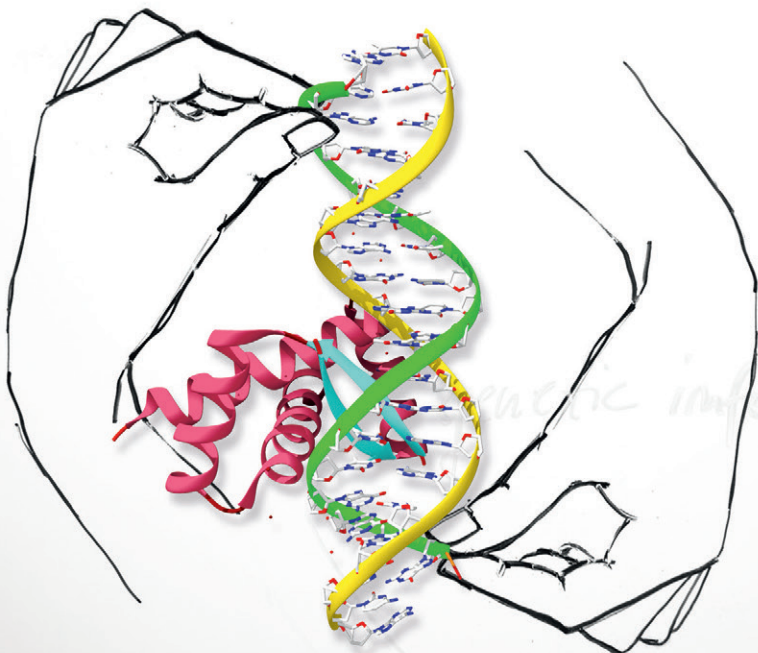


# BIO HACKING

## GENTECHNOLOGIE FÜR ALLE

Rüdiger Trojok

- Werkzeuge der Genbastler: Biomaterial, Geräte und Software zur Bearbeitung von Genen
- Praxisbeispiele und Zukunft der Gentechnik



Rüdiger Trojok

**BIOHACKING**  
**GENTECHNOLOGIE FÜR ALLE**

**Rüdiger Trojok**, Jahrgang 1986, ist Diplom Molekularbiologe und Biohacker. Er arbeitet für das Technikfolgen-Abschätzungsbüro beim Deutschen Bundestag (TAB) und für die Universität Karlsruhe (ITAS) zu Synthetischer Biologie, Citizen Science und Open-Source-Biologie. In Kooperation mit dem globalen Biohacker-Netzwerk Hackteria betreibt er Biotechnologie-Forschung in seinem Privatlabor. Der Fokus liegt dabei auf Generic-Lab-Equipment-Entwicklung und der Vereinfachung von molekularbiologischen Protokollen. Nebenberuflich bearbeitet Trojok diese Themen künstlerisch in Form von Ausstellungen und Workshops. Er bereiste Europa, Indien, Südamerika und Afrika und studierte System- und Synthetische Biologie an den Universitäten Potsdam, Kopenhagen (DTU) und Freiburg.

## **Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© **Franzis Verlag GmbH, 85540 Haar bei München**

Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Das Erstellen und Verbreiten von Kopien auf Papier, auf Datenträgern oder im Internet, insbesondere als PDF, ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Verlags gestattet und wird widrigenfalls strafrechtlich verfolgt.

Die meisten Produktbezeichnungen von Hard- und Software sowie Firmennamen und Firmenlogos, die in diesem Werk genannt werden, sind in der Regel gleichzeitig auch eingetragene Warenzeichen und sollten als solche betrachtet werden. Der Verlag folgt bei den Produktbezeichnungen im Wesentlichen den Schreibweisen der Hersteller.

**Programmleitung und Lektorat:** Dr. Markus Stäuble

**Covergrafik:** Karolina Sobecka, New York

**Satz:** Nelli Ferderer, nelli@ferderer.de

**art & design:** [www.ideehoch2.de](http://www.ideehoch2.de)

**Druck:** CPI-Books

Printed in Germany

**ISBN 978-3-645-60420-8**

*Pentru Mirela și toate celelalte minți  
însetate de cunoștință*

**Danksagung:**

Vielen Dank an Dr. Julian Chollet für seinen wertvollen Beitrag zum Wetware-Kapitel. Ebenfalls richtet sich mein Dank an Urs Gaudenz, Karolina Sobecka und die Wikimedia für die Bereitstellung vieler toller Bilder sowie an Simon Fuchs, nochmals Julian und Günther Seyfried und an den FRANZIS Verlag für die kritischen Kommentare.

# VORWORT



*Zu Ostern 2011 sitzen drei junge Leute in der Küche einer viel zu heißen Dachgeschoss-Studentenbude in Freiburg im Breisgau. Sie trinken Kaffee, sie essen Toastbrot mit Nutella, reden viel, gehen zum Bier über, schaben sich ein bisschen Schleimhaut aus dem Mund.*

Einer von ihnen heißt Rüdiger Trojok, groß gewachsen, lange dunkelblonde Haare, zum Pferdeschwanz gebunden, Stoppelbart, modische Brille. Er ist damals Biologiestudent, zu seinem Glück noch in einem Diplomstudiengang. Denn Bachelor und Master im Bologna-Korsett entsprechen nicht unbedingt seiner Vorstellung von Wissenserwerb und Jungforscherdasein. Er hat auch nicht unbedingt vor, nach dem Studium zu promovieren und sich mit unsicheren Aussichten zwischen die Mühlsteine der akademischen Karrieremühle zu begeben. Er will Forscher sein, ja. Molekularbiologe sogar, aber er will nach seinen eigenen Vorstellungen forschen. Er will Wissenschaft betreiben, aber nicht als Lakai eines Uniprofs, nicht als Teil eines überbürokratisierten Systems, in dem Strukturen, arrivierte Lehrstuhlinhaber, Interessengruppen, Geldtöpfe und die Gutachter der Deutschen Forschungsgemeinschaft bestimmen, was geforscht wird und was nicht, wer wo einen Job bekommt und wer nicht.

Zu Ostern 2011 findet in Freiburg das statt, was wir in »Biohacking – Gentechnik aus der Garage« später als den »Ersten Deutschen Biohack« bezeichnen werden. Einer der Autoren dieses 2013 im Hanser-Verlag erschienenen Buchs ist mit dabei an jenem Osterwochenende. Er heißt Sascha Karberg, ist ein renommierter Wissenschaftsautor und studierter Biologe, und auch er schabt sich im Mund herum, damit sich ordentlich Schleimhautzellen lösen. Die Dritte im Bunde ist Lisa Thalheim aus Berlin, damals Informatikstudentin, Computerhackerin und ebenfalls angehende Biohackerin. Sie hat sich jedenfalls gebraucht eine Maschine zum Vervielfältigen von Erbmaterial gekauft. Es ist ein Gerät, das ein paar Jahre zuvor noch den Wert einer Doppelhaushälfte in einer deutschen Vorstadt hatte, nun aber für weniger als 1.000 Euro zu haben war. Mit seiner Hilfe soll die DNA aus den Mundschleimhäuten der drei Mitstreiter im ersten deutschen Biohack aufbereitet werden.

Allein dass die damals Beteiligten auch fünf Jahre später noch in Sachen Biohacking unterwegs sind, zeigt, dass es nicht jene wirre Idee war, als die sie anfangs von vielen aus dem Bio-Establishment hingestellt wurde. Lisa etwa ist Organisatorin von Biohacking-Aktivitäten in Berlin. Sascha begleitet das Thema ebenso wohlwollend wie kritisch als Autor und Experte. Und Rüdiger ist heute einer der national und international aktivsten Protagonisten der Do-it-yourself-Biologie und arbeitet zudem als Technikfolgenanalyst auf diesem Gebiet.



Und er hat dieses Buch geschrieben. Es ist kein schneller Hack, sondern das Ergebnis jahrelanger Arbeit. Rüdigers Buch ist nichts anderes als ein Meilenstein. Es ist einerseits eine ganz neue Art von Biologiebuch, weil es Sach- und Lehrbuch und Praxisführer in einem ist. Es ist aber auch eine Standortbestimmung der modernen molekularen Biologie – aus einer Perspektive und für einen Standort, die sonst allzu häufig übergangen werden. Es sind Perspektive und Standort des normalen Bürgers und der normalen Bürgerin, die sich mit der typischen »Hände-weg-nur-gucken-das-ist-alles-eh-zu-kompliziert-und-potenziell-gefährlich-für-euch«-Attitüde vieler Profiforscher, Wirtschaftsvertreter und auch Politiker nicht mehr zufriedengeben wollen.

