so ist sie deshalb nicht weniger faszinierend. Es sind schließlich gerade diese schwarzen Löcher, welche die Physik vor ihre größte Herausforderung stellen, weil hinter ihrem Ereignishorizont die Gesetze von Albert Einsteins Relativitätstheorie nicht mehr greifen. Einsteins Theorie beschreibt verblüffend genau die Abläufe im makroskopischen Teil unseres Universums und erlaubt uns immer wieder, Vorhersagen über physikalische Vorgänge zu treffen, die häufig erst zu einem späteren Zeitpunkt bestätigt werden können, wenn unsere technischen Mittel dies zulassen. Allerdings ist seine Theorie blind für die mikroskopische Welt der Quantenteilchen. Für diesen Teil unserer real existierenden Umwelt gibt es heute die zweite große physikalische Theorie, die der Quantenphysik. Die Quantenphysik beschreibt drei der vier Elementarkräfte unseres Universums, nämlich die elektromagnetische Wechselwirkung, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung. Nur die Gravitation, die vierte und schwächste Elementarkraft, kann von ihr nicht beschrieben werden. Da sich diese beiden Theorien (Einsteins Relativitätstheorie und die Theorie der Quantenphysik) nach heutigem Stand noch nicht vereinen lassen, suchen tausende Physiker nach wie vor nach dieser einen alles vereinenden sogenannten „Weltformel“.

An diesem Punkt ist die Biologie der Physik allerdings schon voraus, denn die biologische „Weltformel“, die alle Teildisziplinen der Biologie vereint, ist bereits entdeckt worden: die Evolutionstheorie. Nur dank ihr können wir heute viele, auf den ersten Blick unerklärliche biologische Phänomene deuten. Hiermit meine ich nicht nur die zum Teil aufsehenerregenden Körperformen mancher Pflanzen und Tiere, es geht noch viel tiefer, bis hin zu der Entstehung der komplexen dreidimensionalen Struktur der Proteine, der Zusammensetzung der verschiedenen genomischen „Ökosysteme“ und sogar bis hin zur Entstehung des Lebens als solchem. An dieser Stelle möchte ich den renommierten Evolutionsbiologen Theodosius Dobzhansky zitieren:

*„Nichts in der Biologie macht Sinn außer im Licht der Evolution.“*

Dieser evolutionäre Blick auf die Entstehung des Universums (ob er nun der Wahrheit entspricht oder nicht) mag für manche befremdlich klingen, doch eröffnet er uns ganz neue Blickwinkel auf das Leben im Allgemeinen und auch auf uns selbst als Menschheit. Wie oft muss man sich anhören, dass durch die wissenschaftlichen Erkenntnisse eine emotional kalte, rein auf Zahlen und Fakten basierte Welt geschaffen werde, in welcher der Einzelne nicht mehr zählt. Meiner Ansicht nach ist diese Sichtweise nicht nur falsch, es ist sogar genau das Gegen-

teil der Fall. Wir müssen nur lernen, unser erworbenes Wissen anders zu interpretieren und unser auf die Menschheit zentriertes Weltbild ändern. Dann, und nur dann, schafft die Wissenschaft gänzlich neue Verbindungen und familiäre Bande über die engen Grenzen unserer Spezies hinweg, in der ein jedes Tier, jede Pflanze, jeder Pilz, jedes Bakterium und sogar jeder Virus miteinander verwandt sind und auf einen gemeinsamen Vorfahren zurückgehen. Wissenschaft ist alles andere als fantasielose Rationalität, dargestellt durch mathematische Formeln, sie ist in ihrer Beschreibung der Natur bunter, kreativer und formenreicher als jedes Fantasiegebilde, das jemals dem menschlichen Geist entsprungen ist.

Dieser Blickwinkel auf das Leben erschafft Verbindungen und Zusammengehörigkeit in einem Maßstab, der jede uns bekannte Gesellschaftsform und Religion blass aussehen lässt, da er niemanden ausklammert, sich nicht nur auf eine Spezies konzentriert und stattdessen jedes Lebewesen miteinbezieht. Es geht sogar so weit, dass wir mit Fug und Recht behaupten können, mit dem gesamten Universum „verwandt“ zu sein. Jedes Atom, aus dem unser Körper heute besteht, entstand einst im Inneren eines sterbenden Sterns unter unvorstellbarer Hitze und Druck, um schließlich in einer Explosion kosmischen Ausmaßes in die Weiten des noch jungen Universums geschleudert zu werden, um zu einem späteren Zeitpunkt die Rohmasse für Gesteinsplaneten wie unsere Erde zu bilden. Und vielleicht sind sogar die in unserem Universum geltenden Naturgesetze selbst ein evolutiv „ererbtes“ Merkmal einer übergeordneten, kosmischen Evolution.

