



Mechthild Regenass-Klotz

# Grundzüge der Gentechnik

Theorie und Praxis

3., erweiterte und überarbeitete Auflage

Birkhäuser Verlag  
Basel · Boston · Berlin

Autorin:

Dr. Mechthild Regenass-Klotz

Mühlerain 14

CH-4107 Ettingen

Bildnachweis und Copyrightvermerk

© 1998 Markus Senn, Fotograf, Bern, für folgende Abbildungen: Abb. 6c, 10b, 24a, 32b, 44, 45; © 1998 Prof. H. Hengartner, Universität Zürich, für folgende Abbildungen, die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden: Abb. 22, 36; © 1998 Dr. P. K. Burkhardt, ETH Zürich, für folgende Abbildung, die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde: Abb. 41b © 1998 Interpharma für folgende Abbildungen, die dem Arbeitsordner für Gentechnik «Prinzip und Anwendung» mit freundlicher Genehmigung von der Interpharma entnommen wurden: Abb. 6b, 19, 20, 21, 26, 31, 32a, 39, 41a; © 1998 Novartis, Basel, für folgende Abbildung, die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde: Abb. 42; © 1998 Monsanto, St. Louis, MO, USA (vertreten in der Schweiz durch die P. Bütikofer AG, Zürich, Frau Eggenberger) für folgende Abbildung, die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde: Abb. 43.

Die Vorlagen zu den Abbildungen 15 und 24a wurden freundlicherweise von Dr. P. Fürst und PD Dr. J Heim, Novartis, Basel, Schweiz, zur Verfügung gestellt. Die Vorlagen für die Abbildung 45 wurde freundlicherweise von der Firma Novo Nordisk, Dittingen, Schweiz bereitgestellt.

### **Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

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

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

© 2005 Birkhäuser Verlag AG, Postfach 133, CH-4010 Basel, Schweiz

Ein Unternehmen von Springer Science+Business Media

Buch- und Umschlaggestaltung: Micha Lotrovsky, Therwil, Schweiz

Gedruckt auf säurefreiem Papier, hergestellt aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff. TCF ∞

Printed in Germany

ISBN 10: 3-7643-2421-X

ISBN 13: 978-3-7643-2421-6

9 8 7 6 5 4 3 2 1

[www.birkhauser.ch](http://www.birkhauser.ch)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	5
<b>Vorwort</b> .....	7
<b>Einleitung</b> .....	11
<b>Theorie</b> .....	13
<b>I Desoxyribonukleinsäure (DNA) – Faden des Lebens</b> .....	13
I.1 Chemische Struktur der DNA .....	13
I.2 Replikation – Verdoppelung der DNA .....	20
I.3 Transkription – Überschreibung der DNA in mRNA, erster Schritt zur Entschlüsselung des genetischen Codes .....	26
I.4 Translation – Übersetzung der mRNA in Protein: der genetische Code ist umgesetzt .....	33
I.5 Restriktionsenzyme – Spezifische DNA-Scheren .....	36
<b>II Klonieren – Vermehrung kombinierter DNA-Abschnitte</b> .....	40
II.1 Vektorsysteme – Einbau der DNA in Genfähren und der Gentransfer .....	40
II.1.1 Plasmide .....	42
II.1.2 Bakteriophagen .....	44
II.1.3 Cosmide .....	47
II.1.4 Viren .....	48
II.1.5 Bakterien .....	51
II.1.6 Physikalische Methoden .....	54
II.2 Wirtssysteme – Dort wird die kombinierte DNA vermehrt und die auf ihr codierte Information umgesetzt .....	56
II.2.1 Prokaryontes System (E. coli) – Systeme in Mikroorganismen niederer Ordnung .....	57
II.2.2 Eukaryontes System (Hefe) – Systeme in Organismen höherer Ordnung .....	59
II.2.3 Säuger-Zelllinien (CHO) – Systeme in Zellen von Säugern .....	60