...

Zu der Zeit, als dieses Buch kurz vor der Drucklegung steht, läuft in Paris nicht nur gerade die als entscheidend für die Zukunft des Planeten eingestufte Klimakonferenz. In Washington findet gleichzeitig auch eine Tagung zu den jüngsten Entwicklungen der Gentechnik statt. Es geht dort um Methoden, mit denen man gezielt Gene verändern und Erbanlagen reparieren – aber auch manipulieren – kann. Es ist eine Technik, die es zur Zeit des »Ersten Deutschen Biohacks« überhaupt noch nicht gab, die vier Jahre später aber bereits Standard in Labors weltweit ist. Sie und vieles andere, was heute »moderne Wissenschaft« heißt, sind teuer und bislang nur in Hightech-Labors machbar. Doch andere Techniken, die vor zehn Jahren noch genauso kostspielig wie kompliziert waren, sind heute viel einfacher, billiger oder schlicht als Serviceleistungen zu haben. Sie und die Geräte und Reagenzien dafür passen auch ins Budget eines ganz normalen und normalverdienenden interessierten Bürgers.

Die rasante Entwicklung der Biologie und die finanziell und technisch sinkenden Schwellen, zumindest ein bisschen moderne Biologie zu betreiben, sind zwei der Grundvoraussetzungen für Biohacking, DIY-Biologie, Biofrickeln – oder welche Bezeichnung auch immer einem zusagen mag. Die wichtigste Voraussetzung aber ist ein wachsendes Bewusstsein darüber, welche Implikationen moderne molekulare Biologie hat und noch haben wird: Denn diese sich rasant entwickelnde und in der Praxis immer machbarer werdende Wissenschaft samt ihren Technologien bringt vergleichbare Chancen und Risiken mit sich wie etwa der Klimawandel und die Technologien und Strategien, mit denen die Menschheit ihm begegnen wird. Beides ist etwas, was uns alle betrifft.

...

Biohacker geben sich gern locker und sagen, sie wollten doch nur spielen. Das mag oft sogar stimmen. Und wer schon einmal erfolgreich einen Versuch durchgezogen hat – egal ob sich das Labor in der Waschküche in Opas Keller oder an einem renommierten Institut befand –, wird wissen, wie viel Spaß und Befriedigung so etwas bringen kann. Doch Biohacking auf eine Stufe mit Modelleisenbahnbastelei oder selbst dem Heimwerker-Restaurieren von Biedermeierkommoden zu stellen, greift doch zu kurz. Es kann zwar reine Spaßfrickelei mit Molekülen statt mit Lötzinn und Schraubenzieher sein, aber auch viel mehr. Und es hat durchaus Parallelen zum Computerhacking: Biohacking ist nicht die einzige, aber eine der potentesten Möglichkeiten, Technologien und Erkenntnisse, die jeden heute und in Zukunft auf diesem Planeten lebenden Menschen betreffen, zu verstehen, zu nutzen und kennenzulernen – und zu den Betroffenen zu bringen. Beziehungsweise zu holen.

Denn gebracht – von den Habenden – wird nach wie vor wenig. Etablierte Wissenschaftler sind ebenso wie Politiker und Administratoren meist, zurückhaltend formuliert, zurückhaltend. Ihr Wissen können Forscher kaum zurückhalten, denn sie müssen es ja publizieren, sonst ist es nichts mit der Karriere. Aber die Anwendung dieses Wissens oder vielleicht gar die hacker-typische Umwidmung von Wissen und Technik zu etwas ganz Neuem durch Amateure, Bastler, Hacker ist ihnen nicht geheuer.

Zwar sollen sich Bürger und Wissenschaft näherkommen – an »Tagen der offenen Tür« und in »langen Nächten« sowie über PR, in die Unis und Institute nicht geringe Ressourcen stecken. Auch »Citizen Science«, in der Bürger tatsächlich selbst bei der Wissenschaft mitmachen sollen, ist in aller Munde. Aber Letzteres bitte direkt kontrolliert und dirigiert und eher im Sinne von Zuträgern, Hiwis, Jägern und Sammlern, die Beobachtungen beisteuern oder Proben nehmen und einschicken. Das ist unerlässlich, wenn man etwa flächendeckend herausfinden will, welche Vögel in deutschen Gärten und welche Bakterien in amerikanischen Feuerlöschteichen wachsen. Alles mit klar verteilten Rollen. Aber Gentechnik aus der Dachkammer oder der Garage? Bitte nicht.

Die biotechnologische Gegenwart ist jedoch kein Wunschkonzert für geladene Gäste aus Academia und Politik. Sie ist ein Fakt voller Fakten. Zu diesen Fakten gehört auch, dass Biotechnologie, je machbarer sie wird, auch machbarer wird für ganz normale Leute mit jeder Menge Ideen. Und von denen kann die eine oder andere vielleicht zu einer echten Innovation führen, auf die ein Profiforscher nie gekommen wäre. Aber natürlich wird sie auch machbarer für solche Leute, die tatsächlich besser die Hände davon lassen sollten.

Es ist ein verständlicher Reflex, aufgrund dieser zuletzt genannten Möglichkeit Verbote zu fordern.

Allerdings zeigt die Geschichte aller Verbote und aller verbotenen chemischen, physikalischen und auch biologischen Basterei – von aufgebohrten Kraftfahrzeugteilen über Schnapsbrennen bis zum Bombenbau –, dass man Basterei zwar verbieten, aber nicht verhindern kann. Das gilt ganz speziell auch für die Basterei mit moderner Technologie: das Hacking von elektronischer Hard- und Software.

Es wird auch gelten für die Basterei mit der Hard- und Software des Lebens.

Es gibt eine Menge Gründe, Biohacking und DIY-Biologie positiv zu sehen. Der schon erwähnte Spaß, den das alles machen kann, ist einer davon. Die Möglichkeit, dass viel Interessantes, Innovatives, Nützliches herauskommt, wenn sich viele Leute mit begrenzten Mitteln, aber mit unbegrenztem Enthusiasmus und grenzenlosen beruflichen, privaten und intellektuellen Hintergründen jenseits von Institutsmauern und Mainstream-Forschung für etwas einsetzen, ist ein weiterer. Am wichtigsten ist aber vielleicht etwas ganz anderes: Eigentlich alles Neue, das je in der menschlichen Kultur aufgetaucht ist, hatte das Potenzial, sowohl sinnvoll genutzt als auch übel missbraucht zu werden – vom Faustkeil über die Religion und das Morsealphabet bis hin zu den Kräften des Atomkerns und der Demokratie selbst. Und ob die sinnvolle, menschenfreundliche Nutzung die Oberhand behielt oder der Missbrauch, hing von einem ab: ob irgendwelche Eliten sich, soweit sie nur konnten, die Deutungs- und Nutzungsmacht darüber verschafften oder ob alle, die wollten, realen Zugang bekamen.

Natürlich ist Regulierung nötig. Auch Nitroglyzerin gibt es nicht in Flaschen abgefüllt im Drogeriemarkt zu kaufen und alte Atomkraftwerke nicht bei eBay. Aber Regulierung darf nicht bedeuten, dass »sicherheitshalber« alles verboten wird und dass jede Person, die Biotechnologie, Gentechnik, synthetische Biologie nicht nur auf dem Papier interessant findet, sondern es auch selbst gern einmal probieren würde, gleich als potenzieller Bioterrorist gilt. Das ist auch deshalb logisch, weil die, für die solche Verbote gemacht sind, die wirklichen potenziellen Schadensstifter also, sich ohnehin eher nicht an Verbote halten. Denn sonst gäbe es ja auch keine Raser, Diebe, Steuersünder und Gesetzesbrecher der noch schlimmeren Art.

Und eines ist sicher: Die riesengroße Mehrheit will nichts Böses, sondern nur in Frieden leben, Spaß haben, etwas bewegen und das berechtigte Gefühl haben, mitbestimmen zu können, wohin es mit der Gesellschaft und den sie mitbestimmenden Technologien geht. Und hier liegt jenseits der derzeit

tatsächlich meist noch spielerischen Anfänge auch ein großes und gesellschaftlich höchst wichtiges Potenzial zukünftigen Biohackings: Die sicher zu erwartenden bösen Hacks hie und da wird die große Mehrheit – überlegen sowohl in ihrer Zahl als auch in ihrer Intelligenz – mit effektiven Gegenhacks beantworten. Auch hier wird es also nicht anders sein als beim Computerhacking, wo sich die Bösen seit Jahrzehnten nach Kräften bemühen, wo aber die Antwort der Guten nicht nur Katastrophen verhindert, sondern auch die gesamte Technologie in Hard- und Software vorangebracht hat.

