



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Naturwissenschaften

Biologie für das Medizinstudium

**Allgemeine und molekulare Grundlagen,
klinische Anwendungen**

Dr. Linda Frintrop
Dr. Heribert Keweloh

1. Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselderger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 62365

Autoren:**Dr. rer. nat. Linda Frintrop, M.Sc. Biologie, Univ.-Doz., Rostock**

Die Autorin leitet eine Arbeitsgruppe am Institut für Anatomie der Universitätsmedizin Rostock, die sich mit den molekularen und zellulären Grundlagen der Pathophysiologie der Anorexia nervosa befasst. Ihre Lehrtätigkeit in den vorklinischen Fächern der Humanmedizin verbindet sie mit der Entwicklung biologischer Fachliteratur. Darüber hinaus ist sie als Leiterin in verschiedenen Lehrveranstaltungen der Anatomie tätig und verfügt über umfassende didaktische Erfahrung in der medizinischen Ausbildung. Im Jahr 2024 wurde ihr der Titel „Fachanatomin der Anatomischen Gesellschaft“ verliehen. Sie erhielt zudem den studentischen Lehrpreis für die beste vorklinische Lehrveranstaltung in der Medizin (2025). Frau Frintrop absolvierte erfolgreich ihren Master of Science in Biologie an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf sowie ihre Promotion am Institut für Neuroanatomie der RWTH Aachen.

Dr. rer. nat. Heribert Keweloh, Dipl.-Biol. Priv.-Doz., Oberhausen

Der Autor verfügt über langjährige Forschungs- und Lehrerfahrung am Institut für Mikrobiologie der Universität Münster. Seine Forschungsschwerpunkte waren Strukturen und Funktionen der Zellmembran von Bakterien, die Vorteile der Besiedlung von Biofilmen und die Toleranzmechanismen von Pseudomonaden gegenüber toxischen organischen Verbindungen. Als Lebensmittelmikrobiologe lehrte er im Fachbereich Oecotrophologie der Fachhochschule Münster und betreute zahlreiche Bachelor- und Masterarbeiten. Er hat erfolgreiche Lehr- und Fachbücher zur Molekularen Biologie und Mikrobiologie sowie zur Lebensmittel-mikrobiologie und -hygiene verfasst.

Unter Mitwirkung von:

Herrn Professor Dr. med. Dr. rer. nat. Horst Claassen, Institut für Anatomie, Universitätsmedizin Rostock

Verlagslektorat:

Dr. Astrid Grote-Wolff

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern

1. Auflage 2025

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern identisch sind.

Zu Fragen der Produktsicherheit wenden Sie sich bitte an produktsicherheit@europa-lehrmittel.de.

ISBN 978-3-7585-6236-5

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2025 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Layout und Satz: Daniela Schreuer, 78224 Singen

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfoto: © Corona Borealis Studio – shutterstock.com

Druck: LUC GmbH, 48268 Greven, www.luc-medienhaus.de

Vorwort

Das Lehrwerk **Biologie für das Medizinstudium – Allgemeine und molekulare Grundlagen, klinische Anwendungen** richtet sich an **Studierende der Human- und Zahnmedizin** in den ersten Semestern. Es wurde speziell entwickelt, um die biologischen Grundlagen des Medizinstudiums verständlich zu vermitteln und die Studierenden gezielt auf die Anforderungen des ersten Abschnitts der Ärztlichen Prüfung vorzubereiten. Darüber hinaus eignet sich das Buch für **Studierende biomedizinisch orientierter Studiengänge**, wie z. B. Medizinische Biologie, Biomedizin oder Molekulare Medizin.

Die inhaltlichen Schwerpunkte orientieren sich eng an den aktuellen Gegenstandskatalogen des Instituts für Medizinische und Pharmazeutische Prüfungsfragen (IMPP) für Biologie und für Chemie/Biochemie – mit einem besonderen Fokus auf klinische Anwendungen. Es geht nicht um abstrakte Biologie, sondern um die **für die Medizin relevanten biologischen Grundlagen** – klar, verständlich und zielgerichtet dargestellt.

Besonderer Wert wird auf die Vermittlung **biochemischen Grundwissens** gelegt, das ein vertieftes Verständnis von Zellbiologie, Molekulargenetik und Mikrobiologie ermöglicht – ein Ansatz, der das Lehrwerk in dieser Form einzigartig am Markt positioniert. Die Biochemie ist neben der Biologie ein zentrales Fach im Vorklinikum, das prüfungsrelevante Inhalte vermittelt und die Einsicht in molekulare Prozesse ermöglicht.

Inhalte:

- Eine **Einführung in die Biologie** vermittelt grundlegende Merkmale des Lebens und erläutert, was die Biologie als Wissenschaft ausmacht.
- Die **Grundlagen der Biochemie** umfassen das Wissen über zelluläre Moleküle wie Proteine, das Erbmateriale DNA, zentrale Stoffwechselprozesse sowie die Funktionen von Enzymen.
- Die Inhalte der **Zellbiologie** umfassen den Aufbau und die Funktion der Plasmamembran, die Aufgaben der Zellorganellen sowie die Bedeutung des Zytoskeletts.
- Die molekulare und klassische **Genetik** behandelt zentrale Themen wie die Replikation der DNA, die Proteinbiosynthese, Mutationen sowie die Erbgänge.
- In der **Mikrobiologie** stehen die vielfältigen Eigenschaften und Fähigkeiten von Mikroorganismen im Mittelpunkt.
- Auch **embryologische und immunologische Vorgänge**, die **Evolution** als zentrale Antriebskraft der Biologie sowie **moderne Verfahren** wie die CRISPR/Cas-Technologie werden verständlich dargestellt.

Didaktische Besonderheiten:

Dieses Lehrbuch zeichnet sich durch einen **systematisch aufgebauten Wissenskanon** aus, der sich ideal zur Begleitung der Vorlesung sowie für das Selbststudium eignet.

Statt allgemeiner Merksätze bietet das Buch präzise formulierte, **übersichtliche Zusammenfassungen**, die das Wesentliche auf den Punkt bringen. Diese kompakten Zusammenfassungen erleichtern die Wiederholung und Prüfungsvorbereitung – auch unter Zeitdruck.

Eine besondere Stärke des Lehrwerks liegt in der **konsequenten Text-Bild-Verknüpfung**: Abbildungen sind nicht Beiwerk, sondern integraler Bestandteil der Erklärung und tragen wesentlich zum Verständnis komplexer Sachverhalte bei.

Zur **effektiven Prüfungsvorbereitung** enthält jedes Kapitel sowohl **offene Fragen** als auch **Multiple-Choice-Fragen**. Diese sind didaktisch durchdacht und nah an den **IMPP-Fragetypen** orientiert – ideal zur Vertiefung, Selbstkontrolle und Vorbereitung auf die schriftlichen Prüfungen im ersten Abschnitt der Ärztlichen Prüfung.

Ihr Feedback ist uns wichtig!