<b>III</b>	<b>Methoden in der Gentechnik</b> .....	61
III.1	DNA-Hybridisierung – Was zueinander passt, das bindet .....	61
III.2	DNA-Sequenzierung – Bestimmung der Einzelabfolge der DNA-Bausteine .....	62
III.3	Gen-Bank und Gen-Sonde – Finde das Gen, das Du suchst! .....	66
III.4	PCR-Methode – Aus wenig erhalte viel: DNA-Vermehrung im Automaten .....	68
	<b>Praxis</b> .....	73
<b>IV</b>	<b>Gentechnik in Medizin und Forschung</b> .....	73
IV.1	Das erste Klonierungsexperiment .....	73
IV.2	Anwendung in Diagnostik und Medizin .....	75
IV.2.1	Anwendung der PCR-Methode .....	75
IV.2.2	Der Chip und das Gen .....	78
IV.2.3	Gentechnische Herstellung eines Medikamentes in bakteriellen Wirtszellen (Interferon) .....	82
IV.2.4	Gentechnische Herstellung eines Medikamentes in Säuger-Zellen (Erythropoietin) .....	84
IV.2.5	Gentechnik in der angewandten und der Grundlagenforschung .....	86
IV.2.6	Systemische Biologie .....	89
IV.2.7	Die Basensequenz des Erbguts von Säugetieren .....	92
IV.3	Transgene Tiere .....	102
IV.3.1	Diabetes-Maus .....	105
IV.3.2	Gentechnik und Xenotransplantation .....	109
IV.3.3	Gen-Farming oder Gene-Pharming .....	112
IV.4	Gentherapie und Stammzellen .....	116
IV.4.1	Anwendungsbeispiele für die somatische Gentherapie .....	120
IV.4.2	Stammzellen .....	120
<b>V</b>	<b>Gentechnik bei Kulturpflanzen</b> .....	128
V.1	Transgene Pflanzen .....	128
V.1.1	Transgener Reis .....	130
V.1.2	Flavr Savr™ Tomate .....	135
V.1.3	Transgener Mais .....	137
V.1.4	Transgene Sojabohne .....	138
V.2	Elegante Züchtung .....	141
V.2.1	Das Reisgenom .....	143
V.2.2	Reis und Arabidopsis thaliana .....	144

**VI Gentechnik im täglichen Leben** ..... 145

VI.1 Enzyme ..... 145

    VI.1.1 Gentechnik-Enzyme und Käse ..... 147

    VI.1.2 Gentechnik-Enzyme und Brot ..... 149

    VI.1.3 Gentechnik-Enzyme als Waschmittelzusatz ..... 151

    VI.1.4 Gentechnik-Enzyme und Jeans ..... 151

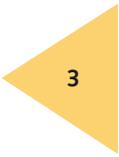
    VI.1.5 Gentechnik-Enzyme in Leder- und Papierverarbeitung ..... 153

**VII Gentechnik und der Blick in die Vergangenheit:  
molekulare Archäologie** ..... 154

**VIII Gentechnik: Sicherheit, Technikfolgenabschätzung, Gesetze,  
Richtlinien und Ethik** ..... 157

**Literaturverzeichnis** ..... 161

**Index** ..... 167



## Danksagung

Ein Buch schreibt man nie allein, auch wenn man als Einzelautor aufgeführt wird. Viele waren direkt oder indirekt mit am Gelingen dieses Buches beteiligt.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich zuerst Walter Doerfler von der Universität Köln, Hans Hengartner von der Universität Zürich und Peter Burkhardt von der ETH Zürich aussprechen. Sie haben die Aufgabe übernommen, das Manuskript zu lesen, und mir wertvolle Anregungen zu diesem Buch gegeben.

Danken möchte ich Heinz Kaufmann, seine Bücher über die organische und anorganische Chemie waren für mich schon in meiner Studienzeit vorbildlich.

Die Zusammenarbeit mit dem Graphiker Micha Lotrovsky sowie dem Fotografen Markus Senn war für mich eine positive, wichtige Erfahrung, die ihren Niederschlag in der Gesamtgestaltung des Buches gefunden hat.

Es sind viele, die mir stets, wenn ich Fragen hatte, mit all ihrem Wissen und Unterlagen weiterhalfen. Ihnen sei hier sehr herzlich gedankt.

Besonderer Dank gilt der grosszügigen Unterstützung des Schwerpunktprogramms Biotechnologie des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung. Es war mit ein Beitrag dafür, dass dieses Buch graphisch und photographisch so reichhaltig ausgestattet werden konnte.

Last, but not least: Das Zusammenwirken mit der Wissenschaftslektorin Petra Gerlach vom Birkhäuser Verlag war von gegenseitigem Verständnis, Vertrauen und Respekt geprägt. Sehr herzlichen Dank.