Es gibt also nur einen Weg. Wer will, muss Zugang zu diesen vielleicht wichtigsten Technologien dieses Jahrhunderts bekommen. Diejenigen, die sie entwickelt haben und weiterhin entwickeln, egal ob sie an Unis oder in Unternehmen arbeiten, stehen dabei ebenso in der Verantwortung, all das zu begleiten und in die richtigen Bahnen zu lenken, wie die Volksvertreter und Gesetzmacher.

Die Biotechnologie und ihre weitere Entwicklung sind Realität, Tatsache. Biotechnologie lässt sich nicht rückgängig machen, so wenig wie man die Produktion von Stahl verbieten oder einer Tollkirschenpflanze das Wachsen untersagen kann. Und auch das Potenzial ist das gleiche. Mit der Tollkirsche kann man jemanden vergiften, aber auch therapieren, aus Stahl kann man Schwerter schmieden, aber auch Pflugscharen. All das haben wir in unserem oben genannten Buch viel ausführlicher erörtert, als es hier möglich ist. Und auch Rüdiger Trojok geht auf den folgenden Seiten ausführlich auf diese und viele andere wichtige Aspekte ein.

...

Rüdiger ist einer der ersten Biohacker überhaupt. Im deutschsprachigen Raum ist er ein absoluter Pionier. Und es ist bezeichnend, dass er und seine Mitstreiter sich von Anfang an mindestens so viele Gedanken über Risiken und Nebenwirkungen und deren Vorbeugung gemacht haben wie über spannende Experimente und intelligente Hacks.

Dieses Buch wird hoffentlich das erste von vielen Büchern zum praktischen und verantwortungsvollen Biohacking sein. Es legt Grundlagen, es ist eine wertvolle, echte Einführung. Es ist ein erster Schritt, Biotech, Gentechnik, synthetische Biologie in die Hände der Bürger zu legen. Es kann ein Grundstein sein für eine neue, echte, moderne und wirklich demokratische – Spaß bringende, aber auch ernsthafte – Bürgerwissenschaft.

Richard Friebe

Berlin, im Januar 2016

# ÜBER DIESES BUCH

Seit einigen Jahren entwickelt sich eine globale Szene aus Bürgerwissenschaftlern, die sich mit der modernen Biologie befassen. Deren Arbeit wurde allgemein als Biohacking bekannt. Für alle Interessierten und Neueinsteiger in das Thema soll dieses Buch als Leitfaden dienen. Das Buch ist in drei Abschnitte aufgeteilt: Theorie, Praxis und Perspektive.

Im ersten Abschnitt, »Theorie«, geht es um das grundlegende Weltverständnis aus molekularbiologischer Perspektive. Angefangen mit dem Beginn des Lebens, wird der Verlauf der Evolution in groben Zügen nach dem heutigen Wissensstand erklärt. Von Bakterien über die Entstehung der Fotosynthese bis hin zu höheren Lebewesen wird anhand von Beispielen illustriert, wie es zu der Vielfalt der heutigen Natur gekommen ist. Nachdem der zeitliche Verlauf geklärt ist, weitet sich der Blick auf das Ökosystem aus, und es wird versucht, die Mechanismen der Evolution und wie die DNA verbreitet wird zu erklären. Anschließend zoomt der Blick ins Molekulare. Um zu verstehen, wie die Natur tickt, werden die Bestandteile der Biomasse und die physikalischen Regeln, nach denen sich diese organisiert, in einfachen Worten beschrieben. Eine Übersicht über den molekularen Baukasten des Lebens dient als Grundlage der digitalen und analogen Biologie. Hier wird der Zusammenhang zwischen dem digitalen Code des Lebens – der DNA – und den analogen Proteinen und Zellbestandteilen hergestellt. Im Detail wird der Mechanismus beschrieben, wie die Zelle von einer abstrakten DNA-Sequenz zu einem komplexen Enzym gelangt.

Im zweiten Abschnitt, »Praxis«, geht es darum, wie man das theoretische Wissen des ersten Teils anwendet. Denn Leben kann man programmieren. Mithilfe moderner Software kann die Synthetische Biologie den digitalen Code des Lebens umschreiben. Anhand eines praktischen Beispiels wird vorgeführt, wie man dabei vorgeht. Um die im Computer entworfene DNA-Sequenz in eine Zelle einzufügen, ist eine Reihe von praktischen Arbeitsschritten nötig. In acht Schritten wird gezeigt, wie man synthetische DNA herstellt, in die Zelle einfügt und den Code in der Zelle ausführt. Um diese Schritte auszuführen, benötigt man ein Labor. Es werden alle relevanten Geräte und ihre Funktionsweisen sowie die Laborgrundausrüstung und die nötigen Reagenzien erklärt, und es werden Hinweise gegeben, wie man sich die nötige Ausrüstung selbst beschaffen kann.

Im dritten Abschnitt, »Perspektive«, wird eine gesellschaftliche Diskussion eröffnet, wie man mit diesem Wissen und den sich ergebenden technischen Möglichkeiten sinnvoll umgehen kann. Die moderne Auffassung des Lebens und die tiefer gehenden Eingriffsmöglichkeiten werden das Verhältnis von Mensch und Natur grundsätzlich verändern. Beim jetzigen Stand der Technik ist das Umprogrammieren von Organismen zwar noch verhältnismäßig aufwendig, ein Ausblick auf die aktuelle exponentielle Entwicklung der DNA-Sequenzier- und -Synthesetechnologie sowie die fortschreitende Laborautomation deutet eine andere Zukunft an. Labors werden bald miniaturisierte computergesteuerte Chips sein, die überall dezentral zum Einsatz kommen können. Gendatenbanken werden dann die wichtigste Ressource darstellen – doch wo liegen die Grenzen dieser globalen Synthetischen Biologie?

Bürgerwissenschaftler haben sich zur Beantwortung dieser Frage mit Bioethik, den gesetzlichen Regelungen zur Biosicherheit und den Konzepten zu geistigem Eigentum befasst. Einige werfen nun die Frage auf, wer das allgemein verfügbare Wissen über die modernen Biowissenschaften zu welchem Zweck einsetzen kann. Neue Akteure, die zunehmende Verbreitung der Technologie und wirtschaftliche Interessen müssen daher in Zukunft mit ethischen Standards und Sicherheitsforderungen in Einklang gebracht werden.

Dieses Buch ist in der Überzeugung geschrieben, dass Forschung und Wissenschaft nicht nur von einer akademischen Elite betrieben werden sollten, sondern alle Bürger Zugang zu wissenschaftlichen Quellen, Techniken und Materialien haben sollten. Jeder sollte sich als Forscher betätigen können, unabhängig von Vorbildung oder Zugehörigkeit zu einem etablierten Forschungsinstitut bzw. kommerziellen Labor.

