

Wenisch



Kurzlehrbuch

Biologie

5. Auflage



Kurzlehrbuch

Chemie

5. Auflage



ELSEVIER

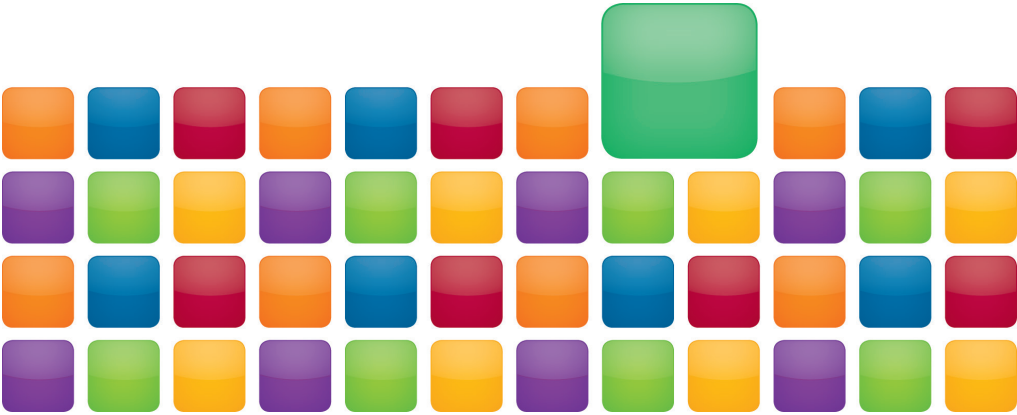


Kurzlehrbuch

Physik für Mediziner

5. Auflage

ELSEVIER



ELSEVIER

Urban & Fischer

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Zellbiologie, Zellteilung und Zelltod	1	1.14	Zytoskelett	26
1.1	Wegweiser	2	1.14.1	Funktion und Einteilung	26
1.2	Zellbegriff und zelluläre Strukturelemente	2	1.14.2	Mikrotubuli	26
1.2.1	Die Zelle	2	1.14.3	Aktinfilamentsystem	28
1.2.2	Strukturelemente der Zelle	3	1.14.4	Intermediärfilamente	30
1.3	Plasmamembran	5	1.14.5	Membranzytoskelett	32
1.3.1	Aufbau der Zellmembran	5	1.15	Zellzyklus und Zellteilung	32
1.3.2	Glykokalix	6	1.15.1	Zellzyklus	32
1.3.3	Membranproteine	7	1.15.2	Die Mitose und ihre Stadien	35
1.3.4	Membrankontakte	7	1.15.3	Zytokinese	38
1.3.5	Transportmechanismen	9	1.16	Meiose	38
1.4	Zellkern	9	1.16.1	Definition und Funktion	38
1.4.1	Lokalisation und Funktion	9	1.16.2	Verlauf der 1. Reifeteilung	39
1.4.2	Kernhülle	10	1.16.3	Verlauf der 2. Reifeteilung	41
1.4.3	Nucleolus	11	1.16.4	Meiose bei der Keimzellbildung	43
1.4.4	Chromatin	11	1.17	Zelltod	44
1.5	Zytoplasma, Zytosol	12	1.17.1	Apoptose	44
1.6	Ribosomen	13	1.17.2	Nekrose	45
1.7	Endoplasmatisches Retikulum	14	1.18	Zellkommunikation und Signaltransduktion	46
1.7.1	Definitionen	14	1.18.1	Allgemeine Prinzipien	46
1.7.2	Raues endoplasmatisches Retikulum	14	1.18.2	Signalmoleküle	46
1.7.3	Glattes endoplasmatisches Retikulum	16	1.18.3	Signalrezeptoren	47
1.8	Golgi-Komplex	17	2	Genetik	51
1.9	Exozytose	18	2.1	Wegweiser	52
1.10	Endozytose	19	2.2	Organisation und Funktion eukaryontischer Gene	52
1.10.1	Rezeptorvermittelte Endozytose	20	2.2.1	Aufbau und Replikation der DNA	52
1.10.2	Pinozytose	20	2.2.2	DNA-Reparatur	55
1.10.3	Phagozytose	21	2.2.3	Transkription der DNA	57
1.11	Lysosomen	21	2.2.4	Regulation der Genexpression	60
1.11.1	Entstehung primärer Lysosomen	21	2.2.5	Translation und genetischer Code	60
1.11.2	Sekundäre Lysosomen	22	2.2.6	Kartierung von Genen	63
1.11.3	Tertiäre Lysosomen	22	2.2.7	Genfamilien	64
1.12	Peroxisomen	23	2.2.8	Repetitive Elemente	64
1.13	Mitochondrien	24	2.3	Die Chromosomen des Menschen	67
1.13.1	Vorkommen	24	2.3.1	Morphologie und Darstellung der Chromosomen	67
1.13.2	Entstehung und Vermehrung	24	2.3.2	Differenzielle Darstellung	69
1.13.3	Einteilung und Funktion	25	2.3.3	Molekulare Zytogenetik	69

2.4	Formale Genetik	70	3.3	Aufbau der Bakterienzelle	98
2.4.1	Begriffe und Symbole	70	3.3.1	Unterschiede zur Euzyte	98
2.4.2	Mendel-Gesetze	71	3.3.2	Zellwand	99
2.4.3	Autosomal-dominanter und -kodominanter Erbgang	73	3.3.3	Geißeln und Pili	101
2.4.4	Autosomal-rezessiver Erbgang	75	3.3.4	Kapseln	103
2.4.5	X-chromosomaler Erbgang	76	3.3.5	Zellmembran	103
2.4.6	Imprinting	78	3.3.6	Ribosomen	104
2.4.7	Mitochondriale Vererbung	79	3.3.7	Genom	104
2.4.8	Multifaktorielle Vererbung	80	3.3.8	Sporen	105
2.5	Gonosomen, Geschlechtsbestimmung und -differenzierung	80	3.4	Wachstum der Bakterien	105
2.5.1	Gonosomen	80	3.4.1	Stoffwechsel	105
2.5.2	X-Inaktivierung	81	3.4.2	Bakterienkultur	106
2.5.3	Geschlechtsdifferenzierung	82	3.4.3	Wachstum und Vermehrung	107
2.6	Mutationen	83	3.5	Bakteriengenetik	107
2.6.1	Genmutationen	83	3.5.1	Genregulation	107
2.6.2	Strukturelle Chromosomenmutationen	85	3.5.2	Übertragung von Genmaterial	109
2.6.3	Numerische Chromosomenmutationen	86	3.6	Pilze	110
2.6.4	Mosaik und Chimären	87	3.6.1	Lebensweise	110
2.6.5	Mutationen in Somazellen	88	3.6.2	Wachstumsformen	110
2.7	Klonierung und Nachweis von Genen bzw. Genmutationen	88	3.6.3	Vermehrung	111
2.7.1	Gentechnologische Methoden	88	3.6.4	Synthese von Antibiotika und Toxinen	111
2.7.2	Polymerase-Kettenreaktion	90	3.7	Viren	112
2.7.3	Nachweis von Genmutationen	90	3.7.1	Virusbegriff	112
2.7.4	Genetische Beratung und vorgeburtliche Diagnostik	91	3.7.2	Aufbau	112
2.8	Entwicklungsgenetik	92	3.7.3	Vermehrung	113
2.9	Populationsgenetik	93	3.8	Prionen	114
2.9.1	Hardy-Weinberg-Gesetz	93	3.9	Ausgewählte Kapitel aus der Ökologie mit Bezügen zur Mikrobiologie	115
2.9.2	Selektion und Zufall	93	3.9.1	Stoffkreisläufe	115
2.9.3	Genetische Polymorphismen	94	3.9.2	Nahrungskette	117
			3.9.3	Populationsdynamik	119
			3.9.4	Wechselbeziehungen zwischen artverschiedenen Organismen	120
3	Grundlagen der Mikrobiologie und der Ökologie	97		Register	121
3.1	Wegweiser	97			
3.2	Morphologische Grundformen der Bakterien	98			

Allgemeine Zellbiologie, Zellteilung und Zelltod

1.1	Wegweiser	2	1.11	Lysosomen	21
			1.11.1	Entstehung primärer Lysosomen	21
1.2	Zellbegriff und zelluläre Strukturelemente	2	1.11.2	Sekundäre Lysosomen	22
1.2.1	Die Zelle	2	1.11.3	Tertiäre Lysosomen	22
1.2.2	Strukturelemente der Zelle	3	1.12	Peroxisomen	23
1.3	Plasmamembran	5	1.13	Mitochondrien	24
1.3.1	Aufbau der Zellmembran	5	1.13.1	Vorkommen	24
1.3.2	Glykokalix	6	1.13.2	Entstehung und Vermehrung	24
1.3.3	Membranproteine	7	1.13.3	Einteilung und Funktion	25
1.3.4	Membrankontakte	7	1.14	Zytoskelett	26
1.3.5	Transportmechanismen	9	1.14.1	Funktion und Einteilung	26
1.4	Zellkern	9	1.14.2	Mikrotubuli	26
1.4.1	Lokalisation und Funktion	9	1.14.3	Aktinfilamentsystem	28
1.4.2	Kernhülle	10	1.14.4	Intermediärfilamente	30
1.4.3	Nucleolus	11	1.14.5	Membranzytoskelett	32
1.4.4	Chromatin	11	1.15	Zellzyklus und Zellteilung	32
1.5	Zytoplasma, Zytosol	12	1.15.1	Zellzyklus	32
1.6	Ribosomen	13	1.15.2	Die Mitose und ihre Stadien	35
			1.15.3	Zytokinese	38
1.7	Endoplasmatisches Retikulum ...	14	1.16	Meiose	38
1.7.1	Definitionen	14	1.16.1	Definition und Funktion	38
1.7.2	Raues endoplasmatisches Retikulum	14	1.16.2	Verlauf der 1. Reifeteilung	39
1.7.3	Glattes endoplasmatisches Retikulum	16	1.16.3	Verlauf der 2. Reifeteilung	41
			1.16.4	Meiose bei der Keimzellbildung	43
1.8	Golgi-Komplex	17	1.17	Zelltod	44
1.9	Exozytose	18	1.17.1	Apoptose	44
			1.17.2	Nekrose	45
1.10	Endozytose	19	1.18	Zellkommunikation und Signaltransduktion	46
1.10.1	Rezeptorvermittelte Endozytose	20	1.18.1	Allgemeine Prinzipien	46
1.10.2	Pinozytose	20	1.18.2	Signalmoleküle	46
1.10.3	Phagozytose	21	1.18.3	Signalrezeptoren	47

IMPP-Hits

- Zytoskelett (► Kap. 1.14)
- Mitochondrien (► Kap. 1.13)
- Meiose (► Kap. 1.16)
- Zellzyklus und Zellteilung (► Kap. 1.15)
- Zellkern (► Kap. 1.4)
- Plasmamembran, Glykokalix (► Kap. 1.3.2)
- Endoplasmatisches Retikulum (► Kap. 1.7)
- Lysosomen (► Kap. 1.11)
- Peroxisomen (► Kap. 1.12)
- Apoptose (► Kap. 1.17.1)

1.1 Wegweiser

Die Zelle ist das kleinste selbstständig reproduktionsfähige biologische System. Alle höheren Organismen sind aus einzelnen Zellen aufgebaut. Dieses Kapitel beginnt mit einer Übersicht über den Aufbau der Zelle (► Kap. 1.2) und erklärt die Struktur und Funktion der einzelnen Zellbestandteile (► Kap. 1.3 bis ► Kap. 1.14). Daran anschließend werden die Vermehrung von Zellen durch Teilung (► Kap. 1.15, ► Kap. 1.16), der Zelltod (► Kap. 1.17) und Wege der Kommunikation zwischen Zellen beschrieben (► Kap. 1.18).

