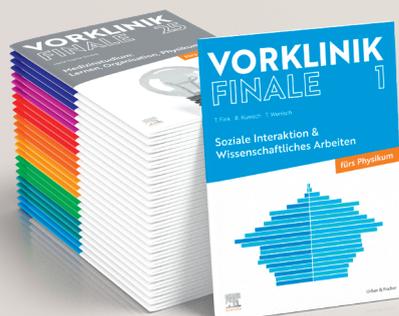
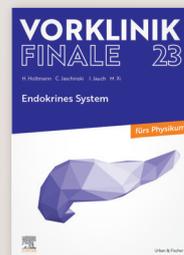
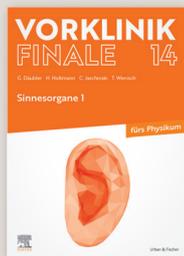


# VORKLINIK FINALE

LESEPROBE

Alle Organe – alle Fächer – alles drin!



ELSEVIER

www.elsevier.de

# VORKLINIK FINALE

## Alle Organe – alle Fächer – alles drin!

Vorklinik Finale sind Prüfungsskripten für das Physikum, die nach Organsystemen gegliedert sind. Bereits in der Vorklinik können sie dir helfen, dich in den vielen neuen Inhalten zu orientieren und Themen im Gesamtüberblick einzuordnen.

### Das ist drin:

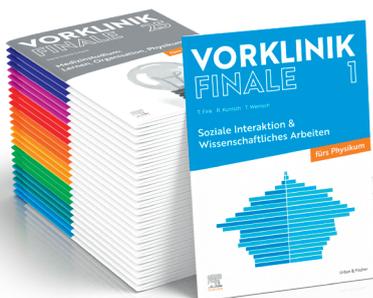
- Zur Vorbereitung auf das Physikum findest du in Heft 1–24 alle relevanten Inhalte inkl. Lernhilfen.
- Kleine Lerneinheiten in Heften, die du rasch abhaken kannst. Das hält die Motivation oben!
- Heft 25 gibt dir Tipps für den Start ins Medizinstudium und fürs Lernen, und enthält Lern- und Kreuzpläne fürs Physikum.

### Zusammenhänge verstehen – organbasiert geht's besser!

- Du wiederholst die Inhalte organbasiert in einem sinnvollen Zusammenhang.
- Relevante klinische Inhalte sind immer direkt integriert.
- Du bist gut vorbereitet auf den klinischen Abschnitt, denn da geht es organbasiert weiter.
- Doppelte Inhalte, die bei fächerbasierter Darstellung häufig auftreten, sind hier bereits zusammengefasst.

### Aktiv lernen bringt dich weiter!

- Besonders prüfungsrelevante Inhalte sind farbig hinterlegt.
- Fragen zum Selbsttest und/oder zur Vorbereitung auf mündliche Prüfungen.
- An jedem Kapitelende gibt es eine Seite mit Vorschlägen, wie du Inhalte durch Zeichnen wiederholen kannst.



ELSEVIER

www.elsevier.de

## Übersicht aller Hefte

- 1 Soziale Interaktion & Wissenschaftliches Arbeiten
- 2 Atome und Naturgesetze
- 3 Moleküle und Stoffumwandlungen
- 4 Biomoleküle
- 5 Zellbiologie, Allgemeine Histologie & Mikrobiologie
- 6 Molekularbiologie, Meiose & Embryologie
- 7 Bewegungsapparat 1
- 8 Bewegungsapparat 2
- 9 Motorik und Bewegungsabläufe
- 10 Kopf und Hals
- 11 Nervensystem
- 12 Zentralnervensystem
- 13 Bewusstsein, Corticale Interaktion & Therapiemethoden
- 14 Sinnesorgane 1
- 15 Sinnesorgane 2
- 16 Lunge und Atmung
- 17 Herz-Kreislauf-System
- 18 Blut und Immunsystem
- 19 Gastrointestinaltrakt
- 20 Verdauung & Abbau von Nährstoffen
- 21 Energiestoffwechsel & Anabole Stoffwechselwege
- 22 Harnorgane und Elektrolythaushalt
- 23 Endokrines System
- 24 Geschlechtsorgane und Reproduktion
- 25 Medizinstudium: Lernen, Organisation, Physikum

# Übersicht nach Heften/Organen

Diese Übersicht zeigt dir alle Hefte und Kapitel der Vorklinik-Finale-Reihe. Daneben sind jeweils die zugehörigen Fächer vermerkt.  
Tipp: Eine Übersicht nach Fächern findest du am Ende dieses Heftes.

Heft 1 Soziale Interaktion & Wissenschaftliches Arbeiten		
1	Individuum, Gesellschaft, Normen	Psych-Soz
2	Arzt und Patient	Psych-Soz
3	Gesundheitssystem	Psych-Soz
4	Messen und Rechnen	Physik
5	Methodische Grundlagen	Psych-Soz

Heft 2 Atome und Naturgesetze		
1	Struktur der Materie	Biochemie, Chemie, Physik
2	Mineralstoffe und Spurenelemente	Biochemie, Chemie
3	Wärmelehre	Physik
4	Elektrizität und Magnetismus	Physik, Physiologie
5	Ionisierende Strahlung	Physik

Heft 3 Moleküle und Stoffumwandlungen		
1	Chemische Bindung	Chemie
2	Stereochemie	Chemie
3	Funktionelle Gruppen und Stoffklassen	Chemie
4	Stoffumwandlungen/chemische Reaktionen	Chemie

Heft 4 Biomoleküle		
1	Kohlenhydrate	Biochemie, Chemie
2	Aminosäuren, Peptide, Proteine	Biochemie, Chemie
3	Fettsäuren, Lipide	Biochemie, Chemie
4	Nukleinsäuren, Nukleotide, Chromatin	Biochemie, Chemie
5	Vitamine und Co-Enzyme	Biochemie, Chemie
6	Thermodynamik und Kinetik	Biochemie, Chemie

Heft 5 Zellbiologie, Allgemeine Histologie & Mikrobiologie		
1	Zellen, Organellen	Biologie, Biochemie, Histologie, Physiologie
2	Transportprozesse	Biologie, Biochemie, Physiologie
3	Signaltransduktion	Biologie, Biochemie, Physiologie
4	Zellzyklus, Zellteilung, Zelltod	Biologie, Biochemie, Physiologie
5	Histologische Methoden und allgemeine Gewebelehre	Histologie
6	Gewebe	Histologie
7	Mikrobiologie	Biologie

Heft 6 Molekularbiologie, Meiose & Embryologie		
1	Enzyme	Biochemie
2	DNA-Replikation und -Transkription	Biochemie
3	Translation und Proteinprozessierung	Biochemie
4	Biochemische Verfahren	Biochemie
5	Vererbungslehre	Biologie

6	Meiose und Entwicklung der Gameten	Biologie, Biochemie, Anatomie
7	Embryologie	Anatomie

Heft 7 Bewegungsapparat 1		
1	Allgemeine Anatomie	Anatomie
2	Binde- und Stützgewebe	Biochemie, Histologie
3	Obere Extremität	Anatomie

Heft 8 Bewegungsapparat 2		
1	Untere Extremität	Anatomie
2	Leibeswand	Anatomie

Heft 9 Motorik und Bewegungsabläufe		
1	Bewegungslehre	Physik
2	Muskeltypen	Biochemie, Histologie, Physiologie
3	Motorik	Physiologie
4	Rückenmark und Reflexe	Physiologie
5	Bewegungsabläufe im ZNS	Physiologie
6	Arbeits- und Leistungsphysiologie	Physiologie

Heft 10 Kopf und Hals		
1	Entwicklung von Kopf und Hals	Anatomie
2	Schädel, Muskulatur, Kopf- und Halseingeweide	Anatomie
3	Hirn- und Halsnerven, vegetative Innervation	Anatomie
4	Arterien, Venen, Lymphsystem	Anatomie
5	Angewandte und topografische Anatomie	Anatomie

Heft 11 Nervensystem		
1	Nervengewebe	Histologie
2	Gliederung des Nervensystems	Anatomie, Histologie
3	Funktionsprinzipien des Nervensystems	Physiologie
4	Neurotransmitter und Rezeptoren	Biochemie, Physiologie
5	Vegetatives Nervensystem	Physiologie

Heft 12 Zentralnervensystem		
1	Entwicklung des Zentralnervensystems	Anatomie
2	Encephalon	Anatomie
3	Stammhirn	Anatomie
4	Rückenmark, Systeme und Bahnen	Anatomie
5	Liquorräume und Meningen	Anatomie
6	Gefäßversorgung und Topografie des ZNS	Anatomie

Heft 13 Bewusstsein, Corticale Interaktion & Therapiemethoden		
1	Bewusstsein und corticale Interaktion	Physiologie, Psych-Soz
2	Therapiemethoden und ihre Grundlagen	Psych-Soz

### Heft 14 Sinnesorgane 1

1	Schwingung, Wellen, Akustik	Physik, Physiologie
2	Hör- und Gleichgewichtsorgan	Anatomie, Histologie
3	Hörvorgang und Gleichgewichtssinn	Physiologie
4	Haut und Hautanhangsgebilde	Histologie
5	Somato-viszerale Sensorik	Physiologie

### Heft 15 Sinnesorgane 2

1	Optik	Physik
2	Sehorgan	Anatomie, Histologie
3	Sehen	Physiologie
4	Chemische Sinne	Anatomie, Histologie, Physiologie

### Heft 16 Lunge und Atmung

1	Entwicklung von Pleuraperikardhöhle, Herz und Schlundbogenarterien	Anatomie, Histologie
2	Anatomie der Atmungsorgane	Anatomie, Histologie
3	Mechanik des Kreislaufsystems	Physik
4	Atemung	Physiologie
5	Gasaustausch	Physiologie

### Heft 17 Herz-Kreislauf-System

1	Aufbau des Herzens	Anatomie, Histologie
2	Nerven und Gefäße der Brusteingeweide	Anatomie
3	Physiologie des Herzens	Physiologie
4	Anatomie und Physiologie des Kreislaufsystems	Anatomie, Histologie, Physiologie

### Heft 18 Blut und Immunsystem

1	Blut und Blutplasma	Histologie, Physiologie
2	Erythrozyten, Hämoglobin & Sauerstofftransport	Biochemie, Physiologie
3	Thrombozyten, Hämostase und Fibrinolyse	Histologie, Physiologie
4	Leukozyten und Immunsystem	Anatomie, Biochemie, Histologie, Physiologie

### Heft 19 Gastrointestinaltrakt

1	Mundhöhle, Rachen, Speiseröhre	Anatomie, Histologie, Physiologie
2	Magen-Darm-Trakt	Anatomie, Physiologie
3	Organe des Magen-Darm-Kanals	Anatomie, Histologie, Physiologie
4	Leber, Gallenblase und Pankreas	Anatomie, Histologie, Physiologie
5	Blutgefäße, Lymphgefäße, vegetative Innervation	Anatomie

### Heft 20 Verdauung & Abbau von Nährstoffen

1	Ökologie, Energie- und Wärmehaushalt	Biochemie, Biologie, Physiologie
2	Nahrungsaufnahme	Biochemie, Physiologie
3	Abbau der Kohlenhydrate	Biochemie
4	Fettsäureabbau und Ketonkörperstoffwechsel	Biochemie
5	Aminosäurestoffwechsel und Harnstoffzyklus	Biochemie

### Heft 21 Energiestoffwechsel & Anabole Stoffwechselwege

1	Citratzyklus und Atmungskette	Biochemie
2	Gluconeogenese und Glykogenstoffwechsel	Biochemie
3	Lipidsynthese	Biochemie
4	Nukleotidstoffwechsel	Biochemie
5	Stoffwechsel der Leber	Biochemie
6	Fettgewebe	Biochemie

### Heft 22 Harnorgane und Elektrolythaushalt

1	Harnorgane	Anatomie, Histologie
2	Nierenfunktion	Physiologie, Biochemie
3	Säure-Basen-Reaktionen	Chemie
4	Säure-Basen-Haushalt	Physiologie, Biochemie
5	Wasser- und Elektrolythaushalt	Physiologie, Biochemie

### Heft 23 Endokrines System

1	Endokrines System	Biochemie, Histologie, Physiologie
2	Epiphyse	Histologie
3	Hypothalamus-Hypophysen-System	Biochemie, Histologie, Physiologie
4	Endokrines Pankreas	Biochemie, Histologie
5	Schilddrüse	Anatomie, Biochemie, Histologie, Physiologie
6	Nebenschilddrüsen	Anatomie, Biochemie, Histologie, Physiologie
7	Endokrine Funktionen der Niere	Physiologie, Biochemie
8	Nebenniere	Anatomie, Biochemie, Histologie, Physiologie
9	Diffuses neuroendokrines System (DNES)	Anatomie, Histologie
10	Gewebshormone	Biochemie, Physiologie

### Heft 24 Geschlechtsorgane und Reproduktion

1	Entwicklung der Geschlechtsorgane	Anatomie
2	Weibliche Geschlechtsorgane	Anatomie, Histologie, Physiologie
3	Männliche Geschlechtsorgane	Anatomie, Histologie, Physiologie
4	Angewandte und topografische Anatomie	Anatomie
5	Blutgefäße, Lymphgefäße, vegetative Innervation	Anatomie
6	Sexualhormone	Biochemie, Physiologie
7	Sexualität und Reproduktion	Physiologie, Psych-Soz
8	Schwangerschaft und Geburt	Anatomie, Histologie, Physiologie

### Heft 25 Medizinstudium: Lernen, Organisation, Physikum

1	How To ... Vorklinik
2	How To ... Physikum
3	Lernpläne
4	Kreuzen

## Übersicht nach Fächern

Du vermisst die Fächer? Bitte sehr, hier siehst du die Kapitel der Vorklinik-Finale-Reihe nach Fächern sortiert!  
Viele Kapitel kombinieren Inhalte mehrerer Fächer und werden deshalb mehrfach genannt.  
Die Übersicht nach Heften/Organen findest du am Anfang dieses Heftes.

### Anatomie

#### Allgemeine Embryologie

Heft 06 | 6 Meiose und Entwicklung der Gameten

Heft 06 | 7 Embryologie

#### Bewegungsapparat

Heft 07 | 1 Allgemeine Anatomie

Heft 07 | 3 Obere Extremität

Heft 08 | 1 Untere Extremität

Heft 08 | 2 Leibeswand

#### Kopf, Hals, Nervensystem

Heft 10 | 1 Entwicklung von Kopf und Hals

Heft 10 | 2 Schädel, Muskulatur, Kopf- und Halseingeweide

Heft 10 | 3 Hirn- und Halsnerven, vegetative Innervation

Heft 10 | 4 Arterien, Venen, Lymphsystem

Heft 10 | 5 Angewandte und topografische Anatomie

Heft 11 | 2 Gliederung des Nervensystems

Heft 12 | 1 Entwicklung des Zentralnervensystems

Heft 12 | 2 Encephalon

Heft 12 | 3 Stammhirn

Heft 12 | 4 Rückenmark, Systeme und Bahnen

Heft 12 | 5 Liquorräume und Meningen

Heft 12 | 6 Gefäßversorgung und Topografie des ZNS

#### Sinnesorgane

Heft 14 | 2 Hör- und Gleichgewichtsorgan

Heft 15 | 2 Sehorgan

Heft 15 | 4 Chemische Sinne

#### Lunge, Herz, Kreislauf, Immunsystem

Heft 16 | 1 Entwicklung von Pleuraperikardhöhle, Herz und Schlundbogenarterien

Heft 16 | 2 Anatomie der Atmungsorgane

Heft 17 | 1 Aufbau des Herzens

Heft 17 | 2 Nerven und Gefäße der Brusteingeweide

Heft 17 | 4 Anatomie und Physiologie des Kreislaufsystems

Heft 18 | 4 Leukozyten und Immunsystem

#### Gastrointestinaltrakt

Heft 19 | 1 Mundhöhle, Rachen, Speiseröhre

Heft 19 | 2 Magen-Darm-Trakt

Heft 19 | 3 Organe des Magen-Darm-Kanals

Heft 19 | 4 Leber, Gallenblase und Pankreas

Heft 19 | 5 Blutgefäße, Lymphgefäße, vegetative Innervation

#### Endokrines System

Heft 23 | 5 Schilddrüse

Heft 23 | 6 Nebenschilddrüsen

Heft 23 | 8 Nebenniere

Heft 23 | 9 Diffuses neuroendokrines System (DNES)

#### Harn- und Geschlechtsorgane

Heft 22 | 1 Harnorgane

Heft 24 | 1 Entwicklung der Geschlechtsorgane

Heft 24 | 2 Weibliche Geschlechtsorgane

Heft 24 | 3 Männliche Geschlechtsorgane

Heft 24 | 4 Angewandte und topografische Anatomie

Heft 24 | 5 Blutgefäße, Lymphgefäße, vegetative Innervation

Heft 24 | 8 Schwangerschaft und Geburt

### Histologie

#### Allgemeine Histologie

Heft 05 | 1 Zellen, Organellen

Heft 05 | 5 Histologische Methoden und allgemeine Gewebelehre

Heft 05 | 6 Gewebe

#### Bewegungsapparat

Heft 07 | 2 Binde- und Stützgewebe

Heft 09 | 2 Muskeltypen

#### Kopf, Hals, Nervensystem

Heft 11 | 1 Nervengewebe

Heft 11 | 2 Gliederung des Nervensystems

#### Sinnesorgane

Heft 14 | 2 Hör- und Gleichgewichtsorgan

Heft 14 | 4 Haut und Hautanhangsgebilde

Heft 15 | 2 Sehorgan

Heft 15 | 4 Chemische Sinne

#### Lunge, Herz, Kreislauf, Immunsystem

Heft 16 | 1 Entwicklung von Pleuraperikardhöhle, Herz und Schlundbogenarterien

Heft 16 | 2 Anatomie der Atmungsorgane

Heft 17 | 1 Aufbau des Herzens

Heft 17 | 4 Anatomie und Physiologie des Kreislaufsystems

Heft 18 | 1 Blut und Blutplasma

Heft 18 | 3 Thrombozyten, Hämostase und Fibrinolyse

Heft 18 | 4 Leukozyten und Immunsystem

### Gastrointestinaltrakt

Heft 19 | 1 Mundhöhle, Rachen, Speiseröhre

Heft 19 | 3 Organe des Magen-Darm-Kanals

Heft 19 | 4 Leber, Gallenblase und Pankreas

#### Endokrines System

Heft 23 | 1 Endokrines System

Heft 23 | 2 Epiphyse

Heft 23 | 3 Hypothalamus-Hypophysen-System

Heft 23 | 4 Endokrines Pankreas

Heft 23 | 5 Schilddrüse

Heft 23 | 6 Nebenschilddrüsen

Heft 23 | 8 Nebenniere

Heft 23 | 9 Diffuses neuroendokrines System (DNES)

#### Harn- und Geschlechtsorgane

Heft 22 | 1 Harnorgane

Heft 24 | 2 Weibliche Geschlechtsorgane

Heft 24 | 3 Männliche Geschlechtsorgane

Heft 24 | 8 Schwangerschaft und Geburt

### Biochemie

#### Grundlagen

Heft 02 | 1 Struktur der Materie

Heft 02 | 2 Mineralstoffe und Spurenelemente

Heft 04 | 1 Kohlenhydrate

Heft 04 | 2 Aminosäuren, Peptide, Proteine

Heft 04 | 3 Fettsäuren, Lipide

Heft 04 | 4 Nukleinsäuren, Nukleotide, Chromatin

Heft 04 | 5 Vitamine und Co-Enzyme

Heft 04 | 6 Thermodynamik und Kinetik

#### Zellbiologie, Molekularbiologie, Meiose

Heft 05 | 1 Zellen, Organellen

Heft 05 | 2 Transportprozesse

Heft 05 | 3 Signaltransduktion

Heft 05 | 4 Zellzyklus, Zellteilung, Zelltod

Heft 06 | 1 Enzyme

Heft 06 | 2 DNA-Replikation und -Transkription

Heft 06 | 3 Translation und Proteinprozessierung

Heft 06 | 4 Biochemische Verfahren

Heft 06 | 6 Meiose und Entwicklung der Gameten

#### Bewegungsapparat, Nervensystem, Immunsystem

Heft 07 | 2 Binde- und Stützgewebe

Heft 09 | 2 Muskeltypen

- Heft 11 | 4 Neurotransmitter und Rezeptoren
- Heft 18 | 2 Erythrozyten, Hämoglobin & Sauerstofftransport
- Heft 18 | 4 Leukozyten und Immunsystem

#### Anabole und katabole Stoffwechselwege

- Heft 20 | 1 Ökologie, Energie- und Wärmehaushalt
- Heft 20 | 2 Nahrungsaufnahme
- Heft 20 | 3 Abbau der Kohlenhydrate
- Heft 20 | 4 Fettsäureabbau und Ketonkörperstoffwechsel
- Heft 20 | 5 Aminosäurestoffwechsel und Harnstoffzyklus
- Heft 21 | 1 Citratzyklus und Atmungskette
- Heft 21 | 2 Gluconeogenese und Glykogenstoffwechsel
- Heft 21 | 3 Lipidsynthese
- Heft 21 | 4 Nukleotidstoffwechsel
- Heft 21 | 5 Stoffwechsel der Leber
- Heft 21 | 6 Fettgewebe

#### Niere, Säure-Basen-, Wasser- und Elektrolythaushalt

- Heft 22 | 2 Nierenfunktion
- Heft 22 | 4 Säure-Basen-Haushalt
- Heft 22 | 5 Wasser- und Elektrolythaushalt

#### Endokrines System

- Heft 23 | 1 Endokrines System
- Heft 23 | 3 Hypothalamus-Hypophysen-System
- Heft 23 | 4 Endokrines Pankreas
- Heft 23 | 5 Schilddrüse
- Heft 23 | 6 Nebenschilddrüsen
- Heft 23 | 7 Endokrine Funktionen der Niere
- Heft 23 | 8 Nebenniere
- Heft 23 | 10 Gewebshormone
- Heft 24 | 6 Sexualhormone

#### Physiologie

##### Zellphysiologie

- Heft 02 | 4 Elektrizität und Magnetismus
- Heft 05 | 1 Zellen, Organellen
- Heft 05 | 2 Transportprozesse
- Heft 05 | 3 Signaltransduktion
- Heft 05 | 4 Zellzyklus, Zellteilung, Zelltod

##### Bewegungsapparat und Motorik

- Heft 09 | 2 Muskeltypen
- Heft 09 | 3 Motorik

##### Nerven und Sinne

- Heft 09 | 4 Rückenmark und Reflexe
- Heft 09 | 5 Bewegungsabläufe im ZNS
- Heft 09 | 6 Arbeits- und Leistungsphysiologie
- Heft 11 | 3 Funktionsprinzipien des Nervensystems

- Heft 11 | 4 Neurotransmitter und Rezeptoren
- Heft 11 | 5 Vegetatives Nervensystem
- Heft 13 | 1 Bewusstsein und corticale Interaktion
- Heft 14 | 1 Schwingung, Wellen, Akustik
- Heft 14 | 3 Hörvorgang und Gleichgewichtssinn
- Heft 14 | 5 Somatoviszzerale Sensorik
- Heft 15 | 3 Sehen
- Heft 15 | 4 Chemische Sinne

#### Atmung, Kreislauf, Blut, Immunsystem

- Heft 16 | 4 Atmung
- Heft 16 | 5 Gasaustausch
- Heft 17 | 3 Physiologie des Herzens
- Heft 17 | 4 Anatomie und Physiologie des Kreislaufsystems
- Heft 18 | 1 Blut und Blutplasma
- Heft 18 | 2 Erythrozyten, Hämoglobin & Sauerstofftransport
- Heft 18 | 3 Thrombozyten, Hämostase und Fibrinolyse
- Heft 18 | 4 Leukozyten und Immunsystem

#### Verdauung, Energie- und Wärmehaushalt

- Heft 19 | 1 Mundhöhle, Rachen, Speiseröhre
- Heft 19 | 2 Magen-Darm-Trakt
- Heft 19 | 3 Organe des Magen-Darm-Kanals
- Heft 19 | 4 Leber, Gallenblase und Pankreas
- Heft 20 | 1 Ökologie, Energie- und Wärmehaushalt
- Heft 20 | 2 Nahrungsaufnahme

#### Niere, Säure-Basen-, Wasser- und Elektrolythaushalt

- Heft 22 | 2 Nierenfunktion
- Heft 22 | 4 Säure-Basen-Haushalt
- Heft 22 | 5 Wasser- und Elektrolythaushalt

#### Endokrines System

- Heft 23 | 1 Endokrines System
- Heft 23 | 3 Hypothalamus-Hypophysen-System
- Heft 23 | 5 Schilddrüse
- Heft 23 | 6 Nebenschilddrüsen
- Heft 23 | 7 Endokrine Funktionen der Niere
- Heft 23 | 8 Nebenniere
- Heft 23 | 10 Gewebshormone

#### Geschlechtsorgane und Reproduktion

- Heft 24 | 2 Weibliche Geschlechtsorgane
- Heft 24 | 3 Männliche Geschlechtsorgane
- Heft 24 | 6 Sexualhormone
- Heft 24 | 7 Sexualität und Reproduktion
- Heft 24 | 8 Schwangerschaft und Geburt

#### Biologie

- Heft 05 | 1 Zellen, Organellen
- Heft 05 | 2 Transportprozesse
- Heft 05 | 3 Signaltransduktion
- Heft 05 | 4 Zellzyklus, Zellteilung, Zelltod
- Heft 05 | 7 Mikrobiologie
- Heft 06 | 5 Vererbungslehre
- Heft 06 | 6 Meiose und Entwicklung der Gameten
- Heft 20 | 1 Ökologie, Energie- und Wärmehaushalt

#### Chemie

- Heft 02 | 1 Struktur der Materie
- Heft 02 | 2 Mineralstoffe und Spurenelemente
- Heft 03 | 1 Chemische Bindung
- Heft 03 | 2 Stereochemie
- Heft 03 | 3 Funktionelle Gruppen und Stoffklassen
- Heft 03 | 4 Stoffumwandlungen/chemische Reaktionen
- Heft 22 | 3 Säure-Basen-Reaktionen
- Heft 04 | 6 Thermodynamik und Kinetik
- Heft 04 | 1 Kohlenhydrate
- Heft 04 | 2 Aminosäuren, Peptide, Proteine
- Heft 04 | 3 Fettsäuren, Lipide
- Heft 04 | 4 Nukleinsäuren, Nukleotide, Chromatin
- Heft 04 | 5 Vitamine und Co-Enzyme

#### Physik

- Heft 01 | 4 Messen und Rechnen
- Heft 02 | 1 Struktur der Materie
- Heft 02 | 3 Wärmelehre
- Heft 02 | 4 Elektrizität und Magnetismus
- Heft 02 | 5 Ionisierende Strahlung
- Heft 09 | 1 Bewegungslehre
- Heft 14 | 1 Schwingung, Wellen, Akustik
- Heft 15 | 1 Optik
- Heft 16 | 3 Mechanik des Kreislaufsystems

#### Med. Psychologie, Med. Soziologie

- Heft 01 | 1 Individuum, Gesellschaft, Normen
- Heft 01 | 2 Arzt und Patient
- Heft 01 | 3 Gesundheitssystem
- Heft 01 | 5 Methodische Grundlagen
- Heft 13 | 1 Bewusstsein und corticale Interaktion
- Heft 13 | 2 Therapiemethoden und ihre Grundlagen
- Heft 24 | 7 Sexualität und Reproduktion

Thomas Fink, Raphael Kunisch, Thomas Wenisch

Vorklinik Finale 1

# Soziale Interaktion & Wissenschaftliches Arbeiten

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Victoria Weltzer



# Herzlich willkommen bei Vorklinik Finale!

## Hier findest du alle Inhalte, die du für das Physikum brauchst!

Egal ob du am Beginn des Medizinstudiums stehst oder schon kurz vor dem Physikum, ob du in einem Regel- oder Reformstudiengang studierst – Vorklinik Finale unterstützt dich beim effizienten Lernen und Überblick gewinnen!

## Gliederung nach Organen:

Durch die Gliederung nach Organen bzw. Organsystemen stehen hier die Inhalte zusammen, die zusammengehören: Die Biochemie, Physiologie und Histologie der Muskeltypen – alles in einem Kapitel. Physik/Optik, Anatomie der Augen und Physiologie des Sehens – direkt aufeinander folgend. Das hat mehrere **Vorteile**:

- Zum einen wird viel deutlicher, warum du naturwissenschaftliche Grundlagen lernst.
- Zum anderen bereitet dich diese Darstellung optimal auf den klinischen Abschnitt und die ärztliche Tätigkeit vor.
- Und außerdem: Bei der Darstellung nach Fächern werden viele Inhalte doppelt dargestellt, damit die Inhalte einem logischen Aufbau folgen. Im Vorklinik Finale sind diese Inhalte bereits zusammengefasst, das erleichtert dir das Lernen! Selbstverständlich sind **alle** relevanten Inhalte der Fächer enthalten.

## Das steckt drin:

Vorklinik Finale erläutert dir von Heft 1 bis Heft 6 wichtige Grundlagen – diese lassen sich keinem Organsystem zuordnen, da musst du leider durch! – und führt dich von Heft 7 bis Heft 24 einmal durch alle Organsysteme. **Heft 25 gibt dir wertvolle Tipps zum Lernen im vorklinischen Abschnitt und zur Vorbereitung auf das Physikum.** Schau doch mal rein!

## Du kannst die Hefte auf unterschiedliche Art nutzen:

- Während des vorklinischen Abschnitts, um dir einen Überblick über den gesamten Lernstoff zu verschaffen und Inhalte einzuordnen.
- Während des vorklinischen Abschnitts, um schnell zu sehen, wie Inhalte aus den einzelnen Fächern bei einem bestimmten Organsystem zusammenkommen.
- Und natürlich zur Vorbereitung auf das Physikum.

## Alles drin und Überblick garantiert!

Ganz vorne und ganz hinten im Heft findest du jeweils eine Gesamtübersicht, einmal nach Organen und einmal nach Fächern.

Wir wünschen dir viel Freude und Erfolg im Medizinstudium!

# So nutzt du die Vorklinik-Finale-Hefte

## Navigation

Du siehst am Anfang jedes Kapitels und Teilkapitels, welche Fächer enthalten sind:

 **Physik, Physiologie**

Wie bereits erwähnt, gibt es ganz vorne und ganz hinten im Heft jeweils eine **Gesamtübersicht**, einmal nach Organen und einmal nach Fächern.

## Diese Markierungen weisen auf wichtige Inhalte hin

### MERKE

Hier erhältst du wichtige Tipps und Hinweise.

### KLINIK

Hier findest du relevante klinische Inhalte.

### FOKUS

Hier stehen klinische Inhalte aus dem Fokuserkrankungs-Netzwerk gemäß Entwurf des neuen NKLM. Sie wurden damit als besonders wichtig für den vorklinischen Abschnitt definiert, und wir empfehlen, sie besonders aufmerksam anzusehen!

Besonders prüfungsrelevante Inhalte sind gelb hinterlegt.

## Aktives Lernen und Überblick behalten

### CHECK-UP

Am Ende jedes Teilkapitels stehen einige Verständnisfragen zum Selbstcheck. Das vermeidet ein „Gelesen, aber nicht gelernt“.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Diese Kästen findest du am Ende jedes Teilkapitels. Sie erinnern dich daran, dass du dir die Inhalte kurz zusammenfasst, so dass du dir Schritt für Schritt Überblick verschaffst. Die Stichwörter werden am Ende des Kapitels weiterverwendet (siehe unten).

### Jetzt bist du dran!

Am Ende jedes Kapitels haben wir dir diese Seite zur Bearbeitung vorbereitet. Sie schlägt dir verschiedene Aufgaben vor, wie du den Inhalt noch einmal aktiv wiederholen kannst.

#### Zeichenaufgabe / Anregungen zur weiteren Wiederholung

Studierende höherer Semester geben euch Tipps, wie ihr wichtige Inhalte aktiv zu Papier bringt. Ideal zum Wiederholen, allein und in Lerngruppen, auch zur mündlichen Vorbereitung.

#### Überblick gewinnen

Du hast ja bereits am Ende jedes Unterkapitels einige Stichwörter notiert. Hier kannst du daraus eine Mindmap oder Liste erstellen und damit aktiv Überblick gewinnen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Individuum, Gesellschaft, Normen</b> .....	1	4.4	Fehler und Unsicherheiten beim Messen .....	32
1.1	Individuum .....	1	4.5	Statistische Fehlerrechnung .....	32
1.2	Gesellschaft .....	3	4.6	Fehlerfortpflanzung .....	33
1.3	Normen .....	6	4.7	Mathematische Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen .....	34
<b>2</b>	<b>Arzt und Patient</b> .....	9	4.8	Grafische Darstellung .....	37
2.1	Arzt- und Krankenrolle .....	9			
2.2	Kommunikation und Interaktion .....	11	<b>5</b>	<b>Methodische Grundlagen</b> .....	39
2.3	Modelle gesundheitsrelevanten Verhaltens .....	14	5.1	Hypothesenbildung .....	39
2.4	Prävention .....	18	5.2	Operationalisierung .....	40
<b>3</b>	<b>Gesundheitssystem</b> .....	21	5.3	Testdiagnostik .....	43
3.1	Elemente des Gesundheitssystems .....	21	5.4	Untersuchungsplanung .....	46
3.2	Ärzterschaft .....	24	5.5	Sozialwissenschaftliche Methoden der Datengewinnung .....	49
3.3	Gesundheitsökonomie .....	25	5.6	Biopsychologische Methoden der Datengewinnung .....	52
<b>4</b>	<b>Messen und Rechnen</b> .....	29	5.7	Datenauswertung und -interpretation .....	53
4.1	Physikalische Größen .....	29			
4.2	Skalare und Vektoren .....	29			
4.3	Internationales Einheitensystem .....	30			
				<b>Register</b> .....	59

# 1

## Individuum, Gesellschaft, Normen

### 1.1 Individuum

Raphael Kunisch



#### 1.1.1 Adoleszenz

Die Entwicklungsphase **zwischen Kindheit und Erwachsenenalter** wird als Adoleszenz bezeichnet.

Die Veränderung der eigenen Rolle in der Gesellschaft, aber auch in der Familie bringt Veränderungen mit sich. Durch den Rollenwechsel zum Erwachsenen hin, wird auch das Gefüge der **familiären Sozialisation verändert**, was häufig von allen Mitgliedern der Kernfamilie als Herausforderung erlebt wird. Die schwindende Kontrolle durch die Eltern eröffnet neue Freiheiten, mit denen ein verantwortungsvoller Umgang erst erlernt werden muss.

Die Adoleszenz birgt daher verschiedene **gesundheitliche Gefahren**. Die körperlichen und sozialen Veränderungen rufen häufig eine Verunsicherung bei den betroffenen Individuen hervor. Wenn diese **Krisen des Selbstkonzepts und Selbstwertgefühls** meist auch gut überstanden werden, sind sie doch auch einer der Gründe dafür, dass Suizid die zweithäufigste Todesursache bei Adoleszenten darstellt. Auch kann durch den sozialen Druck nach Zugehörigkeit gesundheitsgefährdendes Verhalten, wie z. B. Alkohol-, Nikotin- oder anderer Drogenkonsum gefördert werden. Eine besonders große Rolle spielt hierbei die **Peer-Group**, also die Gruppe der gleichaltrigen oder gleichgestellten Bezugspersonen, die Druck, den sogenannten **Peer-Pressure (Gruppenzwang)**, ausüben, z. B. „zu rauchen, um dazuzugehören“. Natürlich spielt bezüglich der Anfälligkeit für ein derartiges gesundheitsriskantes Verhalten auch immer die **Persönlichkeit des betroffenen Individuums** eine große Rolle.

#### Senium

Als Senium wird das höhere Lebensalter ab ca. 60–65 Jahren bezeichnet. Dieses wird nochmals in das junge Alter bis zum 80. Lebensjahr und das alte Alter, welches darauffolgt, unterteilt.

#### Intelligenz

Ein kognitives Merkmal des Alters ist es, dass sich die geistigen Fähigkeiten insgesamt verlangsamen. Während die **fluide Intelligenz** mit zunehmendem Alter abnimmt, steigt die **kristalline Intelligenz** an, weshalb nicht grundsätzlich von einem Intelligenzverlust mit zunehmendem Lebensalter gesprochen werden kann.

#### KLINIK

Mit zunehmendem Lebensalter **sinkt die fluide Intelligenz**, während die **kristalline Intelligenz ansteigt**.

#### Theorien des Alterns

Es gibt unterschiedliche Theorien des Alterns, die unterschiedliche Bedürfnisse und Fähigkeiten von Senioren postulieren:

- Die **Disengagement-Theorie des Alterns** besagt, dass sich Menschen im Ruhestand aus dem **gesellschaftlichen Leben lösen** und nach **Ruhe und Entspannung** streben, um ihren Lebensabend zu genießen.
- Der **Aktivitätstheorie des Alterns** zufolge sind für Senioren **soziale Kontakte und Aktivitäten** die wichtigsten Faktoren für die Lebenszufriedenheit. Daher soll der alte Mensch möglichst aktiv am gesellschaftlichen Leben beteiligt werden.
- **Kompetenztheorie des Alterns**: Anstatt sich auf die negativen Aspekte des Alterns wie Funktionseinschränkungen und Defizite zu konzentrieren und diese zu behandeln, sollen durch spezielle Förderung die individuellen **Ressourcen der Senioren erhalten und gestärkt** werden. Dies wird auch als Ressourcenansatz bezeichnet.
- Die **Kontinuitätstheorie des Alterns** besagt, dass Senioren lediglich die **Verhaltensweisen des Erwachsenenalters fortführen**. Sie postuliert, dass extrovertierte, aktive Menschen eher der Aktivitätstheorie des Alterns entsprechen, während introvertierte, zurückgezogene Menschen im Alter eher der Disengagement-Theorie des Alterns folgen.

#### Alter und Krankheit

Mit dem höheren Lebensalter nimmt das Krankheits- und Sterberisiko stetig zu. Dies ist auf einen Rückgang der physiologischen Reserve und degenerative Prozesse zurückzuführen. Durch das „Anhäufen“ chronischer Erkrankungen, wie z. B. Diabetes mellitus und Arthrose, steigt mit dem Lebensalter auch die **Häufigkeit von Multimorbidität**, also Mehrfacherkrankungen.

Dennoch ist es durch den medizinischen Fortschritt, besseres Gesundheitsverhalten und den gestiegenen Lebensstandard in Deutschland nicht nur zu einer höheren Lebenserwartung, sondern auch zu einer **Kompression der Morbidität** gekommen. Dies bedeutet, dass die Lebensspanne des behinderungsfreien Lebens in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen ist. Die Menschen leben nicht nur länger, sondern sie leben auch überproportional länger in Gesundheit. Die Phase der schweren Krankheit und Behinderung vor dem Tod hat sich stark verkürzt.

## Sozialer Status

Als sozialen oder sozioökonomischen Status bezeichnet man die soziale Position eines Individuums in der Gesellschaft. Gruppen von Personen mit ähnlichem sozialem Status werden als soziale Klassen bezeichnet, welche wiederum durch ihre Rangfolge die **soziale Schichtung** einer Gesellschaft bilden.

### Meritokratische Triade

Als **meritokratische Triade** werden die drei Faktoren bezeichnet, über die in der Soziologie der **sozioökonomische Status und die Schichtzugehörigkeit eines Individuums** definiert werden:

- **Bildung:** der höchste erreichte Bildungsabschluss
- **Beruf:** gesellschaftlicher Status des Berufs und individuelle Stellung
- **Einkommen:** individueller Verdienst

Durch die Bewertung der unterschiedlichen Variablen lässt sich der **Schichtindex** eines Individuums errechnen und dieses hierüber einer sozialen Schicht zuordnen.

### Statuskristallisation

**Statuskristallisation**, auch **Statuskonsistenz** genannt, liegt bei **Übereinstimmung aller drei Statusindikatoren** der meritokratischen Triade vor. Beispielsweise bei einem Individuum, das Medizin studiert und darin promoviert hat, als Arzt arbeitet und ein hohes Einkommen erzielt.

### Statusinkonsistenz

Wenn eine Person bezüglich der einzelnen Statusindikatoren der meritokratischen Triade **starke Unterschiede** aufweist, spricht man von **Statusinkonsistenz**. Ein Beispiel hierfür ist ein promovierter Arzt, der bei einer Hilfsorganisation arbeitet und hier wenig verdient.

### Soziale Mobilität

Die **soziale Mobilität** wird auch als **vertikale Mobilität** bezeichnet, da sie den **sozialen Auf- oder Abstieg** beschreibt. Sie sollte nicht mit der horizontalen Mobilität verwechselt werden, welche eine geografische Mobilität beschreibt, die sich nicht auf die Schichtzugehörigkeit auswirkt.

Zudem werden **intragenerative und intergenerative Mobilität** unterschieden. **Intragenerative Mobilität** bedeutet, dass diese **innerhalb einer Generation** vorkommt, z. B. bei einem Arzt, der einen Arbeitsplatz in einer anderen Stadt findet, umzieht und so eine intragenerative horizontale Mobilität aufweist. Im Gegensatz dazu spielt sich eine **intergenerative Mobilität zwischen zwei Generationen** ab, z. B. bei einer Mutter, die Krankenschwester ist und deren Tochter Ärztin wird und somit eine intergenerative vertikale Mobilität zeigt.

### Stereotyp

**Pauschalisierte Einstellungen** zu Personen oder Gruppen werden als **Stereotyp** bezeichnet. Ein Beispiel hierfür ist die Überzeugung, alle Medizinstudentinnen wollten Kinderärztin werden.

Wenn das Stereotyp ein diskreditierendes, also **herabsetzendes Merkmal** beinhaltet, wird diese Stereotypisierung als **Stigmatisierung** bezeichnet. Die Überzeugung, alle psychisch Kranken seien dumm, ist ein Beispiel hierfür.

### Opportunitätsstruktur

Die **Chancen zur Lebensgestaltung**, die eine Gesellschaft ihren Mitgliedern zur Verfügung stellt, werden in ihrer Gesamtheit als **Opportunitätsstruktur** bezeichnet. Unter diesen breiten Begriff fallen sowohl institutionelle Einrichtungen wie Schulen als auch materielle Güter wie Lebensmittel.

## Sozialstatus und Krankheit

Soziologische Untersuchungen haben ergeben, dass ein **niedriger sozialer Status negativ mit Gesundheit korreliert**. Zur Ursache hierfür existieren zwei etablierte Erklärungsmodelle:

- Die **Drift-Hypothese** wird auch als Modell des sozialen Abstiegs bezeichnet, da die Annahme hierbei lautet, dass die **Erkrankten erst durch ihre Krankheit sozial absteigen** (**sozialer Drift**) und sich deswegen so überdurchschnittlich viele Kranke in den niedrigeren Gesellschaftsschichten finden. Entwickelt wurde die Hypothese an Untersuchungen zur Schizophrenie, die gezeigt haben, dass bereits einige Jahre vor dem Auftreten typischer Symptome ein sozialer Abstieg bei Betroffenen durch Ausbildungsabbruch, Arbeitsplatzverlust und soziale Isolation stattfindet.
- Die **Hypothese der sozialen Verursachung** hingegen nimmt an, dass die mit einem **niedrigen sozialen Status** verbundenen Lebensumstände das **Auftreten von Krankheiten begünstigen** und deren Heilung und Behandlung erschweren. Die vermuteten Ursachen hierfür sind vielfältig und reichen von einer ungünstigeren Umwelt, z. B. höherer Luftverschmutzung, minderwertiger Ernährung und belastenderen Arbeitsverhältnissen, über geringere Bildung mit ungünstigerem Gesundheitsverhalten, wie z. B. Rauchen und mangelnde Bewegung, bis hin zu einer niedrigeren Inanspruchnahme von Gesundheitsleistungen wie Präventionsmaßnahmen und ärztlicher Konsultation. Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Theorie der sozialen Verursachung den bedeutenderen Anteil der gesundheitlichen Ungleichheit zwischen den sozialen Schichten erklärt.

### MERKE

**Drift-Hypothese:** Krankheit macht arm.

**Soziale Verursachung:** Armut macht krank.

### KLINIK

**Deprivation** Der Begriff der **Deprivation** bedeutet in der Soziologie „Benachteiligung“. Die Hypothese der sozialen Verursachung von Krankheiten basiert maßgeblich auf der Deprivation der unteren Gesellschaftsschichten.

- **Strukturelle Deprivation** liegt dann vor, wenn eine Gruppe oder ein Individuum **objektiv benachteiligt** wird, z. B. in seinem Zugang zu Gütern und Dienstleistungen.
- **Relative Deprivation** hingegen bedeutet, dass sich einzelne Personen oder Gruppen **subjektiv benachteiligt fühlen** im Vergleich mit ihrer Umgebung.

## Schichtspezifität

Die verschiedenen Gesellschaftsschichten unterschieden sich in vielen gesundheitsrelevanten Aspekten. Besonders ausgeprägt sind diese Unterschiede zwischen der Unter- und Oberschicht. So ist z. B. die Lebenserwartung von Angehörigen der Unterschicht im Vergleich zu Angehörigen der Oberschicht deutlich niedriger. Die Nutzung von alternativ- oder komplementärmedizinischen Leistungen ist bei Angehörigen der Unterschicht geringer ausgeprägt als in höheren Schichten.

### MERKE

Die meisten Erkrankungen kommen in der Unterschicht sehr viel häufiger vor. Ausnahmen: Erkrankungen mit höherer Prävalenz, z. B. Allergien und Essstörungen; diese treten in der Oberschicht häufiger auf. Einige Erkrankungen sind auch in allen Schichten gleich häufig vertreten, z. B. Brustkrebs.

### CHECK-UP

- Was besagt die Disengagement-Theorie des Alterns?
- Wie verhält sich die Intelligenz im Alter?
- Wie lauten die drei Faktoren der meritokratischen Triade?
- Wie lautet ein Beispiel für intragenerationale vertikale Mobilität?
- Was besagt die Drift-Hypothese?
- Welche Erkrankungen sind schichtspezifisch für die Oberschicht?

## Jetzt bist du dran!

### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Gesellschaft

Raphael Kunisch und Thomas Fink



### 1.2.1 Bevölkerungsentwicklung

#### Demografisches Altern

Die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland wird gegenwärtig durch das sogenannte demografische Altern bestimmt. Dies bedeutet, dass der prozentuale **Anteil der Senioren an der Gesamtbevölkerung zunimmt**. Grund hierfür ist der Prozess des **doppel-**

**ten Alterns**. Damit wird der Umstand beschrieben, dass die Lebenserwartung in den vergangenen Jahrzehnten den höchsten Stand in der Geschichte der Menschheit erreicht hat, während gleichzeitig die Geburtenrate in Deutschland seit den 1960er-Jahren kontinuierlich zurückgeht. Somit leben die älteren Menschen einerseits immer länger, während gleichzeitig immer weniger junge Menschen nachgeboren werden. Dies lässt sich eindrucksvoll anhand der grafischen Darstellung der Altersstruktur nachvollziehen. Hierbei ist für ein bestimmtes Lebensalter in Jahren die Anzahl der männlichen und weiblichen Personen aufgetragen. Der Begriff für eine solche Grafik lautet **Alterspyramide**, was sich aus der klassischen Form im Jahr 1950 leicht erklären lässt. Durch die steigende Lebenserwartung wandelt sich der Altersaufbau (> Abb. 1.1): Die Menschen beginnen statistisch nicht mehr ab dem 40. Lebensjahr sukzessive zu versterben wie noch im Jahr 1950; vielmehr steigt die Mortalität erst im höheren Lebensalter ab dem 70. Lebensjahr stark an. Hierdurch kommt es zu einer **Abflachung der Pyramidenspitze, die als Rektangularisierung** bezeichnet wird. Gegenwärtig spricht man in Bezug auf den Altersaufbau Deutschlands von einer **Urnenform**. Das Verhältnis von Menschen im Erwerbsalter zu Menschen im Ruhestandsalter wird als sogenannter **Altenquotient** bezeichnet. Hiervon zu unterscheiden ist der **Belastungsquotient**, welcher das Verhältnis der Bevölkerung im Erwerbsalter (20–64 Lebensjahre) zur älteren und jüngeren Bevölkerung beschreibt.

#### Kenngroßen des Bevölkerungswachstums

Es existieren verschiedene epidemiologische Kenngrößen zur Beschreibung des Bevölkerungswachstums. Dieses speist sich einerseits durch Einwanderung beschrieben durch die Migrationsrate und folgende Messgrößen zur Geburt:

- **Geburtenziffer:** Anzahl der Kinder, die jede Frau statistisch in ihrem Leben gebiert. Im Jahr 2020 lag diese in Deutschland bei etwa 1,5 Kindern pro Frau. Wird auch als Geburtenrate oder Natalität bezeichnet.
- **Nettoreproduktionsziffer:** Anzahl der Mädchen, die von Frauen über ihr Leben hinweg geboren werden, weshalb bei einem Wert von 1 die Bevölkerung konstant bleibt. Berücksichtigt im Gegensatz zur Geburtenziffer auch die Sterblichkeit von Frauen im gebärfähigen Alter.
- **Fertilität:** Die jährliche Anzahl an Geburten in einem Jahr im Verhältnis zu Frauen im gebärfähigen Alter. Wenn hypothetisch alle Frauen im Alter von 15 bis 49 Jahren jedes Jahr ein Kind gebären, läge die Fertilität bei 1. Wird auch als Fruchtbarkeitsziffer bezeichnet.

#### Lebenserwartung

Die Lebenserwartung ist in Deutschland in den vergangenen 100 Jahren massiv gestiegen. Im Jahr 1900 lag sie bei 46 Jahren für Männer und 53 Jahren für Frauen. Für 100 Jahre später geborene Männer liegt die Lebenserwartung nun bei 75 Jahren und für Frauen bei 81 Jahren. Den wichtigsten Beitrag hierzu lieferte die Verbesserung der Lebensumstände durch bessere Hygiene, Ernährung und Bildung. Der medizinische Fortschritt trug im Vergleich relativ wenig dazu bei. Die Lebenserwartung wächst weiter um durchschnittlich **drei Monate jedes Jahr**.

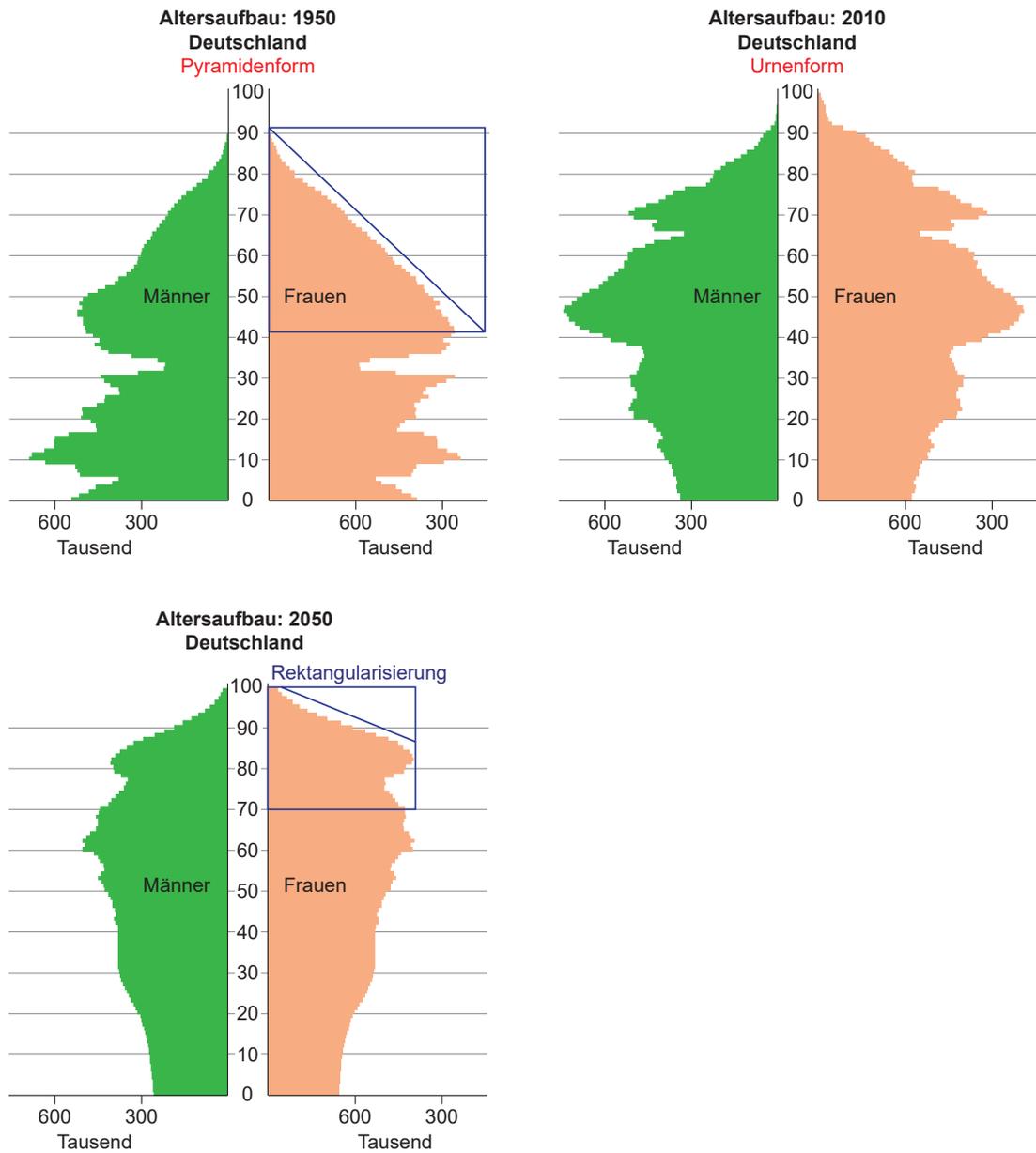


Abb. 1.1 Altersaufbau in Deutschland [L231]

## Immigration

Die **Zuwanderung von Menschen aus anderen Ländern** wird als Immigration bezeichnet. Die Immigration hat die Folgen des demografischen Alterns in Deutschland teilweise kompensiert. Migranten werden durch die Veränderung vor die Herausforderung der **Akkulturation, also des Hineinwachsens in eine fremde Gesellschaft** gestellt. Hierbei werden vier verschiedene Akkulturationsstrategien unterschieden:

Die fremde Kultur wird **angenommen**

- und die eigene Kultur aufgeben: **Assimilation** (Anpassung).
- und die eigene Kultur beibehalten: **Integration** (Einfügen).

Die fremde Kultur wird **nicht angenommen**

- und die eigene Kultur wird aufgegeben: **Marginalisation** (Ausgrenzung).
- und die eigene Kultur wird beibehalten: **Separation** (Abgrenzung).

## KLINIK

**Healthy-Migrant-Effect** Dieser Begriff beschreibt das Phänomen, dass Immigranten eine niedrige Mortalität aufweisen als die Durchschnittsbevölkerung des Landes, in welches sie einwandern. Dies erscheint insbesondere dahingehend paradox, dass für Migranten eine sozioökonomische Deprivation im Vergleich zur Gesamtbevölkerung nachgewiesen ist. Eine solche korreliert gewöhnlich mit einer niedrigeren Lebenserwartung – jedoch nicht bei Migranten. Die gängigste Erklärung des Healthy-Migrant-Effekts beruht auf einer positiven Selektion besonders **belastbarer und gesunder Individuen**, welche die Hürden einer Migration überwinden.

## Demografische Transformation

Der geschichtliche Übergang von einer traditionellen Agrargesellschaft zur modernen Industriegesellschaft ging mit einer schrittweisen Veränderung der Sterbe- und Geburtenrate einher

(> Tab. 1.1). Es werden fünf Phasen unterschieden in deren Verlauf beide Werte im Wechsel sinken, beginnend mit der Sterblichkeit.

### MERKE

- **Demografische Transformation:** Der Wandel der **Bevölkerungsstruktur** im Rahmen von gesellschaftlichen Entwicklungsphasen, z. B. Geburtenrückgang.
- **Epidemiologische Transition:** Der Wandel der **Gesundheitsverhältnisse** ganzer Bevölkerungen im Rahmen von gesellschaftlichen Entwicklungsphasen, z. B. Abnahme der Infektionskrankheiten.

## Fourastié-Hypothese

Diese auch Drei-Sektoren-Hypothese genannte Theorie teilt die Wirtschaft in **drei Sektoren** ein. Durch den **technischen Fortschritt** werden die ersten beiden Sektoren immer weiter automatisiert, sodass der Personalbedarf hier zurückgeht und sich die Beschäftigung zunehmend auf die weniger technisierbaren Sektoren verteilt:

- **Primärer Sektor: Landwirtschaft;** dieser Sektor wurde als erster technisiert.
- **Sekundärer Sektor: Industrielle Produktion;** zweiter hoch automatisierter Sektor.
- **Tertiärer Sektor: Dienstleistungen;** schwer automatisierbar, deshalb wichtigster Beschäftigungssektor in modernen Gesellschaften.

Aufgrund des Zutreffens der Voraussagen der in den 1930er-Jahren aufgestellten Hypothese gilt diese inzwischen als erwiesen. Entsprechend des hohen Zuwachses der Beschäftigung im Informationssektor wird dieser mitunter als vierter Sektor bezeichnet.

## Gini-Koeffizient

Der nach seinem Erfinder, dem italienischen Statistiker Corrado Gini, benannte **Gini-Index** oder -Koeffizient beschreibt die Ungleichverteilung von Einkommen in einer Gesellschaft. Er kann Werte von 0 (alle verdienen exakt das Gleiche) bis 1 (eine Person verdient alles) annehmen, welche mitunter auch als Prozente angegeben werden. Innerhalb der Länder der OECD rangiert der **Gini-Koeffizient** zwischen 0,22 (Slowakei) und 0,62 (Südafrika), wobei Deutschland einen mittleren Rang mit 0,29 einnimmt.

## 1.2.2 Epidemiologie

Die **Epidemiologie** ist eine wissenschaftliche Disziplin, die sich mit dem **Vorkommen und den Ursachen und Folgen von gesundheitlichen Zuständen** beschäftigt. Da aus Untersuchungen in diesem Gebiet meist für eine größere Gruppe von Personen allgemeine Aussagen abgeleitet werden sollen und nur eine kleinere Stichprobe untersucht wird, hat die Epidemiologie große Überschneidungsbereiche mit der (Inferenz-)Statistik. Wesentliche Begriffe der Epidemiologie sind:

- Die **Inzidenz** ist die Anzahl der Neuerkrankungen in einer Bevölkerungsgruppe in einem definierten Zeitraum.
- Die **Prävalenz** bezeichnet die Anzahl der bereits an einer bestimmten Krankheit leidenden Personen in einer Bevölkerungsgruppe zu einem definierten Zeitpunkt (Punktprävalenz) oder in einem Zeitraum (Periodenprävalenz). Für Krankheiten, die nicht lange andauern, ist eine Periodenprävalenz aussagekräftiger.
- Die **Letalität** ist die Anzahl der in einem bestimmten Zeitraum Verstorbenen, die eine bestimmte Krankheit besaßen.

### MERKE

- **Morbidität** beschreibt die Krankheitshäufigkeit in einer bestimmten Bevölkerungsgruppe und bildet somit einen Überbegriff für Inzidenz und Prävalenz.
- **Mortalität** bezeichnet die Todesfälle (Sterbefälle) einer bestimmten Bevölkerungsgruppe und stellt somit einen Überbegriff für die Letalität dar, die nur die Todesfälle der Erkrankten darstellt.

In > Tab. 1.2 werden die häufigsten Todesursachen in Deutschland 2020 im Überblick dargestellt. Die SARS-CoV-2 Pandemie hat hier zu einer akuten Verschiebung geführt, in deren Folge bei den Frauen das Pankreaskarzinom und bei den Männern die Pneumonie auf Platz 11 verdrängt wurden.

### CHECK-UP

- Wie hat das doppelte Altern die Demografie in Deutschland beeinflusst?
- Um wie viel steigt die Lebenserwartung in Deutschland im Jahr gegenwärtig an?
- Worin liegt der Unterschied zwischen Integration und Assimilation?
- Was ist der Unterschied zwischen demografischer Transformation und epidemiologischer Transition?
- Nenne ein Beispiel für jeden Sektor nach der Fourastié-Hypothese?
- Was ist der Unterschied zwischen Inzidenz und Prävalenz?

Tab. 1.1 Demografische Transformation

Phase	Sterberate	Geburtenrate	Merkmale
Prätransformativ Phase	Hoch	Hoch	Agrargesellschaft (bis ca. 1860)
Frühtransformativ Phase	Sinkt	Gleichbleibend (hoch)	Frühindustriell (bis ca. 1900)
Umschwungphase	Gleichbleibend (niedrig)	Sinkt	Industrialisierung (bis ca. 1945)
Spättransformativ Phase	Gleichbleibend (niedrig)	Gleichbleibend (niedrig)	Industrielle Gesellschaft (bis ca. 1980)
Posttransformativ Phase	Gleichbleibend (niedrig)	Gleichbleibend (niedrig)	Postindustrielle Gesellschaft (seit ca. 1980)

Tab. 1.2 Häufigste zehn Todesursachen in Deutschland 2020 (gemäß Statistischem Bundesamt)

Rang	Frauen	Männer
1	Chronische ischämische Herzkrankheit	Chronische ischämische Herzkrankheit
2	Nicht näher bezeichnete Demenz	Bösartige Neubildung der Bronchien und der Lunge
3	Herzinsuffizienz	Akuter Myokardinfarkt
4	COVID-19	COVID-19
5	Bösartige Neubildung der Brustdrüse	Sonstige chronische obstruktive Lungenkrankheit
6	Akuter Myokardinfarkt	Bösartige Neubildung der Prostata
7	Bösartige Neubildung der Bronchien und der Lunge	Nicht näher bezeichnete Demenz
8	Hypertensive Herzkrankheit	Herzinsuffizienz
9	Sonstige chronische obstruktive Lungenkrankheit	Sonstige ungenau oder nicht näher bezeichnete Todesursachen
10	Vorhofflattern und Vorhofflimmern	Bösartige Neubildung des Pankreas

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

- **Idealnorm:** wünschenswerter Sollwert. Beispiel: Die WHO (World Health Organisation) definiert Gesundheit als Zustand des vollkommenen körperlichen, seelischen und sozialen Wohlbefindens.
- **Funktionale Norm:** Die Fähigkeit einer Person, ihre Aufgaben und Verpflichtungen zu erfüllen, z. B. täglich acht Stunden konzentriert arbeiten zu können.
- **Statistische Norm:** Ein gewisser Bereich um den Durchschnittswert wird als „normal“ gedeutet. Abweichungen werden als „unterdurchschnittlich“ und „überdurchschnittlich“ bezeichnet, z. B. IQ-Werte für Ergebnisse eines Intelligenztests.
- **Therapeutische Norm:** beschränkt sich auf eine dichotome Einteilung in „Behandlung notwendig“ und „Behandlung nicht notwendig“, z. B. Normen für Blutdruckwerte der WHO.

#### MERKE

Bei der Festlegung therapeutischer Normen für physiologische Parameter wie Blutdruck geht es hauptsächlich um Risikosenkung für Folgekrankheiten.

- **Diagnostische Norm:** positives (betroffen) oder negatives (nicht betroffen) Ergebnis in einem Testverfahren, z. B. das Ergebnis eines HIV-Tests.

## 1.3 Normen

Raphael Kunisch



**Normen** sind entweder Regeln, Soll- oder Erwartungswerte. Wesentliche Normbegriffe sind:

- **Soziale Norm:** Allgemein anerkannte, als verbindlich geltende Regeln für das Zusammenleben von Menschen in der Gesellschaft. Abweichendes Verhalten wird von anderen Individuen negativ sanktioniert, z. B. die Regeln der Höflichkeit, wie das Grüßen der anderen Anwohner.

Die **Abweichung** von der sozialen Norm wird als **Devianz** bezeichnet. Dabei unterscheidet man zwischen primärer und sekundärer Devianz. Die primäre Devianz stellt die ursprüngliche Abweichung dar. Nach dieser primären Devianz kann eine negative Bewertung des sozialen Umfelds mit dazu beitragen, dass sich das gezeigte Verhalten verstärkt oder wiederholt. Dies bezeichnet man dann als **sekundäre Devianz**. Beispiel: Eine depressive Person, die sich aus ihren sozialen Kreisen zurückzieht, wird daraufhin von den Personen aus diesen Kreisen kritisiert. Dies bewirkt eine Verstärkung der Isolation.

### 1.3.1 Diagnostische Klassifikationssysteme

Zur Entscheidung, welche Diagnose endgültig vergeben werden soll, können **diagnostische Klassifikationssysteme** eine wesentliche Hilfe darstellen. Sie führen detailliert auf, welche **Symptome und operationalisierten Kriterien** vorliegen müssen, damit von einer bestimmten Erkrankung gesprochen werden kann. Sie ermöglichen des Weiteren

- eine größere **Übereinstimmung in der Diagnose** (höhere Reliabilität) zwischen Ärzten,
- eine Erleichterung bei der **Dokumentation der Diagnose**,
- eine **präzisere Kommunikation der Diagnose**, Kollegen und dem Patienten gegenüber,
- eine bessere **Vergleichbarkeit von Patientengruppen** sowie
- die Ableitung von **Therapieempfehlungen**.

## ICD

Die **internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme (ICD)**, International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems) wird von der WHO herausgegeben und gilt als **eines der wichtigsten diagnostischen Klassifikationssysteme für physische und psychische Erkrankungen** weltweit. Seit 2021 ist die elfte Version in Kraft getreten: ICD-11 – wobei bis zum Jahr 2026 übergangsweise laut WHO noch nach ICD-10 berichtet werden kann. Die deutsche Version des ICD-10-GM (German Modification) ist aktuell bis auf Weiteres in Deutschland innerhalb der **ambulanten und stationären Versorgung** zur Verschlüsselung gegenüber den Krankenkassen anzuwenden.

## DSM

Das **diagnostische und statistische Handbuch psychischer Störungen (DSM)**, Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders) ist ein Pendant zum ICD, das aus den USA stammt. Aufgrund seiner noch strikteren Definition von Kriterien, dem Wunsch nach internationaler Vergleichbarkeit von Studien und der Dominanz der englischen Sprache in der Forschung, wird es auch in Deutschland für medizinische und psychologische Studien angewandt. Im Vergleich zum ICD beschränkt sich das DSM auf mentale Erkrankungen. Im Jahr 2013 erschien mit dem DSM-5 die bislang aktuelle Version.

## ICF

Die **internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit, Behinderung und Gesundheit (ICF)**, International Classification of Functioning, Disability and Health) stammt von der WHO und wird zusätzlich zu den diagnostischen Klassifikationssystemen oft zur **Bewertung des funktionellen Niveaus** von Patienten verwendet. Es handelt sich um eine Idealnorm, die Personen komplett erfüllen müssen, um als „gesund“ zu gelten. Die drei Bereiche sind:

- **Körperfunktion und -struktur:** bedarf funktioneller und struktureller Unversehrtheit
- **Aktivität:** Leistungsfähigkeit aus individueller Perspektive
- **Partizipation (Teilhabe):** Leistungsfähigkeit aus gesellschaftlicher Perspektive

Zur gesamtheitlichen Betrachtung werden als Kontextfaktoren auch **Umweltfaktoren** und **personenbezogene Faktoren** aus dem Leben berücksichtigt.

### MERKE

Die tatsächliche Diagnose ist keine Komponente der ICF.

### CHECK-UP

- Definiere sekundäre Devianz.
- Was ist der Unterschied zwischen Idealnorm und statistischer Norm?
- Welche Vorteile bieten diagnostische Klassifikationssysteme?
- In welchen Sektoren der Gesundheitsversorgung kommt die ICD-10 zum Einsatz?
- In welchen Bereichen beurteilt die ICF das Funktionsniveau des Patienten?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

---

**Jetzt bist du dran!**

---

**Zeichenaufgabe**

Zeichne eine aktuelle Alterspyramide. Welche Kenngrößen beschreiben das Wachstum? Wie wirken sich demografische Transformationen auf die Bevölkerungsstruktur aus?

Erstelle eine Tabelle mit den verschiedenen Theorien des Alterns.

Welche Begriffe beschreiben den sozialen Status? Wie hängen Sozialstatus und Krankheit zusammen? Erkläre die angewandten Hypothesen mithilfe einer Mindmap.

**Anregungen zur weiteren Wiederholung**

Schreibe dir in einer Tabelle die Unterschiede der verschiedenen Klassifikationssysteme auf. Wann kommt welches zum Einsatz?

**Überblick gewinnen**

Nutze deine gesammelten Stichwörter für eine Mindmap oder eine gegliederte Stichwortliste.

---

Thomas Wenisch

## Vorklinik Finale 2

# Atome und Naturgesetze

1. Auflage

**Unter Verwendung von Inhalten von:**

Oliver Adolph, Björn Jacobi



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Struktur der Materie</b> .....	1	4.3	Materie im elektrischen Feld .....	28
1.1	Makroskopische Erscheinungsformen der Materie .....	1	4.4	Elektrischer Strom .....	29
1.2	Aufbau und Eigenschaften der Materie .....	2	4.5	Ohm-Gesetz, Ohm-Widerstand .....	30
<b>2</b>	<b>Mineralstoffe und Spurenelemente</b> .....	11	4.6	Elektrische Leistung .....	31
2.1	Biochemisch wichtige Elemente .....	11	4.7	Messung von Strom, Spannung und Widerstand .....	31
2.2	Mineralstoffe .....	11	4.8	Elektrische Kapazität .....	33
2.3	Spurenelemente .....	12	4.9	Elektrizitätsleitung .....	34
<b>3</b>	<b>Wärmelehre</b> .....	17	4.10	Elektrische Spannungen an Grenzflächen, Diffusionsspannungen .....	35
3.1	Temperatur .....	17	4.11	Magnetische Größen .....	35
3.2	Temperaturabhängige Stoffeigenschaften .....	17	4.12	Wechselspannung, Wechselstrom .....	38
3.3	Wärme, Wärmekapazität .....	18	4.13	Elektrische Phänomene an Zellen .....	39
3.4	Thermodynamische Systeme .....	19	<b>5</b>	<b>Ionisierende Strahlung</b> .....	43
3.5	Gaszustand .....	20	5.1	Einteilung .....	43
3.6	Änderung des Aggregatzustands .....	22	5.2	Radioaktivität .....	43
3.7	Wärmetransport .....	23	5.3	Röntgenstrahlung .....	46
3.8	Stoffgemische .....	24	5.4	Strahlendosis .....	47
<b>4</b>	<b>Elektrizität und Magnetismus</b> .....	27	5.5	Strahlenwirkungen .....	48
4.1	Ladung, elektrisches Feld .....	27		<b>Register</b> .....	50
4.2	Elektrisches Potenzial, elektrische Spannung .....	28			

# 1

## Struktur der Materie

### 1.1 Makroskopische Erscheinungsformen der Materie

Thomas Wenisch

Biochemie, Chemie, Physik

Materie kann in verschiedenen Aggregatzuständen vorliegen (> Kap. 1.2) sowie in reiner Form oder als Stoffgemisch (> Kap. 1.3). Reine Stoffe werden wiederum unterteilt in solche, die aus einem einzigen chemischen Element bestehen, und Verbindungen aus mehreren Elementen.