*»Kunst und Wissenschaft, Forschung und Lehre sind frei.«<sup>1</sup>*

---

1 Auszug aus dem Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland, Artikel 5, Absatz 3, [http://www.gesetze-im-internet.de/gg/art\\_5.html](http://www.gesetze-im-internet.de/gg/art_5.html)

# INHALT

<b>I. THEORIE</b> .....	20
1. EVOLUTION .....	22
1.1 Der Beginn des Lebens .....	23
1.2 Prokaryoten .....	26
1.3 Fotosynthese .....	28
1.4 Eukaryoten .....	29
1.5 Vielzeller .....	34
2. ÖKOSYSTEM .....	38
2.1 Mechanismen der Evolution .....	39
2.2 Vertikaler Gentransfer .....	41
2.3 Horizontaler Gentransfer .....	45
3. BIOMASSE .....	48
3.1 Bausteine des Lebens .....	49
3.2 Die Physik der Biologie .....	53
4. DIGITALE BIOLOGIE .....	58
4.1 DNA und RNA .....	60
4.2 DNA-Replikation .....	63
5. VON DIGITAL ZU ANALOG .....	66
5.1 Transkription .....	67
5.2 Translation .....	70

6.	ANALOGE BIOLOGIE .....	74
6.1	Proteine .....	76
6.2	Proteom und Stoffwechsel .....	78
6.3	Membranen .....	81
<b>II.</b>	<b>PRAXIS .....</b>	<b>84</b>
7.	SOFTWARE .....	86
7.1	Synthetische Biologie .....	87
7.2	Leben programmieren .....	89
7.3	Das Lac-Operon .....	93
7.4	Proteindesign .....	95
8.	WETWARE .....	98
8.1	Ein Bakterium als Fabrik .....	99
8.2	Zellprogrammierung in acht Schritten .....	101
8.3	Gelelektrophorese .....	108
9.	HARDWARE .....	114
9.1	Das Labor .....	115
9.2	Grundausstattung .....	118
9.3	Geräte für den Klonierzyklus .....	120
9.4	Geräte für die Gelelektrophorese .....	127
9.5	Weitere Hacks .....	129



<b>III. PERSPEKTIVE</b> .....	136
10. TECHNOLOGIEENTWICKLUNG .....	138
10.1 DNA-Sequenzierung .....	139
10.2 DNA-Synthese .....	142
10.3 Laborautomation .....	142
10.4 Datenbanken .....	145
10.5 Grenzen der Synthetischen Biologie .....	149
11. WISSENSCHAFT, KUNST UND GESELLSCHAFT .....	152
11.1 Biologen .....	153
11.2 Bürgerwissenschaft .....	155
11.3 Die DIYbio-Szene .....	160
11.4 Bioart .....	163
11.5 Zur Freiheit der Wissenschaft .....	166
11.6 DIYbio und Gesellschaft .....	167
12. ETHIK UND RECHT .....	170
12.1 Bioethik .....	171
12.2 Biologische Sicherheitsstufen .....	176
12.3 Selbstklonierung .....	177
12.4 Patente auf Gene .....	179
12.5 Open-Source-Biotechnologie .....	181
13. ZUKUNFT .....	186
13.1 Infrastruktur und Sicherheit .....	187
13.2 Bio-Commons .....	191
13.3 Szenarien .....	193

<b>IV. ANHANG</b> .....	198
ABKÜRZUNGEN .....	200
GLOSSAR .....	202
BILDNACHWEIS .....	214
<b>INDEX</b> .....	218

# PRAXIS

*»Mache die Dinge so einfach wie möglich – aber nicht einfacher.«  
Albert Einstein (1879–1955)*

II

# SOFTWARE



# 7

*Leben kann man programmieren. Mithilfe moderner Software kann die Synthetische Biologie den digitalen Code des Lebens umschreiben. Anhand eines praktischen Beispiels wird vorgeführt, wie man dabei vorgeht.*

## 7.1 SYNTHETISCHE BIOLOGIE

Die Synthetische Biologie ist eine neue Disziplin der Molekularbiologie. Der Anspruch des Fachs ist, den Code des Lebens lesen und schreiben zu können wie ein Computerprogramm. So sollen neue Organismen geschaffen werden, die nützliche Eigenschaften besitzen, intelligent auf ihre Umwelt reagieren und sich selbst reparieren und replizieren. Es sollen selbstheilende intelligente Biomaterialien, zum Beispiel für Prothesen, entwickelt und zelluläre Computer möglich werden.

Man nimmt an, dass der Stoffwechsel von Zellen so umgebaut werden kann, dass man damit von medizinischen Wirkstoffen bis zu Biotreibstoff quasi alles Mögliche herstellen kann. Im Grunde sind somit neben der programmierten Zelle nur Licht, Luft und ein paar Mineralstoffe notwendig, um hoch spezialisierte Güter zu produzieren.

Dieses Vorgehen ist dank neuer Methoden zur DNA-Sequenzierung, dem Umwandeln chemischer DNA-Moleküle in digitale DNA-Sequenzen und dem umgekehrten Prozess der DNA-Synthese, der chemischen Synthese digitaler Sequenzen in DNA-Moleküle, prinzipiell möglich geworden.

Die Grundannahme der Synthetischen Biologie ist das von Watson und Crick formulierte »Central Dogma«, wonach eine Informationsübertragung in Zellen stets vom Genom über mRNA hin zu Proteinen geschieht, aber niemals umgekehrt. Demnach müssten alle Informationen, die für die Funktionalität einer Zelle relevant sind, im Genom codiert sein. Zellen werden dabei als informationsprozessierende Einheiten betrachtet, deren Funktion es ist, ihren eigenen Code über Generationen zu erhalten, unter Energieverbrauch Materie zu strukturieren und sich dadurch in der Umwelt auszubreiten.

Synthetische Biologen nehmen an, dass eine Reduktion der Komplexität natürlichen Lebens möglich sei. Dies könne durch Reduzierung der als unnötig betrachteten Funktionen der Zellen sowie durch eine vereinfachte Anschauung von biologischer Materie gewährleistet werden. Ein Detailverständnis von biologischen Systemen wäre damit nicht mehr notwendig, da man vielfältige Abstraktionsebenen definieren könnte, die voneinander entkoppelt wären.

In der Synthetischen Biologie werden dafür technische Standards auf DNA-Ebene definiert. Diese kann man, so die Idee, wie Schaltkreise von Computerchips designen und herstellen, sodass die Zelle am Ende die gewünschte Funktion bekommt. Die programmierbare Ebene in Zellen wird dabei einer Programmiersprache gleichgesetzt. Man kann direkt auf DNA-Sequenzebene editieren. Das ist aber ähnlich wie mit dem Binärcode im Computer, es ist fast unmöglich, aus den abstrakten Sequenzen einen größeren Sinnzusammenhang zu erschließen.

Die nächste Stufe sind DNA-Sequenzen, die spezifische Funktionen im Genom haben und in unterschiedlichen Kontexten eine gleichartige und wiedererkennbare Sequenz besitzen. Hier gibt es, wie oben erläutert, Steuerungselemente für Transkription und Translation. Dazu zählen Promotoren, Start- und Stop-Codons, Protein codierende Sequenzen, die man nach der Codon-Sonne in Proteinsequenzen übersetzen kann (siehe Abbildung 5.3), und Terminatoren.

Die DNA-Programmiersprache SBOL (Synthetic Biology Open Language) ist ein nicht kommerzielles Open-Source-Projekt, in dem global einheitliche Standards für Wissenschaft und Industrie definiert werden sollen. Durch die Standards sollen Experimente leichter reproduzierbar werden, und ebenso sollen synthetische Organismen verlässlich programmierbar werden. Im folgenden Kapitel wird eine Auswahl der wichtigsten etablierten Standards vorgestellt.

## 7.2 LEBEN PROGRAMMIEREN

Um Proteine, die wesentlichen Funktionseinheiten in Lebewesen, zu programmieren, muss man einerseits ihre Aminosäuresequenz und damit ihre 3-D-Struktur bestimmen (siehe Kapitel 6.1), andererseits muss ihre Genexpression geregelt werden. Damit ist gemeint, wie viel Protein wann und unter welchen Umständen in der Zelle hergestellt wird. Dazu kann man die Transkription und Translation des zu produzierenden Proteins beeinflussen. Die Regulierung der Genexpression funktioniert in Prokaryoten und einigen Eukaryoten über sogenannte Operons, in denen die Gene von Proteinen organisiert sind.

Ein Operon ist eine Funktionseinheit der DNA, mindestens bestehend aus einem Promotor, einer Ribosomenbindestelle (RBS, für Proteine und RBS siehe die Kapitel 5.1 und 5.2), einem oder mehreren Genen, die Proteine codieren (codierende DNA-Sequenz, CDS), und einem Terminator.

Operons können entweder permanent »an« sein, das heißt, dass die Zelle, sofern Material und Energie zur Verfügung stehen, das codierte Protein dauerhaft produziert. Sie können aber auch an- und ausgeschaltet bzw. ihre Genexpression kann herunter- und heraufgeregelt werden. Dies hängt vom Zustand des Promotors im Operon ab.



**Abbildung 7.1:** Operon in »Synthetic Biology Open Language«-Standardschreibweise. Symbole von links nach rechts:

Promotor



Ribosomenbindestelle (RBS)





Codierende DNA-Sequenz (CDS)



Terminator



Der Promotor dient als Bindestelle für die Polymerase und markiert den Startpunkt für die Transkription – von 5' nach 3', hier in Pfeilrichtung. Manche Promotoren sind dafür bekannt, dass Proteine an ihre DNA-Sequenz binden und die Anlagerung der Polymerase verhindern. Dadurch wird die Synthese der mRNA je nach Promotorzustand aktiviert oder gehemmt, indirekt also auch die Translation der codierten Proteine. Diesen Effekt kann man sich zunutze machen und die Aktivität der Genexpression durch den Einsatz spezieller Promotoren planen.