1.2 Zellbegriff und zelluläre Strukturelemente

1.2.1 Die Zelle

1.2.1.1 Die Zelle als kleinste Einheit des Lebens

Es stellte sich in der Biologie die Frage, wo die Grenze zwischen der belebten und der unbelebten Natur anzunehmen sei. Wird der Begriff des Lebendigen so definiert, dass ein Lebewesen

- über einen Stoffwechsel verfügt, d.h. Substanzen aus seiner Umgebung aufnimmt und andere Stoffe wieder an seine Umwelt abgibt, und
 - zu selbständiger Reproduktion in der Lage ist,
- dann ist die Zelle die **kleinste Einheit** des Lebens.

Die Zelle kann als das kleinste Individuum angesehen werden. Fast alle Mikroorganismen bestehen aus einer einzigen Zelle. Aber auch diese Einzeller stehen über den Stoffaustausch in ständigem Kontakt und damit in Kommunikation mit ihrer Umgebung. So ist in einer Zellkultur jede Zelle von den anderen abgegrenzt. Über die Veränderung des Nährstoffangebots in ihrer Umgebung und die Zunahme von Stoffwechselprodukten „erfährt“ die Zelle aber von der Existenz und dem Befinden ihrer Nachbarn.

Im Laufe der Evolution haben sich einzelne Zellen zu größeren Organismen zusammengeschlossen.

In höheren Organismen nehmen die Zellen jeweils spezialisierte Aufgaben wahr. Entsprechend ihrer Funktionen differenzieren sie sich zu den Zellen spezieller Gewebe und Organe.

1.2.1.2 Prokaryonten und Eukaryonten

Merke

Es existieren zwei grundsätzlich verschieden aufgebaute Zellformen, nach denen alle Organismen in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- **Prokaryonten**
- **Eukaryonten**

Diese Bezeichnungen leiten sich ab von griech. karyon = Kern. Prokaryont setzt sich zusammen aus pro (= für, vor) und karyon; eu kommt von der griechischen Bezeichnung für echt. In der Literatur werden gleichermaßen auch die Bezeichnungen **Eukaryoten** und **Prokaryoten** verwendet.

Die Zellen dieser Organismen werden als **Eukaryozyten** oder kurz **Euzyten** bzw. als **Prokaryozyten** (**Prozyten**) bezeichnet.

- Die Euzyten besitzen einen von einer Membran umschlossenen Zellkern. Das Innere der Zelle ist durch die Membranen des endoplasmatischen Retikulums in Kompartimente aufgeteilt. Es sind charakteristische Zellorganellen wie z.B. Mitochondrien vorhanden. Zur Gruppe der Eukaryonten gehören die einzelligen Protisten (Algen, einige Pilze und Protozoen, ► Kap. 3.3.1) und alle mehrzelligen Lebewesen, d.h. Tiere, Pflanzen und Pilze. Eine Besonderheit bilden die Erythrozyten, die in ihrer Reifungsphase ihren Zellkern verlieren.
- Die Prozyten sind dagegen einfacher aufgebaut, sie besitzen keinen Zellkern, das Innere der Zelle ist weniger stark unterteilt, endoplasmatisches Retikulum und Zellorganellen

sind nicht vorhanden. Die Organismengruppe der Prokaryonten umfasst die Archaeen (früher Archaeobakterien genannt) und die Bakterien, (► Kap. 3.3.1).

Einzelne Zellen sind im Lichtmikroskop sichtbar. Der Durchmesser der Euzyten liegt zwischen 5 und 100 µm. Der Durchmesser von Bakterien ist kleiner, in der Regel 1–5 µm. Die Zellen der Eukaryonten sind damit etwa 10-mal größer und besitzen das 1.000fache Volumen der Prozyten.

In der Evolution des Lebens haben sich zunächst die Prokaryonten entwickelt. Erst nachfolgend sind aus diesen die Eukaryonten entstanden. Die **Endosymbiontentheorie** geht davon aus, dass einige Prokaryonten andere Einzeller angegriffen, umschlossen und in ihr Inneres aufgenommen haben. Anstatt dort „aufgefressen und verdaut“ zu werden, haben einige der aufgenommenen Zellen als Symbionten (► Kap. 3.9.4) im Zellinneren weiterexistiert. Im weiteren Verlauf haben sich aus diesen Symbionten an spezifische Aufgaben angepasste Zellorganellen entwickelt.

Lerntipp

Prozyten erinnert an „Prototypen“, auch diese sind einfach aufgebaut und erinnern so an die Zellstruktur der Prozyten: einfache Unterteilung, keine Zellorganellen. Die Euzyten stellen strukturell das Gegenteil dar: komplexe Unterteilung und Bildung von Zellorganellen.

1.2.1.3 Die menschliche Zelle

Bei allen menschlichen Zellen handelt es sich um Euzyten. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird deshalb der Bau der Eukaryontenzelle und hier speziell der tierischen Zelle eingehender beschrieben. Prozyten und damit die Gruppe der Bakterien werden unter dem Thema Mikrobiologie in ► Kap. 3 behandelt. ► Abb. 1.1 zeigt die Eukaryontenzelle eines tierischen Organismus im Überblick. Nicht alle der in dieser verallgemeinerten Darstellung gezeigten Strukturelemente sind in jeder Zelle des Organismus vorhanden. In einem höheren Organismus haben sich die Zellen entsprechend ihrer Aufgaben differenziert und unterscheiden sich oft stark in ihrer äußeren Gestalt. So kann auch die Größe der Zellen unter Umständen stark von den in ► Tab. 1.1 angegebenen Werten abweichen.

- Relativ groß sind z. B. die **Hepatozyten** (Leberzellen), mit etwa 20–30 µm. Besonders stoffwechselaktive Zellen sind häufig polyploid, d. h.,

sie besitzen ein Mehrfaches des kompletten Chromosomensatzes. So ist etwa die Hälfte der Hepatozyten polyploid.

- Die **Erythrozyten** (roten Blutkörperchen) besitzen dagegen keinen Zellkern. Sie haben die bikonkave äußere Form einer abgeflachten und in der Mitte etwas eingedellten Scheibe. Ihr Durchmesser beträgt 7,5 µm.
- **Muskelzellen** haben eine langgestreckte, spindelförmige Gestalt. Die Fasern der glatten Muskulatur haben eine Länge von etwa 0,05 bis 0,5 mm und jeweils einen Zellkern pro Muskelzelle. Die Fasern der quergestreiften Muskulatur erreichen eine Länge bis zu 15 cm und besitzen mehrere Zellkerne. Es wird angenommen, dass sie aus der Verschmelzung mehrerer Zellen entstehen.
- Besonders auffällig ist die Gestalt der **Neuronen**. Aus dem Zellkörper der Nervenzelle gehen zahlreiche baumartige Verzweigungen hervor, die Dendriten, und eine lange, fortleitende Faser, das Axon. An einigen Stellen des menschlichen Körpers können die Axone eine Länge von über einem Meter erreichen.

1.2.2 Strukturelemente der Zelle

Die Zelle wird von einer **Zellmembran** umhüllt. Diese Zellmembran grenzt den Zellleib, das so genannte **Zytosom**, gegen die äußere Umgebung ab. Die Zellmembran ist selektiv für einzelne Stoffe durchlässig. Sie ermöglicht damit den ständigen Stoffaustausch zwischen der Zelle und ihrer Umgebung, aber auch die Abgrenzung eines definierten biochemischen Milieus des Zellinneren von der Außenwelt.

Das Zellinnere, der Bereich zwischen der Zellmembran und dem Zellkern, wird vom **Zytoplasma** ausgefüllt. Das Verhältnis der Volumina von Zellkern und Zytoplasma wird als **Kern-Plasma-Relation** bezeichnet. Die Kern-Plasma-Relation liegt, abhängig vom jeweiligen Zelltyp, meist zwischen 1:7 und 1:10.

Klinik

Die Kern-Plasma-Relation ist ein wichtiges diagnostisches Kriterium in der Histologie. In Tumorzellen ist die Kern-Plasma-Relation häufig zu Ungunsten des Zytoplasmas verändert.

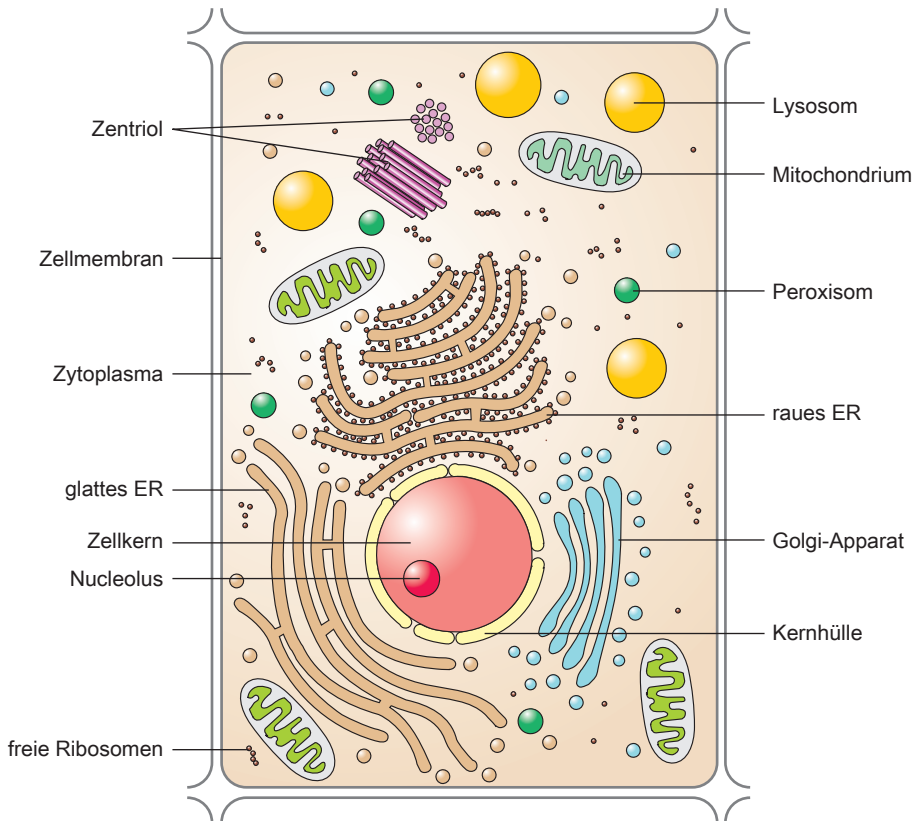


Abb. 1.1 Die tierische Eukaryontenzelle im Überblick.

Tab. 1.1 Unterschiede zwischen den Zellen von Prokaryonten und Eukaryonten

	Prozyten	Euzyten
Zellkern	Keiner	Durch Kernmembran von der übrigen Zelle abgegrenzter Zellkern
Chromosomen	Ein ringförmiges „Bakterienchromosom“	Mehr als ein Chromosom im Zellkern
Zellorganellen	Keine	Vorhanden
Durchmesser	≈ 1–5 µm	≈ 5–100 µm

Das Zytoplasma enthält weitere Strukturelemente, die **Organellen** genannt werden. Ähnlich wie die Organe des Körpers erfüllen die Organellen der Zelle spezielle Funktionen.