Doch nun kommen wir wieder zurück zu unserer Reise durch die irdische Evolution des Lebens, die nach wie vor viele Geheimnisse vor uns versteckt hält. Um ein besseres Verständnis zu bekommen von dem, was Evolution tatsächlich bedeutet, reicht es manchmal schon aus, seine persönliche Denkweise anzupassen. An dieser Stelle möchte ich mal ein kleines Beispiel anführen: Nach wie vor ist es gängig zu denken, der Mensch sei die „Krone der Schöpfung“. Auch wenn dieser Satz in vielen westlichen Ländern so nicht mehr allzu häufig zu hören ist, so zeigt unser tägliches Verhalten, dass wir ihn doch gesellschaftlich tief verinnerlicht haben. Wäre es uns ansonsten möglich, ein Wirtschaftssystem, das so stark auf die Ausbeutung der Natur fokussiert ist, am Leben zu erhalten oder beim Umgang mit Tieren in der industriellen Landwirtschaft jegliche Verhaltensweisen moralischen Ursprungs über Bord zu werfen?

Doch was wird durch diesen Satz noch impliziert? Abgesehen natürlich von der dem Menschen in die Wiege gelegten Bescheidenheit, kann aus diesem Satz gefolgert werden, die Evolution habe einen Zielpunkt und läuft „gesteuert“ auf eben diesen zu. Wir werden auf unserer Reise an vielen Stellen sehen, warum diese Sichtweise grundlegend falsch ist. Doch weil Sätze wie dieser in unserer Gesellschaft immer häufiger Gehör finden, möchte ich schon zu Beginn dieses Buches eine Sache hervorheben: Evolution basiert auf der kontinuierlichen Veränderung der DNS, zum Beispiel durch Mutation, Insertion viraler DNS oder durch DNS-Duplikation, und sie läuft ungesteuert und hat demnach auch keinen „Zielpunkt“.

Wir Menschen neigen dazu, aus Überheblichkeit und einer Gleichgültigkeit gegenüber anderen Arten uns selbst als dieses mystische „Ziel“ der Evolution zu betrachten. Wenn man sich mit Menschen unterhält, die dieses Weltbild verinnerlicht haben, fallen beispielsweise Sätze wie „Es kann ja schließlich kein Zufall sein, dass ausgereicht unsere Vorfahren all die Katastrophen und Massensterben der Vergangenheit überlebt haben“. Bei dieser Art der Argumentation vergisst man jedoch, dass so gesehen jede rezente (heute lebende) Art, egal ob Braunbär, Igel, Amsel oder Eiche, dann als Ziel der Evolution betrachtet werden kann. Diese Ansicht wäre ebenso falsch wie die, dass der Mensch eben dieses ominöse Ziel sei. So wie der Mensch davon überzeugt ist, sein Geist wäre die wunderbarste Schöpfung der Natur, so würde vermutlich ein Fisch entgegenen, es wäre sein stromlinienförmiger Körperbau, ein Falke würde sagen, es wäre seine Fähigkeit zu fliegen, und ein Baum würde auf seine Errungenschaften bei der Umwandlung von Sonnenlicht in organische Materie (Photosynthese) hinweisen. Auf diese Weise könnten alle Lebewesen sich auf gewisse körperliche Merkmale beziehen, die sie von anderen Lebewesen abheben und die ihnen besondere Überlebenschancen gewähren. Doch eines haben alle diese Merkmale, egal wie unterschiedlich sie auch sein mögen, gemeinsam: Sie sind alle durch Evolution entstanden und wurden von der natürlichen Selektion als nützlich erachtet, wodurch sie letztlich erhalten geblieben sind. Dies gilt sowohl für die körperlichen als auch für die geistigen Fähigkeiten aller Lebewesen, auch jener, die sich für etwas Besonderes halten.