Ribosomenbindestelle und Terminatoren sind Sequenzen, die auf der mRNA für das Anlagern und Abspringen des Ribosoms zuständig sind und die Translation kontrollieren. Auch die RBS kann man gezielt auswählen. Es gibt starke und schwache Varianten der RBS, zudem unterscheiden sich die Sequenzen bei den verschiedenen Spezies. Stark heißt, dass viel mRNA dieses Operons produziert wird – schwach heißt eher wenig. Die mRNA-Konzentration in der Zelle bestimmt auch indirekt die Proteinkonzentration.

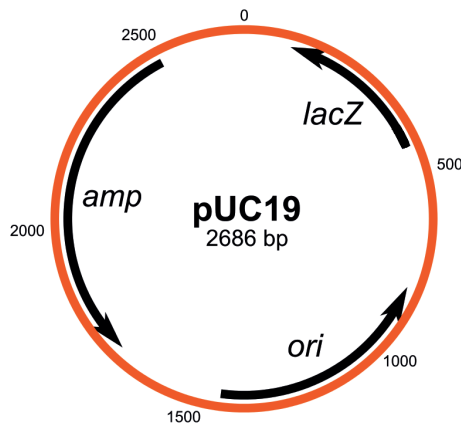
Möchte man also ein Gen aus einer Spezies in eine andere übertragen, müssen Promotor und RBS gegebenenfalls angepasst werden – zumindest wenn der Zielorganismus sehr andersartig ist. Auch bei Terminatoren gibt es spezies-spezifische Varianten. Bei ihnen kommt es allerdings im Wesentlichen darauf an, die Translation möglichst effektiv zu beenden, daher nimmt man einfach einen starken Terminator. Es ist in Prokaryoten und manchen Eukaryoten möglich, zwischen RBS und Terminator mehrere CDS zu positionieren.

Die CDS beginnt mit einem Start-Codon und endet mit einem Stop-Codon. Sie enthält die Sequenz für die Aminosäurekette des Proteins. Auch die Proteinsequenzen kann man speziell designen. Jeder Organismus hat seinen eigenen Codon-Dialekt. Wie in der Codon-Sonne (siehe Abbildung 5.3) gezeigt, codieren mehrere Codons für die gleiche Aminosäure. Allerdings werden manche der Codons häufiger, andere seltener verwendet. Überträgt man ein Gen in eine fremde Spezies, ist es sinnvoll, die Codons zu optimieren.

Neben der Gensequenz kann auch die Aminosäuresequenz editiert werden. Dies ändert die Funktion des Proteins selbst. Genaueres dazu finden Sie im nächsten Kapitel.

Sind Promotor, RBS, CDS und Terminator gewählt, braucht man eine DNA-Sequenz, in die man das Operon einfügen kann. Am besten eignen sich dazu Plasmide (siehe Abbildung 7.2). Viren oder das Genom des Zielorganismus eignen sich prinzipiell ebenso als Speicherort, erfordern aber etwas mehr Wissen über die Lebensweise und die Eigenschaften des Lebewesens.

Plasmide könnte man mit Disketten vergleichen: Es passt nicht viel darauf, aber man kann sie gut bearbeiten. Ein Plasmid ist ein Ring aus doppelsträngiger DNA und hat zwischen 1 Kbp (Kilobasenpaar) und 1.000 Kbp Speicherplatz. Ein Operon hat eine Größe von 1 Kbp bis etwa 20 Kbp, es passen also mehrere Operons auf ein Plasmid.



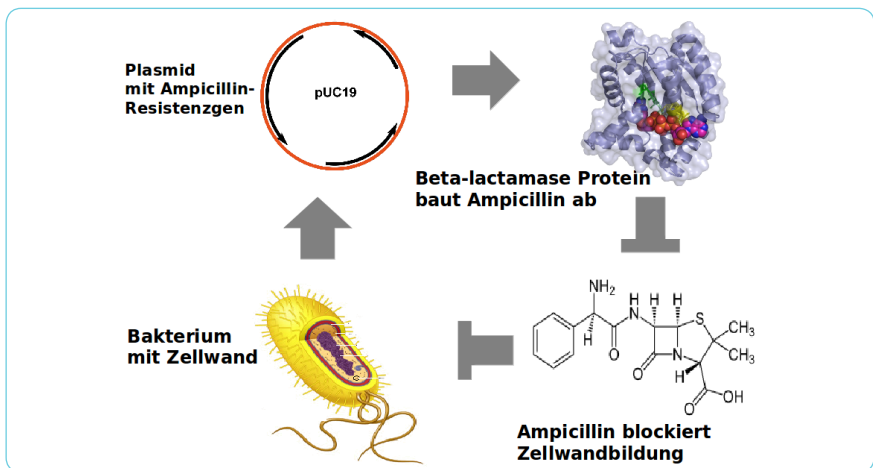
**Abbildung 7.2:** pUC-Plasmid. Schematische Darstellung mit Origin of Replication (*ori*), *lacZ*-CDS und einer Ampicillin-Resistenz-CDS (*amp*, Erläuterung zu *LacZ* siehe Kapitel 7.3, zu *amp* siehe Abbildung 7.3). Die Nummerierung zeigt die Anzahl der Basenpaare an. Es wird in dieser Darstellung auf die Anzeige von RBS und Terminatoren verzichtet.

Zu den Operons gehört auf jedes Plasmid ein Origin of Replication (*Ori*). Der *Ori* ist eine Sequenz auf dem Plasmid, die die Kopienanzahl des Plasmid in der Zelle bestimmt. Der *Ori* startet und steuert die Verdopplung von Plasmiden, indem er einen Proteinkomplex bildet (mehrere Proteine, die sich zu einem

Komplex verbinden), wie ein Schallplattenspieler den Arm die Polymerase auf die richtige Spur setzt und damit den Kopiervorgang startet. Man unterscheidet zwischen:

- *Low Copy*-Plasmidkopienzahl zwischen 1 und 12 pro Zelle
- *Medium Copy*-Plasmidkopienzahl zwischen 15 und 20 pro Zelle
- *High Copy*-Plasmidkopienzahl zwischen 20 und 700 pro Zelle

Je nachdem, was man mit dem Plasmid und der Zelle vorhat (beispielsweise DNA zu vermehren oder Protein zu produzieren, siehe Kapitel 8.2), wählt man einen spezifischen Ori – es gibt immer nur einen pro Plasmidtyp und Zelle. Ein Standardverfahren beim Design von Plasmiden ist, eine Antibiotikaresistenz mit einzubauen. Dazu muss ein Operon, das für ein Resistenzgen codiert ist, in den Code integriert werden. Das Resistenzgen sorgt dafür, dass die Bakterien, die mit dem Plasmid transformiert worden sind, auch in einer Umgebung, in der das Antibiotikum präsent ist, wachsen können. Bakterien, die dieses Plasmid nicht besitzen, sterben ab (siehe Abbildung 7.3).

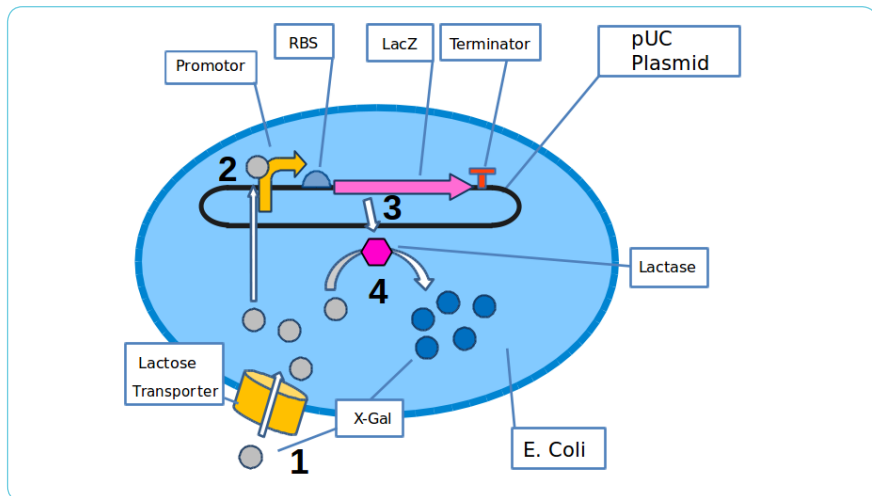


**Abbildung 7.3:** Ampicillin-Resistenz-Wirkweise. Ampicillin ist ein kleines Molekül, das die Zellwandbildung von Bakterien blockiert, sodass diese sich so nicht mehr vermehren können. Nimmt ein Bakterium jedoch ein Plasmid mit einem Ampicillin-Resistenz-Gen (wird häufig mit »amp« abgekürzt) auf und exprimiert das codierte Protein (genannt Beta-Lactamase), kann Ampicillin in der Zelle abgebaut werden.