Systeme von Membranen grenzen einzelne Kompartimente des Zytoplasmas gegeneinander ab, so dass zahlreiche verschiedene Stoffwechselprozesse gleichzeitig ablaufen können.

In der Zytologie wird der Aufbau der Zelle üblicherweise durch folgende Nomenklatur beschrieben: Der Zellleib (Zytosom), ohne äußere Membran und unter Ausschluss extrazellulärer Produkte wie Knochen oder Knorpelsubstanz, wird **Protoplast** genannt. Wird daraus der Zellkern entfernt, bleibt das **Zytoplasma** übrig, das noch die Zellorganellen enthält. Ohne die Zellorganellen

len verbleibt als Grundsubstanz das **Zytosol** (► Kap. 1.5).

Die Strukturelemente der Zelle lassen sich einteilen in:

- Zellkern (► Kap. 1.4)
- Membranöse Organellen:
 - Zellmembran (► Kap. 1.3)
 - Endoplasmatisches Retikulum (► Kap. 1.7)
 - Mitochondrien (► Kap. 1.13)
 - Lysosomen (► Kap. 1.11)
 - Peroxisomen (► Kap. 1.12)
 - Golgi-Apparat (► Kap. 1.8)
- Nicht membranöse Organellen:
 - Ribosomen (► Kap. 1.6)
 - Mikrofilamente (► Kap. 1.14.3)
 - Mikrotubuli (► Kap. 1.14.2)
 - Zentriolen (► Kap. 1.14.2.1)
- Fakultative Organellen:
 - Zilien (► Kap. 1.14.2.2)
 - Geißeln (Flagellen) (► Kap. 1.14.2.2)

Lerntipp

Sehen Sie sich lichtmikroskopische Aufnahmen von verschiedenen Zelltypen an und versuchen Sie, die Organellen zu erkennen. Gerne werden charakteristische Eigenschaften von Organellen abgefragt, diese müssen Sie aber zusätzlich im mikroskopischen Bild identifizieren können.

1.3 Plasmamembran

1.3.1 Aufbau der Zellmembran

Die Entwicklung biologischer Membranen war ein entscheidender Schritt in der Entwicklung des Lebens. Die Zellmembran (Plasmamembran, Plasmalemma) grenzt die Zelle nach außen ab. Sie ist eine selektive Barriere, die die Zelle schützt, die Ausbildung eines Ionengradienten zwischen dem Intra- und dem Extrazellulärraum ermöglicht sowie die Aufnahme von Nährstoffen und die Abgabe von Stoffwechselprodukten erlaubt.

Die Grundstruktur der Zellmembran bildet eine **Doppelschicht** aus **amphiphilen Lipidmolekülen**: Phospholipide und Glykolipide. Den Hauptanteil bilden die **Phospholipide**. Sie besitzen eine hydrophile (d.h. wasserlösliche) Kopfgruppe, bestehend aus Phosphat und Cholin, und zwei hydrophobe (d.h. wasserabstoßende, fettlösliche), durch Kohlenwasserstoffketten gebildete Schwänze.

Die amphiphilen Moleküle lagern sich in wässrigem Milieu mit einander zugewandten hydrophoben Schwänzen zu einer Doppelschicht zusammen (► Abb. 1.2). Die hydrophilen Kopfbereichen zeigen zu beiden Seiten in das wässrige Milieu. Die Dicke dieses Bilayers beträgt etwa 6–10 nm.

In die Membran sind **Glykolipide** eingelagert. Sie bestehen aus Fettsäureketten und hydrophilen Oligosaccharidketten mit 1–15 Zuckern.

Merke

Die Zellmembran ist asymmetrisch aufgebaut. Die Zusammensetzung der Membran ist an ihrer Innen- und Außenseite verschieden (► Abb. 1.3). Glykolipide sind nur in die äußere Schicht der Membran eingelagert; die Zuckerstrukturen sind immer zur Außenseite der Zelle gerichtet.

Die Moleküle der Plasmamembran sind gegeneinander verschiebbar. Die Membran ist beweglich und verhält sich ähnlich wie eine zähe Flüssigkeit. Diese Eigenschaft wird mit dem Begriff **Fluid-Mosaik-Modell** beschrieben. In die Plasmamembran sind Membranproteine eingelagert. Die Membranproteine können in die Membran eintauchen oder sie ganz durchdringen und sind innerhalb der Membran verschiebbar. Auf der extrazellulären Seite sind die Membranproteine häufig glykosyliert.

Die Membranen eukaryontischer Zellen enthalten einen hohen Anteil an **Cholesterin**, das zwischen die Phospholipidmoleküle eingelagert ist. Die Cholesterinmoleküle sind für die Stabilisierung der Membranfluidität verantwortlich. Bei niedrigen Temperaturen erhöht das Cholesterin die Membranfluidität und verhindert so das Erstarren der Membran. Dagegen wird bei höheren Temperaturen, wie der Körpertemperatur von 37 °C, durch das Cholesterin die Fluidität der Membran gesenkt.

Die Membranlipide und -proteine werden im endoplasmatischen Retikulum (► Kap. 1.7) der Zelle synthetisiert und im Golgi-Apparat (► Kap. 1.8) modifiziert.

Epithelzellen in inneren Körperhöhlen, wie z. B. im Darm, können zur Steigerung ihres Resorptionsvermögens die zum Lumen hin gerichtete Oberfläche durch zahlreiche Membranausstülpungen, die **Mikrovilli** (► Kap. 1.14.3.2), wesentlich vergrößern. Die Mikrovilli bedecken als **Bürstensaum** die Oberfläche der Zelle. Sie sind durch Aktinfilamente verstärkt. Die Mikrovilli können vergrößert

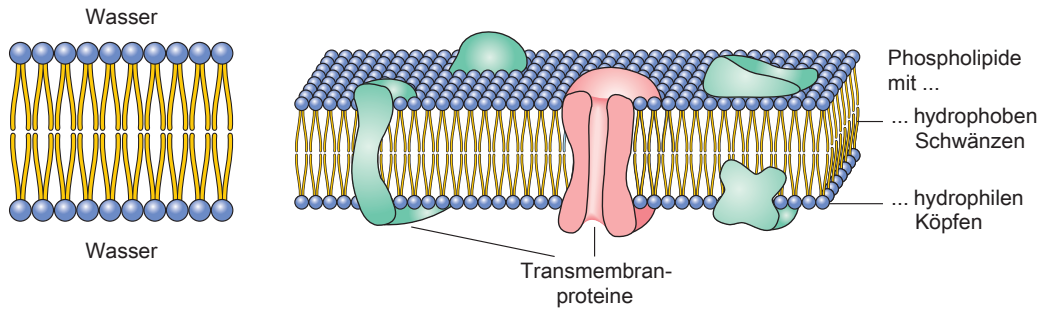


Abb. 1.2 Künstliche Lipiddoppelschicht (links) und das Fluid-Mosaik-Modell einer Biomembran mit in die Lipiddoppelschicht eingelagerten Membranproteinen (rechts).

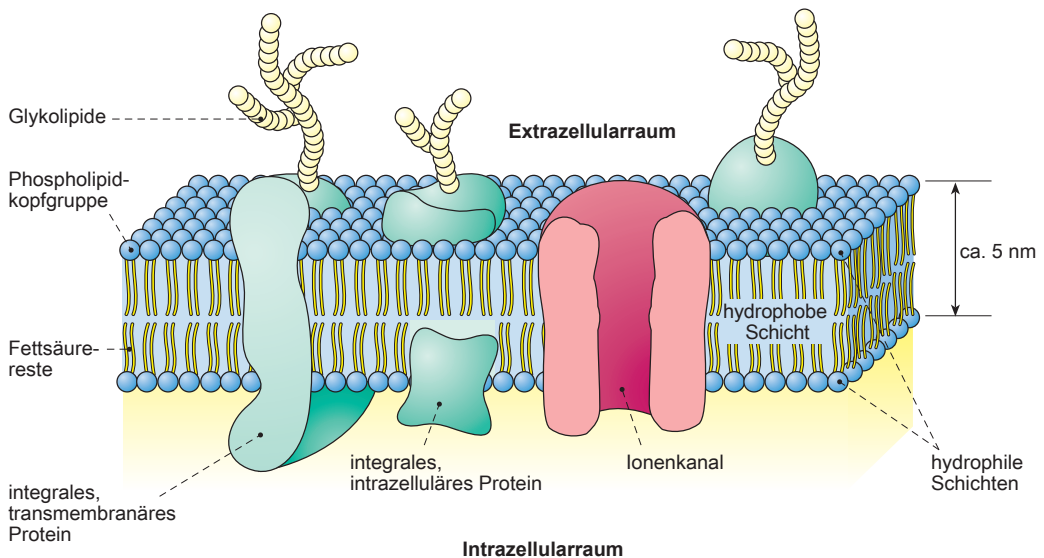


Abb. 1.3 Feinstruktur der Plasmamembran einer tierischen Zelle.

und verkleinert werden. Sie führen jedoch im Gegensatz zu Geißeln keine Eigenbewegung aus.

1.3.2 Glykokalix

Die Polysaccharide der Glykoproteine und Glykolipide werden unter dem Begriff Glykokalix zusammengefasst. Die Glykokalix bildet eine Schicht verschiedener Polysaccharide, die die Außenseite der Zelle überzieht (► Abb. 1.3). Ihre Zusammensetzung ist art- und zellspezifisch. Die Bestandteile der Glykokalix wirken als Antigene.

An den spezifischen Merkmalen der Glykokalix können körpereigene von körperfremden Zellen unterschieden werden.

Klinik

- Die **Blutgruppenantigene** sind ein Beispiel für die Zellerkennung aufgrund der spezifischen Merkmale der Glykokalix.
- Tumorzellen** zeigen häufig eine gegenüber gesunden Zellen veränderte Glykokalix. Daran können sie vom Immunsystem erkannt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Makroskopische Erscheinungsformen der Materie	1	3.2.3	Kinetik, Thermodynamik	47
1.1	Wegweiser	1	3.2.4	Gekoppelte Reaktionen	48
1.2	Aggregatzustände	1	3.3	Heterogene Gleichgewichtsreaktionen	48
1.3	Stoffgemische	1	3.3.1	Begriffe	48
			3.3.2	Verteilung von Stoffen im Gleichgewicht	49
2	Aufbau und Eigenschaften der Materie	3	3.3.3	Oberflächenprozesse	50
2.1	Wegweiser	3	3.4	Säure/Base-Reaktionen	51
2.2	Atome, Isotope, Periodensystem	4	3.4.1	Definition von Säuren und Basen nach von Brönsted	51
2.2.1	Das Atom	4	3.4.2	Dissoziationsabhängige Größen, pH-Wert	52
2.2.2	Isotope	5	3.4.3	Neutralisation, Puffer	57
2.2.3	Elektronenhülle	6	3.4.4	Definition von Säuren und Basen nach Lewis	61
2.2.4	Periodensystem	10	3.5	Redoxreaktionen	61
2.2.5	Biochemisch wichtige Elemente	14	3.5.1	Definitionen und Grundlagen	61
2.3	Chemische Bindung	15	3.5.2	Elektrochemische Zellen	63
2.3.1	Ionenbindung	15	3.5.3	Biochemische Redoxreaktionen	66
2.3.2	Atombindung	16	3.6	Bildung und Eigenschaften der Salze	67
2.3.3	Metallbindung	19	3.6.1	Salzbildung	67
2.3.4	Polare Moleküle und Wasserstoffbrückenbindung	19	3.6.2	Eigenschaften der Salze	67
2.3.5	Koordinative Bindung, Metallkomplexe	20	3.6.3	Schwer lösliche Salze	68
2.4	Acyclische Kohlenstoffverbindungen, einfache funktionelle Gruppen	22	3.6.4	Elektrolyse	69
2.4.1	Kohlenwasserstoffe	22	3.6.5	Biochemisch wichtige Salze	69
2.4.2	Funktionelle Gruppen	26	3.7	Ligandenaustausch-Reaktionen	69
2.5	Carbo- und Heterocyclen	35	3.7.1	Definition und Eigenschaften	69
2.5.1	Cycloalkane, Aromaten	35	3.7.2	Beispiele	70
2.5.2	Heterocyclen	37	3.8	Additions- und Eliminationsreaktionen	70
2.6	Stereochemie	38	3.8.1	Addition, Elimination	70
2.6.1	Isomerie	38	3.8.2	Reaktionen der Carbonylgruppe	71
2.6.2	Konformation	39	3.8.3	Tautomerie, Kondensationen	73
2.6.3	Konfiguration	40	3.9	Substitutionsreaktionen	75
2.6.4	Chirale Verbindungen	41	3.9.1	Reaktionsablauf, reaktive Teilchen	75
3	Stoffumwandlungen	45	3.9.2	Reaktionen am gesättigten Kohlenstoffatom	75
3.1	Wegweiser	46	3.9.3	Reaktionen am ungesättigten Kohlenstoffatom	76
3.2	Homogene Gleichgewichtsreaktionen	46	3.9.4	Aromaten	78
3.2.1	Begriffe	46			
3.2.2	Chemisches Gleichgewicht	46			