#### 1.1.1 Aggregatzustände

In der Umwelt erscheint die Materie in verschiedenen Aggregatzuständen:

- **Fest:** Die Bausteine eines Festkörpers befinden sich zueinander in einer festgelegten Anordnung. Der Körper nimmt eine definierte Form ein, die er nur unter dem Einfluss äußerer Kräfte ändert. Es kann unterschieden werden zwischen **kristallinen** Festkörpern, die eine regelmäßige Kristallstruktur aufweisen, und **amorphen** Substanzen, in denen diese feste Ordnung nicht vorliegt.
- **Flüssig:** Die Teilchen einer Flüssigkeit werden durch **Kohäsionskräfte** zu einem Verband zusammengehalten. Sie sind jedoch gegeneinander verschiebbar. Die Flüssigkeit passt sich der Form eines äußeren Behältnisses an.
- **Gasförmig:** In einem Gas sind die einzelnen Teilchen weit voneinander entfernt. Das Gas füllt jeden ihm zur Verfügung stehenden Raum vollständig aus. Anziehungskräfte zwischen den Gasteilchen können in den meisten Fällen als vernachlässigbar betrachtet werden. Man spricht dann von einem **idealen Gas**.

Die Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig werden auch als **Phase** eines Stoffes bezeichnet. Eine Phase ist ein Bereich, in dem

sich die Stoffeigenschaften nicht sprunghaft ändern. Der Begriff ist nicht mit dem des Aggregatzustands gleichzusetzen. So bilden nicht mischbare Flüssigkeiten, wie z. B. Öl und Wasser, zwei voneinander getrennte flüssige Phasen.

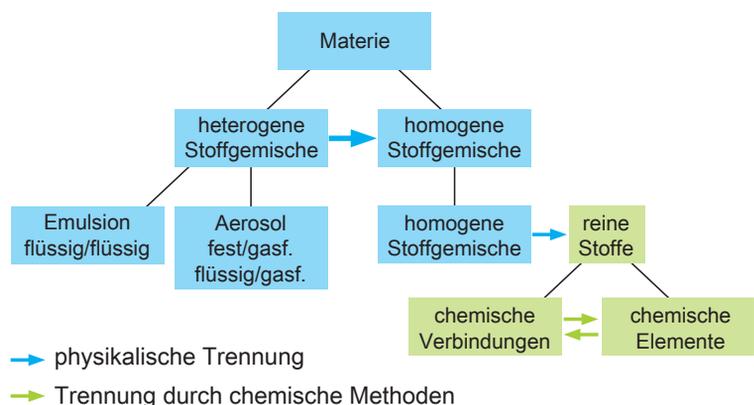
Jede Änderung des Aggregatzustands ist mit einer **Änderung der inneren Energie** verbunden: Beim Schmelzen muss die Kristallstruktur eines Stoffes aufgebrochen werden. Beim Verdampfen einer Flüssigkeit wird Arbeit gegen zwischenmolekulare Anziehungskräfte geleistet. Es muss deshalb ein für den jeweiligen Stoff spezifischer Energiebetrag, seine **Schmelzwärme bzw. Verdampfungswärme**, aufgebracht werden, um den Aggregatzustand zu ändern. Beim Kondensieren oder Erstarren wird diese Bindungsenergie als Kondensationswärme bzw. Erstarrungswärme wieder freigesetzt.

#### 1.1.2 Stoffgemische

Die Materie liegt häufig nicht als einzelner reiner Stoff vor, sondern in Form von **Stoffgemischen**. Eine Übersicht über die Einteilung der Materie in Stoffe bzw. Stoffgemische gibt > Abb. 1.1.

Es wird zwischen homogenen und heterogenen Gemischen unterschieden.

- In einem **heterogenen** Gemisch treten mehrere Phasen auf, z. B. Festkörper und Flüssigkeit oder auch zwei flüssige Phasen.
  - Ein Gemisch zweier flüssiger Phasen, z. B. Wasser und Öl, wird als **Emulsion** bezeichnet. Im Alltag begegnen uns Emulsionen als Creme, Salbe oder Milch.
  - Ein **Aerosol** ist fest-gasförmig oder flüssig-gasförmig. Nebel ist ein Aerosol, hier schweben kleine Flüssigkeitströpfchen in einem Gas. Auch Staub bildet, wenn er in der Luft verwirbelt wird, ein Aerosol.
- In einem **homogenen** Gemisch tritt nur eine Phase auf. Beispiele sind die Legierungen von Metallen, mischbare Flüssigkeiten wie Wasser und Alkohol oder die Gasmischung der Luft.



**Abb. 1.1** Einteilung der Materie. Die in Blau gekennzeichneten Trennungen erfolgen mit physikalischen Verfahren, die in Grün gekennzeichneten Übergänge mit chemischen Methoden. [L253]

- Ein **Eis/Wasser**-Gemisch ist nach dieser Definition, obwohl es sich nur um einen Stoff in verschiedenen Aggregatzuständen handelt, ebenfalls ein heterogenes Gemisch, denn es treten verschiedene Phasen des Wassers nebeneinander auf.
- Die Definition, ob ein System als homogen oder als heterogen bezeichnet wird, hängt auch von der **Teilchengröße** ab.
- Im Falle von Lösungen wird das System bei kleinen, niedermolekularen Teilchen mit einem Durchmesser von weniger als 3 nm als **echte Lösung** bezeichnet. Hier handelt es sich um ein homogenes System.
- Bei Teilchengrößen von etwa 3–200 nm werden die Begriffe **kolloidale Lösung** oder **kolloid-dispers** verwendet. Das Verhalten kolloid-disperser Lösungen ist verschieden von dem echter Lösungen. Es ist umstritten, ob eine kolloidale Lösung als homogen oder als heterogen einzustufen ist.
- Wenn die Teilchen im Lichtmikroskop sichtbar sind, d. h. bei Teilchengrößen über 200 nm, wird das System als heterogen eingestuft. Ein solches Gemisch wird als **grob-dispers** oder als **Suspension** bezeichnet. Ein Beispiel für eine Suspension sind Zellen in einer Nährlösung oder auch das menschliche Blut.

Ein Stoffgemisch lässt sich durch physikalische Methoden in seine Bestandteile trennen (> Abb. 1.1). Es liegen dann reine Stoffe vor. Ein **reiner Stoff** hat definierte physikalische Eigenschaften, wie Dichte, Schmelzpunkt, Brechungsindex usw. Die Eigenschaften eines **Stoffgemischs** sind dagegen nicht exakt definiert, sie hängen vom Mischungsverhältnis der Einzelbestandteile ab.

Bei dem reinen Stoff kann es sich um ein **chemisches Element** handeln. Er besteht dann nur aus einer einzigen Sorte von Atomen. Dagegen sind bei einer **chemischen Verbindung** die Bausteine des Stoffs Moleküle, die wiederum aus mehreren verschiedenartigen Atomen bestehen.

**Jetzt bist du dran!**

**Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

**1.2 Aufbau und Eigenschaften der Materie**

Thomas Wenisch



Die Einteilung in anorganische und organische Verbindungen geht auf die historische Annahme zurück, zwischen den im Reagenzglas herstellbaren anorganischen Stoffen und den organischen Substanzen, die ein lebender Organismus produziert, bestehe ein prinzipieller, grundsätzlich unüberbrückbarer Unterschied. Der historische Sprachgebrauch wurde beibehalten.

**1.2.1 Das Atom**

Die Grundbausteine der Materie, die mit chemischen Methoden nicht weiter zerlegt werden können, sind die **Atome** (von griech. atomos = unteilbar).

Heute ist bekannt, dass das Atom aus noch kleineren **Elementarteilchen** besteht: aus **Neutronen, Protonen und Elektronen** (> Tab. 1.1). Protonen und Elektronen sind elektrisch geladen. Sie tragen die **Elementarladung**  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb (C). Dies ist der kleinste mögliche Betrag einer elektrischen Ladung.

Proton und Neutron haben ungefähr die gleiche Masse. Sie sind etwa 2000-mal schwerer als das Elektron ( $m_p/m_e = 1836$ ). Die moderne Teilchenphysik zeigt, dass Protonen und Neutronen aus weiteren subatomaren Teilchen aufgebaut sind, darauf soll aber hier nicht weiter eingegangen werden.

**Tab. 1.1** Bausteine des Atoms

	Ladung/C	Masse/kg
Elektron	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	$9,1093897 \cdot 10^{-31} \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$
Proton	$+1,6 \cdot 10^{-19}$	$1,6726231 \cdot 10^{-27} \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$
Neutron	0	$1,6749286 \cdot 10^{-27} \approx 1,67 \cdot 10^{-27}$

**MERKE**

Für das Verständnis der Chemie wichtig sind nur die Elementarteilchen Neutronen, Protonen und Elektronen:

- Die positiv geladenen **Protonen** und die elektrisch neutralen **Neutronen** bilden den Kern des Atoms. Sie werden deshalb auch als **Nukleonen** (Kernteilchen) bezeichnet.
- Der Atomkern ist von der Hülle aus negativ geladenen **Elektronen** umgeben. Chemische Reaktionen beruhen auf Wechselwirkungen in den Elektronenhüllen der beteiligten Stoffe.

Auf die Struktur der Elektronenhülle wird deshalb in > Kap. 1.2.3 noch näher eingegangen.

**MERKE**

Jedes Atom hat das Bestreben, nach außen hin elektrisch neutral zu sein. In der Elektronenhülle befinden sich deshalb genauso viele Elektronen wie Protonen im Kern des Atoms.

Ist die Ladungsbilanz des Atoms nicht ausgeglichen, wird das nun elektrisch geladene Atom als **Ion** bezeichnet. Ein **Kation** ist ein positiv geladenes Ion, hier fehlen Elektronen in der Elektronenhülle. Ein **Anion** ist negativ geladen. Bei ihm befinden sich mehr Elektronen in der Hülle als Protonen im Kern.

Ein durch eine bestimmte Protonenzahl und Nukleonenzahl festgelegtes Atom wird als **Nuklid** bezeichnet. Die Schreibweise für ein Nuklid lautet:



- Die chemischen Eigenschaften eines Atoms werden durch die Anzahl der Protonen im Kern festgelegt. Nach ihrer **Protonenzahl p** werden die Elemente im Periodensystem (> Kap. 1.2.4) aufsteigend angeordnet. Deshalb wird diese Zahl auch als **Ordnungszahl** (auch: **Kernladungszahl**) **Z** eines Elements bezeichnet. Da jedes chemische Element durch ein eigenes Elementsymbol beschrieben wird, kann auf die zusätzliche Angabe der Ordnungszahl auch verzichtet werden: <sup>Massenzahl</sup>Elementsymbol

- Nahezu die gesamte Masse des Atoms ist in seinem Kern konzentriert. Die **Nukleonenzahl**, d. h. die Summe der Anzahl von Protonen und Neutronen, ist die **Massenzahl**  $m$  eines Elements.
- Die **Neutronenzahl** eines Nuklids lässt sich aus der Differenz zwischen Massenzahl und Ordnungszahl ermitteln. Beispielsweise steht Eisen (Fe) im Periodensystem an 26. Stelle.  $^{56}\text{Fe}$  hat demnach  $56 - 26 = 30$  Neutronen.

Die Massenzahlen  $m$  sind angegeben als **relative Atommassen** in der atomaren Masseneinheit  $u$  (für unit = Einheit; in der Literatur wird manchmal auch amu genannt, für atomar mass unit).

Eine **atomare Masseneinheit (1 u)** entspricht  $1/12$  der Masse eines Kohlenstoff-12-Atoms ( $1,66 \cdot 10^{-24}$  g).

Die **relative Molekülmasse** ist gleich der Summe der relativen Atommassen der an der Bildung des Moleküls beteiligten Atome.

### MERKE

In der Chemie werden **Stoffmengen in Mol** angegeben. Ein Mol eines Stoffs enthält unabhängig von seinen sonstigen Eigenschaften immer eine festgelegte Teilchenzahl von

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$$

$N_A$  ist die **Avogadro-Zahl** (Einheit: Teilchen/mol).

Die Masse von 1 Mol eines Stoffs, angegeben in Gramm, entspricht der relativen Atommasse bzw., bei einer Verbindung, der relativen Molekülmasse in atomaren Masseneinheiten  $u$ .

## 1.2.2 Isotope

Die Stoffeigenschaften eines Elements werden durch seine Ordnungszahl, d. h. durch die Zahl seiner Protonen, festgelegt. Bei gleicher Kernladungszahl sind aber mehrere Nuklide möglich, die sich in ihrer Neutronenzahl unterscheiden. Dies sind die **Isotope** eines Elements. Beispiele für Isotope biologisch wichtiger Elemente zeigt > Tab. 1.2.

Nur der Kern des häufigsten Isotops des einfachsten chemischen Elements, Wasserstoff,  $^1\text{H}$ , besteht aus einem einzigen Proton. Die Kerne aller anderen Nuklide enthalten Neutronen, die die positiven Ladungen der Protonen gegeneinander abschirmen. Bei

**Tab. 1.2** Beispiele einiger Elemente und ihrer Isotope mit Elementsymbol, Ordnungszahl  $Z$  und relativer Atommasse (die mit \* gekennzeichneten Isotope sind radioaktiv)

Element	Symbol	Z	Atommasse	Isotope
Wasserstoff	H	1	1,008	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{H}^*$
Kohlenstoff	C	6	12,011	$^{11}\text{C}^*$ , $^{12}\text{C}$ , $^{13}\text{C}$ , $^{14}\text{C}^*$
Stickstoff	N	7	14,007	$^{13}\text{N}^*$ , $^{14}\text{N}$ , $^{15}\text{N}$
Sauerstoff	O	8	15,999	$^{16}\text{O}$ , $^{17}\text{O}$ , $^{18}\text{O}$
Natrium	Na	11	22,990	$^{23}\text{Na}$ , $^{24}\text{Na}^*$
Magnesium	Mg	12	24,305	$^{24}\text{Mg}$ , $^{25}\text{Mg}$ , $^{26}\text{Mg}$
Phosphor	P	15	30,974	$^{31}\text{P}$ , $^{32}\text{P}^*$
Schwefel	S	16	32,066	$^{32}\text{S}$ , $^{33}\text{S}$ , $^{34}\text{S}$ , $^{35}\text{S}^*$ , $^{36}\text{S}$
Chlor	Cl	17	35,453	$^{35}\text{Cl}$ , $^{37}\text{Cl}$
Kalium	K	19	39,102	$^{39}\text{K}$ , $^{40}\text{K}^*$ , $^{41}\text{K}$ , $^{42}\text{K}^*$
Calcium	Ca	20	40,08	$^{40}\text{Ca}$ , $^{45}\text{Ca}^*$ , $^{47}\text{Ca}^*$
Eisen	Fe	26	55,847	$^{55}\text{Fe}^*$ , $^{56}\text{Fe}$ , $^{59}\text{Fe}^*$
Cobalt	Co	27	58,932	$^{58}\text{Co}^*$ , $^{59}\text{Co}$ , $^{60}\text{Co}^*$
Iod	I	53	126,904	$^{125}\text{I}^*$ , $^{127}\text{I}$ , $^{131}\text{I}^*$
Uran	U	92	238,029	$^{235}\text{U}^*$ , $^{238}\text{U}^*$

**Tab. 1.3** Einige in Medizin und Biochemie verwendete Radionuklide, ihre Halbwertszeit ( $t_{1/2}$ ), die Art der Strahlung und ihre Anwendung

Isotop	$t_{1/2}^*$	Strahlung	Anwendung
$^3\text{H}$	12,3 a	$\beta$	Tracer
$^{14}\text{C}$	5730 a	$\beta$	Tracer
$^{32}\text{P}$	14,3 d	$\beta$	Tracer, Strahlentherapie (Knochen)
$^{35}\text{S}$	87 d	$\beta$	Tracer, Tumordiagnostik
$^{60}\text{Co}$	6,2 a	$\beta$ , $\gamma$	Strahlentherapie
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 h	$\gamma$	Diagnostik (breite Anwendung)
$^{123}\text{I}$	13 h	$\gamma$	Radiojodtest (Schilddrüse)
$^{125}\text{I}$	60 d	$\gamma$	Tracer für Proteine (in vitro)
$^{131}\text{I}$	8 d	$\beta$ , $\gamma$	Radiojodtherapie (Schilddrüse)
$^{226}\text{Ra}$	1622 a	$\alpha$	Strahlentherapie

\* a = Jahre, d = Tage, h = Stunden

den meisten Nukliden liegt die Neutronenzahl etwa im Bereich des 1- bis 1,5-Fachen der Protonenzahl (> Tab. 1.2). Hat ein Nuklid zu viele oder zu wenig Protonen, ist es instabil. Es wandelt sich spontan in ein anderes Nuklid um; es ist **radioaktiv**.

- Von den meisten Elementen treten natürlicherweise stabile und auch radioaktive Isotope auf. Die meisten Elemente sind daher Isotopengemische, man spricht auch von **Mischelementen**. Die in > Tab. 1.2 angegebenen Atommassen geben die durchschnittliche relative Atommasse des Isotopengemischs an.
- Von etwa 20 Elementen wird in der Natur nur ein einziges Isotop beobachtet. Diese Elemente werden als **Reinelemente** bezeichnet. Dazu zählen Fluor, Natrium, Phosphor und Arsen.
- Durch Kernreaktionen lassen sich künstlich radioaktive Isotope erzeugen, die in der Natur nicht oder nicht mehr vorkommen.

### MERKE

**Lerntipp:** Die Massenzahl steht in der Schreibweise des Nuklids oben, Ordnungszahl unten vor dem Elementsymbol. „M“ steht im Alphabet ja auch über „O“. Prüfe dir ein, dass die Ordnungszahl eines Elements festgelegt ist, während verschiedene Isotope eines Elements unterschiedliche Massenzahlen haben.

### KLINIK

Radioaktive Isotope sind ein wichtiges Hilfsmittel in Medizin und Biochemie (> Tab. 1.3). Der Stoffwechsel des Organismus verwendet das Radionuklid wie jedes andere Isotop des jeweiligen Elements. Um Stoffwechselwege zu verfolgen, werden **radioaktive Tracer** verwendet, deren Strahlung sich von außen messen lässt.

In der Nuklearmedizin wird gerne  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  wegen seiner günstigen Strahlungseigenschaften eingesetzt. Radium und Cobalt dienen vorwiegend als Strahlungsquellen für die Strahlentherapie.

## 1.2.3 Elektronenhülle

Die Vorgänge im Atomkern lassen sich durch chemische Methoden nicht beeinflussen. Umso wichtiger ist der Aufbau der Elektronenhülle für das Verständnis der Chemie. Die Anordnung der Elektronen entscheidet, welche Bindungen ein Element eingeht und wie stabil die entstandenen Verbindungen sind.

Das **Bohr-Atommodell** geht von einer Vorstellung aus, nach der sich die Elektronen auf Bahnen um den Atomkern ähnlich wie Planeten um eine Sonne bewegen. Dieses Modell kann jedoch für

das tiefere Verständnis nicht aufrechterhalten werden. Das Verhalten der Elektronen lässt sich erst mit der **Quantenmechanik** nachvollziehen, deren Resultate aber z. T. recht komplex sind und oft keine einfache bildhafte Vorstellung liefern. Das Atommodell, das heute für die Chemie zugrunde gelegt wird und die Eigenschaften der Elektronenhülle am zutreffendsten beschreibt, ist das **Orbitalmodell**.

Das Elektron wird darin nicht mehr als Teilchen betrachtet, sondern als „Wellenpaket“. Die Position des Elektrons lässt sich nicht genau bestimmen oder voraussagen, sondern es wird von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten gesprochen. Für jedes Elektron lässt sich ein Bereich in der Umgebung des Atomkerns angeben, in dem das Elektron mit hoher Wahrscheinlichkeit anzutreffen ist. Dieser Bereich wird **Orbital** genannt.

➤ Abb. 1.2, ➤ Abb. 1.3 und ➤ Abb. 1.4 zeigen die Form und die räumliche Anordnung der Atomorbitale.

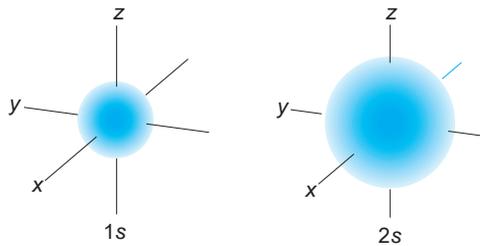


Abb. 1.2 Formen des 1s- und des 2s-Orbitale [L253]

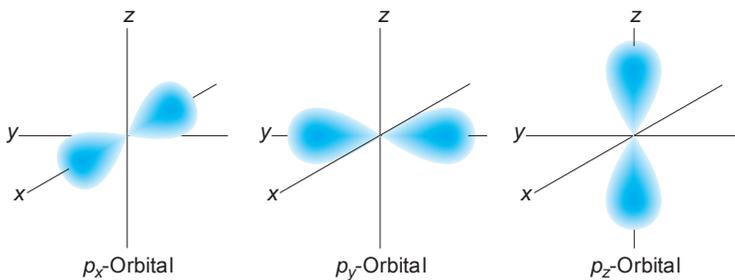


Abb. 1.3 Formen der p-Orbitale [L253]

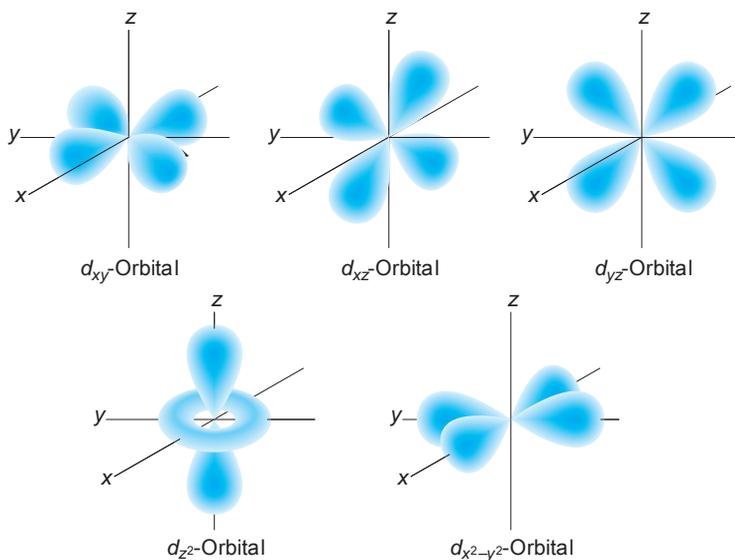


Abb. 1.4 Formen der d-Orbitale [L253]

## Quantenzahlen

Welches Orbital von einem Elektron besetzt wird und in welcher Entfernung zum Kern sich das Orbital befindet, hängt vom Energieniveau des Elektrons ab.

Der Zustand eines Hüllenelektrons wird durch 4 Quantenzahlen beschrieben:

### Hauptquantenzahl $n$

Die Hauptquantenzahl  $n$  nimmt Werte von 1, 2, 3, ...,  $n$  an. Sie gibt das „**Hauptenergieniveau**“ an und entspricht dem Abstand der Elektronenbahn zum Kern im Bohr-Atommodell. Obwohl sich die Elektronen nicht im klassischen Sinne auf Bahnen oder auf konzentrischen Kugelschalen bewegen, wurde der historisch etablierte Begriff der **Elektronenschale** im Sprachgebrauch der Chemie beibehalten.

Die Schalen werden mit fortlaufenden Buchstaben bezeichnet, beginnend mit  $K$ . Die innerste, dem Atomkern am nächsten liegende Schale ist die  $K$ -Schale, ihre Elektronen tragen die Hauptquantenzahl  $n = 1$ . Als Nächstes folgt die  $L$ -Schale, die der Hauptquantenzahl 2 entspricht.

Bei den schwersten bekannten Elementen befinden sich die äußersten Elektronen auf der 7. Schale.

### MERKE

Du kannst dir die Reihenfolge der Buchstaben der ersten Schalen gut einprägen, wenn du an die Airline „KLM“ denkst.

### Nebenquantenzahl $l$

Die Nebenquantenzahl  $l$  unterteilt das durch die Hauptquantenzahl angegebene Energieniveau noch weiter. Die Nebenquantenzahl kann Werte von  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$  annehmen.

Die Nebenquantenzahl gibt die **Art des Orbitals** an. Es existieren verschiedene Arten von Orbitalen, die sich in ihrer räumlichen Konfiguration unterscheiden:

- $l = 0$  entspricht dem **s-Orbital**. Eine Berechnung der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten für dieses Orbital ergibt eine kugelförmige räumliche Anordnung. > Abb. 1.2 zeigt das  $1s$ - ( $n = 1, l = 0$ ) und das  $2s$ -Orbital ( $n = 2, l = 0$ ). Mit steigender Hauptquantenzahl sind die Elektronen im Mittel weiter vom Atomkern entfernt.
- Das zu  $l = 1$  gehörende Orbital wird **p-Orbital** genannt. Die Elektronenverteilung im  $p$ -Orbital ist nicht mehr kugelförmig. Es ergeben sich zwei getrennte Bereiche, zwischen denen der Atomkern liegt (> Abb. 1.3).
- $l = 2$  kennzeichnet ein **d-Orbital** (> Abb. 1.4).
- Zu  $l = 3$  gehört das **f-Orbital**. Dessen Form ist noch komplexer, sodass auf eine Bilddarstellung hier verzichtet wird.

### MERKE

Die Reihenfolge der Orbitale kannst du dir leicht merken, indem du an eine der großen Volksparteien in Deutschland (spd) bzw. ein weitverbreitetes Dokumentformat (pdf) denkst – selbstverständlich soll hiermit für beides keine Werbung gemacht werden.

### Magnetquantenzahl $m$

Die magnetische Quantenzahl  $m$  bildet eine weitere **Aufspaltung der Unterniveaus**. Sie nimmt Werte zwischen  $+l$  und  $-l$  an:  $m = -l, -(l-1), \dots, -1, 0, +1, \dots, (l-1), l$ . Insgesamt sind für  $m$   $2l+1$  verschiedene Werte möglich.

- Für die 1. Schale ( $n = 1$ ) ist  $l = 0$ , und  $m$  kann nur den Wert 0 annehmen. Die Kombination  $l = 0$  und  $m = 0$  steht für das  $s$ -Orbital der durch die jeweilige Hauptquantenzahl  $n$  angegebenen Schale.
- Für die 2. Schale ( $n = 2$ ) kann  $l$  den Wert 0 oder 1 annehmen.
  - Für  $l = 0$  ist auch wieder  $m = 0$ . Dies kennzeichnet das  $s$ -Orbital der 2. Elektronenschale (> Abb. 1.2).
  - Für  $l = 1$  kann  $m$  die Werte  $-1, 0$  oder  $+1$  annehmen.  $l = 1$  kennzeichnet ein  $p$ -Orbital. Es existieren  $3 p$ -Orbitale, die sich in ihrer räumlichen Ausrichtung unterscheiden (> Abb. 1.3). Die Lage des Orbitals wird durch die magnetische Quantenzahl  $m$  angegeben.

- In der 3. Schale nimmt für  $l = 2$  die Magnetquantenzahl die Werte  $-2, -1, 0, 1, 2$  an. Es existieren 5 im Raum verschieden ausgerichtete  $d$ -Orbitale (> Abb. 1.4).
- Ab der 4. Schale kommen durch  $m = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$  für  $l = 3$  noch 7 verschiedene  $f$ -Orbitale hinzu.

### Spinquantenzahl $s$

Die Spinquantenzahl  $s$  kann die Werte  $+\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$  annehmen. Jedes Orbital kann mit zwei Elektronen besetzt werden, die sich in ihrem Spin unterscheiden. Unter dem **Elektronenspin** wird die Orientierung des magnetischen Moments des Elektrons verstanden.

In einem klassischen Modell kann man sich das Elektron als rotierend vorstellen. Der Spin des Elektrons gibt dann die Richtung der Drehung an. Die beiden möglichen Werte der Spinquantenzahl entsprechen dann einer Rechts- bzw. Linksdrehung.

Grafisch wird die Orientierung des Spins oft durch einen Pfeil nach oben oder unten dargestellt. Entsprechend der Lage der Pfeilrichtungen wird bei zwei Elektronen dann von einem **parallelen oder antiparallelen Spin** gesprochen.

### MERKE

Niemals wirst du die Reihenfolge der vier Quantenzahlen vergessen, wenn du dir dazu als Eselsbrücke die Konsonanten aus „niemals“, also  $n, m, l$  und  $s$ , merken.

### Besetzungsregeln

Wolfgang Pauli formulierte 1924 das nach ihm benannte **Pauli-Prinzip**: Keine zwei Elektronen stimmen in allen 4 Quantenzahlen überein.

Anschaulich könnte man sich die Plätze in der Elektronenhülle nummeriert vorstellen, wie die Sitze in einem Theater. Es werden keine zwei Theaterkarten mit identischer Platznummer ausgegeben.

Aus den möglichen Kombinationen der Quantenzahlen lässt sich ableiten, dass in einer durch die Hauptquantenzahl  $n$  gegebenen Schale  $2n^2$  Elektronenplätze zur Verfügung stehen. Eine Übersicht der Bindungsplätze in den ersten 4 Schalen und den jeweiligen Orbitalen zeigt > Tab. 1.4.

Die **Elektronenkonfiguration** eines Elements wird in einer Schreibweise angegeben, bei der die Hauptquantenzahlen, die Orbitale und dahinter als Hochzahl die Zahl der im Orbital befindlichen Elektronen notiert werden. So besitzt das Element mit der

**Tab. 1.4** Aus den Quantenzahlen abgeleitete maximale Elektronenzahl in den ersten 4 Schalen und in den jeweiligen Unterniveaus

$n$	$l$	$m$	Spin	Maximale $e^-$ -Zahl	Maximale $e^-$ -Zahl pro Schale ( $2n^2$ )
1 (K-Schale)	0 (1s)	0	$\pm\frac{1}{2}$	2	2
2 (L-Schale)	0 (2s)	0	$\pm\frac{1}{2}$	2	8
	1 (2p)	+1, 0, -1	je $\pm\frac{1}{2}$	6	
3 (M-Schale)	0 (3s)	0	$\pm\frac{1}{2}$	2	18
	1 (3p)	+1, 0, -1	je $\pm\frac{1}{2}$	6	
	2 (3d)	+2, +1, 0, -1, -2	je $\pm\frac{1}{2}$	10	
4 (N-Schale)	0 (4s)	0	$\pm\frac{1}{2}$	2	32
	1 (4p)	+1, 0, -1	je $\pm\frac{1}{2}$	6	
	2 (4d)	+2, +1, 0, -1, -2	je $\pm\frac{1}{2}$	10	
	3 (4f)	+3, +2, +1, 0, -1, -2, -3	je $\pm\frac{1}{2}$	14	

Ordnungszahl 11, Natrium, 11 Elektronen in der Konfiguration  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ .

### MERKE

Nur die Elektronen auf der äußersten Schale sind an chemischen Bindungen beteiligt (z. B. das  $3s^1$ -Elektron im Fall von Natrium). Die Außenelektronen werden auch **Valenzelektronen** genannt.

Ein für das Atom energetisch besonders günstiger Zustand wird erreicht, wenn die äußere Schale mit 8 Valenzelektronen besetzt ist. Die Schale ist dann „abgeschlossen“. Dieser Zusammenhang ist auch unter dem Begriff **Oktettregel** bekannt. Der energetisch günstige Zustand ist natürlicherweise bei den Edelgasen gegeben. Die Besetzung der Außenschale mit 8 Valenzelektronen wird deshalb **Edelgaskonfiguration** genannt. Eine Ausnahme bildet die erste Schale, sie ist bereits mit 2 Elektronen vollständig besetzt. Dies ist bei Helium der Fall.

Die **Besetzung** der Energieniveaus der Elektronenhülle erfolgt – wenn sich das Atom im nicht angeregten Grundzustand befindet – nacheinander, beginnend mit dem energieärmsten Niveau, dem 1  $s$ -Orbital.

Es wird beobachtet, dass bei energetisch gleichwertigen Orbitalen, wie  $p_x$ ,  $p_y$  und  $p_z$ , diese zunächst einfach durch Elektronen mit zueinander parallelem Spin besetzt und erst dann mit einem zweiten Elektron aufgefüllt werden. Nach ihrem Entdecker wird diese Besetzungsreihenfolge als **Hund-Regel** bezeichnet.

- Es werden zunächst die  $s$ -, dann die  $p$ -Orbitale einer Schale besetzt. Eine Abweichung von der weiteren Reihenfolge zeigt sich bei den  $d$ - und  $f$ -Orbitalen. Die Energien der den Schalen zugeordneten Orbitale überlappen sich wie in  $\blacktriangleright$  Abb. 1.5 dargestellt. Das  $4s$ -Orbital hat eine geringere Energie als die  $3d$ -Orbitale. Bei der sukzessiven Besetzung der Elektronenplätze wird daher zunächst die 4. Schale begonnen und das dortige  $s$ -Orbital gefüllt, bevor die  $3d$ -Orbitale belegt werden.
- Ab der 4. Schale sind  $f$ -Orbitale vorhanden. Das  $4f$ -Orbital hat eine höhere Energie als die  $5s$ -,  $4d$ -,  $5p$ - und  $6s$ -Orbitale, aber einer geringeren Energie als das  $5d$ -Orbital. Es wird deshalb bereits mit der 6. Schale begonnen, bevor Plätze im  $4f$ -Orbital besetzt werden. Im Anschluss werden die  $5d$ -Orbitale gefüllt und dann erst werden die  $6p$ -Orbitale besetzt ( $\blacktriangleright$  Abb. 1.5,  $\blacktriangleright$  Abb. 1.7).

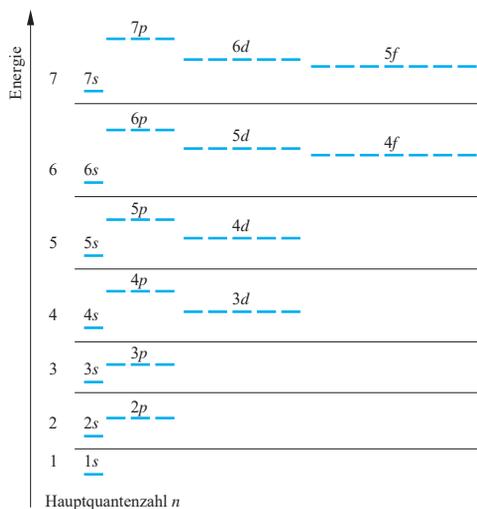


Abb. 1.5 Energieniveaus der Atomorbitale [L253]

### MERKE

- Aus der Reihenfolge des Auffüllens der Elektronenschale lässt sich die Anordnung der Elemente im Periodensystem ( $\blacktriangleright$  Kap. 1.2.4) verstehen. Die Edelgaskonfiguration wird mit der vollständigen Besetzung der  $s$ - und  $p$ -Orbitale der Außenschale erreicht. Bei den Nebengruppenelementen des Periodensystems werden nacheinander die  $d$ - und  $f$ -Orbitale weiter innen liegender Schalen aufgefüllt.
- Das Ziel einer Bindung zwischen zwei Atomen ist jeweils immer das Erreichen der Edelgaskonfiguration, wodurch auch die Oktettregel erfüllt wird.

## 1.2.4 Periodensystem

Heute sind mindestens **112 chemische Elemente** bekannt. Die Elemente bis zur Ordnungszahl 92 (Uran) kommen in der Natur vor. Die noch schwereren Elemente, die sog. Transurane, wurden in kernphysikalischen Reaktionen in Teilchenbeschleunigern oder Kernreaktoren künstlich erzeugt. In der Kernphysik wird versucht, immer schwerere Kerne künstlich herzustellen. Inzwischen gelang die Synthese bis zum Element 116. (Es existieren auch Hinweise auf die Synthese der Elemente 117 und 118. Diese Daten sind aber gegenwärtig unbestätigt und noch nicht von der IUPAC [International Union of Pure and Applied Chemistry] anerkannt.)

Alle bekannten Nuklide der Elemente mit Ordnungszahlen ab 84 sowie der Elemente 43 (Technetium, Tc) und 61 (Promethium, Pm) sind radioaktiv. Die Lebensdauer der künstlichen Nuklide mit Ordnungszahlen ab etwa 100 ist so kurz, dass sie für chemische Reaktionen nicht zur Verfügung stehen. Für die Chemie sind daher etwas weniger als 100 Elemente von Interesse.

### Aufbau des Periodensystems

1869 wurde von Meyer und Mendeljew ein Ordnungsprinzip aufgestellt, nach dem die Elemente waagrecht in **Perioden** untereinander geschrieben werden.

Die in der Senkrechten untereinander stehenden Elemente lassen sich zu **Gruppen** zusammenfassen, die ähnliche chemische Eigenschaften aufweisen ( $\blacktriangleright$  Abb. 1.6).

Das damalige Periodensystem beruhte auf der Beobachtung der Eigenschaften der Elemente. Aus der systematischen Anordnung konnte die Existenz damals noch unbekannter Elemente vorausgesagt werden. Heute ist bekannt, dass der Schlüssel zum Aufbau des Periodensystems in der Elektronenkonfiguration der Atome liegt.

### MERKE

Die Elemente werden in der Reihenfolge ihrer Ordnungszahl und damit der Zahl ihrer Elektronen angeordnet.

- Die Periode kennzeichnet eine Schale der Elektronenhülle, die von links nach rechts mit Elektronen aufgefüllt wird.
- Innerhalb einer Gruppe untereinanderstehende Elemente besitzen die gleiche Zahl von Valenzelektronen. Die Elektronen weiter innen liegender Schalen nehmen an chemischen Bindungen nicht teil.

Es werden **8 Hauptgruppen** und **10 Nebengruppen** unterschieden. Nach neueren Empfehlungen der IUPAC werden die Gruppen von 1–18 nummeriert. Die Gruppen 1 und 2, sowie 13–18 bilden die Hauptgruppen, die Gruppen 3–12 die Nebengruppen. Früher wurden die Hauptgruppen mit IA–VIIIA bezeichnet. Diese Nomenklatur ist auch heute noch weit verbreitet.

### Periodensystem der Elemente

Jeder Kasten enthält: Name, Elementsymbol, Ordnungszahl und relative Atommasse. Alle Hauptgruppenelemente sind blau unterlegt.

	1 (IA)	2 (IIA)	Hauptgruppen										Nebengruppen										18 (VIIIA)							
			3 (IIIB)	4 (IVB)	5 (VB)	6 (VIB)	7 (VIIB)	8 (VIII)	9 (VIII)	10 (VIII)	11 (IB)	12 (IIB)	13 (IIIA)	14 (IVA)	15 (VA)	16 (VIA)	17 (VIIA)													
1. Periode	1,0079 1H Wasserstoff																	4,0026 2He Helium												
2. Periode	6,941 3Li Lithium	9,0122 4Be Beryllium															18,998 9F Fluor	20,180 10Ne Neon												
3. Periode	22,990 11Na Natrium	24,305 12Mg Magnesium											10,811 5B Bor	12,011 6C Kohlenstoff	14,007 7N Stickstoff	15,9994 8O Sauerstoff	18,998 9F Fluor	20,180 10Ne Neon												
4. Periode	39,098 19K Kalium	40,078 20Ca Calcium	44,956 21Sc Scandium	47,88 22Ti Titan	50,942 23V Vanadium	51,996 24Cr Chrom	54,938 25Mn Mangan	55,847 26Fe Eisen	58,933 27Co Cobalt	58,69 28Ni Nickel	63,546 29Cu Kupfer	65,39 30Zn Zink	69,723 31Ga Gallium	72,61 32Ge Germanium	74,922 33As Arsen	78,96 34Se Selen	79,904 35Br Brom	83,80 36Kr Krypton												
5. Periode	85,468 37Rb Rubidium	87,62 38Sr Strontium	88,906 39Y Yttrium	91,224 40Zr Zirkon	92,906 41Nb Niob	95,94 42Mo Molybdän	98,906 43Tc Technetium	101,07 44Ru Ruthenium	102,91 45Rh Rodium	106,42 46Pd Palladium	107,87 47Ag Silber	112,41 48Cd Cadmium	114,82 49In Indium	118,71 50Sn Zinn	121,75 51Sb Antimon	127,60 52Te Tellur	126,90 53I Jod	131,29 54Xe Xenon												
6. Periode	132,91 55Cs Cäsium	137,33 56Ba Baryum		178,49 72Hf Hafnium	180,95 73Ta Tantal	183,85 74W Wolfram	186,21 75Re Rhenium	190,2 76Os Osmium	192,22 77Ir Iridium	195,08 78Pt Platin	196,97 79Au Gold	200,59 80Hg Quecksilber	204,38 81Tl Thallium	207,2 82Pb Blei	208,98 83Bi Bismut	208,98 84Po* Polonium	209,99 85At* Astat	222,02 86Rn* Radon												
7. Periode	223,02 87Fr* Francium	226,03 88Ra* Radium	261 104Rf* Rutherfordium	262 105Db* Dubnium	263 106Sg* Seabergium		Bohrium 107Bh*	Hassium 108Hs*	Meitnerium 109Mt*	Darmstadtium 110Ds*	Roentgenium 111Rg*	Copernicium 112Cn*																		
	138,91 57La Lanthan	140,12 58Ce Cer	140,91 59Pr Praseodym	144,24 60Nd Neodym	146,92 61Pm* Promethium	149,91 62Sm Samarium	151,97 63Eu Europium	157,25 64Gd Gadolinium	167,26 65Tb Terbium	168,93 66Dy Dysprosium	173,04 67Ho Holmium	174,97 68Er Erbium	175,04 69Tm Thulium	178,91 70Yb Ytterbium	183,85 71Lu Lutetium	227,03 89Ac* Actinium	227,03 90Th* Thorium	231,04 91Pa* Protactinium	238,03 92U* Uran	237,05 93Np* Neptunium	244,06 94Pu* Plutonium	244,06 95Am* Americium	243,06 96Cm* Curium	247,07 97Bk* Berkelium	247,07 98Cf* Californium	251,08 99Es* Einsteinium	252,08 100Fm* Fermium	257,10 101Md* Mendelevium	258,10 102No* Nobelium	260,11 103Lr* Lawrencium

\* radioaktive Elemente; angegeben ist die Masse eines wichtigen Isotops (soweit bekannt)

Abb. 1.6 Das Periodensystem der Elemente. Es sind jeweils Elementsymbol, Name, Ordnungszahl und relative Atommasse angegeben. Die Hauptgruppenelemente sind blau unterlegt. Alle Isotope der mit \* gekennzeichneten Elemente sind radioaktiv. Nach neuem Standard sind die Gruppen von 1–18 nummeriert. Die älteren Bezeichnungen sind in Klammern angegeben. [L253]

Die Eigenschaften der Elemente einer Hauptgruppe ähneln sich sehr. Für die Hauptgruppen wurden daher Trivialnamen eingeführt (➤ Tab. 1.5).

Zwischen den Eigenschaften von Elementen verschiedener Hauptgruppen bestehen dagegen wesentliche Unterschiede.

Bei den Nebengruppenelementen ist das s-Orbital der äußeren Schale mit 2 Elektronen besetzt und es werden die auf einem höheren Energieniveau liegenden Orbitale innerer Schalen aufgefüllt (➤ Abb. 1.5 und ➤ Abb. 1.7). Die Nebengruppenelemente ähneln sich in ihren chemischen Eigenschaften, sie besitzen alle metallischen Charakter.

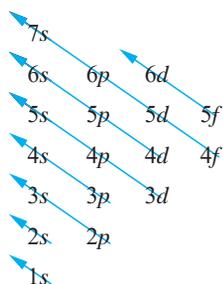
**Tab. 1.5** Gebräuchliche Namen der Hauptgruppen und Zahl ihrer Valenzelektronen

Hauptgruppe	Name	Valenzelektronen
1. (IA)	Alkalimetalle	1
2. (IIA)	Erdalkalimetalle	2
13. (IIIA)	Erdmetalle	3
14. (IVA)	Kohlenstoffgruppe	4
15. (VA)	Stickstoffgruppe	5
16. (VIA)	Chalkogene	6
17. (VIIA)	Halogene	7
18. (VIIIA)	Edelgase	8

- Nebengruppenelemente treten erstmals in der 4. Periode auf. Nach der zweifachen Besetzung des  $4s$ -Orbitals in Calcium (Ca) werden von Scandium (Sc) bis Zink (Zn) die 10 Plätze des  $3d$ -Orbitals gefüllt, bevor mit Gallium (Ga) weiter das  $4p$ -Orbital besetzt wird.
- Das Schema wiederholt sich in der 5. Periode. Das  $5s$ -Orbital ist bei Strontium (Sr) mit 2 Elektronen besetzt. Von Yttrium (Y) bis Cadmium (Cd) wird das  $4d$ -Orbital aufgefüllt, anschließend ab Indium (In) das  $5p$ -Orbital.
- In der 6. Periode werden erstmals  $f$ -Orbitale besetzt. Die **Lanthanoide** – sowie in der 7. Periode die **Actinoide** – könnten als „Nebengruppen der Nebengruppen“ angesehen werden.
- Beim Barium (Ba) ist das  $6s$ -Orbital mit 2 Elektronen besetzt. Nun werden von Lanthan (La) bis Ytterbium (Yb) nacheinander die 14 Plätze des  $4f$ -Orbitals besetzt. Anschließend werden vom Lutetium (Lu) bis Quecksilber (Hg) die 10 Plätze des  $5d$ -Orbitals aufgefüllt. Erst dann wird mit einem Elektron im  $6p$ -Orbital bei Thallium (Tl) zur nächsten Hauptgruppe weitergegangen.
- Die 7. Periode wird nach dem gleichen Schema besetzt, zunächst  $7s$ , dann  $5f$  (Actinoide) und  $6d$ . Ein  $7p$ -Orbital würde erstmals bei Element 113 besetzt. Das nächste Edelgas würde bei Element 118 liegen.

**MERKE**

Die Reihenfolge der Besetzung der Orbitale lässt sich an dem in > Abb. 1.7 gezeigten Schema einfach merken. Es werden von unten nach oben die  $s$ -Orbitale der einzelnen Perioden übereinander geschrieben. Daneben die  $p$ -,  $d$ - und  $f$ -Orbitale. Diagonale Pfeile von rechts unten nach links oben geben die Besetzungsfolge der Orbitale an (> Abb. 1.5).

**Abb. 1.7** Reihenfolge bei der Besetzung der Orbitale mit Elektronen [L253]**Periodische Eigenschaften**

Einige Eigenschaften der Elemente zeigen innerhalb einer Periode oder innerhalb einer Gruppe des Periodensystems einen gesetzmäßigen Verlauf.

**Atomradius**

Die Atomradien der Elemente nehmen innerhalb einer Periode – mit Ausnahme der Edelgase – von links nach rechts ab. Die Elektronen werden durch die zunehmende Kernladung näher an den Atomkern herangezogen.

Von oben nach unten nehmen die Atomradien innerhalb einer Gruppe zu, denn mit jeder Periode wird eine neue, weiter außen liegende Elektronenschale begonnen.

**Ionenradius**

Die Ionenradien nehmen ebenfalls innerhalb einer Periode von links nach rechts ab und innerhalb einer Gruppe von oben nach unten zu.

- Werden Valenzelektronen aus dem Atom entfernt, ist das entstandene Kation kleiner als das neutrale Atom des jeweiligen Elements.
- Werden alle Valenzelektronen entfernt, wie bei  $\text{Na}^+$  oder  $\text{Mg}^{2+}$ , ist das Kation sogar deutlich kleiner, denn gegenüber dem neutralen Atom verschwindet eine Elektronenschale.
- Durch die Aufnahme eines zusätzlichen Valenzelektrons bildet sich ein Anion. Der Radius des Anions ist größer als der des neutralen Atoms, denn zusätzliche Elektronen weiten die Elektronenhülle aus.

**Elektronenaffinität**

Die Elektronenaffinität ist die **Tendenz zur Elektronenaufnahme**, d.h. zur Bildung von Anionen. Die Aufnahme oder Abgabe eines Elektrons ist mit einer Energieänderung verbunden, diese wird in beiden Fällen als Elektronenaffinität bezeichnet. Ihre Einheit wird bei chemischen Umsetzungen in kJ/mol angegeben.

Daneben existiert die Einheit Elektronenvolt (eV):  $1 \text{ eV} \cong 96,5 \text{ kJ/mol}$ . Der Energiebetrag wird negativ gezählt, wenn bei dem Vorgang Energie frei wird. Bei positivem Wert muss Energie aufgewandt werden.

- Für freie (ungeladene) Atome, auch für Alkalimetalle und Erdalkalimetalle, ist es günstiger, ein zusätzliches Elektron aufzunehmen, als eines abzugeben. Bei der Elektronenaufnahme wird daher Energie frei; die Werte der Elektronenaffinität sind **negativ**.
- Um ein Elektron aus einem Atom zu entfernen, muss dagegen Energie, die sog. Ionisierungsenergie, aufgebracht werden. Aus diesem Grund sind die Werte für die Elektronenaffinität **positiv**.

Der Betrag der Elektronenaffinität nimmt innerhalb einer **Periode** von links nach rechts bis zur 7. Hauptgruppe zu, d.h., bei Elektronenaufnahme wird zunehmend mehr Energie freigesetzt, die Werte werden negativer. Beispiel: Natrium  $-53 \text{ kJ/mol}$  und Chlor  $-348 \text{ kJ/mol}$ . Die Edelgase in der 8. Hauptgruppe zeigen dagegen praktisch keine Tendenz zur Aufnahme zusätzlicher Elektronen.

Innerhalb einer **Gruppe** sinkt der Betrag der Elektronenaffinität von oben nach unten. Die größere Elektronenhülle schirmt die Anziehungskraft des Kerns auf ein zusätzliches Elektron stärker ab.

Werden mehrere Elektronen aufgenommen, sind die Elektronenaffinitäten für jedes der Elektronen verschieden. Beispielsweise liegt die Elektronenaffinität von Sauerstoff für die Aufnahme eines Elektrons bei  $-147 \text{ kJ/mol}$ , es wird Energie frei. Für die Auf-

nahme eines zweiten Elektrons beträgt der Wert +738 kJ/mol. Es ist Energie notwendig, die von einem Reaktionspartner aufgebracht werden muss.

## Elektronegativität

Elemente der Gruppen 1 und 2 bilden in Verbindungen bevorzugt Kationen, die Elemente der Gruppen 16 und 17 Anionen. Um die **Neigung zur Ionenbildung** unabhängig von den nur schwer messbaren Größen wie Elektronenaffinität oder Ionisierungsenergie abschätzen zu können, wurde von Linus Pauling der Begriff der Elektronegativität eingeführt.

Die Elektronegativität ist eine relative, dimensionslose Größe, sie nimmt Zahlenwerte zwischen 0,8 (nach neueren Rechnungen für Cäsium) und 4,0 (Fluor) an (➤ Abb. 1.8).

Neben den Elektronegativitätswerten nach Pauling ist auch noch eine Elektronegativitätsskala nach Allred und Rochow in Gebrauch. Die Abweichung gegenüber den von Pauling vorgeschlagenen Werten ist aber meist gering, sodass auf Unterschiede hier nicht weiter eingegangen werden soll.

### MERKE

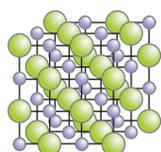
Die Elektronenaffinität bezieht sich immer auf ein einzelnes Atom bzw. Ion, die Elektronegativität dagegen auf das Verhalten eines Atoms innerhalb einer Verbindung.

- Atome mit hoher Elektronegativität ziehen in einer Bindung Elektronen stark zu sich herüber. Die Bindung wird polarisiert.
- Elemente ähnlicher Elektronegativität gehen eine kovalente Bindung ein.
- Bei großen Elektronegativitätsunterschieden wird ein Elektron aus einem Atom heraus- und vollständig zum anderen Bindungspartner herübergezogen, es entsteht eine Ionenbindung (➤ Abb. 1.9).

Die Elektronegativitätswerte nehmen, mit Ausnahme der Edelgase, innerhalb der Perioden von links nach rechts zu und innerhalb der Hauptgruppen von oben nach unten ab (➤ Abb. 1.8).

H 2,2							
Li 1,0	Be 1,6	B 2,0	C 2,6	N 3,0	O 3,4	F 4,0	
Na 0,9	Mg 1,3	Al 1,6	Si 1,9	P 2,2	S 2,6	Cl 3,2	
K 0,8			Ge 2,0	As 2,2	Se 2,6	Br 3,0	
Rb 0,8					Te 2,1	I 2,7	

**Abb. 1.8** Elektronegativitätswerte nach Pauling für einige wichtige Hauptgruppenelemente. Elemente mit besonders geringer bzw. hoher Elektronegativität sind gekennzeichnet. [L253]



**Abb. 1.9** Ionenbindung: Ausschnitt aus dem Kristallgitter von Kochsalz (NaCl) [L253]

### MERKE

F<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> besitzen die stärkste Elektronegativität!

## Metallcharakter

Die Elemente werden in **Metalle** und **Nichtmetalle** eingeteilt. Es gibt aber kein eindeutig festlegbares Kriterium, das Metalle von Nichtmetallen unterscheidet.

- Das beste Unterscheidungsmerkmal ist die hohe elektrische Leitfähigkeit der Metalle. Allerdings leitet auch Graphit (Kohlenstoff) als Nichtmetall den elektrischen Strom.
- Für das chemische Verhalten von Metallen typisch ist das Eingehen von Ionenverbindungen, in denen das Metall als Kation vorliegt.

Unabhängig von den zugrunde gelegten Kriterien existieren immer einige Elemente, deren Eigenschaften an der Grenze zwischen Metall und Nichtmetall liegen. Diese Elemente werden als **Halbmetalle** bezeichnet. Zu den Halbmetallen zählen Bor, Silizium, Germanium, Arsen und Tellur.

Die Nebengruppenelemente sind Metalle. Für die Hauptgruppen nimmt der Metallcharakter innerhalb der Perioden von links nach rechts ab und in den Gruppen von oben nach unten zu.

### MERKE

Zusammenfassung der **periodischen Eigenschaften** von Elementen innerhalb der Periode (→) von links nach rechts, innerhalb der Gruppe (↓) von oben nach unten:

	→	↓
Atomradius	–*	+
Ionenradius	–	+
Elektronenaffinität	+*	–
Elektronegativität	+*	–
Metallcharakter	–	+

(– Abnahme, + Zunahme; \* mit Ausnahme der Edelgase)

## Jetzt bist du dran!

### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

---

**Jetzt bist du dran!**
**Zeichenaufgabe**

Zeichne in das vorgegebene Schema der Energieniveaus die Besetzung der Orbitale des Kohlenstoffes mit Pfeilen (für den Spin) ein. Beschrifte die Orbitale korrekt.

Zeichne das Schema für einen angeregten Zustand – wie sieht der Kohlenstoff dann aus?

**Anregungen zur weiteren Wiederholung**

Zeichne ein Kohlenstoff-Atom im Bohr-Atommodell. Beschrifte dabei alle Bestandteile eines Atoms, ihre Ladung und kennzeichne deine Zeichnung mit Massenzahl und Ordnungszahl. Welche Bedeutung haben diese Zahlen bzw. wie sind Sie definiert?

Skizziere den Umriss eines Periodensystems (oder nimm eines zur Hand) und trage mit Pfeilen ein, wie sich die Atomradius, Elektronenaffinität und Elektronennegativität verhalten. In welche Richtung nehmen sie zu?

**Überblick gewinnen**

Nutze deine gesammelten Stichwörter für eine Mindmap oder eine gegliederte Stichwortliste.

Thomas Wenisch

Vorklinik Finale 3

# Moleküle und Stoffumwandlungen

1. Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Chemische Bindung</b> .....	1	3.3	Carbo- und Heterocyclen .....	26
1.1	Ionenbindung .....	1	3.4	Cycloalkane, Aromaten .....	26
1.2	Atombindung .....	2	3.5	Heterocyclen .....	28
1.3	Metallbindung .....	4			
1.4	Polare Moleküle und Wasserstoffbrückenbindung .....	4	<b>4</b>	<b>Stoffumwandlungen/chemische Reaktionen</b> .....	31
1.5	Koordinative Bindung, Metallkomplexe .....	5	4.1	Wegweiser .....	31
<b>2</b>	<b>Stereochemie</b> .....	9	4.2	Homogene Gleichgewichtsreaktionen .....	31
2.1	Isomerie .....	9	4.3	Heterogene Gleichgewichtsreaktionen .....	33
2.2	Konformation .....	9	4.4	Redoxreaktionen .....	35
2.3	Konfiguration .....	11	4.5	Bildung und Eigenschaften der Salze .....	40
2.4	Chirale Verbindungen .....	12	4.6	Ligandenaustausch-Reaktionen .....	42
<b>3</b>	<b>Funktionelle Gruppen und Stoffklassen</b> .....	17	4.7	Additions- und Eliminationsreaktionen .....	43
3.1	Kohlenwasserstoffe .....	17	4.8	Substitutionsreaktionen .....	46
3.2	Funktionelle Gruppen .....	20	4.9	Sonstige Reaktionen .....	49
				<b>Register</b> .....	52

# 1

Thomas Wenisch

## Chemische Bindung

Atome verbinden sich zu Molekülen, wenn sie dabei eine energetisch günstigere Konfiguration ihrer Elektronenhüllen erreichen. Ein besonders stabiler Zustand ist die Edelgaskonfiguration  $s^2p^6$  der äußeren Schale, bei der diese mit 8 Valenzelektronen besetzt ist. Nur die erste Schale verfügt über kein  $p$ -Orbital, sie ist bereits mit der Elektronenanordnung  $1s^2$  (Helium) vollständig besetzt.

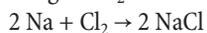
Es werden verschiedene Arten der chemischen Bindung unterschieden, mit denen die beteiligten Atome diese Anordnung ihrer Außenelektronen erreichen können: die Ionenbindung, die Atombindung und die metallische Bindung.

### 1.1 Ionenbindung

Bei der Ionenbindung werden Elektronen zwischen den Bindungspartnern übertragen. Diese Bindung entsteht zwischen Elementen **stark unterschiedlicher Elektronegativität**. Die Ionenbindung findet daher zwischen Elementen statt, die im Periodensystem weit voneinander entfernt stehen. Sie kommt bevorzugt **zwischen Elementen der 1. und 2. Hauptgruppe mit denen der 16. und 17. Hauptgruppe** vor.

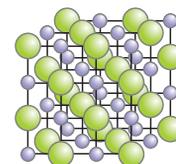
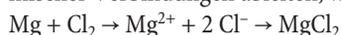
- Wenn die Alkalimetalle ihr Außenelektron abgeben, bilden sie Kationen, z. B.:  
 $\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + e^-$   
Die nächstinnere Schale, die nun die Außengrenze der Elektronenhülle darstellt, ist mit der Edelgaskonfiguration  $s^2p^6$  abgeschlossen.
- Die Halogene erreichen die Edelgaskonfiguration, indem sie ein zusätzliches Elektron anlagern. Es bilden sich Anionen, z. B.:  
 $\text{Cl} + e^- \rightarrow \text{Cl}^-$
- Wegen der elektrostatischen Anziehungskraft zwischen den gegensätzlich geladenen Ionen lagern sich diese zu einem **Molekül** zusammen. Aus den als Beispiel genannten Ionen bildet sich so Kochsalz:  
 $\text{Na} + \text{Cl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{NaCl}$

Die Reaktion zwischen Natrium und Chlor ist hier vereinfacht angegeben, um den Elektronenübergang zu zeigen. In der Natur liegt Chlor nicht atomar vor, sondern im Chlorgas stets in der Verbindung als  $\text{Cl}_2$ -Molekül. Die vollständige Bilanz würde lauten:



Erdalkalimetalle geben entsprechend zwei Elektronen ab und die Elemente der 16. Hauptgruppe können zwei Elektronen aufnehmen.

Die **Ladungsbilanz** ist stets ausgeglichen: Es werden so viele Elektronen abgegeben, wie von den Bindungspartnern aufgenommen werden. Auf diese Weise lässt sich die **Summenformel** chemischer Verbindungen ableiten, wie z. B. bei:



**Abb. 1.1** Ionenbindung: Ausschnitt aus dem Kristallgitter von NaCl [L253]

Die Alkali- und Erdalkalimetalle geben ihre Valenzelektronen leicht, aber dennoch nicht freiwillig ab. Es ist Energie notwendig, um die Valenzelektronen abzulösen. Es wird aber ein noch größerer Energiebetrag freigesetzt, wenn Stoffe hoher Elektronegativität die Elektronen aufnehmen, sodass insgesamt ein energetisch günstigerer Zustand erreicht wird.

Weil sich hier gegensätzlich geladene Ionen verbinden, wird die Ionenbindung auch als heteropolare Bindung bezeichnet. Als **wichtige Eigenschaften** der Ionenbindung seien genannt:

- Die **Bindungsenergie** der Ionenbindung liegt in der Größenordnung von 400 kJ/mol.
- Die gegenseitigen elektrostatischen Anziehungskräfte wirken gleichermaßen in alle Richtungen. Die Ionenbindung ist deshalb **ungerichtet**.
- Als Festkörper bilden durch Ionenbindungen aufgebaute Moleküle **Kristalle**, in deren Struktur die Anionen und Kationen abwechselnd angeordnet sind (➤ Abb. 1.1).
- In wässrigem Milieu **dissoziieren** die Bindungspartner und um die nun einzeln vorliegenden Ionen bilden sich Hydrathüllen aus Wassermolekülen.

#### CHECK - UP

Zwischen welchen Elementen entsteht eine Ionenbindung?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Atombindung

Als Synonyme für diesen Bindungstyp sind auch die Bezeichnungen Elektronenpaarbindung oder kovalente Bindung gebräuchlich.

### 1.2.1 Einfach- und Mehrfachbindung

Wenn sich die Bindungspartner nur wenig in ihrer Elektronegativität unterscheiden, ist keines der Atome in der Lage, vom anderen ein Elektron abzuziehen.

Zwei einfach besetzte Orbitale überlagern sich zu einem gemeinsamen, mit zwei Elektronen besetzten **Molekülorbital**. > Abb. 1.2 zeigt die Verbindung zweier *s*-Orbitale zu einem Molekülorbital, wie sie z. B. im Wasserstoffmolekül H<sub>2</sub> vorliegt.

Diese Art des Molekülorbitals wird als  $\sigma$ -Orbital bzw. die resultierende Bindung als  **$\sigma$ -Bindung** bezeichnet. Der Abstand *a* der Bindungspartner ist die Bindungslänge der Elektronenpaarbindung. Sie liegt im Bereich von 0,07–0,3 nm.

Die in dem Molekülorbital befindlichen Elektronen werden von beiden Bindungspartnern „gemeinsam genutzt“, um die Edelgaskonfiguration zu erreichen.

Vor diesem Hintergrund werden nun auch die verschiedenen für diesen Bindungstyp verwendeten Bezeichnungen verständlich:

- **Atombindung:** Die Bindungspartner behalten ihre Elektronen und bleiben somit elektrisch neutrale Atome.
- **Elektronenpaarbindung:** bindende Elektronenpaare besetzen die Molekülorbitale.
- **Kovalente Bindung:** Valenzelektronen werden „kooperativ“, d. h. gemeinsam, genutzt.
- Gelegentlich wird auch der Begriff **homöopolare** Bindung verwendet, denn beide Partner unterscheiden sich nicht bezüglich ihrer elektrischen Ladung.

Die Bindungsenergie der kovalenten Bindung liegt (ähnlich wie die der Ionenbindung) im Bereich von 400 kJ/mol.

Zwischen zwei Atomen können sich auch **Mehrfachbindungen** ausbilden. In einer Doppelbindung wird zwischen der stärkeren  $\sigma$ -Bindung und einer energieärmeren  $\pi$ -Bindung unterschieden, deren Bindungsenergie nur etwa 300 kJ/mol beträgt.

### MERKE

Die Atombindung ist eine **gerichtete** Bindung. Die Molekülorbitale besitzen eine festgelegte räumliche Ausrichtung. Die Richtungen der Bindungen legen die räumliche Konfiguration eines Moleküls fest. Einfachbindungen sind um ihre Bindungsachse frei drehbar, bei Mehrfachbindungen ist diese freie Drehbarkeit aufgehoben.

Die **Bindigkeit** eines Atoms ist die Zahl der kovalenten Bindungen, die es gleichzeitig eingehen kann. Das Atom geht so lange

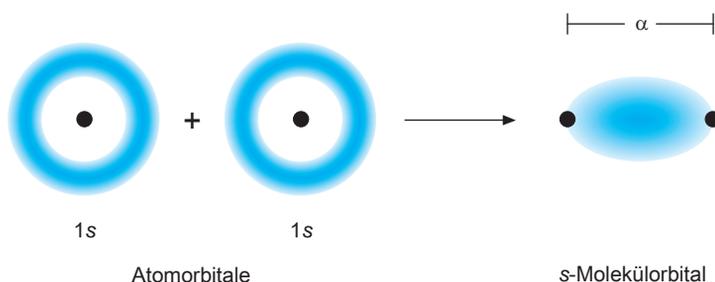


Abb. 1.2 Bildung eines gemeinsamen Molekülorbitals aus zwei Atomorbitalen [L253]

Bindungen ein, bis es die Edelgaskonfiguration seiner Valenzelektronen erreicht hat. Beispielsweise sind Wasserstoff und Chlor einbindig, Sauerstoff und Schwefel sind zweibindig, Stickstoff und Phosphor sind dreibindig und Kohlenstoff ist vierbindig

### 1.2.2 Polarisierung

Bei einer Verbindung zwischen gleichen Atomen, wie im Wasserstoffmolekül H<sub>2</sub> oder im Sauerstoffmolekül O<sub>2</sub>, sind die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der bindenden Elektronen symmetrisch im Raum zwischen den Atomen verteilt. Das ist auch bei der Verbindung verschiedener Elemente mit nahezu gleicher Elektronegativität der Fall.

Gehen **Stoffe unterschiedlicher Elektronegativität** eine Atombindung ein, hält sich das bindende Elektronenpaar näher bei dem Atom mit der größeren Elektronegativität auf. Es entsteht eine **polarisierte Atombindung** (> Abb. 1.3). Die polarisierte Atombindung steht daher bezüglich der Ladungsverteilung zwischen der rein symmetrischen Atombindung und der Ionenbindung.

### 1.2.3 Hybridisierung

Wenn ein mehrbindiges Atom mehrere gleichartige Bindungen eingeht, kann eine **Hybridisierung** genannte Verschiebung der Energieniveaus seiner Valenzelektronen auftreten (> Abb. 1.4). Besonders bei dem vierbindigen Kohlenstoff wird die Hybridisierung beobachtet. Im Grundzustand ist das *s*-Orbital der zweiten Schale doppelt besetzt und es befinden sich zwei ungepaarte Elektronen auf den *p*-Orbitalen ( $s^2p^2$ ). In einem angeregten Zwischen-

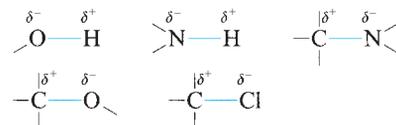
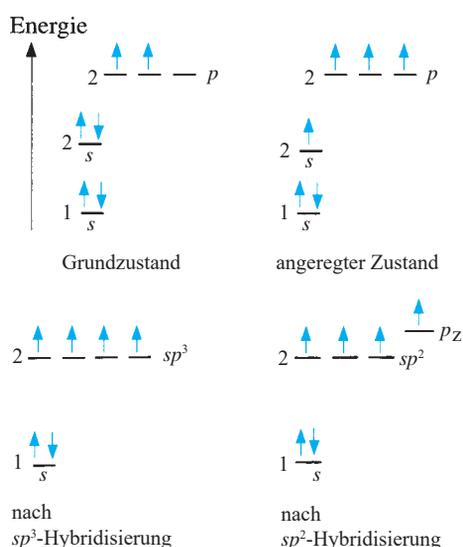


Abb. 1.3 Polarisierte Atombindungen in organischen Molekülen.  $\delta^+$  und  $\delta^-$  kennzeichnen die durch die Ladungsverschiebung hervorgerufenen Partialladungen. [L253]

zustand sind zunächst das *s*- und die *p*-Orbitale einfach besetzt.

- Bei der  $sp^3$ -**Hybridisierung** wird die Energie des *s*-Orbitals angehoben und die Energien der *p*-Orbitale werden entsprechend abgesenkt, sodass energetisch 4 gleichwertige einfach besetzte Orbitale entstehen. Im Methanmolekül CH<sub>4</sub> liegt das Kohlenstoffatom als  $sp^3$ -Hybrid vor.



**Abb. 1.4** Verschiebung der Energieniveaus bei  $sp^3$ - und  $sp^2$ -Hybridisierung [L253]

- In einer **C=C-Doppelbindung** zwischen zwei Kohlenstoffatomen sind die Atome  **$sp^2$ -hybridisiert**. Hier gleichen sich die Energien des  $s$ - und zweier  $p$ -Orbitale an, während das dritte  $p$ -Orbital auf einer höheren Energiestufe verbleibt. Aus den so entstandenen  $p_z$ -Orbitalen bildet sich die – verglichen mit der ersten  $\sigma$ -Bindung schwächere – zweite  $\pi$ -Bindung.
- Bei einer **Dreifachbindung** sind die Atome  **$sp$ -hybridisiert**. Die Bindung besteht aus einer  $\sigma$ - und zwei  $\pi$ -Bindungen.