Mechthild Regenss-Klotz  
Ettingen, im Winter 1997/98

## Vorwort zur 3., erweiterten und überarbeiteten Auflage

Es freut mich, dass das Buch „Grundzüge der Gentechnik – Theorie und Praxis“ dank dem Leserzuspruch nun in die dritte Auflage geht. In den letzten Jahren sind auf dem Gebiet der Gentechnik in Theorie und Anwendung rasante Entwicklungen abgelaufen. Mit den Themen Stammzellen, systemische Biologie, der Sequenzierung verschiedener Genome sowie der «Eleganten Züchtung», also dem «Smart Breeding», ist eine Auswahl getroffen worden, die mir am interessantesten scheint und die es gestattet, den Umfang des Buches im bekannten Rahmen zu halten.

Die Überarbeitung und Erweiterung des Buches ist, wie schon bei den beiden ersten Auflagen, durch vielfältige Unterstützung zustande gekommen. Frau Gabriele Poppen und Herrn Dr. Detlef Klüber vom Birkhäuser Verlag, Basel, danke ich für ihren Einsatz und die professionelle Hilfe bei der Erstellung. Ganz besonders danken möchte ich meinem Mann, der durch seine Bereitschaft zu vielen Diskussionen einen grossen Beitrag zu dieser dritten Auflage geleistet hat.

Mechthild Regenass-Klotz  
Ettingen, im Herbst 2004

## Vorwort zur 2., erweiterten und überarbeiteten Auflage

Das grosse Interesse an diesem Buch führte dazu, dass bereits nach einhalb Jahren die erste Auflage ausverkauft und eine zweite Auflage notwendig wurde. In der vorliegenden Auflage wurden neue wissen-

schaftlich-medizinisch relevanten Gebiete wie Klonen von Tieren und Xenotransplantation aufgenommen.

Mein Dank gilt allen Freunden und Kollegen, die mir auch in dieser Ausgabe wieder mit ihrem Wissen zur Seite standen. Herrn Dr. C. Puhmann vom Birkhäuser Verlag, Basel, danke ich für sein grosses Engagement und seine kompetente Koordination für diese Auflage.

Mechthild Regenass-Klotz  
Ettingen, im Winter 1999/2000

## Vorwort zur 1. Auflage

«Es freut mich, Sie so munter und voller Energie zu sehen.» Das waren die Worte Walter Doerflers, Ordinarius für Genetik am genetischen Institut der Universität zu Köln. Fast 20 Jahre waren vergangen, seit ich dort promoviert hatte und er als mein Erstgutachter und Prüfer, als Mentor und Lehrer massgeblich an meinem wissenschaftlichen Werdegang beteiligt war. Die Gelegenheit, bei der wir uns wiedersahen, war das jährliche Frühjahrsmeeting in Köln, ausgerichtet von dem Institut für Genetik und seit Jahren ein Tummelplatz der ersten Garnitur der Wissenschaftler der molekularen Biologie.

Meine Studienzeit ist für mich ein kostbarer Stein in meiner Lebenssammlung. Begonnen im Sommer 1969, als die Zeit des grossen politischen Umbruchs in Deutschland war, aber auch die Zeit der Wissensexplosion in der Biologie, der Aufbruch von der klassischen Biologie zu neuen Ufern – der Molekularbiologie. Ich war fasziniert von den neuen Erkenntnissen. Biochemie, Proteinchemie, physikalische Chemie standen sozusagen im Dienst der evolvierenden Molekularbiologie. Die damaligen Professoren, die uns diese Fächer vermittelten und uns Studenten den Kontext zur Lehre des Lebens, nichts anderes heisst nämlich Biologie, schufen, besaßen neben ihrem fundierten Wissen auch noch die Gabe, uns das Fach durch bestechende Vorlesungen nahezubringen. Geist, Witz gepaart mit Wissen – wer von uns hätte damals eine Vorlesung ausgelassen!

Die postdoktoralen Jahre der wissenschaftlichen Tätigkeit verbrachte ich im Biozentrum Basel und im Jackson Laboratory in Bar Harbor, Maine, USA. Beide Orte boten Anregungen, Bar Harbor allerdings war,

wie auch Köln, ein Ort des Besonderen, sowohl in der Forschung wie auch im Leben.

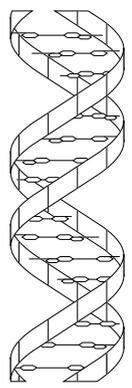
Wie ich nach Hausfrau- und Mutter-Dasein in die Welt der Wissenschaft zurückkehrte, allerdings diesmal in der schreibenden Zunft, fielen mir die vielen Vorlesungen und Seminare, Praktika und Übungen ein, in denen wir uns damals unser Wissen und die Art der Repräsentation dieses Wissens aneignen konnten.