Hinweise, die zur Verbesserung und Weiterentwicklung des Buches beitragen, nehmen wir gerne unter der Verlagsadresse oder per E-Mail (lektorat@europa-lehrmittel.de) entgegen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Biologie	7	3	Zellbiologie	120
1.1	Biologie als Naturwissenschaft. . .	7	3.1	Organisationsformen der Zelle ..	120
1.2	Was ist Leben?	8	3.1.1	Eukaryotische Zelle	121
1.3	Organisationsebenen lebender Systeme	10	3.2	Biomembranen	123
2	Biochemie – Grundlagen	12	3.2.1	Aufbau der Biomembranen	123
2.1	Aminosäuren, Peptide und Proteine	13	3.2.2	Membranfluidität	124
2.1.1	Aufbau der Aminosäuren	13	3.2.3	Glykokalyx	126
2.1.2	Eigenschaften von Aminosäuren ..	14	3.2.4	Permeabilität von Biomembranen	126
2.1.3	Aminosäuren in Nahrung und Stoffwechsel	18	3.2.5	Osmose	127
2.1.4	Struktur der Proteine.	21	3.2.6	Osmbrantransport	128
2.1.5	Funktionen von Proteinen	26	3.2.7	Energetisierung des Membran- transports	130
2.1.6	Struktur-Funktion eines Proteins am Beispiel des Hämoglobins ..	30	3.3	Vesikulärer transmembranärer Stofftransport	132
2.1.7	Eigenschaften und Analytik von Proteinen	34	3.3.1	Endozytose	133
2.2	Nukleinsäuren	44	3.3.2	Exozytose und Transzytose	134
2.2.1	Nukleotide und Derivate	45	3.4	Zytoplasma, Ribosomen und Peroxisomen	137
2.2.2	DNA, Aufbau und Struktur	47	3.4.1	Ribosomen	137
2.2.3	RNA, Aufbau, Struktur und Funktionen	50	3.4.2	Peroxisomen	138
2.2.4	Nukleinsäuretechniken	53	3.5	Zellkern (Nukleus)	140
2.3	Kohlenhydrate	66	3.5.1	Chromatin	140
2.3.1	Aufbau und Eigenschaften der Kohlenhydrate	66	3.5.2	Kernhülle	141
2.3.2	Vorkommen und Funktionen der Kohlenhydrate	71	3.5.3	Nukleoli	142
2.4	Lipide	81	3.6	Mitochondrien	143
2.4.1	Fettsäuren	82	3.7	Endoplasmatische Retikulum (ER) und Golgi-Apparat	145
2.4.2	Neutrale Lipide	85	3.7.1	Glattes endoplasmatisches Retikulum	146
2.4.3	Glycerophospholipide	87	3.7.2	Raues endoplasmatisches Retikulum	146
2.4.4	Sphingolipide	88	3.7.3	Golgi-Apparat	148
2.4.5	Etherlipide	89	3.8	Endosomen-Lysosomen-System	149
2.4.6	Glykolipide	89	3.8.1	Residualkörper	150
2.4.7	Lipopolysaccharide	90	3.8.2	Autophagie	150
2.4.8	Isoprenoide	91	3.8.3	Melanosomen	151
2.5	Enzyme	96	3.9	Zytoskelett	154
2.5.1	Enzymkinetik	97	3.9.1	Aktinfilamente	154
2.5.2	Einflüsse auf die Enzymaktivität .	99	3.9.2	Myosine und Muskelkontraktion.	155
2.5.3	Enzymklassen und Coenzyme ..	101	3.9.3	Mikrotubuli	156
2.6	Stoffwechsel und Energie- transformation	104	3.9.4	Intermediärfilamente	158
2.6.1	Biologische Energieumwandlung	105	3.10	Oberflächendifferenzierungen der Zelle	160
2.6.2	Stoffwechselwege	107	3.10.1	Mikrovilli und Stereozilien	160
2.6.3	Zellatmung	110	3.10.2	Kinozilien	161
			3.11	Zellkontakte	163
			3.11.1	Verschlusskontakte	163
			3.11.2	Haftkontakte	164
			3.11.3	Kommunikationskontakte	165

3.12	Zellkommunikation und Signalübertragung	166	4.9.1	Stammbäume und Erbkrankheiten	231
3.12.1	Signalrezeptoren und Signalkaskaden	167	4.9.2	Die Mendel-Gesetze	233
3.13	Zellteilung, Zellzyklus und Zelltod	170	4.9.3	Kopplungsgruppen und Genkartierung	234
3.13.1	Mitose und Zellzyklus	170	4.9.4	Autosomale Erbgänge	236
3.13.2	Zellzyklus	172	4.9.5	X-chromosomale Erbgänge	241
3.13.3	Meiose	175	4.10	Sonderformen der Vererbung	244
3.13.4	Nekrose und Apoptose	177	4.10.1	Mitochondriale Vererbung	244
4	Molekulare und klassische Genetik	183	4.10.2	Haplotypen	245
4.1	Gene und Genome	183	4.10.3	Multifaktorielle Vererbung	246
4.2	Replikation der DNA	185	4.10.4	Epigenetik	248
4.3	Ablauf der Replikation	186	4.10.5	Imprinting	250
4.4	Proteinbiosynthese	188	4.11	Entwicklungsgenetik und -biologie	251
4.4.1	Transkription	189	4.11.1	DNA-Methylierungsmuster und Differenzierung	253
4.4.2	Der genetische Code	191	4.11.2	Analyse von Entwicklungsprozessen	254
4.4.3	Translation	192	4.12	Evolution und Populationsgenetik	255
4.4.4	mRNA-Prozessierung	195	4.12.1	Bedeutung des Erbguts für die Evolution	256
4.5	Genregulation	196	4.12.2	Bedeutung der Umwelt für die Evolution	258
4.5.1	Regulation auf der Ebene der DNA	197	4.12.3	Selektionstypen	259
4.5.2	Regulation auf der Ebene von Transkription und mRNA-Prozessierung	197	4.12.4	Isolation und Gendrift	261
4.5.3	Regulation auf der Ebene der Translation	198	4.12.5	Gendrift	262
4.6	Mutationen	199	4.12.6	Populationsgenetik	264
4.6.1	Somatische Mutationen	200	4.13	Gentechnik und Gentherapie	268
4.6.2	Genmutationen	200	4.13.1	CRISPR/Cas-System	269
4.6.3	Auswirkungen von Genmutationen	202	4.13.2	Klonierung von Genen	272
4.6.4	Chromosomenmutationen	204	5	Mikrobiologie	277
4.6.5	Genommutationen	206	5.1	Einteilung der Mikroorganismen	277
4.6.6	Mutationsauslösung	210	5.2	Aufbau der Bakterienzelle	280
4.6.7	Transposons	212	5.2.1	Morphologische Formen	281
4.6.8	DNA-Reparaturmechanismen	214	5.2.2	Strukturen der Bakterienzelle	282
4.7	Genfamilien und differenzielle Genaktivität	217	5.2.3	Zellwand von Bakterien	284
4.7.1	Homologe Gene	217	5.3	Fortbewegung und Dauerformen	291
4.7.2	Genduplikationen	219	5.3.1	Chemotaxis	292
4.7.3	Genfamilie der Globine	221	5.3.2	Signaltransduktion	293
4.7.4	Differenzielle Genaktivität	222	5.3.3	Bakterielle Überdauerungsformen	295
4.8	Chromosomen des Menschen	223	5.4	Sauerstoffabhängigkeit und Stoffwechsel	297
4.8.1	Gonosomen	227	5.4.1	Stoffwechselformen	298
4.8.2	X- und Y-Chromosomen	228	5.5	Klassifikation der Bakterien	301
4.8.3	Geschlechtsdifferenzierung	229	5.5.1	Phänotypische Klassifizierung	302
4.8.4	Inaktivierung eines X-Chromosoms	230	5.5.2	Genotypische Klassifizierung	305
4.9	Formale Genetik	231	5.6	Bakteriengenetik	306

5.6.1	Das Operon-Gensystem	306	5.10.1	Pilze	371
5.6.2	Regulation der Genexpression ..	307	5.10.2	Protozoen	377
5.6.3	Genübertragung bei Bakterien ..	309	5.11	Viren und Prionen	379
5.7	Lebensweise und Kultivierung von Mikroorganismen.	314	5.11.1	Struktur von Viren	380
5.7.1	Biofilme.	314	5.11.2	Klassifikation der Viren.	382
5.7.2	Bakterienkulturen	320	5.11.3	Infektionszyklus von Viren.	384
5.7.3	Kultivierungsbedingungen.	322	5.11.4	Virale Krankheitserreger	386
5.7.4	Nährmedien	323	5.11.5	Coronaviren	390
5.7.5	Wachstum und Vermehrung	325	5.11.6	Diagnostik, Prävention und Therapie von Viruserkrankungen	394
5.8	Mikroorganismen des Menschen	328	5.11.7	Prionen	397
5.8.1	Mikrobiom des Körpers	330	5.12	Mikrobielle Ökologie.	400
5.9	Infektionen, Pathogenität und Immunantwort.	334	5.12.1	Nahrungsketten	401
5.9.1	Pathogenität.	336	5.12.2	Wechselbeziehungen zwischen artverschiedenen Organismen ..	404
5.9.2	Erregerreservoir	338	5.12.3	Populationsdynamik	407
5.9.3	Infektionswege.	340	5.12.4	Stoffkreisläufe	409
5.9.4	Das Abwehrsystem des Körpers	342	5.12.5	Abbau von organischen Stoffen am Beispiel von Gewässern und Kläranlagen	411
5.9.5	Bakterielle Krankheitserreger . . .	354			
5.9.6	Antibiotika und Antibiotika- resistenzen	360	Sachwortverzeichnis		417
5.9.7	Infektionsschutz.	368	Bildquellenverzeichnis		428
5.10	Pilze und Protozoen.	370			

1 Einführung in die Biologie

1.1 Biologie als Naturwissenschaft

Die **Biologie** ist die Naturwissenschaft, die sich mit den Prozessen des Lebens beschäftigt (griech. *bíos*: Leben und *lógos*: Lehre). Sie untersucht den Menschen und andere Lebewesen und erklärt deren Lebensvorgänge. Diese stehen mit den chemischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten in Einklang und besitzen oft eine hohe Komplexität.

Die Biologie kann zahlreiche wichtige medizinische Sachverhalte erklären. Die Entstehung und den Verlauf von Krankheiten zu verstehen, bedarf grundlegender Kenntnisse der biologischen Natur des Menschen. Um nicht nur die Symptome von Erkrankungen zu behandeln, sondern ihre ursächlichen Faktoren, müssen die Krankheitsursachen bekannt sein oder aufgeklärt werden.