### MERKE

Insgesamt ist die Anzahl der Hybridorbitale immer gleich der Zahl der Bindungspartner des C-Atoms. Eines der Hybridorbitale stammt immer formal von einem  $s$ -Orbital ab.

## 1.2.4 Summen- und Strukturformel

Eine chemische Verbindung wird durch ihre **Summenformel** angegeben. Für viele Verbindungen existieren Eigennamen, z. B. „Wasser“ für  $H_2O$ . Wenn eine Atomsorte in der Verbindung mehrfach vorkommt, wird die Anzahl der Atome durch einen nachgestellten Index angegeben.

Die **relative Molekülmasse** einer Verbindung ergibt sich aus Addition der relativen Massen der beteiligten Atome. Die dimensionslose Zahl der relativen Molekülmasse entspricht der Masse eines Mols der Verbindung in Gramm. In der Biochemie wird synonym zur Angabe  $g/mol$  die Einheit **Dalton (D)** verwendet:  $1 D = 1 g/mol$ .

Beispiele für einige Verbindungen zeigt > Abb. 1.5. Neben der Summenformel ist meist auch die **Struktur** des Moleküls von Interesse. Eine vereinfachte zweidimensionale Darstellung des in Wirklichkeit dreidimensionalen Moleküls verdeutlicht in den meisten Fällen ausreichend die gegenseitige Lage der an der Verbindung beteiligten Atome. Wie für die ersten vier Verbindungen

Summenformel	Strukturformel	relative Molekülmasse
$H_2$	$H-H$ $H\cdot\cdot H$	2
HCl	$H-\overline{Cl}$ $H\cdot\cdot\overline{Cl}$	36,3
$H_2O$ Wasser	$H-\overline{O}-H$ $H\cdot\cdot\overline{O}\cdot\cdot H$	18
$CO_2$ Kohlendioxid	$\overline{O}=C=\overline{O}$ $\overline{O}\cdot\cdot C\cdot\cdot\overline{O}$	44
$CH_4$ Methan	$\begin{array}{c} H \\   \\ H-C-H \\   \\ H \end{array}$	16
$NH_3$ Ammoniak	$\begin{array}{c} H-\overline{N}-H \\   \\ H \end{array}$	17
$O_2$	$\overline{O}=\overline{O}$	32
$O_3$ Ozon	$\overline{O}=\overline{O}-\overline{O}$	48
$N_2O$ Distickstoffoxid (Lachgas)	$\overline{N}=\overline{N}=\overline{O}$ $\updownarrow$ $\overline{N}\equiv\overline{N}-\overline{O}$	44
HCN Wasserstoffcyanid (Blausäure)	$H-C\equiv N$	27

**Abb. 1.5** Beispiele für Summen- und Strukturformeln sowie relativer Molekülmassen für einige wichtige chemische Verbindungen [L253]

abgebildet, lassen sich die Valenzelektronen durch Punkte darstellen. Diese Schreibweise wird jedoch schnell unübersichtlich. Es ist deshalb üblich, jeweils ein Elektronenpaar durch einen Strich darzustellen. In den Beispielen sind alle Elektronen, sowohl die bindenden als auch die freien, d. h. nicht an chemischen Bindungen beteiligten, Elektronenpaare gezeigt. Die Schreibweise kann auch weiter abgekürzt werden, indem nur die an den kovalenten Bindungen beteiligten Elektronenpaare gezeichnet werden.

### KLINIK

**Distickstoffoxid**  $N_2O$  ist auch unter dem Trivialnamen Lachgas bekannt. Es ist ein geruchloses, nicht brennbares und nahezu untoxisches Gas. Es zeigt eine starke analgetische Wirkung bei gleichzeitig schwacher narkotischer und fehlender muskelrelaxierender Wirkung. Lachgas findet als Inhalationsanästhetikum Anwendung.

**Cyanidverbindungen** ( $-CN$ ) sind extrem toxisch. Cyanwasserstoff, HCN, ist auch als Blausäure bekannt. Zyankali, KCN, ist das Kaliumsalz der Blausäure. Die Säure ist mit Wasser mischbar und hat in schwacher Konzentration einen leicht mandelartigen Geruch. Die Giftigkeit des Cyanidions  $CN^-$  beruht darauf, dass es genau wie Kohlenmonoxid die Sauerstoffaufnahme am Hämoglobinmolekül blockiert. Darüber hinaus stört es einige enzymatische Reaktionen im Stoffwechsel.

### CHECK-UP

- Erkläre den Begriff Hybridisierung.
- Wann sind Kohlenstoffatome  $sp^2$ -hybridisiert?

## Jetzt bist du dran!

## Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Metallbindung

In **Metallen** ordnen sich die Atome in einem **Kristallgitter** an. Die Valenzelektronen sind delokalisiert, d. h., sie sind nicht mehr an ein bestimmtes Atom gebunden, sondern innerhalb des Kristallverbands frei beweglich. Die Beweglichkeit der Elektronen gleicht der der Moleküle eines Gases. Deshalb wird in diesem Zusammenhang auch von einem **Elektronengas** gesprochen. Die freie Beweglichkeit der Elektronen sorgt für die gute elektrische Leitfähigkeit der Metalle.

In reinen Kristallen der Halbmetalle Germanium und Silizium sind die Valenzelektronen bei Raumtemperatur noch gebunden. Erst bei Energiezufuhr werden sie in den energetisch höher liegenden Bereich des sog. Leitungsbands gehoben. Die Halbmetalle stellen deshalb die **Halbleiter** dar, die elektrischen Strom nur schlecht leiten und deren Leitfähigkeit bei steigender Temperatur zunimmt.

## CHECK - UP

Wie unterscheiden sich Metalle und Halbleiter?

## Jetzt bist du dran!

## Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.4 Polare Moleküle und Wasserstoffbrückenbindung

Wenn die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen in einem Molekül nicht zusammenfallen, trägt das Molekül ein **permanentes Dipolmoment** (> Abb. 1.6).

Polare Moleküle können durch polarisierte Atombindungen (> Abb. 1.3) oder durch Ionenbindungen entstehen. Ursache sind aber auch freie Elektronenpaare, die sich auf einer Seite des Atoms aufhalten und so zur Asymmetrie der Ladungsverteilung führen.

Einen elektrischen Dipol bildet das gewinkelt gebaute **Wassermolekül** (> Abb. 1.7 li.). Die O–H-Atombindungen sind polar und zusätzlich trägt das Sauerstoffatom auf der von den Wasserstoffatomen abgewandten Seite noch zwei Elektronenpaare. Zwischen den Wassermolekülen wirken starke Kohäsionskräfte, bedingt durch die Anziehung zwischen der negativen Partialladung am Sauerstoffmolekül und den positiven Partialladungen des Wasserstoffs benachbarter Moleküle. Diese Bindung zwischen Molekülen wird **Wasserstoffbrückenbindung** genannt (> Abb. 1.7 re.). Die Energie der Wasserstoffbrückenbindung liegt etwa bei 40 kJ/mol. Somit ist sie rund zehnmal schwächer als die intramolekularen Bindungsarten Atombindung oder Ionenbindung.

## MERKE

Die starke gegenseitige Anziehung der Wassermoleküle ist für die besonderen physikalischen Eigenschaften des Wassers verantwortlich. Andere Stoffe vergleichbarer Molekülgröße und -masse, wie Methan oder Kohlendioxid, sind bei Raumtemperatur gasförmig. Verglichen mit diesen Stoffen besitzt  $\text{H}_2\text{O}$  einen wesentlich höheren Schmelz- und Siedepunkt.

- **Polar** gebaute Stoffe lösen sich gut in Wasser, sie sind **hydrophil**. Ionenverbindungen z. B. dissoziieren in wässriger Lösung: Die geladenen Pole der Wassermoleküle werden von den jeweils gegensätzlich geladenen Ionen im Kristallgitter angezogen. Auf diese Weise drängen sich die Wassermoleküle zwischen das Kristallgitter und brechen es auf. Sie umlagern die entstehenden Ionen und bilden eine **Hydrathülle** um sie herum, die sich zusammen mit den Ionen durch die Lösung bewegt.
- **Apolare** Substanzen sind dagegen nur schlecht oder überhaupt nicht wasserlöslich. Diese Stoffe werden **hydrophob** oder **lipophil** genannt. Hydrophobe Stoffe vermeiden den Kontakt mit



Abb. 1.6 Beispiele für polare Moleküle. Der Pfeil zeigt in Richtung des Dipolmoments von der positiven zur negativen Partialladung. [L253]

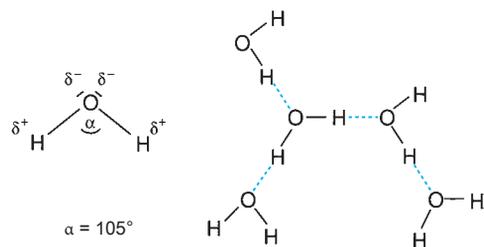


Abb. 1.7 Bau des Wassermoleküls (links) und Wasserstoffbrückenbindung zwischen einzelnen Wassermolekülen (rechts). [L253]

Wasser. Aus diesem Grund entsteht eine hydrophobe Wechselwirkung, wegen der sich in einem Öl-Wasser-Gemisch die Ölmoleküle zu kleinen Tröpfchen assoziieren.

### MERKE

Gleiches löst sich in Gleichem. Salze und polare Stoffe lösen sich im polaren Wasser, Fettsäuren hingegen schwimmen auf der Suppe.

Auch zwischen den polaren Teilbereichen größerer Moleküle bilden sich Wasserstoffbrückenbindungen aus. Die H-Brücken führen zu der für Makromoleküle spezifischen Sekundärstruktur.

### MERKE

**Wasserstoffbrückenbindungen** sind die Grundlage vieler Reaktionsmechanismen in der belebten Natur. Die beiden Stränge der DNA sind durch Wasserstoffbrückenbildung miteinander verbunden. H-Brücken sind auch Ursache für die Faltung von Proteinen. So kann sich die räumliche Struktur eines Enzyms stabilisieren, auf der seine katalytische Wirkung beruht.

In unpolaren Molekülen können durch Fluktuationen der Ladungsverteilung temporäre Dipole entstehen, die sich gegenseitig anziehen. Die Bindungsenergie dieser sog. **Van-der-Waals-Kräfte** ist mit ca. 10 kJ/mol nochmals deutlich geringer als die einer Wasserstoffbrückenbindung. Van-der-Waals-Kräfte halten z. B. die einzelnen Schichten von Graphit, der nur aus Kohlenstoffatomen besteht, zusammen.

### CHECK-UP

Welche biologische Bedeutung hat die Wasserstoffbrückenbindung?

## Jetzt bist du dran!

### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.5 Koordinative Bindung, Metallkomplexe

### 1.5.1 Koordinative Bindung

Zwischen einer positiven Partialladung an einer Stelle eines Moleküls und einem freien Elektronenpaar an einem anderen Molekül oder Atom wirken elektrostatische Anziehungskräfte. Diese führen zu einer **koordinativen Bindung**. Die koordinative Bindung stellt einen Sonderfall der Atombindung dar, bei dem die bindenden Elektronen ausschließlich von einem der Bindungspartner stammen.

Der Bindungspartner mit dem freien Elektronenpaar fungiert als **Elektronendonator**, der andere als **Elektronenakzeptor**. Elektronenakzeptoren sind z. B. Moleküle oder Ionen, denen noch Elektronen zum Erreichen ihrer Edelgaskonfiguration fehlen, oder allgemein Kationen, die sich an einem freien Elektronenpaar anlagern. Dies ist der Fall bei der Bindung der Wasserstoffionen im Hydroniumion  $\text{H}_3\text{O}^+$  oder im Ammoniumion  $\text{NH}_4^+$  (> Abb. 1.8).

### 1.5.2 Metallkomplexe

In einem Metallkomplex ist ein **zentrales Ion** von mehreren koordinativ gebundenen **Liganden** umgeben, von denen die bindenden Elektronen stammen. Die Liganden können jeweils eine (> Abb. 1.9) oder auch mehrere Bindungsstellen zum Zentralion (> Abb. 1.10) aufweisen.

Als Zentralionen in Metallkomplexen treten besonders die **Kationen der Nebengruppenelemente** in Erscheinung. Sie versuchen auf diese Weise, Elektronenlücken in den *d*- und *f*-Orbitalen ihrer inneren Schalen zu füllen.

Es entsteht ein definierter **Komplex**, dessen Eigenschaften sich von denen der Ausgangsverbindungen unterscheiden.

In der Schreibweise wird der Metallkomplex in eckigen Klammern angegeben. Dem Zentralion nachgestellt sind Art und Anzahl der Liganden. Außerhalb der eckigen Klammer wird die Gesamtladung des Komplexes angegeben. So wird z. B. der Tetraminkupferkomplex geschrieben als:  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ .

Die Zahl der Bindungsplätze für Liganden am Zentralion ist die **Koordinationszahl** des Komplexes. Im genannten Beispiel ist sie 4.

### MERKE

Die Koordinationszahl hängt von der Art der Liganden und der Elektronenkonfiguration des zentralen Ions ab. Sie steht aber in keinem Zusammenhang zur Ladung des Zentralions. Es sind Koordinationszahlen von 2 bis 12 bekannt. Am häufigsten sind die Koordinationszahlen 2, 4 und 6.

Die **Gesamtladung** eines Metallkomplexes ergibt sich aus der Summe der Ladungen seiner Bestandteile (> Abb. 1.9).

- Bei ungeladenen Liganden ist sie gleich der Ladung des Zentralions.
- Sind die Liganden negativ geladen, können ihre Ladungen die des Zentralions teilweise oder ganz kompensieren oder auch übertreffen.

Es können somit neutrale Komplexe, Kationen oder Anionen entstehen. Anionische Komplexe bilden mit normalen Kationen Salze.

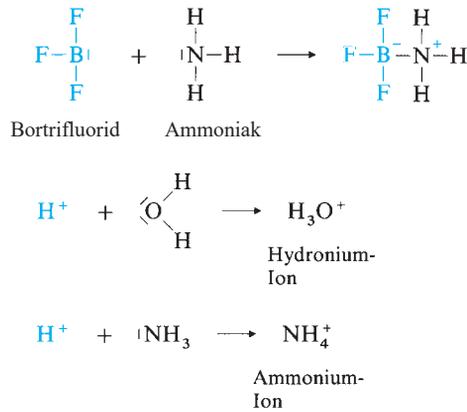


Abb. 1.8 Beispiele für koordinative Bindungen [L253]

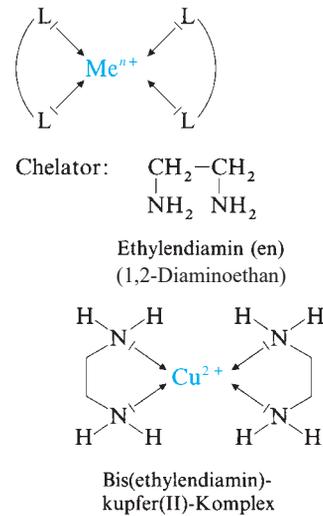


Abb. 1.10 Chelatkomplex mit zwei zweizähligen Liganden: schematische Darstellung und Beispiel [L253]

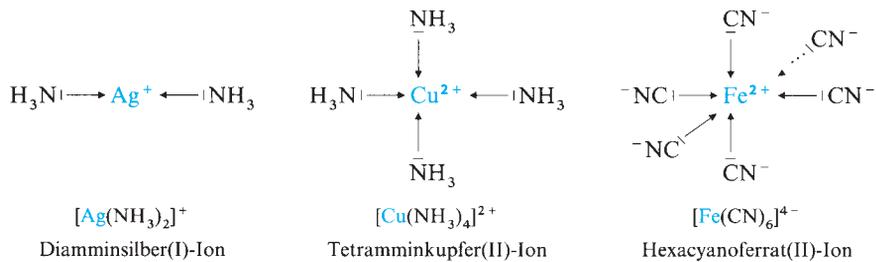


Abb. 1.9 Beispiele für Metallkomplexe mit einfach gebundenen Liganden [L253]

### 1.5.3 Chelatkomplexe

Wie oben erwähnt, kann ein Ligand auch mehrere Bindungsstellen zum zentralen Ion eines Komplexes besitzen. Ein solcher „mehrzähliger“ Ligand wird **Chelator** genannt (von griech. chele = Krebsschere). Die entstandenen Komplexe heißen **Chelatkomplexe**. Chelatkomplexe sind wesentlich stabiler als Komplexe mit einzähligen Liganden. Das Zentralion bildet mit dem Chelator

einen Ring ( $\gg$  Abb. 1.10). Chelatkomplexe entstehen bevorzugt, wenn dieser Ring 5- oder 6-gliedrig ist. Ein solcher Ring ist nicht gespannt und daher besonders stabil.

Biochemisch sind die Kationen einiger Übergangsmetalle als Zentralionen in Chelatkomplexen von Bedeutung.  $\gg$  Tab. 1.1 gibt die Koordinationszahlen wichtiger, biochemisch bedeutender Metallionen sowie Beispiele für ihr Vorkommen in Chelatkomplexen an.

Tab. 1.1 Wichtige Metallionen in Chelatkomplexen: Koordinationszahlen und Beispiele

Metallion	Koordinationszahl	Beispiel
Mg <sup>2+</sup>	6	Chlorophyll (Photosynthese)
Ca <sup>2+</sup>	6	Komplex mit EDTA (Blutgerinnung)
Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	6	Hämoglobin (Sauerstofftransport)
Co <sup>2+</sup> , Co <sup>3+</sup>	6	Cobalamin (Vitamin B <sub>12</sub> )
Cu <sup>2+</sup>	4	D-Penicillamin-Komplex (Entgiftung)
Zn <sup>2+</sup>	4	Alkoholdehydrogenase; Strukturstabilisierung von Insulin; Carboanhydrase (Atmung)

**Jetzt bist du dran!****Zeichenaufgabe**

Zeichne die verschiedenen Doppel- bzw. Dreifachbindungen, die z. B. Kohlenstoff eingehen kann, als Strukturformel und in ihrer Orbitalform.

Zeichne zusätzlich die Energieniveaus der Orbitale. Wie sind die Elektronen verteilt?

**Anregungen zur weiteren Wiederholung**

Erstelle eine Mindmap zu jeder Bindung und verknüpfe je 5 knappe Eckpunkte mit ihr, wie z. B. Polarität, Bindungslänge, ggf. Bindungswinkel, *Sp*-Hybridisierung. Ergänze, was du noch für wichtig erachtest.

Zeichne das Häm-b-Molekül aus Hämoglobin, du wirst es im Examen ggf. erkennen müssen. Überlege dir anhand deiner Zeichnung, wie Sauerstoff gebunden wird.

**Überblick gewinnen**

Nutze deine gesammelten Stichwörter für eine Mindmap oder eine gegliederte Stichwortliste.

Thomas Wenisch

# Vorklinik Finale 4

# Biomoleküle

1. Auflage

**Unter Verwendung von Inhalten von:**  
Maximilian Pfau



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kohlenhydrate</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>Vitamine und Co-Enzyme</b>	<b>37</b>
1.1	Wegweiser	1	5.1	Wegweiser	37
1.2	Monosaccharide	1	5.2	Allgemeines	37
1.3	Disaccharide	6	5.3	Struktur und Funktionen	38
1.4	Oligo- und Polysaccharide	8	5.4	Hypo- und Hypervitaminosen	45
			5.5	Co-Faktoren und Co-Enzyme	46
<b>2</b>	<b>Aminosäuren, Peptide, Proteine</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>Thermodynamik und Kinetik</b>	<b>49</b>
2.1	Wegweiser	11	6.1	Wegweiser	49
2.2	Aminosäuren	11	6.2	Grundbegriffe	49
2.3	Peptide	15	6.3	Freie Enthalpie	50
2.4	Proteine	17	6.4	Reaktionsgeschwindigkeit und Reaktionsordnung	51
2.5	Proteinfaltung und Proteinabbau	18	6.5	Energieprofil	53
2.6	Eigenschaften	19	6.6	Parallelreaktionen	54
2.7	Strukturaufklärung	21	6.7	Katalyse	55
<b>3</b>	<b>Fettsäuren, Lipide</b>	<b>23</b>		<b>Register</b>	<b>57</b>
3.1	Die Stoffklasse der Lipide	23			
3.2	Fettsäuren und Triacylglycerine	24			
3.3	Membranlipide	25			
3.4	Cholesterin und weitere Isoprenoderivate	27			
<b>4</b>	<b>Nukleinsäuren, Nukleotide, Chromatin</b>	<b>31</b>			
4.1	Wegweiser	31			
4.2	Nukleotide	31			
4.3	Nukleinsäuren	32			
4.4	Chromatin	35			

## 1

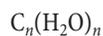
## Kohlenhydrate

## 1.1 Wegweiser

Thomas Wenisch



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. 1.2). Die Monosaccharide können sich untereinander zu Disacchariden (> Kap. 1.3), weiter zu Oligosacchariden und schließlich zu Polysacchariden (> Kap. 1.4) verbinden.

## Jetzt bist du dran!

## Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.



## 1.2 Monosaccharide

Thomas Wenisch



## 1.2.1 Klassifizierung

Die Klassifizierung der Monosaccharide kann nach mehreren Kriterien erfolgen:

- 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 der Zahl der C-Atome (> Tab. 1.1).
- Nach Derivaten, die durch zusätzliche funktionelle Gruppen entstehen. Beispielsweise führt der Ersatz einer OH-Gruppe durch eine Aminogruppe zur Klasse der Aminozucker.
- 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.

## 1.2.2 Beispiele

Im Folgenden werden Beispiele biologisch bedeutender Monosaccharide vorgestellt.

## Triosen

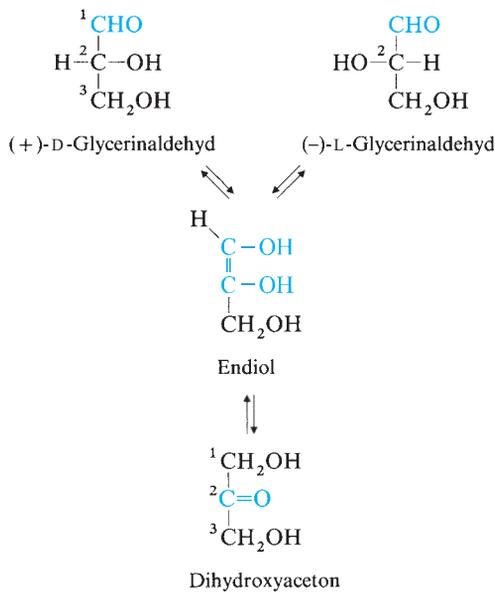
Mit der Kettenlänge  $C_3$  sind die Triosen die kleinsten Monosaccharide.

- Die **Aldotriose** Glycerinaldehyd besitzt am C2-Atom ein Chiralitätszentrum. Glycerinaldehyd ist optisch aktiv, es werden die beiden Enantiomere (+)-D-Glycerinaldehyd und (-)-L-Glycerinaldehyd unterschieden.
- 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 Phosphatestern am C3-Atom, sog. 3-Phosphate, über das Enzym **Isomerase** miteinander im Gleichgewicht.

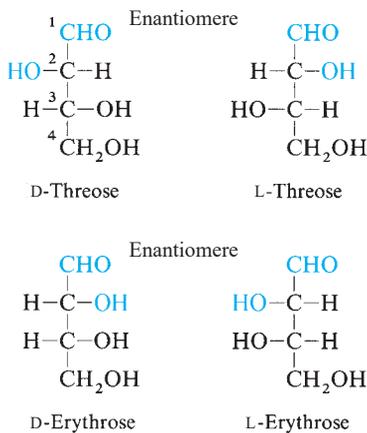
Tab. 1.1 Einteilung der Monosaccharide nach Kettenlänge und Beispiele

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



**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.

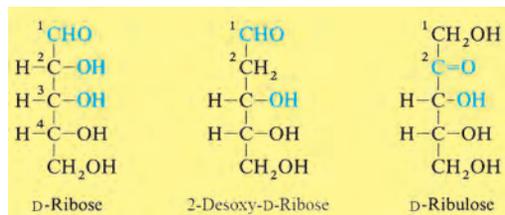
In der Fischer-Projektion wird die Kohlenstoffkette senkrecht, mit der Aldehydgruppe an der Spitze, dargestellt und beginnend mit dem Carbonyl-C-Atom nummeriert. Die Einordnung des Saccharids in die D- oder L-Reihe richtet sich nach dem am weitesten von der Aldehydgruppe entfernten Chiralitätszentrum. 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.

**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).
- Das Fehlen einer OH-Gruppe führt zur **Desoxyribose**. 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.



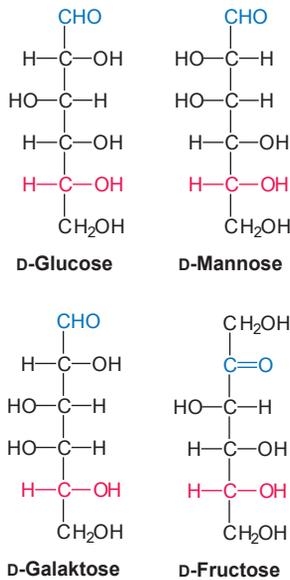
**Hexosen**

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. D-Mannose und D-Galaktose sind daher Epimere der D-Glucose.
- **D-Fructose**, bekannt als Fruchtzucker, besitzt wie alle Ketosen ein Chiralitätszentrum weniger als die entsprechenden Aldosen.

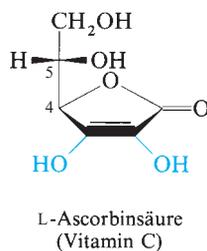
**MERKE**  
Du kannst dir die Stellung der OH-Gruppen leichter merken, wenn du eine nach rechts zeigende OH-Gruppe mit der Silbe „ta“ und eine nach links zeigende mit der Silbe „tü“ bezeichnest. So wird z. B. D-Glucose zu „ta-tü-ta-ta“, D-Galaktose zu „ta-tü-tü-ta“ und D-Mannose zu „tü-tü-ta-ta“.



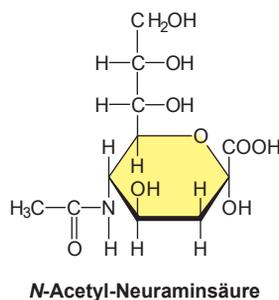
## Derivate der Monosaccharide

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. 1.2) und **Galaktosamin**. In beiden Molekülen ist die OH-Gruppe am C2-Atom des Saccharids durch eine Aminogruppe ersetzt.
- Auch **L-Ascorbinsäure** (Vitamin C) ist ein Zuckerderivat:



- **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.



## 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.

## 1.2.3 Schreibweisen

Zur Darstellung der Monosaccharide sind drei Schreibweisen gebräuchlich, die in > Abb. 1.1 am Beispiel der Glucose gezeigt sind: die Fischer-Projektion, die Haworth-Formel und die Sesselform-Schreibweise.

### Fischer-Projektion

Die **Fischer-Projektion** stellt die Zucker in ihrer offenkettigen Form dar (> Abb. 1.1 o. li.).

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 verbunden. 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. 1.1 o. re.).

Pentosen und Hexosen liegen in wässriger Lösung überwiegend ringförmig, als cyclische Halbacetale vor. 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. Im Unterschied zu den namengebenden Heterocyclen kommen innerhalb der Ringe der Zucker aber keine Doppelbindungen vor.

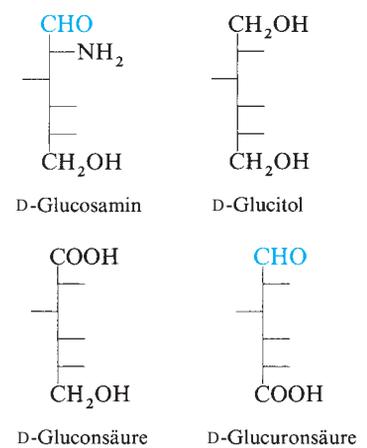
### MERKE

- Durch die Bildung eines cyclischen Halbacetals entsteht ein zusätzliches Chiralitätszentrum.
- **Cave:** Beim Ringschluss einer Hexose geht die OH-Gruppe am C2-Atom „verloren“. 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.

### Haworth-Formel

Die Konfiguration des Rings lässt sich als **Haworth-Formel** darstellen (> Abb. 1.1 u. li.):

- Die Ringatome werden in eine Ebene gelegt.
- Der Ring wird perspektivisch dargestellt, mit Blickrichtung von schräg vorn oben auf die Ringebene.



**Abb. 1.1** Schreibweisen der Monosaccharide: Die offenkettige Form der D-Glucose als Fischer-Projektion in vollständiger (o. li.) und verkürzter Schreibweise (o. re.); das cyclische Halbacetal der Pyranose-Form als Haworth-Formel (u. li.) und in Sesselform-Schreibweise (u. re.). [L253]

- Das ehemalige Hydroxy-O-Atom wird bei den Pyranosen nach rechts hinten, bei den Furanosen nach hinten gelegt. Die Substituenten an den C-Atomen stehen nun oberhalb oder unterhalb der Ringebene.

**MERKE**

Eine in der Fischer-Projektion links stehende Gruppe befindet sich in der Haworth-Formel oberhalb der Ringebene. Zum Merken hilft die „Floh-Regel“: „Fischer Links = oben Haworth“.

Nach der Bildung des cyclischen Halbacetals trägt das ehemalige Carbonyl-C-Atom nun **4 verschiedene Substituenten**. Damit wird es zu einem neuen **Chiralitätszentrum**. Stereoisomere der Saccharide, die sich in der Konfiguration am ehemaligen Carbonyl-C-Atom unterscheiden, werden als **Anomere** bezeichnet. Dieses Kohlenstoffatom wird deshalb auch das **anomere C-Atom** genannt.

**MERKE**

Wenn die OH-Gruppe am anomeren C-Atom axial zur Ringebene steht, handelt es sich um das  **$\alpha$ -Anomer**, bei äquatorialer Stellung um das  **$\beta$ -Anomer** des Kohlenhydrats.

In der Schreibweise nach Haworth zeigt beim  $\alpha$ -Anomer die bestimmte OH-Gruppe nach unten, beim  $\beta$ -Anomer nach oben. Eselsbrücke: „beta ( $\beta$ ) entspricht oben“ merken.

**Sesselform-Schreibweise**

Die Haworth-Formeln zeigen zwar die Konfiguration der Saccharide, ihre Konformation wird aber nicht ausreichend verdeutlicht. Zur vollständigen Darstellung der Konformation der Pyranosen wird die **Sesselform-Schreibweise** verwendet. Erst hier wird die axiale oder äquatoriale Stellung der Substituenten am Ring deutlich erkennbar ( $\gg$  Abb. 1.1 u. re.).

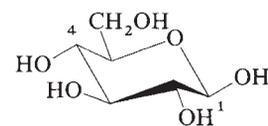
Furanosen werden meist als Haworth-Formeln dargestellt, denn die unterschiedlichen Konformationen des 5-gliedrigen Rings unterscheiden sich energetisch nur unbedeutend.

**1.2.4 Stereochemie**

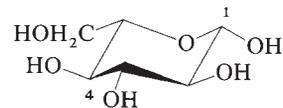
Zunächst wird als Überblick eine Zusammenfassung der wichtigsten Begriffe der Stereochemie gegeben.

- **Stereoisomere** unterscheiden sich in ihrer Konfiguration an chiralen Zentren. Im Fall der Zucker betrifft dies die Stellung der OH-Gruppen.
- **Enantiomere** verhalten sich zueinander wie Bild und Spiegelbild. Sie sind an allen Chiralitätszentren gegensätzlich konfiguriert.
- **Diastereomere** sind Stereoisomere, die keine Enantiomere sind, d. h. sich nicht wie Bild und Spiegelbild verhalten.
- **Epimere** sind Monosaccharide, die sich nur an einem Chiralitätszentrum unterscheiden.
- **Anomere** sind Zucker in der ringförmig zu cyclischen Halbacetalen geschlossenen Form, die sich in ihrer Konfiguration am ehemaligen Carbonyl-C-Atom unterscheiden.
- **D/L-Reihe**: Kohlenhydrate werden nach der D/L-Nomenklatur klassifiziert. Die Einordnung erfolgt nach der Stellung der OH-Gruppe am von der Carbonylgruppe am weitesten entfernten Chiralitätszentrum. Für die Hexosen ist dies das C5-Atom.

- **cis/trans-Konfiguration** bezieht sich als Begriff nicht nur auf die Stellung der Substituenten an einer C=C-Doppelbindung, sondern auch auf eine C-C-Einfachbindung eines Ringsystems.
  - In der *cis*-Stellung stehen beide Substituenten näher beisammen, einer ist axial, der andere äquatorial angeordnet.
  - In der *trans*-Konfiguration stehen sie beide in axialer oder beide in äquatorialer Position.
- **$^4C_1$ - und  $^1C_4$ -Konformation der Pyranosen**: Für die Sesselform der Pyranosen sind zwei Konformationen möglich. Beide Konformationen sind am Beispiel der Enantiomere  $\beta$ -D- und  $\beta$ -L-Glucopyranose gezeigt:
  - Für die wichtigsten D-Hexosen stehen das C4-Atom oberhalb und das C1-Atom unterhalb einer durch den Sessel gelegten Ebene. Diese Anordnung wird abkürzend als  $^4C_1$  bezeichnet. Bei der abgebildeten  $\beta$ -D-Glucopyranose stehen alle Substituenten äquatorial und damit in einer besonders energiereichen und stabilen Form.
  - Ein Umklappen des Sessels führt zur  $^1C_4$ -Konformation, die für die Zucker der L-Reihe gilt.



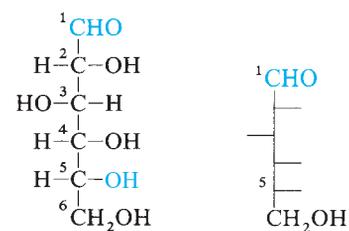
$^4C_1$ -Konformation  
(D-Reihe)



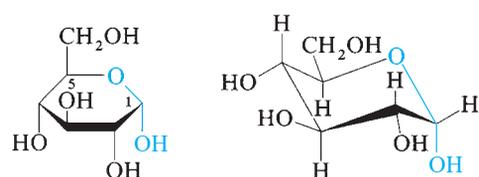
$^1C_4$ -Konformation  
(L-Reihe)

**1.2.5 Reaktionen**

Monosaccharide können auf mehrere Arten reagieren. Dabei entstehen ganz unterschiedliche Reaktionsprodukte. Einige von der Glucose abgeleitete Verbindungen sind in  $\gg$  Abb. 1.2 gezeigt.



D-Glucose



$\alpha$ -D-Glucopyranose

Abb. 1.2 Reaktionsprodukte der D-Glucose [L253]

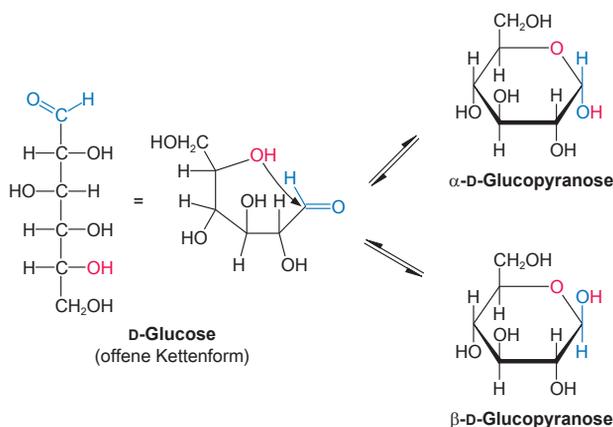
Zunächst werden Reaktionen an der Aldehydgruppe und den OH-Gruppen unterschieden.

## Aldehydgruppe

Bildung cyclischer Halbacetale

Pentosen und Hexosen bilden in wässriger Lösung durch Reaktion der Carbonylgruppe mit einer OH-Gruppe desselben Moleküls cyclische Halbacetale. Pentosen bilden 5-gliedrige Ringe, sie werden in dieser Form als **Furanosen** bezeichnet. Hexosen bilden 6-gliedrige Ringe, die **Pyranosen**.

Aus offenkettiger D-Glucose bildet sich durch Ringschluss **D-Glucopyranose**. Bei der  $\alpha$ -D-Glucopyranose steht die OH-Gruppe am ehemaligen Carbonyl-C-Atom in axialer, bei der  $\beta$ -D-Glucopyranose in äquatorialer Position:



### MERKE

Beide Varianten können sich über die offenkettige Form ineinander umwandeln. Diese ständige Umwandlung wird **Ring-Ketten-Tautomerie** genannt. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der energiereicheren  $\alpha$ -D-Glucopyranose und der energieärmeren  $\beta$ -D-Glucopyranose ein. Das Verhältnis beträgt etwa 37 %  $\alpha$ -Form zu 63 %  $\beta$ -Form.

Während der Gleichgewichtseinstellung zwischen den Isomeren ist eine Änderung der optischen Aktivität der Glucoselösung zu beobachten. Dieser Vorgang wird als **Mutarotation** bezeichnet.

### Reduktion

Die Reduktion der Aldehydgruppe (Hydrierung) liefert Zuckeralkohole. So wird aus D-Glucose D-Glucitol (auch: **D-Sorbit**; > Abb. 1.2). Fructose wird durch Reduktion von Glucose an C<sub>1</sub> und anschließende Oxidation an C<sub>2</sub> synthetisiert.

### Oxidation

Die Aldehydgruppe kann zur Carboxylgruppe oxidiert werden. Die so aus dem Zucker entstandene Säure trägt die Namensendung „-onsäure“. Aus Glucose entsteht Gluconsäure (> Abb. 1.2). Fruc-

tose wird durch Reduktion von Glucose an C<sub>1</sub> und anschließende Oxidation an C<sub>2</sub> synthetisiert.

## Alkoholgruppe

Substitution

Durch Substitution einer Hydroxygruppe durch eine Aminogruppe werden **Aminozucker** gebildet. Hier reagiert bevorzugt die Hydroxygruppe am C<sub>2</sub>-Atom.

Aus Glucose wird der Aminozucker Glucosamin (> Abb. 1.2).

### Reduktion

Die Reduktion einer sekundären Alkoholgruppe führt zu den Desoxyzuckern. Als im Organismus wichtiger Desoxyzucker wurde bereits die 2-Desoxy-D-Ribose genannt.

### Oxidation

Eine Oxidation der primären Alkoholgruppe unter Erhalt der Aldehydgruppe lässt eine zweite Aldehydgruppe entstehen. Diese reagiert weiter zur Carboxylgruppe. Auf diese Weise entstehen im Stoffwechsel die „-uronsäuren“. Aus dem Namen der Säure lässt sich auf das Saccharid schließen. Aus Glucose wird Glucuronsäure (> Abb. 1.2).

Sekundäre OH-Gruppen werden im Allgemeinen nicht oxidiert.

### MERKE

Unterschied zwischen Gluconsäure und Glucuronsäure: Erstere ist einmal am C<sub>1</sub>-Atom (der Carbonylgruppe), letztere zweimal am C<sub>6</sub>-Atom (Alkoholgruppe) oxidiert. Die Glucuronsäure bildet gerne die Ringform aus, während die Gluconsäure stets geöffnet vorliegt.

### CHECK-UP

Definiere die Begriffe Enantiomer, Diastereomer, Anomer und Epimer.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski, Thomas Wenisch

**Vorklinik Finale 5**

# **Zellbiologie, Allgemeine Histologie & Mikrobiologie**

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Björn Jacobi



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zellen, Organellen</b> .....	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>Zellzyklus, Zellteilung, Zelltod</b> .....	<b>29</b>
1.1	Die Zelle .....	1	4.1	Zellzyklus und Zellteilung .....	29
1.2	Die Zellmembran .....	3	4.2	Mitose .....	30
1.3	Der Zellkern .....	5	4.3	Apoptose .....	32
1.4	Zytoplasma, Zytosol .....	7	<b>5</b>	<b>Histologische Methoden und allgemeine Gewebelehre</b> .....	<b>35</b>
1.5	Die Ribosomen .....	7	5.1	Mikroskopie .....	35
1.6	Das endoplasmatische Retikulum .....	8	<b>6</b>	<b>Gewebe</b> .....	<b>39</b>
1.7	Der Golgi-Apparat .....	9	6.1	Allgemeine Gewebelehre .....	39
1.8	Lysosomen .....	10	6.2	Epithelgewebe .....	40
1.9	Peroxisomen .....	10	6.3	Exokrine und endokrine Drüsen .....	42
1.10	Mitochondrien .....	11	<b>7</b>	<b>Mikrobiologie</b> .....	<b>47</b>
1.11	Das Zytoskelett .....	12	7.1	Morphologische Grundformen der Bakterien .....	47
1.12	Übersicht der Zellorganellen menschlicher Zellen ..	15	7.2	Die Bakterienzelle .....	47
<b>2</b>	<b>Transportprozesse</b> .....	<b>17</b>	7.3	Bakterienwachstum .....	50
2.1	Stoffmenge und Konzentration .....	17	7.4	Pilze .....	51
2.2	Osmose .....	17	7.5	Viren .....	51
2.3	Stofftransport .....	18	7.6	Prionen .....	52
2.4	Exo- und Endozytose .....	22	<b>Register</b> .....	<b>54</b>	
2.5	Intrazellulärer Transport .....	23			
<b>3</b>	<b>Signaltransduktion</b> .....	<b>25</b>			
3.1	Signalmoleküle .....	25			
3.2	Signalrezeptoren .....	25			
3.3	Signalkaskaden .....	26			

# 1

# Zellen, Organellen

## 1.1 Die Zelle

Thomas Wenisch



Die Zelle ist das kleinste selbstständig reproduktionsfähige biologische System.

Im Laufe der Evolution haben sich einzelne Zellen zu größeren Organismen zusammengeschlossen. In höheren Organismen nehmen die Zellen jeweils spezialisierte Aufgaben wahr. Entsprechend ihren Funktionen differenzieren sie sich zu den Zellen spezieller Gewebe und Organe.

### 1.1.1 Pro- und Eukaryoten

#### MERKE

Es existieren zwei grundsätzlich verschieden aufgebaute Zellformen, nach denen alle Organismen in zwei Gruppen eingeteilt werden (➤ Tab. 1.1):

- Prokaryoten
- Eukaryoten

Pro- bzw. Eukaryot leitet sich vom griechischen „karyon“ für Kern ab. Das „Pro“ in Prokaryont steht für vor. Das griechische „Eu“ steht für echt, d. h., die Eukaryoten besitzen einen „echten“ Zellkern.

In der Literatur werden auch die Bezeichnungen **Eukaryonten** und **Prokaryonten** verwendet. Die Zellen dieser Organismen werden als **Eukaryozyten** oder kurz **Euzyten** bzw. als **Prokaryozyten** oder auch **Prozyten** bezeichnet.

Merkmale der Eukaryozyten sind:

- Ein von einer Membran umschlossener Zellkern.
- Das Innere der Zelle ist durch die Membranen des endoplasmatischen Retikulums in Kompartimente aufgeteilt.
- Charakteristische Zellorganellen, z. B. Mitochondrien, sind vorhanden.

Prokaryozyten sind einfacher aufgebaut:

- Sie besitzen keinen Zellkern.
- Das Innere der Zelle ist weniger unterteilt.
- Endoplasmatisches Retikulum und Zellorganellen sind nicht vorhanden.

Zu den Eukaryoten gehören alle höheren mehrzelligen Lebewesen, Pflanzen sowie Pilze. Somit handelt es sich bei allen menschlichen Zellen um Euzyten. Der Durchmesser der Euzyten liegt zwischen 5 und 100 µm.

Die Prokaryoten umfassen im weiteren Sinne alle Arten von Bakterien. Der Durchmesser von Bakterien liegt in der Regel zwischen 1 und 5 µm. Euzyten sind damit etwa 10-mal größer als Prozyten und besitzen das 1000-fache Volumen.

**Endosymbiontentheorie** Zunächst entwickelten sich in der Evolution die Prokaryoten. Dann sind aus diesen die Eukaryoten entstanden. Nach der Endosymbiontentheorie haben einige Prokaryoten andere Einzeller angegriffen, umschlossen und in ihr Inneres aufgenommen. Einige der aufgenommenen Zellen haben als Symbionten im Zellinneren weiterexistiert und sich dort zu an spezifische Aufgaben angepassten Zellorganellen entwickelt.

➤ Abb. 1.1 zeigt eine verallgemeinerte Darstellung einer Eukaryotenzelle. Nicht alle der gezeigten Strukturelemente sind in jeder Zelle vorhanden. In einem höheren Organismus haben sich die Zellen entsprechend ihren Aufgaben differenziert und unterscheiden sich oft stark in ihrer äußeren Gestalt. Die Größe der Zellen kann deshalb stark von den in ➤ Tab. 1.1 angegebenen Werten abweichen.

Nachfolgend einige Beispiele für den in ➤ Abb. 1.1 gezeigten Zelltyp:

- Die Zellen der Leber sind relativ groß, etwa 20–30 µm.
- Besonders stoffwechselaktive Zellen sind häufig polyploid, d. h. sie besitzen ein Mehrfaches des kompletten Chromosomensatzes. Etwa die Hälfte der Hepatozyten ist polyploid.
- Die Erythrozyten (roten Blutkörperchen) besitzen 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 lang gestreckte, spindelförmige Gestalt. Die Fasern der glatten Muskulatur haben eine Länge von etwa 0,05–0,5 mm und jeweils einen Zellkern pro Muskelzelle. Die Fasern der quer gestreiften Muskulatur erreichen eine Länge bis zu 15 cm und besitzen mehrere Zellkerne.
- Die Gestalt der Neuronen ist besonders auffällig: Aus dem Zellkörper der Nervenzelle gehen zahlreiche baumartige Verzweigungen hervor, die Dendriten und eine lange, fortleitende Faser, das Axon. Die Axone können eine Länge von über einem Meter erreichen.

Tab. 1.1 Unterschiede zwischen prokaryotischer und eukaryotischer Zelle

	Prozyte	Euzyte
<b>Zellkern</b>	Keiner	Durch Kernmembran von der übrigen Zelle abgegrenzter Zellkern
<b>Chromosomen</b>	Ein ringförmiges „Bakterienchromosom“	Mehr als ein Chromosom im Zellkern
<b>Zellorganellen</b>	Keine	Vorhanden
<b>Durchmesser</b>	~ 1–5 µm	~ 5–100 µm

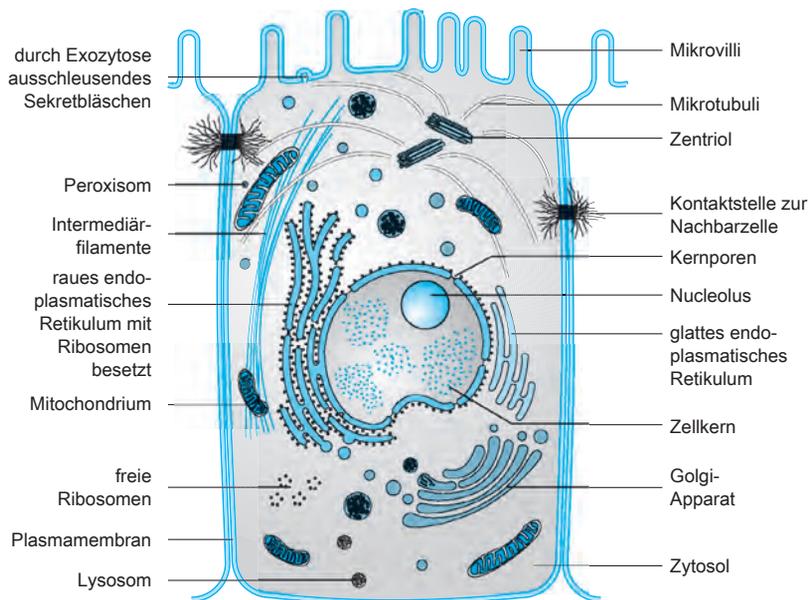


Abb. 1.1 Die Eukaryoten-Zelle [L253]

### 1.1.2 Strukturelemente der Zelle

Die Zelle wird durch eine **Zellmembran** umhüllt, die den Zelleib, das sog. **Zytosom**, gegen die äußere Umgebung abgrenzt. Die Zellmembran ist selektiv für einzelne Stoffe durchlässig und ermöglicht somit den ständigen Stoffaustausch zwischen der Zelle und ihrer Umgebung.

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 ist abhängig vom jeweiligen Zelltyp, sie liegt meist zwischen 1 : 7 und 1 : 10.

Das Zytoplasma enthält weitere Strukturelemente, die Organellen genannt werden. Sie erfüllen spezielle Funktionen. Systeme von Membranen grenzen einzelne Kompartimente des Zytoplasmas gegeneinander ab, sodass verschiedene Stoffwechselprozesse gleichzeitig ablaufen können.

In der Zytologie ist folgende Nomenklatur üblich: Der Zelleib, das Zytosom, ohne äußere Membran und unter Ausschluss extrazellulärer Produkte wie Knochen oder Knorpelsubstanz wird **Protoblast** genannt. Wird daraus der Zellkern entfernt, bleibt das **Zytoplasma** übrig, das noch die Zellorganellen enthält. Ohne die Zellorganellen verbleibt als Grundsubstanz das **Zytosol**.

Die Strukturelemente der Zelle lassen sich einteilen in:

- Zellkern
- Membranöse Organellen
  - Zellmembran
  - Endoplasmatisches Retikulum
  - Mitochondrien
  - Lysosomen
  - Peroxisomen
  - Golgi-Apparat

- Nichtmembranöse Organellen
  - Ribosomen
  - Mikrofilamente
  - Mikrotubuli
  - Zentriolen
- Fakultative Organellen
  - Zilien
  - Geißeln (Flagellen)

#### CHECK - UP

- Worin unterscheiden sich Prozyten und Euzyten?
- Was besagt die Endosymbiontentheorie?
- Erkläre die Begriffe Protoblast, Zytoplasma und Zytosol.
- In welche Klassen lassen sich die Strukturelemente einer Zelle einteilen?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Die Zellmembran

Thomas Wenisch



### 1.2.1 Aufbau

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 Extrazellularraum ermöglicht sowie die Aufnahme von Nährstoffen und Abgabe von Stoffwechselprodukten erlaubt.

#### MERKE

Die Grundstruktur der Zellmembran bildet eine Doppelschicht aus amphipathischen Lipidmolekülen, den **Phospholipiden** und **Glykolipiden**.

Den Hauptanteil bilden die **Phospholipide**. Ihr Verhalten ist amphipatisch. Sie besitzen eine hydrophile Kopfgruppe, bestehend aus Phosphat und Cholin, und zwei hydrophobe, durch Kohlenwasserstoffketten gebildete Schwänze.

In wässrigem Milieu lagern sich die Phospholipide mit einander zugewandten hydrophoben Schwänzen zu einer Doppelschicht zusammen (➤ Abb. 1.2). Die hydrophilen Kopfregionen zeigen zu beiden Seiten in das wässrige Milieu. Die Dicke dieses Bilayers beträgt etwa 6–10 nm.

Eingelagert in die Membran sind **Glykolipide**, bestehend aus Fettsäureketten und hydrophilen Oligosaccharidketten mit 1–15 Zuckern.

#### MERKE

Die Zellmembran ist asymmetrisch aufgebaut: Die Glykolipide sind nur in die äußere Schicht der Membran eingelagert und die Zuckerstrukturen sind immer zur Außenseite der Zelle gerichtet.

Die Moleküle der Plasmamembran sind **gegeneinander verschieblich**. Die Membran verhält sich ähnlich wie eine zähe Flüssigkeit. Dies wird mit dem Begriff **Fluid-Mosaic-Model** beschrieben.

In die Plasmamembran sind **Membranproteine** eingelagert, die in die Membran eintauchen oder sie ganz durchringen können. Die Membranproteine sind innerhalb der Membran verschiebbar. Auf der extrazellulären Seite sind die Membranproteine häufig glykolysiert.

Membranen eukaryotischer Zellen enthalten einen **hohen Anteil an Cholesterin**. Die zwischen die Phospholipidmoleküle eingelagerten Cholesterinmoleküle sind für die Stabilisierung der Membranfluidität verantwortlich.

Die Membranlipide und -proteine werden im **endoplasmatischen Retikulum** synthetisiert und im **Golgi-Apparat** modifiziert.

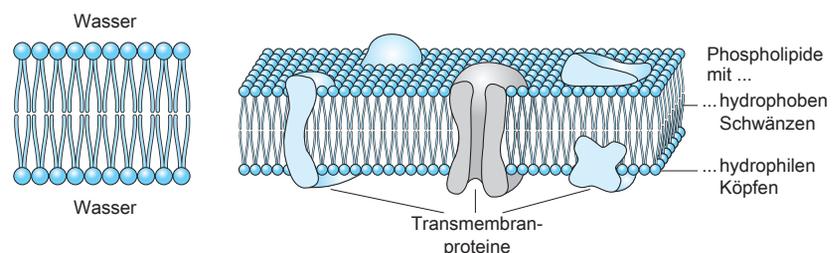
### 1.2.2 Glykokalix

Die Glykokalix bildet eine Schicht verschiedener Polysaccharide, die die **Außenseite der Zelle** überzieht (➤ Abb. 1.3). Sie ist art- und zellspezifisch.

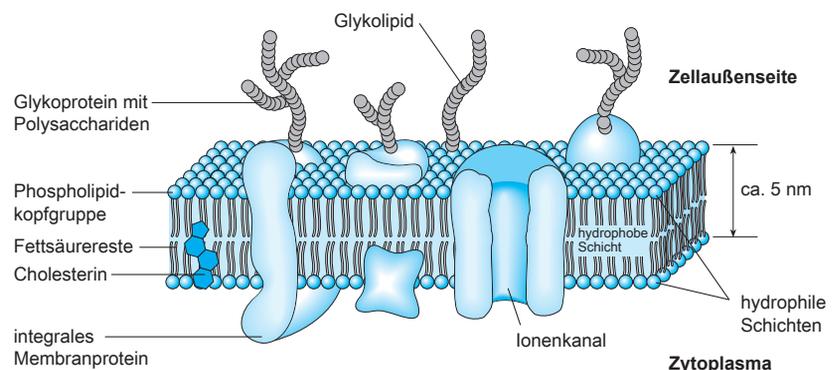
Die Bestandteile der Glykokalix wirken als Antigene. Ein Beispiel für die Zellerkennung aufgrund der Merkmale der Glykokalix sind die Blutgruppenantigene.

### 1.2.3 Membranproteine

Spezielle Aufgaben der Zellmembran werden durch die darin eingelagerten Proteine bestimmt (➤ Abb. 1.3). **Periphere Proteine** lagern sich an der Innen- oder Außenseite der Membran meist an andere Membranproteine an. **Integrale Proteine**, die in die Membran eingelagert sind, besitzen hydrophobe Bereiche, mit denen sie in die Membran eintauchen und hydrophile Regionen, die an einer oder zu beiden Seiten aus der Membran herausragen.



**Abb. 1.2** Künstliche Lipiddoppelschicht (li.) und das Fluid-Mosaic-Modell einer Biomembran mit in die Doppelschicht eingelagerten Membranproteinen (re.) [L253]



**Abb. 1.3** Feinstruktur der Plasmamembran einer tierischen Zelle [L106]

Funktionen der Membranproteine sind:

- **Verbindung** zu Zytoskelett und extrazellulärer Matrix.
- **Transport:** Ein Transmembranprotein kann einen hydrophilen Kanal durch die Membran bilden. Der Kanal ist selektiv für bestimmte Substanzen durchlässig.
- **Enzymaktivität:** Membranproteine können als Enzyme fungieren. Das aktive Zentrum des Proteins ist zum benachbarten wässrigen Milieu hin gerichtet. Häufig fungieren unterschiedliche, nahe beieinanderliegende Membranenzyme als Multienzymkomplex, der mehrere aufeinanderfolgende Schritte eines Stoffwechselwegs katalysiert.
- **Signalübertragung:** Einige Proteine fungieren als ligandenabhängige Rezeptoren, z. B. für Hormone.
- **Zellerkennung:** Glykoproteine dienen als spezifische Merkmale, die von anderen Zellen erkannt werden.
- **Zellverbindung:** Verbindungen der Membranproteine benachbarter Zelle stellen verschiedene Arten von Zellkontakten her.

### 1.2.4 Membrankontakte

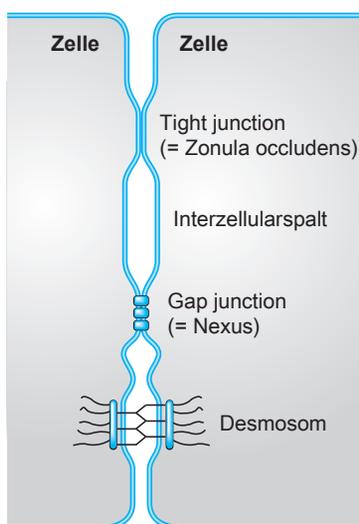
In mehrzelligen Organismen verbinden sich Zellen zu größeren funktionsfähigen Komplexen. Es werden die in > Abb. 1.4 schematisch dargestellten Zellverbindungen unterschieden:

- **Tight Junction** dienen zur Abdichtung der Zellen des Epithelgewebes.
- **Gap Junction** ermöglichen über kleine Kanäle interzelluläre Kommunikation.
- **Desmosomen** stellen eine punktförmige Haftverbindung zwischen Zellen dar.

**Intrazellulärer Spalt** Normalerweise sind die Zellen eines Gewebeverbands durch einen etwa 10–20 nm breiten interzellulären Spalt voneinander getrennt.

**Zonula adhaerens** Als Zonula adhaerens wird ein Bereich bezeichnet, in dem die Zellen über eine klebstoffartige Wirkung der interzellulären Substanz mechanisch fest miteinander verbunden sind, aber trotzdem ein kleiner interzellulärer Spalt verbleibt.

**Tight Junction** Tight Junctions (Zonulae occludentes, Verschlusskontakt) sind gürtelförmige Nähte um die Zelle, an denen die Membranen benachbarter Zellen sozusagen „verschmelzen“.



**Abb. 1.4** Zell-Zell-Kontakte tierischer Zellen: Tight Junction, Gap Junction und Desmosom [L253]

Epithelzellen von Dünndarm, Blase, Niere und der Gehirngefäße sind auf diese Weise miteinander verbunden. Die Abdichtung verhindert, dass Extrazellulärflüssigkeit zwischen den Zellen hindurch an die Oberfläche des Epithels austritt. Tight Junctions werden durch Transmembranproteine wie **Claudine** oder **Occludin** gebildet.

**Gap Junction** **Gap Junctions** (Nexus, Kommunikationskontakt) koppeln die Zellen elektrisch und metabolisch. Durch die direkte Kommunikation werden Signale zwischen den Zellen besonders schnell übertragen. Das **Membranprotein Connexin** bildet einen innen hohlen, transmembranen Zylinder. Diese röhrenförmigen Poren erlauben den Durchtritt von Salzen, Zuckern, Aminosäuren und anderen kleinen Molekülen bis zu einem Molekulargewicht von etwa 2000 Dalton.

**Desmosomen** Desmosomen (Maculae adhaerens) sind **punktförmige Haftverbindungen in Geweben, die stärkerer mechanischer Beanspruchung ausgesetzt sind**. Der Interzellulärraum ist an diesen Stellen mit 25 nm etwas verbreitert und die Zellmembran beinhaltet transmembranöse Proteine: **Desmogleine** und **Desmocilline**. An den Desmosomen sind mittels des Proteins **Desmoplakin** **Intermediärfilamente** aus Keratin verankert, die eine Verbindung zum Zytoskelett herstellen.

**Hemidesmosomen** Hemidesmosomen haben die äußere Form eines halben Desmosoms, sie sind aber aus anderen Proteinen aufgebaut. Hemidesmosomen heften die Zellen an eine extrazelluläre Matrix, z. B. die **Zellen eines Epithels an die Basalmembran**.

### 1.2.5 Transportmechanismen

Bei der **Diffusion** durchdringen Moleküle die Zellmembran entlang eines Konzentrationsgefälles. Die Lipiddoppelschicht der Zellmembran ist durchlässig für kleine ungeladene Moleküle wie  $H_2O$  oder  $CO_2$ , aber auch für hydrophobe fettlösliche Moleküle, z. B. Steroidhormone.

Bei der **gerichteten Diffusion** sind die Moleküle an einen Carrier gebunden und werden zusammen mit diesem durch die Membran transportiert. Dieser Vorgang tritt in der Zelle mit oder ohne ATP-Verbrauch auf.

Für geladene Moleküle oder Makromoleküle ist die Zellmembran dagegen undurchlässig. Hier sind für den Transport spezielle **Membrantransportproteine** notwendig:

- Im einfachsten Fall bildet ein Kanalprotein eine Art Tunnel.
- Carrier-Moleküle binden Ionen oder Moleküle und transportieren sie durch die Membran.

**Passiver Transport** Beim passiven Transport diffundieren niedermolekulare Verbindungen wie Zucker und Aminosäuren ohne Energieverbrauch durch einen Transportkanal.

**Aktiver Transport** Der aktive Transport erfolgt gegen einen Konzentrationsgradienten und erfordert daher Energie. Die notwendige Energie wird durch Hydrolyse von ATP oder auch durch Co-Transport entlang eines Gradienten gewonnen. Beispiel für den aktiven Transport ist die  $Na^+/K^+$ -Pumpe. Die Energie der ATP-Hydrolyse wird benutzt, um  $Na^+$  gegen das Konzentrationsgefälle aus der Zelle heraus- und  $K^+$  hineinzubefördern.

**CHECK-UP**

- Beschreibe den Aufbau der Zellmembran.
- Was beschreibt das Fluid-Mosaic-Modell?
- Was ist die Glykokalix?
- Welche Funktionen erfüllen die Membranproteine?
- Welche Arten von Zell-Zell-Kontakten kennst du? Welche Funktionen erfüllen sie und wie sind die Kontaktstellen aufgebaut?
- Welche Transportmechanismen kennst du?

**Jetzt bist du dran!****Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

**1.3 Der Zellkern**

Thomas Wenisch

**1.3.1 Lokalisation und Funktion****MERKE**

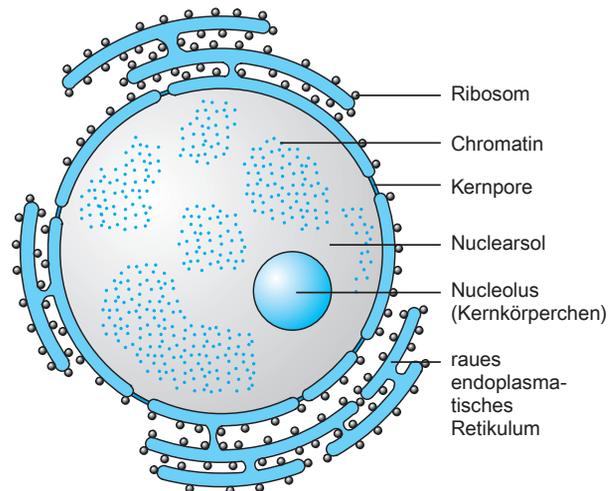
Im **Nucleus** (Zellkern, > Abb. 1.5) befindet sich die genetische Information der Zelle. Dort ist die Hauptmenge der DNA lokalisiert. Außerhalb des Zellkerns ist DNA nur noch in den Mitochondrien, bei Pflanzen in den Chloroplasten zu finden.  
Im Zellkern finden die Replikation und die Transkription der DNA statt.

Der Durchmesser des Zellkerns der Eukaryontenzelle beträgt **etwa 5 µm**. In der Regel hat jede Zelle einen Zellkern. Eine Ausnahme bilden die reifen Erythrozyten, die keinen Zellkern mehr aufweisen. Einige Zellen sind mehrkernig, das betrifft Leberzellen, manche Nervenzellen sowie die Fasern der Skelettmuskulatur und die knochenabbauenden Osteoklasten. Durch Fusion von Einzelzellen entstandene mehrkernige Einheiten werden als **Synzytium** bezeichnet.

Der Inhalt des Zellkerns wird als **Karyoplasma** bezeichnet. Das Kerninnere ist vom Zytoplasma durch eine **Kernhülle** getrennt.

**1.3.2 Die Kernhülle**

Die Kernhülle ist eine Doppelmembran. Jede Membran besteht aus einer Lipiddoppelschicht mit darin eingelagerten Proteinen. Die äußere Kernmembran geht in das Membransystem des endo-



**Abb. 1.5** Der Zellkern mit dem endoplasmatischen Retikulum [L253]

plasmatischen Retikulums (ER) über. Sie ist wie die Membran des rauen endoplasmatischen Retikulums (rER) mit Ribosomen besetzt.

Der Raum zwischen beiden Membranen der Kernhülle beträgt etwa 20–40 nm. Er wird als **Perinuklearzisterne** bezeichnet und steht direkt mit den Hohlräumen des endoplasmatischen Retikulums in Verbindung.

Die Kernhülle weist **Kernporen** mit einem Durchmesser von etwa 100 nm auf. Die Kernporen werden von Proteinkomplexen gebildet. Innere und äußere Kernmembran gehen an den Rändern der Kernporen ineinander über. Der Durchmesser der zentralen Pore beträgt etwa 40 nm. Die Innenseite der Kernhülle ist von der **Kernlamina**, einem netzartigen Geflecht von Proteinfasern bedeckt.

Über die Poren der Kernhülle können kleine wasserlösliche Moleküle zwischen Zytoplasma und dem Karyoplasma diffundieren. Für Makromoleküle existieren selektive, aktive Transportmechanismen.

Die Proteine des Karyoplasmas stammen alle aus dem Zytoplasma. Die direkte Verbindung zwischen dem Kern und den Kanälen des endoplasmatischen Retikulums ermöglicht den schnellen Transport von am ER synthetisierten Proteinen in den Kern. Enzyme zur Nukleinsynthese wie DNA- und RNA-Polymerasen sowie Histone zur Strukturierung neusynthetisierter DNA werden in den Kern transportiert. Aus dem Kern heraus werden RNA und neugebildete Ribosomenuntereinheiten transportiert.

**MERKE**

Die Kernhülle trennt die aufeinanderfolgenden Prozesse Transkription und Translation der Proteinbiosynthese räumlich voneinander. Diese Trennung ermöglicht eine posttranskriptionelle Modifizierung der angereiften RNA.

**Kernlokalisierungssignale** Kernlokalisierungssignale sind Aminosäuresequenzen in Proteinen, die den aktiven Transport des Proteins in den Zellkern vermitteln. Modifikationen dieser Kernlokalisierungssignale, etwa durch Phosphorylierung, können den aktiven Kerntransport unterbinden. Die Proteine verbleiben dann im Zytoplasma, wo sie unter Umständen andere Funktionen ausüben. Durch die unterschiedliche Lokalisationen und Funktionen einiger Proteine findet eine Signalübermittlung zwischen Zytoplasma und dem Zellkern statt.

### 1.3.3 Der Nucleolus

Der Nucleolus (Kernkörperchen) ist ein Bereich im Zellkern, der große DNA-Schleifen enthält. Er besitzt keine eigene Membranhülle. Nach Färbung ist er im Lichtmikroskop im Inneren des Zellkerns erkennbar.

Im Nucleolus wird ribosomale RNA mit hoher Geschwindigkeit transkribiert. Die gebildete rRNA assoziiert mit aus dem Zytoplasma kommenden ribosomalen Proteinen zu Vorstufen der Ribosomen-Untereinheiten.

Der Nucleolus bildet sich an charakteristischen Stellen der Chromosomen, den sog. **Nucleolus Organizer Regions** (NOR), die Cluster von Genen ribosomaler RNA enthalten.

Es können, abhängig von der Organismenart und dem Entwicklungsstadium der Zelle, mehrere Nucleoli existieren. Die Nucleoli werden während der Zellteilung aufgelöst und danach wieder neu gebildet. In der Mitose sind die **Nucleolus Organizer Regions** als sekundäre Einschnürungen an den Chromosomen zu erkennen. Sie finden sich an den **akrozentrischen Chromosomen** 13, 14, 15, 21 und 22.

### 1.3.4 Das Chromatin

Die DNA ist in Form von Chromatin organisiert. Nur während der Zellteilung verdichtet sich das Chromatin, sodass getrennte Strukturen, die Chromosomen, unterscheidbar werden.

Das Chromatin besteht aus der DNA und **darin eingelagerten basischen Proteinen, den Histonen**.

Es werden 5 Histonsorten unterschieden: H1, H2A, H2B, H3 und H4. Je zwei Untereinheiten H2A, H2B, H3 und H4 bilden ein Oktamer, dessen kugelförmige Quartärstruktur zwei umlaufende Rillen aufweist. In diese Rillen legt sich ein DNA-Strang von 140 Basenpaaren (bp) Länge. Der Faden läuft dann 60 bp weiter, bevor er auf die nächste Histonkugel aufgespult wird ( > Abb. 1.6a).

So entsteht ein perlschnurartiges Gebilde. Seine kleinste Einheit ist das Nukleosom, das aus einem DNA-Faden von insgesamt 200 bp Länge und den Histonen H2A, H2B, H3 und H4 besteht ( > Abb. 1.6b). Zwischen den Nukleosomen lagern sich die H1-Histone an.

Durch nochmalige Spiralisierung entsteht eine **DNA-Superhelix** und daraus eine Super-Superhelix ( > Abb. 1.6c).

Man unterscheidet zwischen Euchromatin und Heterochromatin. Das locker verteilte **Euchromatin** ist weitgehend entspiralisiert. An diesen **aktiven Bereichen des Genoms** wird die **Erbinformation transkribiert**. Das dichter gepackte **Heterochromatin** kann nicht abgelesen werden und wird deshalb als inaktives Genmaterial bezeichnet.