Als der Birkhäuser Verlag mir das Angebot für dieses Buch unterbreitete, war ein Arbeitsordner über Gentechnik bereits an den Gymnasien der Schweiz als Unterrichtsmaterial etabliert. Die Arbeit an diesem Ordner, aber auch das vorliegende Buch wären ohne meine Ausbildung in Köln nicht denkbar. In dankbarer Erinnerung an die unvergessliche Studienzeit und alles, was ich dort lernen konnte, möchte ich dieses Buch

Walter Doerfler  
Bernd Gutte  
Dietrich Woermann  
Lothar Jänicke  
Benno Müller-Hill  
sowie meinen Eltern, Hans und Anneliese Klotz

zueignen.

Mechthild Regenass-Klotz  
Ettingen, im Winter 1997/98



## Einleitung

«Zwar weiss ich viel, doch möcht' ich alles wissen...»

...«da steh ich nun, ich armer Tor und bin so klug als wie zuvor...»

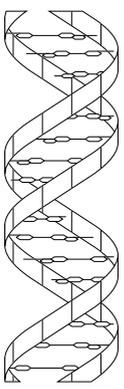
*Zitate aus Goethes Faust, Teil I*

Jeder von uns wird die Gefühle, die Goethe in seinem Faust ausdrückt, einmal selber durchgelebt haben. Wer hätte sich nicht die Frage, woher wir kommen und wohin wir gehen, schon einmal in seinem Leben gestellt. Wer hat nicht irgendwann einmal das Gefühl gehabt, fast alles zu wissen, um dann wieder abzustürzen in den Zustand, wo man eigentlich begonnen hat.

Jedesmal, wenn wir glauben, den endgültigen Raum allen Wissens zu betreten, erkennen wir, dass dieser Raum wiederum mindestens eine Türe hat, die weiterführt – das Endstadium unseres Wissen ist wieder nicht erreicht. Und, fast wie ein Hohn auf unsere schnellebige Zeit, scheinen sich neue Fragen in immer rascherer Folge aufzuwerfen, ganz unserem Lebenstempo angepasst. Selbst wenn wir glauben, den Gipfel einer Pyramide erreicht zu haben, erscheinen nach kurzer Zeit neue Stufen, die uns zeigen, dass wir stets neu dazulernen müssen.

Ein Thema unserer Tage ist die Gentechnik, ein Untergebiet der Molekularbiologie.

Viele Fragen sind offen, viele Themen sind halb- oder sogar ganz unklar. Viele sind erschreckt über dieses Thema, weil nicht genügend Klarheit herrscht. Einfache Klarheit. Es ist das Ziel dieses Buches, dem Leser einfache Klarheit zu vermitteln, ohne dass er erst noch selber ein Studium der Molekularbiologie hinter sich bringen muss. Gentechnik umfasst eine breite Palette von Methoden, die es erlauben, das genetische Material gezielt zu bearbeiten und von verschiedenen Organismen neu zu kombinieren. Die Neukombinationen kommen in dieser Form zum Teil in natürlichen Organismen nicht vor.

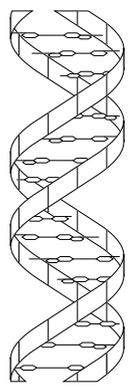


Die Diskussion um die Gentechnik ist ein ernsthaftes Thema, und ebenso ernsthaft ist dieser Wissenschaftszweig. Eine fundierte Diskussion darüber zu führen bedeutet auch, sich mit der Materie auseinanderzusetzen. Dazu gehören auch chemische Formeln und biologische Gesetze und Dogmen. Wenn Sie Angst vor chemischen Formeln haben: die kann ich Ihnen nicht nehmen. Aber ich habe mich bemüht, den Stoff der Theorie so ansprechend wie möglich zu gestalten, um Ihnen das Studium des Buches zu erleichtern. Manche Seiten werden Sie rasch lesen und begreifen können, manche Seiten werden von Ihnen eine grössere Aufmerksamkeit erfordern.

Da aber die Theorie bekanntermassen etwas grau erscheint, beinhaltet die zweite Hälfte des Buches in einer Auswahl die Darstellung der direkten Anwendung der Gentechnik: ich habe versucht, die Praxis zu den theoretischen Grundzügen im ersten Teil in Bezug zu stellen, damit Sie sehen, wie die Theorie seit Jahren bereits praktische Umsetzung erfahren hat.