Man macht sich diesen Trick zunutze, um die erfolgreich umprogrammierten Bakterien von denen zu trennen, die kein Plasmid aufgenommen haben. Denn nur ein Bruchteil der Zellen, die mit der DNA in Kontakt kommen, nimmt diese tatsächlich auf. Im Labor verwendet man ausschließlich Antibiotika, die medizinisch nicht mehr von Nutzen sind, zum Beispiel Ampicillin – ein dem Penicillin sehr ähnliches Molekül.

### 7.3 DAS LAC-OPERON

Ein klassisches Beispiel für ein Operon ist das Lactose-Operon von *E. coli* (siehe Kasten »Lac-Operon-Sequenzen«), kurz Lac-Operon. Es ist für den Abbau von Lactose wichtig. Bei Anwesenheit von Lactose wird der Promotor des Operons angeschaltet, und das Enzym Lactase exprimiert (also transkribiert und translatiert). Lactase spaltet Lactose in verdauliche Galactosidase und Glucose, die im Stoffwechsel in ATP umgewandelt werden können. Das Gen für Lactase wird LacZ genannt.



**Abbildung 7.4:** Funktionsweise des Lac-Operons (vereinfacht dargestellt). **1.** X-Gal (anstelle von Lactose) wird durch den Lactose-Transporter in eine *E. coli*-Zelle aufgenommen und **2.** aktiviert den Promotor des Lac-Operons. **3.** Das LacZ-Gen, das für Lactase codiert ist, wird transkribiert und translatiert. **4.** In der natürlichen Umgebung baut Lactase Lactose enzymatisch ab. Im Versuch mit X-Gal wird diese in einen blauen Farbstoff umgewandelt.

## LAC-OPERON-SEQUENZEN



Lactose-induzierbarer Promotor:  
TTTACACTTTATGCTTCCGGCTCGTATGTT



Ribosome Binding Site (N steht für ein beliebiges Nukleotid):  
TCTACAGAAAGANNNGANNNACTAC



CDS von LacZ mit Start- und Stop-Codon (fett markiert):  
ATGACCATGATTACGGATTCACTGGCCGTCGTTTTACAACGT-  
CGTGACTGGGAAAACCTGGCGTTACCCAACCTAATCGCC-  
TTGCAGCACATCCCCCTTTCGCCAGCTGGCGTAATAGCGAA-  
GAGGCCCGCACCGATCGCCCTTCCCAACAGTTGCGCAGC-  
CTGAATGGCGAATGGCGCTTTGCCTGGTTTCCGGCACCA-  
GAAGCGGTGCCGAAAGCTGGCTGGAGTAATAA



Terminator:  
CCAGGCATCAAATAAAACGAAAGGCTCAGTCGAAAGAC-  
TGGGCCTTTCGTTTTATCTGTTGTTTGTGCGGTGAACGCTCTC



**Abbildung 7.5:** E. coli auf Agar-Nährboden mit X-Gal. Die Bakterien wurden mit dem Lac-Operon transformiert. Einige enthalten das Operon jedoch nicht und bleiben weißlich. Die transformierten Zellen färben sich blau ein.

Man kann dieses Operon synthetisch herstellen oder aus dem Bakteriengenom herauskopieren und in ein Plasmid, beispielsweise das pUC-Plasmid, einbauen. Wie man das genau macht, wird in Kapitel 8.2 erklärt. Dieses Plasmid kann man dann in eine Zelle einbringen, die Lactose auf natürliche Weise nicht verdauen kann, da ihr das Gen LacZ fehlt.

Es gibt ein Molekül, X-Gal genannt, das mit Lactose fast identisch ist. Es aktiviert den Promotor genauso wie Lactose und wird auch von Lactase enzymatisch bearbeitet. Das Resultat der Enzymreaktion ist jedoch nicht Galactose und Glucose, sondern ein blauer Farbstoff. Hat man Bakterienzellen mit einem Plasmid versehen, das das Lac-Operon beinhaltet, kann man mit X-Gal die Zellen blau anfärben. In Abbildung 7.4 ist der genaue Ablauf des Vorgangs dargestellt, in Abbildung 7.5 sieht man ein Foto der blau gefärbten Bakterien.

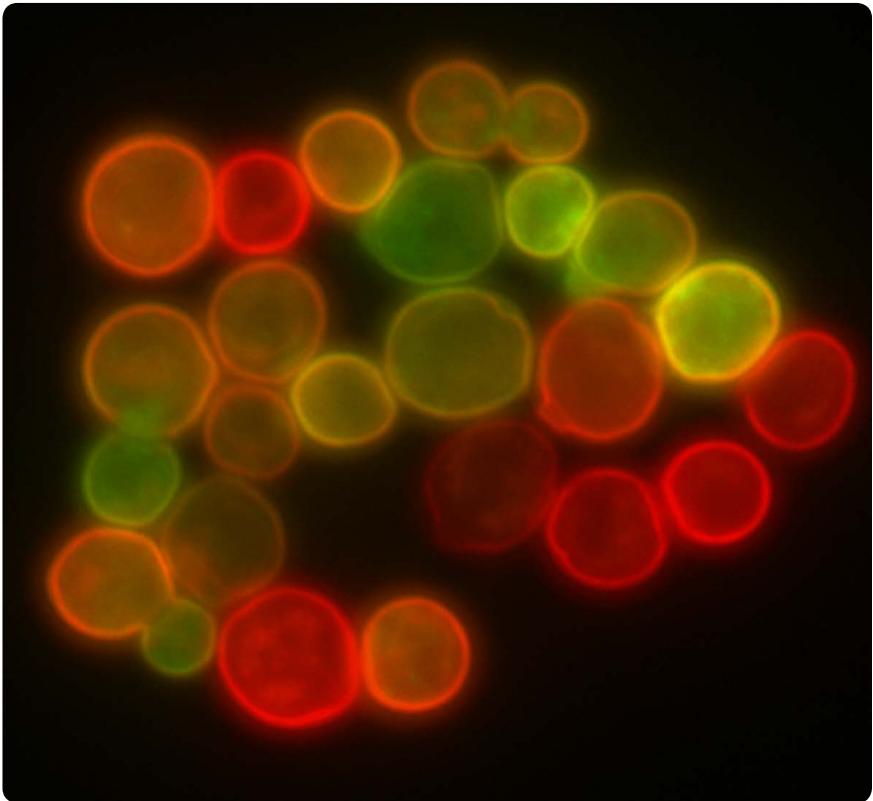
## 7.4 PROTEINDESIGN

Proteine kann man scannen und auch designen. Die 3-D-Struktur kann in Speziallabors mittels Röntgenkristallografie atomgenau aufgelöst und im Computermodell abgebildet werden. Ein gutes Open-Source-Programm zur Darstellung der Kristallstrukturen ist Pymol, mit dem übrigens die Proteindarstellungen in diesem Buch generiert wurden: <https://www.pymol.org/>

Die von der internationalen Wissenschaftler-Community erforschten Strukturen kann man in digitalen Datenbanken im Internet im PDB-Format frei abrufen: <http://www.rcsb.org> und <http://www.ebi.ac.uk/>

Es gehört jedoch einiger Rechenaufwand dazu, Proteinstrukturen im Computer korrekt darzustellen. Das Spiel Foldit verfolgt daher, ähnlich wie Seti@Home (ein Programm zur Suche nach extraterrestrischem Leben, das man sich auf seinem Heimcomputer installieren kann), den Ansatz, Bürger in die Forschung einzubinden. Auf der Website des Projekts kann man im Wettbewerb mit anderen Spielern dreidimensionale Proteine falten und so zur Erforschung der Kristallstrukturen beitragen. Wer also einen praktischen Zugang zum Verhalten von Aminosäureketten bekommen möchte, kann das sehr gut mithilfe des Onlinespiels Foldit tun: <https://fold.it/portal/>

Da die Proteinstruktur im Computer abbildbar ist, kann man sie dort auch nahezu beliebig umformen. Man muss natürlich die Geometrie der Aminosäuresequenz in Betracht ziehen, die nicht alle, aber doch sehr viele räumliche Positionen einnehmen kann, wenn man sie entsprechend anordnet. So haben Wissenschaftler beispielsweise das 1962 in der Qualle *Aequorea victoria* entdeckte Protein Green Fluorescent Protein (GFP) so umstrukturiert, dass es statt grünen Lichts andere Spektren abstrahlt (siehe Abbildung 7.6). Es wurden so aus dem im Original grünlich fluoreszierenden Protein blaue, gelbe, orangefarbene und rote Proteine generiert.