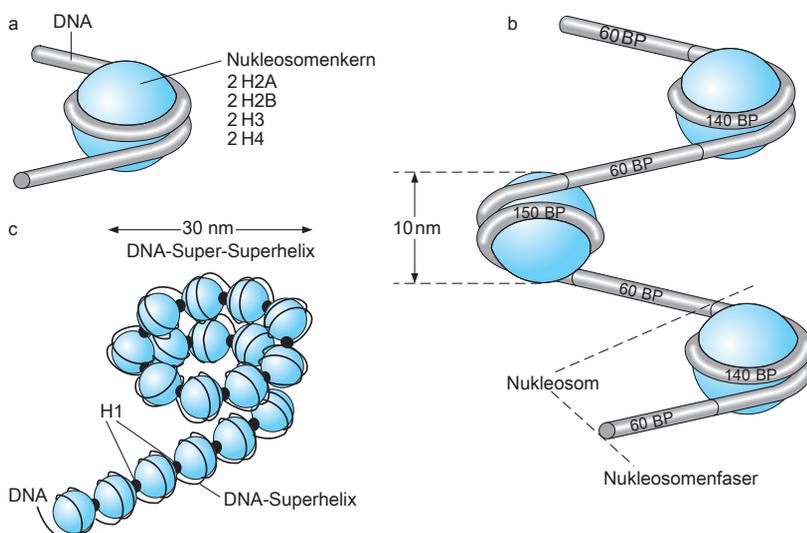
#### CHECK - UP

- Beschreibe den Aufbau des Zellkerns und der Kernlamina.
- Welche Funktion haben die Kernporen?
- Was geschieht im Nucleolus?
- Was versteht man unter NOR, an welchen Chromosomen sind sie zu finden?
- Beschreibe den Aufbau des Chromatins.
- Was sind Histone?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.



**Abb. 1.6** a Aufbau des Chromatins: Nukleosom mit Histonkugel und herumgewundenem DNA-Strang, b perlschnurartige Nukleosomenkette, c DNA-Superhelix und Super-Superhelix [L253]

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski, Thomas Wenisch

Vorklinik Finale 6

# Molekularbiologie, Meiose & Embryologie

1. Auflage

**Unter Verwendung von Inhalten von:**

Oliver Adolph, Fabian Bock, Björn Jacobi, Maximilian Pfau



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Enzyme</b> .....	1	<b>5</b>	<b>Vererbungslehre</b> .....	29
1.1	Katalysatoren .....	1	5.1	Die Chromosomen des Menschen .....	29
1.2	Enzyme als Biokatalysatoren .....	1	5.2	Kartierung von Genen .....	30
1.3	Michaelis-Menten-Modell .....	2	5.3	Repetitive Elemente .....	31
1.4	Enzymregulation .....	3	5.4	Formale Genetik .....	32
1.5	Enzymhemmung .....	3	5.5	Imprinting .....	36
1.6	Enzymklassen .....	5	5.6	Mitochondriale Vererbung .....	37
			5.7	Multifaktorielle Vererbung .....	37
<b>2</b>	<b>DNA-Replikation und -Transkription</b> .....	7	5.8	Gonosomen, Geschlechtsbestimmung und Differenzierung .....	38
2.1	DNA-Replikation .....	7	5.9	Mutationen .....	39
2.2	Transkription .....	10	5.10	Populationsgenetik .....	41
2.3	DNA-Schäden und -Reparatur .....	13			
<b>3</b>	<b>Translation und Proteinprozessierung</b> .....	17	<b>6</b>	<b>Meiose und Entwicklung der Gameten</b> .....	43
3.1	Translation .....	17	6.1	Meiose .....	43
3.2	Kotranslatinaler Proteintransport und Proteinmodifikationen .....	21	6.2	Entwicklung der Gameten .....	46
<b>4</b>	<b>Biochemische Verfahren</b> .....	23	<b>7</b>	<b>Embryologie</b> .....	51
4.1	Enzymatisch-optische Tests .....	23	7.1	Befruchtung und Implantation .....	51
4.2	Polymerase-Ketten-Reaktion .....	25	7.2	Frühentwicklung .....	54
4.3	DNA-Klonierung .....	26	7.3	Organogenese und Ausbildung der äußeren Körperform .....	58
4.4	Western Blotting .....	27			
				<b>Register</b> .....	61

## 1

## Enzyme

## 1.1 Katalysatoren

Thomas Wenisch, Voraufgabe: Maximilian Pfau



Enzyme wirken in biochemischen Reaktionen als Katalysatoren.

## KLINIK

Definition eines Katalysators: „Ein Katalysator ist ein Stoff, der die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion erhöht, ohne selbst dabei verbraucht zu werden und ohne die endgültige Lage des thermodynamischen Gleichgewichts dieser Reaktion zu verändern.“

Wilhelm Ostwald, Nobelpreisträger für Chemie 1909

Die wichtigsten Eigenschaften aller Katalysatoren sind:

- Katalysatoren **beschleunigen eine Reaktion**.
- Der Katalysator liegt nach der Reaktion **unverändert** vor. Er wird nicht verbraucht.
- Durch Katalysatoren stellt sich ein chemisches Gleichgewicht schneller ein. Katalysatoren haben **keinen Einfluss** auf die **Lage des Gleichgewichts**.

## Jetzt bist du dran!

## Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Enzyme als Biokatalysatoren

Thomas Wenisch, Voraufgabe: Maximilian Pfau



Enzyme beschleunigen als Biokatalysatoren Reaktionen, indem sie die Aktivierungsenthalpie ( $E_A$ ) herabsetzen (> Abb. 1.1). Dies geschieht z. B. dadurch, dass sie den Übergangszustand einer Reaktion energetisch stabilisieren.

Die meisten Biokatalysatoren sind Proteine. Einige Biokatalysatoren bestehen aus Ribonukleinsäuren und nennen sich Ribozyme.

## KLINIK

**nRNA-Welt-Hypothese** Heute geht man davon aus, dass Ribonukleinsäuren der Ursprung des Lebens sind. Zum einen besitzen sie die Fähigkeit, chemische Reaktionen zu katalysieren, zum anderen können sie gleichzeitig als Informationsspeicher dienen und sich selbst vervielfältigen.

## 1.2.1 Enzymatische Katalyse

Eine enzymkatalysierte Reaktion läuft nach folgendem Schema ab: Enzym + Substrat  $\leftrightarrow$  Enzymsubstratkomplex  $\leftrightarrow$  Enzymproduktkomplex  $\leftrightarrow$  Enzym + Produkt

Enzyme binden ihre Substrate mit ihrem **aktiven Zentrum**. Das ist der Bereich, der die katalytische Aktivität aufweist. Das aktive Zentrum besteht meist aus vielen hydrophoben Aminosäuren, so dass der Bereich frei von Wasser ist. Es existieren zwei Modelle für die spezifische Bindung von Substraten:

- **Schlüssel-Schloss-Prinzip:** Das aktive Zentrum des Enzyms ist eine dreidimensionale Struktur. Es kann als passende Gegenform das Substrat binden (> Abb. 1.2).
- **Induced-fit-Modell:** Manche Substrate treten bereits vor dem Binden mit dem Enzym in Wechselwirkung und verändern dessen Konformation so, dass es anschließend das Substrat binden kann (> Abb. 1.2).

In den meisten Fällen erfolgt die Substratbindung **nicht kovalent**. Es entsteht der Enzymsubstratkomplex. Nach der Katalyse der Reaktion entsteht der Enzymproduktkomplex, der anschließend in das Enzym und die Produkte zerfällt. Das Enzym kann dann die nächste Reaktion katalysieren.

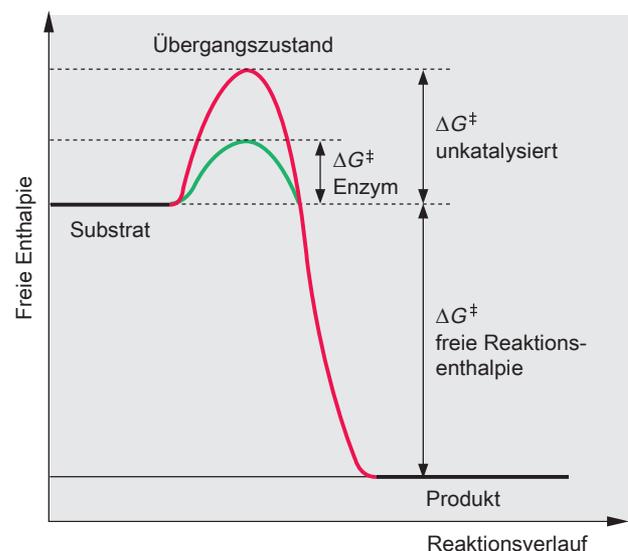


Abb. 1.1 Herabsetzen der Aktivierungsenthalpie durch Enzyme [L253]

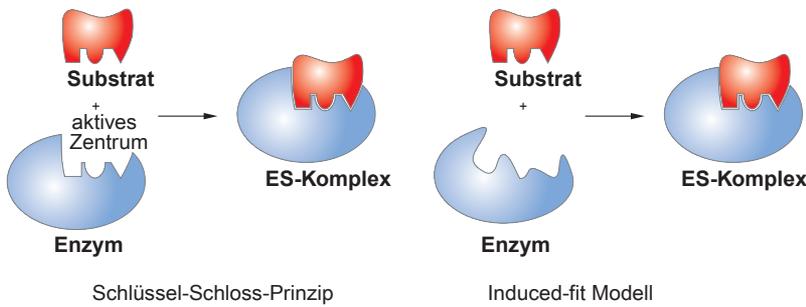


Abb. 1.2 Vergleich zwischen Schlüssel-Schloss-Prinzip und Induced-fit-Modell [L253]

### 1.2.2 Enzymeigenschaften

Wichtige Enzymeigenschaften sind:

- **Substratspezifität:** Enzyme können meisten nur ein ganz bestimmtes Substrat binden.
- **Wirkungsspezifität:** Enzyme katalysieren immer nur eine ganz bestimmte Reaktion.
- **pH-Abhängigkeit:** Die Geschwindigkeit von enzymkatalysierten Reaktionen ist pH-abhängig, da der pH-Wert Einfluss auf die Konformation von Proteinen hat.

**Jetzt bist du dran!**

**Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

**MERKE**

Die Michaelis-Menten-Konstante  $K_M$  ist ein Maß für die Affinität des Enzyms zu seinem Substrat. Ist der  $K_M$ -Wert hoch, ist die Affinität des Enzyms zum Substrat niedrig. Ist der  $K_M$ -Wert niedrig, ist die Affinität des Enzyms zum Substrat hoch.

### 1.3.2 Wichtige Sonderfälle

Es gibt drei wichtige Sonderfälle der Michaelis-Menten-Gleichung:

- **[S] >>  $K_M$ :** In diesem Fall kann  $K_M$  im Nenner vernachlässigt werden, sodass der Quotient  $[S]/[S]$  übrig bleibt. Folglich ist bei hohen Substratkonzentrationen  $v = v_{max}$ .
- **[S] =  $K_M$ :** Ist die Substratkonzentration genauso groß wie der  $K_M$ -Wert, ergibt sich  $v = \frac{1}{2} \times v_{max}$ . Die Reaktionsgeschwindigkeit ist nun die **halb maximale Geschwindigkeit**.
- **[S] <<  $K_M$ :** Ist die Substratkonzentration gegenüber dem  $K_M$ -Wert sehr klein, kann sie im Nenner vernachlässigt werden. Deshalb gilt  $v = [S]$ . Demnach steigt in diesem Bereich die Geschwindigkeit bei Erhöhung der Substratkonzentration linear an.

**MERKE**

Der  $K_M$ -Wert kennzeichnet die **Substratkonzentration (Einheit mol/l)**, bei der die Enzyme mit halb maximaler Geschwindigkeit arbeiten.

## 1.3 Michaelis-Menten-Modell

Thomas Wenisch, Voraufgabe: Maximilian Pfau



Das **Michaelis-Menten-Modell** (MM-Theorie) beschreibt die Reaktionskinetik einfacher Enzymreaktionen. Es stellt einen Zusammenhang zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit und der Substratkonzentration her (> Abb. 1.3).

### 1.3.1 Michaelis-Menten-Gleichung

Die Michaelis-Menten-Gleichung lautet:

$$v = v_{max} \times \frac{[S]}{K_M + [S]}$$

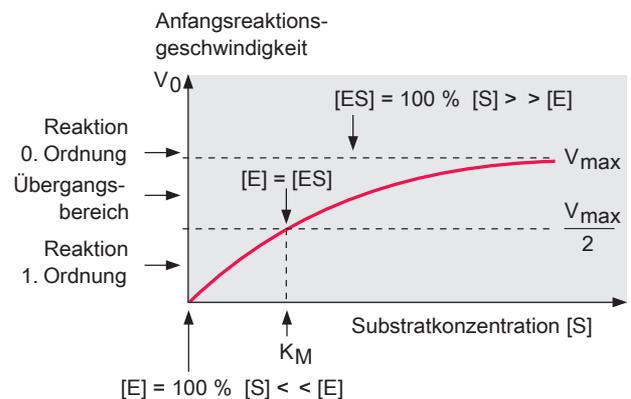


Abb. 1.3 Michaelis-Menten-Modell [L253]

### 1.3.3 Lineweaver-Burk-Diagramm

Durch Bildung des **Kehrwerts** lässt sich die Michaelis-Menten-Gleichung als sog. Lineweaver-Burk-Diagramm in Form einer Geraden darstellen (➤ Abb. 1.4).

Der Schnittpunkt mit der x-Achse entspricht  $-1/K_M$ , der Schnittpunkt mit der y-Achse entspricht  $1/v_{\max}$ .

$$\frac{1}{v_0} = \frac{1}{v_{\max}} + \frac{K_M}{v_{\max}} \times \frac{1}{[S]}$$

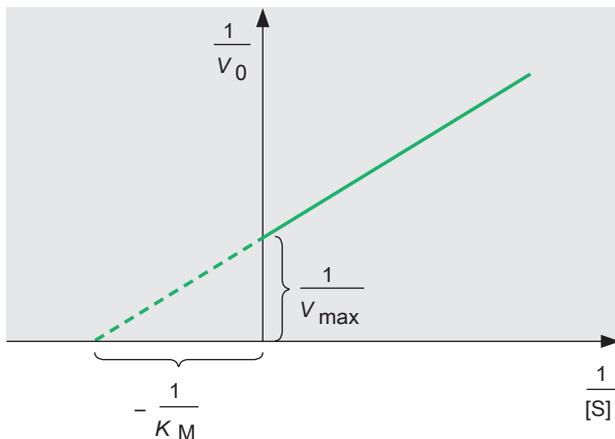


Abb. 1.4 Lineweaver-Burk-Diagramm [L253]

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.4 Enzymregulation

Thomas Wenisch, Voraufgabe: Maximilian Pfau



### 1.4.1 Allosterie

Als **Allosterie** wird in einem Enzym das Vorhandensein weiterer Bindungsstellen neben dem aktiven Zentrum bezeichnet, sog. allosterische Zentren. Hier können sog. **Effektoren** binden und über

eine **Konformationsänderung** die Aktivität des Enzyms beeinflussen. Man unterscheidet zwischen positiven und negativen Effektoren. Positive Effektoren wirken stimulierend, negative Effektoren inhibierend.

### 1.4.2 Interkonvertierung

Manche Enzyme können durch **Phosphorylierung** an freien **OH-Gruppen** aktiviert oder inaktiviert werden. Durch Dephosphorylierung kann dieser Effekt zu einem späteren Zeitpunkt wieder umgekehrt werden. Man spricht von der Interkonvertierung eines Enzyms. Gerade im Kohlenhydratstoffwechsel werden so ganze Stoffwechselwege an- und abgeschaltet. Die Enzyme der Glykolyse sind beispielsweise alle nur dephosphoryliert aktiv.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.5 Enzymhemmung

Thomas Wenisch, Voraufgabe: Maximilian Pfau



Bei der Enzymhemmung wird die reversible von der irreversiblen Hemmung unterschieden.

Bei der **irreversiblen Hemmung** geht das Enzym eine dauerhafte Bindung mit dem Hemmstoff ein und wird dabei funktionsunfähig.

Ein Sonderfall der irreversiblen Hemmung sind sog. **Suizidinhibitoren**. Sie binden im aktiven Zentrum und werden anschließend vom Enzym umgesetzt. Erst nach dieser Katalyse bleiben sie fest an das Enzym gebunden und hemmen es irreversibel.

Die **reversible Hemmung** lässt sich in drei Untergruppen gliedern:

- Kompetitive Hemmung
- Nichtkompetitive Hemmung
- Unkompetitive Hemmung

### 1.5.1 Kompetitive Hemmung

Ein kompetitiver Inhibitor ähnelt dem Substrat und konkurriert mit dem Substrat um die Bindungsstelle im aktiven Zentrum. Blockierte Enzyme können keine weiteren Substrate binden und es wird eine erhöhte Substratkonzentration benötigt um  $v_{max}$  zu erreichen (> Abb. 1.5).

**MERKE**

Kompetitive Inhibition:  $K_M \uparrow$ ;  $v_{max} = \text{konstant}$   
 Der Effekt der kompetitiven Hemmung lässt sich durch Erhöhung der Substratkonzentration wieder aufheben.

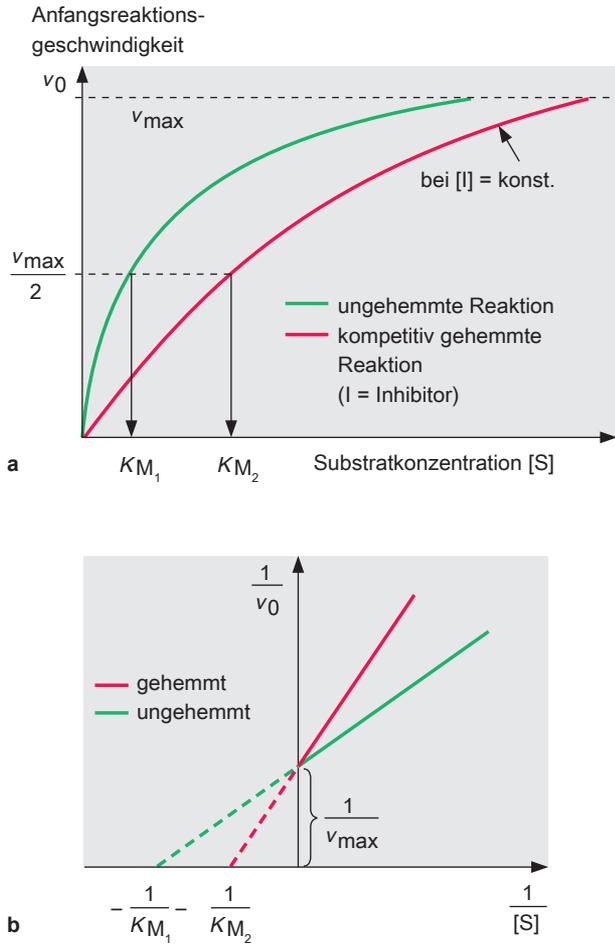


Abb. 1.5 Kompetitive Hemmung. a) Michaelis-Menten-Modell, b) Lineweaver-Burk-Diagramm [L253]

### 1.5.2 Nichtkompetitive Hemmung

Nichtkompetitive Hemmung wird auch als allosterische Hemmung bezeichnet. Ein nichtkompetitiver Inhibitor hat keine Ähnlichkeit mit dem Substrat und bindet daher außerhalb des aktiven Zentrums. Die Reaktionsgeschwindigkeit des Enzyms nimmt ab (> Abb. 1.6). Die Affinität des Enzyms zu seinem Substrat wird allerdings nicht beeinflusst.

**MERKE**

Nichtkompetitive Inhibition:  $K_M = \text{konstant}$ ;  $v_{max} \downarrow$   
 Der Effekt lässt sich nicht durch Erhöhung der Substratkonzentration aufheben.

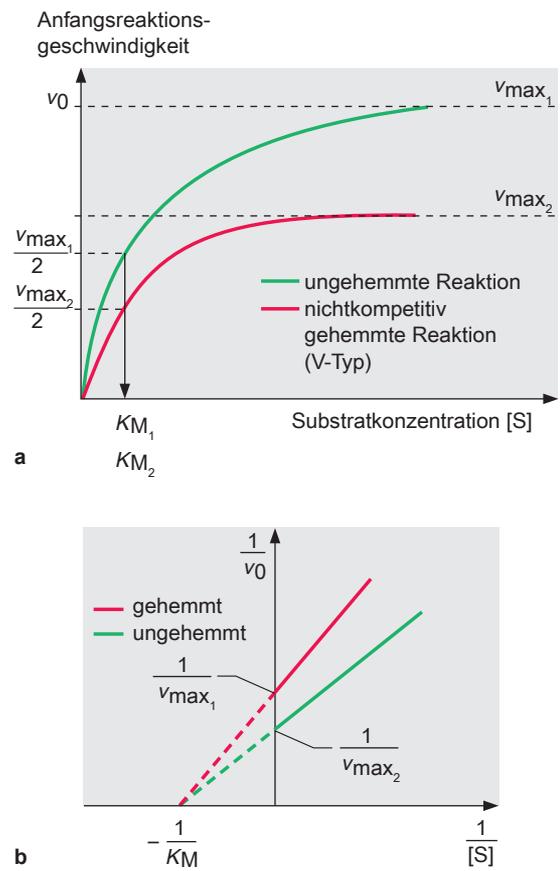


Abb. 1.6 Nichtkompetitive Hemmung. a) Michaelis-Menten-Modell, b) Lineweaver-Burk-Diagramm [L253]

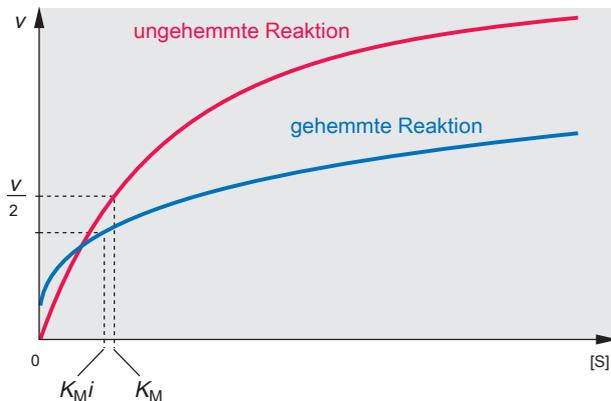
### 1.5.3 Unkompetitive Hemmung

Der Hemmstoff bei der unkompetitiven Hemmung kann nur mit dem **Enzym-Substrat-Komplex** reagieren. Dabei nehmen sowohl  $K_M$  als auch  $v_{\max}$  ab (> Abb. 1.7).

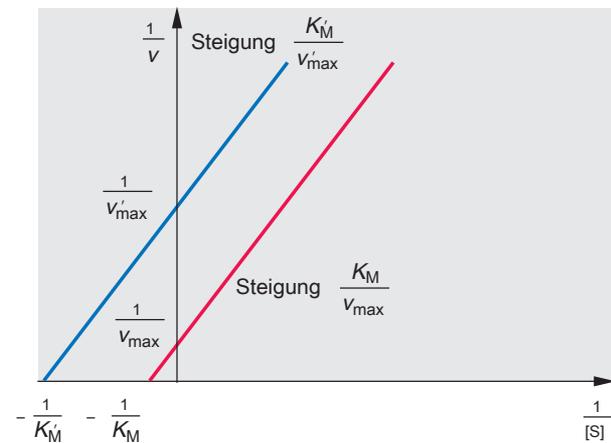
#### MERKE

Unkompetitive Inhibition:  $K_M \downarrow$ ;  $v_{\max} \downarrow$

Dieser Typus der Enzymhemmung kommt vergleichsweise selten vor.



a



b

Abb. 1.7 Unkompetitive Hemmung. a) Michaelis-Menten-Modell, b) Lineweaver-Burk-Diagramm [L253]

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.6 Enzymklassen

Thomas Wenisch, Voraufgabe: Maximilian Pfau



Nach der IUPAC und IUBMB lassen sich Enzyme in sechs Klassen unterteilen. Katalysiert ein Enzym unterschiedliche Reaktionstypen, wird es mehreren Enzymklassen zugerechnet. Die sechs Klassen sind:

1. **Oxidoreduktasen** katalysieren Redoxreaktionen.
2. **Transferasen** übertragen die funktionelle Gruppe von einem Substrat auf ein anderes.
3. **Hydrolasen** spalten Bindungen unter Einsatz von Wasser.
4. **Lyasen** (Synthasen) katalysieren die Spaltung komplexerer Moleküle oder deren Synthese aus einfachen Substraten.
5. **Isomerasen** katalysieren die Umwandlung von chemischen Isomeren.
6. **Ligasen** (Syntethasen) katalysieren die Bildung oder Spaltung von Substanzen und verbrauchen dabei ATP.

#### MERKE

**Synthetasen** verbrauchen ATP, **Synthasen** benötigen hingegen kein ATP.

#### CHECK-UP

- Nenne die wichtigsten Eigenschaften, die Enzyme besitzen.
- Was gibt der  $K_M$ -Wert an?
- Welchen Werten entsprechen die y- und x-Achsenabschnitte des Lineweaver-Burk-Diagramms?
- Wie lässt sich der Effekt der kompetitiven Inhibition aufheben?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

---

**Jetzt bist du dran!**

---

**Zeichenaufgabe**

Zeichne den Ablauf der enzymatischen Katalyse.

Wie können enzymatische Reaktionen reguliert und gehemmt werden? Wie wird die kompetitive Hemmung unterteilt? Schreibe dir das Prinzip der verschiedenen Vorgänge auf.

**Anregungen zur weiteren Wiederholung**

Zeichne das Michaelis-Menten-Modell für die verschiedenen Regulationsarten.

Welche Enzymklassen kennst du?

**Überblick gewinnen**

Nutze deine gesammelten Stichwörter für eine Mindmap oder eine gegliederte Stichwortliste.

---

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski, Vanessa Maaßen,  
Fabian Rengier

## Vorklinik Finale 7

# Bewegungsapparat 1

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Oliver Adolph



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeine Anatomie</b> .....	1	3.3	Oberarm und Unterarm .....	28
1.1	Allgemeine Anatomie .....	1	3.4	Hand .....	33
1.2	Bewegungsapparat .....	2	3.5	Nerven .....	37
			3.6	Arterien .....	41
<b>2</b>	<b>Binde- und Stützgewebe</b> .....	7	3.7	Venen .....	42
2.1	Zellen .....	7	3.8	Lymphknoten und Lymphgefäße .....	43
2.2	Moleküle .....	16	3.9	Angewandte und topografische Anatomie .....	44
<b>3</b>	<b>Obere Extremität</b> .....	23		<b>Register</b> .....	47
3.1	Grundkenntnisse der Entwicklung .....	23			
3.2	Schultergürtel .....	23			

# 1

# Allgemeine Anatomie

## 1.1 Allgemeine Anatomie

Christoph Jaschinski



### 1.1.1 Gestalt

Der menschliche Körper besteht aus dem Stamm sowie den beiden oberen und unteren Extremitäten. Der Stamm wird in Kopf (**Caput**), Hals (**Collum**) und Rumpf (**Truncus**) untergliedert. Der Rumpf lässt sich weiter in Rücken (**Dorsum**), Brustkorb (**Thorax**), Bauchraum (**Abdomen**) und Becken (**Pelvis**) unterteilen.

### 1.1.2 Allgemeine Begriffe

Um eine internationale Verständlichkeit und Einheitlichkeit zu erreichen, wurden die anatomischen Begriffe erstmals 1895 in der **Nomina anatomica** katalogisiert. Die neueste Fassung heißt **Terminologia anatomica** und stammt aus dem Jahr 1998. Sie umfasst ca. 7500 Begriffe.

#### MERKE

- **Norm:** statistisch am häufigsten vorkommende Variante
- **Variabilität:** Möglichkeit der Variation, also der Ausbildung einer Bandbreite von Varianten, die von der Norm abweichen
- **Metametrie:** eine in der Biologie vorkommende Symmetrieform, bei der ähnliche Elemente hintereinander gestaffelt sind, z. B. bei der Somitensegmentierung

### 1.1.3 Richtungs- und Lagebezeichnungen

Zur Kennzeichnung der Richtung und Lage von Körperteilen werden im anatomischen Sprachgebrauch spezielle Begriffe verwendet (> Tab. 1.1, > Abb. 1.1).

#### MERKE

Allen Bezeichnungen liegt die **anatomische Grundstellung** zugrunde: aufrecht stehender Körper mit herabhängenden Armen und nach vorn geöffneten Handinnenflächen. In der Chirurgie verwendet man die **chirurgische Grundstellung**, welche der anatomischen bis auf die Armhaltung entspricht. Hier zeigen die Daumen nach vorn und die Handinnenflächen zum Körper.

Tab. 1.1 Übersicht über Orientierungsbegriffe

Fachbegriff	Umgangssprache
<b>dexter</b>	rechts
<b>sinister</b>	links
<b>kranial</b> ( <i>lat. cranium = Schädel</i> )	zum Kopfende hin
<b>kaudal</b> ( <i>lat. cauda = Schwanz</i> )	zum Steißende hin
<b>superior</b>	obere(r)
<b>inferior</b>	untere(r)
<b>ventral</b> ( <i>lat. venter = Bauch</i> )	zum Bauch hin
<b>dorsal</b> ( <i>lat. dorsum = Rücken</i> )	zum Rücken hin
<b>anterior</b>	nach vorn
<b>posterior</b>	nach hinten
<b>rostral</b> ( <i>lat. rostrum = Schnabel</i> )	zur Nase hin
<b>occipital</b> ( <i>lat. occiput = Hinterhaupt</i> )	zum Hinterhaupt hin
<b>proximal</b>	rumpfnah
<b>distal</b>	rumpffern
<b>medial</b>	auf die Medianebene zu
<b>lateral</b>	von der Medianebene weg
<b>Median</b>	in der Medianebene
<b>zentral</b>	zum Körperinneren hin
<b>peripher</b>	zur Körperoberfläche hin
<b>superficialis</b>	zur Oberfläche hin
<b>profundus</b>	in die Tiefe
<b>radial</b> ( <i>lat. radius = Speiche</i> )	zur Speichenseite (Daumen- seite) hin
<b>ulnar</b> ( <i>lat. ulnar = Elle</i> )	zur Ellenseite (Kleinfinger- seite) hin
<b>tibial</b> ( <i>lat. tibia = Schienbein</i> )	zur Schienbeinseite (Groß- zehenseite) hin
<b>fibular</b> ( <i>lat. fibula = Wadenbein</i> )	zum Wadenbeinseite (Klein- zehenseite) hin
<b>palmar</b> ( <i>lat. palma = Handinnenfläche</i> )	zur Handinnenfläche hin
<b>dorsal</b>	zum Handrücken hin
<b>plantar</b> ( <i>lat. planta = Fußsohle</i> )	zur Fußsohle hin
<b>dorsal</b>	zum Fußrücken hin

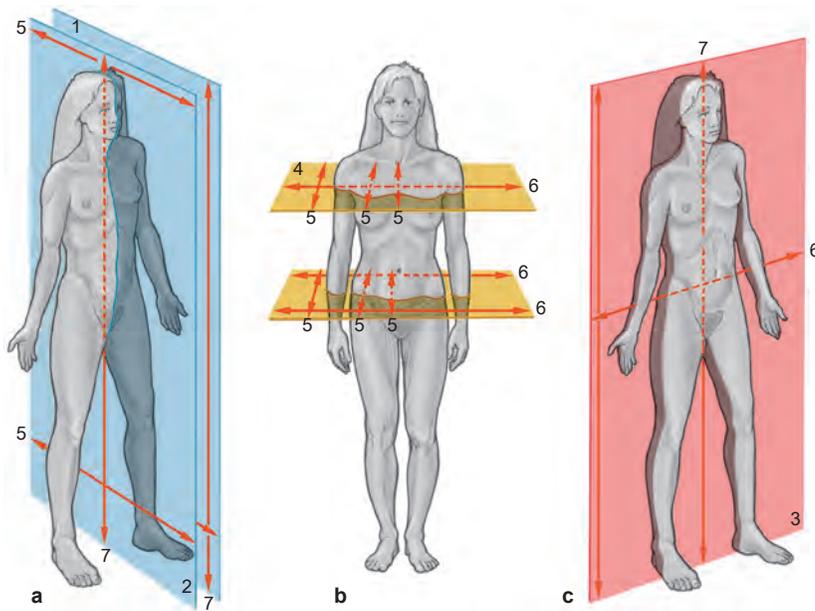
### 1.1.4 Körperachsen und Körperebenen

3 **Körperachsen** sind grundlegend:

- **Sagittalachse:** verläuft in ventrodorsaler Richtung durch den Körper.
- **Transversalachse:** verläuft von einer zur anderen Seite quer durch den Körper. Sie steht senkrecht zur vertikalen Achse.
- **Longitudinalachse:** verläuft in kraniokaudaler Richtung durch den Körper. Sie steht senkrecht zur horizontalen Achse.

Außerdem unterscheidet man folgende **Körperebenen**:

- **Medianebene (Mediansagittalebene):** vertikale Ebene durch die Körpermitte, teilt den Körper in zwei Hälften



- 1 Sagittalebene
- 2 Mediansagittalebene
- 3 Frontalebene
- 4 Transversalebene
- 5 Sagittalachse
- 6 Transversalachse
- 7 Longitudinalachse

**Abb. 1.1** Die wichtigsten Ebenen, Lagebezeichnungen und Bewegungsrichtungen (K. Dalkowski aus Paulsen/Waschke. Sobotta Atlas der Anatomie. 25. A. 2022 © Elsevier GmbH) [S700-L126]

- **Sagittalebene** (Paramedianebene): vertikale Ebene parallel zur Medianebene, teilt den Körper in rechts und links von ihr liegende Strukturen
- **Transversalebene**: horizontale Ebene, teilt den Körper in über und unter ihr liegende Strukturen
- **Frontalebene**: Ebene parallel zur Stirn (Os frontale), teilt den Körper in vor und hinter ihr liegende Strukturen

### CHECK - UP

- Was versteht man unter Norm, Variabilität und Metametrie?
- Wie verläuft die Sagittalebene?
- Nenne 5 gegensätzlich Richtungs- und Lagebezeichnungen!

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Bewegungsapparat

Christoph Jaschinski



### 1.2.1 Knochen

Die Knochen (*lat.* Ossa) übertragen die Kontraktionskraft der Muskeln. Sie schützen die Eingeweide, z. B. als Schädelknochen oder als Brustkorb, und sind Ionenspeicher für Kalzium, Magnesium, Phosphat und Natrium. I. d. R. besteht der menschliche Körper aus ca. **210 Knochen**, die entsprechend ihrer Funktion und Lage verschiedene Erscheinungsformen besitzen:

- **Ossa longa** (lange Knochen, Röhrenknochen): z. B. Oberarmknochen, Oberschenkelknochen
- **Ossa brevia** (kurze Knochen): z. B. Hand- und Fußwurzelknochen
- **Ossa plana** (flächenhafte Knochen): z. B. Schädeldach, Schulterblatt oder Darmbein
- **Ossa pneumatica** (lufthaltige Knochen): z. B. Oberkiefer oder Stirnbein mit Nasennebenhöhlen
- **Ossa sesamoidea** (in Sehnen eingelagerte Knochen): z. B. Knie- scheibe oder Erbsenbein
- **Ossa accessoria** (zusätzliche, überzählige Knochen): z. B. am Fuß

Aufbau eines Knochens am Beispiel der Röhrenknochen:

- **Diaphyse**: bildet das Mittelstück des Knochens. Man nennt sie auch Schaft.
- **Metaphyse**: ist die trichterförmige Erweiterung des Schafts zwischen Diaphyse und Epiphysenfuge

- **Epiphysenfuge:** ist die Längenwachstumszone. Sie liegt zwischen Metaphyse und Epiphyse und verknöchert nach Abschluss des Längenwachstums zur **Linea epiphysialis**.
- **Epiphyse:** bildet das Endstück des Röhrenknochens.
- **Apophyse:** ist ein metaphysärer Knochenvorsprung, der als Ansatzpunkt für Muskeln dient und als Processus, Tuberositas oder Tuberculum bezeichnet wird.

Gewebsschichten bei einem reifen Knochen von außen nach innen:

- **Periost** (Knochenhaut): überzieht die gesamte äußere Oberfläche des Knochens mit Ausnahme der Gelenk- und Sehnenansatzflächen
- **Substantia compacta:** solider Teil des Knochens
- **Substantia spongiosa:** gitterförmiger Teil des Knochens, der sich aus parallel zum Druck- oder Biegemoment ausgerichteten Knochenbälkchen (**Trabekeln**) zusammensetzt. Dieser Teil ist für die Leichtbauweise des Knochens verantwortlich und beherbergt das **Knochenmark**.
- **Endost:** bedeckt die innere Oberfläche des Knochens und liegt den Trabekeln der Markhöhle und den Gefäßkanälen auf.

## Knochenmark

Beim **Knochenmark** unterscheidet man rotes und gelbes Knochenmark. Das rote Knochenmark (**Medulla ossium rubra**) besteht aus blutbildendem Gewebe und findet sich beim Neugeborenen noch in fast allen Knochen. Beim Erwachsenen wird das rote Knochenmark insbesondere in den **Diaphysen** der langen Röhrenknochen durch das fetthaltige, gelbe Knochenmark (**Medulla ossium flava**) ersetzt.

### MERKE

- **Rotes Knochenmark** findet man in:
  - Epiphysen der langen Röhrenknochen
  - Rippen, Brustbein
  - Schulterblatt, Schlüsselbein
  - Wirbelkörper
  - Becken- und Schädelknochen
- **Gelbes Knochenmark** findet man in Diaphysen der langen Röhrenknochen.

### MERKE

Das gesamte Knochenmark macht etwa 5 % des Körpergewichts aus, wobei paritätisch 2,5 % auf gelbes und rotes Knochenmark entfallen.

### FOKUS

- **Arthrose:** Verschleißerscheinung, die oft durch überstarke Belastung z. B. infolge einer bestehenden Fettleibigkeit, aber auch posttraumatisch oder altersbedingt entstehen kann.
- **Arthritis:** Eine Gelenkentzündung kann grundsätzlich bakteriell oder abakteriell verursacht sein. Die häufigste Form ist die **rheumatoide Arthritis**, eine rheumatologische Erkrankung.

## Zuggurtung

Der Knochen besitzt eine geringe Stabilität gegenüber Biegespannung. Bänder und Muskeln, die in nahezu paralleler Richtung zum Knochen verlaufen, minimieren die Biegespannung, indem sie entweder durch Kontraktion ein der Biegespannung entgegengesetztes Drehmoment bewirken oder einen Teil der Biegespannung aufnehmen.

- **Ligamentäre Zuggurtung:** z. B. Tractus iliotibialis am Oberschenkel
- **Muskuläre Zuggurtung:** z. B. M. biceps brachii am Oberarm oder M. brachioradialis am Unterarm

## 1.2.2 Gelenke

Knochen sind über **Gelenke** (*lat. Articulatio, Abk. Art.*) miteinander verbunden.

### Synarthrosen

**Synarthrosen** (**unechte Gelenke**) verbinden die Knochen mit Füllgewebe aus Bindegewebe bei geringer bis mittelgradiger Beweglichkeit. Man unterscheidet:

- **Syndesmosen:** Bandgelenke (**Art. fibrosa**) findet man als Membrana interossea an Unterarm und Unterschenkel, als Fontanellen am Kopf des Neugeborenen oder als Gomphosis zur Verankerung der Zähne in Ober- und Unterkiefer.
- **Synchondrosen:** Knorpelgelenke (**Art. cartilaginea**) sind die Epiphysenfugen, der Rippenknorpel und die Schambeinfuge.
- **Synostosen:** verknöcherte Synarthrosen sind das Kreuzbein (Os sacrum), die Hüftknochen (Os coxae) und nach Verknöcherung die geschlossenen Epiphysenfugen.

### Diarthrosen

In den **echten Gelenken** (**Diarthrosen, Art. synovialis**) trennt ein Gelenkspalt die beiden Knochenenden. Diarthrosen bilden daher eine diskontinuierliche Verbindung aus und haben eine gute Beweglichkeit.

### MERKE

- **Ankylose:** pathologische Verknöcherung eines Gelenks.
- **Arthrodesese:** operative Gelenkversteifung als Therapieform.
- **Pseudarthrose:** Falschgelenk nach missglückter Frakturheilung.
- **Hemiarthrose:** Übergangsformen von Symphysen zu Diarthrosen.
- **Amphiarthrose** („straffes Gelenk“): Diarthrosen, die aufgrund kräftiger Bandführung in ihrer Beweglichkeit stark eingeschränkt sind. Beispiele: Iliosakral-, Interkarpal- oder Karpometakarpalgelenke II–IV.

Diarthrosen lassen sich in Gelenke, in denen nur 2 Skelettelemente miteinander artikulieren, **Art. simplex**, und solche, in denen mehr als 2 Skelettelemente miteinander artikulieren, **Art. composita**, unterteilen. In den meisten echten Gelenken artikuliert ein konvex geformter Gelenkkopf mit einer konkav geformten Gelenkpfanne. Entsprechend ihrer Form lassen sich Diarthrosen gliedern:

- **Kugelgelenk** (Art. spheroida): halbmondförmiger Gelenkkopf in einer dazu passend ausgehöhlten Gelenkpfanne, z. B. Schultergelenk.  
Sonderform: **Nussgelenk** (Art. cotylica), bei dem die Gelenkpfanne mehr als die Hälfte des Gelenkkopfs umschließt, z. B. Hüftgelenk.
- **Eigelenk** (Art. ellipsoidea): ellipsoid gekrümmter Gelenkkopf in einer dazu passend ausgehöhlten Gelenkpfanne, z. B. proximales Handgelenk.

- **Sattelgelenk** (Art. sellaris): Beide Skelettelemente sind sattelförmig geformt, z. B. **Daumensattelgelenk**.
- **Bikondyläres Gelenk** (Art. bicondylaris): 2 Rollen auf einer planen Gelenkpfanne. Bikondyläre Gelenke können in einer gemeinsamen Gelenkhöhle, z. B. Kniegelenk, oder voneinander getrennt liegen, z. B. Atlantooszipitalgelenk.
- **Scharniergelenk** (Art. ginglymus): walzenförmiger Gelenkkopf in einer zangenförmigen Gelenkpfanne, z. B. ulnarer Teil des Ellenbogengelenks oder oberes Sprunggelenk.
- **Radgelenk** (Art. trochoidea): konkave Gelenkpfanne dreht sich um feststehenden Zapfen, z. B. distales Radioulnargelenk oder Atlantoaxialgelenk.
- **Zapfengelenk** (Art. trochoidea): Zapfen als Gelenkkopf dreht sich in konkaver Gelenkpfanne, z. B. proximales Radioulnargelenk.
- **Planes Gelenk** (Art. plana): 2 plane Gelenkflächen, die sich in äußerst begrenztem Maße gegeneinander verschieben lassen, z. B. Intervertebralgelenke.

**MERKE**

Die Gelenkflächen von Diarthrosen sind in den meisten Fällen mit hyalinem Knorpel bedeckt. Ausnahmen sind das Kiefergelenk und das Art. sternoclavicularis, die mit Faserknorpel überzogen sind.

**Bewegungen**

Jede Gelenkbewegung (> Tab. 1.2) kann auf 2 Grundbewegungen zurückgeführt werden:

- **Translation:** Alle Punkte des bewegten Körpers bewegen sich in dieselbe Richtung. Der Körper bewegt sich geradlinig.
- **Rotation:** Alle Punkte des bewegten Körpers beschreiben eine Kreisbahn um eine Rotationsachse. Der Körper vollführt eine Drehbewegung.

**KLINIK**

Man verwendet die sog. **Neutral-0-Methode** zur standardisierten Beurteilung des **Bewegungsausmaßes eines Gelenks**. Sie bezieht sich auf die chirurgische Grundstellung und wird als Code in Winkelgraden ausgedrückt. Dabei gibt der erste Winkel die Auslenkung in die körperferne Richtung (Extension, Abduktion, Außenrotation) an. Der zweite Winkel lautet im Normalfall 0° (= Neutralstellung), der dritte Winkel beschreibt die Auslenkung in die körpernahe Richtung (Flexion, Adduktion, Innenrotation).

**MERKE**

Im Raum kann sich ein Körper – den 3 Achsen des Koordinatensystems entsprechend – geradlinig in 3 Richtungen verschieben bzw. um 3 Achsen rotieren. Daher unterscheidet man 3 Freiheitsgrade der Translation und 3 Freiheitsgrade der Rotation.

Tab. 1.2 Allgemeine Fachbegriffe der Gelenkbewegungen

Begriff	Bedeutung
Anteversion/Retroversion	Vorheben/Rückführen
Extension/Flexion	Streckung/Beugung
Abduktion/Adduktion	Abspreizen/Heranführen
Elevation	Anheben der Arme über die Horizontale heraus
Außenrotation/Innenrotation	Drehbewegung vom Körper weg/ Drehbewegung zum Körper hin
Pronation/Supination	Einwärtsdrehung/Auswärtsdrehung

Den Freiheitsgraden der Rotation entsprechend lassen sich die Diarthrosen einteilen:

- **1 Freiheitsgrad:** Scharniergelenk, Rad-/Zapfengelenk
- **2 Freiheitsgrade:** Eigelenk, Sattelgelenk, bikondyläres Gelenk
- **3 Freiheitsgrade:** Kugelgelenk.

**Zusatzeinrichtungen der Gelenke**

- **Disciarticulares:** scheibenförmige Zwischenscheiben bestehend aus straffem Bindegewebe oder **Faserknorpel**. Sie dienen der Gelenkführung und optimieren die Druckverteilung. Z. B. im **Kiefergelenk**, im proximalen Handgelenk zwischen Elle und Handwurzelknochen und im Art. sternoclavicularis
- **Menisciarticulares:** halbmondförmige Strukturen im Kniegelenk. Dort gleichen sie die Unebenheiten des Schienbeinplateaus aus und vergrößern die Kontaktfläche zwischen Schienbein und Oberschenkelknochen.
- **Labrum articulare:** Gelenklippen, welche die Gelenkfläche vergrößern und den Gelenkkopf in der Gelenkpfanne stabilisieren, z. B. Schulter- und Hüftgelenk
- **Intrartikuläre Bänder:** haben verschiedenste Funktionen. Das Lig. capitis femoris führt die A. capitis femoris, die im Kindes- und Jugendalter den Oberschenkelkopf versorgt. Die Kreuzbänder, Ligg. cruciata, stabilisieren das Kniegelenk.

**1.2.3 Skelettmuskeln**

Gliederung der Skelettmuskeln nach unterschiedlichen Formen (> Abb. 1.2):

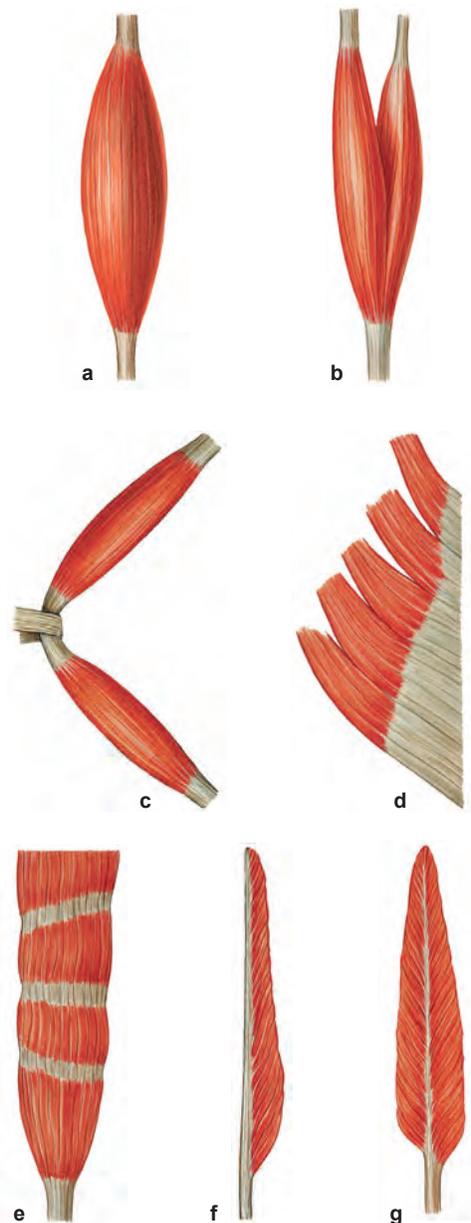
- **M. planus:** liegt dem Skelett flächenhaft auf, z. B. M. obliquus externus abdominis.
- **M. fusiformis:** besitzt den klassischen voluminösen Muskelbauch, z. B. M. palmaris longus.
- **Ringförmiger Verschlussmuskel:** dient dem Verschluss der Körperöffnungen, z. B. M. sphincter ani externus und M. orbicularis oculi.
- **Mehrbäuchiger Muskel:** Sehnige Zwischenstücke, **Intersectio- nes tendineae**, grenzen die Bäuche voneinander ab, z. B. M. rectus abdominis und M. omohyoideus.
- **Mehrköpfiger Muskel:** Seine Köpfe inserieren an unterschiedlichen Stellen, z. B. M. biceps brachii.

Zur Bezeichnung der Muskelfunktion werden im anatomischen Sprachgebrauch spezielle Begriffe verwendet (> Tab. 1.3).

Die **Muskelfiederung** bezeichnet den Winkel, in dem die Muskelfasern zur Sehne ziehen. Die Muskelfasern können entweder annähernd parallel (parallelfaserig) oder schräg (gefiedert) verlaufen. Parallelfaserige Muskeln können sich stärker verkürzen, gefiederte Muskeln mehr Kraft entwickeln.

**MERKE**

- Der **physiologische Querschnitt** verläuft senkrecht zur Verlaufsrichtung der Muskelfasern und erlaubt direkte Rückschlüsse auf die absolute Kontraktionskraft.
- Der **anatomische Querschnitt** teilt den Muskel hingegen an dessen dickster Stelle. Bei parallelfaserigen Muskeln entspricht der anatomische dem physiologischen Querschnitt.



**Abb. 1.2** Muskeltypen der Skelettmuskulatur: **a** – einköpfig, parallelfaserig; **b** – zweiköpfig, parallelfaserig; **c** – zweibäuchig, parallelfaserig; **d** – mehrköpfig, flach; **e** – mehrbäuchig, durch Zwischensehnen unterteilt; **f** – einfach gefiedert; **g** – mehrfach gefiedert (M. Hoffmann aus Paulsen/Waschke. Sobotta Atlas der Anatomie. 25. A. 2022 © Elsevier GmbH) [S700-L275]

**Tab. 1.3** Allgemeine Fachbegriffe der Muskellehre

Begriff	Bedeutung
<b>Bewegungsmuskeln</b>	Bewegen ein Gelenk
<b>Haltemuskeln</b>	Stabilisieren ein Gelenk
<b>Aktive Muskelinsuffizienz</b>	Das Verkürzungsvermögen eines Muskels reicht nicht aus, um ein Gelenk maximal zu bewegen
<b>Passive Muskelinsuffizienz</b>	Unzureichende Dehnungsfähigkeit der Antagonisten verhindert ein Gelenk maximal zu bewegen
<b>Agonisten</b>	Muskeln, welche die gewünschte Bewegung ausführen
<b>Antagonisten</b>	Muskeln, die der gewünschten Bewegung entgegenwirken
<b>Synergisten</b>	Unterstützen die Arbeit der Agonisten

## KLINIK

**Muskelfaserriss** Zerreißen einzelner Muskelfasern infolge starker Belastung

**Muskelkater** Ausgelöst durch Mikrotraumata im Bereich der Z-Scheibe

**Myasthenie** Im Rahmen verschiedenster Krankheiten auftretende Muskelschwäche, z. B.:

- Myasthenia gravis: Autoimmunantikörper gegen nikotinischen Acetylcholinrezeptor
- Lambert-Eaton-Rooke-Syndrom: Autoimmunantikörper gegen präsynaptische Kalziumkanäle
- Botulismus: Infektion mit Clostridium botulinum
- Amyotrophe Lateralsklerose: degenerative Erkrankung des motorischen Nervensystems.

## Zusatzeinrichtungen der Muskeln und Sehnen

- **Faszien:** straffes Bindegewebe, das den Muskel umschließt. Sie minimieren Reibungskräfte und unterteilen die Muskeln in funktionelle Kompartimente.
- **Bursae** (Schleimbeutel): liegen als Verschiebekissen an den Stellen, wo Sehnen oder Weichteile gegen feste Strukturen verschoben werden. Ihr Wandaufbau ähnelt mit Stratum fibrosum und Stratum synoviale dem Aufbau von Gelenkkapseln.
- **Vagina tendinum** (Sehnenscheiden): röhrenförmige Schleimbeutel, welche die Sehnen vollständig umhüllen. Den von der Sehnenscheide umschlossenen Spaltraum nennt man **Cavitas synovialis tendinis**.
- **Retinacula:** Rückhaltebänder, die Sehnen am Knochen fixieren.
- **Hypomochlion** (Widerlager): Knochenabschnitte oder Retinacula, welche die Verlaufsrichtung von Sehnen, Bändern oder Muskeln ändern.

## CHECK-UP

- In welchem Knochenabschnitt findet die Blutbildung zwar im Kleinkindesalter statt, nicht aber im Erwachsenenalter?
- Wie viel Prozent des Körpergewichts entfallen auf das rote Knochenmark?
- Welche Aufgabe erfüllt die Zuggurtung?
- Nenne die verschiedenen Gelenkformen und je ein Beispiel!
- Was versteht man unter einer Amphiarthrose?
- Nenne die Zusatzeinrichtungen der Gelenke, Muskeln und Sehnen und beschreibe deren Funktion!
- Was ist die Besonderheit an den langen Röhrenknochen und den platten Knochen?

## Jetzt bist du dran!

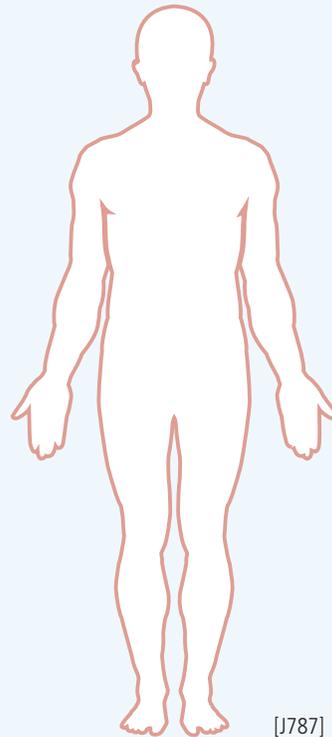
### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## Jetzt bist du dran!

**Zeichenaufgabe**

- Färbe die Gestalt unterschiedlich ein und bezeichne sie mit den korrekten Begriffen der unterschiedlichen Körperregionen.
- Zeichne anschließend die unterschiedlichen Körperachsen ein und bezeichne sie.
- Mache dir anhand der Achsen bewusst, in welche **Ebenen** der Körper eingeteilt wird. (Du brauchst sie vielleicht einmal, um Schnittbilder eines CTs befunden zu können.)



[J787]

**Anregungen zur weiteren Wiederholung**

- Skizziere die verschiedenen Knochenformen (Latein/Deutsch) und nenne je zwei Beispielknochen für diese Form.
- Zeichne schematisch das Schultergelenk. Welchen Freiheitsgrad hat es? Zeichne an den Arm Pfeile für seine Bewegungsrichtungen und beschrifte sie mit den richtigen Bezeichnungen.

**Überblick gewinnen**

Nutze deine gesammelten Stichwörter für ein Mindmap oder eine gegliederte Stichwortliste.

Christoph Jaschinski, Fabian Rengier

**Vorklinik Finale 8**

# **Bewegungsapparat 2**

1. Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Untere Extremität</b> .....	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Leibeswand</b> .....	<b>25</b>
1.1	Grundkenntnisse der Entwicklung .....	1	2.1	Rücken .....	25
1.2	Hüfte .....	1	2.2	Brustwand .....	34
1.3	Oberschenkel .....	3	2.3	Bauchwand .....	37
1.4	Unterschenkel .....	6	2.4	Becken .....	40
1.5	Fuß .....	10	2.5	Leitungsbahnen .....	44
1.6	Nerven .....	15			
1.7	Arterien .....	21		<b>Register</b> .....	<b>47</b>
1.8	Venen .....	22			
1.9	Lymphknoten und Lymphgefäße .....	22			
1.10	Angewandte und topografische Anatomie .....	23			

# 1

## Untere Extremität

### 1.1 Grundkenntnisse der Entwicklung

Christoph Jaschinski



Die Entwicklung der unteren Extremität läuft prinzipiell genauso ab wie die Entwicklung der oberen. Allerdings ist der gesamte Entwicklungsprozess um etwa zwei Tage verzögert. Am Anfang der 5. EW erscheinen die kaudalen Extremitätenknospen (**Beinknospen**) an den kaudalen Enden der Extremitätenleisten. Sie bestehen aus einem mesenchymalen Kern der Somatopleura des Seitenplattenmesoderms, der von einer ektodermalen Hülle umgeben ist. Distal verdickt sich das Ektoderm zur **Randleiste**, die durch Expression des **Fibroblastic Growth Factor (FGF)** den mesenchymalen Kern zum Längenwachstum anregt. Unter Einfluss des **Entwicklungsfaktors Sonic Hedgehog** formt sich danach aus dem mesenchymalen Kern ein mesenchymales Vorläuferskelett (**Primordialskelett**), das ab der 7. EW zu verknöchern beginnt. Die Knochen der unteren Extremität entstehen rein durch **chondrale Ossifikation**. Die Vorläuferzellen der Muskulatur stammen aus den **ventralen Dermatomyotomen der lumbosakralen Somiten**. Im Gegensatz zur oberen Extremität entwickeln sich aus den dorsalen Vormuskelmassen die Flexoren und aus den ventralen die Extensoren.

#### CHECK - UP

Welche Unterschiede gibt es zwischen der Entwicklung der oberen und unteren Extremität?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

### 1.2 Hüfte

Christoph Jaschinski



#### 1.2.1 Knochen

##### Hüftbein (Os coxae)

Siehe > Kap. 2.4.

#### 1.2.2 Gelenke und Bänder

##### Hüftgelenk

Das **Hüftgelenk (Art. coxae)** ist ein Nussgelenk (**Art. cotylica**), da die Gelenkpfanne mehr als die Hälfte des Gelenkkopfs umschließt. In ihm artikuliert die knorpelige **Facies lunata** der Hüftpfanne (**Acetabulum**) mit dem Kopf des Oberschenkelknochens (**Caput femoris**). Das faserknorpelige **Labrum acetabuli** entspringt am Rand des Acetabulum und erweitert die Auflagefläche der Hüftpfanne.

#### MERKE

Die Gelenkkapsel des Hüftgelenks entspringt proximal des Labrum acetabuli ebenfalls vom Acetabulum und schließt nahezu den gesamten Schenkelhals des Oberschenkelknochens (Collum femoris) ein, sodass sowohl das Labrum als auch die Epiphysenfuge intrakapsulär liegen. Der große und kleine Rollhügel des Oberschenkelknochens (Trochanteres major et minor femoris) sowie die Fossa trochanterica liegen hingegen extrakapsulär.

Die Gelenkkapsel ist am entspanntesten, wenn der Oberschenkel etwas gebeugt, abduziert und auswärts gedreht ist. Diese Stellung nehmen Patienten unwillkürlich bei einer Entzündung des Hüftgelenks (Coxitis) ein.

Das Hüftgelenk ist durch straffe Bänder gesichert:

- **Lig. iliofemorale (Bertini-Band):** stärkstes Band des menschlichen Körpers. Es zieht von der Spina iliaca anterior inferior zum Trochanter major (Pars transversa), zum Trochanter minor (Pars longitudinalis) sowie zur Linea intertrochanterica.
  - Pars transversa: limitiert Adduktion und Außenrotation
  - Pars longitudinalis: limitiert Extension und Innenrotation
- **Lig. iliofemorale:** strahlt in den ventralen Kapselabschnitt ein. Es ist bei Extension angespannt und verhindert so eine Überstreckung im Hüftgelenk oder ein Rückwärtskippen des Rumpfs.
- **Lig. ischiofemorale:** entspringt vom acetabulären Bereich des Os ischii und inseriert in der Fossa trochanterica (Pars supe-

rior) und an der Linea intertrochanterica (Pars inferior). Gemeinsam begrenzen die Partes die Adduktion. Die Pars superior hemmt darüber hinaus die Innenrotation. Das Lig. ischiofemorale strahlt dorsal in die Gelenkkapsel ein.

- **Lig. pubofemorale:** hat seinen Ursprung am Ramus superior ossis pubis und seine Ansätze an der Linea intertrochanterica und am Trochanter minor femoris. Es begrenzt die Außenrotation in Extensionstellung und die Abduktion bei jeglicher Bein- stellung.

Die genannten Bänder vereinigen sich distal in einem Faserring (Lig. arcuatum femoris, **Zona orbicularis**), der den gesamten Schenkelhals umschließt und einer Luxation des Hüftkopfs vorbeugt.

Zwischen Fovea capitis des Oberschenkelknochen und Fossa acetabuli spannt sich intraartikulär das **Lig. capitis femoris** auf. Es besitzt keinerlei mechanische Haltefunktion, sondern enthält den R. acetabularis der A. obturatoria zur arteriellen Versorgung des Oberschenkelkopfs.

### 1.2.3 Muskulatur

Der **M. iliopsoas** setzt sich zusammen aus **M. iliacus**, **M. psoas major** und **M. psoas minor** (> Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Innere Hüftmuskeln

Muskel	Ursprung	Ansatz	Innervation	Funktion
<b>M. iliacus</b>	Fossa iliaca ossis ilii	Trochanter minor femoris	<ul style="list-style-type: none"> <li>• N. femoralis</li> <li>• direkte Äste des Plexus lumbalis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Punctum fixum an der Wirbelsäule: Flexion und Außenrotation im Hüftgelenk</li> <li>• Punctum fixum am Oberschenkelknochen:               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Lateralflexion der LWS (einseitig)</li> <li>– Aufrichten des Rumpfs aus horizontaler Ruhelage (beidseitig)</li> </ul> </li> </ul>
<b>M. psoas major</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BWK 12</li> <li>• LWK 1–4</li> </ul>			
<b>M. psoas minor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• BWK 12</li> <li>• LWK 1</li> </ul>			

Tab. 1.2 Äußere Hüftmuskeln

Muskel	Ursprung	Ansatz	Innervation	Funktion im Hüftgelenk
<b>M. tensor fasciae latae</b>	Spina iliaca anterior superior	Tractus iliotibialis	N. gluteus superior	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexion, Abduktion und Innenrotation im Hüftgelenk</li> <li>• Spannen des Tractus iliotibialis</li> </ul>
<b>M. gluteus maximus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os sacrum</li> <li>• Os coccygis</li> <li>• Lig. sacrotuberale</li> <li>• Fascia thoracolumbalis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tractus iliotibialis</li> <li>• Tuberositas glutea femoris</li> </ul>	N. gluteus inferior	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamter Muskel: Extension und Außenrotation im Hüftgelenk sowie <b>Spannen des Tractus iliotibialis</b></li> <li>• Laterokranieller Teil: <b>Abduktion</b> im Hüftgelenk</li> <li>• Mediokranieller Teil: <b>Adduktion</b> im Hüftgelenk</li> </ul>
<b>M. gluteus medius</b>	Ala ossis ilii zwischen Crista iliaca und den Lineae gluteae anterior et posterior	Trochanter major femoris	N. gluteus superior	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesamter Muskel: Abduktion im Hüftgelenk</li> <li>• Vordere Fasern: Flexion und Innenrotation im Hüftgelenk</li> <li>• Hintere Fasern: Extension und Außenrotation im Hüftgelenk</li> </ul>
<b>M. gluteus minimus</b>	Ala ossis ilii zwischen Linea glutea anterior und Linea glutea inferior			
<b>M. piriformis</b>	Ventralseite des Os sacrum			
<b>M. obturatorius internus</b>	Innenfläche der Membrana obturatoria	Fossa trochanterica femoris	Direkte Äste des Plexus sacralis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Außenrotation im Hüftgelenk</li> <li>• Adduktion im Hüftgelenk (bei gestrecktem Bein)</li> <li>• Abduktion im Hüftgelenk (bei gebeugtem Bein)</li> </ul>
<b>M. gemellus superior</b>	Spina ischiadica ossis ischii			
<b>M. gemellus inferior</b>	Tuber ischiadicum ossis ischii			
<b>M. quadratus femoris</b>		Crista intertrochanterica femoris	N. ischiadicus	Adduktion und Außenrotation im Hüftgelenk

### MERKE

- M. iliopsoas: wichtigster Muskel der Flexion.
- **M. gluteus maximus** (> Tab. 1.2): wichtigster Muskel der Extension und Außenrotation sowie Beteiligung am Spannen des Tractus iliotibialis.
- Mm. glutei medius et minimus: wichtigste Muskeln der Abduktion.

### KLINIK

- Bei **einseitiger Läsion des N. gluteus superior** kommt es zum Ausfall des M. tensor fasciae latae und der Mm. glutei medius et minimus. Betroffene Patienten können beim Stehen auf dem kranken Bein das Becken nicht gerade halten. Es sinkt zur gesunden Seite hin ab (**Trendelenburg-Zeichen**). Durch das sog. Duchenne-Hinken, bei dem die Patienten den Rumpf zur kranken Seite hin neigen, versuchen sie das Gleichgewicht zu halten.
- Bei **beidseitiger Läsion des N. gluteus superior** laufen die Patienten infolge des steten Wechsels zwischen absinkender Spielbeinseite und gegenläufiger Ausgleichbewegung im **Watschelgang**.

### CHECK-UP

- Welche Bänder sichern das Hüftgelenk?
- Welche Funktionen hat der M. gluteus maximus, welche der M. iliopsoas?
- Wo inseriert der M. iliopsoas?
- Wie kommt es zum Trendelenburg-Zeichen?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Oberschenkel

Christoph Jaschinski



### 1.3.1 Knochen

#### Oberschenkelknochen (Femur)

- Längster und mächtigster Röhrenknochen des menschlichen Skeletts.
- Artikuliert kranial über seinen nahezu kugelförmigen Schenkelkopf (Caput femoris) im Hüftgelenk mit der Facies lunata des Hüftknochens.
- **Caput femoris:** auf ihm befindet sich eine rundliche Vertiefung (**Fovea capitis femoris**), von der das gefäßführende Lig. capitis femoris zur Hüftpfanne zieht.
- Das Caput femoris verjüngt sich distal zum Schenkelhals (**Collum femoris**).
- Nächste Knochenabschnitte i. S. apophysärer Vorsprünge sind die beiden Rollhügel (Trochanteres major et minor):
  - **Trochanter major:** nach lateral ausgerichtet. An seinem Fuß liegt die Fossa trochanterica, die den Mm. obturatorii externus et internus sowie gemelli superior et inferior als Ansatzfläche dient.
  - **Trochanter minor:** nach dorsal ausgerichtet. Läuft distal zur Linea pectinea aus, dem Ansatzpunkt des M. pectineus.
- Ventral sind die Trochanteren über eine feine Knochenlinie (**Linea intertrochanterica**) miteinander verbunden. Hier entspringt der M. vastus medialis.
- Die scharfkantige **Crista intertrochanterica** verbindet die beiden Rollhügel dorsal miteinander. Hier entspringt der M. quadratus femoris.
- Gelenkkapsel des Hüftgelenks: umschließt fast vollständig den Schenkelhals und zieht ventral bis zur Linea intertrochanterica und dorsal bis ca. 1 cm an die Crista intertrochanterica heran.
- **Corpus femoris:** beginnt distal der Trochanteren. Es bildet mit dem Collum femoris den **Kollodiaphysenwinkel** (Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel, **CCD-Winkel**). Im Laufe des Lebens verkleinert sich der CCD-Winkel von 150° beim Neugeborenen auf 120° bei alten Menschen. Auf der Dorsalseite des

Corpus femoris imponiert die **Linea aspera**. Sie ist eine Verstärkung des Corpus femoris und Ansatzleiste der Adduktoren. Die Linea aspera besteht aus 2 Lippen: **Labium mediale et Labium laterale**. Letztere beginnt an der **Tuberositas glutea**, wo der M. gluteus maximus ansetzt.

- Die Labia mediale et laterale konvergieren zur Mitte des Corpus femoris und divergieren in Richtung seines distalen Endes. Dort verdicken sie sich zu den **Lineae supracondylares mediales et laterales**, welche die dreieckige Facies poplitea begrenzen.
- Die Lineae supracondylares medialis et lateralis verdicken sich weiter zu den **Epicondylis medialis et lateralis**. Auf dem Epicondylus medialis liegt das Tuberculum adductorium, an dem der M. adductor magnus inseriert.
- **Condylis medialis et lateralis:** distales Ende des Femurs. Massive Gelenkknorren. Sie sind im Kniegelenk mit dem Schienbein verbunden. Zwischen ihnen liegt die **Fossa intercondylaris**, die dorsal durch die flache **Linea intercondylaris** begrenzt wird. Vereinigen sich ventral zur **Facies patellaris**, der hyalinen Fläche zur Gelenkverbindung mit der Kniescheibe.

#### MERKE

- **Coxa vara:** verkleinerter CCD (< 120°); führt zu einer erhöhten **Biegebeanspruchung** des Femurs
- **Coxa valga:** vergrößerter CCD (> 135°); führt zu einer erhöhten **Druckbelastung** des Femurs

#### KLINIK

**Oberschenkelhalsfraktur** Ein Bruch des Collum femoris ist die typische Fraktur des alten Menschen. Sie resultiert meist aus einem Sturz auf den Oberschenkel oder die Hüfte. Das charakteristische Indiz einer Oberschenkelhalsfraktur ist das verkürzte, außenrotierte Bein der betroffenen Seite. Die Oberschenkelhalsfraktur lässt sich mithilfe von Spongiosaschrauben oder Prothesen – **Hemiendoprothese (HEP)** oder **Totalendoprothese (TEP)** – behandeln.

#### Kniescheibe (Patella)

- Größtes Sesambein des menschlichen Körpers
- In die Ansatzsehne des M. quadriceps femoris eingelagert
- Fungiert als **Hypomochlion**, wodurch die Quadrizepssehne in einem günstigeren Winkel ins Schienbein einstrahlt und einen effektiveren Hebelarm entfalten kann
- Facies anterior: beginnt proximal als Basis patellae und endet distal spitzzulaufend im Apex patellae
- Facies articularis patellae: steht mit der Facies patellaris femoris in Verbindung
- **Lig. patellae:** distal des Apex patellae liegender Abschnitt der Ansatzsehne des M. quadriceps femoris. Inseriert an der **Tuberositas tibiae** des Schienbeins.