Die Biologie kann, insbesondere aus evolutionsbiologischer Perspektive, wertvolle Aussagen über Körperreaktionen liefern, dies gilt auch für medizinische Aspekte. Krankheitssymptome werden als körperliche Anpassungen verstanden und offenbaren einen Nutzen für den Körper. **Fieber** ist beispielsweise im Kampf gegen Bakterien und **Viren** eine nützliche Körperreaktion und die Einnahme von fiebersenkenden Medikamenten ist oft kontraproduktiv. Bei erhöhter Temperatur laufen viele Vorgänge der Körperabwehr schneller ab, die Immunzellen sind aktiver. Hingegen sind die Vermehrung der Mikroorganismen und deren Aktivität oft verzögert.

Die Erforschung der Strukturen von Lebewesen ist durch deren außerordentliche Vielfalt und einen zumeist sehr komplexen Aufbau der Organismen gekennzeichnet. Aufgrund dieser Strukturfülle und Komplexität ist die biologische Wissenschaft in zahlreiche Einzelfachdisziplinen gegliedert, die in der Regel auch spezielle Arbeitstechniken und Forschungsmethoden anwenden.

Die Aufteilung der Biologie in verschiedene Fachdisziplinen mit ihren jeweiligen Schwerpunkten ist ein historischer Prozess. Die Biologie als theoretische und experimentelle Erforschung des Lebens entwickelte sich im 16. und 17. Jahrhundert. Durch den Bau leistungsfähiger Mikroskope (*Antoni van Leeuwenhoek*, 1632 bis 1723) wurden die Möglichkeiten der Untersuchung von **Zellen** und ihren Strukturen deutlich erweitert, die **Zellbiologie** wurde begründet.

Die Untersuchung der Prinzipien der Vererbung von Merkmalen durch den Augustinermönch *Gregor Mendel* (1822 bis 1884), der zum ersten Mal systematisch Kreuzungsexperimente mit Pflanzen durchführte, legte den Grundstein für die **Genetik**. Die Entdeckung der Vererbungssubstanz DNA schaffte die molekulare Grundlage für die Genetik und bildete die Basis für die Entwicklung der **Molekularbiologie**. Die **Humangenetik** fokussiert sich im Wesentlichen auf die Diagnostik, die Therapie und die Prävention von Erbkrankheiten und kann heutzutage molekulare Erklärungen von Erkrankungen liefern.

Die mikroskopische Beobachtung von Bakterien und anderen **Mikroorganismen** führte zur Entstehung der Fachdisziplin **Mikrobiologie**. *Antoni van Leeuwenhoek* sah als erster einzelne Bakterien, und zwar in seinem Zahnbelag, er konnte jedoch die Bedeutung der Bakterien zu seiner Zeit noch nicht erkennen. Das Mikroskop stellte sich aber im Laufe der Zeit als

Viren zählen nicht zu den Lebewesen. Sie haben keinen eigenen Stoffwechsel und brauchen eine Wirtszelle zur Vermehrung.

Zelle
Kleinste, selbstständig lebens- und vermehrungsfähige biologische Einheit

Mikroorganismen
Mit dem Auge nicht sichtbare Lebewesen, die überwiegend aus einer einzigen Zelle bestehen

ein wichtiges Instrument bei der Entdeckung von Krankheitserregern dar. Der französische Chemiker *Louis Pasteur* (1822 bis 1895) und der deutsche Bakteriologe *Robert Koch* (1843 bis 1910) untersuchten als Erste systematisch Mikroorganismen und erkannten die Rolle der Bakterien als Verursacher von Infektionskrankheiten.

Die Entstehung und Entwicklung der verschiedenen Arten von Lebewesen behandelt die **Evolutionstheorie**. Die von *Charles Darwin* (1809 bis 1882) begründete Fachrichtung der Biologie erklärt die Vielfalt heutiger Lebensformen und die Veränderungen der Lebewesen. Die Entwicklungsgeschichte des Lebens ist ein historischer, unumkehrbarer Prozess. Vor etwa 3,4 Milliarden Jahren ist das Leben auf der Erde entstanden. Zahlreiche Arten sind im Laufe der Erdzeitalter entstanden und auch wieder verschwunden.

Heute wird das Leben auf der Erde in drei große Abteilungen gegliedert, in die **Bakterien**, die **Archaeen** und die höher organisierten Organismen, die **Eukaryoten** oder Eukaryonten. Zu letzteren gehören nicht nur die Menschen, sondern auch Pflanzen, Tiere, Pilze und sogar viele Einzeller.

Die Archaeen wurden erst im Jahr 1977 als eigenständige Domäne entdeckt. Man erkannte, dass sie grundsätzliche Unterschiede zu den Bakterien aufweisen, z. B. im Aufbau von Zellmembran und Zellwand. Bakterien und Archaeen bestehen beide aus einer einzigen Zelle, deren Erbsubstanz DNA nicht in einem Zellkern eingeschlossen ist und die keine inneren membranumschlossenen Kompartimente (Organellen) aufweist. Aufgrund dieser Gemeinsamkeiten wird dieser evolutionär alte Zelltyp Prozyte (im Gegensatz zur Euzyte der Eukaryoten) genannt und die Lebewesen **Prokaryoten** oder Prokaryonten.

Auch der **Mensch** ist ein Produkt evolutionärer Prozesse. Vor etwa sieben Millionen Jahren spaltete sich in Afrika eine Entwicklungslinie der Menschenaffen auf, aus der Frühformen einerseits der Schimpansen und andererseits des Menschen hervorgingen. Dieser Ursprung der Menschen ist heute durch fossile und genetische Befunde gut belegt. Der menschliche Körper ist demzufolge das Ergebnis uralter Evolutionsvorgänge. Biologische Konstruktionsmuster der Vormenschenzeit und Anpassungen der menschlichen Vorfahren an die Steinzeitwelt führten zu Eigenschaften, die im Zeitalter der Zivilisation teilweise als Schwachstellen des Körpers erscheinen.

1.2 Was ist Leben?

Die Erkennung von Lebewesen fällt in der Regel leicht: Auch völlig unbekannte Spezies können aufgrund ihrer Eigenschaften fast immer dem Bereich des Lebens zugeordnet werden. Andererseits ist „Leben“ schwer zu definieren, da es von einer hohen Komplexität gekennzeichnet ist, die bis heute nur in groben Zügen verstanden wird. Es gibt keine allgemein gültige, umfassende Definition dessen, was Leben ist. Vielmehr grenzt eine Reihe von Eigenschaften die Lebewesen von unbelebter Materie ab (**Abb. 1**).

Alle Lebewesen sind aus **Zellen** aufgebaut, die trotz großer äußerlicher Unterschiede sogar innerhalb eines Organismus Gemeinsamkeiten

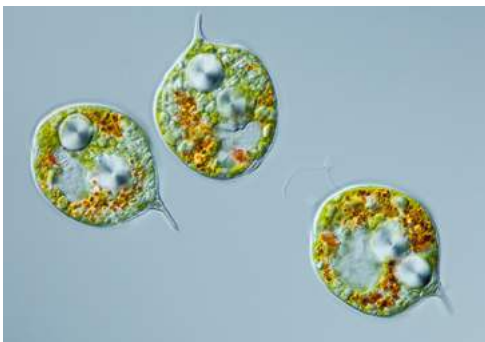


Abb. 1 Eukaryotische Einzeller mit Chloroplasten zur Fotosynthese

besitzen. Es handelt sich um abgegrenzte Kompartimente, die von einer Membran umschlossen sind und einheitliche chemische Verbindungen in wässrigem Milieu enthalten. Zellen sind die kleinsten lebenden Einheiten, die sich durch selbsterhaltende Systeme auszeichnen. Indem Zellen wachsen und sich teilen, können sie von sich selbst eine Kopie anfertigen. **Einzeller** sind als einzeln lebende Zellen einfache, aber sehr erfolgreiche Lebensformen. Höhere Lebewesen sind miteinander kooperierende Gemeinschaften von Millionen Einzelzellen, die bei jedem Individuum aus einer einzigen Zelle hervorgegangen sind.

Organismen sowie Zellen weisen bestimmte Merkmale auf, die als **Kennzeichen des Lebens** gelten:

► Stoffwechsel

Die chemischen und physikalischen Vorgänge des **Stoffwechsels** dienen dem Aufbau und der Erhaltung der Zell- und Körperstrukturen sowie der Energiegewinnung. Stoffwechsellvorgänge werden in den Zellen durch Enzyme vermittelt und durch Signalstoffe, wie z. B. Hormone, gesteuert.

► Wachstum

Die Stoffwechselaktivitäten führen zum **Wachstum** eines Organismus. Mit der Masse (oder der Größe) nimmt zumeist auch die Zahl der Zellen zu. Einzeller teilen sich bei einer bestimmten Zellgröße in Tochterzellen. Das Wachstum führt bei ihnen zur Vermehrung, zur Zunahme der Zahl neuer Individuen.