Ein weiteres Hindernis auf dem Weg zu einem Verständnis von Evolution ist das Menschen dazu neigen, natürliche Prozesse nach den ihnen bekannten Vorstellungen von Zeit zu betrachten. Doch wenn wir uns einmal anschauen, welche Zeitspannen uns im alltäglichen Leben bereits als „lang“ vorkommen, wird eins deutlich, sie sind viel zu kurz. Man blickt ja bereits mit einiger zeitlicher Ehrfurcht auf die Arbeiten von Historikern oder Archäologen, die Geschehnisse oder Überreste aus den letzten Jahrhunderten, Jahrtausenden oder sogar Zehntausenden von Jahren bergen. Doch gemessen an den Zeitspannen, über die wir sprechen müssen, um ein Verständnis von der Evolution zu bekommen, sind sie erschreckend kurz. Es reicht schlicht und ergreifend nicht aus, über Jahrhunderte oder Jahrtausende zu sprechen, nicht einmal hunderttausende Jahre können uns viel sagen über das Wesen der Evolution und die Entstehung komplexen Lebens. Hierfür müssen wir unsere Uhren sehr viel schneller zurückdrehen. Hier wird uns langsam deutlich, dass wir über Millionen, hunderte Millionen und sogar Milliarden Jahre sprechen, wenn es um die Geschichte des Lebens auf der Erde geht.

An dieser Stelle gibt es eine verblüffende Ähnlichkeit zwischen der Evolution und der Geologie, also der Wissenschaft von der Entstehung und Entwicklung der Erde. Denn die Geschichte des Lebens ist auch gleichzeitig die Geschichte unseres Planeten. Nur durch die von der Erde bereitgestellten Bedingungen war die Entstehung von Leben überhaupt erst möglich und durch ihren steten Wandel wurde auch der Evolution stets die Richtung vorgegeben. Die

enge Verwandtschaft dieser beiden Disziplinen erkennt man besonders deutlich daran, dass beide Wissenschaften auf die gleiche Zeitmessung zurückgreifen, auf die geologische Zeitskala. Beginnend vor circa 4,6 Milliarden Jahren, also dem Zeitpunkt der Entstehung unserer Erde, und dem Hier und Jetzt. An dieser Stelle ist es vor allem wichtig zu verstehen, dass beide Wissenschaften den Ist-Zustand der belebten wie der unbelebten Welt um uns herum nur erklären können dank dem Blick zurück in die Vergangenheit. So wissen wir heute, dass viele der grundlegenden Körperbaupläne nahezu aller heute lebenden Tierarten, einschließlich dem von uns Menschen, vor über 500 Millionen Jahren, in einem Erdzeitalter namens Kambrium, entstanden sind – und zwar als Anpassung an die Umweltbedingungen der damaligen Zeit und nicht etwa in Aussicht auf das, was einmal kommen wird. Schließlich kennt die Evolution keine Voraussicht. Jede Veränderung wird direkt geprüft und kann sich nur durchsetzen, wenn sie von Vorteil ist oder sich zumindest nicht als nachteilig erweist für das Überleben seiner Träger. Auf jede dieser Veränderungen baut die Evolution auf und fügt neue Details hinzu, die sich so im Laufe von Millionen Jahren akkumulieren und so die uns bekannte Vielfalt des Lebens hervorbringen. Es waren also die Umweltbedingungen vor über 500 Millionen Jahren, die den Grundstein legten für unsere heutigen Körper, die durch die Bedingungen der heutigen Zeit stets weiter geprüft und verändert werden.

Auch innerhalb der Geologie gibt es dieses Zusammenspiel zwischen alt und neu. Eines der schönsten Beispiele für mich persönlich ist die Küste der südkroatischen Provinz Dalmatien. Hier treffen über tausend Meter hohe Berge auf das Wasser der Adria, doch ein Blick zurück in die Vergangenheit zeigt uns, dass selbst diese monumentalen Berge einst Teil eines prähistorischen Ozeans waren, und zwar der legendären Tethys. Die Tethys entstand einst durch das Auseinanderbrechen des Superkontinents Pangäa in die kleineren Kontinente Gondwana und Laurasia. Über Jahrtausende hinweg lagerten sich Sedimente am Grund dieses Meeres ab und wurden im Laufe der Zeit zu Kalkstein und aus eben diesem Kalkstein bestehen die Gebirgszüge entlang der kroatischen Küstenlinie. Man kann also sagen, dass Abschnitte des heutigen Mittelmeeres durch die Millionen Jahre alten Überreste eines längst vergangenen, aber sehr viel größeren, prähistorischen Meeres begrenzt werden und so die dramatischen Landschaften Dalmatiens erschaffen.