3.10	Sonstige Reaktionen	78	6.3	Acylglycerine	108
3.10.1	Nukleinsäuren	78	6.3.1	Struktur und Klassifizierung	108
3.10.2	Carbonsäuren	79	6.3.2	Eigenschaften	109
3.10.3	Anorganische Säuren	79	6.4	Sphingolipide	110
			6.4.1	Struktur und Klassifizierung	110
			6.4.2	Eigenschaften	111
			6.5	Steroide	111
4	Kohlenhydrate	81	7	Nukleinsäuren, Nukleotide, Chromatin	113
4.1	Wegweiser	81	7.1	Wegweiser	113
4.2	Monosaccharide	81	7.2	Nukleotide	113
4.2.1	Klassifizierung	81	7.2.1	Struktur	113
4.2.2	Beispiele	81	7.2.2	Reaktionen	114
4.2.3	Schreibweisen	84	7.3	Nukleinsäuren	115
4.2.4	Stereochemie	85	7.3.1	Klassifizierung	115
4.2.5	Reaktionen	86	7.3.2	Struktur	115
4.3	Disaccharide	87	7.3.3	Reaktionen	117
4.3.1	Klassifizierung und Aufbau	87	7.4	Chromatin	118
4.3.2	Beispiele	88			
4.3.3	Reaktionen	89	8	Vitamine, Vitaminderivate, Coenzyme	119
4.4	Oligo- und Polysaccharide	89	8.1	Wegweiser	119
4.4.1	Klassifizierung und Aufbau	89	8.2	Allgemeines	119
4.4.2	Struktur	90	8.2.1	Definition und Klassifikation	119
			8.2.2	Herkunft und Stabilität	121
5	Aminosäuren, Peptide, Proteine	93	8.3	Struktur und Funktionen	121
5.1	Wegweiser	93	8.3.1	Fettlösliche Vitamine	121
5.2	Aminosäuren	93	8.3.2	Wasserlösliche Vitamine	123
5.2.1	Klassifizierung	93	8.4	Pathobiochemie	129
5.2.2	Eigenschaften	94			
5.2.3	Beispiele	98	9	Grundlagen der Thermodynamik und Kinetik	131
5.2.4	Reaktionen	98	9.1	Wegweiser	131
5.3	Peptide	99	9.2	Grundbegriffe	131
5.3.1	Klassifizierung und Aufbau	99	9.2.1	Erhaltungsbedingungen	131
5.3.2	Peptidbindung	99	9.2.2	Reaktionsenthalpie	132
5.3.3	Reaktionen	100	9.2.3	Reaktionsentropie	132
5.4	Proteine	101	9.3	Freie Enthalpie	132
5.4.1	Klassifizierung und Aufbau	101	9.3.1	Gibbs-Helmholtz-Gleichung	132
5.4.2	Eigenschaften	102	9.3.2	Freie Enthalpie bei Konzentrationsänderung	133
5.4.3	Strukturaufklärung	104	9.3.3	Freie Enthalpie und elektromotorische Kraft	134
6	Fettsäuren, Lipide	105			
6.1	Wegweiser	105			
6.2	Fettsäuren	105			
6.2.1	Klassifizierung	105			
6.2.2	Beispiele	106			
6.2.3	Eigenschaften	107			
6.2.4	Reaktionen	107			

9.4	Reaktionsgeschwindigkeit und Reaktionsordnung	134	9.5	Energieprofil	136
9.4.1	Reaktionsgeschwindigkeit	134	9.6	Parallelreaktionen	137
9.4.2	Reaktionsordnung	134	9.7	Katalyse	137
9.4.3	Geschwindigkeitsbestimmender Teilschritt	135		Register	139

Kohlenhydrate

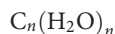
4.1	Wegweiser	81	4.3	Disaccharide	87
4.2	Monosaccharide	81	4.3.1	Klassifizierung und Aufbau	87
4.2.1	Klassifizierung	81	4.3.2	Beispiele	88
4.2.2	Beispiele	81	4.3.3	Reaktionen	89
4.2.3	Schreibweisen	84	4.4	Oligo- und Polysaccharide	89
4.2.4	Stereochemie	85	4.4.1	Klassifizierung und Aufbau	89
4.2.5	Reaktionen	86	4.4.2	Struktur	90

IMPP-Hits

- Disaccharide, Beispiele (► Kap. 4.3.2)
- Disaccharide, Klassifizierung (► Kap. 4.3.1)
- Monosaccharide (► Kap. 4.2)
- Struktur der Polysaccharide (► Kap. 4.4.2)

4.1 Wegweiser

Die **Kohlenhydrate**, auch **Saccharide** oder **Zucker** genannt, sind Hydrate des Kohlenstoffs. Formal wird jedem Kohlenstoffatom ein Wassermolekül zugeordnet. Daraus ergibt sich für die Kohlenhydrate die allgemeine Summenformel:



Alle Kohlenhydrate verfügen als funktionelles Strukturelement über eine Carbonylgruppe. Daneben liegen mehrere Hydroxygruppen vor. Die Kohlenhydrate könnten deshalb als Polyalkohole mit einer zusätzlichen Carbonylgruppe aufgefasst werden. Das einzelne Kohlenhydratmolekül wird als Monosaccharid bezeichnet (► Kap. 4.2). Die Monosaccharide können sich untereinander zu Disacchariden (► Kap. 4.3), weiter zu Oligosacchariden und schließlich zu Polysacchariden (► Kap. 4.4) verbinden.

4.2 Monosaccharide

4.2.1 Klassifizierung

Die Klassifizierung der Monosaccharide kann nach mehreren Kriterien erfolgen:

- Nach der Zahl der C-Atome (► Tab. 4.1).

- Nach der Position der Carbonylgruppe. In den **Aldosen** liegt sie als Aldehyd $-CHO$ vor, in den **Ketosen** als Keton $>C=O$.
- Einige Zucker schließen sich in wässriger Lösung zu einem Ring. Nach dem Ringsystem wird unterschieden in **Furanosen** mit einem 5-gliedrigen Ring aus 4 C-Atomen und einem O-Atom und in **Pyranosen** mit einem 6-gliedrigen Ring aus 5 C-Atomen und einem O-Atom.
- Nach Derivaten, die durch zusätzliche funktionelle Gruppen entstehen. Beispielsweise führt der Ersatz einer OH-Gruppe durch eine Aminogruppe zur Klasse der Aminozucker.

4.2.2 Beispiele

Im Folgenden werden Beispiele biologisch bedeutender Monosaccharide vorgestellt.

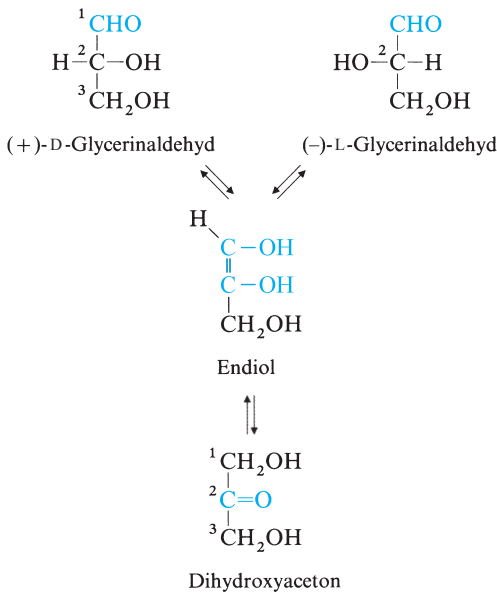
4.2.2.1 Triosen

Mit der Kettenlänge C_3 sind die Triosen die kleinsten Monosaccharide.

- Die **Aldotriose** Glycerinaldehyd besitzt am C2-Atom ein Chiralitätszentrum. Glycerinaldehyd ist optisch aktiv, es werden die beiden

Enantiomere (+)-D-Glycerinaldehyd und (-)-L-Glycerinaldehyd unterschieden (► Kap. 2.6.4.2).

- Verwandt ist die **Ketotriose** Dihydroxyaceton. Das sp^2 -hybridisierte C-Atom des Ketons ist kein Chiralitätszentrum. In alkalischer Lösung stellt sich über das Zwischenprodukt Endiol, die Enolform des Dihydroxyacetons, ein Gleichgewicht zwischen den Triosen ein:



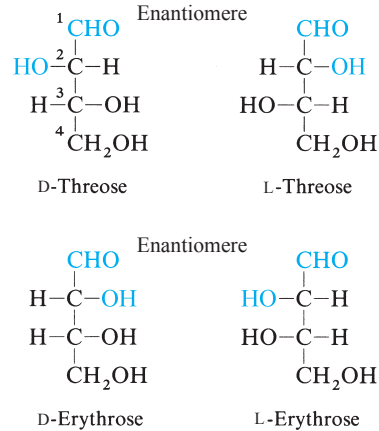
Im Organismus stehen Glycerinaldehyd und Dihydroxyaceton in Form von Phosphateestern am C3-Atom, sogenannter 3-Phosphate, über das Enzym **Isomerase** miteinander im Gleichgewicht.

Tab. 4.1 Einteilung der Monosaccharide nach Kettenlänge und Beispiele

Anzahl der C-Atome	Bezeichnung	Beispiel
3	Triose	Glycerinaldehyd
4	Tetrose	Threose
5	Pentose	Ribose
6	Hexose	Glucose
7	Heptose	Sedoheptulose

4.2.2.2 Tetrosen

Aldotetrosen besitzen zwei chirale C-Atome, daher gibt es $2^2 = 4$ Stereoisomere. Die Namen der gezeigten Saccharide weisen auf den Bau der Moleküle hin:



Merke

Die Vorsilben *threo*- und *erythro*- kennzeichnen die Konfiguration benachbarter Chiralitätszentren: „*erythro*“ bedeutet, dass sich die OH-Gruppen auf der gleichen Seite der chiralen Atome befinden, „*threo*“ steht für die gegenüberliegende Anordnung.