Um etwas Klarheit zu schaffen, muss man mit den elementaren Bausteinen anfangen, so wie man bei einem Hausbau zuerst das Fundament baut, bevor man die Mauern hochzieht.

Wir wissen, dass alle Lebewesen einen gemeinsamen Stammbaum aus den Urzeiten unserer Erdgeschichte besitzen. Die chemische Substanz, die alle Lebewesen dazu befähigt, sich zu vermehren und vererbare Information weiterzugeben, heisst Desoxyribonukleinsäure, abgekürzt: DNS. Die englische Schreibweise ist DNA. Um gut zu verstehen, warum ein chemisches Molekül dazu in der Lage ist, als Informationsträger zu dienen, müssen wir uns zu Beginn ein wenig mit der chemischen Struktur der DNA auseinandersetzen.



# Theorie

## I Desoxyribonukleinsäure (DNA) – Faden des Lebens

### I.1 Chemische Struktur der DNA

Die Bausteine der DNA sind die Nukleotide. Nukleotide setzen sich aus drei Teilen zusammen: einer Stickstoffbase, einem Zucker und einer Phosphatgruppe. In der DNA finden wir üblicherweise vier verschiedene Stickstoffbasen: Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) und Thymin (T). A und G gehören zu der Klasse der Purine, C und T sind der Klasse der Pyrimidine zugehörig (s. Abb. 1).

Die Purine, also A und G, sind strukturell aus einem sogenannten Fünfering und einem Sechsering zusammengesetzt, während die Pyrimidin-Stickstoffbasen C und T aus lediglich einem Sechsering sind.

Jede Stickstoffbase ist über eine kovalente Bindung an den Zucker, die Desoxyribose, gebunden. Diese Art der Bindung soll den Leser nicht verwirren, es bedeutet nichts anderes, als dass diese Art der Bindung nur enzymatisch, das heisst, durch ein besonderes Enzym, und nicht durch blosses Erhitzen oder mechanisches Zerschneiden, aufgespalten werden kann.

Das Phosphat wiederum ist ebenso kovalent, nämlich über eine sogenannte Ester-Bindung mit dem Zucker verbunden (s. Abb. 2).

Der Zucker allein heisst Desoxyribose, die Verbindung von Zucker und einer Base ist das Nukleosid, spezifischer, wenn die Base z.B. Adenin ist, Desoxyadenosin. Sobald die Phosphatgruppe gebunden ist, wird das Ganze zum Nukleotid, oder mit dem Adenin-Beispiel zum

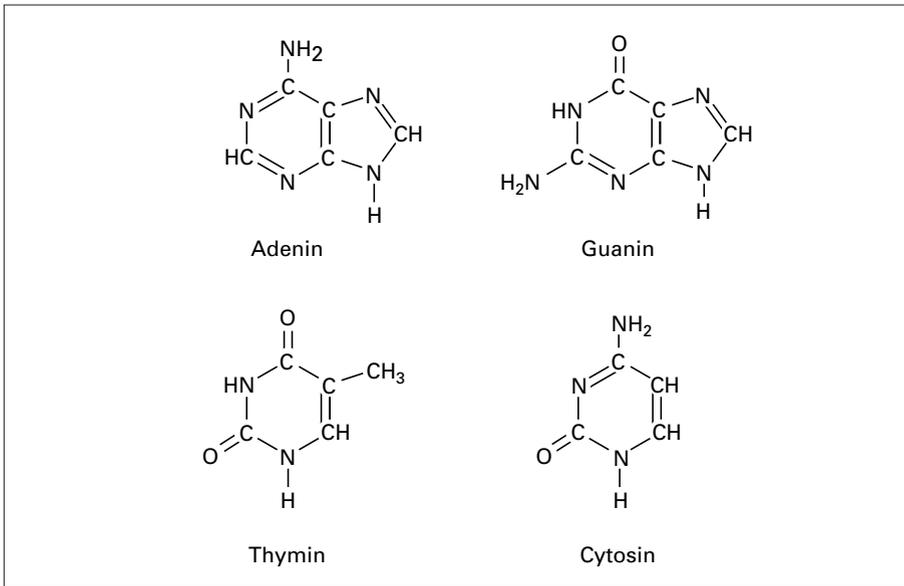
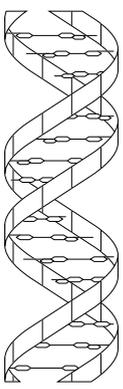