### 1.3.2 Muskulatur

Die Muskeln des Oberschenkels (> Tab. 1.3, > Tab. 1.4, > Tab. 1.5) werden von der Oberschenkelfaszie (**Fascia lata**) umgeben. Von ihr ziehen 3 bindegewebige Septen – **Septum intermusculare femoris mediale**, **Septum intermusculare femoris laterale** und **Septum intermusculare vastoadductorium** – zum Oberschenkelknochen. Dadurch wird die Oberschenkelmuskulatur in eine ven-

Tab. 1.3 Muskeln der Vorderseite des Oberschenkels

Muskel	Ursprung	Ansatz	Innervation	Funktion
<b>M. sartorius</b>	Spina iliaca anterior superior	Über Pes anserinus superficialis medial der Tuberositas tibiae	N. femoralis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexion, Abduktion und Außenrotation im Hüftgelenk</li> <li>Flexion und Innenrotation im Kniegelenk</li> </ul>
<b>M. quadriceps femoris</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>M. rectus femoris:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Spina iliaca anterior inferior</li> <li>Acetabulum</li> </ul> </li> <li>M. vastus medialis: <ul style="list-style-type: none"> <li>Linea intertrochanterica</li> <li>Labium mediale der Linea aspera femoris</li> </ul> </li> <li>M. vastus intermedius: Vorderseite des Femurs</li> <li>M. vastus lateralis: <ul style="list-style-type: none"> <li>Labium laterale der Linea aspera femoris</li> <li>Trochanter major</li> </ul> </li> </ul>	Über Lig. patellae an der Tuberositas tibiae		<ul style="list-style-type: none"> <li>Gesamter Muskel: Extension im Kniegelenk</li> <li><b>M. rectus femoris:</b> Flexion im Hüftgelenk</li> </ul>
<b>M. articularis genu</b>	Vorderseite des distalen Femurs	Kniegelenkkapsel		Spannen der Kniegelenkkapsel

Tab. 1.4 Adduktoren des Oberschenkels

Muskel	Ursprung	Ansatz	Innervation	Funktion
<b>M. obturatorius externus</b>	Außenfläche der Membrana obturatoria	Fossa trochanterica femoris	N. obturatorius	Adduktion und Außenrotation im Hüftgelenk
<b>M. pectineus</b>	Pecten ossis pubis	Linea pectinea femoris	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>N. femoralis</b></li> <li><b>N. obturatorius</b></li> </ul>	Flexion, Adduktion und Außenrotation im Hüftgelenk
<b>M. adductor longus</b>	Ramus superior ossis pubis	Labium mediale der Linea aspera femoris	N. obturatorius	Flexion und Adduktion im Hüftgelenk
<b>M. adductor brevis</b>	Ramus inferior ossis pubis			<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexion und Adduktion im Hüftgelenk</li> <li>Flexion und Innenrotation im Kniegelenk</li> </ul>
<b>M. gracilis</b>		Über Pes anserinus superficialis medial der Tuberositas tibiae		
<b>M. adductor magnus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ramus inferior ossis pubis</li> <li>Ramus ossis ischii</li> <li>Tuber ischiadicum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oberflächlicher „sehniger“ Ansatz: Tuberculum adductorium des Epicondylus medialis femoris</li> <li>Tiefer „fleischiger“ Ansatz: Labium mediale der Linea aspera femoris</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oberflächlicher „sehniger“ Ansatz: <b>N. tibialis</b></li> <li>Tiefer „fleischiger“ Ansatz: <b>N. obturatorius</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oberflächlicher „sehniger“ Ansatz: Innenrotation im Hüftgelenk</li> <li>Tiefer „fleischiger“ Ansatz: Extension, Adduktion und Außenrotation im Hüftgelenk</li> </ul>
<b>M. adductor minimus</b>	Ramus inferior ossis ischii	Labium mediale der Linea aspera femoris	N. obturatorius	Flexion, Adduktion und Außenrotation im Hüftgelenk

Tab. 1.5 Flexoren des Oberschenkels

Muskel	Ursprung	Ansatz	Innervation	Funktion
<b>M. biceps femoris</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caput longum: Tuber ischiadicum</li> <li>Caput breve: Labium laterale der Linea aspera femoris</li> </ul>	Caput fibulae	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caput longum: N. tibialis</li> <li>Caput breve: N. fibularis communis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gesamter Muskel: Flexion und Außenrotation im Kniegelenk</li> <li>Caput longum: Extension im Hüftgelenk</li> </ul>
<b>M. semitendinosus</b>	Tuber ischiadicum	Über Pes anserinus superficialis medial der Tuberositas tibiae	N. tibialis	<ul style="list-style-type: none"> <li>Extension im Hüftgelenk</li> <li>Flexion im Kniegelenk</li> <li>Innenrotation im Kniegelenk (bei gebeugtem Knie)</li> </ul>
<b>M. semimembranosus</b>		Pes anserinus profundus		
<b>M. popliteus</b>	Condylus lateralis femoris	Hinterseite des Schienbeins		<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexion im Kniegelenk</li> <li>Innenrotation im Kniegelenk (bei gebeugtem Knie)</li> <li>Spannen der Gelenkkapsel des Kniegelenks</li> </ul>

trale Muskelloge sowie eine mediale **Adduktorenloge** und eine dorsale **Beugerloge** unterteilt.

### MERKE

- **M. sartorius:** Beuger im Knie- und Hüftgelenk
- **M. quadriceps femoris:** einziger Strecker im Kniegelenk
- **M. rectus femoris:** zusätzlich Beuger im Hüftgelenk
- **M. articularis genu:** Abspaltung des M. vastus intermedius
- **M. adductor magnus:** wichtigster Muskel der Adduktion
- **M. adductor minimus:** Abspaltung des M. adductor magnus
- **M. biceps femoris:** wichtigster Muskel der Außenrotation im Kniegelenk
- **Mm. semitendinosus et semimembranosus:** wichtigste Muskeln der Innenrotation im Kniegelenk

**Tractus iliotibialis** Derbe Verdickung der Fascia lata am seitlichen Oberschenkel, die sich vom Beckenkamm (Crista iliaca) bis zum Condylus lateralis des Schienbeins erstreckt. Entsteht durch die Sehnenfasern des M. tensor fasciae latae und des kranialen Anteils des M. gluteus maximus. Reduziert gemäß dem Zuggurtungsprinzip die Biegebeanspruchung des Femurs.

### MERKE

- **Pes anserinus superficialis:** bezeichnet die Vereinigung der Ansatzsehnen des M. sartorius, M. gracilis und M. semitendinosus an der medialen Schienbeinseite kaudal des Schienbeinkopfs.
- **Pes anserinus profundus:** bezeichnet die 3-teilige Ansatzsehne des M. semimembranosus. Sie inseriert am Condylus medialis des Schienbeins, an der Faszie des M. popliteus und als Lig. politeum obliquum am lateralen Schienbeinkopf.

### CHECK-UP

- Nenne die wichtigsten anatomischen Strukturen des Oberschenkels und deren Funktionen!
- Welche zweigelenkigen Oberschenkelmuskeln gibt es?
- Welche Oberschenkelmuskeln werden doppelt innerviert?
- Welche Muskeln gehören zu den Adduktoren des Oberschenkels?
- Welche anatomischen Strukturen bilden den Pes anserinus superficialis bzw. profundus?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

Gregor Däubler, Henrik Holtmann, Isa Jauch, Thomas Wenisch

Vorklinik Finale 9

# Motorik und Bewegungsabläufe

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Björn Jacobi, Maximilian Pfau



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Bewegungslehre</b> .....	1	<b>4</b>	<b>Rückenmark und Reflexe</b> .....	29
1.1	Translationsbewegungen .....	1	4.1	Rückenmark .....	29
1.2	Kräfte .....	2			
1.3	Arbeit, Energie, Leistung .....	3	<b>5</b>	<b>Bewegungsabläufe im ZNS</b> .....	33
1.4	Impuls, Stoßvorgänge .....	5	5.1	Basalganglien .....	33
1.5	Rotationsbewegung .....	6	5.2	Cerebellum .....	35
			5.3	Integrale motorische Funktionen des ZNS .....	36
<b>2</b>	<b>Muskeltypen</b> .....	9	<b>6</b>	<b>Arbeits- und Leistungsphysiologie</b> .....	39
2.1	Übersicht der Muskeltypen .....	9	6.1	Allgemeine Grundlagen .....	39
2.2	Skelettmuskulatur .....	9	6.2	Organbeteiligung .....	42
2.3	Herzmuskulatur .....	17	6.3	Erfassung von Leistung und Leistungsbeurteilung .....	44
2.4	Glatte Muskulatur .....	18			
<b>3</b>	<b>Motorik</b> .....	23	<b>Register</b> .....		46
3.1	Programmierung der Willkürbewegung .....	23			
3.2	Motorische Repräsentation auf dem Cortex .....	23			
3.3	Efferente Projektion der motorischen Cortices .....	25			
3.4	Störungen der Motorik .....	27			

# 1

## Bewegungslehre

### 1.1 Translationsbewegungen

Thomas Wenisch



#### 1.1.1 Gleichförmige Bewegung

Bei einer gleichförmigen Bewegung ist die Geschwindigkeit konstant. Es gilt:

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

$\Delta s$  ist der im Zeitintervall  $\Delta t$  zurückgelegte Weg.

SI-Einheit der Geschwindigkeit: **m/s**. Im Alltag gebräuchlicher ist die Einheit Kilometer pro Stunde (km/h). Wichtig ist der Umrechnungsfaktor zwischen beiden Einheiten. Er beträgt 3,6.

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1.000 \text{ m}}{3.600 \text{ s}} = \frac{1}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Beispiel: 50 km/h  $\approx$  14 m/s; 10 m/s = 36 km/h.

#### 1.1.2 Beschleunigte Bewegung

Ist die Geschwindigkeit nicht konstant, kann man mit den oben stehenden Rechenwegen die Durchschnittsgeschwindigkeit ermitteln, mit der sich der Körper im Zeitintervall  $\Delta t$  bewegt. Die **Momentangeschwindigkeit** wird durch die Ableitung der Weg-Zeit-Funktion  $s(t)$  nach der Zeit  $t$  berechnet:

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

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

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

Einheit der Beschleunigung: **m/s<sup>2</sup>**.

Hinweis: Geschwindigkeit und Beschleunigung sind **vektorielle Größen**. Zur Vereinfachung der Schreibweise werden aber hier und im Folgenden die Vektorpfeile weggelassen.

Bei konstanter Beschleunigung aus dem Stillstand heraus oder im Fall negativer Beschleunigung für ein Abbremsen bis zum Stillstand ist die erreichte Endgeschwindigkeit  $v$  und der zurückgelegte Weg  $s$ :

$$v = a \cdot t$$

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

Beide Gleichungen lassen sich kombinieren:

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

Das Ergebnis wird eingesetzt in:

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

Bei anderen Randbedingungen als Anfangs- bzw. Endgeschwindigkeit  $v_0$  gelten die folgenden Formeln:

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

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

Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind durch Differentiation bzw. Integration miteinander verknüpft. Aus einer Integration ergeben sich Konstanten, die die Anfangsbedingungen beschreiben.

#### CHECK-UP

- Nenne die Weg-Zeit-Funktion für eine gleichförmige und für eine beschleunigte Bewegung.
- Wie werden Geschwindigkeitsangaben in m/s und km/h ineinander umgerechnet?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Kräfte

Thomas Wenisch



### 1.2.1 Trägheitskraft

Eine Beschleunigung erfolgt nur dann, wenn eine Kraft wirkt. Diese wird definiert als:

$$F = m \cdot a$$

Die **Masse**  $m$  ist dabei der Proportionalitätsfaktor zwischen der wirkenden Kraft und der daraus resultierenden Beschleunigung. Diese Kraft kennzeichnet den „Widerstand“ oder, besser ausgedrückt, die Trägheit, die der Körper dem Bestreben, seine Geschwindigkeit zu verändern entgegensetzt. Sie wird deshalb als **Trägheitskraft** bezeichnet.

Einheit der Kraft:  $\text{kg m/s}^2$ . Dafür wurde die Einheit **Newton (N)** eingeführt.

$$1\text{N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

### 1.2.2 Gravitationskraft

Zwei Massen ziehen sich gegenseitig an. Dies beschreibt 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**  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$  ist eine **Naturkonstante**.

#### MERKE

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

Setzt man in das Gravitationsgesetz die Masse der Erde,  $M_E = 5,97 \cdot 10^{24} \text{kg}$ , und den Erdradius  $r_E = 6378 \text{km}$ , ein, ergibt sich für die Massenanziehung auf einen Körper auf der Erdoberfläche:

$$F = m \cdot g$$

Die Konstante  $g$  wird **Erdbeschleunigung** genannt, sie hat den Wert  $g = 9,81 \text{m/s}^2$ . Die durch die Erdanziehung auf einen Körper wirkende Kraft wird auch **Schwerkraft**, **Gewichtskraft** oder einfach kurz **Gewicht** genannt.

Im Alltag werden die Begriffe Masse und Gewicht oft fälschlicherweise synonym verwendet. Die Aussage „Der Patient wiegt 95 kg, er hat Übergewicht“ ist physikalisch nicht richtig. Die Masse des Patienten ist 95 kg, seine Gewichtskraft beträgt (gerundet) 950 N.

### 1.2.3 Reibungskraft

Bewegen sich feste Körper gegeneinander, entsteht eine Reibungskraft  $F_r$ , die der Richtung der Bewegung entgegen gerichtet 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  $F_g = m \cdot g$ .
- Der Reibungskoeffizient  $\mu$ , auch Reibungszahl genannt, kennzeichnet die Materialeigenschaften beider Oberflächen.
- Der Wert des Reibungskoeffizienten liegt zwischen 0 und 1, d.h.  $0 \leq \mu \leq 1$ .

Es werden Haft- und Gleitreibung unterschieden.

#### Haftreibung

Mikroskopisch kleine Unebenheiten beider Oberflächen sind ineinander verzahnt und verhakt. Sie müssen voneinander „losgerissen“ werden, um die Bewegung zu starten.

Dazu ist die Kraft notwendig:

$$F_r = \mu_H \cdot F_N$$

#### Gleitreibung

Sind die Oberflächen gegeneinander in Bewegung, muss nur noch die nun geringere Gleitreibung überwunden werden:

$$F_r = \mu_{Gl} \cdot F_N$$

Die Gleitreibungszahl  $\mu_{Gl}$  ist immer kleiner als die Haftreibungszahl  $\mu_H$ :

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

Beim Abrollen eines Rads ist die Haftreibung wirksam. Die Aufstandsfläche eines Autoreifens ist gegenüber der Straße in Ruhe, es wird beim Abrollen nur jeweils ein neues Stück Gummi auf die Straße gelegt.

Ein rollender Reifen kann höhere Brems- oder Beschleunigungskräfte übertragen als ein blockierendes oder durchdrehendes Rad.

#### Schiefe Ebene

An einer schiefen Ebene ( $\triangleright$  Abb. 1.1) wird die Richtung der Reibungskraft und die Zerlegung eines Kraftvektors in seine Komponenten deutlich.

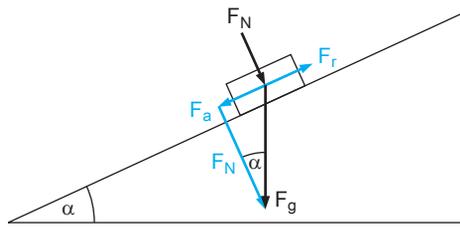
Auf einer um den Winkel  $\alpha$  gegen die horizontal geneigte Ebene wirkt eine Abtriebskraft  $F_a$  entlang der Neigungsebene.

Durch die Reibungskraft  $F_r$  wird ein Gegenstand am Abrutschen gehindert. Die Normalkraft  $F_N$  wirkt senkrecht zur Unterlage, die Schwerkraft  $F_g = m \cdot g$  nach unten.

Für die Kräftevektoren gilt:

$$F_a = F_g \cdot \sin \alpha$$

$$F_N = F_g \cdot \cos \alpha$$



**Abb. 1.1** Abtriebs- ( $F_a$ ), Reibungs- ( $F_r$ ), Normal- ( $F_N$ ) und Schwerkraft ( $F_g$ ) an der schiefen Ebene [L253]

Solange die Abtriebskraft die Reibungskraft nicht übersteigt, bleibt der Gegenstand in Ruhe.

$$F_r = F_a$$

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

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

Wenn der Tangens des Neigungswinkels die Haftreibungszahl überschreitet, beginnt der Gegenstand zu rutschen. Er beschleunigt und wird nur durch die kleinere Gleitreibung gebremst.

## Reibung in Gasen und Flüssigkeiten

In Gasen und Flüssigkeiten ist die Reibungskraft geschwindigkeitsabhängig:

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

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

**Stokes-Reibung** Die Reibung in Flüssigkeiten ist bei langsamen Bewegungen proportional zur Geschwindigkeit  $v$ :

$$F_r = b \cdot v$$

**Newton-Reibung** Die Reibungskraft in Luft ist, zumindest näherungsweise, proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit:

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

### MERKE

Fällt ein Körper durch eine Flüssigkeit oder ein Gas, nimmt seine Geschwindigkeit solange zu, bis die Reibungskraft gleich der beschleunigenden Gewichtskraft ist. Dann kompensieren sich beide Kräfte und der Körper fällt weiter mit konstanter Geschwindigkeit.

## 1.2.4 Auftriebskraft

Ein Körper, der in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, erfährt eine Auftriebskraft. Diese entspricht der Gewichtskraft des verdrängten Flüssigkeitsvolumens.

Das Verhältnis der Masse zum Volumen wird als **Dichte**  $\rho$  bezeichnet:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

SI-Einheit der Dichte:  $\text{kg/m}^3$ , gebräuchlicher ist aber die Angabe in  $\text{g/cm}^3$ .

Die Dichte von Wasser beträgt  $1 \text{ g/cm}^3$  bzw.  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

Das Volumen der verdrängten Flüssigkeit ist gleich dem Volumen des eingetauchten Körpers  $V_K$ . Mit der Dichte der Flüssigkeit  $\rho_{FL}$  beträgt die Auftriebskraft:

$$F_a = \rho_{FL} \cdot V_K \cdot g$$

Im Vergleich dazu ist die Gewichtskraft eines Körpers der Dichte  $\rho_K$ :

$$F_g = \rho_K \cdot V_K \cdot g$$

### MERKE

Nach dem archimedischen Prinzip werden drei Fälle unterschieden:

$\rho_{FL} < \rho_K \Rightarrow F_a < F_g \Rightarrow$	Der Körper sinkt.
$\rho_{FL} = \rho_K \Rightarrow F_a = F_g \Rightarrow$	Der Körper schwebt in der Flüssigkeit.
$\rho_{FL} > \rho_K \Rightarrow F_a > F_g \Rightarrow$	Der Körper schwimmt und taucht so weit in die Flüssigkeit ein, dass er ein Flüssigkeitsvolumen verdrängt, das seinem eigenen Gewicht entspricht.

Die Dichte von Flüssigkeiten kann mit einem **Aräometer** gemessen werden. Hier taucht ein Probekörper in eine Flüssigkeit ein. Die Eintauchtiefe wird auf einer Skala abgelesen, die so kalibriert ist, dass direkt die Dichte der Flüssigkeit abgelesen werden kann.

### CHECK-UP

- Wie hängen Masse und Gewicht zusammen?
- Drück die Einheit Newton (N) durch Basisgrößen des internationalen Einheitensystems aus.
- Wovon hängt die Auftriebskraft eines Körpers ab?
- Welche Reibungskräfte kennst du?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Arbeit, Energie, Leistung

Thomas Wenisch



Die Begriffe **Arbeit** und **Energie** können synonym verwendet werden. Als Formelzeichen sind  $W$  (Work) oder  $E$  (Energy) gebräuchlich.

### 1.3.1 Arbeit

Die Arbeit ist definiert als das Produkt aus der aufgewendeten Kraft  $F$  und dem zurückgelegten Weg  $s$ :

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s}$$

Es handelt sich hier um das Skalarprodukt zweier Vektoren.

Wirkt die Kraft nicht genau in der Bewegungsrichtung, wird nur die Komponente des Kraftvektors berücksichtigt, die in Richtung der Bewegung verläuft ( > Abb. 1.2).

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos\alpha$$

Wenn  $F_s = |\vec{F}| \cdot \cos\alpha$  als Komponente der Kraft in Richtung des Wegs gesetzt wird, lässt sich unter Verzicht auf Vektorpfeile auch schreiben:

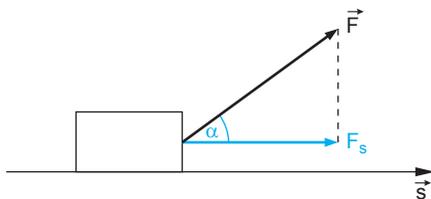
$$W = F_s \cdot s$$

Ist die Kraft nicht konstant, muss über einzelne Teilstücke summiert werden. Daraus resultiert die allgemeine, integrale Definition der Arbeit:

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F_s \cdot ds$$

Die Integrationsgrenzen  $s_1$  und  $s_2$  sind Anfangs- und Endpunkt der Bewegung.

Einheit der Arbeit: Nm. Dafür wird die Einheit **Joule (J)** eingeführt:  $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$ .



**Abb. 1.2** Definition der Arbeit als Produkt der Komponente der Kraft in Richtung des Wegs und der zurückgelegten Wegstrecke [L253]

### 1.3.2 Energie

#### Potenzielle Energie

Um einen Gegenstand im Schwerfeld (Gravitationsfeld) auf die Höhe  $h$  zu heben, muss die Gewichtskraft  $F_g = m \cdot g$  aufgebracht werden. Diese Arbeit heißt **potenzielle Energie** oder **Lageenergie**. Sie beträgt:

$$W = m \cdot g \cdot h$$

Diesen Energiebetrag hat der Gegenstand nun „gespeichert“. Er wird wieder freigesetzt, wenn der Gegenstand herabfällt.

Für die Lageenergie eines Körpers ist seine Höhe entscheidend – nicht die Art und Weise, wie er auf die Höhe gelangt ist.

#### Kinetische Energie

Ein Körper, der sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt, besitzt **kinetische Energie** oder **Bewegungsenergie**:

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

#### MERKE

Die kinetische Energie eines Körpers ist proportional zu seiner Masse und proportional zum **Quadrat der Geschwindigkeit**. Eine Verdopplung der Geschwindigkeit bedeutet die 4-fache kinetische Energie.

#### Energieerhaltung

Die Energie ist eine **Erhaltungsgröße**. Energie kann weder „erschaffen“ noch „vernichtet“ werden, sie geht lediglich von einer Form in eine andere Form über. Das ist ein universelles Naturgesetz.

Fällt z. B. von einem Turm ein Stein herab, so besitzt der Stein vor dem Fall potenzielle Energie. Während des Falls nehmen die potenzielle Energie ab und die kinetische Energie zu, bis die gesamte potenzielle Energie in kinetische Energie umgewandelt ist:

$$W_{pot} = W_{kin}$$

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Die Masse des Steins ist unerheblich, sie kürzt sich heraus.

### 1.3.3 Leistung

Die Leistung  $P$  ist definiert als Quotient aus Arbeit und Zeit:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Ist die Leistung nicht konstant, ergibt der so berechnete Wert die durchschnittliche Leistung im Zeitintervall  $\Delta t$ . Der Momentwert der Leistung wird durch Differentiation bestimmt:

$$P = \frac{dW}{dt} = \dot{W}$$

Einheit der Leistung: das **Watt (W)**,  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ .

Das Produkt aus Leistung und Zeit gibt wieder die geleistete Arbeit an. So ist eine Kilowattstunde (kWh):  $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ J/s} \cdot 3600 \text{ s} = 3.600.000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$ .

#### Wirkungsgrad

In vielen technischen Geräten wird eine Energieform in eine andere umgewandelt. Ein Elektromotor beispielsweise nimmt elektrische Energie auf und gibt Energie in Form mechanischer Arbeit ab.

Leider geht in der Praxis immer auch Energie in nicht nutzbare Formen „verloren“, wie z. B. Reibungswärme.

Das Verhältnis zwischen abgegebener und aufgenommener Leistung wird als **Wirkungsgrad**  $\eta$  bezeichnet:

$$\eta = \frac{P_{\text{abgegeben}}}{P_{\text{aufgenommen}}}$$

### CHECK - UP

- Wie sind Arbeit, potenzielle Energie, kinetische Energie und Leistung definiert?
- Wie verhält sich die kinetische Energie, wenn sich die Geschwindigkeit halbiert?
- Wie verhält sich die potenzielle Energie, wenn sich die Höhe verdoppelt?
- Erkläre den Begriff Wirkungsgrad.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.4 Impuls, Stoßvorgänge

Thomas Wenisch



### 1.4.1 Impuls

Der Impuls ist neben der Energie eine weitere **Erhaltungsgröße**. Der Gesamtimpuls eines Systems aus mehreren Teilchen bleibt erhalten.

Der **Impuls**  $p$  ist das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit:

$$p = m \cdot v$$

Einheit Impuls: kg · m/s oder N · s.

**Impulserhaltung** spielt bei Stoßvorgängen bzw. Kollisionen eine wichtige Rolle.

### 1.4.2 Stoßvorgänge

#### Inelastischer Stoß

Zwei Körper bleiben nach dem Zusammenstoß miteinander verbunden und bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit  $v_n$  gemeinsam weiter. Die Summe der Impulse vor dem Stoß ist gleich dem Gesamtimpuls nach dem Stoß:

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v_n$$

### MERKE

Beim Zusammenstoß geht kinetische Energie „verloren“, die in andere Energieformen umgewandelt wird, z. B. bei einer bleibenden Deformation. Die **Energieerhaltung** gilt beim inelastischen Stoß daher **nicht**.

#### Elastischer Stoß

Nach einem elastischen Stoß trennen sich die Körper wieder, und die Geschwindigkeiten nach dem Stoßvorgang  $v_{1n}$  und  $v_{2n}$  sind im Allgemeinen verschieden. Beim elastischen Stoß bleibt die Gesamtenergie erhalten.

Aus dem Energie- und Impulserhaltungssatz lassen sich die Geschwindigkeiten nach dem elastischen Stoß berechnen:

$$v_{1n} = \frac{2 \cdot m_2 \cdot v_2 + (m_1 - m_2) \cdot v_1}{m_1 + m_2}$$

$$v_{2n} = \frac{2 \cdot m_1 \cdot v_1 + (m_2 - m_1) \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

### MERKE

Für den Sonderfall gleicher Massen  $m_1 = m_2$  vereinfacht sich dieses Ergebnis zu:

$$v_{1n} = v_2 \text{ und } v_{2n} = v_1.$$

Die beiden Körper „tauschen“ ihre Geschwindigkeiten.

#### Kraftstoß

Ein Körper wird unter dem Einfluss einer äußeren Kraft beschleunigt. Damit ändert sich auch sein Impuls:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta(m \cdot v)}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Wird ein kurzes Zeitintervall betrachtet, in dem die Kraft  $F$  konstant ist, ergibt die Multiplikation mit  $\Delta t$ :

$$F \cdot \Delta t$$

$$F \cdot \Delta t = \Delta p$$

wird als Kraftstoß bezeichnet.

### CHECK - UP

- Worin unterscheiden sich elastische und inelastische Stoßvorgänge?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski, Fabian Rengier

**Vorklinik Finale 10**

# **Kopf und Hals**

1. Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Entwicklung von Kopf und Hals</b> .....	1	<b>3</b>	<b>Hirn- und Halsnerven, vegetative</b>	
1.1	Schädel .....	1		<b>Innervation</b> .....	21
1.2	Schlundbögen .....	2	3.1	Hirnnerven .....	21
1.3	Schlundtaschen .....	3	3.2	Halsnerven .....	30
1.4	Schlundfurchen .....	3	3.3	Vegetative Innervation an Kopf und Hals .....	31
1.5	Schlundmembranen .....	4			
1.6	Gesicht .....	5	<b>4</b>	<b>Arterien, Venen, Lymphsystem</b> .....	35
			4.1	Arterien .....	35
<b>2</b>	<b>Schädel, Muskulatur, Kopf- und</b>		4.2	Venen .....	37
	<b>Halseingeweide</b> .....	7	4.3	Lymphknoten und Lymphgefäße .....	38
2.1	Schädel .....	7	<b>5</b>	<b>Angewandte und topografische Anatomie</b> ...	41
2.2	Kopf- und Halsmuskulatur .....	11	5.1	Angewandte und topografische Anatomie .....	41
2.3	Kopf- und Halseingeweide .....	18		<b>Register</b> .....	46

## 1

Christoph Jaschinski

# Entwicklung von Kopf und Hals

## 1.1 Schädel



Die Schädelknochen entstehen aus Kopfmesenchym, das sich von der **Prächordalplatte**, dem paraaxialen Mesoderm der 4 kranialsten Somiten (**postotische Somiten**) und hauptsächlich von der **Neuralleiste** ableitet.

Der Großteil des Kopfmesenchyms wandelt sich durch desmale Ossifikation direkt in Knochengewebe um (Desmocranium), der kleinere Teil entwickelt sich durch chondrale Ossifikation über die Zwischenstufe eines knorpeligen Vorläuferskeletts (Chondrocranium).

Zum **Desmocranium** zählt man:

- Stirnbein (Os frontale)
- Nasenbein (Os nasale)
- Tränenbein (Os lacrimale)
- Oberkiefer (Maxilla)
- Gaumenbein (Os palatinum)
- Pflugscharbein (Vomer)
- Unterkiefer (Mandibula)
- Jochbein (Os zygomaticum)
- Pars squamosa des Schläfenbeins (Os temporale)
- Scheitelbein (Os parietale)
- Oberer Teil der Pars squamosa des Hinterhauptsbeins (Os occipitale).

Zum Chondrocranium rechnet man:

- Untere Nasenmuschel (Concha nasalis inferior).
- Siebbein (Os ethmoidale): entsteht aus den **Cartilagine trabeculares** (Trabeculae cranii).
- Keilbein (Os sphenoidale): Die Alae minores entwickeln sich aus den knorpeligen **Alae orbitales**, die Alae majores aus den knorpeligen **Alae temporales**.
- Partes mastoidea, petrosa et tympanica des Os temporale.
- Unterer Teil der Pars squamosa sowie Pars basilaris und Partes laterales des Os occipitale: Die Vorläuferstruktur der Pars basilaris entsteht aus der Vereinigung des **Parachordalknorpels** mit dem paraaxialen Mesoderm der postotischen Somiten.
- Zungenbein (Os hyoideum).

Die Schädelknochen sind durch die bindegewebigen Schädelnähte (**Suturen**) miteinander verbunden. Man unterscheidet:

- **Stirrnaht** (Sutura frontalis): zwischen den beiden Ossa frontalia
- **Kranznaht** (Sutura coronalis): beidseits zwischen Os frontale und Os parietale
- **Pfeilnaht** (Sutura sagittalis): zwischen den beiden Ossa parietalia
- **Lambdanaht** (Sutura lamboidea): beidseits zwischen Os occipitale und Os parietale

Die Sutura frontalis verknöchert bereits innerhalb der ersten beiden Lebensjahre, wodurch die beiden Stirnbeine (Ossa frontalia) zum Stirnbein (Os frontale) verschmelzen. Die übrigen Suturen verknöchern gewöhnlich im 3.–4. Lebensjahrzehnt.

### KLINIK

Ein vorzeitiger Verschluss der Suturen (**Kraniosynostose**) führt zu typischen Schädeldeformitäten:

- **Dreiecksschädel** (Trigonocephalus): durch frühzeitigen Verschluss der Sutura frontalis. Es entsteht eine kielförmige Stirn.
- **Turmschädel** (Turricephalus): bei verfrühter Verknöcherung der Sutura coronalis. Es bildet sich ein extrem hoher Schädel, der zu Stirn und Hinterhaupt steil abfällt.
- **Kahnschädel** (Scaphocephalus): durch abnorm schnelle Verknöcherung der Sutura sagittalis. Es formt sich ein langer, schmaler Schädel mit hoher Stirn und hervorstehendem Hinterkopf.

An bestimmten Stellen bilden die Suturen breite Bindegewebsplatten, **Fontanellen**:

- **Stirntfontanelle** (Fonticulus anterior, „große Fontanelle“): liegt zwischen den Ossa frontalia und Ossa parietalia. Hier kreuzen **Suturæ frontalis, coronalis et sagittalis**. Der viereckige Fonticulus anterior bietet die Möglichkeit der diagnostischen Blut- oder Liquorentnahme, z. B. zum Ausschluss einer Gehirnhautentzündung, sowie der Ultraschalluntersuchung des Gehirns. Die große Fontanelle verknöchert um das 3. Lebensjahr.
- **Hinterhauptfontanelle** (Fonticulus posterior, „kleine Fontanelle“): wird von den Ossa parietalia und dem Os occipitale begrenzt. Hier laufen die Suturæ sagittalis et lamboidea zusammen. Sie dient bei der Geburt als Orientierungspunkt für die Lage des kindlichen Kopfs. Der dreieckige Fonticulus posterior verknöchert als Erste der Fontanellen in etwa im 3. Lebensmonat.
- **Keilbeinfontanelle** (Fonticulus sphenoidalis): spannt sich beidseits zwischen Os parietale, Os sphenoidale und Os frontale auf. Sie verknöchert im 6. Lebensmonat.
- **Warzenfontanelle** (Fonticulus mastoideus): liegt beidseits zwischen dem Warzenfortsatz (Processus mastoideus) des Os temporale und dem Os occipitale. Sie verknöchert nach etwa 1,5 Lebensjahren.

Sowohl Suturen als auch Fontanellen gewährleisten die nötige Verschieblichkeit der Schädelknochen während des Geburtsvorgangs, sodass sich der kindliche Kopf beim Durchtritt durch das mütterliche Becken den knöchernen Konturen anpassen kann. Gleichzeitig nimmt der Schädel aufgrund der Suturen und Fontanellen den postnatalen Volumenzuwachs des Gehirns (**sekundäre Altrizialität**) problemlos auf.

**Jetzt bist du dran!****Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

**Schlundbögen (Pharyngealbögen, Brachialbögen).** Sie bestehen aus einem/r (> Tab. 1.1):

- Knorpelteil
- Mesenchymteil
- Muskulaturteil
- Schlundbogennerve
- Schlundbogenarterie

**Jetzt bist du dran!****Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Schlundbögen



In der 4. EW formt das Mesoderm des kranialen Endes des Vorderdarms (**Schlunddarm**) transversal verlaufende Wülste, die

**Tab. 1.1** Schlundbögen und ihre Abkömmlinge

	<b>Knorpelteil</b>	<b>Mesenchymteil</b>	<b>Muskulaturteil</b>	<b>Nerven</b>
<b>1. Schlundbogen</b> (= Mandibularbogen)	Meckel-Knorpel <ul style="list-style-type: none"> <li>• Malleus</li> <li>• Incus</li> <li>• Lig. mallei anterior</li> <li>• Lig. sphenomandibulare</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maxilla</li> <li>• Mandibula</li> <li>• Os zygomaticum</li> <li>• Pars squamosa des Os temporale</li> <li>• Medialer Zungenwulst</li> <li>• Laterale Zungenwülste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaumuskulatur</li> <li>• M. digastricus, Venter anterior</li> <li>• M. mylohyoideus</li> <li>• M. tensor veli palatini</li> <li>• M. tensor tympani</li> </ul>	N. mandibularis (V <sub>3</sub> )
<b>2. Schlundbogen</b> (= Hyoidbogen)	Reichert-Knorpel <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Stapes</b></li> <li>• Proc. styloideus des Os temporale</li> <li>• Cornu minus des Zungenbeins</li> <li>• Corpus des Zungenbeins (oberer Teil)</li> <li>• Lig. stylohyoideum</li> </ul>	Copula	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mimische Muskulatur</li> <li>• M. digastricus, Venter posterior</li> <li>• M. stylohyoideus</li> <li>• M. stapedius</li> </ul>	N. facialis (VII) mit Chorda tympani
<b>3. Schlundbogen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cornu majus des Zungenbeins</li> <li>• Corpus des Zungenbeins (unterer Teil)</li> </ul>	Hypobranchialer Wulst	<ul style="list-style-type: none"> <li>• M. constrictor pharyngis superior et medius (teilweise)</li> <li>• M. salpingopharyngeus</li> <li>• M. stylopharyngeus</li> <li>• M. palatoglossus</li> <li>• M. palatopharyngeus (teilweise)</li> </ul>	N. glossopharyngeus (IX) mit N. tympanicus
<b>4. Schlundbogen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schildknorpel (Cartilago thyroidea) des Kehlkopfs (oberer Teil)</li> <li>• Keilknorpel (Cartilago cuneiformis) des Kehlkopfs</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• M. constrictor pharyngis medius (teilweise)</li> <li>• M. levator veli palatini</li> <li>• M. cricothyroideus</li> </ul>	N. laryngeus superior des N. vagus (X)
<b>5. Schlundbogen</b>	–	–	–	–
<b>6. Schlundbogen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartilago thyroidea des Kehlkopfs (unterer Teil)</li> <li>• Stellknorpel (Cartilago arytaenoidea) des Kehlkopfs</li> <li>• Spitzenknorpel (Cartilago corniculata) des Kehlkopfs</li> <li>• Ringknorpel (Cartilago cricoidea) des Kehlkopfs</li> </ul>	–	<ul style="list-style-type: none"> <li>• M. pharyngis inferior (teilweise)</li> <li>• <b>Alle inneren Kehlkopfmuskeln</b></li> </ul>	N. laryngeus inferior (recurrens) des N. vagus (X)

## 1.3 Schlundtaschen



Als **Schlundtaschen** bezeichnet man die Rinnen auf der Innenseite des Schlunddarms, die zwischen den Schlundbögen liegen (> Tab. 1.2). Sie sind mit **Entoderm** bedeckt.

Tab. 1.2 Schlundtaschen und ihre Abkömmlinge

Schlundtasche (ST)	Abkömmlinge
1. ST	Recessus tubotympanicus: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Paukenhöhle</li> <li>• Ohrtrumpete (Tuba auditiva)</li> </ul>
2. ST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tonsillarbucht (Fossa tonsillaris)</li> <li>• Oberflächenepithel der Gaumenmandel (Tonsilla palatina)</li> </ul>
3. ST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untere Nebenschilddrüsen (Gll. parathyroideae inferiores)</li> <li>• Thymus (Hauptteil)</li> </ul>
4. ST	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obere Nebenschilddrüsen (Gll. parathyroideae superiores)</li> <li>• Thymus</li> </ul>
5. ST	Ultimobranchialkörper

### MERKE

Aus dem Ultimobranchialkörper gehen die **C-Zellen der Schilddrüse** hervor. Sie sind ein Teil des diffusen neuroendokrinen Systems (DNES) und produzieren das Hormon **Kalzitinin**. Kalzitinin senkt durch Hemmung der Osteoklasten den Kalziumspiegel und bildet somit den Gegenspieler zum Parathormon aus den Nebenschilddrüsen.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.4 Schlundfurchen



Die äußeren Rinnen zwischen den Schlundbögen nennt man **Schlundfurchen**. Sie sind mit **Ektoderm** bedeckt. Aus der 1. Schlundfurchen entsteht der äußere Gehörgang (**Meatus acusticus externus**). Die 2. bis 4. Schlundfurchen stülpen sich zu einer **Höhle (Sinus cervicalis, Operculum)** ein, bevor sie sich zurückbilden.

### KLINIK

Wenn sich der Sinus cervicalis nur unvollständig zurückbildet, können aus ihm laterale Halsfisteln oder -zysten (**brachiogene Fisteln** oder **Zysten**) entstehen. Sie imponieren meist als schmerzlose Schwellungen am vorderen Rand des M. sternocleidomastoideus und fallen häufig erst bei älteren Kindern und Jugendlichen auf. Gelegentlich kann ein Fistelgang auch im Bereich der Gaumenmandel münden.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

Gregor Däubler, Henrik Holtmann, Isa Jauch, Fabian Rengier,  
Michelle Xi

## Vorklinik Finale 11

# Nervensystem

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Björn Jacobi, Maximilian Pfau



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Nervengewebe</b> .....	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>Neurotransmitter und Rezeptoren</b> .....	<b>29</b>
1.1	Neurone .....	1	4.1	Acetylcholin .....	29
1.2	Glia .....	4	4.2	Monoamine .....	31
1.3	Nervenfasern .....	6	4.3	Aminosäuren .....	33
			4.4	Neuropeptide .....	35
<b>2</b>	<b>Gliederung des Nervensystems</b> .....	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>Vegetatives Nervensystem</b> .....	<b>37</b>
2.1	Übergeordnete Gliederungen .....	9	5.1	Gliederung .....	37
2.2	Zentrales Nervensystem (ZNS) .....	9	5.2	Aufbau .....	39
2.3	Peripheres Nervensystem (PNS) .....	11	5.3	Zelluläre und molekulare Mechanismen der Signaltransduktion .....	41
2.4	Segmentale und periphere Innervation .....	13	5.4	Funktionelle Organisation des VNS .....	43
<b>3</b>	<b>Funktionsprinzipien des Nervensystems</b> .....	<b>17</b>		<b>Register</b> .....	<b>47</b>
3.1	Signalübertragung in Zellen .....	17			
3.2	Signalübertragung zwischen Zellen .....	21			
3.3	Signalverarbeitung im Nervensystem .....	26			

# 1

## Nervengewebe

Nervengewebe besteht aus **Neuronen** (Nervenzellen) und **Gliazellen** (Hüllzellen).

### 1.1 Neurone

Henrik Holtmann



Nervenzellen nehmen elektrische oder chemische Signale auf, verarbeiten und geben sie weiter. Sie bestehen aus einem Nervenzellkörper, **Dendriten** und einem **Axon**.

#### 1.1.1 Nervenzellkörper (Perikaryon, Soma)

Der Durchmesser des Nervenzellkörpers schwankt zwischen 5 und 150  $\mu\text{m}$  ( $\gg$  Abb. 1.1). Als trophisches Zentrum der Zelle enthält das Perikaryon ultrastrukturell:

- Einen großen runden Zellkern mit viel Euchromatin und einem ausgeprägten Nucleolus.
- Viele **Neurosomen** (Mitochondrien).
- Reichlich rER mit umliegenden freien Ribosomen im **Neuroplasma** (Zytoplasma). Diese rER-Ribosomen-Konglomerate werden auch als **Nissl-Substanz** (**Nissl-Schollen**, **Tigroidsubstanz**) bezeichnet und sind Ausdruck der ausgeprägten Syntheseleistung von Neuronen (Neurotransmitter, Bestandteile des Zytoskeletts).
- Unzählige Transportvesikel für Neurotransmitter.
- Lysosomen.
- Gelegentlich Lipofuszin und **Neuromelanin**; Letzteres sind Melaninpigmente, die für die Zelle eine schützende, antioxidative Wirkung zu haben scheinen.

#### 1.1.2 Dendriten

Dendriten dienen der Reizaufnahme und der Weiterleitung des empfangenen Signals zum Perikaryon hin. Gewöhnlich hat ein Neuron mehrere Dendriten ( $\gg$  Abb. 1.1).

Meistens verzweigen sie sich baumartig. In der Peripherie sind sie in der Regel schlank und häufig mit Dornen (**Dendritic spines**) besetzt, die ebenfalls der Reizaufnahme dienen.

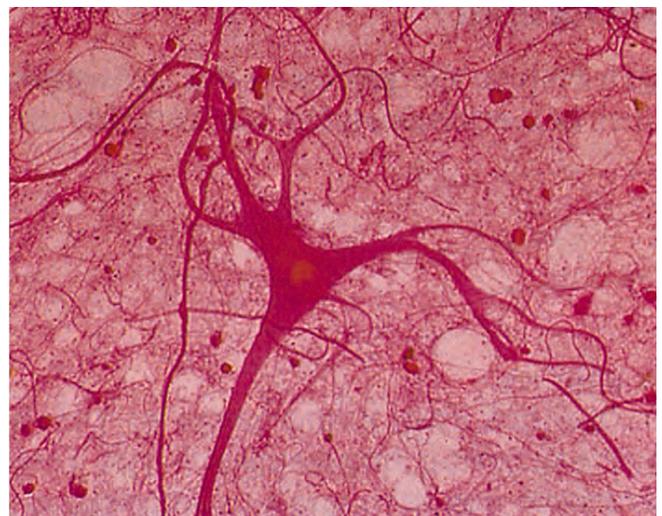
Nahe des Perikaryons sind sie mit Golgi-Apparat, Nissl-Substanz und Neurosomen angefüllt.

#### 1.1.3 Axon (Neurit)

Das Axon dient der Erregungsweiterleitung vom Perikaryon zu anderen Zellen wie Drüsen-, Muskel- und Nervenzellen. Grundsätzlich haben alle Neurone nur **ein** Axon ( $\gg$  Abb. 1.1). In der Peripherie zweigt sich das Axon zum **Telodendron** („Endbäumchen“) auf. Axone haben einen fast konstanten Durchmesser von 20  $\mu\text{m}$ .

Beim Axon lassen sich vier Teilbereiche unterscheiden:

- **Axonhügel** (Ursprungssegment): Der Ansatzbereich des Axons am Perikaryon. Bereits ab hier ist das Axon frei von Nissl-Substanz und Golgi-Apparat.
- **Initialsegment** (Anfangssegment): Ort, an dem im Axon neue Aktionspotenziale generiert werden. Hier ist das **Axolemm**, die Plasmamembran des Axons, von vielen  $\text{Na}^+$ -Kanälen überzogen. Falls das Axon eine Myelinscheide hat, beginnt diese distal des Initialsegments.
- **Hauptverlaufsstrecke**: trägt im Fall myelinisierter Axone eine Myelinscheide, die sich eigentlich aus vielen einzelnen, durch Ranvier-Schnürringe unterbrochenen Myelinscheiden zusammensetzt. Sie kann bei manchen myelinscheidenlosen Neuronen **Varikositäten** (präterminale Axonschwellungen) tragen, die Teil einer chemischen Synapse sind. Dies ist z. B. bei Neuronen des vegetativen Nervensystems der Fall.
- **Telodendron** (Endaufzweigung): Das Axon endet in kolbenartigen **Boutons** (Endknöpfe), die mit anderen Zellen über chemische Synapsen in Kontakt stehen.



**Abb. 1.1** Nervenzelle (Zellkörper mit Axon und Dendriten; Rückenmark; Vergrößerung, hohe Vergrößerung) [X141]

**MERKE**

Je nach Richtung der Erregungsleitung spricht man von Afferenz oder Efferenz.

Die Signalweiterleitung wird als **afferent** bezeichnet, wenn die Erregung über Dendriten zum Perikaryon oder zu Kerngebieten im zentralen Nervensystem (ZNS) hingeleitet wird.

Die Signalübertragung ist **efferent**, wenn die Erregung vom Perikaryon über das Axon oder von Kerngebieten des ZNS weggeführt wird.

**1.1.4 Klassifizierung von Neuronen**

**Golgi-Typ** Neurone mit großem Perikaryon und einem über 1 m langen Axon werden auch als **Golgi-Typ-I-Neurone** bezeichnet. Sie dienen der Kommunikation weit entfernter Bereiche im Nervensystem und werden auch **Projektionsneurone** genannt.

Das Gegenteil sind **Golgi-Typ-II-Neurone**, sog. **Interneurone**, die nur über kurze Strecken Informationen zwischen Neuronen weitergeben.

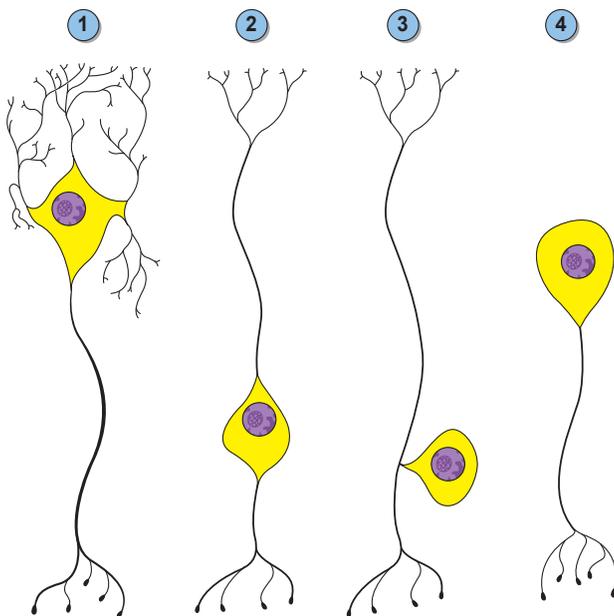
**Bipolare Neurone** Die Neurone haben zwei Pole: Der eine Pol ist das Axon, der andere ein Dendrit mit distaler Verzweigung (**Dendritenbaum**, > Abb. 1.2 [2]).

**Multipolare Neurone** Sie haben viele Pole, d. h. neben einem Axon mehrere Dendritenbäume (> Abb. 1.2 [1]).

**Pseudounipolare Neurone** Perikaryonnahes Axon und Dendrit sind **T-förmig** miteinander verschmolzen. Die über einen Dendritenbaum aufgenommenen Signale werden, ohne das Perikaryon zu überqueren, direkt auf das Axon übergeleitet. Bei pseudounipolaren Neuronen wird der Dendrit auch als **dendritisches Axon** bezeichnet (> Abb. 1.2 [3]).

**Unipolare Neurone** Das Axon ist der einzige Pol dieser Nervenzelle. Es gibt keinerlei Dendriten (> Abb. 1.2 [4]).

**Weitere Neurontypen** Beispiele hierfür sind die **Purkinje-Zellen** des Kleinhirns mit bis zu vier riesigen Dendritenbäumen, die ein spalierförmiges Geflecht bilden, die **Pyramidenzellen** der



**Abb. 1.2** Ausgewählte Neurontypen mit nach unten gerichtetem Axon: multipolar (1), bipolar (2), pseudounipolar (3) und unipolar (4) (Welsch/Kummer/Deller. Histologie. 5. A. 2018 © Elsevier GmbH) [R170-3]

Endhirnrinde, die neben einem langen **Apikaldendriten** (Spitzen-dendrit) viele seitliche Basaldendriten ausformen; und die Sinneszellen der Regio olfactoria, die eine spezielle Form der bipolaren Neurone mit stark reduziertem Dendriten sind.

**1.1.5 Chemische Synapse**

An dieser Form der Synapse wird ein zunächst elektrisches Signal, das Aktionspotenzial, in ein chemisches Signal, den Neurotransmitter, übersetzt und dann zurück in ein elektrisches transferiert.

**Axonendknopf** Dem Verlauf des Signals nach ist dies der erste zu nennende Bereich der chemischen Synapse. Der Axonendknopf wird von der präsynaptischen Membran umschlossen. Er enthält viele Mitochondrien und synaptische Vesikel mit einem Durchmesser von bis zu 50 nm, die Neurotransmitter enthalten.

**MERKE**

**Nicht proteinerge Neurotransmitter** werden im Axonendknopf gebildet und dort auch in Vesikeln gespeichert. **Proteinerge Transmitter**, sog. **Neuropeptide**, werden hingegen im Perikaryon produziert und von dort das Axon entlang in den Axonendknopf transportiert.

**Aktive Zone** Ein Aktionspotenzial, das den Axonendknopf erreicht, führt in der präsynaptischen Membran zur Öffnung von spannungsaktivierten  $Ca^{2+}$ -Kanälen mit Anstieg der zytosolischen  $Ca^{2+}$ -Konzentration und über eine Vernetzung von **SNARE-Proteinen** zur Fusion der **synaptischen Vesikel** mit der präsynaptischen Membran. Durch Exozytose wird der Neurotransmitter in den synaptischen Spalt freigesetzt. Die Membran der Vesikel wird durch Endozytose aus der präsynaptischen Membran zurückgewonnen.

Der Ort der Präsynapse, an dem die Freisetzung der Transmitter geschieht, erscheint unter dem EM ultrastrukturell verdichtet und wird als **aktive Zone** bezeichnet.

**MERKE**

Sinneszellen, die einen konstanten und hohen Neurotransmitterumsatz haben, weisen präsynaptisch **synaptische Bänder und Lamellen** auf, die synaptische Vesikel in hoher Zahl gebunden haben. Diese sorgen für eine schnelle und koordinierte Exozytose großer Mengen Neurotransmitter. Sie finden sich vor allem an den Fotorezeptor- und Bipolarzellen der Netzhaut sowie an den vestibulocochleären Haarzellen.

**Synaptischer Spalt und postsynaptische Membran** Die Neurotransmitter diffundieren durch den ca. 20 nm breiten Spalt und binden an die Neurotransmitter-Rezeptoren der postsynaptischen Membran der Zielzelle. Aufgrund der dort konzentrierten Rezeptoren erscheint diese Membran verdichtet. Man spricht deshalb auch von **Postsynaptic densities**. Je nachdem, wo sich die postsynaptische Membran bei der Empfängerzelle befindet, wird die transmitterausschüttende Synapse unterschiedlich benannt:

- **Axodendritische Synapse:** Die postsynaptische Membran gehört zu einem Dendriten. Häufigster Fall.
- **Axosomatische Synapse:** Die Erregung wird an das Perikaryon einer anderen Nervenzelle weitergegeben.
- **Axoaxonale Synapse:** Die Synapse knüpft an das Initialsegment oder Telodendron eines anderen Axons an.

**Postsynaptische Signalweiterleitung** Binden die Neurotransmitter an die Rezeptoren der postsynaptischen Membran, öffnen sich dort die Ionenkanäle. Dies führt bei der postsynaptischen Membran entweder zu einer Depolarisation mit Entstehung eines Aktionspotenzials oder zu einer Hyperpolarisation mit Absenkung des Membranpotenzials, sodass die angesteuerte Nervenzelle schwerer zu erregen ist. Im Fall einer Depolarisation bezeichnet man die chemische Synapse daher als **exzitatorische** (erregende) Synapse. Die Erregung pflanzt sich Richtung Perikaryon und Axon fort (s. u.). Bei einer Hyperpolarisation spricht man von einer **inhibitorischen** (hemmenden) Synapse.

### MERKE

Aufgrund ultrastruktureller Unterschiede unterscheidet man zwischen **Gray-I-Synapsen** (Synapse vom asymmetrischen Typ), die runde Transmittervesikel enthalten und postsynaptisch eine breitere Verdichtung zeigen als präsynaptisch, und **Gray-II-Synapsen** (Synapse vom symmetrischen Typ) mit vielen ovalen Transmittervesikeln und gleich breiter prä- und postsynaptischer Verdichtung.

### KLINIK

Neurotoxine von Bakterien, z. B. das **Tetanustoxin** von *Clostridium tetani*, werden über Endozytose in den präsynaptischen Axonendknopf aufgenommen und blockieren dort die SNARE-Proteine, sodass keine Transmitterexozytose mehr stattfinden kann. Das Tetanustoxin blockiert v. a. hemmende Synapsen im Rückenmark und verursacht dadurch schwerste Krämpfe.

### MERKE

Die Abgabe von Neuropeptiden über das Axonende an Kapillaren und damit den Blutkreislauf bezeichnet man als **Neurosekretion**. Da diese Neuropeptide ihre Zielzellen über die Blutbahn erreichen, handelt es sich hier definitionsgemäß um **Hormone**.

## 1.1.6 Elektrische Synapse

Bei elektrischen Synapsen handelt es sich um **Gap junctions**, die als spannungsgesteuerte, transmitterfreie Synapsen fungieren. Da sie die Nerven- und Muskelzellen direkt miteinander verbinden, ist eine schnelle, synchrone Weiterleitung der Aktionspotenziale gegeben. Häufig verteilt sich die Erregung ungerichtet zwischen den Zellen. Man spricht hier von einem **funktionellen Synzytium**.

Diese direkte Art der Verschaltung findet man seltener im Nervengewebe, z. B. vereinzelt in der Kleinhirnrinde. Weitaus häufiger kommen elektrische Synapsen zwischen glatten Muskelzellen und zwischen Kardiomyozyten vor.

## 1.1.7 Weitere ultrastrukturelle Bestandteile von Neuronen

Das gesamte Neuron hat ein stützendes Zytoskelett, bestehend aus **Neurofilamenten** (Intermediärfilamenten), **Neurotubuli** (Mikrotubuli) und Mikrofilamenten (Aktinfilamente). Neuro- und Mikrofilamente dienen der Stabilisierung der Zelle, Mikrotubuli und Mikrofilamente dem intrazellulären Transport von Nährstoffen, Peptiden und Zellorganellen.

Die Neurotubuli transportieren mithilfe des Motorproteins **Kinesin** z. B. Mitochondrien und leere oder mit Transmittern gefüllte Vesikel aus dem Perikaryon durch das Axon zu den einzelnen Synapsen. Die Transportgeschwindigkeit dabei ist hoch: bis zu 40 cm/d.

Abfallstoffe, nicht gebrauchte Membranfragmente und Mitochondrien aus den Synapsen und der dazwischenliegenden Strecke werden entlang der Neurotubuli mithilfe des Motorproteins **Dynein** mit einer geringeren Geschwindigkeit von 20 cm/d zurück zum Perikaryon gebracht. Stabilisiert werden die Neurotubuli durch mikrotubulusassoziierte Proteine (**MAP**), z. B. durch das **Tau-Protein** in den Axonen, welches seine stützende Funktion vor allem dadurch erfüllt, dass es den Zusammenbau der Tubuli reguliert.

Über die Mikrofilamente – in Verbindung mit Myosinen – erfolgt der Kurzstreckentransport und im Axonplasma der mit 0,4 cm/d langsame Transport von zytosolischen Bestandteilen, z. B. Enzymen für die Monoaminsynthese, zu den Axonendknöpfen.

### FOKUS

Bei der **Alzheimer-Erkrankung** (Alzheimer-Demenz, Morbus Alzheimer) kommt es u. a. zu einer intrazellulären Ablagerung von hyperphosphorylierten Tau-Proteinen. Durch die Inaktivität dieses Proteins entsteht eine Destabilisierung der Mikrotubuli, was den intrazellulären, neuronalen Transport beeinträchtigt.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Glia

Henrik Holtmann



Die Glia (*griech.* Leim, Neuroglia) ist das interstitielle stützende Bindegewebe des ZNS und steht in enger räumlicher und funktionaler Verbindung zu den Neuronen. Quantitativ sind sie je nach Region in ZNS oder PNS zwischen 10- und 50-mal häufiger als Neurone.

Zu den vielfältigen Funktionen der Gliazellen gehören u. a. die Bildung der EZM, die Isolierung von Neuronen, Stoffwechseltransport.

**Makrogliazellen** Entstammen wie die Neurone dem Neuroektoderm. Im ZNS gehören zu den Makrogliazellen die Astrozyten, Ependymzellen und Oligodendrozyten, im PNS sind es die Mantelzellen und Schwann-Zellen.

**Mikrogliazellen** Eine Besonderheit unter den verschiedenen Gliazellen. Sie sind **nicht** neuroektodermal, sondern **mesodermaler** Herkunft, daher auch die Bezeichnung **Mesogliazellen**. Es handelt sich um Zellen des Makrophagen-Phagozyten-Systems (MPS), die in das ZNS eingewandert sind. Die Mikrogliazellen sind die inflammatorischen Zellen des ZNS. Ihre Hauptaufgabe ist die aktive Immunabwehr des ZNS, da die Blut-Hirn-Schranke (BHS) für Antikörper unpassierbar ist. Die Pathogene werden durch Phagozytose beseitigt.

### 1.2.1 Astrozyten

Astrozyten haben einen sternförmig verzweigten Zelleib und füllen den spärlichen Extrazellularraum im Nervengewebe. Man unterscheidet zwei Typen:

- **Protoplastische Astrozyten** („Kurzstrahler“) mit bis zu 25 µm großem Perikaryon und kurzen Zellfortsätzen, die sich überwiegend in der grauen Substanz finden
- **Fibrilläre Astrozyten (Faserglia, „Langstrahler“)** mit bis zu 12 µm großem Perikaryon und längeren Zellfortsätzen, die nahezu ausschließlich in der weißen Substanz vorkommen

Beide Typen exprimieren als reife Zellen **GFAP** (Glial fibrillary acidic protein, saures Gliafaserprotein), ein Intermediärfilament, das vermutlich die äußere Form und Beweglichkeit von Astrozyten bedingt. Astrozyten eines Typs sind untereinander netzwerkartig durch Gap junctions verbunden. Sie übernehmen die Stützfunktion des ZNS, regulieren die Homöostase des Extrazellularrums, phagozytieren Abfallstoffe und legen sich an neuronale Synapsen, wo sie überschüssige, neuronal nicht von der Präsynapse zurückgewonnene Transmitter aufnehmen. Darüber hinaus umschließen sie zur Isolierung locker marklose Nervenfasern des ZNS.

#### KLINIK

GFAP kann als Tumormarker bei Hirntumoren verwendet werden. Es findet sich z. B. in Astrozytomen, Glioblastomen und Oligodendrogliomen.

Eine ihrer wichtigsten Funktionen ist die Ausbildung dichter Schutzbarrieren:

- **Membrana limitans gliae superficialis:** äußere Oberfläche des ZNS; grenzt das ZNS von der weichen Hirnhaut ab

- **Membrana limitans gliae perivascularis:** Teil der BHS, umgibt deren Blutgefäße

Astrozyten sind an der Entwicklung der Nervenzellen beteiligt: Sie synthetisieren **Neurotrophine**, die auf die Neuronen wachstumsfördernd wirken, und dienen aussprossenden Neuronenfortsätzen als Leitschiene, an der diese sich zu weiter entfernten Zellen entlanghangeln.

#### MERKE

Bei den **Radialgliazellen** handelt es sich um einen speziellen Astrozytentyp. Diese Zellen sind für die Entwicklung des ZNS entscheidend, da sie u. a. bei der Ausbildung des Gehirns Leitstruktur für die Wanderung junger Neurone sind.

Während sich die meisten von ihnen zu reifen Astrozyten differenzieren, lassen sich im adulten ZNS nur noch **Bergmann-Glia** im Kleinhirn und die **Müller-Zellen** der Retina als direkte Abkömmlinge der Radialglia identifizieren.

Ein weiterer spezieller Astrozytentyp sind die **Pituizyten**, die nur im Hypophysenhinterlappen (HHL) lokalisiert sind. Pituizyten beeinflussen den Transport, die Speicherung und die Freisetzung von Hormonen in den Nervenfasern.

### 1.2.2 Ependymzellen

Ependymzellen überziehen den Zentralkanal des Rückenmarks und die inneren Liquorräume einschließlich der Ventrikel im Gehirn. Es handelt sich um einschichtig kubische bis hochprismatische Zellen, die dicht mit Kinozilien und Mikrovilli besetzt sind. Sie sind durch Adhäsionskontakte und Gap junctions miteinander verbunden und bilden damit die innere Barriere des ZNS zwischen Hirngewebe und Liquor cerebrospinalis, die sog. **Membrana limitans interna**. Diese Membran ist allerdings keine vollständig hermetische Schranke.

Spezielle Ependymzellen wie das **Plexusepithel** bedecken den Plexus choroideus, den Ort der Liquorbildung. Bei ihnen handelt es sich um nahezu ausschließlich kubische Zellen mit Mikrovillibesatz, die durch Tight junctions so fest miteinander verbunden sind, dass sie das Plexusepithel regelrecht abdichten. Das Plexusepithel ist Teil der Blut-Liquor-Schranke (BLS).

Andere spezielle Ependymzellen sind die **Tanyzyten**. Man findet sie als **ventrikuläre Tanyzyten** mit langen basalen Ausläufern und vielen apikalen Kinozilien/Mikrovilli und **zirkumventrikuläre Tanyzyten** mit meist nur einer einzelnen Kinozilie und basalen, bis zu 500 µm langen Fortsätzen. Sie bilden eine wirksame BLS aus und verhindern den Übergang toxischer Substanzen aus dem Blut in den Liquor.

### 1.2.3 Oligodendrozyten

Kleine Gliazellen mit ultrastrukturell elektronendichtem Zytoplasma und zahlreichen Mikrotubuli. In der grauen Substanz umgeben sie wie Satellitenzellen die Nervenzellkörper. In der weißen Substanz reihen sich die Oligodendrozyten in Ketten hintereinander und sind durch Gap junctions und Tight junctions fest miteinander verbunden. Sie liegen den Axonen eng an und bilden die Myelinscheiden der Neurone des ZNS.

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski, Fabian Rengier

**Vorklinik Finale 12**

# **Zentralnervensystem**

1. Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Entwicklung des Zentralnervensystems</b> .....	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>Liquorräume und Meningen</b> .....	<b>33</b>
1.1	Neuralinduktion und Neurulation .....	1	5.1	Innere Liquorräume .....	33
1.2	Entstehung des Rückenmarks .....	2	5.2	Hirn- und Rückenmarkshäute, äußere Liquorräume .....	35
1.3	Entstehung des Gehirns .....	3			
<b>2</b>	<b>Encephalon</b> .....	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>Gefäßversorgung und Topografie des ZNS</b> ...	<b>39</b>
2.1	Großhirn .....	5	6.1	Gefäßversorgung .....	39
2.2	Kleinhirn .....	9	6.2	Angewandte und topografische Anatomie .....	43
<b>3</b>	<b>Stammhirn</b> .....	<b>13</b>	<b>7</b>	<b>Feinstruktur des ZNS</b> .....	<b>47</b>
3.1	Rautenhirn .....	13	7.1	Rückenmark .....	47
3.2	Mittelhirn .....	18	7.2	Kleinhirn .....	48
3.3	Zwischenhirn .....	21	7.3	Endhirnrinde .....	49
			7.4	Liquorräume und Schranken des ZNS .....	51
			7.5	ZNS-Häute .....	52
<b>4</b>	<b>Rückenmark, Systeme und Bahnen</b> .....	<b>25</b>		<b>Register</b> .....	<b>54</b>
4.1	Rückenmark .....	25			
4.2	Systeme und Bahnen .....	30			

# 1

# Entwicklung des Zentralnervensystems

## 1.1 Neuralinduktion und Neurulation

Christoph Jaschinski



Das gesamte Zentralnervensystem entwickelt sich aus **Ektoderm**, wobei die Chorda dorsalis und das paraaxiale Mesoderm zunächst die Differenzierung des darüberliegenden Ektoderms zur **Neuralplatte** (Lamina neuralis) induzieren und somit gleichzeitig die natürliche Differenzierung des darüberliegenden Ektoderms zum Oberflächenektoderm verhindern. Diesen Vorgang nennt man **Neuralinduktion**.

An die Neuralplatte grenzt ein Band ektodermaler Zellen, die man als **Neuralleiste** bezeichnet. Aus der Neuralleiste entstehen in der weiteren Entwicklung v. a. Teile des peripheren Nervensystems. Die Ränder der Neuralplatte wölben sich beidseits zu Neuralfalten auf, wodurch in der Mittellinie die **Neuralrinne** (Sulcus neuralis) entsteht. Auf Höhe des 4. Somiten schließen sich in der 4. EW die **Neuralfalten** (Plicae neurales) zum **Neuralrohr** (Tubus neuralis). Diesen Vorgang nennt man **Neurulation**. Sie endet mit dem Schluss des kaudalen Neuralrohrendes (Neuroporus caudalis) am 26. ET. 2 Tage vorher schließt sich bereits das kraniale Neuralrohrende (Neuroporus cranialis).

Aus den 2 kranialen Dritteln des Neuralrohrs entwickelt sich das spätere Gehirn. Aus dem kaudalen Drittel des Neuralrohrs bildet sich das Rückenmark. Die Grenze zwischen beiden Anteilen bildet der 4. Somit.

### KLINIK

Wenn sich das Neuralrohr kranial nicht verschließt, entsteht eine **Anenzephalie**. Unterbleibt der kaudale Verschluss des Neuralrohrs, entsteht eine **Spina bifida**.

Anenzephalie bezeichnet ein weitgehendes oder vollständiges Fehlen des Groß- und Zwischenhirns sowie des Schädeldachs. Sie ist mit dem Leben nicht vereinbar.

Eine Spina bifida kann abhängig vom Schweregrad der Erkrankung sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Das klinische Erscheinungsbild reicht von vereinzelt unvollständig verschlossenen Wirbelbögen über herausquellende Hirnhäute (**Meningozele**) bis zu austretendem Rückenmark (**Meningomyelozele**). Somit variiert auch der Zeitpunkt der Diagnosestellung von einem röntgenologischen Zufallsbefund zur Abklärung unklarer Rückenschmerzen (Spina bifida occulta) bis zu einer perinatalen Blickdiagnose (Spina bifida aperta).

Ein erhöhtes  $\alpha$ -Fetoprotein (**AFP**) im mütterlichen Blut oder Fruchtwasser kann auf eine Verschlussstörung des Neuralrohrs hinweisen. Präventiv wird die Substitution von **Folsäure** bereits 4 Wochen vor der Empfängnis empfohlen.