Wie in ► Kap. 2.6.4.2 beschrieben, wird in der Fischer-Projektion die Kohlenstoffkette senkrecht, mit der Aldehydgruppe an der Spitze, dargestellt und beginnend mit dem Carbonyl-C-Atom nummeriert. Die Einordnung des Saccharids in die D- oder L-Reihe richtet sich nach dem am weitesten von der Aldehydgruppe entfernten Chiralitätszentrum. Für die Aldotetrosen legt die Konfiguration am C3-Atom die D- oder L-Form fest.

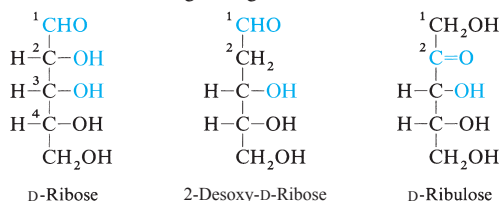
- Die 4 Stereoisomere lassen sich in 2 **Enantiomerenpaare** einteilen. D- und L-Threose verhalten sich zueinander wie Bild und Spiegelbild, das Gleiche gilt für D- und L-Erythrose.
- Threose und Erythrose sind dagegen **Diastereomere**, d. h. Stereoisomere, die sich nicht wie Bild und Spiegelbild verhalten.

4.2.2.3 Pentosen

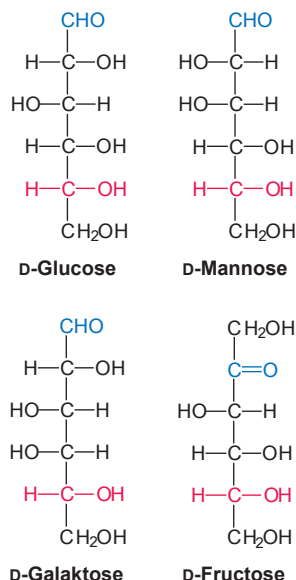
Von den Aldopentosen existieren $2^3 = 8$ Stereoisomere.

- Die **D-Ribose** ist in ihrer zu einem Ring geschlossenen Konfiguration Baustein des Strangs der Ribonukleinsäuren (RNA, ► Kap. 7.3.1).

- Das Fehlen einer OH-Gruppe führt zur **Desoxy-****ribose**. Die 2-Desoxy-D-Ribose ist Baustein der Desoxyribonukleinsäure (DNA). Hier trägt das C2-Atom keine OH-Gruppe. Die 2-Desoxy-D-Ribose hat daher nur noch zwei chirale C-Atome. Im Allgemeinen wird auch bezüglich der Desoxyribose von einem Zucker gesprochen, obwohl es sich im eigentlichen Sinne eher um ein Derivat eines Zuckers handelt, denn die Summenformel der Saccharide $C_n(H_2O)_n$ ist hier nicht mehr erfüllt.
- **D-Ribulose** ist eine zur D-Ribose gehörende Ketose. Für die Ketosen werden die Darstellung in der Fischer-Projektion und die Nummerierung der C-Atome so gewählt, dass das Carbonyl-C-Atom die niedrigstmögliche Nummer erhält.



- **D-Fructose**, bekannt als Fruchtzucker, besitzt wie alle Ketosen ein Chiralitätszentrum weniger als die entsprechenden Aldosen.



4.2.2.4 Hexosen

Die für den Energiestoffwechsel wichtigsten Monosaccharide sind die **Hexosen**. Ihre Summenformel ist $C_6H_{12}O_6$. **Aldohexosen** besitzen 4 chirale C-Atome und daher $2^4 = 16$ Stereoisomere. Bei den Hexosen ist die Einordnung in die D- oder L-Reihe der Monosaccharide durch die Stellung der OH-Gruppe am C5-Atom bestimmt:

- Die unter den Trivialnamen Dextrose oder Traubenzucker bekannte **D-Glucose** dient im Stoffwechsel als Energielieferant. Sie ist gekennzeichnet durch die Stellung der OH-Gruppen: rechts, links, rechts, rechts.
- Eine davon abweichende Anordnung der Hydroxygruppen ergibt die Stereoisomere der Glucose. Von diesen sind im Stoffwechsel noch **D-Mannose** und **D-Galaktose** von Bedeutung. Bei D-Mannose unterscheidet sich die Konfiguration am C2-Atom, bei D-Galaktose am C4-Atom von der der D-Glucose. Monosaccharide, deren Konfiguration sich an nur einem Chiralitätszentrum unterscheidet, werden als **Epimere** bezeichnet (► Kap. 2.6.4.4). D-Mannose und D-Galaktose sind daher Epimere der D-Glucose.

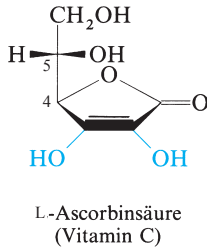
Lerntipp

Sie können sich die Stellung der OH-Gruppen leichter merken, wenn Sie eine nach rechts zeigende OH-Gruppe mit der Silbe „ta“ und eine nach links zeigende mit der Silbe „tü“ bezeichnen. So wird z. B. D-Glucose zu „ta-tü-ta-ta“, D-Galaktose zu „ta-tü-tü-ta“ und D-Mannose zu „tü-tü-ta-ta“.

4.2.2.5 Derivate der Monosaccharide

Von den Monosacchariden leiten sich zahlreiche Derivate ab, von denen hier nur einige wenige exemplarisch vorgestellt werden können.

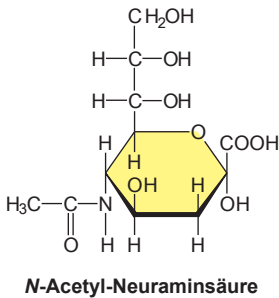
- Als Baustein in anderen Verbindungen sind **Aminozucker** von Bedeutung. Die bekanntesten sind **Glucosamin** (► Abb. 4.2) und **Galaktosamin**. In beiden Molekülen ist die OH-Gruppe am C2-Atom des Saccharids durch eine Amino-Gruppe ersetzt.
- Auch **L-Ascorbinsäure** (Vitamin C) ist ein Zuckerderivat:



Klinik

Fast alle Lebewesen können D-Glucose enzymatisch in Vitamin C umwandeln. Beim Meerschweinchen und bei Primaten fehlt ein Enzym der Reaktionskette. Der Mensch ist deshalb auf die Zufuhr von Vitamin C in der Nahrung angewiesen (► Kap. 8.2.2).

- **N-Acetyl-D-Neuraminsäure (NANA)** ist ein Desoxyzucker, eine Ketose, ein Amid und gleichzeitig eine Säure. N-Acetyl-D-Neuraminsäure ist ein Baustein der Glykoproteine (► Kap. 4.4.2.2).



4.2.3 Schreibweisen

Zur Darstellung der Monosaccharide sind drei Schreibweisen gebräuchlich, die in ► Abb. 4.1 am Beispiel der Glucose gezeigt sind: die Fischer-Projektion, die Haworth-Formel und die Sesselform-Schreibweise.

4.2.3.1 Fischer-Projektion

Die **Fischer-Projektion** stellt die Zucker in ihrer offenkettigen Form dar (► Abb. 4.1 oben links). Sie wurde bereits in ► Kap. 4.2.2.2 beschrieben und bei den dort gezeigten Beispielen angewendet. Gelegentlich wird die Schreibweise der Fischer-Projektion verkürzt angegeben. Von der Kohlenstoffkette sind nur das erste und das letzte C-Atom gezeichnet und durch einen senkrechten Strich ver-

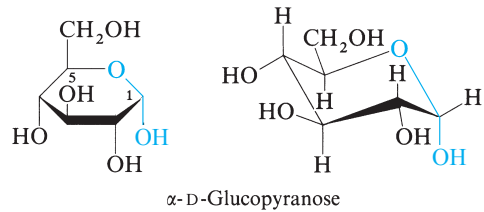
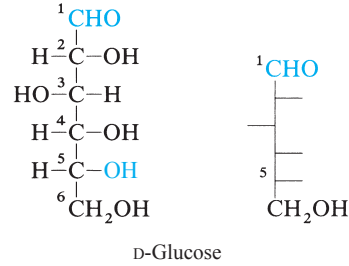


Abb. 4.1 Schreibweisen der Monosaccharide: Die offenkettige Form der D-Glucose als Fischer-Projektion in vollständiger (oben links) und verkürzter Schreibweise (oben rechts); das cyclische Halbacetal der Pyranose-Form als Haworth-Formel (unten links) und in Sesselform-Schreibweise (unten rechts).

bunden. Kurze waagerechte Striche symbolisieren rechts oder links der Vertikalen die Stellung der OH-Gruppen. Jeder waagerechte Strich steht für eine OH-Gruppe, das nicht gezeichnete C-Atom und das gegenüberliegende, ebenfalls nicht gezeichnete H-Atom (► Abb. 4.1 oben rechts). Pentosen und Hexosen liegen in wässriger Lösung überwiegend ringförmig, als cyclische Halbacetale vor (► Kap. 3.8.2.3, ► Kap. 4.2.5.1). In dieser Form werden sie als Furanosen oder Pyranosen bezeichnet, abgeleitet von dem 5-gliedrigen Furan oder dem 6-gliedrigen Pyran. Beide enthalten Sauerstoff als Heteroatom (► Kap. 2.5.2). Im Unterschied zu den namengebenden Heterocyclen kommen innerhalb der Ringe der Zucker aber keine Doppelbindungen vor.

Merke

Durch die Bildung eines cyclischen Halbacetals entsteht ein zusätzliches Chiralitätszentrum.

Lerntipp

Beachten Sie, dass beim Ringschluss einer Hexose die OH-Gruppe am C2-Atom „verloren“ geht. Das Sauerstoffatom dieser Gruppe – nicht das Sauerstoffatom der Carbonylgruppe – bildet das Heteroatom im Ring. An den C-Atomen im Ring verbleiben nur die OH-Gruppen an C2 bis C4.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe des Messens und der quantitativen Beschreibung	1	2.5.3	Elastischer Stoß	25
1.1	Wegweiser	1	2.5.4	Kraftstoß	25
1.2	Physikalische Größen	1	2.6	Rotationsbewegung	26
1.2.1	Definition	1	2.6.1	Winkelgeschwindigkeit	26
1.2.2	Skalare und Vektoren	2	2.6.2	Zentripetal- und Zentrifugalkraft	27
1.2.3	Internationales Einheitensystem	3	2.6.3	Drehmoment	28
1.3	Fehler und Unsicherheiten beim Messen	6	2.6.4	Schwerpunkt	29
1.3.1	Messfehler	6	2.6.5	Rotationsenergie, Trägheitsmoment	30
1.3.2	Statistische Fehlerrechnung	7	2.6.6	Drehimpuls	30
1.3.3	Fehlerfortpflanzung	8	2.7	Druck	31
1.4	Mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen	9	2.7.1	Definition und Einheiten	31
1.4.1	Funktionen, Differenzial und Integral	9	2.7.2	Schweredruck in Flüssigkeiten	32
1.4.2	Trigonometrische Funktionen	11	2.7.3	Kolbendruck	33
1.4.3	Exponential- und Logarithmusfunktion	12	2.7.4	Luftdruck	33
1.5	Grafische Darstellung	13	2.8	Verformung fester Körper	34
2	Mechanik	15	2.8.1	Dehnung	34
2.1	Wegweiser	15	2.8.2	Verformungsbereiche	35
2.2	Translationsbewegungen	16	2.8.3	Biegung	35
2.2.1	Gleichförmige Bewegung	16	2.8.4	Scherung	36
2.2.2	Beschleunigte Bewegung	16	2.8.5	Torsion	36
2.3	Kräfte	18	2.8.6	Kompression	36
2.3.1	Trägheitskraft, Newton-Axiome	18	2.8.7	Dehnung einer Feder	37
2.3.2	Gravitation	18	2.8.8	Viskoelastizität	37
2.3.3	Reibungskraft	19	2.9	Kräfte an Grenzflächen	38
2.3.4	Auftriebskraft	21	2.9.1	Oberflächenspannung	38
2.4	Arbeit, Energie, Leistung	22	2.9.2	Kapillarwirkung	39
2.4.1	Arbeit	22	2.10	Strömung von Flüssigkeiten und Gasen	40
2.4.2	Potenzielle Energie	22	2.10.1	Definitionen und Einheiten	40
2.4.3	Kinetische Energie	23	2.10.2	Kontinuitätsbedingung	40
2.4.4	Energieerhaltung	23	2.10.3	Bernoulli-Gleichung	40
2.4.5	Leistung	24	2.10.4	Strömungswiderstand	41
2.5	Impuls, Stoßvorgänge	24	2.10.5	Kirchhoff-Gesetze	44
2.5.1	Impuls	24	3	Struktur der Materie	45
2.5.2	Inelastischer Stoß	24	3.1	Wegweiser	45
			3.2	Aufbau der Atome und Atomkerne	45
			3.2.1	Das Atom	45
			3.2.2	Elemente und Isotope	46
			3.2.3	Die Elektronenhülle	47