Abb. 1 Stickstoffbasen der DNA

Die Stickstoffbasen sind unterteilt in Purine und Pyrimidine. Zu den Purinen gehören Adenin und Guanin. Zu den Pyrimidinen gehören Thymin und Cytosin. Diese vier Basen sind in den Nukleotiden vorhanden, und an den Zucker über dessen Kohlenstoff C1-Atom gebunden (vgl. Abb. 3, 6a). (Schematische Darstellung)

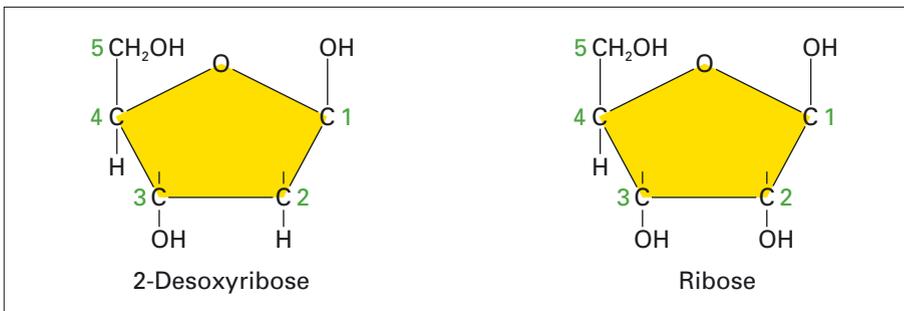
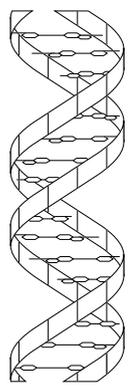


Abb. 2 Der Zucker in der DNA

Die 2-Desoxyribose ist das Zuckermolekül, das in der DNA vorhanden ist. Ribose hingegen ist der Zucker der RNA.

Die Kohlenstoffatome, oder auch C-Atome, sind im Uhrzeigersinn nummeriert. Da in der Desoxyribose das C-Atom Nummer 2 keinen Hydroxylrest trägt, wird dieser Zucker chemisch als Desoxyribose bezeichnet.

An das C-Atom 1 bindet im Grundbaustein der DNA, dem Nukleotid, die Stickstoffbase, am C-Atom 3 bzw. 5 werden die Phosphatgruppen gebunden. (Schematische Darstellung)



Desoxyadenosin-monophosphat. Monophosphat deshalb, weil im Nukleotid nur eine Phosphatgruppe vorhanden ist.

Ein Nukleotid sieht also folgendermassen aus (s. Abb. 3).

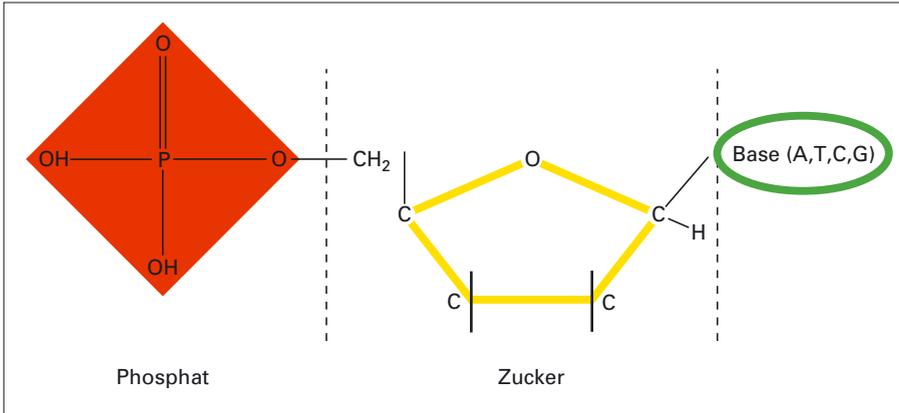


Abb. 3 Grundbaustein Nukleotid

Das Nukleotid bildet den Grundbaustein des Fadens des Lebens, der DNA.

Hier zeigen wir die einzelnen Komponenten des Nukleotids: die Phosphatgruppe (rot), der Zucker (Desoxyribose, gelb) und die Stickstoffbase (grün). Während Zucker und Phosphat stetig gleichbleiben und für das sogenannte «Rückgrat» der DNA verantwortlich sind, können an der Position der Base je eine der vier verschiedenen Basen Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin in einem Nukleotid eingebaut sein. (Schematische Darstellung)

Wir sehen also, dass die Bausteine der DNA, die Nukleotide, aus verschiedenen Teilen (Phosphat, Zucker, Stickstoffbase) aufgebaut sind, und dass diese kovalent miteinander verbunden sind.