Hier haben wir wieder die Parallelen zu unseren Körpern, auch sie fußen auf einem Millionen Jahre alten Fundament, das durch stete Weiterentwicklung in seine heutige Form gedrückt wurde. So wie die geologischen Kräfte Meeresboden im Laufe von Jahrtausenden in Berge verwandeln können, so kann die Evolution Fische in Menschen oder Elefanten verwandeln. Erst wenn wir uns in eben diesem Tempo durch die Jahrtausende der Erdgeschichte bewegen, offenbart die Evolution ihren wahren Charakter: den einer unbändigen, das Leben formenden Kraft, die allen Lebewesen innewohnt und ihre, an eine zähe Flüssigkeit erinnernden Körper verformt, um sie stets besser an die vorhandenen Umweltbedingungen anzupassen. Um ein

Verständnis von den Mechanismen der Evolution zu bekommen, muss man also alle Kapitel ihres Buches lesen und vor allem seine innere Uhr auf „ihre“ Zeit einstellen.

Nun beginnen wir unsere Reise durch die zeitlichen und räumlichen Schauplätze der Evolution mit den Grundbausteinen des Lebens auf der zellulären und molekularen Ebene. Denn diese Ebene birgt ihre ganz eigenen, für unsere Augen unsichtbaren Wunder und kann uns daher viele ungeahnte Besonderheiten der Evolution vermitteln. Ohne das „Kleine“ kann man auch das „Große“ nicht verstehen.



# Raum – Gene und Genome

## DNS, Molekül des Lebens

Wir beginnen unsere Reise durch den „Raum“ nun bei dem, was das Fundament der Evolution und gleichzeitig die elementarste Einheit der belebten Natur darstellt, dem Gen. Doch was ist eigentlich ein Gen? Rein fachlich ausgedrückt ist ein Gen ein DNS-Abschnitt, der einen definierten Teil der Erbinformation speichert und der durch Reproduktion in einem zeitlichen Fluss an die Nachkommen weitergegeben werden kann. Nun sind wir bereits bei einem starken Bild angekommen, von dem wir schon im einleitenden Teil dieses Buches gehört haben, und zwar dem „Fluss der genetischen Information“. Doch was ist darunter zu verstehen? Hier gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, dieses Bild zu deuten, die beide auf ihre Weise richtig sind. Zum einen ist es der zeitliche Fluss der Gene durch die evolutionären Zeiträume vom Beginn des Lebens auf der Erde bis zum heutigen Tag. Aber es gibt noch die zweite Möglichkeit, von einem Fluss der Information zu sprechen, nämlich auf rein molekularer Basis. Damit meint man im Allgemeinen den Weg vom Speichermedium der DNS hin zum fertigen Genprodukt, was in den meisten Fällen mit einem funktionsfähigen Protein gleichzusetzen ist. Doch hier kommt schon die erste Hürde auf uns zu, denn DNS wird nie direkt in Protein übersetzt. Es ist ein Zwischenschritt erforderlich, der nicht übergangen werden kann. Die DNS wird zunächst in RNS umgeschrieben (transkribiert), bevor sie in eine Proteinsequenz übersetzt (translatiert) werden kann. Ich verwende hier mit den Worten „umgeschrieben“ und „übersetzt“ ganz bewusst eine Analogie zu der uns bekannten Sprache, da auch die DNS als eine Art Schriftwerk zu verstehen ist, das aus vier verschiedenen Buchstaben besteht und durch dessen Reihenfolge eine molekulare Sinnhaftigkeit entsteht. Doch wenn die DNS ein Speichermedium darstellt, auf welche Art speichert sie die Information des Lebens, und was ist es überhaupt, wovon wir als „die Information des Lebens“ sprechen?