3.3	Aggregatzustände der Materie	48	5.4	Materie im elektrischen Feld	71
3.3.1	Festkörper	48	5.4.1	Elektrischer Dipol	71
3.3.2	Flüssigkeiten	48	5.4.2	Polarisation	71
3.3.3	Gase	48	5.4.3	Influenz	71
4	Wärmelehre	51	5.5	Elektrischer Strom	72
4.1	Wegweiser	51	5.5.1	Elektrische Stromstärke	72
4.2	Temperatur	51	5.5.2	Gleich- und Wechselstrom	72
4.2.1	Temperaturskalen	51	5.5.3	Wirkungen des elektrischen Stroms	73
4.2.2	Temperaturabhängige Stoffeigenschaften	52	5.6	Der elektrische Stromkreis	73
4.3	Wärme, Wärmekapazität	53	5.6.1	Stromrichtung und Schaltungssymbole	73
4.3.1	Wärmekapazität	53	5.6.2	Widerstand	74
4.3.2	Thermodynamische Systeme	54	5.6.3	Elektrische Leistung	75
4.3.3	Erster Hauptsatz der Wärmelehre	55	5.6.4	Messung von Strom, Spannung und Widerstand	75
4.3.4	Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre	55	5.6.5	Schaltungen von Widerständen	76
4.4	Gaszustand	56	5.6.6	Wheatstone-Brücke	77
4.4.1	Kinetische Gastheorie	56	5.6.7	Spannungsquellen	78
4.4.2	Zustandsgleichung des idealen Gases	56	5.7	Elektrische Kapazität	79
4.4.3	Reale Gase	57	5.7.1	Der Kondensator	79
4.4.4	Gasgemische	58	5.7.2	Schaltungen von Kondensatoren	80
4.4.5	Normbedingungen	58	5.7.3	Auf- und Entladevorgänge	80
4.5	Änderung des Aggregatzustands	59	5.8	Elektrizitätsleitung	81
4.5.1	Phasendiagramm	59	5.8.1	Leitung in Festkörpern	81
4.5.2	Phasengleichgewichte	60	5.8.2	Leitung in Flüssigkeiten	81
4.6	Wärmetransport	61	5.8.3	Leitung in Gasen	82
4.6.1	Wärmeleitung	61	5.8.4	Leitung im Vakuum	82
4.6.2	Konvektion	61	5.9	Elektrische Spannungen an Grenzflächen, Diffusionsspannungen	83
4.6.3	Strahlung	62	5.9.1	Kontaktspannung, Thermospannung	83
4.7	Stoffgemische	62	5.9.2	Galvanische Spannung	83
4.7.1	Gas – Flüssigkeit	62	5.9.3	Membranspannung, Nernst-Gleichung	84
4.7.2	Festkörper – Flüssigkeit	63	5.10	Magnetische Größen	85
4.7.3	Transportphänomene	64	5.10.1	Magnetische Felder	85
5	Elektrizitätslehre	67	5.10.2	Magnetische Eigenschaften der Materie	87
5.1	Wegweiser	68	5.10.3	Magnetische Kraftwirkung, Lorentzkraft	89
5.2	Ladung, elektrisches Feld	68	5.10.4	Induktion	90
5.2.1	Ladung	68	5.10.5	Technische Anwendung der Induktion	91
5.2.2	Elektrisches Feld	68			
5.3	Elektrisches Potenzial, elektrische Spannung	69			
5.3.1	Elektrisches Potenzial	69			
5.3.2	Elektrische Spannung	70			

5.11	Wechselspannung, Wechselstrom	92	7.2.3	Lichtentstehung	112
5.11.1	Eigenschaften der Wechselspannung	92	7.2.4	Lichtmessung	113
5.11.2	Darstellung am Elektronenstrahl-Oszillografen	93	7.3	Geometrische Optik	115
5.11.3	Bauelemente im Wechselstromkreis	93	7.3.1	Reflexion	115
5.11.4	Elektromagnetischer Schwingkreis	94	7.3.2	Lichtbrechung an Grenzflächen	116
5.11.5	Stromwirkung auf den menschlichen Körper	95	7.3.3	Lichtbrechung an dünnen Linsen	117
6	Schwingungen und Wellen	97	7.3.4	Bildkonstruktion an der Linse	120
6.1	Wegweiser	97	7.3.5	Der sphärische Hohlspiegel	124
6.2	Schwingungen	97	7.4	Wellenoptik	125
6.2.1	Grundbegriffe	97	7.4.1	Interferenzerscheinungen	125
6.2.2	Schwingungsfähige Systeme	98	7.4.2	Polarisation	126
6.2.3	Gedämpfte Schwingungen	99	7.5	Optische Instrumente	127
6.2.4	Erzwungene Schwingungen	100	7.5.1	Spektrometer	127
6.2.5	Anharmonische Schwingungen	100	7.5.2	Monochromator	127
6.3	Wellen	100	7.5.3	Photometer	128
6.3.1	Transversal- und Longitudinalwellen	100	7.5.4	Polarimeter	128
6.3.2	Wellengleichung	101	7.5.5	Refraktometer	128
6.3.3	Energietransport und Intensität	101	7.5.6	Kamera, Projektionsapparat	128
6.3.4	Ausbreitungsphänomene	102	7.5.7	Mikroskop	128
6.4	Schallwellen	103	8	Ionisierende Strahlung	131
6.4.1	Eigenschaften des Schalls	103	8.1	Wegweiser	131
6.4.2	Kenngrößen des Schallfelds	104	8.2	Radioaktivität	131
6.4.3	Schallausbreitung in Materie	105	8.2.1	Der radioaktive Zerfall	131
6.4.4	Doppler-Effekt	106	8.2.2	Die Zerfalls- und Strahlungsarten	133
6.5	Elektromagnetische Wellen	107	8.2.3	Zerfallsreihen, Herstellung radioaktiver Nuklide	134
6.5.1	Eigenschaften elektromagnetischer Wellen	107	8.3	Röntgenstrahlung	136
6.5.2	Wellenlängenbereiche	107	8.4	Nachweis ionisierender Strahlung	137
6.5.3	Ausbreitung und Energiegehalt	108	8.4.1	Strahlungsmessgeräte	137
6.5.4	Ionisierende und nichtionisierende Strahlung	109	8.4.2	Strahlendosis	138
7	Optik	111	8.5	Strahlenwirkungen	139
7.1	Wegweiser	111	8.5.1	Teilchenstrahlung	139
7.2	Licht	111	8.5.2	Photonenstrahlung	139
7.2.1	Eigenschaften	111	Anhang		141
7.2.2	Lichtelektrischer Effekt	111	A1	Griechisches Alphabet	141
			A2	Zahlen- und Größenwertete	141

2.1	Wegweiser	15	2.6.5	Rotationsenergie, Trägheitsmoment . .	30
2.2	Translationsbewegungen	16	2.6.6	Drehimpuls	30
2.2.1	Gleichförmige Bewegung	16	2.7	Druck	31
2.2.2	Beschleunigte Bewegung	16	2.7.1	Definition und Einheiten	31
2.3	Kräfte	18	2.7.2	Schweredruck in Flüssigkeiten	32
2.3.1	Trägheitskraft, Newton-Axiome	18	2.7.3	Kolbendruck	33
2.3.2	Gravitation	18	2.7.4	Luftdruck	33
2.3.3	Reibungskraft	19	2.8	Verformung fester Körper	34
2.3.4	Auftriebskraft	21	2.8.1	Dehnung	34
2.4	Arbeit, Energie, Leistung	22	2.8.2	Verformungsbereiche	35
2.4.1	Arbeit	22	2.8.3	Biegung	35
2.4.2	Potenzielle Energie	22	2.8.4	Scherung	36
2.4.3	Kinetische Energie	23	2.8.5	Torsion	36
2.4.4	Energieerhaltung	23	2.8.6	Kompression	36
2.4.5	Leistung	24	2.8.7	Dehnung einer Feder	37
2.5	Impuls, Stoßvorgänge	24	2.8.8	Viskoelastizität	37
2.5.1	Impuls	24	2.9	Kräfte an Grenzflächen	38
2.5.2	Inelastischer Stoß	24	2.9.1	Oberflächenspannung	38
2.5.3	Elastischer Stoß	25	2.9.2	Kapillarwirkung	39
2.5.4	Kraftstoß	25	2.10	Strömung von Flüssigkeiten und Gasen	40
2.6	Rotationsbewegung	26	2.10.1	Definitionen und Einheiten	40
2.6.1	Winkelgeschwindigkeit	26	2.10.2	Kontinuitätsbedingung	40
2.6.2	Zentripetal- und Zentrifugalkraft	27	2.10.3	Bernoulli-Gleichung	40
2.6.3	Drehmoment	28	2.10.4	Strömungswiderstand	41
2.6.4	Schwerpunkt	29	2.10.5	Kirchhoff-Gesetze	44

IMPP-Hits

- Strömung von Flüssigkeiten: Strömungswiderstand (► Kap. 2.10.4), Kontinuitätsbedingung (► Kap. 2.10.2)
- Energie, Leistung (► Kap. 2.4)
- Translationsbewegungen (► Kap. 2.2)

2.1 Wegweiser

Die Mechanik beschäftigt sich im Allgemeinen mit der Beschreibung von Bewegungen. Ein ausge-

dehnter, starrer Körper wird dabei zunächst näherungsweise als Massenpunkt betrachtet und die Bewegung dieses Punkts wird beschrieben. Es werden geradlinige (Translation, ► Kap. 2.2) und

Kreisbewegungen (Rotation, ► Kap. 2.6) unterschieden.

Verschiedene Arten der Kraft werden vorgestellt (► Kap. 2.3), ebenso wie die damit zusammenhängenden Begriffe der Arbeit, Energie und Leistung (► Kap. 2.4) sowie Impuls und Stoßvorgänge (einschließlich Kraftstoß; ► Kap. 2.5). Ein eigenes Kapitel befasst sich mit dem Druck (► Kap. 2.7).