Hängen wir nun mehrere Nukleotide aneinander, so sprechen wir von einem Oligonukleotid. Und zwar bindet ein Nukleotid kettenmässig an ein anderes, ebenfalls kovalent, und zwar über eine Phosphatbrücke, die zwischen dem sogenannten 5' C-Atom der Desoxyribose, also des Zuckers des vorangehenden Nukleotids mit dem 3' C-Atom des Zuckers des folgenden Nukleotids, ausgebildet wird. Man nennt die Zucker-Phosphat-Kette in der Biologie auch das «Rückgrat» der DNA (s. Abb. 4).

Nun haben wir zwar die Kettenform des DNA-Moleküls, aber noch nicht die doppelsträngige Form, in der die DNA üblicherweise in den Zellen vorliegt. Hier nun kommt das eigentliche Staunen über die Genialität in der Natur. Schauen wir uns an, wie die einzelnen Nukleotide in einem Doppelstrang angeordnet sind. Denn hier liegt der Schlüssel des Lebens: in idealer Passform legen sich die Ringstrukturen

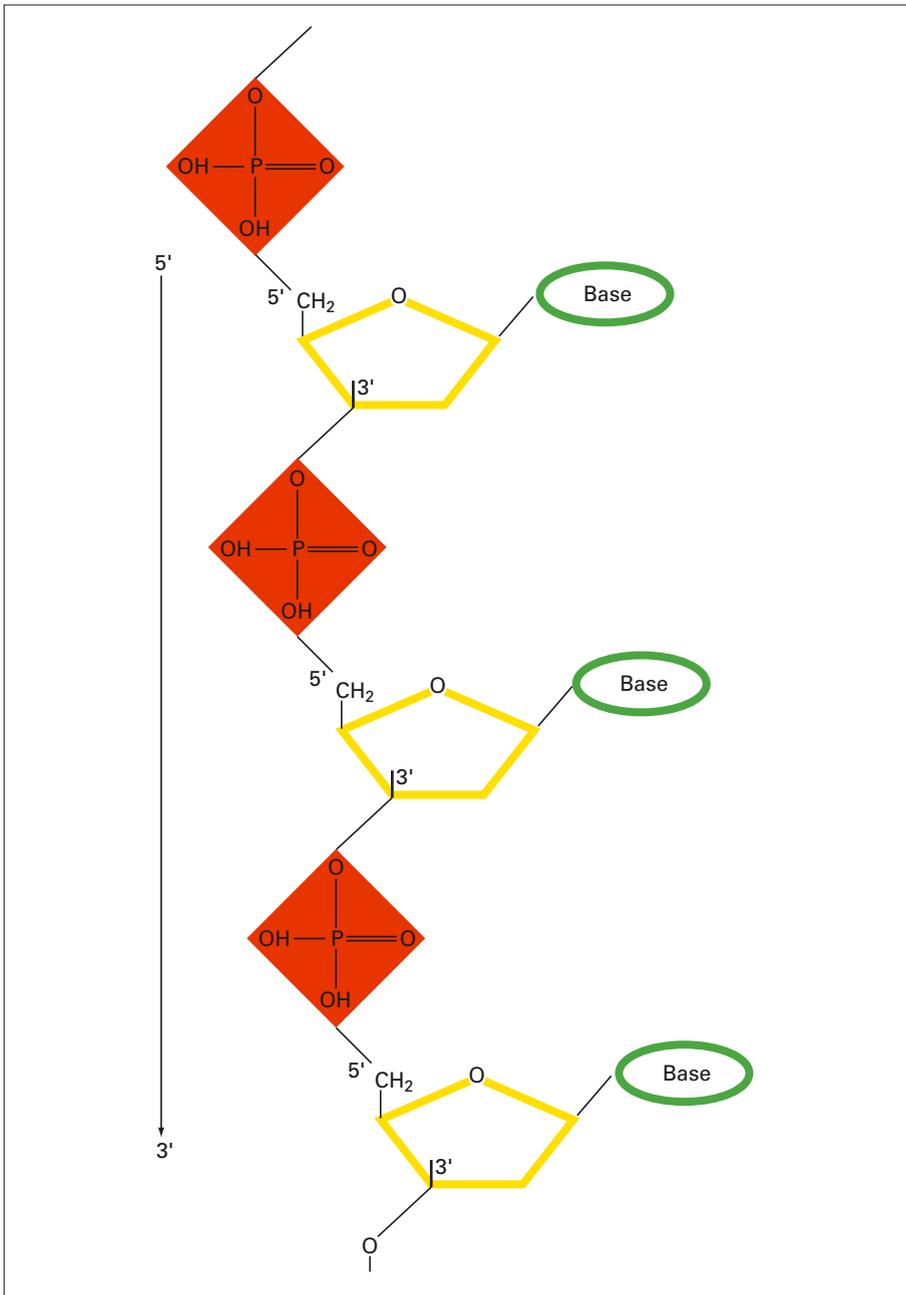
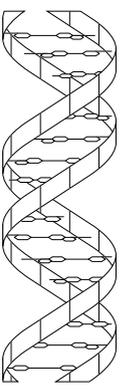
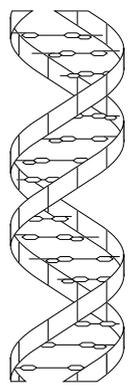