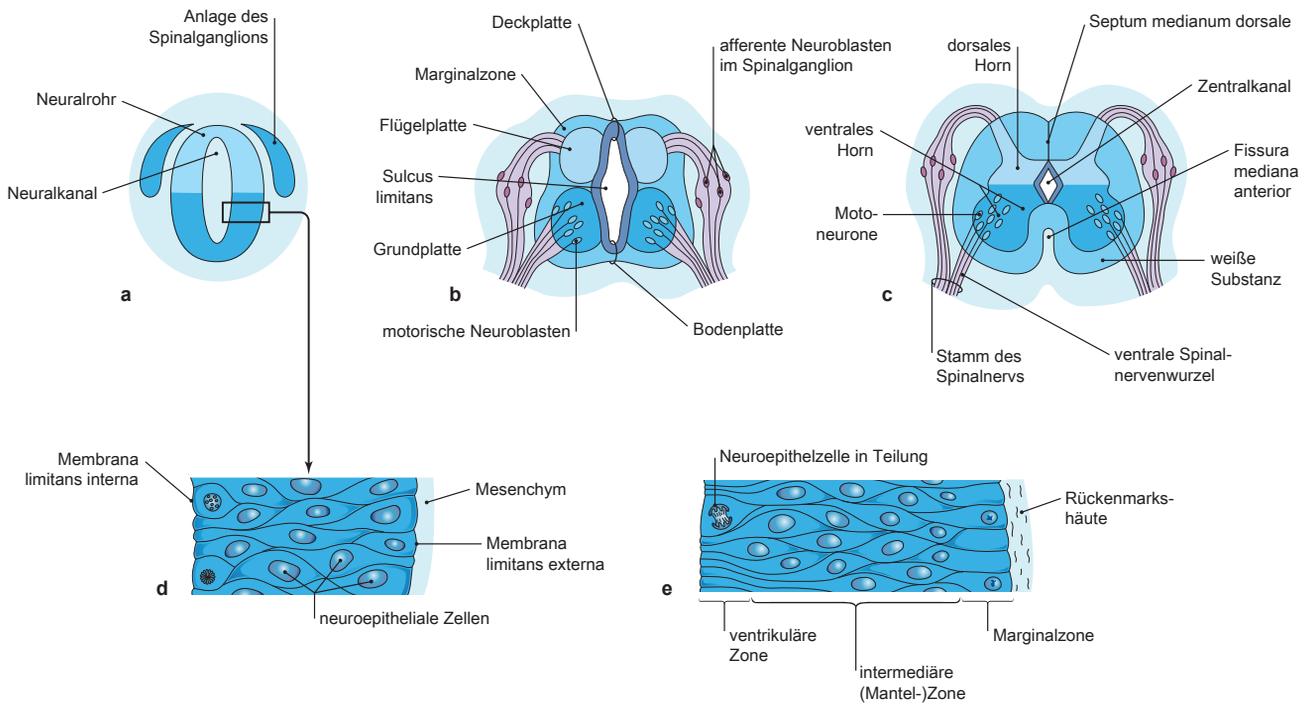
### CHECK-UP

Beschreibe die Vorgänge Neuralinduktion und Neurulation!

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.



**Abb. 1.1** Entwicklung von Rückenmark, Spinalganglien, Vorder- und Hinterwurzeln und Spinalnerven: a = 4. EW (Neuralrohrstadium), b = 6. EW, c = 20.–25. EW. Pfeile im Canalis centralis markieren den Sulcus limitans (Moore/Persaud/Torchia. The Developing Human. 9th ed. 2013 © Elsevier) [E347-09]

## 1.2 Entstehung des Rückenmarks

Christoph Jaschinski



Im Laufe der Entwicklung grenzen sich verschiedene Abschnitte voneinander ab (> Abb. 1.1):

- **Ventrikulärzone** (Stratum ependymale): besteht anfänglich aus mehrreihigem Neuroepithel, aus dem sich Proneurone und Glioblasten differenzieren:
  - **Proneurone:** Vorläufer aller Nervenzellen des ZNS
  - **Glioblasten:** Vorläufer aller Makrogliazellen des ZNS
- Die Ventrikulärzone besteht später aus Ependym, das den Zentralkanal (**Canalis centralis**) auskleidet. Zum Canalis centralis hin verdichtet sich das Epithel zur inneren Grenzmembran (**Membrana limitans interna**).
- **Intermediärzone** (Stratum palliale, Mantelzone): entsteht zwischen Ventrikulär- und Marginalzone durch das Einwachsen von Proneuronen. Diese neuronalen Progenitorzellen verdicken sich zur ventral gelegenen **Grundplatte**, dem späteren somatomotorischen Vorderhorn, und der dorsal gelegenen **Flügelplatte**, dem späteren somatosensorischen Hinterhorn. Die Grenze zwischen Grund- und Flügelplatte bildet der **Sulcus limitans**. Hier liegen die viszeromotorischen und -sensiblen Rückenmarksanteile. Aus der **Intermediärzone** entsteht die graue Substanz des Rückenmarks.
- **Marginalzone** (Stratum marginale): grenzt sich nach außen über die äußere Grenzmembran (**Membrana limitans externa**) zum Mesenchym hin ab. Aus der Marginalzone bildet sich später die weiße Substanz des Rückenmarks.

Dieser Wandaufbau trifft allerdings nur für die Seitenwände (Seitenplatten) zu. Der dorsale Wandabschnitt (Deckplatte) bleibt als nicht weiter differenziertes Neuroepithel bestehen. Der ventrale Teil (Bodenplatte) entsteht vermutlich aus dem Mesoderm des Primitivknotens.

### CHECK-UP

Nenne die 3 Wandzonen des Rückenmarks!

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Entstehung des Gehirns

Christoph Jaschinski



Am 24. ET lassen sich am kranialen Ende des Neuralrohrs die 3 primären Hirnbläschen voneinander abgrenzen:

- **Vorderhirnbläschen** (Prosencephalonbläschen): Vorläufer für Großhirn (Telencephalon) und Zwischenhirn (Diencephalon)
- **Mittelhirnbläschen** (Mesencephalonbläschen): Vorläufer des Mittelhirns (Mesencephalon)
- **Rautenhirnbläschen** (Rhombencephalonbläschen): Vorläufer für das Hinterhirn (Metencephalon), aus dem Brücke (Pons), Kleinhirn (Cerebellum) und Nachhirn (Myelencephalon) – der Vorgänger des verlängerten Rückenmarks (Medulla oblongata) – hervorgehen.

Durch das schnelle Wachstum der Hirnanlagen entstehen 3 Beugungen, die für die Regionalisierung des Gehirns in seine verschiedenen Abschnitte von Bedeutung sind:

- **Scheitelbeuge** (Flexura mesencephalica): wird durch das Mesencephalon gebildet und verbindet Prosencephalon und Rhombencephalon.
- **Brückenbeuge** (Flexura pontina): unterteilt das Rautenhirn in das kaudale Myelencephalon und das kraniale Metencephalon. Sie bewirkt zudem ein Auseinanderweichen der Seitenplatten, sodass die Kerne am Boden des IV. Ventrikels zu liegen kommen.
- **Nackenbeuge** (Flexura cervicalis): grenzt das Rhombencephalon vom Rückenmark ab.

Im Gehirn besteht grundsätzlich die gleiche dreigliedrige Gliederung aus Ventrikulär-, Intermediär- und Marginalzone wie im

Rückenmark. In der **Großhirnrinde** entstehen jedoch 3 zusätzliche Schichten:

- **Ventrikulärzone**: differenziert sich zu Ependym
- **Subventrikulärzone**: Proliferationszone, insbesondere für gliale Vorläuferzellen
- **Intermediärzone**: entwickelt sich zur weißen Substanz
- **Unterplatte**: wird durch eine transiente Zellpopulation gebildet und geht größtenteils durch Apoptose unter
- **Kortikale Platte**: bildet die Laminae II–VI des Isokortex
- **Marginalzone**: bildet die Lamina I des Isokortex

### CHECK - UP

Beschreibe die 6 Wandzonen der Großhirnrinde!

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

---

**Jetzt bist du dran!**

---

**Zeichenaufgabe**

Zeichne vier verschiedene Stadien der Einsenkung des Neuroektoderms und wie aus der Neuralplatte das Neuralrohr und Neuralleisten werden.

Welche Krankheiten entstehen bei einem fehlenden Verschluss des Neuralrohrs? Welcher biologische Marker weist bereits während der Schwangerschaft auf eine Verschlussstörung des Neuralrohrs hin?

**Überblick gewinnen**

Nutze deine gesammelten Stichwörter für eine Mindmap oder eine gegliederte Stichwortliste.

---

# 2

## Encephalon

### 2.1 Großhirn

Christoph Jaschinski



#### 2.1.1 Makroskopischer Aufbau

Das Großhirn (**Telencephalon, Endhirn**) liegt in der vorderen und mittleren Schädelgrube. Es ist der größte Gehirnabschnitt und macht etwa 80 % des Hirngewichts aus.

Das Telencephalon besteht aus 2 Hemisphären (**Hemispheria cerebri**), die durch den Interhemisphärenspalt (**Fissura longitudinalis cerebri**) getrennt sind. Innerhalb der Fissura longitudinalis cerebri liegt in situ die Hirnsichel (**Falx cerebri**), eine Platte aus harter Hirnhaut.

Jede Hemisphäre lässt sich in 6 Großhirnloben untergliedern:

- **Frontallappen** (Lobus frontalis)
- **Parietallappen** (Lobus parietalis)
- **Okzipitalappen** (Lobus occipitalis)
- **Temporallappen** (Lobus temporalis)
- **Insellappen** (Lobus insularis, Insula)
- **Limbischer Lappen** (Lobus limbicus)

Grundsätzlich unterscheidet man an jeder Hemisphäre 3 Flächen und 2 Ränder: Facies medialis, Facies superolateralis und Facies inferior sowie Margo superior (Mantelkante) und Margo inferolateralis.

Zu den Seiten läuft jede Hemisphäre zu prominenten Rundungen, den sog. Polen, aus: rostral zum **Frontalpol**, lateral zum **Temporalpol** und okzipital zum **Okzipitalpol**.

Trotz der großen morphologischen Ähnlichkeit weisen die Hemisphären schwerpunktmäßige Kompetenzen auf. Man spricht von „**Hemisphärendominanz**“. So liegt bei einem Rechtshänder das motorische und sensorische Sprachzentrum fast immer auf der linken Hemisphäre, wohingegen bei einem Linkshänder sowohl die rechte als auch die linke Hemisphäre dominant sein können.

Die Oberfläche des Großhirns ist durch tiefe Hirnfurchen (**Sulci cerebri**) und ineinander verschlungene Hirnwindungen (**Gyri cerebri**) gekennzeichnet. Diese Strukturen führen zu einer erheblichen Zunahme der Großhirnoberfläche –  $\frac{2}{3}$  sind von außen nicht sichtbar.

#### Sulci cerebri

Bei den Hirnfurchen unterscheidet man Primär-, Sekundär- und Tertiärfurchen:

- **Primärfurchen:** trennen die Großhirnloben voneinander ab. Sie finden sich bei allen Menschen. Die auffälligsten Primärfurchen sind:

- Sulcus centralis (Rolando-Furche): trennt Lobus frontalis und Lobus parietalis
- Sulcus lateralis: markiert die Grenze zwischen Lobus temporalis auf der einen Seite und Lobi frontalis et parietalis auf der anderen Seite
- Sulcus parietooccipitalis: bildet die Grenze zwischen Lobus parietalis und Lobus occipitalis
- Sulcus calcarinus: spaltet den Lobus occipitalis in nahezu transversaler Richtung
- **Sekundärfurchen:** unterteilen den einzelnen Großhirnloben. Sie sind variabel ausgeprägt.
- **Tertiärfurchen:** gehen von den Sekundärfurchen ab und sind so einzigartig wie ein Fingerabdruck.

#### 2.1.2 Innerer Aufbau

Die graue Substanz findet sich im Telencephalon an 2 Orten: Zum einen formt sie die oberflächlich gelegene **Großhirnrinde** (Cortex cerebri, **Kortex**), zum anderen die Basalganglien. Die weiße Substanz des Telencephalons nennt man **Großhirnmark** (**Medulla cerebri**). In ihm verlaufen die Bahnen des Telencephalons.

#### MERKE

Gemäß ihren histologischen Charakteristika wurden die einzelnen Abschnitte der Großhirnrinde in Flächen (**Areae**) gegliedert und durchnummeriert (**Rindfelder nach Brodmann**, > Abb. 2.1).

#### Cortex cerebri

##### Frontallappen

- **Gyri frontales superior et medius:** bezeichnet man auch als **frontalen Assoziationskortex**. Er ist der Ort höherer geistiger Fähigkeiten, z. B. des Kurzzeitgedächtnisses oder ethischen und planerischen Handelns. Er wird als **Areae 9–11** bezeichnet.
- **Gyrus frontalis inferior:** besteht aus Pars orbitalis, Pars opercularis und Pars triangularis. Insbesondere im Bereich der beiden letztgenannten Abschnitte liegt auf der dominanten Hemisphäre das motorische Sprachzentrum (**Broca-Zentrum**). Es erhält Afferenzen aus der sekundären Hörrinde, die wichtig sind, um ein Wort nachsprechen zu können. Darüber hinaus erreichen Fasern aus der sekundären Sehrinde das Broca-Zentrum. Sie sind die anatomische Voraussetzung, um Texte vorlesen zu können. Im Broca-Zentrum werden Wortlaut und Satzbau geformt. Seine Efferenzen ziehen zum Gyrus precentralis, der dann die für die Sprache wichtigen Muskeln aktiviert. Dem Broca-Zentrum ordnet man die **Areae 44 und 45** zu.

Gregor Däubler, Thomas Fink, Raphael Kunisch

## Vorklinik Finale 13

# Bewusstsein, Corticale Interaktion & Therapiemethoden

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Victoria Weltzer



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Bewusstsein und corticale Interaktion</b> .....	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Therapiemethoden und ihre Grundlagen</b> .....	<b>31</b>
1.1	Allgemeine Physiologie und funktionelle Anatomie der Großhirnrinde .....	1	2.1	Lernen und Verhaltenstherapie .....	31
1.2	Integrative Funktionen durch corticale und subcorticale Interaktionen .....	5	2.2	Psychodynamik .....	36
1.3	Biologie und Kognition .....	10	2.3	Klientenzentrierte Gesprächspsychotherapie .....	40
1.4	Psychologie des Individuums .....	19	2.4	Systemische Therapie .....	41
1.5	Motivation .....	22	2.5	Psychotherapieverfahren im Vergleich .....	42
1.6	Persönlichkeit und Verhaltensstile .....	24		<b>Register</b> .....	<b>45</b>
1.7	Entwicklungs- und Sozialpsychologie .....	26			

# 1

## Bewusstsein und corticale Interaktion

### 1.1 Allgemeine Physiologie und funktionelle Anatomie der Großhirnrinde

Gregor Däubler



#### 1.1.1 Organisation der Großhirnrinde

##### Aufbau

**Laminae** Der Cortex gliedert sich anatomisch und funktionell in zwei Hemisphären, die teilweise unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Zytoarchitektonisch besteht der Cortex aus sechs **Laminae** (Schichten), die sich morphologisch und funktionell unterscheiden. Sie werden von außen nach innen römisch nummeriert (> Tab. 1.1).

**Neuronentypen** Die corticalen Neurone lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen.

- **Pyramidenzellen:** Projektionsneurone des Cortex, wirken über ihren Transmitter Glutamat exzitatorisch
- **Nicht-Pyramidenzellen** (z. B. Sternzellen, Korbzellen): heterogene Population von meist GABAergen Interneuronen

##### Funktionelle Gliederung

**Kolumnen** In vielen Cortexarealen sind die Neurone zu säulenartigen Einheiten gruppiert. Diese Kolumnen umfassen sämtliche Schichten und bilden eigenständige **Recheneinheiten**, die wiederum zu größeren funktionellen Einheiten zusammengeschaltet sind. Sie sind v. a. im visuellen Cortex, aber auch in anderen Arealen von zentraler Bedeutung.

**Verbindungen** **Kommissurenfasern** verbinden die beiden Hemisphären. Der Balken (Corpus callosum) ist die wichtigste. Verbindungen innerhalb einer Hemisphäre werden durch **Assoziationsfasern** hergestellt. Die efferenten **Projektionsfasern** in subcorticalen

le Gebiete machen insgesamt nur einen kleinen Teil der corticalen Verbindungen aus.

#### 1.1.2 Corticale Felder

Der **Cortex** lässt sich funktionell in Primärfelder, Sekundärfelder und Assoziationsfelder einteilen. Diese unterscheiden sich funktionell und zytoarchitektonisch. Die Einteilung nach **Brodman** in 52 Felder beruht auf histologischen Kriterien. Weil diese oft mit funktionellen Aspekten korrelieren, wird sie auch heute noch häufig verwendet. Darüber hinaus existiert die makroskopische Unterteilung in die durch Fissuren getrennten Lappen.

**Primärfelder** Als Primärfelder werden Cortexareale bezeichnet, die über den Thalamus direkte Afferenzen empfangen. Die dort ankommenden Informationen sind zwar bereits durch den Thalamus gefiltert, aber noch nicht interpretiert: Sie können also nicht bewusst wahrgenommen werden (z. B. primärer visueller Cortex). Damit stellt auch der primäre Motocortex, der im Rahmen der motorischen Schleife thalamische Projektionen erhält, ein Primärfeld dar.

**Sekundärfelder** In räumlicher Nähe zu den Primärfeldern befinden sich die Sekundärfelder. Sensorische Sekundärfelder dienen dazu, die in den primären Feldern aufbereiteten Informationen zu interpretieren und in manchen Fällen auch zu Bewusstsein zu bringen. Motorische Sekundärfelder bilden eine Schnittstelle zwischen assoziativen und primären Motocortices.

**Assoziationsfelder** Im Gegensatz zu Sekundärfeldern erhalten assoziative Felder nicht nur Informationen eines einzigen Primärfelds, sondern **integrieren** und **interpretieren** Informationen verschiedener primärer und sekundärer Felder. Beispielsweise findet eine bewusste Seh Wahrnehmung erst im parietalen Assoziationscortex statt. Einige motorische Assoziationsfelder erfüllen spezifische Funktionen z. B. motorisches Sprachzentrum.

#### MERKE

Assoziationsfelder erhalten zwar Informationen aus Primärfeldern, jedoch **keine** primären Sinnesinformationen.

Tab. 1.1 Laminae des Cortex

	Schicht	Lamina	Aufbau
I	Molekularschicht	Lamina molecularis	Geringe Zelldichte, hauptsächlich Zellfortsätze und Interneurone
II	Äußere Körnerschicht	Lamina granularis externa	Dicht gelagerte kleine Pyramidenzellen
III	Äußere Körnerschicht	Lamina pyramidalis externa	Große Pyramidenzellen, deren Axone den Großteil der assoziativen Bahnen bilden
IV	Innere Körnerschicht	Lamina granularis interna	Kleine Interneurone und Pyramidenzellen, Eingangsstation sensorischer Afferenzen → dominant in sensorischen Cortexarealen
V	Innere Pyramidenschicht	Lamina pyramidalis interna	Große Pyramidenzellen, deren Axone die Efferenzen in subcorticalen Gebieten bilden → dominant in motorischen Arealen
VI	Multiforme Schicht	Lamina multiformis	Kleine Pyramidenzellen und Interneurone, die corticothalamische Efferenzen bilden

## Frontallappen

**Präfrontaler Cortex** Von entscheidender Bedeutung für die hohen kognitiven, aber auch ethischen **Leistungen** des Menschen. Läsionen dieses Assoziationsfelds resultieren entsprechend in schwerwiegenden Persönlichkeitsveränderungen.

**Motocortices** Primäre und sekundäre (supplementäre) Motocortices liegen dicht beieinander.

**Frontales Augenfeld** Zuständig für die Initiation willkürlicher Augenbewegungen. Steht mit den visuellen Cortices und dem Hirnstamm in Verbindung.

**Motorisches Sprachzentrum** Als motorisches Assoziationsfeld von essenzieller Bedeutung für die Sprachbildung.

**Frontales Blasenzentrum** Auch die willkürliche Kontrolle über Harn- und Stuhlkontinenz ist auf einen intakten Frontallappen angewiesen. Daneben existieren vegetative Mechanismen, die die Kontinenz sichern.

## Parietallappen

**Sensorische Cortices** Sowohl primäre als auch sekundäre sensorische Areale befinden sich im Parietallappen.

**Posteriorer parietaler Cortex** Hat als Assoziationscortex eine entscheidende Bedeutung für die Interpretation sensorischer Informationen. Erhält visuelle, propriozeptive, vestibuläre und auditive Informationen über Afferenzen aus den entsprechenden primären und sekundären Feldern. Diese werden integriert und gleichzeitig genutzt, um die **Umgebung sinnvoll wahrzunehmen**. Entsprechend ist der parietale Assoziationscortex für die **Orientierung im Raum** notwendig.

### KLINIK

**Neglect** Nach ischämischen Schädigungen des **parietalen Assoziationscortex** ist klinisch das Bild eines Neglects der kontralateralen Seite zu beobachten. Das bedeutet, dass der Patient sensorische Informationen dieser Seite **nicht mehr bewusst wahrnimmt**. Dazu zählen die jeweils betroffene Seite des Gesichtsfelds **und die entsprechende Körperhälfte**.

**Vestibulärer Cortex** Auch im Parietallappen lokalisiert.

**Gyrus angularis** Bildet die wichtigste Schnittstelle zwischen den sekundären Seh- und Hörarealen. Spielt eine entscheidende Rolle für das Lesen und Schreiben. Läsionen resultieren folglich in einer Alexie oder Agrafie.

### KLINIK

**Apraxie** Äußert sich in einer Unfähigkeit, komplexe **Bewegungsläufe** wie Zähneputzen oder Schuhebinden durchzuführen. Im Gegensatz zu Ataxien oder anderen zentralen motorischen Störungen ist keine Muskelschwäche oder Beeinträchtigung der Feinmotorik zu beobachten. Ursache kann eine Läsion supplementär motorischer Cortices oder des parietalen Assoziationscortex sein.

## Temporallappen

**Auditive Cortices** In den **Heschl-Querwindungen** des Temporallappens befindet sich die primäre Hörrinde. Kaudal ist die sekundäre Hörrinde lokalisiert, die entscheidend am Sprachverständnis beteiligt ist.

**Hippocampus** In der Tiefe des Temporallappens befindet sich der Hippocampus. Dieser phylogenetisch alte Teil des Großhirns ist entscheidend an **Lernvorgängen** und räumlicher Orientierung beteiligt (> Kap. 1.2.3).

## Okzipitallappen

Der Okzipitallappen enthält die primären und sekundären visuellen Cortices.

## Limbischer Cortex

Der limbische Cortex besteht aus mehreren funktionell verbundenen Teilen des Großhirns: v. a. Amygdala, anteriorer cingulärer Cortex, Hippocampus und Teile des präfrontalen Cortex. Er ist entscheidend an affektiven Verhaltensmustern wie z. B. Angst und **Fluchtreaktionen** beteiligt, aber auch an emotional geprägten Gedächtnisinhalten.

### MERKE

**Corticale Plastizität** Nach corticalen Läsionen (z. B. Tumor, Ischämie) oder auch peripheren Läsionen (z. B. Trauma) kommt es zu einer **Reorganisation**. Diese Neuordnung der corticalen Areale ist etwa nach dem Verlust eines Fingers zu beobachten: Einige Wochen nach dem Trauma sind die entsprechenden motorischen und sensorischen Areale neu organisiert und die bisherigen Repräsentationen durch andere, zweckmäßigere ersetzt.

Corticale Plastizität ist auch als **Trainingseffekt** zu beobachten. So nehmen bei feinmotorischen Tätigkeiten wie dem Üben eines Instruments die entsprechenden Repräsentationen nach und nach eine größere Fläche ein.

## 1.1.3 Corticale Asymmetrie

Unter dem Begriff der corticalen Asymmetrie versteht man die Tatsache, dass sich die beiden Hemisphären funktionell unterscheiden.

**Hemisphärendominanz** V. a. höhere kognitive Funktionen wie das Sprachverständnis sind in der Regel **lateralisiert**, sodass eine Hemisphäre als (sprach-)dominant bezeichnet wird. Die andere Hirnhälfte wird entsprechend als subdominante Hemisphäre bezeichnet.

**Händigkeit** Etwa 90 % der Menschen sind **Rechtshänder**, d. h. sie benutzen während des Schreibens und anderen komplexen Tätigkeiten ausschließlich die rechte Hand. Die dominante Hemisphäre befindet sich also ebenso wie die Repräsentation der rechten Hand auf der linken Seite. Auch bei vielen **Linkshändern** ist die linke Hemisphäre dominant, nur wenige besitzen eine dominante rechte Hirnhälfte oder eine bilaterale Verteilung. Folglich ist bei der großen Mehrheit die **linke** die **dominante Hemisphäre**. Über die Ursachen der Lateralisierung kognitiver Funktionen wird spekuliert. Eine Theorie besagt, dass die Ausbildung der Händigkeit durch die intrauterine Lage des Fetus bestimmt wird (über die Hörwahrnehmung).

**Dominante Hemisphäre** Die dominante Hirnhälfte ist für die **Verarbeitung aller Sprachleistungen** zuständig. Dazu gehören nicht nur das Sprechen und das Sprachverständnis, sondern auch

Lesen und Schreiben. Daher sind Broca- und Wernicke-Zentrum i. d. R. ausschließlich in der dominanten Hemisphäre lokalisiert.

**Subdominante Hemisphäre** Die subdominante Hirnhälfte erfüllt ebenfalls wichtige Funktionen, die Voraussetzung höherer kognitiver Fähigkeiten sind. Es finden die neuronalen Prozesse statt, die Grundlage kognitiver Phänomene wie **räumliches Denken**, Orientierung im Raum und anderer Kategorien **nonverbaler Intelligenz** sind. So ist eine funktionell intakte subdominante Hemisphäre erforderlich, um Objekte zu ertasten oder anhand anderer sensorischer Stimuli wie hören oder sehen zu erkennen. Die subdominante Hemisphäre ist für die musikalische Wahrnehmung zuständig.

**Hemisphärenplastizität** Im Kindesalter können sich die Aufgaben der Hemisphären noch verändern. Dies geschieht jedoch nur nach frühen Läsionen der dominanten Hemisphäre im Rahmen corticaler Plastizität. Dieser **Sprachenshift** ist nur bis zur Pubertät möglich, da die dann einsetzenden Änderungen der Hormonausschüttung zu einer Verminderung der corticalen Plastizität führen.

**Kommunikation über Kommissurenfasern** Die beiden Hemisphären erfüllen teilweise unterschiedliche Aufgaben, sind jedoch über Kommissurenfasern anatomisch und funktionell eng miteinander verbunden.

## KLINIK

**Split brain** Bei einigen schweren Formen generalisierter Epilepsie wurde früher **der Balken durchtrennt**, um die Ausbreitung des Krampfanfalls auf eine Hemisphäre zu beschränken. Patienten mit einem durchtrennten Corpus callosum zeigen charakteristische Defizite, die auf die stark eingeschränkte Hemisphärenkommunikation zurückzuführen sind.

## Bildgebende Verfahren

Patienten mit umschriebenen Läsionen sind als Erkenntnisquelle funktioneller Zuordnungen mittlerweile von **bildgebenden Verfahren** abgelöst worden. **PET** und **fMRT** erlauben eine Analyse des corticalen Glucose- oder Sauerstoffverbrauchs, die mit der corticalen Aktivität korrelieren. Experimentell wird dann die **Aktivierung einzelner Cortexareale** während verschiedener Tätigkeiten bestimmt. Das Auflösungsvermögen dieser funktionellen Verfahren ist jedoch „klassischen“ bildgebenden Verfahren wie Röntgen oder MRT deutlich unterlegen. Die funktionelle Bildgebung liefert eher relative Unterschiede und Korrelationen als absolute Werte.

**Positronenmissionstomografie (PET)** Bei der PET wird eine schwach radioaktiv markierte Substanz injiziert, die sich gleichmäßig im Körper verteilt. Für die Analyse des corticalen Sauerstoff- oder Glucoseverbrauchs wird dafür meist radioaktiv markierte Glucose verwendet. Aus dem radioaktiven Zerfall eines Isotops (z. B.  $^{15}\text{O}$ ) gehen Positronen hervor. Deren Halbwertszeit ist außerordentlich gering, da sie sofort auf Elektronen treffen und unter Abstrahlung von zwei entgegengesetzt emittierten Photonen vernichtet werden. Ein Detektor misst dann die freigesetzten Photonen. Die PET wird klinisch mit verschiedenen Radiopharmaka in Neurologie, Psychiatrie und Onkologie eingesetzt.

**Funktionelle MRT (fMRT)** Mit der **fMRT** kann der Oxygenierungsgrad des Bluts bestimmt werden. **Desoxygeniertes Blut hat aufgrund der Konformationsänderung des Hämoglobins andere magnetische Eigenschaften als sauerstoffreiches Blut (BOLD:**

**Blood oxygen level dependency**). **fMRT-Aufnahmen bestehen aus einem konventionellen MRT-Bild, auf dem die Areale farblich markiert sind, die einen erhöhten Sauerstoffverbrauch aufweisen.**

## 1.1.4 Corticale Ableitungen

### Grundlagen

**Extrazelluläre Potenziale** entstehen spiegelbildlich zu den intrazellulären Ladungsverschiebungen während neuronaler Aktivität: Während der Ladungsverschiebung von extrazellulär nach intrazellulär verliert der Extrazellulärraum positive Ladung. Weil dessen Volumen um ein Vielfaches größer als das des Intrazellulärraums ist, finden normalerweise nur geringe Potenzialverschiebungen statt: Ein **EPSP** verursacht nur eine minimale Negativierung, ein **IPSP** eine minimale Positivierung. Da jedoch im Cortex meist ganze Neuronengruppen synchron aktiv sind, summieren sich die **postsynaptischen Potenziale** (EPSP und IPSP) zu einem **Feldpotential**. Dieses zeigt Amplituden von bis zu 100  $\mu\text{V}$  und lässt sich durch die Schädeldecke registrieren. Dafür werden für ein Standardenzephalogramm Wechselspannungsverstärker verwendet. **Im Ausnahmefall können auch Gleichstromverstärker zum Einsatz kommen, womit Schwankungen des mittleren corticalen Aktivitätsniveaus deutlicher sichtbar sind.**

### Leistungen

Mithilfe extrazellulärer Elektroden kann man die Aktivität der corticalen Neurone erfassen. Die **Elektroenzephalografie** (EEG) mittels Wechselstromverstärkern verfügt über ein unübertroffenes **zeitliches Auflösungsvermögen**, da die neuronale Aktivität in Echtzeit aufgezeichnet wird. Das räumliche Auflösungsvermögen ist dagegen sehr beschränkt: Es wird nur eine **Summenaktivität** aufgezeichnet, sodass keine Aussage über die Aktivität einzelner Neurone möglich ist. Durch die Kondensatorwirkung der Kalotte und die corticale Schichtung erlauben Amplitude oder Richtung der EEG-Kurve keine Rückschlüsse auf die corticale Aktivität. Per Konvention wird jedoch ein positiver Ausschlag als negative Potenzialänderung bezeichnet.

## MERKE

**EEG-Anwendung** Die EEG ist ein Standardverfahren der **Neurologie**, der Neurochirurgie und der Intensivmedizin. Eine routinemäßige Ableitung beinhaltet mindestens zwölf Messelektroden sowie Referenzelektroden, die nach einem festen Schema über die Kopfhaut verteilt werden. Während des **intraoperativen Monitorings** bei neurochirurgischen Eingriffen werden auch Potenziale direkt von der Cortexoberfläche abgeleitet.

**Hirntod** Das entscheidende Kriterium ist das **Null-Linien-EEG**, das auftritt, wenn die Cortexaktivität vollständig erlischt. Nachdem akute Vergiftungen ausgeschlossen worden sind, die ebenfalls Ursache eines Nulllinien-EEG sein können, gilt der Patient als biologisch tot.

### Frequenzbänder im EEG

Eine typische EEG-Aufnahme zeigt **rhythmische Potentialschwankungen** (Oszillationen), deren Frequenz je nach Tätigkeit variiert. Die griechischen Bezeichnungen sind historisch begrün-

det und richten sich nicht nach der Frequenz (> Tab. 1.2, > Abb. 1.1). Das Produkt aus Frequenz und Amplitude ist relativ konstant, sodass hohe Frequenzen mit niedrigeren Amplituden einhergehen und umgekehrt. Die dominanten Frequenzbänder sind auch altersabhängig.

Tab. 1.2 Frequenzbänder im EEG

Wellen	Frequenz [Hz]	Charakteristika
$\alpha$ -Wellen	8–13	Treten im entspannten Wachzustand bei geschlossenen Augen als synchronisiertes EEG auf; verschwinden bei plötzlichen Sinnesreizen (z. B. Augen öffnen, Geräusche): $\alpha$ -Blockade
$\beta$ -Wellen	13–30	Treten während geistiger Tätigkeit oder Sinnesreizen auf; desynchronisierte Wellen
$\gamma$ -Wellen	30–100	Während Lernprozessen und anderen kognitiven Aufgaben; synchronisierte Wellen
$\delta$ -Wellen	0,1–4	Langsame, synchronisierte Wellen, die typisch für Tiefschlafphasen sind
$\theta$ -Wellen	4–7	Treten während der Einschlafphase und in Zuständen verminderter Vigilanz auf

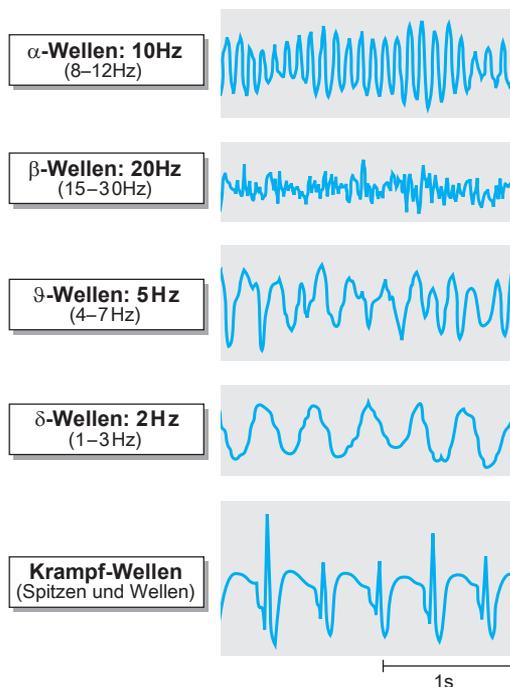
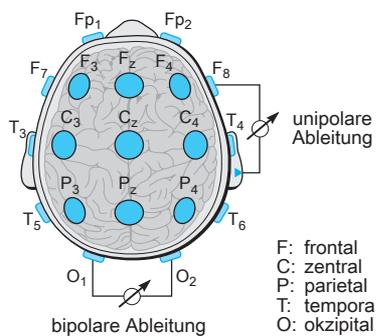


Abb. 1.1 Frequenzbänder im EEG. Dargestellt sind Originalableitungen verschiedener Frequenzen. Die klinisch weniger relevanten  $\gamma$ -Wellen fehlen in dieser Übersicht. Die untere Spur zeigt EEG-Muster, wie sie während eines epileptischen Anfalls auftreten. [L106]

## KLINIK

**Epilepsie** Ein epileptischer Anfall ist durch eine corticale Übererregung gekennzeichnet, die entweder lokal beschränkt bleibt (fokale Epilepsie) oder generalisiert auf sämtliche Cortexareale übergreift (Grand Mal). Im EEG lassen sich dabei spezifische Muster in Form von **Spike and wave complexes**, eine **erhöhte Amplitude** sowie eine pathologische **Synchronizität** der Entladungen beobachten.

## Evozierte Potenziale

EEG-Wellen, die aufgrund eines kontrolliert applizierten sensorischen Stimulus registriert werden, bezeichnet man als **evozierte Potenziale**. Beispiele hierfür sind visuell evozierte Potenziale, aber auch akustisch oder somatosensorisch evozierte Potenziale.

**Anwendung** Sie werden als Routinemethoden in der Klinik eingesetzt, um die funktionelle Intaktheit eines Sinneskanals zu überprüfen.

**Eigenschaften** Weil die reizkorrelierten Potenziale mit durchschnittlich 10  $\mu$ V eine viel geringere Amplitude als das Spontan-EEG mit 100  $\mu$ V haben, muss man viele Aufnahmen (Episoden) mitteln, um das evozierte Potenzial aus dem Grundrauschen herauszurechnen. Die evozierten Potenziale können eine Dauer von einigen Hundert Millisekunden haben und bestehen aus verschiedenen Komponenten. Die bekannteste ist **P300** – eine mit 300 ms Latenzzeit relativ späte corticale Antwort auf einen visuellen Stimulus.

## CHECK-UP

- Nach welchen Kriterien lässt sich der Cortex morphologisch und funktionell einteilen?
- Welche Aufgabe hat der parietale Assoziationscortex?
- Was versteht man unter dem Begriff der Hemisphärendominanz?
- Welche Frequenzbänder werden im EEG unterschieden?
- Was ist ein evoziertes Potenzial?

## Jetzt bist du dran!

### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Integrative Funktionen durch corticale und subcortical Interaktionen

Gregor Däubler



### 1.2.1 Zirkadiane Periodik

#### Grundlagen

Viele biologische Vorgänge zeigen eine Periodik, sie laufen in wiederkehrenden Phasen ab. Die Phase kann mehrere Jahre lang sein. In den meisten Fällen liegt sie jedoch relativ konstant bei **24 Stunden** und prägt den Tag-Nacht-Rhythmus. Auch bei völliger Isolation bleibt diese **zirkadiane Rhythmik** weitgehend erhalten, die Zyklen werden jedoch geringfügig länger. Neben dem **Schlafwach-Rhythmus** zeigen v. a. Körpertemperatur, Blutdruck, Vigilanz und die Blutkonzentration der meisten Hormone eine zirkadiane Periodik.

#### Rhythmusgeneratoren

Zirkadiane Rhythmusgeneratoren liegen v. a. im Nucleus suprachiasmaticus. Diese Neurone integrieren exogene und endogene Zeitgeber: Über den Tractus retinohypothalamicus, eine Kollaterale des Tractus opticus, erhalten sie Informationen über die Umwelthelligkeit. Gleichzeitig sind sie selbst **spontan rhythmisch aktiv** und generieren auch ohne externe Stimuli Oszillationen, deren Frequenz mit der Tageszeit korreliert. Dieses **zeitabhängige Frequenzmuster** entsteht durch die gemeinsame Entladung von Neuronenverbänden. Dabei ändert sich wahrscheinlich je nach Tageszeit die Leitfähigkeit der Zellmembran, sodass sich die Entladungsfrequenz entsprechend verschiebt.

#### Melatonin

Nucleus suprachiasmaticus und **Hypophyse** sind funktionell eng gekoppelt. Während der Dunkelphasen schüttet die Hypophyse vermehrt **Melatonin** aus. Dieses Hormon wirkt zentral und senkt die Vigilanz und Körpertemperatur. Gleichzeitig wirkt Melatonin auf die suprachiasmatischen Neurone zurück und synchronisiert deren Oszillationen.

#### Charakteristika des Schlafs

Schlaf kann als Zustand herabgesetzter Vigilanz betrachtet werden und dient der körperlichen **Regeneration** und der **Konsolidierung** von Gedächtnisinhalten. Dabei sind charakteristische Veränderungen zu beobachten:

- **Verringerte Aufnahmefähigkeit:** Die Wahrnehmungsschwelle für sensorische Stimuli ist deutlich heraufgesetzt, nur starke Reize gelangen zum Bewusstsein.
- **Erhöhter Parasympathikotonus:** Vegetativ dominiert die Parasympathikusaktivität. Neben anderen Effekten senkt dies Herzfrequenz und Blutdruck.

- **Verringerter Muskeltonus:** Durch Interaktion von Hypophyse, Thalamus und motorischen Cortices wird der Muskeltonus gesenkt.
- **Verlangsamte Atmung:** Die Atmung ist während des Schlafs verlangsamt und ähnelt einer leichten Form der Cheyne-Stokes-Atmung.

#### Schlafstadien

Schlaf ist kein passiver Zustand und somit nicht mit dem der Bewusstlosigkeit oder Narkose zu vergleichen. Stattdessen ist er durch eine **intensive Kommunikation** von **Hirnstamm, Thalamus** und **Cortex** geprägt. Dabei werden zyklisch verschiedene Phasen durchlaufen, die anhand der vorherrschenden Frequenzbänder und EEG-Muster unterschieden werden:

**Einschlafphase (S1)** Das Stadium des Einschlafens dauert nur wenige Minuten und ist durch einen Übergang von einer  $\alpha$ - in eine  $\delta$ -Rhythmik geprägt. Die Weckschwelle ist niedrig, es kann zu generalisierten Muskelzuckungen (Einschlaf-Kloni) kommen.

**Leichter Schlaf (S2)** Die zweite Schlafphase beginnt ca. 15 Min. nach dem Einschlafen. Sie ist durch das Auftreten von **Schlafspindeln** (schnelle Potentialschwankungen, die im EEG spindelförmig aussehen) und **K-Komplexen** (biphasische Wellenmuster hoher Amplitude) geprägt, die Zeichen einer niedrigen Weckschwelle sind.

**Mittlere Schlaftiefe (S3)** Diese Übergangsphase in den Tiefschlaf ist durch  $\delta$ - und  $\theta$ -Wellen mittlerer Amplitude gekennzeichnet.

**Tiefschlaf (S4)** Unregelmäßige  $\delta$ -Wellen hoher Amplitude nehmen den größten Anteil ein. Sie wechseln sich mit langsamen  $\theta$ -Wellen ab. Deshalb wird der Tiefschlaf auch als Slow wave sleep bezeichnet. Durch den hohen Parasympathikotonus sinken Blutdruck, Atem- und Herzfrequenz. Weil der Tiefschlaf mit dem intuitiven Konzept von Schlaf übereinstimmt, wird er auch als **orthodoxer Schlaf** bezeichnet. Die Weckschwelle ist stark erhöht.

**Paradoxe Schlaf (REM)** Diese Schlafphase ist von schnellen Augenbewegungen (Rapid eye movements) geprägt. Gleichzeitig steigen Blutdruck, Weckschwelle, Herz-, Atem- und vorherrschende EEG-Frequenzen, während der Muskeltonus extrem gering ist. Deshalb wird der REM-Schlaf auch als **paradoxe Schlaf** bezeichnet. Die Dauer der REM-Phasen nimmt in der zweiten Nachthälfte zu. Trotz der hohen Weckschwelle erfolgt das Erwachen meistens aus diesen Phasen, sodass man sich kurzzeitig an den größten Teil der Traumhalte erinnern kann. Träume finden ausschließlich in REM-Phasen statt. Bei Verhindern von REM-Phasen, etwa während eines Experiments im Schlaflabor, beinhaltet der Schlaf in der nächsten Nacht einen erhöhten REM-Anteil.

#### MERKE

Pro Nacht werden etwa fünf Schlafzyklen durchlaufen, die alle Phasen beinhalten. Dabei sind die ersten beiden Zyklen besonders wichtig für die Regeneration. Sie werden als **Kernschlaf** bezeichnet, die darauffolgenden als **Füllschlaf**.

**Altersabhängigkeit** Während der Entwicklung nimmt die Schlafdauer ständig ab. Während sie beim Neugeborenen noch bis zu 16 Stunden beträgt, sinkt sie im Verlauf der Kindheit und Pubertät auf durchschnittlich 8 Stunden. Im Alter beträgt die Schlaf-

Gregor Däubler, Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski,  
Thomas Wenisch

**Vorklinik Finale 14**

# **Sinnesorgane 1**

1. Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Schwingung, Wellen, Akustik</b> .....	1	3.3	Zentrale Hörbahn und kortikale Repräsentation ..	25
1.1	Schwingung .....	1	3.4	Sprachbildung und Sprachverständnis .....	26
1.2	Wellen .....	2	3.5	Bewegungs- und Lagesinn .....	28
1.3	Schallwellen .....	3			
1.4	Physiologische Akustik .....	5	<b>4</b>	<b>Haut und Hautanhangsgebilde</b> .....	31
			4.1	Kutis (Haut) .....	31
<b>2</b>	<b>Hör- und Gleichgewichtsorgan</b> .....	9	4.2	Subkutis (Unterhaut) .....	33
2.1	Entwicklung des Hör- und Gleichgewichtsorgans .....	9	4.3	Hautdrüsen .....	33
2.2	Äußeres Ohr .....	9	4.4	Haare .....	34
2.3	Mittelohr .....	11	4.5	Nägel .....	35
2.4	Innenohr .....	13	<b>5</b>	<b>Somatoviszerale Sensorik</b> .....	37
2.5	Hörbahn .....	17	5.1	Funktionelle und morphologische Grundlagen ...	37
2.6	Gleichgewichtsbahnen .....	19	5.2	Temperatursinn .....	41
			5.3	Tiefensensibilität .....	42
<b>3</b>	<b>Hörvorgang und Gleichgewichtssinn</b> .....	21	5.4	Viszerale Sensibilität .....	43
3.1	Gehörgang und Mittelohr .....	21	5.5	Nozizeption .....	44
3.2	Innenohr .....	22		<b>Register</b> .....	47

# 1

## Schwingung, Wellen, Akustik

### 1.1 Schwingung

Thomas Wenisch



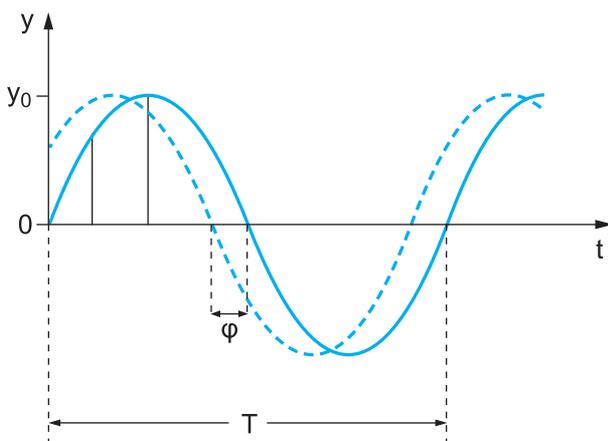
#### 1.1.1 Grundlagen

Eine **Schwingung** ist ein periodischer, d. h. ein sich wiederholender Vorgang. Breitet sich die Schwingung im Raum aus, entsteht eine **Welle**.

Ein System, bei dem der rückstellende Einfluss proportional zu seiner Abweichung aus der Ruhelage ist, führt eine **harmonische Schwingung** aus. Diese werden durch Sinus- oder Cosinusfunktionen beschrieben (➤ Abb. 1.1):

$$y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$$

- $y(t)$ : Der Momentanwert der Schwingung, bei mechanischen Systemen auch **Elongation** (Auslenkung) genannt.
- $y_0$ : Amplitude, der Maximalwert.
- $T$ : Schwingungsdauer, die für eine Schwingung benötigte Zeit. Der Zusammenhang mit der Frequenz  $f$ , also der Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, ist  $f = 1/T$ .
- $\omega$ : Kreisfrequenz, mit  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ . Die Frequenz  $f$  wird in Hertz angegeben ( $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ ), die Kreisfrequenz aber immer in der Einheit  $\text{s}^{-1}$ .
- $\phi$ : Phasenwinkel; er gibt die Verschiebung zwischen zwei Schwingungen an.



**Abb. 1.1** Verlauf einer harmonischen Schwingung der Form  $y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)$  [L253]

#### 1.1.2 Energiebilanz, Dämpfung

Soweit Verluste durch Dämpfung vernachlässigt werden können, ist die Gesamtenergie des schwingenden Systems konstant. Periodisch wird eine Energieform in eine andere umgewandelt, z. B. kinetische in potenzielle Energie und umgekehrt.

In der Realität geht aber stets Energie verloren, z. B. durch Reibung oder Luftwiderstand. Die Schwingung ist gedämpft. In jeder neuen Periode ist die Amplitude etwas kleiner als in der vorangegangenen Periode.

Die Exponentialfunktion

$$y(t) = y_0 \cdot e^{-\delta t}$$

beschreibt diesen **Abklingvorgang**. Die Konstante  $\delta$  ist ein Maß für die **Dämpfung** des Systems.

Insgesamt ist die Zeitabhängigkeit einer gedämpften Schwingung

$$y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \cdot e^{-\delta t}$$

#### 1.1.3 Erzwungene Schwingung

Durch eine äußere periodische Kraft führt ein schwingungsfähiges System eine erzwungene Schwingung aus, z. B. beim periodischen Anstoßen einer Schaukel.

Die Auslenkung ist abhängig vom Verhältnis der Erregerfrequenz  $\omega$  und der Eigenfrequenz  $\omega_0$  des Systems. Ist die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz des ungedämpften Systems, wächst dessen Amplitude theoretisch bis ins Unendliche.

Das **Mitschwingen** eines Systems wird als **Resonanz** bezeichnet.

#### 1.1.4 Harmonische und anharmonische Oszillatoren

Das Federpendel, das Fadenpendel sowie der elektrische Schwingkreis führen **harmonische** Schwingungen durch. Sie werden auch als harmonische Oszillatoren bezeichnet. Sie machen nur einen kleinen Teil der in Natur und Technik auftretenden periodischen Vorgänge aus.

Beispiele für **anharmonische** Schwingungen sind die Ableitungen des EKG und EEG, die periodische, aber keine harmonischen Signale liefern.

#### CHECK - UP

- Erkläre die Begriffe Amplitude und Elongation.
- Wie hängen Schwingungsdauer, Frequenz und Kreisfrequenz einer Schwingung zusammen?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Wellen

Thomas Wenisch



### 1.2.1 Grundlagen

Wenn ein schwingendes System seine Umgebung beeinflusst, breitet sich die Schwingung räumlich aus und es entstehen Wellen (> Abb. 1.2).

Es wird unterschieden zwischen Longitudinalwellen und Transversalwellen (> Abb. 1.3).

- **Longitudinalwellen** (Längswellen): Die Schwingungsrichtung ist entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle. Beispiel: Schallwellen in einem Gas.
- **Transversalwellen** (Querwellen): Die Schwingungsrichtung ist senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung der Welle. Beispiel: Wasserwellen.

#### MERKE

Das Produkt aus Wellenlänge und Frequenz ist gleich der **Ausbreitungsgeschwindigkeit**  $c$  einer Welle

$$c = \lambda \cdot f$$

Dies gilt für alle Arten von Wellen und in allen Ausbreitungsmedien. In verschiedenen Stoffen breiten sich Wellen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus.

Beim Übergang in ein anderes Medium bleibt die Frequenz einer Welle konstant, es ändert sich die Wellenlänge.

Bei der dreidimensionalen Ausbreitung einer Welle bilden sich Kugelwellen um das Erregungszentrum. Dabei wird stets auch Energie transportiert, die sich mit wachsender Entfernung auf einer Kugelschale verteilt.

Die **Intensität**  $I$  einer Welle ist als deren Energiestromdichte definiert. Ihre Einheit:  $\text{W}/\text{m}^2$ .

$$I = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Darin ist  $P$  die Leistung eines Strahlers.

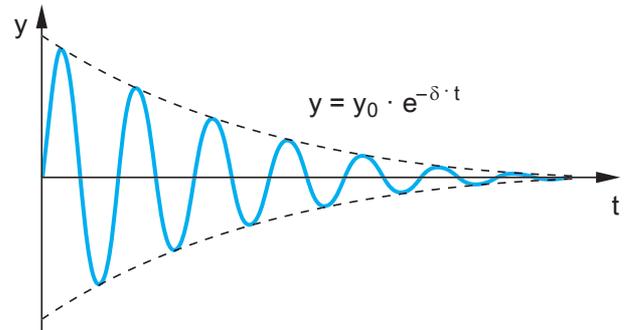


Abb. 1.2 Gedämpfte Schwingung [L253]

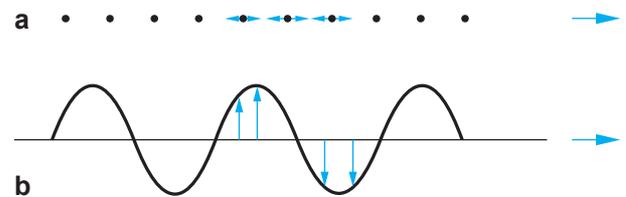


Abb. 1.3 Longitudinalwellen (a) und Transversalwellen (b) [L253]

#### MERKE

Die Intensität einer punktförmigen Strahlungsquelle nimmt mit dem Quadrat des Abstands von der Quelle ab.

$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

Die Intensität einer Welle ist proportional zum Quadrat der Schwingungsamplitude.

### 1.2.2 Ausbreitung von Wellen

Bei der Ausbreitung von Wellen können verschiedene Phänomene auftreten:

- Interferenz
- Reflexion
- Stehende Wellen
- Brechung
- Beugung
- Streuung
- Dispersion
- Polarisation

#### Interferenz

Interferenz bezeichnet die Überlagerung von Wellen. Es addieren sich die einzelnen Wellenfunktionen. Treffen jeweils die Maxima oder die Minima zweier Wellen aufeinander, tritt eine Verstärkung ein. Trifft das Maximum der einen auf das Minimum der anderen Welle, schwächen sich beide Wellen ab.

**Kohärente Wellen** schwingen in gleicher Phase. Bei Überlagerung werden sie verstärkt.

## Reflexion

Eine Welle wird von einer Grenzfläche zurückgeworfen.

## Stehende Welle

Wenn eine Welle zwischen zwei Begrenzungen hin- und herreflektiert wird und diese Strecke ein Vielfaches der halben Wellenlänge ist, kann sich durch die Überlagerung von hin- und rücklaufender Welle eine stehende Welle bilden.

Die Minima und Maxima des Wellenfelds befinden sich dann stets am gleichen Ort.

## Brechung

Die Ausbreitungsrichtung einer Welle ändert sich beim Übergang von einem in ein anderes Medium wie z. B. Luft, Wasser oder Glas.

## Beugung

**Huygens-Prinzip:** An jedem Punkt eines Wellenfeldes – auch an den Kanten eines Hindernisses – entsteht eine Kugelwelle.

Eine Welle erreicht daher auch Bereiche hinter einem Hindernis, die bei einer vollkommen geradlinigen Ausbreitung abgeschattet würden: Die Welle „läuft ein wenig um die Ecke“.

## Streuung

Nach der **Absorption** einer Welle folgt eine **Emission**, bei der die Welle zufällig in eine andere Richtung ausgestrahlt wird. Wellen werden so aus ihrer ursprünglichen Richtung in andere Richtungen gestreut.

## Dispersion

Dispersion bedeutet, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen in einem Medium **frequenzabhängig** geschieht.

## Polarisation

Für transversale Wellen (s. o.) ist jede Schwingungsrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung denkbar.

Bei einer **polarisierten Welle** ist eine Vorzugsrichtung ausgezeichnet, d. h., alle Wellenzüge schwingen in die gleiche Richtung.

- Bei **linearer Polarisation** bleibt diese Vorzugsrichtung konstant.
- Bei **zirkularer Polarisation** ändert sie sich mit dem Fortlaufen der Welle. Es kann dann weiter zwischen einer Drehung im (rechts) und gegen (links) den Uhrzeigersinn unterschieden werden.

## CHECK - UP

- Was unterscheidet eine Welle von einer Schwingung?
- Worin unterscheiden sich Longitudinal- und Transversalwellen?
- Was versteht man unter Polarisation?
- Eine Welle läuft von einem Ausbreitungsmedium in ein anderes. Wie verhalten sich Geschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz?

## Jetzt bist du dran!

### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Schallwellen

Thomas Wenisch



### 1.3.1 Schall

Schall: Frequenzbereich von **20–20.000 Hz**.

Frequenz < 20 Hz: **Infraschall**, Frequenz > 20 kHz: **Ultraschall**.

Eigenschaften des Schalls:

- Schallausbreitung ist nur in Materie möglich.
- In Gasen und Flüssigkeiten entstehen Longitudinalwellen durch das Hin- und Herschwingen der Teilchen.
- Schall transportiert Energie, aber keine Materie.

### MERKE

Die **Schallgeschwindigkeit** hängt von den Eigenschaften des jeweiligen Mediums ab. Sie beträgt in:

- Luft (1013 mBar, 0 °C): 330 m/s; bei Raumtemperatur etwa 340–350 m/s
- Wasser (20 °C): 1480 m/s (näherungsweise für Berechnungen: 1500 m/s)

### 1.3.2 Schallintensität

Die Schallintensität  $L$  ist die wichtige Kenngröße eines Schallfelds. Synonym dazu werden auch diese Begriffe verwendet: **Schallpegel**, **Pegelmaß**, **Schallstärke**, **Schallintensitätspegel**.

Die Schallintensität  $L$  ist definiert über das Verhältnis der gemessenen Intensität  $I$  zu einer festgelegten Referenzintensität  $I_0$ .

$$L = 10 \cdot \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

Diese Berechnung ergibt zwar eine dimensionslose Zahl, der Schallpegel wird aber in der Einheit **Dezibel (dB)** angegeben.

Zu beachten ist die Definition über den Logarithmus: Eine **Verdopplung** der Intensität entspricht lediglich einer Zunahme von **3 dB**.

**Referenzintensität** Als Referenzintensität  $I_0$  ist die Intensität eines Tons der Frequenz 1000 Hz festgelegt, die der Reizschwelle des menschlichen Gehörs entspricht.

**Hörschwelle** Die Hörschwelle ist frequenzabhängig. Töne gleicher Intensität, aber verschiedener Frequenz, werden als unterschiedlich laut empfunden.

**Phon** Die Einheit **Phon** wurde zur Angabe der subjektiv wahrgenommenen Lautstärke eingeführt. Die Phonzahl eines Tons beliebiger Frequenz entspricht dem Schallpegel eines 1 kHz-Referenztons, der als gleich laut empfunden wird.

### MERKE

Die folgenden **Intensitätsverhältnisse** werden häufig gefragt:

$$I = 2 \cdot I_0 \Rightarrow +3 \text{ dB}$$

$$I = 10 \cdot I_0 \Rightarrow +10 \text{ dB}$$

$$I = 100 \cdot I_0 \Rightarrow +20 \text{ dB}$$

### 1.3.3 Schalldruck

Der Schalldruck oder **Schallwechseldruck** ist die Amplitude der Druckschwankungen.

Die Intensität einer Schallwelle ist ein Maß für die transportierte Energie einer Welle. Sie ist proportional zum Quadrat der Druckamplitude,  $I \sim P^2$ .

$$L_p = 10 \cdot \log \left( \frac{P^2}{P_0^2} \right)$$

Anwendung der Rechenregel für Logarithmen  $\log_a x^n = n \cdot \log_a x$  ergibt

$$L_p = 20 \cdot \log \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

### MERKE

Für den **Schalldruck** gelten folgende Pegelzunahmen:

$$P = 2 \cdot P_0 \Rightarrow +6 \text{ dB}$$

$$P = 10 \cdot P_0 \Rightarrow +20 \text{ dB}$$

$$P = 100 \cdot P_0 \Rightarrow +40 \text{ dB}$$

Es besteht eine **Verwechslungsgefahr zwischen Schalldruck und Schallintensität**. Bei Aufgaben muss sorgfältig auf die Angabe der gesuchten Größen geachtet werden.

Das Pegelmaß gilt grundsätzlich für alle Arten von Wellen. Auch die Verstärkung oder Dämpfung elektrischer Signale wird in dB angegeben.

### 1.3.4 Doppler-Effekt

Bewegen sich Sender und Empfänger einer Welle relativ zueinander, so nimmt der Empfänger eine Frequenzverschiebung wahr. Dieses Phänomen wird als **Doppler-Effekt** bezeichnet.

- Bewegen sich Sender und Empfänger aufeinander zu, wird eine gegenüber der Sendefrequenz  $f_0$  erhöhte Frequenz wahrgenommen.
- Bewegen sich beide voneinander weg, wird eine erniedrigte Frequenz wahrgenommen.

Der Doppler-Effekt gilt für alle Arten von Wellen und somit auch für elektromagnetische Wellen.

### CHECK-UP

- Welchen Frequenzbereich hat Schall?
- Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit in Wasser und in Luft?
- Wie ändert sich der Pegel bei doppelter, 10-facher, 100-facher Schallintensität?
- Wie ändert sich der Pegel bei doppeltem, 10-fachem, 100-fachem Schalldruck?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.4 Physiologische Akustik

Gregor Däubler



### 1.4.1 Akustische Wahrnehmung

#### Schwellenwerte

##### Schalldruckpegel

- **Intensitätsunterschiedsschwelle:** Die Unterschiedsschwelle für verschiedene Schalldrücke beträgt bei 40 dB 1 dB.
- **Hörschwelle:** Schalldruckpegel, der gerade noch wahrgenommen werden kann; liegt in der Regel bei **0 dB**, für manche Frequenzen auch darunter. Das entspricht einer Schallenergie von lediglich  $10^{-16}$  W, die auf das Trommelfell einwirkt.
- Schmerzgrenze: liegt bei ca. **130 dB**.
- **Dynamikbereich:** wahrnehmbarer Schalldruckpegelbereich, geht von 0–130 dB.
- Hörschäden: langfristige Lärmbelastung führt ab Pegeln von 80 dB zu Hörschäden, ebenso kurzfristige Expositionen von 120 dB.

#### KLINIK

In Diskotheken werden Schalldruckpegel um 100 dB gemessen, das entspricht dem Lärm eines Presslufthammers aus 1 m Entfernung. Dieser Schalldruck reicht aus, um bei längerer Exposition dauerhafte Hörschäden hervorzurufen.

#### Frequenzbereich

- **Frequenzunterschiedsschwelle:** Die akustische Wahrnehmung besitzt im Vergleich mit anderen Sinnesorganen das höchste Auflösungsvermögen. Bei einer Frequenz von 1 kHz werden Abweichungen von 3 Hz, also 0,3 %, wahrgenommen.

- Der wahrnehmbare Frequenzbereich liegt etwa zwischen **20 Hz** und **20 kHz**. Eine Verdopplung der Frequenz entspricht einer **Oktavierung**.
- **Presbyakusis:** altersbedingte Schwerhörigkeit. Im Alter nimmt die Empfindlichkeit für hohe Frequenzen, v. a. für Frequenzen > 5 kHz, deutlich ab.

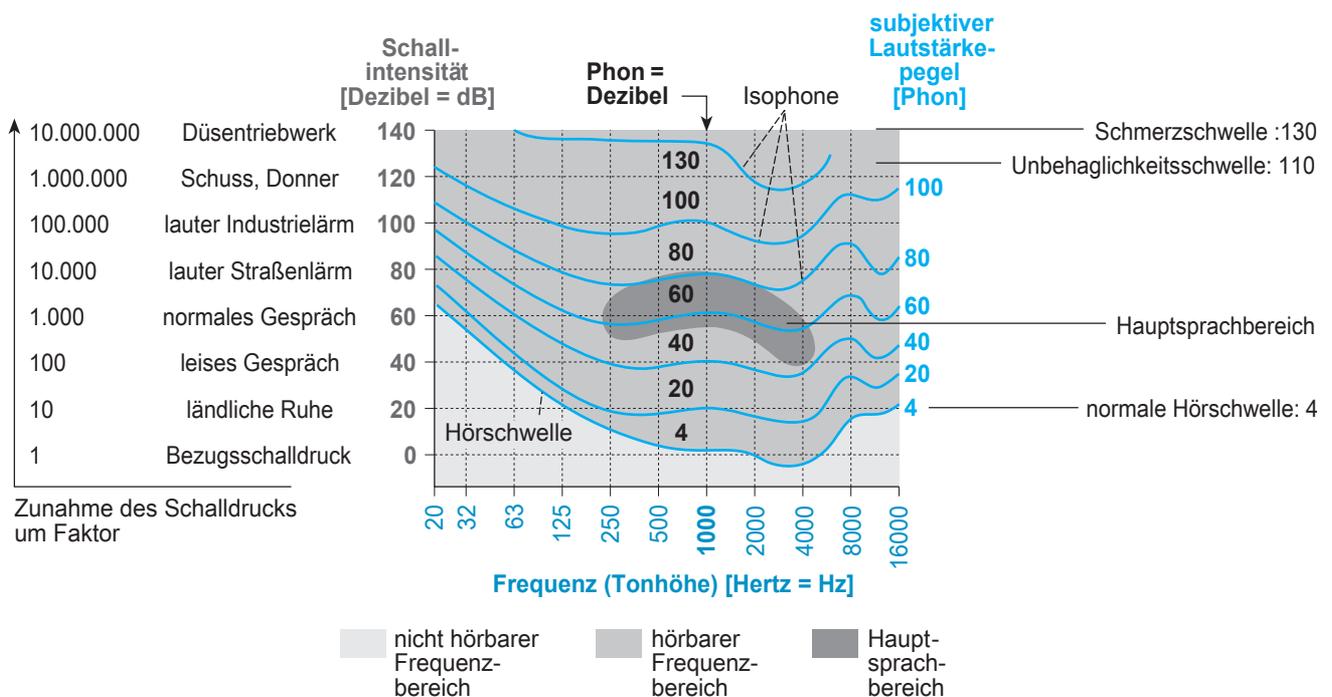
#### Lautstärkeempfinden

Die dB-Skala berücksichtigt nicht, dass Töne gleichen Schalldruckpegels bei unterschiedlichen Frequenzen unterschiedlich laut wahrgenommen werden. Um die subjektive Lautstärke psychophysikalisch zu beurteilen, wurde das **Phon** als Einheit eingeführt. Mittels Tonaudiogramm lassen sich Schalldrücke so variieren, dass verschiedene Frequenzen schließlich gleich laut wahrgenommen werden. Die resultierenden Kurven werden als **Isophone** bezeichnet (> Abb. 1.4). Dabei hat man willkürlich festgelegt, dass der Wert in Phon demjenigen Schalldruckpegel bei 1 kHz entspricht, der gleich laut wahrgenommen wird wie der Ton einer bestimmten Frequenz und eines bestimmten Schalldruckpegels.

Der funktionell bedeutsame **Hauptsprachbereich** ist der Frequenz- und Lautstärkebereich, in dem sich alle sprachlichen Äußerungen bewegen. In diesem Bereich besitzt das Ohr die höchste Schallempfindlichkeit. Er befindet sich etwa zwischen 2 und 5 kHz im Bereich von 40–70 Phon. Die Hörschwelle liegt bei 2 kHz bei 0 dB, jedoch bei 4 Phon.

#### MERKE

Nur bei einer Frequenz von 1 kHz entsprechen die dB- den phon-Werten.



**Abb. 1.4** Schalldruckpegel im Vergleich. Daneben ist das Resultat einer typischen Audiometrie mit Isophonkurven und eingezeichnetem Hauptsprachbereich dargestellt. [L106]

Gregor Däubler, Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski,  
Thomas Wenisch

**Vorklinik Finale 15**

# **Sinnesorgane 2**

1. Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Optik</b> .....	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>Sehen</b> .....	<b>27</b>
1.1	Elektromagnetische Wellen .....	1	3.1	Dioptrischer Apparat .....	27
1.2	Licht .....	2	3.2	Signalverarbeitung in der Retina .....	33
1.3	Geometrische Optik .....	3	3.3	Zentrale Repräsentation des visuellen Systems ...	38
1.4	Wellenoptik .....	8	3.4	Informationsverarbeitung in der Sehbahn .....	39
<b>2</b>	<b>Sehorgan</b> .....	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>Chemische Sinne</b> .....	<b>41</b>
2.1	Entwicklung des Sehorgans .....	11	4.1	Grundlagen der chemischen Sinne .....	41
2.2	Augenhöhle .....	12	4.2	Geschmack .....	42
2.3	Bulbus oculi .....	13	4.3	Geruchssinn und trigeminaler chemischer Sinn ...	45
2.4	Zusätzliche Einrichtungen .....	18			
2.5	Sehbahn .....	19			
2.6	Feinstruktur des Sehorgans .....	21		<b>Register</b> .....	<b>49</b>

# 1

## Optik

### 1.1 Elektromagnetische Wellen

Thomas Wenisch



#### 1.1.1 Eigenschaften

Elektromagnetische Wellen breiten sich unabhängig von einem Leiter oder einem sonstigen Trägermedium als wechselnde elektrische und magnetische Felder frei im Raum aus.

- Elektromagnetische Wellen sind **Transversalwellen**.
- Die Richtungen des elektrischen und magnetischen Feldes stehen senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (➤ Abb. 1.1).
- Elektromagnetische Wellen sind polarisierbar. Als Polarisationsrichtung wird die Richtung des elektrischen Feldvektors angegeben.

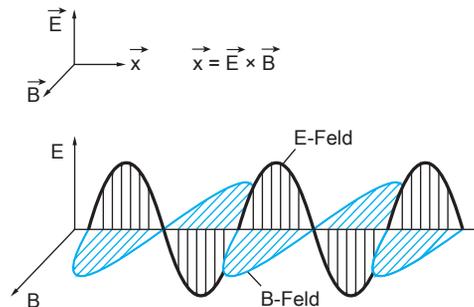


Abb. 1.1 Elektromagnetische Wellen mit der Richtung von elektrischem und magnetischem Feld [L253]

#### 1.1.2 Sichtbarer Bereich

Nur ein kleiner Teil des elektromagnetischen Spektrums (➤ Abb. 1.2) ist vom menschlichen Auge als sichtbares Licht wahrnehmbar. Dieser sichtbare Bereich liegt bei Wellenlängen  $\lambda$  von 400–760 nm. Gelegentlich werden auch um einige Nanometer abweichende Grenzen genannt.

➤ Tab. 1.1 zeigt die Farben des sichtbaren Lichts.

Geringere bzw. höhere Wellenlängen sind für das menschliche Auge nicht sichtbar:

- $\lambda < 400$  nm: **ultraviolette Strahlung**
- $\lambda > 760$  nm: **infrarote Strahlung**

**MERKE**

Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum und praktisch auch in Luft mit der Geschwindigkeit

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Es existiert keine einheitliche Modellvorstellung für elektromagnetische Strahlung, situationsabhängig zeigen sich sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften.

Die Energie eines Strahlungsteilchens ist proportional zu seiner Frequenz

$$E = h \cdot f$$

oder mit  $c = \lambda \cdot f$  umgekehrt proportional zur Wellenlänge:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Farbe	Wellenbereich
Rot	650–700 nm
Gelb	600 nm
Grün	500–550 nm
Blau	450 nm
Violett	420 nm

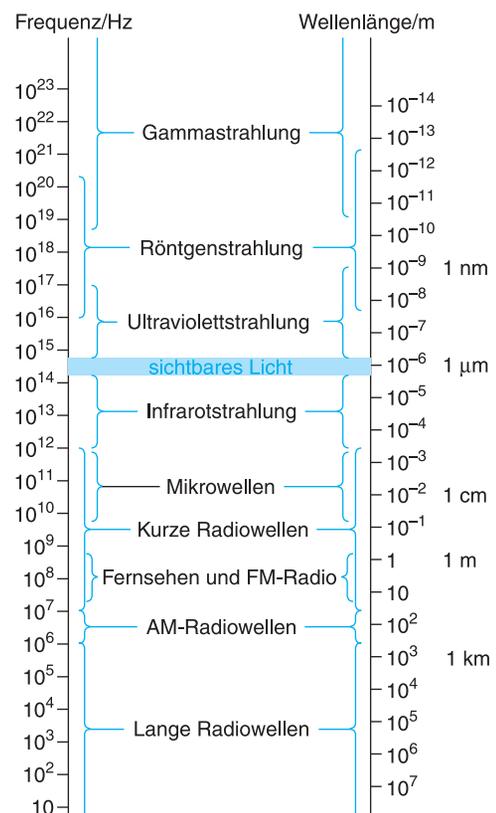


Abb. 1.2 Das elektromagnetische Spektrum [L253]

Die **Planck-Konstante**  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Js ist eine universelle Naturkonstante. Ihr Wert entspricht der kleinsten in der Natur möglichen Energieübertragung.