Werden die Kräfte auf die einzelnen Teilchen eines Körpers betrachtet, lassen sich Verformungen (► Kap. 2.8) und Effekte an Grenzflächen (► Kap. 2.9) verstehen. In Flüssigkeiten und Gasen sind die einzelnen Teilchen gegeneinander verschiebbar. Die hier auftretenden Phänomene lassen sich letztlich auch auf den Bewegungszustand der einzelnen Teilchen zurückführen (► Kap. 2.10).

2.2 Translationsbewegungen

2.2.1 Gleichförmige Bewegung

Wir unterscheiden zwischen gleichförmigen und beschleunigten Bewegungen. Bei einer gleichförmigen Bewegung ist die **Geschwindigkeit** v konstant, es gilt:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Dabei ist Δs der im Zeitintervall Δt zurückgelegte Weg.

Die Geschwindigkeit ist eine abgeleitete Größe. Im internationalen Einheitensystem wird ihre Einheit in m/s angegeben. Im Alltag ist für Geschwindigkeitsangaben die Einheit Kilometer pro Stunde (km/h) gebräuchlich:

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = \frac{1}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Der Umrechnungsfaktor zwischen beiden Angaben beträgt 3,6. Die Geschwindigkeitsangabe in km/h wird durch 3,6 geteilt, um sie in m/s umzurechnen. Umgekehrt wird die Angabe in m/s mit 3,6 multipliziert, um auf km/h umzurechnen. Beispiel: 50 km/h $\approx$ 14 m/s; 10 m/s = 36 km/h.

Lerntipp

Die Formel $v = s/t$ ist ein Klassiker in Prüfungen! Auch die Umrechnung von km/h auf m/s sollte sicher angewendet werden können!

2.2.2 Beschleunigte Bewegung

Wäre die Geschwindigkeit nicht konstant, sondern würde sich während des Zeitintervalls Δt verändern, würde die Rechnung wie in ► Kap. 2.2.1 die **Durchschnittsgeschwindigkeit** ergeben, mit der sich der Körper im Zeitintervall Δt bewegt hat. Soll die **Momentangeschwindigkeit** bestimmt werden, muss das Messintervall Δt immer weiter verkleinert werden. Auf diese Weise ergibt sich der allgemeinere, differenzielle Ansatz (► Kap. 1.4.1.2):

$$V = \frac{ds}{dt} = \dot{s}$$

Bei einer beschleunigten Bewegung ändert sich die Geschwindigkeit in jedem Zeitintervall. Die **Beschleunigung** a ist definiert als:

$$a = \frac{dv}{dt} = \ddot{s}$$

Die Beschleunigung wird in m/s² angegeben.

Merke

Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie die in den folgenden Kapiteln behandelten Kräfte sind **vektorielle Größen**. Zur Vereinfachung sind in der Schreibweise hier und im Folgenden jedoch die Pfeile über den vektoriellen Größen weggelassen, wenn die Richtungen offensichtlich erkennbar sind.

Bei konstanter Beschleunigung lassen sich die erreichte **Endgeschwindigkeit** und der zurückgelegte Weg ermitteln:

$$v = a \cdot t$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Diese beiden Formeln stellen eine Vereinfachung dar. Sie gelten für eine Beschleunigung aus dem Stillstand heraus oder im Falle negativer Beschleunigung für ein Abbremsen bis zum Stillstand. Diese leicht zu merkenden Zusammenhänge reichen für die meisten Fragestellungen aus.

Sind andere Anfangsbedingungen vorgegeben, muss eine allgemeinere Betrachtung durchgeführt werden. Die Zeitabhängigkeiten für Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind durch Dif-

ferenzial- bzw. Integralbildung voneinander abgeleitet worden. Aus einer Integration ergeben sich Konstanten, die die Anfangsbedingungen beschreiben. Für eine konstante Beschleunigung $a = a_0$ ergibt sich für:

$$v = a \cdot t + v_0$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$$

Lerntipp

Überlegen Sie zunächst, um welche Bewegungsform es sich handelt: um eine gleichförmige oder eine beschleunigte Bewegung? Dann erst verwenden Sie die entsprechenden Gleichungen.

Beispiel

Ein Pkw hat nach 500 m eine Geschwindigkeit von 72 km/h. Nun beschleunigt er innerhalb von 5 s auf 108 km/h. Wo hat er seine Endgeschwindigkeit erreicht? In physikalische Größengleichungen müssen die Werte für die Geschwindigkeit in m/s eingesetzt werden: 72 km/h = 20 m/s; 108 km/h = 30 m/s. Zunächst kann die Beschleunigung berechnet werden:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{30 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = \frac{10 \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = 2 \text{ m/s}^2$$

Als die Beschleunigung beginnt, hat der Pkw bereits die Geschwindigkeit $v_0 = 20 \text{ m/s}$ und befindet sich am Ort $s_0 = 500 \text{ m}$.

$$\begin{aligned} s &= \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0 = \\ &= \frac{1}{2} \cdot 2 \text{ m/s}^2 \cdot (5 \text{ s})^2 + 20 \text{ m/s} \cdot 5 \text{ s} + 500 \text{ m} \\ &= 25 \text{ m} + 100 \text{ m} + 500 \text{ m} = 625 \text{ m} \end{aligned}$$

Die Endgeschwindigkeit wird nach 625 m erreicht.

Man beachte, dass die Einheiten der einzelnen Größen eingesetzt und miteinander verrechnet werden, sodass das Ergebnis schließlich die richtige Einheit für eine Länge trägt.

Nicht in allen Fällen kann das Ergebnis durch einfaches Einsetzen in eine Gleichung ermittelt werden. Unter Umständen sind zuvor mehrere Gleichungen zusammenzufassen.

Beispiel

Ein startendes Flugzeug beschleunigt auf einer Strecke von 2.000 m auf eine Geschwindigkeit von 360 km/h. Wie groß ist die Beschleunigung?

$$v = a \cdot t \Rightarrow t = \frac{v}{a}$$

wird eingesetzt in:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \Rightarrow s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \frac{v^2}{a^2} \Rightarrow s = \frac{v^2}{2a}$$

Auflösen nach a und Einsetzen der Zahlenwerte ergibt:

$$a = \frac{v^2}{2s} = \frac{(100 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 2000 \text{ m}} = \frac{10\,000 \text{ m}^2/\text{s}^2}{4000 \text{ m}} = 2,5 \text{ m/s}^2$$

Es könnte auch noch die Dauer des Vorgangs berechnet werden:

$$t = \frac{v}{a} = \frac{100 \text{ m/s}}{2,5 \text{ m/s}^2} = 40 \text{ s}$$

Eine Bewegung kann grafisch als **Weg-Zeit-**, **Geschwindigkeits-Zeit-** oder **Beschleunigungs-Zeit-Diagramm** dargestellt werden. Ein Beispiel zeigt

► Abb. 2.1:

- $t = 0$: Der Körper befindet sich an der Ortskoordinate s_0 (► Abb. 2.1 oben), Geschwindigkeit und Beschleunigung sind gleich 0 (► Abb. 2.1 Mitte und unten). Der Körper bleibt in Ruhe und verändert seine Position nicht.
- $t = t_1$: Die Beschleunigung ändert sich auf einen positiven, konstanten Wert (unten). Die Geschwindigkeit nimmt mit der Zeit linear zu (Mitte). Die Weg-Zeit-Abhängigkeit ist eine quadratische Funktion (Parabel) (oben).
- $t = t_2$: Die Beschleunigung ändert sich auf einen negativen Wert (unten). Der Körper wird langsamer, die Weg-Zeit-Funktion verläuft immer flacher (oben).
- $t = t_3$: Der Körper wurde bis zum Stillstand abgebremst (Mitte). Die negative Beschleunigung dauert aber weiter an (unten). Ab jetzt beginnt eine Rückwärtsbewegung (oben).
- $t = t_4$: Die Beschleunigung ist 0 (unten). Die Geschwindigkeit bleibt konstant (Mitte). Die Weg-Zeit-Funktion ist eine Gerade (oben).
- $t = t_5$: Die Beschleunigung nimmt wieder einen positiven Wert an. Die Rückwärtsbewegung wird abgebremst.
- $t = t_6$: Der Körper kommt am Ort $s = 0$ zum Stillstand.

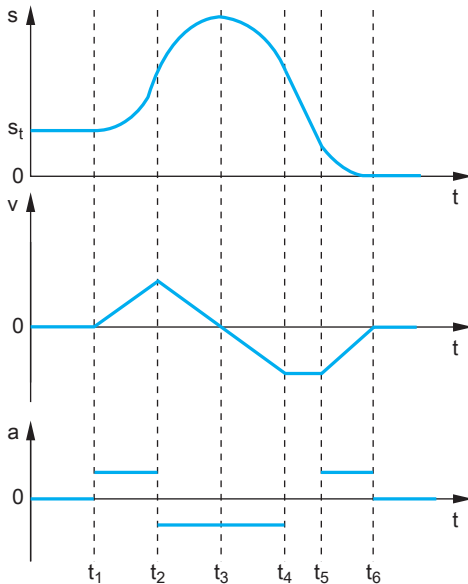


Abb. 2.1 Weg-Zeit- (oben), Geschwindigkeits-Zeit- (Mitte) und Beschleunigungs-Zeit-Diagramm (unten).

In den hier genannten Beispielen wurde in den jeweiligen Zeitintervallen eine **konstante Beschleunigung** zugrunde gelegt. Dies ist für die meisten Fragestellungen ausreichend.

Im Allgemeinen kann auch die Beschleunigung durch eine zeitabhängige Funktion gegeben sein. Durch Integration nach der Zeit können dann die Bewegungsgleichungen für Geschwindigkeit und Weg abgeleitet werden.

2.3 Kräfte

In diesem Kapitel werden Trägheitskraft, Gravitationskraft, Reibungskräfte sowie die Auftriebskraft beschrieben. An anderer Stelle werden die Federkraft (► Kap. 2.8.7) und die Zentripetal- und Zentrifugalkraft (► Kap. 2.6.2) behandelt sowie im Kapitel Elektrizitätslehre die Coulombkraft (► Kap. 5.2.1) und die Lorentzkraft (► Kap. 5.10.3).

2.3.1 Trägheitskraft, Newton-Axiome

Eine Beschleunigung erfolgt nur dann, wenn eine Kraft wirkt. Die Definitionsgleichung für die Kraft wurde schon von Isaac Newton (1643–1727) aufstellt:

$$F = m \cdot a$$

Die **Kraft** F muss aufgebracht werden, um einem Körper der Masse m die Beschleunigung a zu verleihen. Die Masse m ist dabei der Proportionalitätsfaktor zwischen der einwirkenden Kraft und der daraus resultierenden Beschleunigung. Für die Einheit der Kraft wurde die Einheit **Newton (N)** eingeführt: $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Diese Kraft kennzeichnet den „Widerstand“ oder besser ausgedrückt die Trägheit, die der Körper dem Bestreben, seine Geschwindigkeit zu verändern, entgegensetzt. Deshalb wird in diesem Zusammenhang auch von **Trägheitskraft** gesprochen.

Merke

Für jede Bewegung gelten die 3 **Newton-Axiome**:

- Trägheitsprinzip: Ohne Einfluss einer resultierenden äußeren Kraft ändert sich der Bewegungszustand nicht.
- Aktionsprinzip: Wirkt eine Kraft F auf einen Körper der Masse m , erfährt dieser die Beschleunigung $a = F/m$.
- Reaktionsprinzip: Zu jeder Kraft existiert eine gleich große entgegengerichtete Kraft $-F$ (actio = reactio).