Abb. 4 Aufbau des Oligonucleotids  
Hier zeigen wir die Aneinanderkettung von einzelnen Nucleotiden zu einem Oligonucleotid. Das Oligonucleotid liegt noch im Einzelstrangstadium vor. Gut erkennbar ist von oben nach unten gelesen die 5' → 3' Richtung. (Schematische Darstellung)



der Purine und Pyrimidine ineinander. Stets paart sich ein Purin mit einem Pyrimidin! Nie erfolgt eine Paarung gleichartiger Stickstoffbasen!

Diese feste Zuordnung bezeichnen wir als komplementäre Basenpaarung. A ist komplementär zu T und C ist komplementär zu G.

Die beiden DNA-Einzelstränge sind gegenläufig angeordnet. Wandern wir an der Zucker-Phosphat-Kette in der sogenannten 5'-3'-Richtung entlang, stossen wir immer von der Phosphatgruppe auf das 5. Kohlenstoffatom des folgenden Zuckers. Liest man aber in der sogenannten 3'-5'-Richtung, so wird man von der Phosphatgruppe stets auf das 3. Kohlenstoffatom des Zuckers treffen. Dies gibt den Strängen eine Polarität nämlich  $5' \rightarrow 3'$  oder  $3' \rightarrow 5'$ . Die Anordnung der DNA Stränge in entgegengesetzter Polarität nennt man antiparallel. Dies ist wichtig zu wissen, denn die Enzyme, die mit den Vorgängen an der DNA zu tun haben, funktionieren, wie wir untenstehend noch sehen werden, nur in ganz bestimmter Polaritätsrichtung.

Die entscheidende Erkenntnis zu der Tatsache, dass sich stets Purin mit Pyrimidin paart, erarbeitete E. Chargaff in den frühen 50er Jahren. Er untersuchte eine grosse Anzahl von verschiedenen Organismen in Bezug auf die Basenzusammensetzung der DNA und fand immer wieder, dass in jeder DNA der Gehalt von Adenin (einem Purin) und Thymin (dem paarenden Pyrimidin) gleich war. Ebenso war der Gehalt von der Purinbase Guanin gleich mit der korrespondierenden Pyrimidinbase Cytosin. Also gilt:  $A=T$  und  $C=G$ . Zwischen den jeweiligen komplementären Basen bilden sich Bindungen, die Wasserstoffbrücken genannt werden. Zwischen A und T bilden sich zwei Wasserstoffbrücken, und zwischen G und C deren drei aus. Die Bindung zwischen G und C ist deshalb stabiler als die zwischen A und T, eine G-C reiche DNA wird also stabiler sein als eine A-T reiche DNA, und zwar stabiler in Bezug auf das Aufspalten des DNA-Doppelstranges in Einzelstränge.

Die Wasserstoffbrücken sind keine kovalenten Bindungen und können durch Hitze aufgespalten werden. Der Vorgang des Aufspaltens der doppelsträngigen DNA zu Einzelsträngen wird mit dem Fachwort Denaturierung umschrieben.

Die Paarung komplementärer Basen zueinander ist die Basenpaarung. Die lineare Abfolge hingegen der Basen auf dem DNA-Strang ist die Basensequenz. Zum Beispiel: TCGA... (s. Abb. 5).

Untenstehend sehen wir zuerst die planare Form eines DNA-Doppelstrangs, danebenstehend die dreidimensionale Struktur der Doppelhelix. Dieser Name stammt von den Aufklärern der DNA-Struktur, J. Watson und F. Crick, die mit dem Wort Doppelhelix perfekt die inein-