Für die meisten Menschen, die bereits einige Grundkenntnisse der Biologie besitzen, und selbst für viele Biologen wird die Antwort lauten, dass DNS die Information für den Bau von Proteinen enthält. Und diese Antwort ist selbstverständlich richtig, jedoch umfasst sie nur einen kleinen Teil davon, was DNS kann und tut. Denn DNS ist schließlich nur der chemische Name für ein Molekül, das aus lediglich vier verschiedenen Bausteinen ganze Genome entstehen lässt, und es ist auch korrekt, dass Genome zum Teil aus Genen bestehen, die den Bauplan für komplexe Proteine und Enzyme enthalten. Doch wie wir noch erfahren werden,

sind Genome weit mehr als nur die Summe der proteincodierenden Gene, die sie enthalten. Sie kontrollieren gezielt Aktivität und Funktion einzelner Gene durch die Gleichsetzung von Struktur und Funktion, sie bestehen zu einem Großteil aus parasitischen, viralen Sequenzen und sie codieren für eine Vielzahl regulatorischer Sequenzabschnitte, die niemals in Protein übersetzt werden müssen, um ihre Wirkung zu entfalten. Damit komme ich schon früher als eigentlich geplant zu einem der Kernpunkte dieses Buches, den ich zu einem späteren Zeitpunkt detailliert ausführen werde. Denn Genome sind weit mehr als nur riesige Datenspeicher der Evolution. Sie sind uralte, komplexe Ökosysteme, welche die Fähigkeit besitzen, sich im ständigen Wandel der Zeit gleichzeitig anzupassen und die in ihnen gespeicherte Information zu erhalten. Durch die hochgradig regulierte Aktivität dieser Genome werden auch ganz bestimmte räumliche Echos erzeugt. Diese räumlichen Echos sind letztendlich die Körper aller Lebewesen um uns herum, einschließlich unseres eigenen. Doch dazu später mehr.

In diesem Kapitel geht es vorerst um die Funktion und Struktur der DNS: So ist ein Speichermedium nur so gut wie seine Fähigkeit, Informationen zu erhalten und weiterzugeben. Das ist im Falle der DNS ein unfassbar komplexer Prozess, der nur durch das Zusammenspiel diverser Proteine und Enzyme sowie die Struktur der DNS selbst ermöglicht wird. Wir werden im Laufe dieses Abschnitts die wichtigsten Akteure dieses Prozesses kennenlernen und dadurch auch ein tieferes Verständnis für die Rolle der Gene in unserem alltäglichen Leben erlangen. Doch um ein tatsächliches Verständnis für die Funktion und das „Verhalten“ der Gene zu bekommen, müssen wir erstmal mehr über den Stoff erfahren, aus denen sie bestehen, nämlich die DNS selbst sowie über ihren molekularen Bruder, die Ribonukleinsäure (RNS).

Die DNS ist ein Makromolekül von unglaublichen Dimensionen, doch jedes DNS-Molekül besteht trotz seiner enormen Größe nur aus vier verschiedenen molekularen Bausteinen, den sogenannten Nukleotiden. Diese Nukleotide bestehen aus drei Komponenten:

- Ein Zuckermolekül, bestehend aus fünf Kohlenstoffatomen (2-Desoxyribose in DNS und Ribose in RNS)
- Jeweils eine Purin- oder Pyrimidinbase (Purinbasen: Adenin und Guanin; Pyrimidinbasen: Cytosin und Thymin; Uracil in RNA), die an das  $C_1$ -Atom der Zuckerkomponente gebunden ist
- Ein Phosphat-Rest, der an das  $C_5$ -Atom der Zuckerkomponente gebunden ist

Erst wenn diese drei Komponenten aneinander gebunden vorliegen, spricht man von einem Nukleotid, was man durchaus als funktionelle Einheit der DNS bezeichnen kann. Während die Zucker- und die Phosphatkomponente in jedem Nukleotid identisch sind, unterscheiden sie sich nur durch ihre unterschiedlichen Basen und werden entsprechend der in ihnen enthaltenen Base abgekürzt als A (Adenin), T (Thymin), C (Cytosin) und G (Guanin). Das bedeutet, durch die Kombination dieser vier Nukleotide wird die gesamte Information für das Leben

auf der Erde gespeichert, erhalten und weitergegeben. Das Buch des Lebens auf der Erde ist also weder in den 26 Buchstaben des lateinischen Alphabets geschrieben noch in den 33 Buchstaben des kyrillischen Alphabets, sondern in den lediglich vier universell gültigen Buchstaben, aus denen die DNS aufgebaut ist. Daraus ergibt sich auch der faszinierende Rückschluss, dass es keinen qualitativen Unterschied gibt zwischen dem Erbmaterial einer Pflanze, dem eines Bakteriums oder dem von uns Menschen. Der Stoff, der uns zu Menschen macht und ein Darmbakterium zu einem Darmbakterium, unterscheidet sich also keineswegs durch seine chemische Signatur, sondern ausschließlich durch die veränderte Reihenfolge der gleichen vier Bausteine.