### 1.1.3 Ionisierende Strahlung

Energiereiche elektromagnetische Strahlung zählt zu den ionisierenden Strahlungen. Ionisierende Strahlung besitzt genügend Energie, um Materie zu ionisieren, d. h. um Elektronen abzulösen. Dazu zählen **Röntgenstrahlung**,  **$\gamma$ -Strahlung** sowie **kosmische Strahlung**.

Ultraviolette Strahlung gehört dagegen zu den **nicht ionisierenden Strahlungen**.

#### CHECK - UP

- Wie groß ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum?
- Welche Wellenlängen haben die Farben des sichtbaren Lichts?
- Wie hängen Frequenz, Wellenlänge und Energie elektromagnetischer Strahlung zusammen?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Licht

Thomas Wenisch



### 1.2.1 Eigenschaften

Licht ist der sichtbare Teil des elektromagnetischen Spektrums. Es hat folgende Eigenschaften:

- Wellenlänge:  $\lambda = 400 - 760$  nm
- Geschwindigkeit (im Vakuum):  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s
- Energie:  $E = h \cdot f$

Die Natur des Lichts lässt sich nicht eindeutig festlegen. Es zeigt sich einmal wie eine Welle, ein anderes Mal wie ein Teilchen.

#### Temperaturstrahlung

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts sendet elektromagnetische Strahlung aus. Bei hohen Temperaturen liegt diese Strahlung im sichtbaren Bereich. Die Strahlungsleistung ist proportional zur **vierten Potenz der Temperatur**.

## Fotoeffekt

Nur durch den Teilchencharakter des Lichts erklärbar ist der Fotoeffekt, auch **äußerer lichtelektrische Effekt** genannt: Licht löst aus einem Metall Elektronen heraus. Dazu muss die für jedes Metall typische Austrittsarbeit  $W_a$  aufgebracht werden.

Der Fotoeffekt ist frequenzabhängig. Ab einer Grenzfrequenz  $f_g$  können Elektronen ausgelöst werden. Es gilt:

$$h \cdot f_g = W_a$$

In der Regel wird der Fotoeffekt erst bei blauem oder ultraviolettem Licht beobachtet.

### 1.2.2 Lichtmessung

#### Fotometrische Größen

Bei Beschreibung einer Strahlungsquelle sind mehrere strahlungsphysikalische und lichttechnische Größen gebräuchlich. Die wichtigsten sollen hier genannt werden:

- **Strahlungsenergie W**, angegeben in Joule (J).
- **Strahlungsleistung P**, angegeben in Watt (W).
- **Strahlungsstärke  $\Psi$**  gibt die pro Raumwinkel abgegebene Leistung in der Einheit Watt pro Steradian (W/sr) an.
- **Strahlungsintensität  $\Phi$**  ist dagegen definiert als Leistung pro Flächeneinheit, angegeben als Watt pro Quadratmeter (W/m<sup>2</sup>).
- **Bestrahlung H** ist die Energie pro Flächeneinheit, ausgedrückt in Joule pro Quadratmeter (J/m<sup>2</sup>).

In der Beleuchtungstechnik wird auch die vom spektralen Empfindlichkeitsverlauf des menschlichen Auges abhängige, subjektive Wahrnehmungsqualität berücksichtigt.

#### MERKE

Die Lichtstärke  $\Psi_l$ , gemessen in der **Candela (Cd)** (lat.: Kerze), ist eine im internationalen Einheitensystem festgelegte Basisgröße.

Der genauen Definition der Einheit **Candela** liegt das spektrale Empfindlichkeitsmaximum des menschlichen Auges bei einer Wellenlänge von 555 nm zugrunde. Ein Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die Licht der Frequenz  $540 \cdot 10^{12}$  Hz aussendet und deren Strahlungsstärke  $1/683$  W pro Steradian beträgt.

#### MERKE

Für eine ideale, punktförmige Strahlungsquelle verteilt sich die abgestrahlte Energie bzw. abgegebene Leistung gleichmäßig auf alle Raumrichtungen. Strahlungsstärke und Strahlungsintensität nehmen beide mit dem **Quadrat der Entfernung** ab.

#### Das Fotometer

Ein wichtiges Messinstrument in der chemischen Analytik ist das Fotometer. Dabei wird die Schwächung des Lichts beim Durchgang durch Materie benutzt, um die Konzentration einer Substanz in einer Lösung zu bestimmen.

Eine Fotozelle misst die Intensität  $I$  eines Lichtstrahls nach dem Durchgang durch eine Probe; als Referenz den Wert  $I_0$  ohne Probe.

Das Verhältnis beider Intensitäten ist die üblicherweise in Prozent angegebene **Transmission**:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

### MERKE

Die beim Fotometer wichtigste Messgröße ist die über den Logarithmus definierte **Extinktion E**:

$$E = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\log(T)$$

Die Extinktion ist eine dimensionslose Zahl.

Die **spezifische Extinktion** einer Substanz ist abhängig von der Wellenlänge. So hat ein blauer Farbstoff eine niedrige Extinktion für blaues Licht. Für alle anderen Farben hat die Extinktion einen höheren Wert, denn diese Wellenlängen werden absorbiert.

### Gesetz von Lambert-Beer

Das Gesetz von Lambert-Beer beschreibt den Zusammenhang zwischen der Extinktion und der Konzentration eines Stoffs in der Messlösung:

$$E = \epsilon_m \cdot c \cdot d$$

- $c$ : Konzentration des Stoffs
  - $d$ : Dicke der durchstrahlten Schicht
  - $\epsilon_m$ : molarer Extinktionskoeffizient des untersuchten Stoffs
- $\epsilon_m$  (auch als  $\epsilon_\lambda$  bezeichnet) ist ein stoffspezifischer, jeweils für eine bestimmte Wellenlänge angegebener Wert.

### CHECK-UP

- Welche fotometrische Größe ist Basisgröße des internationalen Einheitensystems?
- Welches Abstandsgesetz gilt für eine punktförmige Lichtquelle?
- Welchen Wert hat die Extinktion, wenn  $I/I_0 = 1/100$  beträgt?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Geometrische Optik

Thomas Wenisch



Die geometrische Optik geht von der vereinfachenden Betrachtung aus, dass sich das Licht stets geradlinig in Form von **Strahlen** ausbreitet. Die Strahlen ändern an der Grenzfläche zweier optischer Medien ihre Richtung.

### 1.3.1 Reflexion

Licht wird an einer spiegelnden Oberfläche reflektiert. Nach dem Reflexionsgesetz ist der Einfallswinkel  $\alpha_1$  zwischen auftreffendem Lichtstrahl und dem senkrecht auf der Oberfläche stehenden Einfallslot gleich dem Ausfallswinkel  $\alpha_2$  zwischen Einfallslot und reflektiertem Strahl.

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

Eine Abbildung an einem ebenen Spiegel wird durch Verlängerung die reflektierten Strahlen auf die rückwärtige Seite des Spiegels konstruiert (➤ Abb. 1.3).

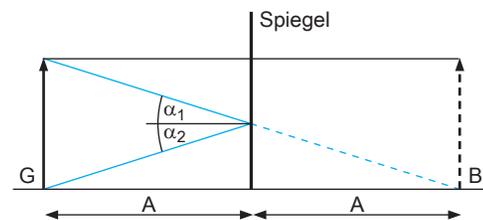


Abb. 1.3 Reflexion an einem Spiegel [L253]

### 1.3.2 Lichtbrechung

Die Geschwindigkeit des Lichts ist in Materie geringer als die Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  im Vakuum.

$$c = \frac{c_0}{n}$$

#### Brechungsindex $n$

Die materialspezifische Größe  $n$  wird als Brechungsindex, Brechzahl oder optische Dichte eines Mediums bezeichnet. Im Vakuum und praktisch auch für Luft ist  $n = 1$ . Der Brechungsindex von Wasser beträgt  $n = 1,33$ . Für Glas liegt er, abhängig von der Glasart, im Bereich von etwa  $n = 1,45$ – $1,65$ .

### MERKE

Die Frequenz einer Welle bleibt beim Übergang von einem in ein anderes Medium unverändert. Es gilt immer  $c = \lambda \cdot f$ , die Wellenlänge ändert sich im gleichen Verhältnis wie die Geschwindigkeit.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

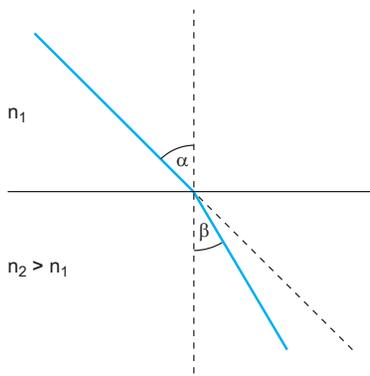


Abb. 1.4 Lichtbrechung [L253]

Die Richtung eines Lichtstrahls ändert sich an der Grenze zweier lichtdurchlässiger Medien, er wird gebrochen (> Abb. 1.4).

### Brechungsgesetz

Für den Übergang von einem Medium mit der Brechzahl  $n_1$  in ein Medium mit der Brechzahl  $n_2$  sagt das Brechungsgesetz:

$$n_1 \cdot \sin\alpha = n_2 \cdot \sin\beta$$

#### MERKE

Beim Übergang von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium wird der Lichtstrahl zum Einfallslot hin gebrochen. Beim Übergang vom optisch dichteren in das dünnere Medium wird der Strahl vom Einfallslot weggebrochen.

- Beim Durchgang durch eine planparallele Glasplatte wird das Licht beim Eintritt und beim Austritt gebrochen (> Abb. 1.5a). Beide Richtungsänderungen kompensieren sich und insgesamt wird der Lichtstrahl um einen kleinen Betrag parallel versetzt.
- Beim **Prisma** kompensieren sich die Richtungsänderungen dagegen nicht und der Strahl wird aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt (> Abb. 1.5b).

### Totalreflexion

Der Übergang in ein Medium mit größerer optischer Dichte ist bei jedem Einfallswinkel möglich. Wird aber beim Übergang vom optisch dichteren in das dünnere Medium ein bestimmter Grenzwin-

kel überschritten, tritt **Totalreflexion** auf. Der Lichtstrahl kann das dichtere Medium nicht verlassen und wird an der Grenzfläche vollständig in das optische dichtere Medium zurückgeworfen.

### Dispersion

Der Brechungsindex eines Mediums ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts. Dieses Phänomen wird als **Dispersion** bezeichnet. Deshalb kann weißes Licht an einem Prisma in seine Spektralfarben aufgetrennt werden.

#### MERKE

**Dispersion:** Blaues Licht wird stärker gebrochen als rotes Licht.

### 1.3.3 Die Linse

Eine Linse wird gezeichnet, indem ein Kreisbogen mit dem Krümmungsradius  $r$  um den Brennpunkt gezogen wird. Die Brennweite  $f$  der Linse ist der Abstand vom Brennpunkt zur Mittelebene der Linse. Allerdings ist für **dünne Linsen** deren Dicke gegenüber ihrer Brennweite vernachlässigbar, sodass hier Krümmungsradius und Brennweite gleichgesetzt werden.

### Sphärische Linse

Die Oberfläche einer sphärischen Linse ist geformt wie der Ausschnitt aus einer Kugeloberfläche. Der Radius der Kugelschale entspricht der **Krümmungsradius** der Linse.

- Die **konvexe** Oberfläche einer **Sammellinse** wird beim Blick von außen,
- die **konkave** Oberfläche von **Zerstreuungslinsen** beim Blick von innen auf einen Kugelabschnitt sichtbar.

### Zylindrische Linse

Sie ist wie die Mantelfläche eines Zylinders nur in eine Richtung gekrümmt. Die **optische Achse** geht durch den Mittelpunkt der Linse und steht senkrecht auf ihrer Mittelebene.

- Der **Brennpunkt F** (Focus) liegt auf der optischen Achse.
- Die **Brennebene** liegt parallel zur Linsenebene, sie steht im Brennpunkt senkrecht auf der optischen Achse.

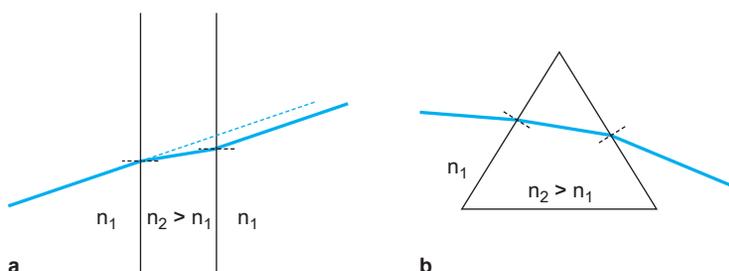


Abb. 1.5 Strahlengang an einer planparallelen Platte (a) und an einem Prisma (b) [L253]

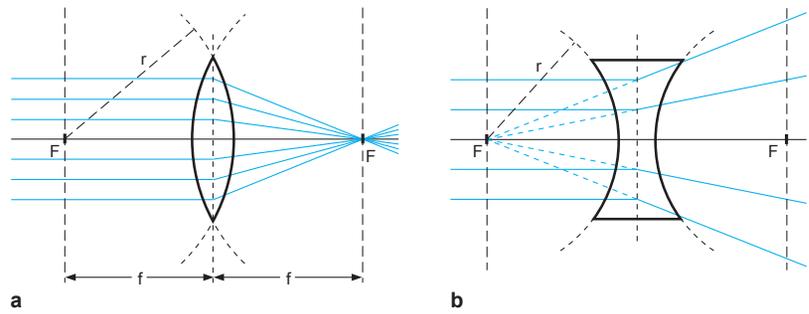


Abb. 1.6 Strahlengang einer konvexen (a) und einer konkaven Linse (b) [L253]

## Strahlengang

Das Licht wird zwar an der Vorder- und Rückseite der Linse gebrochen, aber in einer vereinfachten Darstellung des Strahlengangs werden diese beiden Brechungen nicht einzeln betrachtet, sondern die einfallenden Strahlen bis zur Mittelebene der Linse verlängert (> Abb. 1.6):

- Ein zur optischen Achse paralleles Strahlenbündel wird von einer Sammellinse auf der gegenüberliegenden Seite im Brennpunkt vereinigt.
- Fällt ein paralleles Strahlenbündel schräg zur optischen Achse auf eine Sammellinse, treffen sich die Strahlen in einem Punkt der gegenüberliegenden Brennebene außerhalb des Brennpunkts.
- Der Strahlengang an einer Linse ist grundsätzlich umkehrbar. Befindet sich eine Lichtquelle im Brennpunkt einer konvexen Linse, verlaufen die Strahlen auf der anderen Seite der Linse parallel (> Abb. 1.6a).
- Eine konkave Linse zerstreut ein parallel einfallendes Strahlenbündel. Die Öffnung des gebildeten Strahlenkegels lässt sich als Verlängerung der Verbindungslinie von der Mittelebene der Linse zum Brennpunkt auf der Einfallsseite konstruieren (> Abb. 1.6b).

## Brechkraft

Die Brechkraft  $\phi$  oder Brechwert einer Linse ist als der Kehrwert ihrer Brennweite definiert:

$$\phi = \frac{1}{f}$$

- Einheit: **Dioptrie (dpt)**,  $1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$ .
- Die Brechkraft wird für Sammellinsen positiv und für Zerstreuungslinsen negativ gezählt.
- Werden mehrere Linsen hintereinander zu einem **Linsensystem** angeordnet, errechnet sich der Gesamtbrechwert durch Addition der einzelnen Dioptrienzahlen.

## Bildkonstruktion

Ein Gegenstand der Größe  $G$  ist eine als Gegenstandsweite  $g$  bezeichnete Strecke von einer Sammellinse entfernt. Die Abbildung wird konstruiert (> Abb. 1.7):

- Achsenparallele Strahlen gehen auf der gegenüberliegenden Seite durch den Brennpunkt.
- Ein Strahl durch den Mittelpunkt der Linse wird nicht gebrochen.
- Ein durch den Brennpunkt einfallender Strahl verlässt die Linse parallel zur optischen Achse.

Jeweils zwei dieser Strahlen genügen zur Bildkonstruktion, der dritte kann zur Kontrolle zusätzlich gezeichnet werden.

Auf der gegenüberliegenden Linsenseite schneiden sich die Strahlen in der Spitze des Bilds  $B$ . Dessen Entfernung von der Linse ist die Bildweite  $b$ .

In > Abb. 1.7 entsteht ein **reelles Bild**. Ein reelles Bild kann auf eine Mattscheibe oder Leinwand projiziert und von dort betrachtet werden.

Das Bild steht gegenüber dem Gegenstand auf dem Kopf und ist seitenverkehrt.

### MERKE

Lage und Größe des Bilds können mit den **Linsenformeln** berechnet werden.

Gegenstandsweite  $g$ , Bildweite  $b$  und Brennweite  $f$  stehen im Zusammenhang:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Bildgröße  $B$  und Gegenstandsgröße  $G$  stehen im Verhältnis:

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

$B/G$  gibt den Abbildungsmaßstab bzw. die Vergrößerung an.

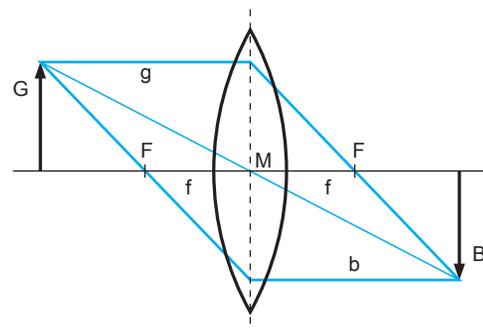


Abb. 1.7 Bildkonstruktion an einer Sammellinse [L253]

Die folgenden Fälle werden unterschieden und lassen sich einfach merken:

- Der Gegenstand steht genau in der doppelten Brennweite vor der Linse,  $g = 2f$ , dann entsteht ein gleich großes Bild ( $B = G$ ) ebenfalls in der Entfernung  $b = 2f$ .
- Bei einer Gegenstandsweite zwischen einfacher und doppelter Brennweite entsteht ein vergrößertes Bild außerhalb der doppelten Brennweite.
- Liegt die Gegenstandsweite außerhalb der doppelten Brennweite, entsteht ein verkleinertes Bild zwischen einfacher und doppelter Brennweite.
- Befindet sich der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite, divergieren die Strahlen auf der anderen Seite der Linse. Es entsteht nur ein virtuelles Bild ( $\rightarrow$  Abb. 1.8). Die Berechnung mit den Linsenformeln ergibt einen negativen Wert für  $b$ .
- Steht der Gegenstand genau in der einfachen Brennweite, verlassen die Strahlen die Linse parallel. Das virtuelle Bild entsteht im Unendlichen. Die Anwendung der Linsenformeln führt in diesem Fall zu keinem sinnvollen Ergebnis.

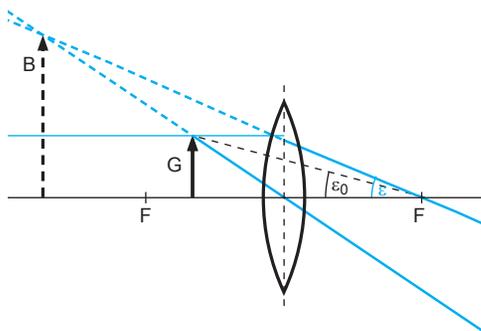


Abb. 1.8 Strahlengang an der Lupe [L253]

### Akkommodation

Die Einstellung des Auges auf unterschiedliche Entfernungen heißt Akkommodation. Die **Akkommodationsbreite A** des Auges lässt sich mit einer leichten Abwandlung der Linsenformel berechnen:

$$A + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Dabei ist  $f$  der Abstand des Nahpunkts des Auges und  $b$  der Abstand des Fernpunkts, jeweils angegeben in m.

Rückt der Fernpunkt ins Unendliche, wird daraus:

$$A = \frac{1}{f}$$

So wäre für minimale deutliche Sehweite von 25 cm:  $A = \frac{1}{0,25m} = 4D$ .

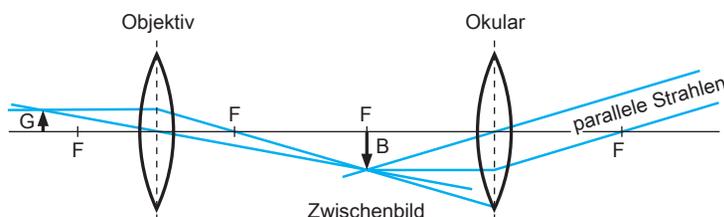


Abb. 1.9 Strahlengang des Mikroskops [L253]

### Abbildungsfehler

Es werden zwei Arten von Abbildungsfehlern unterschieden: die sphärische und die chromatische Aberration.

**Sphärische Aberration** Die Regeln zur Bildkonstruktion sind Näherungen, die nur für dünne Linsen und nahe der optischen Achse verlaufende Strahlen gelten. Da diese Voraussetzungen nicht immer vollständig erfüllt sind, treten Abbildungsfehler auf.

**Chromatische Aberration** Aufgrund der Dispersion, d.h. der Frequenz- bzw. Wellenlängenabhängigkeit der Lichtbrechung, sind die Brennweiten für die einzelnen Lichtfarben unterschiedlich. Jede Linse weist daher chromatische Fehler auf.

### Lupe

Eine Lupe erzeugt ein **virtuelles Bild** ( $\rightarrow$  Abb. 1.8).

Ein virtuelles Bild kann nicht projiziert werden, es entsteht erst im Auge des Betrachters. Das Auge bündelt die parallel oder leicht divergent einfallenden Strahlen, sodass auf der Netzhaut das Bild entsteht.

Für die Bildkonstruktion wird eine Gegenstandsposition innerhalb der einfachen Brennweite gewählt. Der Mittelpunktstrahl und der Strahl durch den gegenüberliegenden Brennpunkt verlaufen divergent. Ihre rückwärtigen Verlängerungen schneiden sich in der Spitze des virtuellen Bildes.

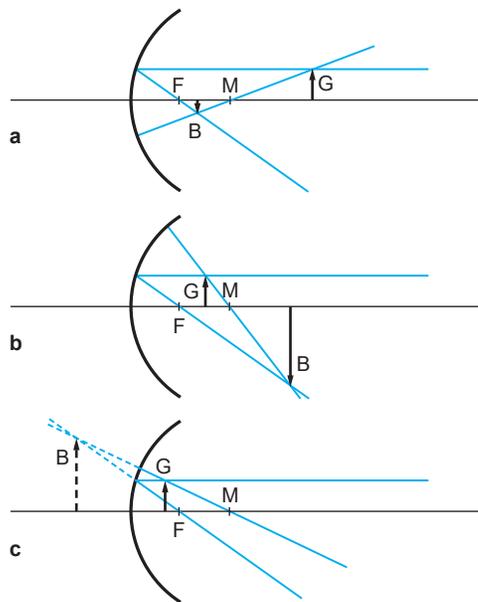
In der Realität wird ein Objekt mit dem entspannten, auf große Entfernung akkommodierten Auge betrachtet. Das Objekt steht genau in der Brennebene der Lupe. Die Strahlen verlassen die Lupe dann parallel und das Bild entsteht „im Unendlichen“. Dabei ist  $d$  der Betrachtungsabstand und  $f$  die Brennweite der Lupe. Als deutliche Sehweite bei entspanntem Auge gilt  $d = 25\text{ cm}$ .

Ein allgemeines Maß für die Abbildungsvergrößerung optischer Instrumente ist die **Sehwinkelvergrößerung**  $\varepsilon/\varepsilon_0$ . Der Sehwinkel  $\varepsilon$  unter Verwendung des Instruments wird mit dem Winkel  $\varepsilon_0$  bei Betrachtung ohne Instrument verglichen.

### Mikroskop

Im Wesentlichen besteht das Mikroskop aus einem **Objektiv** und einem **Okular** ( $\rightarrow$  Abb. 1.9).

- Das Objektiv erzeugt ein **reelles Zwischenbild**.
- Das Zwischenbild ist umgekehrt und vergrößert. Es liegt in der Brennebene des Okulars.
- Das Okular wirkt wie eine Lupe.
- Die Strahlen verlassen das Okular parallel, das virtuelle Bild entsteht im Unendlichen.
- Die Gesamtvergrößerung ergibt sich aus der Multiplikation der Vergrößerungsfaktoren von Objektiv und Okular.



**Abb. 1.10** Bild am sphärischen Hohlspiegel: Gegenstand außerhalb der 2-fachen Brennweite (a), Gegenstand zwischen 1-facher und 2-facher Brennweite (b), Gegenstand zwischen Spiegel und Brennpunkt (c) [L253]

Die maximale Vergrößerung eines Mikroskops ist begrenzt. Sein **Auflösungsvermögen U** ist der Kehrwert der Distanz  $d$  zweier Punkte, die gerade noch getrennt abgebildet werden können.

$$U = \frac{1}{d}$$

Der kleinste im Mikroskop unterscheidbare Abstand ist:

$$d = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha}$$

$\alpha$  ist der Öffnungswinkel des Objektivs,  $n$  der Brechungsindex des Mediums zwischen Objekt und Objektiv.  $n \cdot \sin \alpha$  wird als **numerische Apertur** des Objektivs bezeichnet.

Die maximal erreichbare Auflösung liegt beim Lichtmikroskop mit ca.  $0,2 \mu\text{m}$  etwa bei der halben Wellenlänge des verwendeten Lichts ( $\rightarrow$  Abb. 1.9).

### 1.3.4 Der sphärische Hohlspiegel

Der sphärische Hohlspiegel hat die Form eines Kugelausschnitts. Der Brennpunkt  $F$  liegt auf halbem Weg zwischen der Spiegelfläche und dem Krümmungsmittelpunkt ( $\rightarrow$  Abb. 1.10).

#### MERKE

Die Bildkonstruktion am Hohlspiegel ist mit der Bildkonstruktion an der Sammellinse vergleichbar:

- Achsenparallele Strahlen werden durch den Brennpunkt reflektiert.
- Ein Strahl durch den Krümmungsmittelpunkt wird in sich selbst reflektiert.
- Durch den Brennpunkt einfallende Strahlen verlassen den Spiegel parallel zur optischen Achse.
- Die Linsenformeln sind auf den sphärischen Hohlspiegel übertragbar.

#### CHECK-UP

- Wie ist der Brechwert einer Linse definiert? Welche Linsen haben positive, welche negative Brechwerte?
- Konstruiere ein reelles und ein virtuelles Bild an einer Sammellinse.
- Nenne die Linsenformeln.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

Franziska Breidt, Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski,  
Thomas Wenisch

## Vorklinik Finale 16

# Lunge und Atmung

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Ludwig Schlemm



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Entwicklung von Pleuraperikardhöhle, Herz und Schlundbogenarterien</b> .....	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>Mechanik des Kreislaufsystems</b> .....	<b>17</b>
1.1	Pleuraperikardhöhle .....	1	3.1	Druck .....	17
1.2	Herz .....	1	3.2	Verformung fester Körper .....	19
1.3	Schlundbogenarterien .....	3	3.3	Kräfte an Grenzflächen .....	21
			3.4	Strömung von Flüssigkeiten und Gasen .....	22
<b>2</b>	<b>Anatomie der Atmungsorgane</b> .....	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>Atmung</b> .....	<b>27</b>
2.1	Atmungsorgane .....	5	4.1	Allgemeine Grundlagen .....	27
2.2	Kehlkopf .....	6	4.2	Atemmechanik .....	29
2.3	Luftröhre .....	9			
2.4	Bronchialbaum .....	10	<b>5</b>	<b>Gasaustausch</b> .....	<b>35</b>
2.5	Lunge .....	12	5.1	Lungenperfusion .....	35
2.6	Pleura .....	14	5.2	Gasaustausch in der Lunge .....	36
2.7	Angewandte und topografische Anatomie .....	15	5.3	Atemgastransport .....	38
			5.4	Atmungsregulation .....	40
			5.5	Atmung unter ungewöhnlichen Bedingungen .....	42
				<b>Register</b> .....	<b>45</b>

# 1

# Entwicklung von Pleuraperikardhöhle, Herz und Schlundbogenarterien

## 1.1 Pleuraperikardhöhle

Christoph Jaschinski



Die Pleuraperikardhöhle formt sich gegen Ende der 3. EW durch das Vorwachsen der **Plicae pleuroperitoneales** und **Plicae pleuropericardiales**. Während die Plicae pleuroperitoneales die Pleuraperikardhöhle gegen die Peritonealhöhle abgrenzen, unterteilen die Plicae pleuropericardiales die Pleuraperikardhöhle in die unpaare Perikardhöhle und die beiden Pleurahöhlen.

Über die **Ductus pericardioperitoneales** steht die Pleuraperikardhöhle mit dem intraembryonalen Zölon in Verbindung. Die Ductus pericardioperitoneales verengen sich im Laufe der Entwicklung durch das Vorwachsen der Plicae pleuroperitoneales zu den **Hiatus pleuroperitoneales**.

Die finale Abtrennung der Pleuraperikardhöhle von der Peritonealhöhle entsteht durch die Ausbildung des Zwerchfells.

**Jetzt bist du dran!**

**Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Herz

Christoph Jaschinski



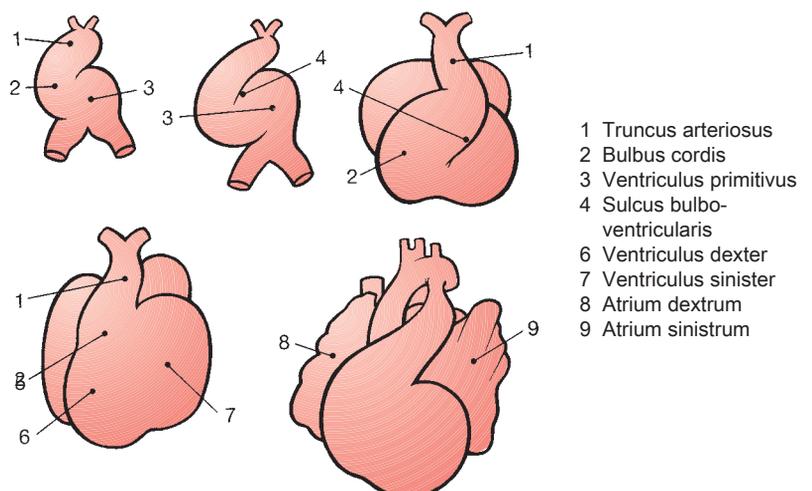
Aus dem Mesoderm der Splanchnopleura stammende **Angioblasten** bilden ab dem 21. Tag mehrere **Gefäßplexus**, die schließlich zu 2 Endokardrohren zusammenwachsen. Die Endokardrohre vereinigen sich zum unpaaren **Herzschlauch**, der sich in einen venösen Einflusstrakt und einen arteriellen Ausflusstrakt unterteilen lässt. Im Laufe der Entwicklung folgt die Untergliederung in (> Abb. 1.1): Sinus venosus, Atrium commune, Ventriculus communis, Conus arteriosus (Bulbus cordis) und Truncus arteriosus.

### 1.2.1 Septierung der Vorhof-Kammer-Grenze

Durch das schnelle Längenwachstum des fixierten Herzschlauches entsteht eine S-förmige Krümmung, die sog. **Herzschleife**. Diese besitzt 2 von außen sichtbare Furchen, den Sulcus atrioventricularis und den Sulcus conoventricularis. Im Sulcus atrioventricularis proliferiert das Mesenchym zu 4 **Endokardkissen**. Durch die Verschmelzung des oberen mit dem unteren Endokardkissen entstehen ein rechter und linker Atrioventrikularkanal.

### 1.2.2 Septierung der Vorhöfe

Im primitiven Vorhof wächst von kraniodorsal eine Membran, das **Septum primum**, in Richtung der beiden verschmolzenen Endokardkissen. Dabei bleibt zunächst eine Öffnung zwischen dem Septum primum und den Endokardkissen, das **Foramen primum**.



**Abb. 1.1** Entwicklung der äußeren Form des Herzens durch Schleifenbildung (Lippert, Lehrbuch Anatomie, Urban & Fischer, 7. A., 2006) [S002-7]

Nachdem dieses vollkommen verschlossen ist, treten Perforationen im oberen Teil des Septum primum auf, die sich zum **Foramen secundum** erweitern. Dieses wird durch ein rechts des Septum primum vorwachsendes **Septum secundum** verkleinert, jedoch nicht verschlossen. Da das Septum secundum das Foramen secundum nur unvollständig verschließt, bleibt als Verbindung der beiden Vorhöfe das **Foramen ovale** offen.

### MERKE

Der Boden der **Fossa ovalis** leitet sich vom Septum primum ab.

## 1.2.3 Septierung der Ventrikel

Zunächst schnürt die vorwachsende **Pars muscularis** des **Septum interventriculare** den primitiven Ventrikel in 2 Hälften. Am oberen Ende verbleibt dabei eine Öffnung, das **Foramen interventriculare**. Dieses wird später durch die **Pars membranacea** des **Septum interventriculare**, die sich aus dem Konusseptum entwickelt, verschlossen.

## 1.2.4 Septierung der Ausflussbahn

Während der Conus arteriosus weitgehend in die Ausstrombahn des rechten Ventrikels eingezogen wird, entsteht aus dem **Truncus arteriosus** der spätere Truncus pulmonalis und die **Aortenwurzel**. Um diese voneinander abzutrennen, wird der Truncus arteriosus durch 3 Wulstsysteme halbiert:

- das unpaare **Septum aorticopulmonale**,
- die paarigen **Trunkussepten**,
- die paarigen **Konussepten**.

Für die Septierung ist die Einwanderung von Neuralleistenzellen über die Schlundbogen notwendig.

### CHECK - UP

Beschreibe die Herzentwicklung.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

### 1.3 Schlundbogenarterien

Christoph Jaschinski



Die **Schlundbogenarterien** (Pharyngealbogenarterien, > Abb. 1.2) entwickeln sich nacheinander, sodass die ersten beiden schon wieder verschwunden sind, wenn die anderen Schlundbogenarterien erscheinen. Ihre Derivate sind in > Tab. 1.1 aufgeführt.

Schlundbogenarterie (SBA)	Derivate
1. SBA	Verschwundet größtenteils. Bildet die A. maxillaris
2. SBA	Bildet sich bis auf die A. stapedia weitgehend zurück
3. SBA	Formt beidseits die Aa. carotides communes, externae und internae
4. SBA	Bildet links den Arcus aortae und rechts die proximale A. subclavia
5. SBA	Ist oft nicht angelegt
6. SBA	Links Ductus arteriosus (Botalli), rechts Aa. pulmonales
7. SBA	Bildet beidseits die distalen Anteile der Aa. subclaviae

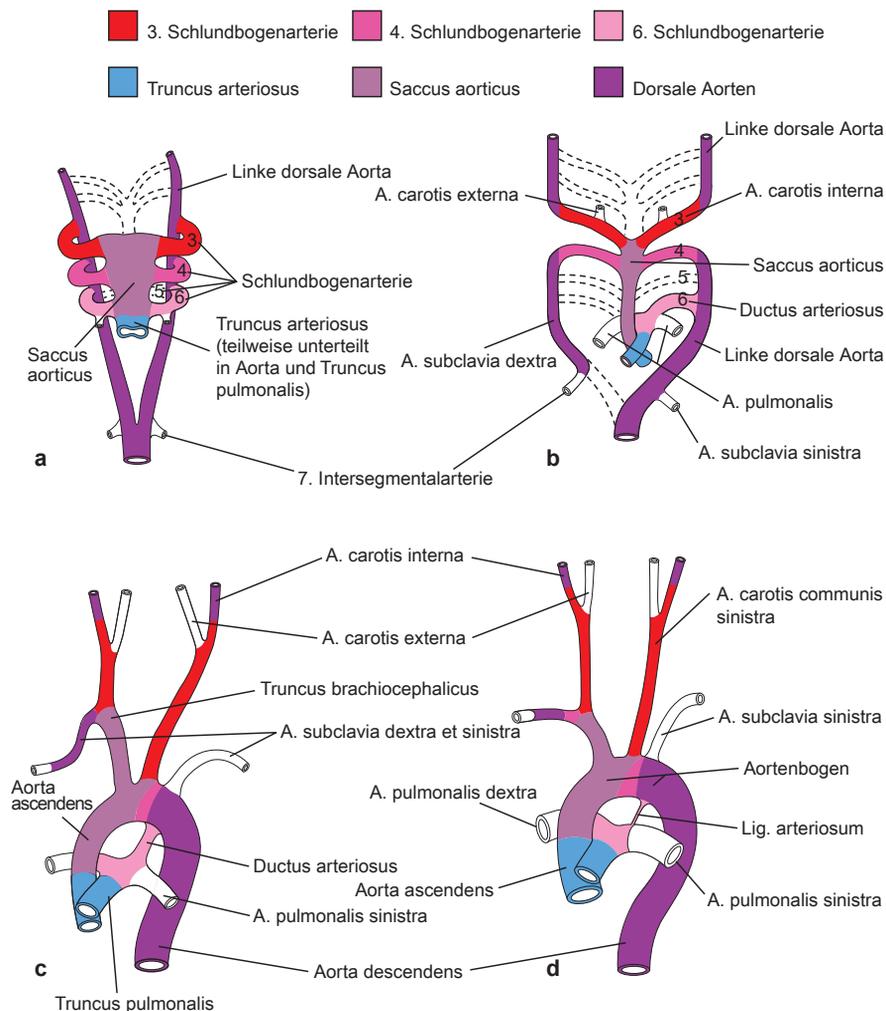
#### CHECK - UP

Nenne die Derivate der Schlundbogenarterien.

#### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.



**Abb. 1.2** Schematische Darstellung der Arterien, die sich durch Umformung aus Truncus arteriosus, Saccus aorticus, Schlundbogenarterien und dorsaler Aorta bilden. a = 6. EW, b = 7. EW, c = 8. EW, d = 6. EM [R249]

---

**Jetzt bist du dran!**

---

**Zeichenaufgabe**

Skizziere die Entwicklung des Herzens in groben Zügen (Schlauch, Schleife, Septierung). Beschrifte deine Zeichnungen mit Woche der Entwicklung und beteiligten Zellen.

Wenn du Hilfe brauchst, findest du dazu auch etwas in deinem Anatomie-Atlas.

**Anregungen zur weiteren Wiederholung**

Skizziere das Derivat zu jedem Schlundbogen. Was wird dadurch versorgt, welche wichtigen Äste gibt es ab?

**Überblick gewinnen**

Nutze deine gesammelten Stichwörter für eine Mindmap oder eine gegliederte Stichwortliste.

---

# 2

## Anatomie der Atmungsorgane

### 2.1 Atmungsorgane

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski

#### Anatomie, Histologie

Unter dem **Respirationstrakt** versteht man die Gesamtheit der Strukturen und Organe, die an der Atmung beteiligt sind. Zu den Atmungsorganen gehören Luftröhre (Trachea), Bronchialbaum, Lunge (Pulmo) und Brustfell (Pleura).

Für Nerven und Nervengeflechte sowie Arterien, Venen, Lymphbahnen der Brusteingeweide.

Im nahezu gesamten Respirationstrakt besteht die Lamina epithelialis der Tunica mucosa aus mehrreihigem hochprismatischem Flimmerepithel mit Becherzellen (**respiratorisches Epithel**). In der darunterliegenden Lamina propria finden sich muköse und seröse Drüsen. Beide Schichten dienen der Sekretion von Muzinen und sorgen für die Anfeuchtung und Reinigung der Atemluft.

#### 2.1.1 Entwicklung

Die Atmungsorgane entwickeln sich aus der **Laryngotrachealrinne**. Diese stülpt sich zu Beginn der 4. EW aus dem Entoderm der Vorderdarmbuchts nach kaudal aus. In der 5. EW entwickeln sich die Lungenknospen, aus denen die Lungen entstehen. Die weitere Differenzierung der Lunge lässt sich in 3 Abschnitte unterteilen:

- **Pseudoglanduläre Phase:** In dem Zeitabschnitt zwischen der 5.–17. EW entwickeln sich die luftleitenden Abschnitte bis zu den Bronchioli terminales. Die Bezeichnung resultiert aus der morphologischen Ähnlichkeit der Lunge mit einer exokrinen Drüse.

- **Kanalikuläre Phase:** Durch dichotome Aussprossung bilden sich in der Zeit von der 13.–26. EW die Bronchioli respiratorii und Ductus alveolares.
- **Alveoläre Phase:** Ab der 24. EW entstehen die Lungenbläschen (Alveolen), ab der 28. EW wird in den Alveolen Surfactant gebildet. Die Alveolenzahl steigt von 50 Mio. zum Zeitpunkt der Geburt bis auf 300–400 Mio. im 8. Lebensjahr.

#### KLINIK

Ob ein Neugeborenes tot zur Welt kam oder kurze Zeit gelebt hat, lässt sich herausfinden, indem man die Lungen der **Schwimmprobe** unterzieht. Da die Lungen sich erst bei den ersten Atemzügen mit Luft füllen, sinken die flüssigkeitsgefüllten Lungen einer Totgeburt bei der Schwimmprobe ab. Wohingegen die Lungen einer Lebendgeburt schwimmen.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 2.2 Kehlkopf

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski

### Anatomie, Histologie

Der **Kehlkopf (Larynx)** bildet die Eintrittspforte zu den Atmungsorganen und erfüllt somit eine wichtige „Pfortnerfunktion“. Normalerweise ermöglicht er eine ausreichende Ventilation der Lungen, aber bei Bedarf, z. B. während des Schluckakts, riegelt er luftdicht ab. Innerhalb des Larynx liegen die Stimmbänder – der Ort der Stimmtonbildung (**Phonation**).

### 2.2.1 Entwicklung

Der Kehlkopf (**Larynx**) entwickelt sich nahezu vollständig aus den Knorpelteilen des 4.–6. Schlundbogens. Ausnahme ist der Kehldeckel (**Epiglottis**), dessen kaudaler Anteil aus dem hypobranchialen Wulst entsteht.

#### MERKE

Durch einen physiologischen **Hochstand des Kehlkopfs** können junge Säuglinge gewöhnlich gleichzeitig trinken und atmen.

### 2.2.2 Knorpel

Man unterscheidet:

- **Schildknorpel** (Cartilago thyroidea): besteht aus einer rechten und einer linken Knochenplatte (Laminae dextra et sinistra), die kranial und kaudal jeweils über eine Kerbe (Incisurae thyroideae superior et inferior) miteinander verbunden sind. Auf den Laminae imponiert jeweils eine schräg verlaufende Linie (Linea obliqua). Sie dient als Muskelursprungs- und -ansatzfläche. Kranial und kaudal läuft die Cartilago thyroidea beidseits zu Hörnern aus (Cornua superiora et inferiora).
- **Ringknorpel** (Cartilago cricoidea): hat die Form eines Siegelrings. Er besteht ventral aus dem schmalen Ringknorpelbogen (Arcus) und dorsal aus der breiten Ringknorpelplatte (Lamina). Die Cartilago cricoidea formt die Basis des Kehlkopfs und ist gleichzeitig das bindende Element zwischen Schild- und Stellknorpel.
- **Stellknorpel** (Cartilago arytenoidea): sitzt dem Ringknorpel auf. Er besitzt 2 Fortsätze, die als Ansätze fungieren: Am Processus muscularis inserieren die Mm. cricoarytenoideus posterior et lateralis sowie die Pars lateralis des M. thyroarytenoideus, am Processus vocalis setzen der M. vocalis und das Stimmband an.
- **Hörnchenknorpel** (Cartilago corniculata): sitzt wiederum dem Stellknorpel auf.
- **Keilknorpel** (Cartilago cuneiformis): liegt in einer Schleimhautfalte (Plica aryepiglottica), die von der Epiglottis zum Stellknorpel zieht. Die Plica aryepiglottica überdeckt den M. aryepiglotticus und bildet die laterale Begrenzung des Aditus laryngis.
- **Weizenknorpel** (Cartilago triticea): liegt im Lig. thyrohyoideum laterale.
- **Epiglottis** (Cartilago epiglottica): besteht im Gegensatz zum übrigen Kehlkopfskelett, das aus hyalinem Knorpel besteht, aus elastischem Knorpel.

### 2.2.3 Bänder und Gelenke

Die Kehlkopfknorpel stehen über zahlreiche Bänder miteinander in Verbindung:

- **Stimmband (Lig. vocale)**: zieht von der Innenseite des Schildknorpels zum Proc. vocalis des Stellknorpels und ruft eine Schleimhautfalte, die Stimmfalte (**Plica vocalis**), hervor.
- **Membrana fibroelastica laryngis**: besteht aus der kranialen Membrana quadrangularis und dem kaudalen Conus elasticus. Erstgenannte entspringt am Kehldeckel und endet als Taschenbänder (**Ligg. vestibularia**). Letzteres beginnt an den Stimmbändern und reicht bis zum Ringknorpel. Jedes Taschenband wirft eine Schleimhautfalte, die Taschenfalte (**Plica vestibularis**), auf.
- **Membrana thyrohyoidea**: spannt sich zwischen Schild- und Ringknorpel auf. Sie wird durch das Lig. thyrohyoideum medianum und die beiden Ligg. thyrohyoidea laterales verstärkt und besitzt beidseits eine Öffnung (**Foramen n. laryngei superioris**), durch die der R. internus des N. laryngeus superior und die A. laryngea superior ziehen.

Darüber hinaus ist das Kehlkopfskelett mit seiner Umgebung bindegewebig verbunden:

- **Lig. cricotracheale**: verbindet den Ringknorpel mit den Knorpelspannen der Trachea
  - **Lig. hyoepiglotticum**: verankert die Epiglottis am Zungenbein
- Die Kehlkopfknorpel sind über 2 Gelenke miteinander verbunden:
- **Art. cricothyroidea**: Scharniergelenk, welches die Plica vocalis vorspannt. Die Gelenkkapsel der Art. cricothyroidea wird durch das Lig. cricothyroideum verstärkt.
  - **Art. cricoarytenoidea**: Eigelenk, das Gleit- und Scharnierbewegungen zur Erweiterung und Verengung sowie Verkürzung und Verlängerung der Plica vocalis ermöglicht. Die weite Gelenkkapsel der Art. cricoarytenoidea wird durch das kräftige Lig. cricoarytenoideum gesichert.

#### KLINIK

Falls sich die Atemwege beispielsweise infolge einer allergischen Reaktion verschließen, kann es notwendig werden, die Atemwege mittels eines Luftröhrenschnitts (**Koniotomie**) zu sichern. Dabei wird das **Lig. cricothyroideum** durchtrennt.

### 2.2.4 Etagen des Kehlkopfs

Der Larynx lässt sich in 3 Etagen gliedern:

- **Supraglottischer Raum** (Vestibulum laryngis): reicht von der Epiglottis bis zu den Plicae vestibulares.
- **Transglottischer Raum** (Cavitas laryngis intermedia): Abschnitt zwischen Plicae vestibulares und Plicae vocales. Seitlich ist die Wand des transglottischen Raums zu einer kleinen Ausbuchtung (Ventriculus laryngis) erweitert.
- **Subglottischer Raum** (Cavitas infraglottica): Raum zwischen Plicae vocales und dem Unterrand des Ringknorpels i. H. HWK 6.

### 2.2.5 Stimmritze

Als Stimmritze (**Rima glottis, Glottis**) bezeichnet man die Engstelle zwischen den beiden Plicae vocales. Sie besteht aus 2 Teilen:

- **Pars intermembranacea**: zwischen den Mm. vocales
- **Pars intercartilaginea**: zwischen den Cartilaginea arytenoidea

Franziska Breidt, Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski,  
Fabian Rengier

**Vorklinik Finale 17**

# **Herz-Kreislauf-System**

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Ludwig Schlemm



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufbau des Herzens</b> .....	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>Physiologie des Herzens</b> .....	<b>17</b>
1.1	Makroskopischer Aufbau .....	1	3.1	Elektrophysiologie des Herzens .....	17
1.2	Innenrelief der Herzhöhlen .....	1	3.2	Mechanik des Herzens .....	25
1.3	Topografie .....	2	3.3	Ernährung des Herzens .....	30
1.4	Herzkranzgefäße .....	2	3.4	Steuerung der Herzaktivität .....	31
1.5	Herzklappen .....	3			
1.6	Herzskelett .....	4	<b>4</b>	<b>Anatomie und Physiologie des</b>	
1.7	Erregungsbildungs- und			<b>Kreislaufsystems</b> .....	<b>35</b>
	Erregungsleitungssystem .....	4	4.1	Aufbau des Gefäßsystems .....	35
1.8	Herzbeutel .....	5	4.2	Hämodynamik .....	38
1.9	Mikroskopischer Aufbau .....	6	4.3	Hochdrucksystem .....	41
1.10	Angewandte und topografische Anatomie .....	7	4.4	Niederdrucksystem .....	45
			4.5	Organdurchblutung .....	46
<b>2</b>	<b>Nerven und Gefäße der Brusteingeweide</b> .....	<b>11</b>		<b>Register</b> .....	<b>50</b>
2.1	Nerven und Nervengeflechte .....	11			
2.2	Arterien und Pulmonalgefäße .....	13			
2.3	Venen .....	14			
2.4	Lymphabfluss und Lymphknoten .....	15			

# 1

## Aufbau des Herzens

- Das Herz ist ein muskuläres Hohlorgan.
- Es besteht aus 2 Vorhöfen (Atrien, Sing. **Atrium**) und 2 Kammern (Ventriculi, Sing. **Ventriculus**).
- Es ist ungefähr faustgroß und wiegt abhängig von Geschlecht und Trainingszustand zwischen 250 und 320 g.
- Die rechte Kammer pumpt sauerstoffarmes Blut in den kleinen Kreislauf (**Lungenkreislauf**), die linke Kammer sauerstoffreiches Blut in den großen Kreislauf (**Körperkreislauf**).

### 1.1 Makroskopischer Aufbau

Christoph Jaschinski



Das Herz besitzt eine Kegelform. Die Herzspitze (**Apex cordis**) bildet die Spitze des Kegels und liegt hinter dem 5. ICR. Die Kegelgrundfläche wird von der Herzbasis (**Basis cordis**) gebildet, die auf Höhe des BWK 6–9 projiziert.

#### MERKE

Das Herz liegt zu allen 3 Raumebenen in einem Winkel von 45°. Seine Längsachse verläuft von rechts dorsal oben nach links ventral unten.

In Anlehnung an die angrenzenden Strukturen unterscheidet man 4 Herzflächen:

- **Facies sternocostalis:** wird vor allem vom **rechten Ventrikel** gebildet und von den Lungenflügeln überlagert. Weitere Anteile der Facies sternocostalis bilden der rechte Vorhof und ein kleiner Teil des linken Ventrikels. Die Facies sternocostalis bildet im Übergang zur Facies diaphragmatica einen scharfkantigen Übergang (Margo dexter, Margo acutus).
- **Facies diaphragmatica:** Die Wände des **rechten und linken Ventrikels** bilden die dem Zwerchfell zugewandte Seite.
- **Facies pulmonalis dexter:** wird vom **rechten Vorhof** gebildet.
- **Facies pulmonalis sinister:** wird vom **linken Vorhof** gebildet. Sie bildet im Übergang zur Facies sternocostalis den stumpfen Margo sinister (Margo obtusus).

Das makroskopische Erscheinungsbild des Herzmuskels ist durch 3 Furchen geprägt:

- **Sulcus coronarius:** trennt die Vorhöfe von den Kammern.
- **Sulcus interventricularis anterior:** steht an der Herzspitze über die Incisura apicis cordis mit dem Sulcus interventricularis posterior in Verbindung und fasst den R. interventricularis anterior des linken Herzkranzgefäßes ein.
- **Sulcus interventricularis posterior:** bildet gemeinsam mit dem Sulcus interventricularis anterior die Grenze zwischen rechter und linker Kammer. In ihm verläuft der R. interventricularis posterior des rechten Herzkranzgefäßes.

Bei der äußeren Betrachtung fallen die beiden **Herzohren (Auriculae)** als Ausstülpungen der Vorhöfe auf. Sie sind mit sog. Kammernmuskeln (Mm. pectinati) ausgekleidet. Bei Dehnung des Vorhofs scheiden diese **ANP** (atrial natriuretic peptide) aus, das über eine gesteigerte Ausscheidung von Natrium in der Niere eine osmotische Wasserausscheidung bewirkt und somit den Blutdruck senkt. Eine ähnliche Wirkung besitzt **BNP** (brain natriuretic peptide), das aus den Herzmuskelzellen des Ventrikels bei Dehnung sezerniert wird. Somit wirken ANP und BNP im Sinne endogener Diuretika.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

### 1.2 Innenrelief der Herzräume

Christoph Jaschinski



#### 1.2.1 Rechter Vorhof

Der **rechte Vorhof** besteht entwicklungsgeschichtlich aus 2 Teilen. Aus der venösen Einstrombahn, Sinus venosum, entwickelt sich der Vorhofsinus (**Sinus venarum cavarum**). Diesen grenzt der **Sulcus terminalis** in Richtung ventral von dem Teil des Vorhofs ab, der wegen der Mm. pectinati eine unregelmäßige Oberflächenstruktur aufweist. Rechts des Truncus pulmonalis liegt das rechte Herzohr (**Auricula dextra**). Der Sulcus terminalis wölbt sich im Inneren als **Crista terminalis** vor. Weiterhin findet sich im rechten Vorhof die **Valvula venae cavae inferioris (Eustachii)**. Sie leitet im pränatalen Kreislauf das sauerstoffreiche Blut aus der V. cava inferior über das Foramen ovale in den linken Vorhof und somit in den Körperkreislauf. Als Derivat des Foramen ovale bleibt die **Fossa ovalis** zurück, an deren Rand ein Relikt des Septum secundums, der **Limbus fossae ovalis (Vieussenii)**, auffällt. Neben dem venösen Blut aus der oberen und unteren Körperhälfte mündet auch das

venöse Abflusssystem des Herzens, der **Sinus coronarius**, über die **Valvula sinus coronarii (Thebesii)** in den rechten Vorhof.

## 1.2.2 Rechter Ventrikel

Der **rechte Ventrikel** lässt sich in eine unregelmäßig konturierte Einstrombahn und eine glattwandige Ausstrombahn unterteilen. Die **Trabecula septomarginalis** (Moderatorband) und die **Crista supraventricularis** begrenzen nach kaudal bzw. kranial die Einstrombahn des rechten Ventrikels. Die gesamte Einstrombahn ist mit Muskelbalken, **Trabeculae carneae**, durchsetzt. 3 Papillarmuskeln, **Mm. papillares**, geben Sehnenfäden, **Chordae tendineae**, zur Valva atrioventricularis dexter ab. Die 3 Papillarmuskeln heißen: **Mm. papillares anterior, posterior et septalis**. Jenseits der Crista supraventricularis beginnt der glattwandige **Conus arteriosus**.

## 1.2.3 Linker Vorhof

Der **linke Vorhof** ist ebenso wie der rechte größtenteils glattwandig – nur im linken Herzohr (Auricula sinistra) bilden die **Mm. pectinati** eine höckerige Oberfläche. Das linke Herzohr liegt links der Aorta, sodass die beiden Herzohren sich den ventrikulären Ausflussbahnen anlegen. In den linken Vorhof münden die 4 **Vv. Pulmonales**. Als Relikt des Septum primum erhebt sich die **Valvula foraminis ovalis**.

### MERKE

Bei etwa einem Viertel aller Menschen ist das Foramen ovale nur unvollständig verschlossen und daher im Herzkatheter sondendurchgängig. Dieser unvollständige Verschluss ist allerdings nur in wenigen Ausnahmefällen von hämodynamischer Relevanz.

## 1.2.4 Linker Ventrikel

Die Muskelwand des **linken Ventrikels** ist wegen des höheren Widerstands im Körperkreislauf ungefähr 3-mal so dick wie die Wand des rechten Ventrikels. Jedoch entwickelt sich die Wandstärke des linken Ventrikels erst postnatal. Zum Zeitpunkt der Geburt hat der rechte Ventrikel den größeren Durchmesser. Entsprechend der 2-teiligen Valva atrioventricularis sinistra finden sich 2 Papillarmuskeln: **Mm. papillares anterior et posterior**.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Topografie

Christoph Jaschinski



Das Herz liegt im **mittleren Mediastinum**. Es grenzt an die Strukturen des vorderen, hinteren und oberen Mediastinums sowie ans Zwerchfell.

## 1.4 Herzkranzgefäße

Christoph Jaschinski



Aufgrund der enormen Pumpleistung des Herzens – 100.000 Schläge pro Tag – benötigt die Herzmuskulatur eine umfassende Versorgung mit Sauerstoff und Nährstoffen. Diese stellt das Kapillarnetz der Herzkranzgefäße (**Koronarien**) sicher. Die Koronarien sind die **Vasa privata** des Herzens.

### 1.4.1 Koronararterien

Direkt distal der Aortenklappen gehen die beiden Herzkranzarterien aus der Aorta ab. Die rechte Koronararterie (**A. coronaria dextra**, RCA = right coronary artery) zieht im Sulcus coronarius um das Herz und legt sich dorsal in den Sulcus interventricularis posterior. Wichtige Abgänge der A. coronaria dextra zum Erregungsbildungs- und Erregungsleitungssystem bilden der **R. nodus sinuatrialis**, der zum Sinusknoten zieht, und der **R. nodus atrioventricularis**, der den AV-Knoten versorgt.

Die linke Koronararterie (**A. coronaria sinistra**, LCA = left coronary artery) versorgt vorwiegend die kräftige Muskulatur des linken Ventrikels. Kurz nach ihrem Abgang aus der Aorta spaltet sie sich in den **R. circumflexus** (RCX) und den **R. interventricularis anterior** (RIVA, LAD = left anterior descending artery).

Beide Koronararterien geben einen Seitenast, **R. marginalis**, ab.

Anastomosen zwischen den beiden Herzkranzarterien bestehen zwischen den Rr. interventriculares anterior und posterior über die Rr. septales und ggf. über die Herzspitze. Zudem bestehen Anastomosengebiete im Bereich des Sinusknoten – auch die linke Koronararterie gibt einen Ast zum Sinusknoten ab – und über die Rr. cono arteriosii.

### FOKUS

Bei einem Herzinfarkt (**Myokardinfarkt**) ist eine Koronararterie z. B. durch arteriosklerotische Verengungen oder einen Embolus verschlossen. In den letzten Jahren war ein akuter Myokardinfarkt die **2. häufigste Todesursache** nach einer chronischen ischämischen Herzkrankheit. Jährlich versterben in Deutschland zwischen 60.000–70.000 Menschen an einem akuten Myokardinfarkt. Da es sich bei den Koronararterien um **funktionelle Endarterien** handelt, rutschen die Herzmuskelzellen bei einem Verschluss der Koronararterien zunächst in eine Sauerstoffschuld, die – falls der Verschluss nicht aufgehoben wird – bereits nach wenigen Minuten zum **irreversiblen Verlust von Herzgewebe** führt. Die Patienten schildern typischerweise einen **drückenden, retrosternalen Vernichtungsschmerz** und zeigen durch Stress ausgelöste vegetative Begleiterscheinungen wie **Blässe und Kältschweißigkeit**. Teilweise wird auch ein Brennen beschrieben. Abhängig von der Lokalisation des Verschlusses strahlen die Schmerzen in den Kopfbereich (Vorderwand), in den Arm (Seitenwand) oder in den Bauch (Hinter-

wand) aus. Ein Myokardinfarkt kann durch eine Minderversorgung des Erregungsbildungs- und Erregungsleitungssystem **lebensbedrohliche Herzrhythmusstörungen** hervorrufen. Diese Gefahr besteht insb. bei einem Verschluss der rechten Koronararterie. Durch die Brustwandableitungen nach Wilson lässt sich schon vor der Herzkatheteruntersuchung die Lokalisation des Verschlusses abschätzen. So weisen z. B. **ST-Strecken-Hebungen** als typische Zeichen einer Durchblutungsstörung in den Ableitungen V5, V6 auf einen Verschluss des R. circumflexus der A. coronaria sinistra oder ihres R. marginalis hin. Die Diagnose Myokardinfarkt stellt man mittels der Trias aus **Klinik** (Beschwerdesymptomatik des Patienten), **EKG-Veränderungen** (ST-Strecken-Hebungen) und **Labor** (erhöhte Troponinwerte). Bei Diabetikern kann infolge der diabetischen Polyneuropathie die Schmerzsymptomatik fehlen. Therapeutisch geht man wie folgt vor: strikte Immobilisation des Patienten, 30°-Oberkörperhochlage, Sauerstoffgabe, Schmerzmedikation, ggf. präklinische Lyse, Dilatation und Stenteinsatz im Herzkatheter.

Die Koronararterien sind bei jedem Menschen individuell ausgeprägt. Abhängig von der Ausprägung der Koronararterien unterscheidet man 3 Versorgungstypen:

- **Linksversorgungstyp:** Der R. interventricularis posterior entspringt aus dem R. circumflexus der A. coronaria sinistra.
- **Ausgeglichener Versorgungstyp:** Der R. interventricularis posterior geht aus der A. coronaria dextra hervor. Die A. coronaria sinistra stellt einen R. posterior ventriculi sinistrii.
- **Rechtsversorgungstyp:** Die A. coronaria dextra gibt einen sehr kräftigen R. interventricularis posterior ab. Aus der A. coronaria sinistra entspringt nur ein zarter R. posterior ventriculi sinistrii.

#### MERKE

Die Koronarien werden während der Diastole perfundiert.

### 1.4.2 Koronarvenen

Das venöse System des Herzens verläuft in enger Beziehung zu den Koronararterien. Dabei sammelt die **V. cardiaca magna** das Blut aus dem Stromgebiet der A. coronaria sinistra, die **V. cardiaca media** das venöse Blut aus dem Bereich des R. interventricularis posterior und die **V. cardiaca parva** aus dem Teil des rechten Ventrikels. So sammeln sich  $\frac{2}{3}$  des venösen Abflusses im **Sinus coronarius** an der Herzhinterwand. Der Rest fließt über das transmurale und endomurale System direkt in die Herzhöhle zurück. Zum **transmuralem System** zählt man die Vv. ventriculi dextri anteriores und die Vv. arteriales. Die Vv. cardiae minimae (Thebesius-Venen) bilden das **endomurale System** und münden in den rechten Vorhof.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.5 Herzklappen

Christoph Jaschinski



Die Herzklappen fungieren als Ventile und führen zu einem gerichteten Blutstrom. Das Herz besitzt 2 verschiedene Klappentypen, Segelklappen und Taschenklappen.

**Segelklappen** werden wegen ihrer anatomischen Lage auch als **Atrioventrikularklappen** (Valvae atrioventriculares dextra et sinistra) bezeichnet. Sie schließen sich während der Systole durch die Kontraktion der Papillarmuskeln und dichten den Ventrikel in Richtung Vorhof ab. Über **Chordae tendinae** wird die Kraft der Papillarmuskeln auf die Segelklappen übertragen. In der Diastole öffnen sich die Segelklappen passiv durch die Druckunterschiede zwischen Vorhof und Kammer. Wenn sich die Segelklappen öffnen, entsteht beim Gesunden eine **Klappenöffnungsfläche** von ca. **4–6 cm<sup>2</sup>**. Die Valva atrioventricularis dextra besteht aus 3 Segeln. Man nennt sie daher auch Trikuspidalklappe (**Valva tricuspidalis**). In Anlehnung an die Form eines Bischofshuts nennt man die 2-teilige Valva atrioventricularis sinistra auch Mitralklappe (**Valva mitralis**).

**Taschenklappen** finden sich in den ventrikulären Ausflusstrakten als **Valva trunci pulmonalis** im Truncus pulmonalis und als **Valva aortae** in der Aorta. Sie bestehen jeweils aus 3 Klappen (**Valvulae semilunares**). Ihre Spitzen sind zu Knötchen verdickt, **Noduli valvarum semilunarium (Arrantii)**, welche die Taschenklappen während der Diastole verschließen. Distal der Klappen finden sich Aufweitungen (Sinus) in der Gefäßwand: Den Sinus aortae nennt man auch Bulbus aortae. In diesem Bereich zweigen die beiden Koronararterien ab. Entsprechend den Abgängen bezeichnet man die einzelnen Aortenklappen als: Valvula coronaria dextra, Valvula coronaria sinistra und Valvula noncoronaria. Bei der Pulmonalklappe heißen sie Valvulae semilunaris anterior, dexter et sinister. Die Pulmonalklappe liegt an der Grenze zwischen Conus arteriosus und Truncus pulmonalis. Die normale **Klappenöffnungsfläche** beträgt ca. **3 cm<sup>2</sup>**.

#### MERKE

Klappen sind Ausstülpungen des Endokards und frei von Blutgefäßen.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.6 Herzskelett

Christoph Jaschinski



Der Begriff Herzskelett bezeichnet das straffe, bindegewebige Gerüst des Herzens, das die Vorhöfe von den Kammern elektrisch isoliert. Zudem dient das Herzskelett als Verankerungspunkt für den Klappenapparat und bildet dadurch das Fundament der Ventilebene. In den beiden großen Ringen, **Anulus fibrosus dexter und Anulus fibrosus sinister**, liegen die Valvae atrioventriculares dexter et sinister. Das **Trigonum fibrosum dextrum** besitzt den Durchtrittspunkt des His-Bündels. Das schmale **Trigonum fibrosum sinistrum** verbindet den Anulus fibrosus sinister mit dem Aortenring. Über die Konussehne (**Tendo infundibuli**) hängt der Pulmonalisring am Anulus fibrosus sinister. Sowohl der Aorten- als auch der Pulmonalisring besitzen eine gezackte Struktur.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.7 Erregungsbildungs- und Erregungsleitungssystem

Christoph Jaschinski



Um einen gerichteten Auswurf zu erreichen, muss die Herzmuskelkontraktion koordiniert werden. Dies erreicht das Herz mittels modifizierter Herzmuskelzellen, die Aktionspotenziale generieren können (> Abb. 1.1). Der Taktgeber ist hierbei der subepikardial gelegene **Sinusknoten (Nodus sinuatrialis)**. Er liegt im Sulcus terminalis im Bereich der Mündung der V. cava superior und erzeugt die Ruhefrequenz von 60–80 Schlägen pro Minute. Nächster Erregungspunkt ist der **AV-Knoten (Nodus atrioventricularis, Aschoff-Tawara-Knoten)**. Er verzögert die Erregungsweiterleitung und gewährleistet, dass sich die Vorhöfe vor den Ventrikeln kontrahieren und sich die Ventrikel adäquat füllen können. Der AV-Knoten initialisiert einen Eigenrhythmus von 40–50 Schlägen pro Minute. Da diese Frequenz jedoch von der des Sinusknotens übertroffen wird, kommt seine Schrittmachertätigkeit im gesunden Herzen nicht zum Tragen.

#### MERKE

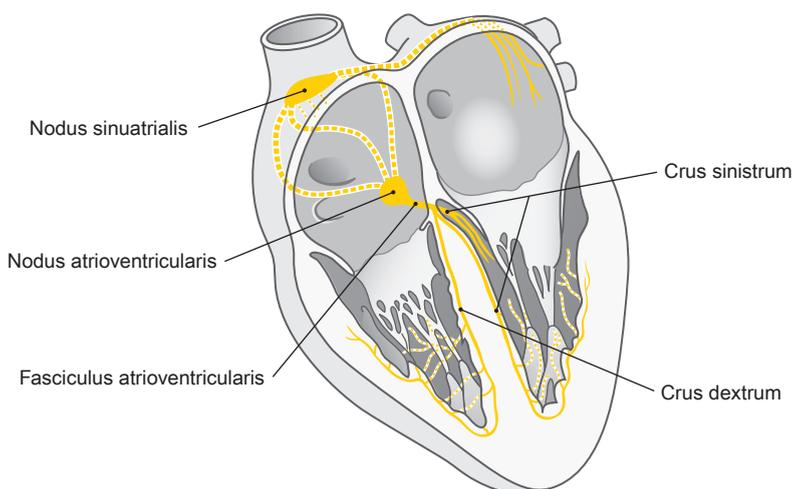
Der AV-Knoten liegt in der Basis des Vorhofseptums (Septum interatriale) im **Koch-Dreieck**.

Die Kanten des Koch-Dreiecks bilden die Mündung des Sinus coronarius, der Trikuspidalklappenrand und die Todaro-Sehne, eine sehnenartige Verbindung zwischen der Valvula venae cavae inferioris (Eustachii) und dem Trigonum fibrosum dextrum. Der AV-Knoten leitet die Erregung weiter zum His-Bündel.

#### MERKE

Das His-Bündel besteht aus einem Vorhofabschnitt und einem perforierenden Abschnitt.

Auch das **His-Bündel** kann eine Eigenfrequenz und kann 20–30 Schlägen pro Minute erzeugen. Es überbrückt die elektrische Isolation zwischen Vorhöfen und Kammern, indem es durch das Trigonum fibrosum dextrum hindurchtritt. In der Pars membranacea des Kammerseptums (Septum interventriculare) teilt sich das His-Bündel in die beiden Tawara-Schenkel auf. Die **Tawara-Schenkel (Crus dextrum und Crus sinistrum)** verzweigen sich zu den subendokardial gelegenen **Purkinjefasern**, die die Erregung auf die



**Abb. 1.1** Erregungsbildungs- und -leitungssystem des Herzens (K. Dalkowski aus Paulsen/Waschke. Sobotta Atlas der Anatomie. 25. A. 2022 © Elsevier GmbH) [S700-L126]

Herzmuskelzellen übertragen. Die ventrikuläre Erregungsausbreitung beginnt im apikalen Drittel des Septum interventriculare.