**Abbildung 7.6:** Hefezellen, die mit verschiedenen Varianten des GFP eingefärbt wurden. Das Gen des GFP und seine Variationen wurden dazu in die Genome der Zellen eingefügt, woraufhin diese das entsprechende Protein exprimieren und so ihre Farbe verändern.

---

## WEITERE INFORMATIONEN ZUM THEMA

Pymol, <https://www.pymol.org>

Foldit, <https://fold.it/portal>

Proteindatenbanken, <http://www.rcsb.org> und <http://www.ebi.ac.uk>



# INDEX

## A

Abstammungsbaum 36  
Adenin 60, 209  
ADP 83, 200  
Agar 109, 202  
Agarose 109–111, 127, 202  
Agarose-Gel 109–111, 202  
Algenfossilien 23  
Alkohol 32  
Alpha helices 76  
Alterungsprozess 41  
Aminosäure 202  
Aminosäuresequenz  
  Einbuchstabencode 75  
amp 200  
Ampicillin 93  
Analog 66  
Analoge Biologie 74  
  Membranen 81  
  Proteine 76  
  Proteom 78  
  Stoffwechsel 78  
Antibiotika 93  
Apoptose 202  
Archaeen 26, 202  
Atom 49, 203  
  Atommasse 50  
  Bindungspartner 52  
  Kern 51  
ATP 76, 83, 200, 203  
ATPase 83, 203  
Autoklavieren 203

## B

Bakterien 26  
Base 60, 203  
Bausteine des Lebens 49  
Beginn des Lebens 23  
Beta-Faltblätter 76  
Bier 31  
Bindung  
  chemisch 203  
Bindungsenergie 55  
Bioart 163  
BioBricks 150  
  BricksKonzept 184  
Bio-Commons 163, 191  
Bioethik 15, 171  
Biofilm 28  
Biohacking 155, 156  
Biologen 153  
Biologie  
  analog 74  
Biologische Sicherheitsstufen 176  
Biomasse 40, 48  
  Bausteine des Lebens 49  
  Planet 40  
Biopunk 155  
Biosicherheit 15  
Biotechnologie  
  Open Source 181  
Biowissenschaft 15  
Bp 200  
Brownsche Molekularbewegung 203  
Bürgerwissenschaft 155

**C**

Calciumcarbonat 28  
 CDS 71, 200, 204  
 Central Dogma 88  
 Chloroplasten 203  
 Chromosomen 204  
 Cider 31  
 Citizen Science 157  
 Code  
   digital 61  
   DNA 61  
 Codon 70, 90  
 Codon-Sonne 72  
 Creative Commons 182  
 Crick, Francis 150  
 CRISPR-Technologie 180  
 Crowdsourcing 32, 204  
 Cyanobakterien 28, 46, 204  
 Cytosin 60, 209

**D**

Darm 26  
 Darmflora 26  
 Darwin, Charles 43  
   Evolution 45  
 Datenbanken 145  
 DH5alpha 26  
 Diffusion 204  
 Digital 66  
 Digitale Biologie 58  
   DNA 60  
   RNA 60

Dinosaurier 35  
 DIYbio (DIY-Biologie) 155, 160  
   Gesellschaft 167  
   Szene 160  
 DIY-Genomics 155  
 DNA 14, 60, 200  
   Aminosäuresequenz 70  
   Base 67  
   Code 61  
   Doppelhelix 61  
   einfügen 105  
   kopieren 103  
   Modellorganismus 26  
   Patente 179  
   Polymerasen 63  
   Programmiersprache 88  
   Replikation 63, 204  
   Sequenzierung 139  
   Synthese 63, 142  
 DNA-Extraktion 101  
 DNA-Replikation 63  
 DNA-Sequenzierung 102  
   Kosten 139  
 DNA-Synthese 102  
 DSMZ 200

**E**

E. coli 26, 106, 205  
   Produktion 101  
 Einzeller 42  
   Populationschwund 43  
   Reproduktionsgeschwindigkeit 43

Elektron 50  
 Elektroporation 106  
 EMBL 200  
 Endomembransystem 29, 204  
 Endoplasmatisches Retikulum 204  
 Endosymbionten 32  
 Endosymbiontentheorie 204  
 Entropie 55, 205  
 Enzym 205  
 Epigenetik 63, 69, 205  
 Eppendorf Tube (Eppi) 119, 200, 205  
 Erlenmeyerkolben 205  
 Escherichia coli. (*siehe* E. coli)  
 Essig 31  
 Ethik 170  
   Bioethik 171  
   Selbstklonierung 177  
 Eukaryoten 29, 205  
 Eukaryotische Zelle  
   pflanzlich, Schema 33  
   tierisch, Schema 30  
 Evolution 22, 39, 70, 205  
 Exprimierung 205

## F

FabLab 158  
 Falcon 205  
 Flagellum 26, 206  
 Fließgleichgewicht 206  
 Foldit 206  
 Fortpflanzung 42, 206  
   Einzeller 42  
   Eizelle 44  
   geschlechtlich 44  
   Spermium 44  
 Fotosynthese 28  
 Frugale Innovation 156

## G

Garagenbiologie 155  
 Geißel 206  
 Gelelektrophorese 108, 127, 206  
   Geräte 127  
 Gemeingüter 182  
 Gen 206  
   Patente 179  
 Gendrift 206  
 Genetische Information 41  
 Genetischer Code 27, 39, 206  
 Genexpression 76, 205, 207  
 Genom 32, 41, 45, 67, 68, 80, 207  
   Preis 139  
 Genomsequenz 26  
 Gentechnik 103  
 Gesellschaft 152  
   DIYbio 167  
 GFP 77, 200  
   Darstellungen 77  
 Gibson Assembly 207  
 Glykolyse 80, 207  
 Golgi-Apparat 30, 207  
 Guanin 60, 209

## H

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 200  
 Hacken 156  
 Hackerspace 158  
 Hardware 114  
   Gelelektrophorese 127  
   Grundausstattung 118  
   Hacks 129  
   Klonierzyklus 120  
   Labor 115  
 Hefe 31, 32  
   Backhefe 32, 45  
   Synthetisierung 32

Helix 60, 63  
 His-Tag 207  
 Histidin 108, 207  
 Horizontaler Gentransfer 39, 45, 207  
   Algenteppich 46  
   Prokaryoten 45

**I**

iGEM 154  
 Infrastruktur 187  
 Inkubation 107, 207

**J**

Jugaad 156

**K**

K12 26  
 kb 200  
 kBp 200  
 Keimbahn 207  
 Klonierzyklus 120  
   Geräte 120  
 Kohlenhydrate 28, 53, 208  
 Kohlenstoff 52  
 Kontinentaldrift 208  
 Kunst 152

**L**

Labor 115  
 Laborautomation 142  
 Lac-Operon 93  
   Sequenzen 94  
 Lactase 99  
 Leben programmieren 89  
 Lichtenergie 28  
 Lipide 53, 208

**M**

Makerspace 158  
 Massenaussterben 208  
 Mechanismen der Evolution 39  
 Membranen 81  
 Membranprotein 203  
 Membranrezeptoren 208  
 Mensch 44  
   Anzahl der Zellen 49  
   genetische Information 44, 60  
   Körper 49  
 Messenger 67  
 Methangärung 26  
 Mikroalgen 28  
 Mitochondrien 30, 33, 208  
 Molekül 208  
 mRNA 67, 90, 200  
 Mullis, Kary 103  
 Mutation 41, 43, 209

**N**

Nanodrop 125  
 Nanopore-Sequencing 139  
 Neuronales Netzwerk 76  
 Neutron 50  
 Nukleid 209  
 Nukleinsäuren 53  
 Nukleotid 209