► Fortpflanzung

Die Fortpflanzung (Reproduktion) von Lebewesen kann auf sexuellem oder auf nicht-sexuellem Wege erfolgen. Bei der sexuellen Fortpflanzung kommt es zu einer Verschmelzung (Fusion) von zwei Zellen, einer weiblichen und einer männlichen Keimzelle (Gameten). Die Nachkommen erhalten dadurch Erbanlagen von beiden Elternteilen. Der Vorgang der Zellfusion wird als Befruchtung bezeichnet und das Verschmelzungsprodukt als **Zygote**. Ungeschlechtliche Fortpflanzung, bei der keine Befruchtung stattfindet, ist typisch für Bakterien, aber auch bei Pflanzen häufig, z. B. durch Bildung von Ablegern.

► Vererbung

Ein essentielles Merkmal aller Lebewesen besteht darin, dass sie genetische Informationen an ihre Nachkommen weitergeben. Die Erbinformationen sind als **Gene** in der Molekülform der DNA gespeichert. In der Regel werden die Gene bei jeder Zellteilung vollständig an die Tochterzellen übertragen. Dazu duplizieren Zellen das genetische Material und verteilen es bei der anschließenden Teilung der Zelle gleichmäßig auf die Tochterzellen.

► Beweglichkeit

Bei tierischen Organismen und einigen menschlichen Zelltypen, wie den neutrophilen Granulozyten des Immunsystems, ist die Fähigkeit zu aktiven Bewegungen klar ersichtlich. Auch zahlreiche Mikroorganismen können sich aktiv fortbewegen. Sogar Pflanzen zeigen langsame Bewegungen, wie z. B. das Ausrichten der Blätter in Richtung des einstrahlenden Lichts.

► Reaktion auf Reize

Lebewesen sowie einzelne Zellen können sich als Reaktion auf die Umwelt aktiv ändern. Sie können Reize, Informationen aus der Umwelt, empfangen und ihr Verhalten ihrer Umgebung anpassen.

Stoffwechsel

Aufnahme von Stoffen, Verarbeitung in Form von chemischen Umwandlungen sowie Abgabe von Stoffen

Wachstum

Zunahme der Masse eines Organismus durch Neubildung von Körpersubstanz

Gene

Einheiten der im Erbgut vorhandenen Erbinformation, die zumeist zur Bildung von Proteinen dienen

Neurotransmitter

Botenstoffe, die Reize zwischen Nervenzellen an deren Kontaktstellen, den Synapsen, weiterleiten

► Kommunikation

Die Arbeitsteilung der Zellen in einem vielzelligen Organismus erfordert, dass Botschaften ausgetauscht werden und eine Kommunikation zwischen den Zellen bzw. den Organen existiert. Der Informationsaustausch kann zwischen benachbarten Zellen oder körperweit von Organ zu Organ stattfinden und erfolgt durch körpereigene Signalstoffe. Beispielsweise werden im Nervengewebe zwischen einzelnen Nervenzellen **Neurotransmitter** ausgetauscht.

1.3 Organisationsebenen lebender Systeme

Die Biologie ist eine Wissenschaft, die die Lebensprozesse auf unterschiedlichen Ebenen betrachtet. Ihr Spektrum reicht von der Untersuchung von molekularen Strukturen über die Untersuchung von Zellen, aus denen alle Organismen aufgebaut sind, bis hin zur Untersuchung von Lebewesen und ihren Beziehungen.

Bei der Untersuchung biologischer Objekte wird oft angestrebt, kleinere Bestandteile der Objekte zu gewinnen und separat von den anderen biologischen Komponenten zu untersuchen. Nur dann können die besonderen Eigenschaften erkannt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass lebende Systeme hierarchisch aufgebaut und organisiert sind.

Auch biologische Objekte können bis hin zu den kleinsten Materieteilchen, den Atomen, zerlegt werden. Genau wie die Moleküle atomunabhängige Eigenschaften besitzen, weisen auch separierte biologische Objekte andere Eigenschaften auf, als wenn sie im Verband vorliegen. Das Zusammenwirken relativ einfacher biologischer Komponenten ermöglicht besondere Leistungen der Objekte einer höheren Strukturebene. Ein Organismus, wie z. B. der menschliche Körper, ist mehr als die Summe der Leistungen seiner einzelnen Organe.

Durch die Untersuchung verschiedener biologischer Strukturebenen können bei einem Lebewesen unterschiedliche Erkenntnisse gewonnen werden. Komplexe biologische Strukturen sind immer aus kleinen, einfachen und zusammenwirkenden Einheiten aufgebaut. Die **Strukturebenen** von Lebewesen können in der Reihenfolge zunehmender Größe und höherer Komplexität folgendermaßen unterteilt werden:

► Biomoleküle

Auf der untersten Strukturebene werden in allen Lebewesen neben einigen anorganischen Verbindungen eine Vielzahl typischer organischer Verbindungen gefunden, die Biomoleküle. Eine besonders große Bedeutung haben **Makromoleküle**, wie Proteine, Polysaccharide und Nukleinsäuren.

► Zelluläre Grundstrukturen

Aus Lipiden und Makromolekülen werden die zelltypischen Grundstrukturen aufgebaut, wie **Organellen**, Zellkern, Chromosomen, Ribosomen und Biomembranen. Die Organellen und andere Grundstrukturen haben in der Zelle bestimmte Aufgaben, wie z. B. die Energiegewinnung und -bereitstellung.

► Zellen

Die strukturelle Grundeinheit der Lebewesen, die Zelle, ist ein geschlossener, durch eine Biomembran abgegrenzter Raum. Zellen sind eigenständig; sie enthalten alle Informationen, die der gesamte Organismus für alle seine Aktivitäten und Funktionen benötigt. Die Entwicklung von Zellen in

Makromoleküle

Moleküle, die aus vielen gleichen oder unterschiedlichen Bausteinen bestehen und damit eine relativ große Molekülmasse besitzen

Organellen

Zellstrukturen, die eine spezifische Funktion innerhalb der Zelle erfüllen und von einer Membran umgeben sind

einen stark spezialisierten Zustand wird Differenzierung bezeichnet.

► Gewebe

In vielzelligen Organismen wie dem Menschen bestehen Gewebe aus unterschiedlichen Zellen, die jeweils gleiche Funktion und Morphologie besitzen (**Abb. 1**). Die Zellen im Gewebe sind aufgrund ihrer Spezialisierung und Arbeitsteilung allein meist nicht lebensfähig.

► Organe

Verschiedene Gewebetypen bilden in Vielzellern wie Menschen und Tieren abgegrenzte Funktionseinheiten, die Organe. Sie haben im Körper bestimmte Aufgaben zu erfüllen: Beispielsweise wird im Magen die Nahrung gemischt und angesäuert. Organe wie der Magen können mit anderen Funktionseinheiten, wie Leber und Dünndarm, zu Organsystemen mit übergeordneten Aufgaben, wie zum Verdauungssystem, zusammengeschlossen werden. Auf der Ebene der Organe werden Lebensvorgänge über Hormone gesteuert. Hormone sind Botenstoffe, die von spezialisierten Drüsenzellen ausgeschüttet werden, über das Blut zu Zielzellen transportiert werden und dort spezifische Reaktionen auslösen.

► Organismen

An einem lebenden Organismus, wie einem Tier oder einer Pflanze, lassen sich die Merkmale des Lebens am deutlichsten erkennen. Voraussetzung für die Existenz des Organismus ist das Zusammenwirken aller Organisationsebenen, von der Vielfalt der Moleküle in der Zelle bis zum Zusammenspiel der Organe.

► Populationen und Biozöosen

Da Organismen mit Artgenossen und mit Lebewesen anderer **Arten** (Spezies) zusammenleben, gibt es weitere Organisationseinheiten. Die Gruppe von Individuen, die der gleichen Art angehören und die in mehreren aufeinanderfolgenden Generationen im gleichen Lebensraum wohnen, wird Population genannt. Werden auch andere Arten, mit denen der gleiche Lebensraum geteilt wird, in die Betrachtung einbezogen, spricht man von Biozöosen (Lebensgemeinschaften).

Wissenswert

Die **Zelle** ist die kleinste Einheit des Lebens mit den Fähigkeiten der Selbsterhaltung und Vermehrung.

Zellen und Lebewesen haben lebensstypische Eigenschaften, wie Stoffwechsel, Wachstum, Fortpflanzung, Vererbung, Beweglichkeit, Kommunikation und Reaktion auf Reize, die in der Summe die **Kennzeichen für Leben** darstellen.

Die **Strukturebenen** bzw. **Organisationseinheiten** lebender Systeme sind Biomoleküle, zelluläre Grundstrukturen (z. B. Zellorganellen), Zellen, Gewebe, Organe, Organismen, Populationen und Biozöosen.