In DNS-Molekülen sind zum Teil viele Milliarden Nukleotide zu langen, unverzweigten Fäden miteinander verbunden, und zwar durch sogenannte Phosphodiester-Bindungen zwischen dem  $C_3$ -Atom eines Nukleotids und dem  $C_5$ -Atom des nächsten Nukleotids (siehe Abbildung). Wie wir heute wissen, liegt DNS auch nicht als einzelsträngiges Riesemolekül vor, sondern bildet stets einen Doppelstrang, die uns bekannte Doppelhelix, dessen dreidimensionale Struktur im Jahre 1953 durch James D. Watson und Francis H. C. Crick entschlüsselt wurde. Durch diesen naturwissenschaftlichen Durchbruch wurde sozusagen über Nacht das Rätsel gelöst, wie die Erbinformation von einer Generation zur nächsten weitergegeben wird. Denn bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts wurde tatsächlich die Ansicht vertreten, dass große Proteinmoleküle die Erbinformation weiterreichen. Doch spätestens seit der Entschlüsselung der DNS-Struktur besteht kein Zweifel mehr daran, dass sie und nur sie für die Weitergabe und den Erhalt der Erbinformation verantwortlich ist. Jetzt wollen wir einen genaueren Blick auf die Struktur der DNS werfen und damit auch auf die Art und Weise, wie die Information, die unserem Sein zu Grunde liegt, gespeichert wird.



*Abbildung 1: Schematische Darstellung eines DNS-Doppelstrangs. Die verschiedenfarbigen Linien verdeutlichen die Basenpaarungen nach den Watson-Crick-Regeln (A – Adenin, T – Thymin, C – Cytosin und G – Guanin). akg-images / Science Source*

Beginnen werden wir unsere Betrachtung der DNS mit dem Abschnitt, der ihr ihre Stabilität verleiht, nämlich dem Rückgrat (Backbone). Das Rückgrat der DNS wird durch den Zucker 2-Desoxyribose und den bereits erwähnten Phosphat-Rest gebildet (Zucker-Phosphat Backbone). Die einzelnen Kohlenstoff-Atome der 2-Desoxyribose werden der Klarheit halber von 1' (gesprochen 1 Strich) bis 5' (5 Strich) nummeriert. Der Phosphat-Rest befindet sich am C<sub>5</sub>'-Atom der Zuckerkomponente und bildet eine Phosphodiester-Bindung mit der Hydroxyl-Gruppe (OH-Gruppe) am C<sub>3</sub>'-Atom des jeweils nächsten Nukleotids. Auf diese Weise bekommt ein jeder DNS-Strang ein 5'-und ein 3'-Ende, was für seine Funktion von entscheidender Bedeutung ist. Durch die einfache, aber stabile Anordnung von Zucker- und Phosphat-Bausteinen erschafft dieses starre, sich ständig wiederholende Gebilde einen Rahmen für die verborgene Komplexität der DNS. Denn diese liegt verschlüsselt in der Abfolge der nach innen gerichteten Purin- und Pyrimidinbasen, die an das C<sub>1</sub>'-Atom der jeweiligen Zuckerkomponente gebunden sind und damit in das Innere eines jeden DNS-Stranges hineinragen. Wie wir schon gehört haben, liegt die DNS in Form einer Doppelhelix vor. Daraus folgt, dass zwei in ihrer Basensequenz komplementäre DNS-Stränge sich miteinander zu eben dieser Doppelhelix verbinden. Doch was bedeutet an dieser Stelle „komplementär“? Nun aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften können immer nur ganz bestimmte Basen eine Bindung miteinander eingehen und dadurch Basenpaare bilden. Zum einen verbindet sich die Purinbase Adenin mit der Pyrimidinbase Thymin (A-T) mithilfe von zwei Wasserstoffbrückenbindungen. Das zweite mögliche Basenpaar wird gebildet von der Purinbase Guanin und der Pyrimidinbase Cytosin (G-C). In diesem Fall werden sogar drei Wasserstoffbrückenbindungen ausgebildet, was dafür sorgt, dass Guanin-Cytosin-Basenpaare fester und stabiler sind als Basenpaarungen zwischen Adenin und Thymin. Aus dieser Art der komplementären Bindungen, auch Watson-Crick-Bindungen genannt (nach den Entdeckern der DNS-Struktur), ist die direkte Folge für die Doppelhelix, dass die Sequenz des einen DNS-Stranges in kompletter Abhängigkeit zum jeweils anderen entsteht. Jedem Adenin im DNS-Strang mit der Orientierung 5'-3' steht ein Thymin im Strang mit der entgegengesetzten Orientierung (3'-5') entgegen und jedem Guanin steht ein Cytosin gegenüber und so weiter.