**O**

Ökosystem 38  
 Oligonukleotid (Oligo) 122, 209  
 Open Source 181  
   Biotechnologie 181  
 Operon 91, 209  
 Organell 209

Organismen 26  
 einzellig 26  
 Ori 201  
 Ozonschicht 29

## P

Pansen 26, 210  
 Parasiten 45  
 Patente 179  
 PCR 103, 201, 210  
 Ablauf 104  
 PDB 201  
 Penicillin 93  
 Phagen 45, 210  
 Physik der Biologie 53  
 Pilus 27, 210  
 Plasmide 62  
 Polymerase 210  
 Primer 103, 210  
 Prokaryoten 26, 210  
 Archaeen 26  
 Bakterien 26  
 Schema 27  
 Volumen 29  
 Promotor 69, 210  
 Protein 26, 53, 76, 211  
 Extraktion 107  
 Funktionen 76  
 Primärstruktur 76  
 Quartärstruktur 76  
 regulatorisch 69  
 Sekundärstruktur 76  
 Tertiärstruktur 76  
 Proteindesign 95  
 Proteinexpression 26  
 Proteinmaschinerie 41, 63  
 Proteom 62, 67, 78, 80, 211

Proton 50  
 Protozelle 39  
 Pseudomonas syringae 46

## R

RBS 70, 201  
 Recht 170  
 biologische Sicherheitsstufen 176  
 Selbstklonierung 177  
 Reparaturmechanismus 41  
 Ribosomen 70, 211  
 Ribosomenbindestellen 73  
 RNA 60, 201  
 Aminosäurekette 70  
 Basen 67  
 Polymerasen 63

## S

Saccharomyces cerevisiae 31, 211  
 Sauerstoff 29  
 Entstehung 28  
 Säugetiere 35, 41  
 SBOL 88  
 CDS 90  
 Operon 89  
 Promotor 89  
 RBS 89  
 Terminator 90  
 Sedimentation 211  
 Selbstklonierung 177  
 Selbstklonierungsparagraf 178  
 Selbstreproduktionsfähigkeit 26  
 Selektion 43, 106  
 Sexuelle Reproduktion 42, 43, 80, 211  
 Sexuelle Selektion 40  
 Sicherheit 187

Software 86  
 Lac-Operon 93  
 Leben programmieren 89  
 Proteindesign 95  
 Synthetische Biologie 87  
 Sonnensystem 23  
 Entstehung 24  
 Spektrometer  
 Nanodrop 125  
 Spirulina 28, 211  
 Mikroalgen 28  
 Start Codon 70, 90  
 Stoffwechsel 26, 45, 53, 78, 211  
 Stop Codon 70, 90  
 Synthetische Biologie 87  
 Grenzen 149  
 Synthetischer Biologie Oath 174

## T

Taq 201  
 Taq-Polymerase 212  
 Technologieentwicklung 138  
 Datenbanken 145  
 DNA-Sequenzierung 139  
 DNA-Synthese 142  
 Laborautomation 142  
 Temperatur (T) 201  
 Terminator 212  
 Thermocycler 105, 212  
 Thermodynamik 55, 212  
 Thymin 60, 209  
 Transfer 71  
 Transformation 106  
 Transilluminator 128, 212  
 Transkription 67, 212  
 Schema 69

Translation 67, 70, 212  
 Transposon 45, 62, 212  
 Transposonproteine 62  
 tRNA 71, 201, 212  
 Turn 76, 213

## U

Überlebensstrategie 45  
 Ursprungsorganismus 27  
 Ursuppe 23  
 UV-Licht 29

## V

Vermehrung  
 vegetativ 45  
 Vertikaler Gentransfer 39, 41, 213  
 Vesikel 30, 213  
 Vielzeller 34, 43, 213  
 Fortpflanzung 43  
 sexuelle Reproduktion 43  
 Viren 45, 213

## W

Wasserstoffatom 49  
 Wasserstoffmolekül 51  
 Schema 51  
 Watson, James 150  
 Wein 31  
 Wetware 98  
 Bakterium als Fabrik 99  
 Gelelektrophorese 108  
 Zellprogrammierung 101  
 Wirtszellen 62  
 Wissenschaft 152  
 Freiheit 166

## Z

- Zelle
  - Darstellung des Stoffwechsels 79
  - männlich 45
  - weiblich 45
- Zellen
  - Flagellum 26
  - Geruchssinn 26
- Zellkultur 213
- Zellmembran 26, 213
- Zellorganellen 29
- Zellprogrammierung 101
  - Ablaufdiagramm 100
  - DNA einfügen 105
  - DNA-Extraktion 101
  - DNA kopieren 103
  - DNA-Sequenzierung 102
  - DNA-Synthese 102
  - Inkubation 107
  - Protein-Extraktion 107
  - Transformation 106
- Zellteilung 28, 42
- Zukunft 186
  - Bio-Commons 191
  - Infrastruktur 187
  - Sicherheit 187
  - Szenarien 193
- Zytoplasma 76, 80
- Zytoskelett 30, 213

# BIOHACKING

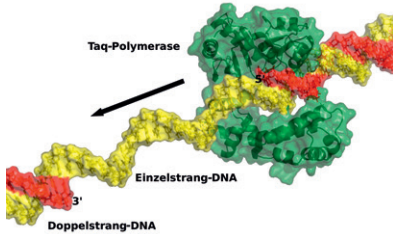
## GENTECHNOLOGIE FÜR ALLE

Rüdiger Trojok

### Leben kann man programmieren

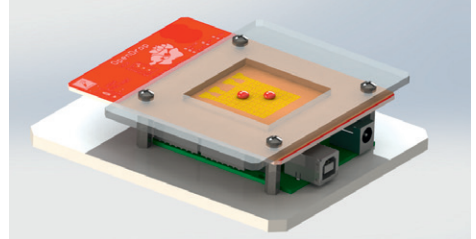
Das moderne Verständnis des Lebens und die tiefgehenden Eingriffsmöglichkeiten werden das Verhältnis von Mensch und Natur grundsätzlich verändern. Labs werden bald miniaturisierte, computergesteuerte Chips sein, die überall dezentral zum Einsatz kommen können. Gendatenbanken werden dann die wichtigste Ressource darstellen – doch wo liegen die Grenzen dieser globalen Synthetischen Biologie?

Theoretische Zusammenhänge sind anschaulich bebildert und ausführlich erklärt.



*Taq-Polymerase-Protein: Mit molekularen Werkzeugen kann man DNA bearbeiten.*

Das Buch erläutert nicht nur die Theorie, sondern auch die Praxis des Biohackings.



*OpenDrop-Prototyp: In Zukunft wird man mit computer-gesteuerten Biochips Zellen umprogrammieren können.*

**„Das Buch ist kein schneller Hack,  
sondern das Ergebnis jahrelanger Arbeit.  
Rüdigers Buch ist nichts anderes als ein Meilenstein.  
Es ist eine ganz neue Art von Biologiebuch,  
weil es Sach- und Lehrbuch und Praxisführer in einem ist.“**  
*(Richard Friebe)*

Als Einstieg ins Thema skizziert das Buch zunächst den Verlauf der Evolution nach heutigem Wissensstand und vermittelt die biologischen Grundlagen. Erfahren Sie dann, wie Informationen auf DNA codiert werden, wie der DNA-Code gelesen und in Proteine übersetzt wird und wie man ihn am Computer ändern kann. Der Autor Rüdiger Trojok zeigt Ihnen praxisnah, wie man synthetische DNA herstellt, sie in eine Zelle einfügt und den Code in der Zelle ausführt. Wenn Sie selbst Hand anlegen wollen, kommen Sie um eine kleine Laborausstattung nicht herum; lesen Sie, welche Grundausstattung Sie benötigen.

Natürlich bleibt auch die Frage nach dem sinnvollen und verantwortungsbewussten Umgang mit dem Wissen und den sich daraus ergebenden technischen Möglichkeiten nicht unbeantwortet.

Biohacking steht erst am Anfang seiner Entwicklung; wo die Reise hingehen kann, zeigt dieses Buch. Es soll Ihnen als interessiertem Laien als Leitfaden für Theorie und Praxis dienen und die Perspektiven dieser hochaktuellen Technologie aufzeigen.



Besuchen Sie  
unsere Website  
[www.franzis.de](http://www.franzis.de)

**FRANZIS**