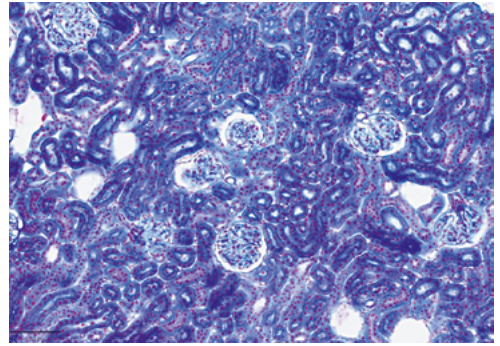


Abb. 1 Gewebe der murinen Niere, mikroskopische Aufnahme

Art, Spezies

Gruppe von Organismen, die sich von anderen Organismengruppen unterscheiden, sich untereinander fortpflanzen und fruchtbaren Nachwuchs erzeugen können

Wissenskontrolle

1. Erklären Sie die Begriffe Zellen und Einzeller.
2. Welche Kennzeichen stehen für die Existenz von Leben?

2 Biochemie – Grundlagen

Einfachbindung

Kovalente chemische Bindung, die durch ein Elektronenpaar gebildet wird und in sich selbst drehbar ist

Funktionelle Gruppe

Atomgruppen in organischen Verbindungen, die das Reaktionsverhalten der Verbindungen bestimmen

Makromoleküle

Moleküle, die aus vielen gleichen oder gleichartigen Bausteinen bestehen und meist eine große Molekülmasse besitzen

Enzyme

Biochemische Katalysatoren der Reaktionen im Stoffwechsel

Biomasse

Durch Lebewesen gebildetes organisches Material

Als Biomoleküle werden die in Zellen vorhandenen biologisch aktiven Moleküle bezeichnet, die an den Stoffwechselfvorgängen und anderen biologischen Prozessen beteiligt sind. Die Zellstrukturen und deren Inhalte bestehen aus **organischen Verbindungen**, den **Kohlenwasserstoffen**. Sie bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H). Darüber hinaus können Biomoleküle die vier Elemente Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Phosphor (P) und Schwefel (S) enthalten, sie werden **Heteroatome** genannt.

Kohlenstoffatome können miteinander und mit anderen Elementen stabile Bindungen eingehen, sie bilden das Grundgerüst der Biomoleküle. Besondere Charakteristika von Verbindungen des Kohlenstoffs sind:

- ▶ C-Atome können vier Bindungen zu anderen Atomen eingehen, sowohl **Einfachbindungen** als auch Doppel- oder Dreifachbindungen.
- ▶ C-Atome können mit weiteren C-Atomen kettenförmige Verbindungen bilden, wobei sowohl Einfachbindungen als auch Doppelbindungen zwischen den C-Atomen möglich sind.
- ▶ C-Atome bilden mit anderen C-Atomen lineare oder verzweigte Kohlenwasserstoffe oder auch ringförmige C-Verbindungen, die cyclische Kohlenwasserstoffe genannt werden.
- ▶ Doppel- oder Dreifachbindungen zwischen den C-Atomen eines Kohlenwasserstoffs beeinflussen ebenso wie Bindungen zu Heteroatomen oder Heteroatome enthaltenden Atomgruppen sein Reaktionsverhalten. Diese für einen Kohlenwasserstoff charakteristischen Gruppen werden als **funktionelle Gruppen** bezeichnet.

Die Strukturen der Kohlenwasserstoffe sowie ihre funktionellen Gruppen bilden die Basis für die Varietät organischer Moleküle. Die in Lebewesen vorkommenden Verbindungen können in niedermolekulare und hochmolekulare Stoffe eingeteilt werden.

Beispiele für niedermolekulare Biomoleküle mit kleinem Molekulargewicht sind:

- ▶ **Lipide**, Moleküle mit lipophilem (fettlöslichem) Charakter, die in Biomembranen vorkommen und strukturelle Grenzschichten bilden,
- ▶ **Monomere** zum Aufbau von polymeren Verbindungen, wie Aminosäuren, Ein- und Mehrfachzucker und Nukleotide,
- ▶ weitere Verbindungen mit unterschiedlichen Strukturen und Funktionen, wie z. B. Vitamine und Vitaminderivate, sowie verschiedene Signalstoffe, wie Hormone für die Zellkommunikation und den Stoffwechsel.

Hochmolekulare organische Stoffe werden **Makromoleküle** genannt. Dabei handelt es sich zumeist um Polymere, die aus gleichen oder gleichartigen Bausteinen (Monomeren) bestehen.

Makromoleküle werden in folgende typische Stoffklassen eingeteilt:

- ▶ **Proteine (Eiweiße)**, die aus 20 verschiedenen Aminosäuren aufgebaut sind und, z. B. als **Enzyme**, zentrale Funktionen in und zwischen den Zellen erfüllen,
- ▶ **Polysaccharide (Kohlenhydrate)**, wie z. B. Stärke und Zellulose, die als Speicher- und Strukturpolymere den mengenmäßig größten Teil der gesamten **Biomasse** ausmachen,

- **Nukleinsäuren (DNA und RNA)**, die als Erbsubstanz und im Stoffwechsel essentielle Bedeutung haben.

Wissenswert

Biomoleküle sind überwiegend organische Verbindungen (Kohlenstoff-Verbindungen), die in der Zelle in großer struktureller und funktionaler Vielfalt vorhanden sind.

Die wichtigsten **Makromoleküle der Zelle** sind Proteine, Kohlenhydrate und Nukleinsäuren. Eine weitere wichtige Stoffklasse sind die Lipide, die für alle Zellen essentiell sind, da sie mit ihrem lipophilen Charakter in der Lage sind, Biomembranen aufzubauen.

2.1 Aminosäuren, Peptide und Proteine

Peptide und Proteine (Eiweiße), die im Organismus verschiedenste Funktionen erfüllen, sind aus Aminosäuren aufgebaut. Die Synthese erfolgt in allen lebenden Systemen einheitlich und stellt einen der wichtigsten zellulären Prozesse dar, die Proteinbiosynthese (s. Kap. 4.4, S. 188). Alle dabei eingebauten Aminosäuren werden **proteinogene Aminosäuren** genannt. Bis auf seltene Ausnahmen sind Peptide und Proteine aus 20 unterschiedlichen proteinogenen Aminosäuren aufgebaut. Diese 20 Standardbausteine werden auch die **kanonischen Aminosäuren** genannt.

2.1.1 Aufbau der Aminosäuren

Die in Proteinen vorkommenden Aminosäuren enthalten Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Sauerstoff- und Stickstoffatome, zwei der Aminosäuren besitzen zusätzlich Schwefelatome. Sämtliche Aminosäuremoleküle enthalten mindestens zwei **funktionelle Gruppen**, nämlich eine Carboxylgruppe (-COOH) und eine Aminogruppe (-NH₂).

Abb. 1 zeigt den allgemeinen Aufbau einer Aminosäure. Das zentrale C-Atom, das in Nachbarschaft zur Carboxylgruppe steht und α -C-Atom genannt wird, trägt zusätzlich die Aminogruppe. Das α -C-Atom besitzt außerdem ein H-Atom und eine Seitengruppe, die auch Rest (R) genannt wird. Die proteinogenen Aminosäuren haben unterschiedliche Seitengruppen mit möglichen weiteren funktionellen Gruppen.

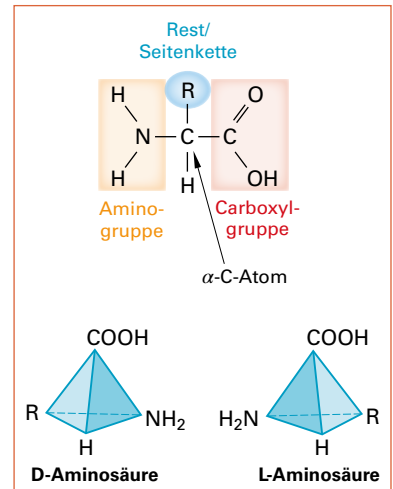


Abb. 1 Aufbau von Aminosäuren und enantiomerer Formen

Substanzen, die wie Aminosäuren ein Kohlenstoffatom enthalten, das Bindungen zu vier verschiedenen Nachbargruppen oder Substituenten aufweist, sind **Enantiomere** oder Stereoisomere. Die vier Substituenten gruppieren sich um das zentrale Kohlenstoffatom annähernd wie ein Tetraeder. Dabei sind zwei verschiedene Anordnungen der Substituenten möglich, die sich wie Abbild und Spiegelbild verhalten. Die zwei stereoisomeren Formen werden als D- und als L-Form bezeichnet (lat.: *dexter*: rechts; *laevus*: links). Alle enantiomeren Verbindungen sind **optisch aktiv**. Aminosäuren, die vier verschiedene Substituenten am α -C-Atom aufweisen und damit ein asymmetrisch substituiertes C-Atom besitzen, müssen folglich entweder als L- und als D-Aminosäuren vorliegen. Dies trifft nur auf die kleinste Aminosäure Glyzin nicht zu, die anstelle einer Seitengruppe ein zweites H-Atom trägt.