GCATTTACGTA  
CGTAAATGCAT

*Abbildung 2: Schematische Darstellung der Watson-Crick-Bindungen zwischen den verschiedenen Nukleotiden der DNS.*

## DNS versus RNS

Doch die DNS ist nicht das einzige Molekül bestehend aus Nukleotiden (Polynukleotid), das eine große Rolle in der Biologie spielt, sondern es gibt auch noch den sehr engen molekularen Verwandten, die Ribonukleinsäure. Wenn wir die Unterschiede zwischen den beiden Geschwistermolekülen DNS und RNS betrachten, so liegt er hauptsächlich in der konstanten Komponente des Rückgrats. Molekular betrachtet ähneln sich DNS und RNS beträchtlich. Allerdings gibt es zwei wichtige Unterschiede. Der wichtigste zuerst: Das Zucker-Phosphat-Rückgrat besteht bei der **DNS**, wie der Name schon sagt, aus 2-**Desoxy**ribose, da die Hydroxyl-Gruppe (OH-Gruppe) am C<sub>2</sub>'-Atom des Zuckers entfernt wurde, während sie bei der **RNS**, die **Ribose** als Baustein enthält, immer noch vorhanden ist. So klein dieser Unterschied auch erscheinen mag, er hat erheblichen Einfluss auf die chemischen Eigenschaften dieser beiden Moleküle. Im Gegensatz zur DNS, die stets in Form einer Doppelhelix, also doppelsträngig, vorliegt, ist die RNS bis auf wenige Ausnahmen als Einzelstrang aktiv. Dies hat einen enormen Vorteil für die RNS, denn nichtsdestotrotz können auch hier komplementäre Sequenzabschnitte innerhalb eines langen RNS-Moleküls miteinander feste Bindungen nach den Watson-Crick-Regeln eingehen. Auf diese Weise wird aus einem langen, unverzweigten RNS-Einzelstrang eine (abhängig von der Sequenz der Basen) komplexe dreidimensionale Struktur, die sogar vielfältige, enzymatische Funktionen erfüllen kann. Diese dreidimensionale Struktur wird auch Sekundärstruktur genannt, angelehnt an die hierarchischen Strukturebenen bei Proteinen, die wir in den nächsten Kapiteln noch kennenlernen werden. Auch im Falle der RNS nennt man die Abfolge der verschiedenen Nukleotide entlang der linearen RNS Kette ihre Primärstruktur.

Auf den ersten Blick mag sich das alles kompliziert anhören, allerdings helfen zum Verständnis dieser biologischen Abläufe und Strukturen einfache Bilder, die sich jeder leicht vor Augen führen kann. Man kann sich hier beispielsweise ein idealisiertes RNS-Molekül vorstellen wie eine Perlenkette, die aus vier verschiedenfarbigen Perlen besteht und eine Gesamtlänge von sagen wir mal 250 Perlen besitzt. Es gibt blaue, grüne, rote und gelbe Perlen, die in einer zufälligen Anordnung aufgefädelt sind. Nun stellen wir uns weiter vor, dass blaue und grüne Perlen sich ähnlich wie Magnete gegenseitig anziehen, und das Gleiche gilt auch für rote und gelbe Perlen. Legen wir jetzt unser idealisiertes RNS-Molekül der Länge nach auf einen Tisch, so wird es eine ganz bestimmte, charakteristische Form (Sekundärstruktur) annehmen, aufgrund seiner Primärstruktur (sprich der Sequenz oder Abfolge der verschiedenfarbigen Perlen) und wegen der physikalischen Eigenschaften, die wir den jeweiligen Perlen zugeschrieben haben. Diese dreidimensionale Sekundärstruktur erlaubt es den RNS-Molekülen, ganz bestimmte Aufgaben innerhalb einer Zelle zu erfüllen, ohne dass sie vorher in Proteine übersetzt werden müssen.