Wirkt keine Kraft oder heben sich die äußeren Kräfte in ihrer Wirkung auf, wird sich ein Körper nicht in Bewegung setzen. Hat der Körper bereits eine Anfangsgeschwindigkeit, wird er sich ohne Einfluss einer Kraft geradlinig und gleichförmig weiterbewegen. Man denke z. B. an ein Raumschiff, das fern von allen Anziehungskräften seinen Kurs und seine Geschwindigkeit beibehält.

Das auf den ersten Blick abstrakte Reaktionsprinzip (actio = reactio) lässt sich beim Anschieben eines Fahrzeugs erfahren. Der Schiebende muss die Kraft $F = m \cdot a$ aufbringen, um das Fahrzeug zu beschleunigen. Gleichzeitig verspürt er als Widerstand die Gegenkraft, mit der das Fahrzeug sich der Beschleunigung „widersetzt“.

2.3.2 Gravitation

Zwei Massen ziehen sich gegenseitig an. Beschrieben wird diese Anziehung durch das **Gravitationsgesetz**:

$$F = \gamma \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}$$

r ist der Abstand der beiden Massen M_1 und M_2 . Die **Gravitationskonstante** γ ist eine Naturkonstante. Sie hat den Wert $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

Merke

Die Anziehungskraft nimmt proportional zum Quadrat des Abstands beider Massen ab, d. h., bei Verdoppelung des Abstands sinkt die Anziehungskraft auf ein Viertel.

Am Gravitationsgesetz wird ebenfalls das 3. Newton-Axiom deutlich: Auf jede der beiden Massen wirkt eine gleich große Kraft. So zieht ein Gegenstand die Erde mit gleich großer Kraft an, wie er auch von dieser angezogen wird. Für die **Erdanziehungskraft** auf eine Masse m gilt nach dem Gravitationsgesetz:

$$F = \gamma \cdot \frac{M_E \cdot m}{r_E^2}$$

Dabei ist M_E die Masse der Erde: $M_E = 5,97 \cdot 10^{24}$ kg. In der Rechnung werden beide Massen als Punktmassen betrachtet, als ob sich die gesamte Masse eines Körpers in seinem Schwerpunkt befände. Der Abstand eines Körpers auf der Erdoberfläche zum Schwerpunkt der Erde ist gleich dem Erdradius $r_E = 6.378$ km. Damit kann zusammengefasst werden:

$$\gamma \cdot \frac{M_E}{r_E^2} = g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Für die Massenanziehung auf einen Körper auf der Erdoberfläche folgt daraus:

$$F = m \cdot g$$

Die Konstante g wird **Erdbeschleunigung** genannt, sie hat den Wert $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Dieser Wert ist nicht überall auf der Erde genau gleich, da die Erde keine exakte Kugelform hat, sondern die eines abgeplatteten Rotationsellipsoids. Der Erddurchmesser ist am Äquator größer als von Pol zu Pol gemessen. Diese kleinen Unterschiede können hier aber vernachlässigt werden.

Merke

Soll ohne Taschenrechner nur eine Überschlagsrechnung durchgeführt werden, kann die Erdbeschleunigung g näherungsweise als 10 m/s^2 angenommen werden.

Die auf einen Körper durch die Erdanziehung wirkende Kraft wird auch **Schwerkraft**, **Gewichtskraft** oder einfach kurz **Gewicht** genannt. In der Alltags-

sprache werden die Begriffe Masse und Gewicht häufig fälschlicherweise synonym verwendet.

Merke

Die Aussage „Der Patient wiegt 95 kg, er hat Übergewicht“ ist physikalisch nicht richtig. Die Masse des Patienten ist 95 kg. Der Begriff des **Body-Mass-Index** (BMI) ist hier sprachlich korrekt. Das Gewicht, d. h. die Gewichtskraft, des Patienten beträgt (gerundet) 950 N. Könnte sich der Patient an einen Ort mit geringer Gravitationskraft begeben – z. B. auf den Mond –, so hätte er sein Gewicht reduziert, nicht aber seine Masse und die damit verbundenen gesundheitlichen Risiken.

In der Nähe der Erdoberfläche wirkt auf jeden Gegenstand die Erdbeschleunigung g . Ein **freier Fall** ist eine beschleunigte Bewegung. Für die Berechnungen von Fallbewegungen gelten die entsprechenden Zusammenhänge wie für beschleunigte Bewegungen (► Kap. 2.2.2). Als Wert für die Beschleunigung wird die Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ eingesetzt.

2.3.3 Reibungskraft**2.3.3.1 Feste Körper**

Bewegen sich feste Körper gegeneinander, tritt Reibung auf. Es entsteht eine **Reibungskraft** F_r , die der Richtung der Bewegung entgegengerichtet ist:

$$F_r = \mu \cdot F_N$$

F_N ist die **Normalkraft**, mit der der Körper senkrecht auf seine Unterlage drückt. Bei waagerechter Unterlage entspricht F_N der Gewichtskraft $F_g = m \cdot g$. μ wird Reibungszahl oder **Reibungskoeffizient** genannt und kennzeichnet die Materialeigenschaften beider Oberflächen. Der Wert des Reibungskoeffizienten liegt zwischen 0 und 1. $\mu = 0$ würde den Idealfall einer völlig reibungsfreien Bewegung beschreiben. Wäre $\mu > 1$, so wäre die Kraft, um den Körper über eine Oberfläche zu ziehen, größer als die Kraft, die man benötigt, um ihn senkrecht hochzuheben. Es würde sich in diesem Fall nicht mehr um ein Reibungsphänomen handeln, sondern der Körper wäre auf irgendeine Weise auf der Oberfläche befestigt.

In der Technik wird durch den Einsatz von Gleit- und Schmiermitteln die Reibung reduziert.

Bei eingehenderer Betrachtung werden 2 Vorgänge unterschieden:

- **Haftreibung:** Die mikroskopisch kleinen Unebenheiten beider Oberflächen sind ineinander verzahnt und verhakt. Die Oberflächen müssen voneinander „losgerissen“ werden, um die Bewegung zu starten. Dazu ist die Kraft notwendig: $F_r = \mu_H \cdot F_N$.
- Sind die Oberflächen gegeneinander in Bewegung, muss nur noch die nun geringere **Gleitreibung** überwunden werden: $F_r = \mu_{Gl} \cdot F_N$.
- Die Gleitreibungszahl μ_{Gl} ist stets geringer als die Haftreibungszahl μ_H :

$$\mu_{Gl} < \mu_H$$

Antriebs-, Brems- und Seitenführungskräfte zwischen einem rollenden Rad und dem Boden werden durch die Haftreibung übertragen. Wenn das Rad blockiert, wirkt nur noch die geringere Gleitreibung und der Fahrzustand wird meist instabil.

Die Fortbewegung auf Rollen oder Rädern vermindert die Reibung, verglichen mit dem „Schleifen“ über eine Unterlage. Aber auch beim Rollen ist aufgrund von Deformationen von Rad und Unterlage ein Reibungswiderstand zu überwinden, die so genannte **Rollreibung**. Für jede Materialkombination lässt sich auch ein Rollreibungskoeffizient μ_r angeben. Die Rollreibung ist sehr viel kleiner als die Gleitreibung:

$$\mu_r \ll \mu_{Gl} < \mu_H$$

Klinik

Im Bewegungsapparat tritt Reibung in den Gelenken auf, die sich bei **Arthrose** unangenehm bemerkbar macht. Im menschlichen Körper wird die Reibung in den Gelenken durch die Synovia (Gelenkschmiere) herabgesetzt.

Am Beispiel der **schiefen Ebene** können Größe und Richtung der Reibungskraft sowie nochmals die Zerlegung eines Kraftvektors in seine Komponenten verdeutlicht werden (► Abb. 2.2). Liegt ein Gegenstand auf einer um den Winkel α gegen die Horizontale geneigten Ebene, so wirkt eine Abtriebskraft F_a entlang der Neigungsfläche. Durch die Reibungskraft F_r wird der Gegenstand am Abrutschen gehindert. Die Schwerkraft $F_g = m \cdot g$ wirkt nach

unten, die Normalkraft F_N senkrecht zur Unterlage. Die Kraftvektoren lassen sich parallel zu einem rechtwinkligen Dreieck verschieben. Es gilt:

$$F_a = F_g \cdot \sin \alpha \quad \text{und} \quad F_N = F_g \cdot \cos \alpha$$

- Der Gegenstand bleibt liegen, solange die Abtriebskraft die Reibungskraft nicht übersteigt: $F_r = F_a$.

$$\mu_H \cdot F_g \cdot \cos \alpha = F_g \cdot \sin \alpha$$

$$\mu_H = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$$

- Der Gegenstand beginnt zu rutschen, wenn der Tangens des Neigungswinkels die Haftreibungszahl überschreitet. Dann wird er nur durch die kleinere Gleitreibung gebremst und führt eine beschleunigte Bewegung aus.

2.3.3.2 Gase und Flüssigkeiten

In Gasen und Flüssigkeiten tritt eine geschwindigkeitsabhängige Reibungskraft auf. Allgemein gilt der Zusammenhang:

$$F_r = b \cdot v^n$$

Der Koeffizient b hängt von den Eigenschaften des Mediums sowie der Oberfläche und Geometrie des bewegten Körpers ab.

- In Flüssigkeiten ist die Reibung bei langsamen Bewegungen proportional zur Geschwindigkeit v , dies wird als **Stokes-Reibung** bezeichnet:

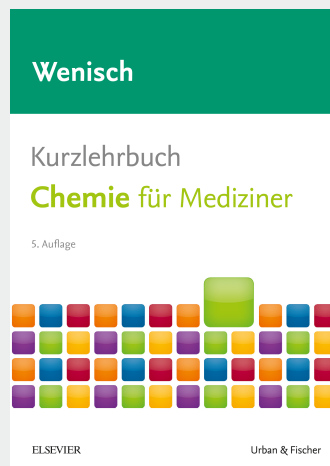
$$F_r = b \cdot v$$

- In Luft ist die Reibungskraft (zumindest in guter Näherung) proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit, dies ist die so genannte **Newton-Reibung**:

$$F_r = b \cdot v^2$$

Fällt ein Körper durch eine Flüssigkeit oder ein Gas, wird seine Geschwindigkeit so lange zunehmen, bis die Reibungskraft gleich der beschleunigenden Gewichtskraft ist. Dann kompensieren sich beide Kräfte und der Körper fällt mit konstanter Geschwindigkeit.

Erhältlich in jeder Buchhandlung oder im Elsevier Webshop



Die Kurzlehrbücher vermitteln schnell und kompakt ein solides Verständnis der Fächer. Für alle Situationen geeignet: zum semesterbegleitenden Einsatz und zur gezielten Vorbereitung auf die 1. Ärztliche Prüfung (Physikum).

Verlässliche Orientierung durch ein gut strukturiertes Layout:

- Was ist wirklich wichtig? Sinnvoll gesetzte Schwerpunkte dank IMPP-Hits
- Wie merken sich das andere Studenten? Wir haben die besten Lerntipps
- Was wird im Physikum gefragt? Farbige Kennzeichnung der Prüfungsrelevanz
- Was hat das mit Medizin zu tun? Klinikkästen erklären den klinischen Zusammenhang

Biologie, Chemie und Physik gehören zu den Basisnaturwissenschaften in der Medizin. Unsere Kurzlehrbücher zu den drei Themen sind aufeinander abgestimmt und machen Lernen effizient!

Kurzlehrbuch Biologie
978-3-437-43332-0

Kurzlehrbuch Chemie
978-3-437-43373-3

Kurzlehrbuch Physik
978-3-437-43381-8

jeder Titel € [D] 25,- / € [A] 25,70 / SFr 34,-

Empowering Knowledge