Enantiomere

Chemische Verbindungen, die sich in ihrer räumlichen Struktur unterscheiden (wie Abbild und Spiegelbild)

Optisch aktiv

Eigenschaft von Enantiomeren, die Schwingungsebene von polarisiertem Licht zu drehen

Aus Lebewesen stammende Proteine enthalten ausschließlich **L-Aminosäuren**. D-Aminosäuren kommen ebenfalls in der Natur vor, besonders häufig bei Bakterien. Sie sind dort, wie z. B. D-Alanin, ein Bestandteil der Murein-Zellwand (s. Kap. 5.2.3, S. 284).

D-Aminosäuren kommen in manchen Antibiotika zur Anwendung, weil sie nicht als Substrat erkannt werden und vor dem Angriff von Proteasen besser geschützt sind.

Einige D-Aminosäuren erfüllen beim Menschen eine wichtige physiologische Funktion. Beispielsweise sind D-Serin und D-Asparaginsäure Signalfstoffe im Zentralnervensystem.

Wissenswert

Aminosäuren enthalten sowohl eine Carboxylgruppe als auch eine Aminogruppe. Das α -C-Atom, das diese beiden funktionellen Gruppen trägt, enthält darüber hinaus ein H-Atom sowie eine Seitengruppe, die spezifisch für die jeweilige Aminosäure ist.

Aminosäuren sind **optisch aktive** Substanzen, die aufgrund des asymmetrisch substituierten α -C-Atoms in einer von zwei enantiomeren Formen vorliegen. Die Aminosäuren der Proteine sind **L-Aminosäuren**.

2.1.2 Eigenschaften von Aminosäuren

Aminosäuren sind **Ampholyte**, d. h. Verbindungen, die sowohl als Säure und auch als Base reagieren können. Zum einen hat die Carboxylgruppe die Neigung, ein Proton (H^+) abzugeben, wirkt als Protonendonator und hat eine Säurefunktion. Die Carboxylgruppe wird dabei zu einer negativ geladenen Gruppe ($-COO^-$). Zum anderen kann die Aminogruppe positiv geladene Teilchen wie Protonen anlagern, da das Stickstoffatom ein freies Elektronenpaar aufweist. Protonenakzeptoren besitzen einen basischen Charakter und die Aminogruppe enthält dann eine positive Ladung ($-NH_3^+$). Aminosäuren können gleichzeitig Protonen aufnehmen und Protonen abgeben. Durch Protonenwanderung innerhalb des Aminosäuremoleküls entstehen **Zwitterionen**, die gleichzeitig eine positive und eine negative Ladung aufweisen.

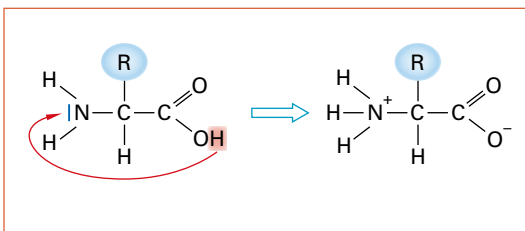


Abb. 1 Aminosäuren, Bildung von Zwitterionen

Physiologisch

Den normalen Abläufen und Körperfunktionen des menschlichen Organismus entsprechend

Bei niedrigem pH-Wert werden Protonen von der negativen Carboxylgruppe gebunden und die Aminosäuremoleküle werden zu Kationen. Wird einer Aminosäurelösung eine Base zugefügt, wird das der Aminogruppe angelagerte Proton abgespalten (Deprotonierung) und verbindet sich mit OH^- -Ionen zu H_2O -Molekülen. Aus dem Zwitterion entsteht aufgrund der deprotonierten Carboxylgruppe ein Anion. Im **physiologischen** pH-Bereich, der um den Wert von 7 liegt, liegen Aminosäuren überwiegend als Zwitterionen vor (Abb. 1). Sowohl die kationische als auch die anionische Molekülform liegen zu einem geringen Anteil in der Lösung vor.

Eine Lösung aus Aminosäuren besitzt eine **Pufferwirkung**. Bei jeder Änderung des pH-Wertes kommt es zu einer Protonierung oder Deprotonierung der Aminosäuren, je nachdem ob die Lösung saurer oder basischer wird. Weil eine Aminosäure sowohl wie eine Base als auch wie eine Säure reagieren kann, wird der pH-Wert der Lösung nicht stark verändert. Da jede Aminosäure mindestens zwei protonierbare oder deprotonierbare

Gruppen besitzt, gibt es auch zwei Pufferbereiche. Histidin ist aufgrund seiner Seitenkette besonders gut im physiologischen pH-Bereich als Puffer wirksam.

Bei einem bestimmten pH-Wert liegen genau gleiche Mengen an Anionen und Kationen der Aminosäuren vor. Dieser pH-Wert wird als **isoelektrischer Punkt** bezeichnet, da die Moleküle in einem elektrischen Feld aufgrund der neutralen Gesamtladung der Aminosäuren nicht wandern. Der isoelektrische Punkt der verschiedenen Aminosäuren ist unterschiedlich, da die Restgruppen Einfluss auf die Moleküleigenschaften ausüben.

Aminosäuren können über **Peptidbindungen** miteinander verknüpft werden (**Abb. 1**). Zwischen der Aminogruppe einer Aminosäure und der Carboxylgruppe einer anderen Aminosäure entsteht durch Wasserabspaltung ein Dipeptid. Diese Reaktion ist eine **Kondensationsreaktion**. Durch eine Hydrolysereaktion, bei der ein Wassermolekül benötigt wird, kann die Peptidbindung wieder gespalten werden und Aminosäuren entstehen. Wird eine dritte Aminosäure mit dem Dipeptid verknüpft, entsteht ein Tripeptid. Durch Einbau weiterer Aminosäuren können Oligopeptide oder sehr lange Polypeptidketten entstehen.

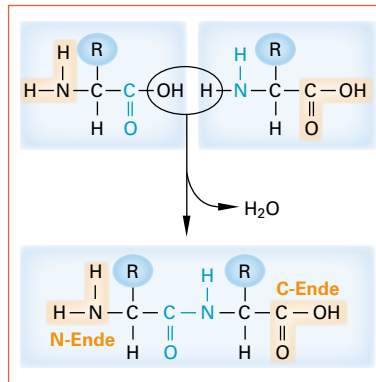


Abb. 1 Peptidbindung zwischen zwei Aminosäuren

Die in Proteinen zu findenden 20 Aminosäuren enthalten 20 verschiedene Restgruppen. Die Seitenketten sind von entscheidender Bedeutung für die Ausbildung der dreidimensionalen Struktur, die ein Protein im wässrigen Milieu der Zelle einnimmt.

Unpolare Aminosäuren mit hydrophoben Restgruppen

Restgruppen wie die **aliphatischen Seitenketten** sind **hydrophob**, stoßen Wassermoleküle ab und haben die Neigung, sich zusammenzulagern (**Abb. 2**). Als unpolare Moleküle können sie keine Wasserstoffbrücken (H-Brücken) mit Wassermolekülen eingehen und sind in Wasser schlecht löslich. Die Kohlenwasserstoffketten können aber miteinander kompakte Strukturen ohne größere Zwischenräume bilden. **Glyzin** besitzt als Seitenkette nur ein Wasserstoffatom und ist räumlich die kleinste Aminosäure. **Alanin** als zweitkleinste weist eine Methylgruppe (-CH₃) auf. **Valin, Leucin** und **Isoleucin** haben noch größere Kohlenwasserstoffreste und nehmen mehr Platz im Protein ein.

Aminosäure	Restgruppe
Glycin	-H
Alanin	-CH ₃
Valin	-CH(CH ₃) ₂
Leucin	-CH ₂ -CH(CH ₃) ₂
Isoleucin	-CH(CH ₃)-CH ₂ -CH ₃
Methionin	-CH ₂ -CH ₂ -S-CH ₃
Prolin	-CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -

Abb. 2 Aminosäuren mit hydrophoben Restgruppen

Eine hydrophobe Seitenkette besitzt auch **Methionin**, eine der zwei schwefelhaltigen Aminosäuren. Die Aminosäure **Prolin** verfügt über eine **sekundäre Aminogruppe** und unterscheidet sich von allen anderen Aminosäuren dadurch, dass die Seitenkette nicht nur mit dem α-C-Atom, sondern auch mit dem Stickstoffatom der Aminogruppe kovalent verbunden ist.

Kondensationsreaktion

Chemische Reaktion, bei der sich zwei Moleküle unter Abspaltung eines einfachen Moleküls (meist Wasser) miteinander verbinden

Aliphatische Verbindungen

Ketten- oder ringförmige Kohlenwasserstoffe mit Einfach-, Doppel- oder Dreifachbindungen zwischen den C-Atomen und ggf. weiteren funktionellen Gruppen, aber ohne aromatisches Kohlenstoff-Ringsystem

Sekundäre Aminogruppe

Aminogruppe, deren Stickstoffatom mit zwei Kohlenstoffatomen verbunden ist

Aromatische Verbindungen

Ringförmiger, planarer Kohlenwasserstoff mit abwechselnd C-C-Einfach- und -Doppelbindungen und hoher Stabilität, weil die Elektronen der Doppelbindungen über den gesamten Ring verteilt sind (Mesomeriestabilisierung)

Unpolare Aminosäuren mit aromatischen Seitenketten

Einige der Aminosäuren mit **aromatischen** Seitenketten (**Abb. 1**), wie Phenylalanin und Tryptophan, sind stark hydrophob. Die Aminosäure **Phenylalanin** besitzt einen Phenylring (Benzolring) und **Tryptophan** einen Indolring, der außer Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen noch ein Stickstoffatom enthält. Die aromatische Aminosäure **Tyrosin** besitzt eine Hydroxylgruppe, die dazu führt, dass diese Aminosäure weniger hydrophob als Phenylalanin ist.

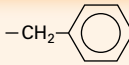
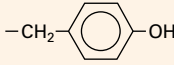
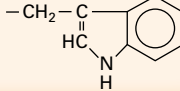
Aminosäure	Restgruppe
Phenylalanin	
Tyrosin	
Tryptophan	

Abb. 1 Aminosäuren mit aromatischen Restgruppen

Polare Aminosäuren

Verschiedene Aminosäuren besitzen polare Aminosäurereste, die eine hohe Affinität zu Wasser und damit **hydrophile** Eigenschaften haben. Die Seitengruppen dieser Aminosäuren können geladen (**Abb. 2**) oder ungeladen sein. Die **geladenen Seitengruppen** bestehen aus einer Aminogruppe oder einer Carboxylgruppe. Entsprechend werden die polaren Aminosäuren mit einer Ladung an der Restgruppe in basische und saure Aminosäuren unterteilt.

Zu den **basischen Aminosäuren** gehören Lysin, Arginin und Histidin. **Lysin** und **Arginin** haben sehr lange Seitenketten und sind aufgrund der zusätzlichen Aminogruppe bei neutralem pH-Wert positiv geladen. Die Seitenkette von **Histidin** hat eine aromatische Ringstruktur aus drei Kohlenstoff- und zwei Stickstoffatomen, einen sogenannten Imidazolring. Er kann im physiologischen pH-Wert-Bereich protoniert oder deprotoniert sein und damit in ungeladener Form oder mit positiver Ladung vorliegen.

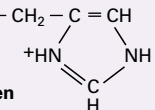
Aminosäure	Restgruppe	
Lysin	$-(\text{CH}_2)_4 - \text{NH}_3^+$	
Arginin	$-(\text{CH}_2)_3 - \text{NH} - \text{C} = \text{NH}_2^+$ NH_2	
Histidin		
basische Aminosäuren		
Asparaginsäure	$-\text{CH}_2 - \text{COO}^-$	saure Aminosäuren
Glutaminsäure	$-(\text{CH}_2)_2 - \text{COO}^-$	

Abb. 2 Aminosäuren mit geladenen Restgruppen

Asparaginsäure und **Glutaminsäure** sind die **sauren Aminosäuren**, die in Proteinen enthalten sind. Bei physiologischem pH-Wert liegen ihre Seitenketten überwiegend negativ geladen vor. Die Anionen, die bei der Deprotonierung der Carboxylgruppen entstehen, werden **Aspartat** bzw. **Glutamat** genannt.

Weitere Aminosäuren besitzen hydrophile Seitenketten mit **ungeladenen Restgruppen**, z. B. solche, die wie **Serin** und **Threonin** eine Hydroxylgruppe an ihren aliphatischen Seitenketten besitzen (**Abb. 1**, S. 17).

Asparagin und **Glutamin** sind von den sauren Aminosäuren Asparaginsäure und Glutaminsäure abgeleitete Verbindungen (Derivate). Sie haben statt der endständigen Carboxylgruppe eine **Amidgruppe** und weisen damit keine Ladung am Rest auf. Die zweite Aminosäure mit einem Schwefelatom **Cystein** enthält eine Sulfhydrylgruppe (-SH), die sehr reaktiv ist. Sie kann mit einem anderen Cysteinrest des Proteins Disulfidgruppen (S-S- oder Schwefelbrücken) bilden. Die Ausbildung von Disulfidbindungen wird durch ein Enzym katalysiert.

Aminosäure	Restgruppe
Serin	$-\text{CH}_2\text{OH}$
Threonin	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ -\text{CH}-\text{CH}_3 \end{array}$
Asparagin	$-\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}_2$
Glutamin	$-(\text{CH}_2)_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}_2$
Cystein	$-\text{CH}_2-\text{SH}$

Abb. 1 Aminosäuren mit ungeladenen polaren Restgruppen

Amide, Säureamide

Verbindung einer organischen Säure mit einem Amin (formal: Ersetzung der OH-Gruppe der Carboxylgruppe durch -NH oder -NH₂)

Nicht-kanonische Aminosäuren

Zusätzlich zu den 20 bei allen Lebewesen vorkommenden kanonischen Aminosäuren gibt es weitere natürlich vorkommende Aminosäuren, die nicht-kanonischen Aminosäuren, die proteinogen oder nicht-proteinogen sein können. Proteinogen sind zwei Aminosäuren, die allerdings nur selten und nicht in allen Organismen vorkommen:

- ▶ **Selenocystein** ist ein strukturelles Analogon der Aminosäure Cystein und enthält anstelle des Schwefelatoms ein reaktionsfähiges Selenatom. Selenocystein ist Bestandteil einiger menschlicher Proteine. Die Aminosäure wird vor allem in Enzymen gefunden, die **Redoxreaktionen** katalysieren.
- ▶ **Pyrrrolysin** ist eine Verbindung, die der Aminosäure Lysin ähnelt. Sie findet sich in Proteinen einiger Bakterien und Archaeen, aber nicht beim Menschen.

Nicht-proteinogene Aminosäuren entstehen oft, wenn eine Aminosäure im Anschluss an die Proteinbiosynthese enzymatisch modifiziert wird. Inzwischen sind auch zahlreiche nicht-proteinogene Aminosäuren bekannt, die im Stoffwechsel oder bei der Kommunikation zwischen Zellen eine Rolle spielen. So dienen einige Aminosäuren und davon abgeleitete Verbindungen als Botenstoffe des Körpers. Die meisten nicht-proteinogenen Aminosäuren leiten sich von den proteinogenen L- α -Aminosäuren ab. Andere sind β -Aminosäuren oder γ -Aminosäuren, bei denen sich die Aminogruppe nicht am α -C-Atom befindet, sondern am 2. oder 3. C-Atom.

Beispiele für nicht-proteinogene Aminosäuren sind:

- ▶ L-Thyroxin, ein Hormon der **Schilddrüse**,
- ▶ GABA (γ -Aminobuttersäure), ein Botenstoff, der von Nervenzellen durch Decarboxylierung von Glutaminsäure gebildet wird,
- ▶ D-Serin, ein **Neurotransmitter**, sowie andere D-enantiomere Aminosäuren,
- ▶ L-DOPA (L-3,4-Dihydroxyphenylalanin), eine Vorstufe von Neurotransmittern, wie Adrenalin, und ein Arzneistoff (Levodopa).

Als **Redox-Reaktion** wird die in einer gemeinsamen Reaktion ablaufende Kombination von Oxidation und Reduktion bezeichnet, wobei Elektronen übertragen werden

Schilddrüse

Hormondrüse, die sich bei Säugetieren unterhalb des Kehlkopfes befindet und iodhaltige Hormone, wie Thyroxin, sowie andere Hormone bildet

Neurotransmitter

Biomoleküle, die Signale zwischen Nervenzellen übertragen

Wissenswert

Aminosäuren, die in Abhängigkeit vom pH-Wert als Säure oder als Base reagieren können, liegen häufig als **Zwitterionen** vor, die eine positive und eine negative Ladung haben. Sie besitzen eine **Pufferwirkung**, d. h. sie können bei Zugabe kleiner Mengen an Säuren oder Basen den pH-Wert konstant halten.

Der **isoelektrische Punkt** ist der pH-Wert, bei dem Aminosäuren gleich viele negativ geladene Säuregruppen wie positiv geladene Aminogruppen besitzen.

Aminosäuren können über **Peptidbindungen** miteinander verknüpft werden, indem die Aminogruppe mit der Carboxylgruppe einer anderen Aminosäure unter Wasserabspaltung reagiert.

Aminosäuren mit aliphatischen oder aromatischen Seitenketten (Ausnahme: Tyrosin) sind hydrophob und bestrebt, sich zur Vermeidung von Wasserkontakt zusammenzulagern.

Aminosäuren mit einem polaren Rest besitzen eine hydrophile Seitengruppe, die geladen oder ungeladen sein kann.

Basische Aminosäuren sind Lysin, Arginin und Histidin. Sie enthalten im Rest eine Aminogruppe, die im physiologischen pH-Bereich positiv geladen ist.

Saure Aminosäuren, wie Asparaginsäure und Glutaminsäure, enthalten im Rest eine Carboxylgruppe, die bei pH 7 negativ geladen ist.

Aminosäuren mit **ungeladenen polaren Restgruppen** sind Serin und Threonin, die eine OH-Gruppe am Rest aufweisen, die Säureamide Asparagin und Glutamin sowie Cystein mit einer SH-Gruppe.

Nicht-proteinogene Aminosäuren können in Proteinen enthalten sein, wenn Aminosäuren nachträglich modifiziert werden. Sie stellen oft Signalstoffe, wie z. B. Neurotransmitter, bzw. eine Vorstufe bei deren Synthese dar.

2.1.3 Aminosäuren in Nahrung und Stoffwechsel

Aufgrund der großen Bedeutung der Aminosäuren für die Ernährung und den menschlichen Stoffwechsel sind Abkürzungen der Verbindungen weit verbreitet. Für proteinogene Aminosäuren gibt es zwei Kürzelsysteme. Das eine Abkürzungssystem besteht aus jeweils drei Buchstaben für eine Aminosäure, das andere benutzt einen 1-Buchstaben-Code (**Tab. 2.1**, S. 19), der dazu dient, die oft langen Sequenzen der Aminosäuren in Peptiden und Proteinen darzustellen.

Proteasen

Peptidbindungen spaltende Enzyme, die Proteine vom Ende der Peptidkette abbauen (Exoproteasen) oder im Inneren der Kette spalten

Mit der Nahrung aufgenommene Proteine werden durch Verdauungsenzyme des Darms, durch **Proteasen**, in Peptide und Aminosäuren aufgespalten. Diese werden in der Leber weiter ab- oder umgebaut. Die so gewonnenen Aminosäuren können bei der Proteinbiosynthese der Zellen zur Neusynthese von Proteinen verwendet werden. Zur Synthese vieler Neurotransmitter kann das CO₂ der Carboxylgruppe abgespalten werden, so dass biogene Amine entstehen.

Tab. 2.1 Aminosäuren, Kürzel und Eigenschaften

Aminosäure	3-Buchstaben-Code	1-Buchstaben-Code	Polarität	Säure/Baseverhalten	Essentielle Aminosäure
Alanin	Ala	A	unpolar	neutral	nein
Arginin	Arg	R	polar	basisch	für Kinder
Asparagin	Asn	N	polar	neutral	nein
Asparaginsäure	Asp	D	polar	sauer	nein
Cystein	Cys	C	polar	neutral	für Kinder
Glutamin	Gln	Q	polar	neutral	nein
Glutaminsäure	Glu	E	polar	sauer	nein
Glyzin	Gly	G	unpolar	neutral	nein
Histidin	His	H	polar	basisch	für Kinder
Isoleucin	Ile	I	unpolar	neutral	ja
Leucin	Leu	L	unpolar	neutral	ja
Lysin	Lys	K	polar	basisch	ja
Methionin	Met	M	unpolar	neutral	ja
Phenylalanin	Phe	F	unpolar	neutral	ja
Prolin	Pro	P	unpolar	neutral	nein
Serin	Ser	S	polar	neutral	nein
Threonin	Thr	T	polar	neutral	ja
Tryptophan	Trp	W	unpolar	neutral	ja
Tyrosin	Tyr	Y	polar	neutral	für Kinder
Valin	Val	V	unpolar	neutral	ja

Der menschliche Körper kann, im Gegensatz zu vielen Bakterien, nicht alle von ihm benötigten Aminosäuren selbst herstellen. Er muss die **essentiellen Aminosäuren** über die Proteine der Nahrung aufnehmen. Dabei handelt es sich um die acht Aminosäuren Valin, Leucin, Isoleucin, Threonin, Phenylalanin, Tryptophan, Methionin und Lysin, die auch als **unentbehrliche Aminosäuren** bezeichnet werden. Es gibt Hinweise, dass Kinder mit weiteren Aminosäuren, wie Arginin, Cystein, Histidin und Tyrosin, versorgt werden müssen, da die Eigensynthese nicht ausreichend ist.

Der menschliche Körper kann einige Aminosäuren zwar nicht selbst herstellen, aber durch chemische Modifizierung aus anderen Aminosäuren bilden. Beispielsweise sind die schwefelhaltigen Aminosäuren Methionin und Homocystein ineinander umwandelbar. Andere Aminosäuren können wahrscheinlich unter bestimmten physiologischen Bedingungen nicht oder nicht in ausreichenden Mengen bereitgestellt werden.

Neurotransmitter

Biomoleküle, die Signale zwischen Neuronen übertragen

Myelinscheide

Lipidreiche Schicht um die Fortsätze (Axone) von Nervenzellen

In der Regel wird bei einer ausgewogenen Ernährung der Bedarf an essentiellen Aminosäuren entweder durch tierische Proteine oder durch eine geeignete Kombination verschiedener pflanzlicher Proteine gedeckt, beispielsweise aus Getreide und Hülsenfrüchten. Pflanzliche Proteine haben allerdings meist eine geringere **biologische Wertigkeit**, da sich die prozentuale Zusammensetzung von menschlichen Proteinen stark unterscheidet und der Gehalt essentieller Aminosäuren gering ist.

Klinische Anwendung: Phenylketonurie

Die Phenylketonurie ist eine angeborene und weit verbreitete Stoffwechselstörung (s. auch S. 266), bei der Phenylalanin nicht in die Aminosäure Tyrosin umgewandelt werden kann. Es fehlen genetisch bedingt funktionierende Enzyme, die zur Synthese der Aminosäure benötigt werden. Im Blut treten hohe Konzentrationen von Phenylalanin auf, die z. B. die Produktion des **Neurotransmitters** Serotonin beeinträchtigen. Ein Teil des überschüssigen Phenylalanins wird zu Phenylketonen verstoffwechselt und mit dem Urin ausgeschieden, was zu dem Namen Phenylketonurie geführt hat.

Unbehandelt führt die Erbkrankheit schon im Säuglingsalter zu verzögerter geistiger Entwicklung und schweren Hirnschädigungen. Es treten Störungen bei der Bildung der **Myelinscheiden** auf, von denen das Gehirn betroffen ist.

Diese Krankheit wird in Deutschland im Rahmen des Neugeborenencreenings erfasst. Die Bestimmung des Phenylalanin gehalts im Blut gibt vom vierten bis sechsten Lebensstag an sichere Hinweise auf die Erkrankung. Die betroffenen Personen entwickeln sich bei konsequenter eiweißarmer Diät normal. Menschen mit Phenylketonurie dürfen auch den Süßstoff Aspartam nicht konsumieren, der aus Asparaginsäure und Phenylalanin besteht. Ohne strenge Diät entwickeln betroffene Kinder oder Erwachsene neurologische und psychiatrische Symptome.

Klinische Anwendung: Chinarestaurant-Syndrom

Glutamat wird für das Chinarestaurant-Syndrom verantwortlich gemacht, das nach glutamatgewürztem Essen Übelkeit, Herzrasen und Kopfschmerzen hervorrufen soll. Wissenschaftliche Studien zeigen allerdings zumeist keine Indizien für gesundheitsschädliche Wirkungen von Glutamat. Jedoch bestehen Hinweise auf einen Zusammenhang von häufigem Glutamatverbrauch und der Entstehung von Übergewicht.

Glutamat ist im Gehirn ein wichtiger **Neurotransmitter**. Bei vielen Erkrankungen des Zentralnervensystems, wie Alzheimer-Demenz und Parkinson, wird ein erhöhter Glutamat Spiegel beobachtet. Es ist noch nicht geklärt, ob die Veränderung des Glutamat Spiegels nur eine Folge des Erkrankungsprozesses ist.

■ Abbau von Aminosäuren

Aminosäuren, die nicht benötigt werden, können abgebaut werden. Dies geschieht vor allem in der Leber durch den **Harnstoffzyklus** (Ornithin-Zyklus). Ziel des Stoffwechselwegs ist es, die Aminogruppen der Aminosäuren in Harnstoff umzuwandeln, um die Bildung von freiem und toxischem Ammoniak zu verhindern.

Das Kohlenstoffgerüst der Aminosäuren kann als Energieträger für den Keton- oder den Glukosestoffwechsel (s. Kap. 2.6, S. 104) verwendet