### MERKE

Über das Moderatorband ziehen Purkinjefasern zur Innervation des M. papillaris anterior nach ventral.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.8 Herzbeutel

Christoph Jaschinski

### Anatomie

Der **Herzbeutel (Perikard)** umschließt das Herz. Er hat ein Volumen von ca. 1000 ml und enthält stets 10–15 ml seröse Flüssigkeit, ein Ultrafiltrat des Blutes, als Gleitmittel. Das Perikard lässt sich in ein kol-

lagenfaserreiches **Pericardium fibrosum** und ein **Pericardium serosum** unterscheiden. Das Pericardium serosum lässt sich weiter in eine Lamina parietalis und eine Lamina visceralis differenzieren.

### MERKE

Die Lamina visceralis pericardii bildet das Epikard.

Durchtrittspunkte zur Brusthöhle bilden die Einmündungen der Vv. cavae superior und inferior und die Vv. pulmonales (Porta venosa). Austrittspunkte ergeben sich über den Truncus pulmonalis und die Aorta (Porta arteriosa), deren Anfangsteile noch von Perikard umhüllt sind. An den Durchtrittspunkten befinden sich die Umschlagfalten, an denen die Lamina visceralis pericardii in die Lamina parietalis pericardii übergeht. Dadurch entstehen 2 charakteristische Rinnen (> Abb. 1.2):

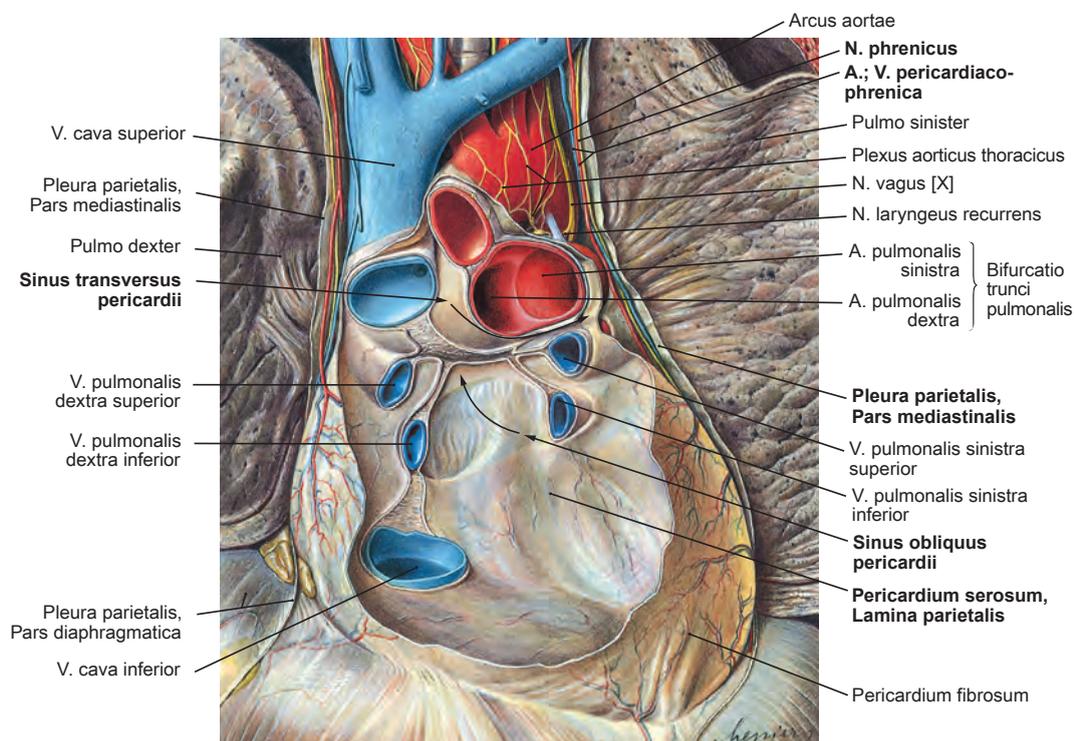
- **Sinus transversus pericardii:** trennt die Porta arteriosa von der Porta venosa.
- **Sinus obliquus pericardii:** liegt zwischen den zum Herz führenden Vv. pulmonales.

### KLINIK

**Herzbeutelamponade** Blut- oder Flüssigkeitsansammlung im Herzbeutel, welche die Pumpfunktion des Herzens lebensbedrohlich einschränken kann.

**Panzerherz (Pericarditis calcarea)** Verhärtung des Herzbeutels infolge einer Herzbeutelentzündung (**Perikarditis**).

Im Bereich des Centrum tendineum ist das Perikard fest mit dem Diaphragma verwachsen. Es bestehen über die **Membrana bronchopericardiaca** bindegewebige Verbindungen zur Luftröhre und über die **Ligg. sternopericardiaca** zum Sternum. In der Kontaktfläche zwischen Perikard und Pleura (pleuroperikardialer Spalt) verlaufen Nn. phrenici und Vasa pericardiaphrenica.



**Abb. 1.2** Anatomie des Herzbeutels und seiner epikardialen Umschlagfalten, Ansicht von ventral (Sobotta-Archiv aus Paulsen/Waschke. Sobotta Atlas der Anatomie. 25. A. 2022 © Elsevier GmbH) [S700]

**CHECK - UP**

- Beschreibe das Innenrelief der Herzhöhlen!
- Welche Koronararterie versorgt in der Regel den AV-Knoten?
- Wohin strahlt der Schmerz bei einem Vorder-/Seiten-/Hinterwandinfarkt aus? Welche Koronaräste sind betroffen?
- Nenne die Stationen des Erregungssystems!
- Was ist der Sinus transversus pericardii?

**Jetzt bist du dran!****Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

**1.9 Mikroskopischer Aufbau**

Henrik Holtmann

**1.9.1 Endokard**

Das Endokard ist die innere Wandschicht des Herzens. Es kleidet die Kammern und Vorhöfe der Herzhöhlen aus und bedeckt die Herzklappen, Sehnenfäden und Papillarmuskeln. Es besteht aus:

- Endothel
- Subendotheliale Bindegewebsschicht: liegt unter dem Endothel und besteht aus kollagenen und elastischen Fasern. Beide Schichten – Endothel und Bindegewebe – setzen sich in die Intima der Blutgefäße fort.
- Subendokardiale Bindegewebsschicht: liegt unter dem subendothelialen Bindegewebe und ist mit dem Myokard verbunden. Es enthält Blutgefäße, Nerven sowie Fasern des Reizleitungssystems.

**1.9.2 Myokard**

Das Myokard ist die mittlere und dickste Wandschicht des Herzens und besteht aus **zwei** Typen von Kardiomyozyten, die durch End-zu-End-Verbindungen an den Glanzstreifen zu einem **funktionellen Synzytium** verbunden sind:

- Die Kardiomyozyten, die der Kontraktion dienen und das **Arbeitsmyokard** bilden, machen den deutlich größeren Teil des Myokards aus.
- Zu einem kleinen Teil sind Kardiomyozyten vorhanden, die der Erregungsbildung und -leitung dienen.

Das Bindegewebe des Myokards steht mit dem Bindegewebe des Endo- und Epikards in Verbindung. Es wird als **Endomysium** bezeichnet und führt die zu den Kardiomyozyten parallel verlaufenden Kapillaren, die zahlenmäßig in etwa der Anzahl der Kardiomyozyten entsprechen.

**1.9.3 Epikard**

Das Epikard ist die Außenschicht des Herzens. Es besteht aus Mesothel, einer dünnen bindegewebigen Schicht sowie einer subepikardialen Fettschicht. Als viszerales Blatt überzieht es die Außenfläche des Herzens.

**1.9.4 Weitere Strukturen**

**Herzskelett** Platte aus straffem kollagenem Bindegewebe, die bis auf Ausnahmen wie die durchlaufenden akzessorischen Leitungsbahnen und das His-Bündel das Myokard der Atrien und Ventrikel vollständig voneinander trennt und damit elektrisch voneinander isoliert. Es ist darüber hinaus der Ursprung des Arbeitsmyokards. An vier verstärkten Faserringen innerhalb des Skeletts, den sog. **Anuli fibrosi**, sind die Herzklappen befestigt.

**Herzklappen** Sie sind vom Endothel überzogen und enthalten viel kollagenes Bindegewebe mit elastischen Fasern (Fibrillen), weshalb das Bindegewebe hier auch als **Fibrosa** bezeichnet wird. Die Herzklappen sind **gefäß- und muskelfrei**.

**Erregungsbildungssystem und -leitungssystem** Dieses System wird von **modifizierten** großen Kardiomyozyten gebildet. Die Zellen sind arm an Mitochondrien und Myofibrillen, dafür aber mit großen Energiereserven ausgestattet in Form von reichlich Glykogen. Dadurch sind sie bereits lichtmikroskopisch in Standardansichten von Zellen des Arbeitsmyokards zu unterscheiden. Sie können elektrische Impulse in Form von Erregungen autonom auslösen und weiterleiten. Auf diese Weise koordinieren sie das zeitlich und räumlich geordnete Kontraktionsspiel in den einzelnen Bereichen des Herzens.

**CHECK - UP**

- Aus welchen Schichten besteht das Endokard?
- Was unterscheidet kontraktile Kardiomyozyten und solche des Erregungsleitungssystems?

**Jetzt bist du dran!****Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

Franziska Breidt, Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski,  
Fabian Rengier

## Vorklinik Finale 18

# Blut und Immunsystem

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Fabian Bock, Björn Jacobi



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Blut und Blutplasma</b> .....	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>Thrombozyten, Hämostase und Fibrinolyse</b> ...	<b>15</b>
1.1	Knochenmark .....	1	3.1	Thrombozyten .....	15
1.2	Blutzellbildung .....	2	3.2	Hämostase .....	16
1.3	Blut .....	3	3.3	Fibrinolyse .....	18
1.4	Blutplasma .....	4			
<b>2</b>	<b>Erythrozyten, Hämoglobin und Sauerstofftransport</b> .....	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>Leukozyten und Immunsystem</b> .....	<b>21</b>
2.1	Erythrozyten .....	7	4.1	Immunsystem .....	21
2.2	Hämoglobin und Sauerstofftransport .....	11	4.2	Unspezifische Abwehrmechanismen .....	25
			4.3	Primäre lymphatische Organe .....	27
			4.4	Sekundäre lymphatische Organe .....	29
			4.5	Spezifische Abwehrmechanismen .....	33
				<b>Register</b> .....	<b>40</b>

# 1

## Blut und Blutplasma

### 1.1 Knochenmark

Henrik Holtmann

#### Histologie, Physiologie

Das Knochenmark füllt die inneren Hohlräume aller Knochen des menschlichen Körpers aus und steht über **Aa. nutriciae** mit dem Blutkreislauf in Verbindung. Das Grundgerüst des Knochenmarks ist aus Retikulumzellen aufgebaut, die in retikuläres Bindegewebe eingebettet sind. Bei den **Retikulumzellen** wird zwischen fibroblastischen und fettbeladenen Zellen unterschieden. In den weiten Räumen des hämatopoetisch aktiven **roten Knochenmarks** findet zwischen den **fibroblastischen Retikulumzellen**, eingebettet in das Stroma aus retikulärem Bindegewebe, die Hämatopoese statt. **Fettbeladene Retikulumzellen** dienen als Platzhalter und schaffen bei erhöhtem Bedarf an Blutzellen durch Abgabe des Speicherfetts Raum für die Hämatopoese. Sie dominieren im **gelben Mark**, das nicht in die Blutzellbildung involviert ist. Fettbeladene Retikulumzellen sind **keine** Adipozyten!

#### MERKE

**Phasen der Hämatopoese:** In den ersten 12 EW findet sie im Dottersackmesenchym statt (**mesoblastische Periode**). Ab der 8. EW wird die Blutzellbildung zunehmend in die Leber verlagert (**hepatische Periode**), ab der 16. EW findet sie parallel zur Leber auch in Milz und Thymus statt (hepatolineale Periode). Ab der 24. EW findet sie dann fast ausschließlich nur noch in Knochenmark und Milz statt (**lienomyelo-poetische Periode**) und schließlich nur noch im Knochenmark (**myelo-poetische Phase**; mit Ausnahme der T-Lymphozyten).

Die Verteilung von rotem und gelbem Mark ist altersabhängig verschieden. Beim Kind füllt das rote Mark alle Knochen aus, mit zunehmendem Alter nur noch bestimmte Knochen, z.B. Beckenkamm, Brustbein sowie proximaler Oberarm- und Oberschenkelknochen.

Weitere generelle Bestandteile des Knochenmarks sind **Sinus**. Dabei handelt es sich um Kapillaren mit Endothel vom diskontinuierlichen Typ mit bis zu 3 µm großen Fenstern. Die Kapillaren speisen sich aus den versorgenden Blutgefäßen und transportieren – im Fall des roten Knochenmarks – reife, neu gebildete Blutzellen wie auch die **Knochenmarkmakrophagen**, die durch Apoptose untergegangenen Blutvorläuferzellen phagozytieren und eine stimulierende Funktion bei der Erythropoese haben.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Blutzellbildung

Henrik Holtmann

### Histologie, Physiologie

Ursprung der Blutzellbildung ist die **hämatopoetische Stammzelle** des Knochenmarks. Diese multipotente, dem Endost anliegende Zelle hat lebenslang die Potenz, sich selbst zu erneuern und zu differenzieren. Allerdings hat sie selbst nur eine geringe mitotische Aktivität. Jedoch entwickeln sich aus ihr stärker mitotisch aktive **multipotente Progenitorzellen**, die lymphatische und myeloische Progenitorzellen hervorbringen.

**Lymphatische Progenitorzelle** Hieraus entwickeln sich T- und B-Lymphozyten. T-Lymphozyten wandern bereits auf einer frühen Entwicklungsstufe aus dem Knochenmark aus und in die **Thymusrinde** ein.

B-Lymphozyten hingegen bleiben im Knochenmark und reifen hier antigenunabhängig heran. Erst dann besiedeln sie die sekundären lymphatischen Organe. Da B-Lymphozyten bei Vögeln in der **Bursa fabricii** heranreifen, werden diese Zellen auch beim Menschen als B-Lymphozyten bezeichnet.

NK-Zellen scheinen sowohl im Knochenmark als auch im Thymus heranzureifen.

**Myeloische Progenitorzelle** Aus ihr gehen **Colony forming units** (CFU) hervor, und daraus entwickeln sich reife Erythrozyten, Granulozyten, Monozyten, Thrombozyten, aber auch Mastzellen.

**Steuerung der Blutzellbildung** Die Entwicklung der einzelnen Blutzellen steht unter dem Einfluss von **Zytokinen**. Jene, die Einfluss auf die CFU haben, werden auch als **Colony stimulating factors** (CSF) bezeichnet. Der Ursprung der Zytokine liegt überwiegend in den Retikulumzellen und den Knochenmarkmakrophagen. Die Stammzelle erhält darüber hinaus Überlebenssignale von nahe liegenden Osteoblasten.

**Erythropoetin**, das überwiegend aus der Niere stammt, wirkt außerdem stimulierend auf die Erythropoese (Bildung roter Blutkörperchen).

Die Thrombozytopoese wird durch das von Hepatozyten gebildete **Thrombopoetin** gefördert.

#### KLINIK

In Rahmen einer gesteigerten Hämatopoese, z. B. nach einer stärkeren Blutung, tauchen vermehrt **Retikulozyten**, die Vorläuferzellen der Erythrozyten (normal < 1 % aller zirkulierenden Erythrozyten) im peripheren Blut auf. Sie enthalten Reste von Polyribosomen (**Substantia granulofilamentosa**).

#### KLINIK

Als **reaktive Linksverschiebung** wird ein vermehrtes Auftreten stabkerniger Granulozyten im peripheren Blut bezeichnet, die auf einen erhöhten Bedarf an Phagozyten hindeutet und Ausdruck einer bakteriellen Infektion sein kann.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Blut

Fabian Rengier, Voraufgabe: Björn Jacobi

### Histologie, Physiologie

#### 1.3.1 Funktionen des Bluts

Das Blut erfüllt eine **Transportfunktion** für:

- O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>
- Nährstoffe und Abbauprodukte
- Wärme
- Hormone und andere Signalstoffe

Daneben hat das Blut weitere wichtige Aufgaben:

- **Homöostase:** Aufrechterhaltung des inneren Milieus mit Isonomie und Isotonie sowie Pufferfunktion mit Stabilisierung des pH-Werts
- **Reparaturfunktion:** Blutstillung und -gerinnung, Fibrinolyse, Einleitung der Wundheilung
- **Abwehrfunktion:** gegen Infektionen und körperfremde Substanzen.

#### 1.3.2 Blutvolumen

Das **Blutvolumen** macht beim erwachsenen Menschen ca. 7–8% des Körpergewichts aus. Das entspricht einem Blutvolumen von etwa 70 ml/kg KG beim Mann und 65 ml/kg KG bei der Frau. Absolut hat somit ein 70 kg schwerer Mann ein Blutvolumen von ca. 5 l. Bei Neugeborenen ist der Anteil des Bluts am Körpergewicht mit bis zu 100 ml/kg höher, im hohen Alter mit ca. 50 ml/kg niedriger. Das Blutvolumen kann mit dem Indikator-Verdünnungsverfahren gemessen werden.

#### KLINIK

**Normovolämie** bezeichnet das normale Blutvolumen. Ein pathologisch erhöhtes Blutvolumen, **Hypervolämie**, findet man z. B. bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Ein pathologisch vermindertes Blutvolumen, **Hypovolämie**, entsteht z. B. durch Blutverlust.

#### 1.3.3 Blutbestandteile

Das Blut besteht aus:

- **Blutzelle:** Erythrozyten, Leukozyten und Thrombozyten, Konzentrationen > Tab. 1.1
- **Blutplasma:** Wasser, Plasmaproteine, niedermolekulare Stoffe und Elektrolyte

Tab. 1.1 Blutzellen, Konzentrationen

Blutzellen	Durchschnittliche Konzentration [/ $\mu$ l Blut]	Normbereich [/ $\mu$ l Blut]
Erythrozyten	5 Mio.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ♀: 4,0–5,2 Mio.</li> <li>• ♂: 4,3–6,1 Mio.</li> </ul>
Leukozyten	7000	4000–10.000
Thrombozyten	250.000	150.000–440.000

#### CHECK - UP

- Welche Funktionen erfüllt das Blut?
- Wie groß ist das normale Blutvolumen und wie verändert es sich mit dem Alter?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.4 Blutplasma

Fabian Rengier, Voraufgabe: Björn Jacobi

### Histologie, Physiologie

Wasser macht zu ca. 90 % das Volumen des Blutplasmas aus. 10 % sind im Wasser gelöste Substanzen, dazu gehören:

- Plasmaproteine: 70 %
- Niedermolekulare Stoffe (Glucose, Harnstoff, Kreatinin): 20 %
- Elektrolyte: 10 %

#### MERKE

**Blutserum** Der flüssige Anteil des Bluts nach abgeschlossener Gerinnung. Blutserum ist im Gegensatz zum Blutplasma frei vom Plasmaprotein Fibrinogen.

### 1.4.1 Elektrolyte und niedermolekulare Stoffe

Glucose hat im Blut eine Konzentration von 3,6–6,1 mmol/l (= 65–110 mg/dl). > Tab. 1.2 fasst die wichtigsten Elektrolytkonzentrationen zusammen. Gemeinsam haben alle Elektrolyte eine **osmolare Konzentration** von ca. 290 mosmol/l. Dies entspricht einem **osmotischen Druck** von ca. 5700 mmHg (= 750 kPa) und der osmotischen Wirksamkeit einer 0,9-prozentigen Kochsalzlösung.

**Tab. 1.2** Wichtigste Elektrolytkonzentrationen im erwachsenen Blutplasma

Elektrolyt	Konzentration im Plasma [mmol/l]
Natrium	135–145
Kalium	3,5–5
Calcium (frei und gebunden)	2,1–2,7
Chlorid	95–110
Bicarbonat	21–26

### 1.4.2 Plasmaproteine

Die normale Proteinkonzentration beträgt 60–80 g/l Plasma. Der von den Plasmaproteinen erzeugte osmotische Druck heißt **kolloidosmotischer Druck** oder auch **onkotischer Druck**. Er beträgt ca. 25 mmHg (= 3,3 kPa), macht also weniger als 1 % des gesamten osmotischen Drucks des Plasmas aus. In den Kapillaren jedoch ist das Endothel gut durchlässig für Ionen, aber schlecht durchlässig für Proteine. Dadurch ist hier der kolloidosmotische Druck für die Wasserretention entscheidend. Daneben erfüllen die Plasmaproteine weitere Funktionen wie den Transport wasserunlöslicher Stoffe, die Blutgerinnung, die humorale Immunabwehr und die Blutpufferung.

Es gibt mehr als 1000 verschiedene Plasmaproteine. Sie werden in **fünf Fraktionen** eingeteilt (> Tab. 1.3): Albumin sowie  $\alpha_1$ -,  $\alpha_2$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Globuline. Die Serumelektrophorese liefert **fünf Banden**, wobei jede Bande einer **Proteinfraktion** entspricht. Wertet man die Banden fotometrisch aus, kann man die Menge der Proteinfraktion relativ zu einem Referenzwert bestimmen. Die großen, negativ geladenen Albumine wandern bei der Gelelektrophorese in Richtung Pluspol (> Abb. 1.1).

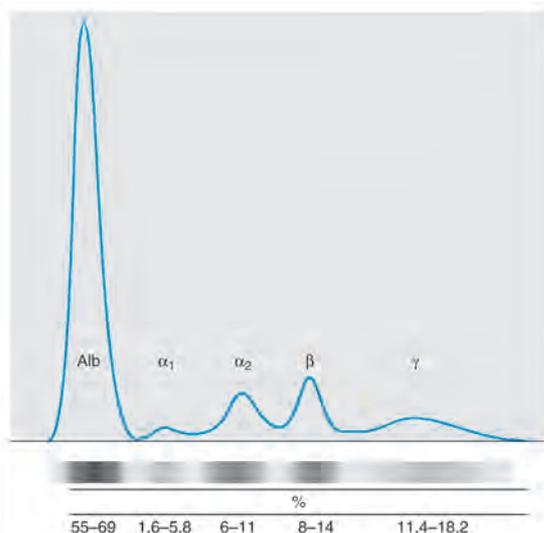
#### KLINIK

**Hypoproteinämie** Bezeichnet eine verminderte Plasmaproteinkonzentration. Die häufigste Form ist die Hypalbuminämie. Der durch die verminderte Proteinkonzentration verursachte Abfall des kolloidosmotischen Drucks führt zu einer erhöhten Plasmafiltration und somit zu interstitiellen Ödemen, Hypovolämie und Blutdruckabfall.

**Albuminfraktion** **Albumin** ist mit einer Konzentration von 30–50 g/l die größte Plasmaproteinfraktion. Gleichzeitig macht es ca. 80 % des kolloidosmotischen Drucks aus. Es transportiert apolare Substanzen wie **Fettsäuren** und **Bilirubin** sowie viele Medikamente. Albumin wird ausschließlich in der Leber synthetisiert, ist aber kein Glykoprotein und wird deshalb nicht über Glykoproteinrezeptoren in der Leber abgebaut.

**Tab. 1.3** Fraktionen der Plasmaproteine mit wichtigen Vertretern sowie deren Funktion

Fraktion	Konzentration [g/l]	Anteil an Plasmaproteinen [%]	Wichtige Vertreter	Funktion
Albumin	30–50	60	Präalbumin Albumin	Thyroxinbindung Kolloidosmotischer Druck, Stofftransport (u. a. Calcium, Fettsäuren, Bilirubin), Reserveeiweiß
$\alpha_1$ -Globuline	7–12	4	$\alpha_1$ -Lipoprotein (HDL) Transcortin	Lipidtransport Glukokortikoid-Transport
$\alpha_2$ -Globuline	3–6	8	$\alpha_2$ -Makroglobulin $\alpha_2$ -Haptoglobin $\alpha_2$ -Antithrombin Coeruloplasmin	Proteinasehemmung Hämoglobintransport Thrombinhemmung Kupfertransport
$\beta$ -Globuline	7–15	12	Transferrin $\beta$ -Lipoprotein (LDL) Fibrinogen	Eisentransport Lipidtransport Blutgerinnung
$\gamma$ -Globuline	7–17	16	IgA IgD IgE IgG IgM	Antikörper, Schleimhäute Antikörper, B-Zell-Aktivierung Antikörper, Allergien, Parasitenabwehr Antikörper, späte Reaktion Antikörper, frühe Reaktion



**Abb. 1.1** Serumelektrophorese; Alb: Albuminfraktion und  $\alpha_1$ - $\gamma$ -Fraktionen mit relativen Anteilen in Prozent) [O523]

Auf der Höhe des **Albumins** läuft im Gel zu einem geringen Teil auch **Präalbumin**. Präalbumin wird auch als **Transthyretin** bezeichnet und transportiert Thyroxin.

#### KLINIK

Da Albumin in der Leber synthetisiert wird, ist die Albuminkonzentration im Plasma ein Indikator für die Syntheseleistung und den **Funktionszustand der Leber**. Bei einer **Leberzirrhose** vermindert sich deshalb die Albuminkonzentration.

Aufgrund seines Molekulargewichts von 69 kD und seiner negativen Ladung kann Albumin nicht die glomeruläre Filtrationsbarriere in den Nieren passieren. Kommt es beim **nephrotischen Syndrom** oder bei **diabetischen Spätschäden** der Niere zu Durchlässigkeit des Filters, kann Albumin im Urin ausgeschieden und diagnostiziert werden. Es kommt zur **Albuminurie**.

**$\alpha_1$ -Globuline** Bei den  $\alpha_1$ -Globulinen spielt das  $\alpha_1$ -Antitrypsin mengenmäßig die größte Rolle.  $\alpha_1$ -Antitrypsin ist ein **Serinprotease-Inhibitor** und hemmt die im Blut und an Entzündungsorten vorkommenden Serinproteasen. Ein Mangel an  $\alpha_1$ -Antitrypsin zeigt sich in einer schwächeren Bande in der Serumelektrophorese. Beim  $\alpha_1$ -Antitrypsin-Mangel kommt es zum Abbau von gesundem Gewebe, v. a. in der Lunge und Leber. Die Folge ist ein **Lungenemphysem** bzw. eine **Leberzirrhose**.

#### KLINIK

Substanzen im **Tabakrauch** können **Methionin** im aktiven Zentrum des  $\alpha_1$ -Antitrypsins oxidieren. Damit ist die Bindung der Protease **Elastase** im Lungengewebe an  $\alpha_1$ -Antitrypsin gehemmt. Elastase kann ungehindert Lungengewebe abbauen und es kommt zum Lungenemphysem.

**$\alpha_2$ -Globuline** Zu den  $\alpha_2$ -Globulinen gehören  $\alpha_2$ -Makroglobulin, **Haptoglobin** und Antithrombin. Haptoglobin bindet freies Hämoglobin im Blut und verhindert so den Verlust von Eisen bei Hämolyse. Antithrombin hemmt den Blutgerinnungsfaktor Thrombin.

**$\beta$ -Globuline** Die wichtigsten Vertreter sind Transferrin, **Fibrinogen** und die **Lipoproteine** LDL und VLDL. Fibrinogen ist nur Bestandteil des Blutplasmas, nicht des Blutserums.

**$\gamma$ -Globuline**  $\gamma$ -Globuline sind die Immunglobuline. Als eine der wenigen Ausnahmen werden sie nicht in der Leber, sondern in Plasmazellen gebildet. Den Hauptanteil stellt das IgG.

#### KLINIK

Das **Plasmozytom** ist ein bösartiger Tumor der Plasmazellen, bei dem es zur krankhaft erhöhten Bildung von Immunglobulinen wie IgG kommt. In der Elektrophorese ist dann ein großer Ausschlag im Bereich der  $\gamma$ -Globuline zu sehen.

### 1.4.3 Akute-Phase-Proteine

Während eines Entzündungsprozesses kommt es zum Anstieg von Akute-Phase-Proteinen im Plasma, darunter **Fibrinogen**, **C-reaktives Protein**, Haptoglobin und  $\alpha_1$ -Antitrypsin.

Produziert die Leber vermehrt Akute-Phase-Proteine, geht das auf Kosten anderer Proteine. Proteine, deren Konzentration bei der akuten Entzündungsantwort im Plasma sinken, nennt man negative Akute-Phase-Proteine oder **Anti-Akute-Phase-Proteine**. Die wichtigsten sind **Albumin** und **Transferrin**.

### 1.4.4 Leber und Plasmaproteine

Die Leber ist mit einem speziellen Abbaumechanismus für Glykoproteine ausgerüstet. Es sind die Zuckerketten der Glykoproteine, die endständig mit dem Zucker N-Acetyl-Neuraminsäure, der **Sialinsäure**, verknüpft sind. Kommt es mit zunehmender Alterung der Plasmaproteine zur Abspaltung der Sialinsäuren, wird die in der Zuckerkette folgende Galaktose freigelegt. Die Leber besitzt **Asialoglykoprotein-Rezeptoren**, die die sialinsäurefreien Glykoproteine erkennen. So wird sichergestellt, dass gealterte Plasmaglykoproteine rasch erkannt und abgebaut werden.

#### MERKE

Mit Ausnahme von Albumin sind fast alle Plasmaproteine **Glykoproteine** mit endständigen Sialinsäuren, die in der Leber abgebaut werden.

#### CHECK - UP

- Welche Konzentrationen haben Natrium, Kalium, Calcium, Chlorid und Bicarbonat im Blutplasma?
- Welche ungefähren prozentualen Anteile an der Plasmaproteinkonzentration haben die einzelnen Plasmaproteinfraktionen?
- Was ist der kolloidosmotische Druck und welche Funktion erfüllt er?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

# 2

## Erythrozyten, Hämoglobin und Sauerstofftransport

### 2.1 Erythrozyten

Fabian Rengier, Voraufgabe: Björn Jacobi



#### 2.1.1 Lebenszyklus der Erythrozyten

##### Erythropoese

Erythrozyten entwickeln sich wie alle Blutzellen aus den **multi-potenten hämatopoetischen Stammzellen**, die sich beim Erwachsenen im roten Knochenmark befinden. Aus diesen undeterminierten Stammzellen entstehen schließlich spezialisierte Vorläuferzellen der einzelnen Blutzellen. Diese werden auch als **Colony forming units (CFU)** bezeichnet.

Die Entwicklung der erythroiden Vorläuferzelle (CFU-E, > Abb. 2.1) wird durch **Erythropoetin (EPO)** reguliert. EPO verstärkt zunächst die Proliferation und Differenzierung, anschließend steigert es die Hämoglobinbildung. Proliferation und Differenzierung sind abhängig von Cobalamin (Vitamin B<sub>12</sub>) und Folsäure, die Hämoglobinbildung von Eisen.

Im letzten Entwicklungsschritt im Knochenmark wird der Kern ausgestoßen, und es entsteht der Retikulozyt. Dieser enthält noch Reste von Kernchromatin. Nachdem er in die Blutbahn ausgewandert ist, verliert der Retikulozyt innerhalb eines Tages Ribosomen und Mitochondrien und wird so zum reifen Erythrozyten.

EPO wird in der Nierenrinde von peritubulär gelegenen fibroblastenähnlichen Zellen produziert, vermehrt bei niedrigem Sauerstoffpartialdruck (Hypoxie). Hypoxie stabilisiert den Transkriptionsfaktor HIF-1α. Dieser induziert die EPO-Produktion.

##### MERKE

Das bei Hypoxie vermehrt in der Nierenrinde gebildete EPO kann die Erythropoese um das 5- bis 10fache steigern.

##### KLINIK

Erythropoetin kann bei bestimmten Anämien als Medikament eingesetzt werden. Außerdem kann Erythropoetin missbräuchlich als Dopingmittel zur Verbesserung der Sauerstofftransportkapazität und damit der Ausdauerleistungsfähigkeit verwendet werden. Als Nebenwirkung kann es durch die Erhöhung der Blutviskosität zu Blutgerinnseln und somit thromboembolischen Ereignissen wie Herzinfarkt oder Schlaganfall kommen.

##### Leben und Abbau

Die mittlere **Lebensdauer** eines Erythrozyten beträgt 120 Tage. Damit haben sie die **längste Verweildauer aller Blutzellen im Blutkreislauf**. Der Abbau erfolgt im mononukleären Phagozyten-System (MPS), vor allem in Milz und Knochenmark. Aufgrund ihrer geringeren Verformbarkeit können überalterte Erythrozyten die engen Schlitze der Milzsinus nicht mehr passieren und werden so herausgefiltriert. Das beim **Abbau** durch Makrophagen gewonnene Eisen wird im Blut, an Transferrin gebunden, transportiert und dem Knochenmark für die Neusynthese von Hämoglobin zugeführt. Das ebenfalls frei werdende unkonjugierte („indirekte“) Bilirubin wird im Blut, an Albumin gebunden, zur Leber transportiert.

##### KLINIK

**Pathologische Hämolyse** Neben der geschilderten physiologischen Hämolyse kann es durch frühzeitigen Abbau von Erythrozyten zu einer pathologischen Hämolyse kommen. Gründe hierfür sind u. a.:

- Zellmembrandefekte des Erythrozyten
- Hämoglobinopathien, z. B. Sichelzellanämie
- Enzymdefekte, z. B. Glucose-6-Phosphat-Dehydrogenase-Mangel
- Toxische oder andere, die Erythrozytenmembran schädigende Substanzen im Plasma, z. B. Toxine von bestimmten Streptokokken
- Mechanische Hindernisse, z. B. künstliche Herzklappen.

Das Plasmaprotein Haptoglobin bindet v. a. bei intravasaler Hämolyse, d. h. Hämolyse im Gefäßlumen, das frei werdende Hämoglobin.

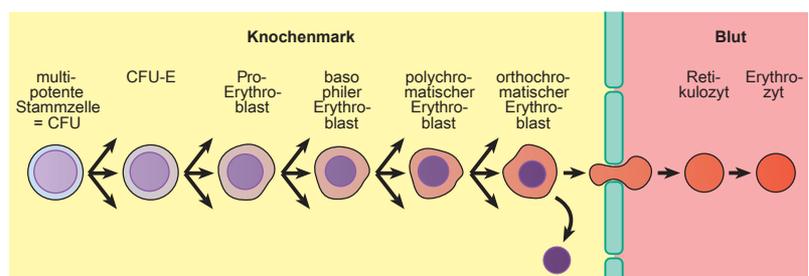


Abb. 2.1 Erythropoese im Knochenmark [L106]

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski, Fabian Rengier

## Vorklinik Finale 19

# Gastrointestinaltrakt

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Björn Jacobi



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Mundhöhle, Rachen, Speiseröhre</b> .....	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>Organe des Magen-Darm-Kanals</b> .....	<b>23</b>
1.1	Entwicklung .....	1	3.1	Magen .....	23
1.2	Mundhöhle .....	2	3.2	Dünndarm .....	28
1.3	Lippen und Wangen .....	3	3.3	Dickdarm .....	30
1.4	Schlundenge .....	3			
1.5	Zähne .....	4	<b>4</b>	<b>Leber, Gallenblase und Pankreas</b> .....	<b>35</b>
1.6	Zunge .....	5	4.1	Leber .....	35
1.7	Speicheldrüsen .....	6	4.2	Gallenblase .....	38
1.8	Rachen .....	8	4.3	Pankreas .....	40
1.9	Speiseröhre .....	10			
<b>2</b>	<b>Magen-Darm-Trakt</b> .....	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>Blutgefäße, Lymphgefäße, vegetative Innervation</b> .....	<b>45</b>
2.1	Entwicklung des Magen-Darm-Trakts .....	13	5.1	Arterien .....	45
2.2	Organe des Magen-Darm-Kanals .....	14	5.2	Venen .....	48
2.3	Peritoneum .....	15	5.3	Lymphknoten und Lymphgefäße .....	50
2.4	Angewandte und topografische Anatomie .....	16			
2.5	Motorik des Magen-Darm-Trakts .....	18			
2.6	Sekretion .....	18			
2.7	Vegetative Innervation der Bauch- und Beckeneingeweide .....	19			
2.8	Integrative Steuerung der Magen-Darm- Funktion .....	20			
				<b>Register</b> .....	<b>52</b>

# 1

## Mundhöhle, Rachen, Speiseröhre

### 1.1 Entwicklung

Christoph Jaschinski



#### 1.1.1 Zunge

Die Zunge entsteht gegen Ende der 4. EW am Boden des Schlunddarms aus 3 Zungenwülsten: dem **unpaaren medialen Zungenwulst** (Tuberculum impar) und den beiden **lateralen Zungenwülsten**. Alle 3 Zungenwülste formen sich aus Mesenchym des 1. Schlundbogens. Im Laufe der Entwicklung überwachsen die beiden lateralen Zungenwülste das Tuberculum impar. Die Grenze zwischen den lateralen Zungenwülsten bildet auf der Oberfläche der **Sulcus medianus** und in der Tiefe das bindegewebige **Septum linguae**.

#### MERKE

Aus den beiden lateralen Zungenwülsten entstehen die vorderen  $\frac{2}{3}$  der Zunge.

Das hintere Zungendrittel, die Zungenwurzel (**Radix linguae**), entwickelt sich aus der **Copula** und dem **hypobranchialen Wulst**. Die Copula entstammt dem Mesenchym des 2. Schlundbogens, der hypobranchiale Wulst dem Mesenchym des 3. und 4. Schlundbogens. Die Grenze zwischen Radix linguae und den vorderen  $\frac{2}{3}$  der Zunge bildet der V-förmige **Sulcus terminalis**. Die Muskelvorläuferzellen der Zungenmuskulatur entstammen den postotischen Somiten.

#### 1.1.2 Zähne

Gegen Ende der 5. EW dringt das Ektoderm der Mundbucht als halbkreisförmige Zahnleiste (**Lamina dentalis**) in das darunter gelegene Mesenchym des Ober- und Unterkiefers ein. Die Lamina dentalis formt eine vestibuläre und eine orale Aussprossung. Aus der vestibulären Aussprossung entwickeln sich die **20 Milchzähne (Dentes decidui)**, aus der oralen die 32 bleibenden Zähne (**Dentes permanentes**).

In der 8. EW entstehen 10 knotige Verdickungen pro Kiefer innerhalb der vestibulären Ausstülpungen, die **Zahnknospen**. Die Zahnknospe ist die erste Vorläuferstruktur des späteren Zahns. Im Laufe der Entwicklung wandelt sie sich über das Zwischenstadium der **Zahnkappe** zur **Zahnglocke**. Die Zahnglocke differenziert sich schließlich zum **Schmelzorgan**, das aus äußerem Schmelzepithel und innerem Schmelzepithel besteht. Zwischen den beiden Schmelzepithelschichten liegt ein Raum, der mit lockerem retikulärem Zellmaterial ausgefüllt ist, die **Schmelzpulpa**. Den Grenzbereich, in dem das innere Schmelzepithel in das äußere übergeht, bezeichnet

man als **epitheliale Wurzelscheide (Hertwig-Epithelscheide)**. Die Hertwig-Epithelscheide dringt immer weiter in die Tiefe des Kiefermesenchyms ein und determiniert die Gestalt der späteren Zahnwurzel. Das unterhalb jeder Zahnglocke gelegene Mesenchym bezeichnet man als **Zahnpapille**, das Mesenchym, welches den gesamten Komplex aus Zahnglocke und Zahnpapille umgibt, als **Zahnsäckchen** (> Tab. 1.1). In der 10. EW beginnt die Entwicklung der Dentes permanentes. Sie entwickeln sich prinzipiell genauso wie die Dentes decidui, nur über einen deutlich längeren Zeitraum.

#### MERKE

Als erster Milchzahn bricht im Alter von 6–8 Lebensmonaten der **untere mediale Schneidezahn** durch. Es folgen lateraler Schneidezahn, 1. Milchmolar und Eckzahn. Als letzter Milchzahn bricht im Alter von 2 Jahren der **2. Milchmolar** durch. Auch bei den restlichen Milchzähnen erscheinen die Zähne des Unterkiefers vor denen des Oberkiefers. Vom bleibenden Gebiss bricht im Alter von 6 Jahren als Erstes der obere 1. Molar durch („**Sechsjahrmolar**“). Es folgen medialer Schneidezahn, lateraler Schneidezahn, 1. Prämolare, Eckzahn, 2. Prämolare, 2. Molar, 3. Molar. Die treibende Kraft hinter dem Zahnwechsel ist das Wurzelwachstum der Vorläuferstrukturen der Dentes permanentes.

#### 1.1.3 Speicheldrüsen

##### Ohrspeicheldrüse

Die Ohrspeicheldrüse (**Glandula parotidea, Parotis**) entwickelt sich aus **Ektoderm** am kranialen Rand des 2. Schlundbogens.

##### Unterkieferspeicheldrüse

Die Unterkieferspeicheldrüse (**Glandula submandibularis**) entwickelt sich aus **Entoderm** beidseits der beiden lateralen Zungenwülste.

##### Unterzungenspeicheldrüse

Die Unterzungenspeicheldrüse (**Glandula sublingualis**) entwickelt sich aus **Entoderm** im Bereich der späteren Plica sublingualis.

Tab. 1.1 Strukturen der Zahnentwicklung und ihre Abkömmlinge

Vorläuferstruktur	Definitive Struktur
Inneres Schmelzepithel	Ameloblasten (Adamantoblasten, Schmelzbildner)
Zahnpapille	Odontoblasten (Dentinbildner)
Zahnsäckchen	Zement, Wurzelhaut (Sharpey-Fasern) und Alveolarknochen

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Mundhöhle

Christoph Jaschinski und Henrik Holtmann



### 1.2.1 Aufbau

Die Mundhöhle (**Cavitas oris**) gliedert sich in:

- **Mundvorhof** (Vestibulum oris): bezeichnet bei geschlossenem Mund den Raum zwischen Lippen und Wangen auf der einen Seite und Zähnen und Alveolarfortsätzen auf der anderen Seite. In das Vestibulum oris münden kleine Lippen- und Wangendrüsen (Gll. labiales et buccales) sowie der Ausführungsgang der Ohrspeicheldrüse (Ductus parotideus).
- „Echte“ **Mundhöhle** (Cavitas oris propria): bezeichnet den Raum innerhalb der Zahnbögen. Hier liegt die Zunge und münden die Ausführungsgänge der Unterkiefer- und Unterzungspeicheldrüse (Ductus submandibularis bzw. Ductus sublingualis).

Der Gaumen begrenzt die Cavitas oris nach kranial. Er besteht aus 2 Teilen:

- **Harter Gaumen** (Palatum durum): besteht von rostral nach okzipital aus Os incisivum, Processus palatini maxillae und Lamina horizontalis ossis palatini. Zwischen Os incisivum und den Processus palatini maxillae verläuft die **Sutura incisiva**.

Zwischen den Processus palatini maxillae und der Lamina horizontalis ossis palatini liegt die **Sutura palatina transversa**. Die **Sutura palatina mediana** unterteilt das Palatum durum in eine rechte und eine linke Seite. Die den harten Gaumen bedeckende Schleimhaut ist zu quer stehenden Falten (Plica palatinae transversae, Rugae palatinae) aufgeworfen.

- **Weicher Gaumen** (Palatum molle): schließt sich dem harten Gaumen okzipitalwärts an und formt das Gaumensegel (Velum palatinum) und das Zäpfchen (Uvula). Seine Schleimhaut ist mit Gaumendrüsen durchsetzt (Gll. palatinae). Die Grundlage des Palatum molle eine Bindegewebsplatte (Aponeurosis palatina), in die ein ausgeklügeltes muskuläres System (> Tab. 1.2) einstrahlt.

### 1.2.2 Mundschleimhaut

Die Oberfläche der Mundschleimhaut besteht aus unverhorntem mehrschichtigem Plattenepithel, welches an den Lippen in verhorntes mehrschichtiges Plattenepithel übergeht. An mechanisch beanspruchten Stellen wie dem harten Gaumen, Zahnfleisch und Zungenrücken ist das Epithel z. T. verhornt. Im Epithel lassen sich Melanozyten, Merkel- und Langerhans-Zellen finden. Unter dem Epithel befinden sich die Lamina propria mit Abwehrzellen, Meißner-Tastkörperchen sowie seromukösen und mukösen Drüsen.

#### KLINIK

Zigaretten- und Alkoholkonsum induzieren in der Mundhöhle, besonders an Lippe, Wange und Zunge, chromosomale Aberrationen in den untersten Lagen des Plattenepithels. Es entstehen **Präkanzerosen** (nichtinvasive Malignomvorstufen), z. B. die **Leukoplakie** (griech. derber weißer Fleck). Aus diesen Vorstufen können sich **invasive Plattenepithelkarzinome** entwickeln.

### 1.2.3 Regionale Besonderheiten der Mundschleimhaut

**Lippen** Sie sind innen bedeckt von unverhorntem Plattenepithel (**Pars mucosa**), welches nach außen in das verhornte Plattenepithel des Gesichts übergeht (**Pars cutanea**). Die Übergangzone liegt im Bereich des Lippenrots (**Pars intermedia**). Zunächst ist hier das Epithel **parakeratinisiert** und wird im Verlauf nach außen **orthokeratinisiert**. Die Lamina propria der Pars mucosa enthält seromuköse Drüsen (**Gll. labiales**), Fettzellen, Gefäße sowie Nervenzellen. Die Oberfläche Pars cutanea hingegen enthält

Tab. 1.2 Muskulatur des Gaumens

Muskel	Ursprung	Ansatz	Innervation	Funktion
<b>M. tensor veli palatini</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lamina medialis des Proc. pterygoideus ossis sphenoidalis</li> <li>Tuba auditiva</li> </ul>	Aponeurosis palatina	N. mandibularis (V <sub>3</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spannen des Velum palatinum</li> <li>Öffnung der Tuba auditiva</li> </ul>
<b>M. levator veli palatini</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pars petrosa ossis temporalis</li> <li>Tuba auditiva</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>N. glossopharyngeus (IX)</li> <li>N. vagus (X)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anheben des Velum palatinum</li> <li>Öffnung der Tuba auditiva</li> </ul>
<b>M. uvulae</b>	Aponeurosis palatina	Bindegewebe der Uvula	N. glossopharyngeus (IX)	Verkürzung der Uvula
<b>M. palatoglossus</b>		Radix linguae		<ul style="list-style-type: none"> <li>Verengung der Schlundenge</li> <li>Senken des Velum palatinum</li> </ul>
<b>M. palatopharyngeus</b>		Rachennaht (Rape pharyngis)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Senken des Velum palatinum</li> <li>Heben des Rachens</li> </ul>

Haarfollikel, Schweiß- und Talgdrüsen. Die Pars intermedia ist reich an Kapillaren und bis auf einzelne Talgdrüsen drüsenfrei.

### MERKE

**Parakeratinisiert** Epithel mit Merkmalen verhornten und unverhornten Plattenepithels. Die oberen Zellschichten tragen noch Kerne und Kernreste, das Str. granulosum ist sehr dünn.

**Orthokeratinisiert** Epithel, das lediglich Merkmale verhornten Plattenepithels trägt.

**Wangen** Unter ihrer Schleimhaut findet sich zusätzlich eine Submukosa mit kleinen Speicheldrüsen (**Gl. buccales**).

**Weicher Gaumen** Dieser trägt Schleimhaut mit unverhorntem mehrschichtigem Plattenepithel und mukösen Drüsen in der Submukosa. Diese Schleimhaut geht nasal in respiratorisches Epithel über.

**Harter Gaumen** Er trägt an seiner Oberfläche unverhorntes mehrschichtiges Plattenepithel. Das Epithel ist fest am Periost verwachsen. An den Stellen, wo die mechanische Beanspruchung höher ist, ist es orthokeratotisch verhornt.

**Zunge** Die Zungenwurzel enthält lymphatisches Gewebe (**Tonsilla lingualis**). Auf dem Zungenrücken finden sich in der Schleimhaut vier verschiedene Formen von Papillen:

1. **Papillae filiformes (Fadenpapillen)**: Vorkommen am gesamten Zungenrücken, häufigste Papillen. Schlank mit rachenwärts gerichteten Spitzen, die verhorntes Epithel tragen. Funktion: Mechanorezeptoren (Tastsinn), weshalb sich histologisch Tastrezeptoren und freie Nervenendigungen finden.
2. **Papillae fungiformes (Pilzpapillen)**: finden sich an Zungenspitze und Zungenrand. Form: niedrig und breit wie ein Pilz. Funktion: Thermo-, Mechano- und Geschmacksrezeptoren.
3. **Papillae foliatae (Blattpapillen)**: Vorkommen am Zungenrand. Bilden Schleimhautfalten, in denen Geschmacksknospen liegen.

**Papillae vallatae (Wallpapillen)**: sind mit einem Durchmesser von ca. 1–3 mm die größten aller Papillen. Vorkommen: 7–12 Papillen befinden sich im V-förmigen Sulcus terminalis. Sind von einem Graben umgeben, in den die Ausführungsgänge der serösen **Von-Ebner-Spüldrüsen** münden. Im seitlichen Epithel liegen Geschmacksknospen.

### CHECK-UP

Beschreibe Aufbau, Funktion und jeweilige Lage der Papillen auf der Zunge!

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Lippen und Wangen

Christoph Jaschinski



Die Lippen (**Labia**) werden durch den M. orbicularis oris hervorgerufen und sind jeweils über eine Schleimhautfalte – Oberlippenbändchen (Frenulum labii superioris) bzw. Unterlippenbändchen (Frenulum labii inferioris) – mit dem Zahnfleisch verbunden. Da den Lippen im Gegensatz zum übrigen Gesicht eine Hornhautschicht fehlt, schimmert die Farbe des darunter strömenden Blutes hindurch und führt zur charakteristischen Rotfärbung.

Die muskuläre Grundlage der Wangen (**Buccae**) bildet der M. buccinator, dem nach außen das Corpus adiposum buccae (Wangenfettprof, **Bichat-Fettpfropf**) aufliegt. Der Bichat-Fettpfropf füllt den Raum zwischen M. buccinator und M. masseter und ist bei Kindern besonders stark ausgeprägt („Pausbacken“).

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.4 Schlundenge

Christoph Jaschinski



Als **Schlundenge (Isthmus faucium)** bezeichnet man eine halbmondförmige Öffnung, die den **Übergang von der Mundhöhle zum Rachenraum** bildet. Kranial liegen das Velum palatinum und die Uvula, lateral der vordere (**Arcus palatoglossus**) und hintere Gaumenbogen (**Arcus palatopharyngeus**) und kaudal die Zunge. Zwischen Arcus palatoglossus und Arcus palatopharyngeus liegt die Tonsillarbuchse (**Fossa tonsillaris**). In der Fossa tonsillaris liegt auf beiden Seiten die Gaumenmandel (**Tonsilla palatina**). Die Oberfläche einer Tonsilla palatina ist durch zahlreiche Mandelgrübchen (Fossulae tonsillares) zerklüftet. In die Tiefe weiten sich die Fossulae tonsillares zu Mandelkrypten (Cryptae tonsillares). Dort sammelt sich bei entzündlichen Erkrankungen Detritus, der als weißliche Pünktchen auf der Oberfläche sichtbar wird.

### KLINIK

Die Gaumenmandeln liegen in einem gut durchbluteten Gewebe. Das größte Risiko bei der **Tonsillektomie** sind Nachblutungen aus Ästen der A. carotis externa.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.5 Zähne

Henrik Holtmann

### Histologie

Das menschliche Gebiss besteht aus Frontzähnen, die die Schneide- (**Dentes incisivi**) und Eckzähne (**Dentes canini**) umfassen, sowie aus Seitenzähnen, zu denen die Vormahl- (**Dentes premolares**) und die Mahlzähne (**Dentes molares**) gerechnet werden.

### 1.5.1 Allgemeiner Zahnaufbau

Jeder Zahn besteht aus folgenden Anteilen:

- **Corona dentis** (Krone): sichtbarer, aus dem Zahnfleisch herausragender Teil des Zahns; von Zahnschmelz überzogen.
- **Collum dentis** (Hals): liegt oberhalb des knöchernen Zahnfachs (Zahnalveole, Alveolus dentis) und ist von Gingiva (Zahnfleisch) überzogen.
- **Radix dentis** (Wurzel): liegt in der Zahnalveole, ist von Zement überzogen und wird durch Desmodontium (Periodontium) im Alveolarknochen fixiert. Front- und Vormahlzähne haben in der Regel eine Wurzel, Mahlzähne zwei bis drei.

#### MERKE

Gingiva, Zement, Desmodontium und der dem Zahn zugewandte Knochen werden gemeinsam als **Parodontium** (Zahnhalteapparat) bezeichnet.

### 1.5.2 Zahnschmelz

Der an den Zahnhöckern bis zu 2,5 mm dicke **Amelium** (**Enamelum**, Zahnschmelz) setzt sich aus ca. 5 µm dicken, säulenförmigen Schmelzprismen und dazwischenliegendem interprismatischem Schmelz zusammen. Insgesamt besteht Schmelz zu über 95 Gew.-% aus Hydroxylapatitkristallen und ist die härteste Substanz des menschlichen Körpers. Schmelzbildung:

1. Dem Schmelz aufliegende und vor ihm zurückweichende **Ameloblasten** (Adamantoblasten) stellen Schmelzmatrixproteine, z. B. Amelogenin, Ca<sup>2+</sup> und Phosphat, bereit.
2. In Richtung auf die Schmelzfront bilden die Ameloblasten den keilförmigen **Tomes-Fortsatz**, der vor der Mineralisation zurückgezogen wird.

3. Interprismatischer Schmelz wird als Leitstruktur mineralisiert, dann wird das Schmelzprisma verlängert.
4. Schmelz wächst von der Schmelz-Dentin-Grenze (der ehem. Membrana preformativa) aus in Richtung der später freien Zahnoberfläche. Am reifen Zahn ist er max. 2,3 mm dick.
5. Bei Zahndurchbruch gehen die Ameloblasten unter. Reifer Schmelz ist daher zellfrei und nicht regenerationsfähig.

#### MERKE

Der regelmäßige Verlauf der Schmelzprismen ist im Zahnschliff an der **Hunter-Schreger-Streifung** erkennbar. Diese Streifen verlaufen orthogonal zur Schmelz-Dentin-Grenze. Durch rhythmisches Wachstum entstehen außerdem parallel zur Schmelz-Dentin-Grenze und zur freien Zahnoberfläche sog. **Retzius-Streifen**.

### 1.5.3 Dentin (Zahnbein)

Dentin bildet sich im Zentrum des Zahns und wächst lebenslang von der Schmelz-Dentin-Grenze in Richtung Pulpa (**Zahnmark**). Dentin ist bis zu 5 mm dick und besteht (in Gew.-%) aus Hydroxylapatit (70%), organischer Matrix (20%, v. a. Kollagen Typ I) und Wasser (10%). Es wird von **Odontoblasten** bereitgestellt, die sich wie auch die Ameloblasten vor der Mineralisation zurückziehen und deren Perikaryen an der Dentin-Pulpa-Grenze zu liegen kommen. Von ihnen geht ein Fortsatz (**Tomes-Faser**) aus, der in einem Dentinkanälchen liegt und bis an den Schmelz heranreicht.

- **Manteldentin**: geringer mineralisiertes Dentin, das direkt unter dem Schmelz liegt und bei der Zahnentwicklung zuerst entsteht
- **Prärdentin**: das zuletzt gebildete, noch nicht mineralisierte Dentin
- **Zirkumpulpaes Dentin**: voluminösester Teil des Dentins; liegt zwischen Mantel- und Prärdentin
- **Peritubuläres Dentin**: die Dentintubuli einschließendes Dentin; stark mineralisiert, geringer Kollagenanteil
- **Intertubuläres Dentin**: füllt die Räume zwischen dem peritubulären Dentin aus; geringer mineralisiert

Bis zum Abschluss des Wurzelwachstums gebildetes Dentin bezeichnet man als **Primärdentin**. Hiervon zu differenzieren ist:

- **Sekundärdentin**: lebenslang physiologisch nachgebildetes Dentin, das zu einer zunehmenden Pulpaatrophie führt
- **Tertiärdentin (reparatives oder Reizdentin)**: auf einen pathologischen Reiz hin gebildetes Dentin, z. B. infolge von Knirschen oder Beschleifen des Zahnes beim Zahnarzt; ohne reguläre histologische Dentincharakteristika wie das Primär- und Sekundärdentin mit seinen peri- und intertubulären Dentinbereichen

#### MERKE

Im Zahnschliff sind im Dentin physiologischerweise Wachstumslinien (**Von-Ebner-Linien**) sichtbar. Pathophysiologisch durch metabolische Störungen entstehende Wachstumslinien werden als **Owens-Linien** bezeichnet.

### 1.5.4 Zement

Am Zahnhals geht der Schmelz in den 0,1–0,5 mm dicken, desmal ossifizierenden Zement über, der in Aufbau, Gewebestruktur und Zusammensetzung dem Knochen gleicht. Zement besteht in Gew.-%

% zu 61 % aus Hydroxylapatit, zu 27 % aus organischer Matrix und zu 12 % aus Wasser. Er wird von **Zementoblasten** gebildet. Den Zement durchziehende Kollagenfasern, sog. **Sharpey-Fasern**, verbinden den Zement mit dem Desmodont.

### 1.5.5 Zahnpulpa

Die Pulpa, einschließlich der Wurzelkanäle, hat ein Grundgerüst aus retikulären Fasern und mesenchyalem Bindegewebe, in das Blut- und Lymphgefäße sowie ein Nervengeflecht, der **Raschkow-Plexus**, eingelagert sind. Vom Plexus reichen dendritische Axone in die Dentinkanälchen und übermitteln Schmerzsignale.

### 1.5.6 Desmodontium und Gingiva

Das 0,1–0,3 mm starke Desmodontium (Parodontium) aus straffem kollagenem Bindegewebe verbindet den Zahn über den Zement mit dem Alveolarknochen. Die Gingiva, die den Zahn im Halsbereich bedeckt, setzt sich aus einem verhornten Plattenepithel und einer kollagenfaserreichen Lamina propria zusammen. Über das **Saumepithel**, das zum Schmelz hin eine Basalmembran und Hemidesmosomen ausbildet, ist die Gingiva fest mit dem Zahn verbunden.

#### KLINIK

**Karies** bezeichnet die bakteriell und säurebedingte Zerstörung von Zahnhartsubstanzen bis zur Pulpa, **Parodontitis** die bakterielle Zerstörung des Saumepithels, eventuell mit anschließender Degeneration des gesamten Desmodontiums.

#### CHECK-UP

- Wodurch wird das Dentin im Kronenbereich, wodurch im Wurzelbereich bedeckt?
- Was bezeichnet Sekundär- was Tertiärdentin?

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.6 Zunge

Christoph Jaschinski



Die Zunge (**Lingua**) ist ein Muskelkörper zum Greifen, Zermahlen und Schlucken von Nahrung. Sie ist zudem bei der Erzeugung von Sprachlauten (**Artikulation**) von entscheidender Bedeutung. Die Zunge enthält lymphatisches Gewebe sowie Geschmacks- und Mechanorezeptoren. Beim Säugling erzeugt sie den notwendigen Unterdruck beim Saugen.

### 1.6.1 Makroskopischer Aufbau

Die Zunge besteht aus der feinen Zungenspitze (**Apex linguae**), dem mächtigen Zungenkörper (**Corpus linguae**) und dem breiten Zungenrund (**Radix linguae**). Im Radix linguae liegt reichlich lymphatisches Gewebe, das in seiner Gesamtheit als Zungenmandel (Tonsilla lingualis) bezeichnet wird. Über 3 Schleimhautfalten – die Plica glossoepiglottica mediana und die beiden Plicae glossoepiglotticae laterales – ist der Zungenrund mit dem Kehlkopf verbunden, wobei zwischen Plica glossoepiglottica mediana und einer Plica glossoepiglottica lateralis jeweils eine grubige Vertiefung (Vallecula epiglottica) liegt.

Die Zungenoberfläche nennt man Zungenrücken (**Dorsum linguae**), den Zungenrand bezeichnet man als Margo linguae und die Zungenunterseite als Facies inferior linguae. Auf dem Dorsum linguae formt der V-förmige **Sulcus terminalis** die Grenze zwischen Corpus linguae und Radix linguae. An der Spitze des Sulcus terminalis liegt das Foramen caecum, wo die Entwicklung der Schilddrüse beginnt. Unterhalb des Dorsum linguae liegt die Aponeurosis linguae, die als Ansatzstelle der äußeren und inneren Zungenmuskulatur (> Tab. 1.3 und > Tab. 1.4) fungiert. Der Sulcus medianus teilt die Zunge oberflächlich, das Septum linguae in der Tiefe in eine rechte und eine linke Seite. Über das Zungenbändchen (Frenulum linguae) ist die Facies inferior linguae mit dem Mundboden verbunden. Gelegentlich ziert eine prominente Schleimhautfalte (**Plica fimbriata**) die Facies inferior linguae. Sie ist das Relikt einer früheren Unterzunge.

#### MERKE

Die Zunge ist der einzige quer gestreifte Muskel, der sich **aktiv verlängern** kann („Zunge herausstrecken“).

Tab. 1.3 Äußere Zungenmuskulatur

Muskel	Ursprung	Ansatz	Innervation	Funktion
<b>M. genioglossus</b>	Spina mentalis superior mandibulae	Aponeurosis linguae	N. hypoglossus (XII)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herausstrecken der Zunge</li> <li>• Senken des Apex linguae</li> </ul>
<b>M. hyoglossus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cornu majus ossis hyoidei</li> <li>• Corpus ossis hyoidei</li> </ul>	Aponeurosis linguae		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rückzug der herausgestreckten Zunge</li> <li>• Senken des Margo linguae</li> </ul>
<b>M. styloglossus</b>	Proc. styloideus ossis temporalis	Apex linguae		Bewegung der Zunge nach kraniookzipital

Tab. 1.4 Innere Zungenmuskulatur

Muskel	Ursprung	Ansatz	Innervation	Funktion
M. longitudinalis superior	Apex linguae	Radix linguae	N. hypoglossus (XII)	• Verkürzen und Verbreitern der Zunge
M. longitudinalis inferior				• Heben des Apex linguae
M. transversus linguae	Margo linguae	• Septum linguae • Aponeurosis linguae		• Verkürzung und Verbreitern der Zunge • Senken des Apex linguae
M. verticalis linguae	Dorsum linguae	Facies inferior linguae		Versmälern und Verlängern der Zunge
				Abflachen und Verlängern der Zunge

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

### MERKE

Der Ausführungsgang der Ohrspeicheldrüse (**Ductus parotideus**) zieht zunächst unterhalb des Jochbogens über den M. masseter, danach durchbohrt er den M. buccinator und mündet schließlich auf der Papilla ductus parotidei gegenüber des 2. oberen Molaren in das Vestibulum oris ein.

## 1.7 Speicheldrüsen

Christoph Jaschinski und Henrik Holtmann, Voraufgabe: Björn Jacobi

### Anatomie, Histologie, Physiologie

Bei den Speicheldrüsen unterscheidet man 3 große Speicheldrüsen (**Glandulae salivariae majores**).

#### 1.7.1 Ohrspeicheldrüse

Die rein seröse Ohrspeicheldrüse (**Gl. parotidea, Parotis**) produziert ca. 20 % des Ruhespeichels. Nach Stimulation durch mechanische Reize, z. B. Kauen, und/oder durch Geschmacksreize steigt der Anteil auf bis zu 35 % an.

Die Gl. parotidea gliedert sich in einen oberflächlichen (Pars superficialis) und einen tiefen Teil (Pars profunda). Die Pars superficialis liegt auf dem M. masseter, die Pars profunda ragt bis in die Fossa retromandibularis. Zwischen den beiden Partes spaltet sich die **A. carotis externa** in ihre beiden Endäste (A. maxillaris und A. temporalis superficialis) auf. Gleichzeitig teilt sich auch der **N. facialis (VII)** innerhalb der Ohrspeicheldrüse in seine Hauptäste auf (**Plexus intraparotideus**).

Rostral wird die Gl. parotidea vom M. masseter begrenzt, okzipital liegen äußerer Gehörgang (Meatus acusticus externus), Proc. styloideus ossis temporalis, Proc. mastoideus ossis temporalis sowie M. sternocleidomastoideus. Die kaudale Begrenzung bilden Corpus mandibulae und M. digastricus, kranial liegt der Arcus zygomaticus.

Die Ohrspeicheldrüse wiegt in etwa 20–30 g und ist von einer Bindegewebskapsel (Fascia parotidea) umgeben.

#### 1.7.2 Unterkieferspeicheldrüse

Die Unterkieferspeicheldrüse (**Gl. submandibularis**) produziert den größten Teil des Speichels: 65 % in Ruhe, 55 % nach Stimulation. Sie liegt im **Trigonum submandibulare** und wird vom M. digastricus kaudal eingerahmt. Oberhalb grenzen Corpus mandibulae und **M. mylohyoideus an sie an**.

Die Unterkieferspeicheldrüse wiegt ca. 10–15 g und ist eine gemischt seromuköse Drüse mit vorwiegend seröser Sekretion. Der Ausführungsgang der Gl. submandibularis (**Ductus submandibularis**) zieht zuerst haarnadelförmig um den Hinterrand des M. mylohyoideus, dann auf dem M. mylohyoideus nach rostral und mündet letztlich auf eine warzenförmige Erhebung der Mundschleimhaut, die Caruncula sublingualis, die lateral des Frenulum linguae liegt.

### MERKE

Die **A. facialis** – als Ast der A. carotis externa – durchzieht die Gl. submandibularis.

#### 1.7.3 Unterzungenspeicheldrüse

Die Unterzungenspeicheldrüse (**Gl. sublingualis**) produziert mit etwa 5 % nur einen verschwindend geringen Teil des Speichels. Sie liegt auf dem M. mylohyoideus und ruft eine Schleimhautfalte (**Plica sublingualis**) hervor. Die Gl. sublingualis ist eine gemischt seromuköse Drüse mit vorwiegend muköser Sekretion und wiegt ungefähr 5 g. Sie setzt sich aus vielen kleinen Einzeldrüsen zusammen, die auf verschiedene Ausführungsgänge münden: Der **Ductus sublingualis major** mündet gemeinsam mit dem Ductus submandibularis auf der Caruncula sublingualis, die **Ductus sublinguales minores** enden auf der Plica sublingualis.

#### 1.7.4 Kleine Speicheldrüsen

Neben den 3 großen Speicheldrüsen gibt es eine Vielzahl kleiner Speicheldrüsen (**Gll. salivariae minores**). Man unterscheidet:

- **Gll. labiales**
- **Gll. buccales**

- **Gll. palatinae**
- **Gll. linguales**

Die Glandulae salivariae minores produzieren allerdings nur 10% des Speichels, die für sich genommen nicht ausreichen, um den Mund zu befeuchten.

### 1.7.5 Feinstruktur

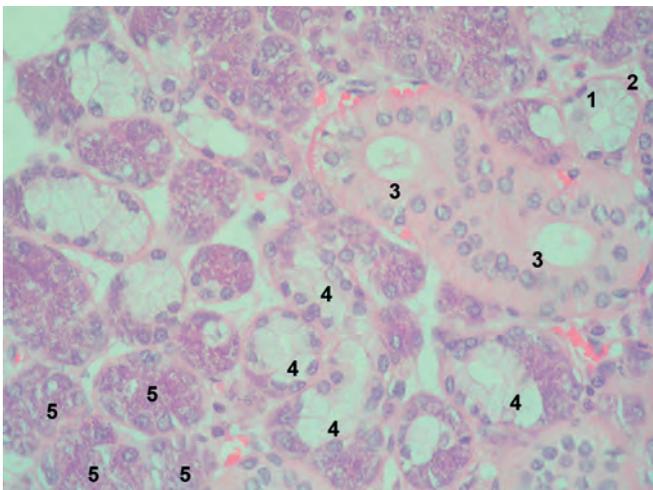
Die großen Speicheldrüsen sind von einer Kapsel umgeben, deren Fasern in das Innere ziehen und die Drüsen in Läppchen unterteilen.

**Drüsenendstücke** In den Läppchen befinden sich je nach Speicheldrüse muköse, seröse und/oder seromuköse Endstücke (> Abb. 1.1). Diese Endstücke enthalten an ihrer basalen Seite **Myoepithelzellen**.

**Ausführungsgangsystem** Das in den Endstücken produzierte Sekret drainiert zuerst in intralobulär gelegene **Schaltstücke**, von hier weiter in intralobulär gelegene **Streifenstücke** (Sekretrohr) und schließlich in den interlobulären **Ausführungsgang**. Dieser vereinigt sich mit weiteren Ausführungsgängen zum **Hauptausführungsgang**.

Die Schaltstücke bilden die kleinste und dünnste Einheit des Ausführungsgangsystems. Sie haben ein einschichtig flaches Epithel und enthalten ebenfalls Myoepithelzellen, die den Rückfluss des in den Endstücken gebildeten Sekrets verhindern sollen. Die **Streifenstücke** sind größer als die Schaltstücke und von einem einschichtig prismatischen Epithel ausgekleidet. Ihr Zytoplasma ist aufgrund des Reichtums an Mitochondrien, welche die **basale Streifung** der Streifenstücke bewirken, azido- bzw. eosinophil. Der in den Endstücken produzierte isotone Speichel wird in den Streifenstücken durch Rückresorption von  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Ionen ( $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase), aber nicht von Wasserionen, hypoton. Die zahlreichen Mitochondrien liefern die Energie für diesen Prozess.

Die interlobulär gelegenen Ausführungsgänge sind weitlumig und im Anfangsbereich aus einschichtig prismatischem Epithel aufgebaut, welches im weiteren Verlauf in ein zweischichtiges prismatisches Epithel übergeht. Die Hauptausführungsgänge sind durch zweischichtiges prismatisches Epithel gekennzeichnet.



**Abb. 1.1** Gl. submandibularis bei hoher Vergrößerung (H. E.): rein muköses Endstück (1), Myoepithelzelle (2), längs angeschnittenes Streifenstück (3), muköse Endstücke mit aufsitzenden Von-Ebner-Halbmonden (4), rein seröse Endstücke (5) [M652]

**Gl. parotidea** Diese große Speicheldrüse enthält ausschließlich **seröse Endstücke**. Im Anschnitt des Parenchyms finden sich mit zunehmendem Alter immer mehr Fettzellen.

**Gl. sublingualis** Diese Drüse weist v. a. muköse Endstücke auf. Nur selten finden sich hier Von-Ebner-Halbmonde und Anschnitte von Streifenstücken.

**Gl. submandibularis** Die Drüse enthält neben serösen Endstücken, die die Hauptmasse bilden, auch muköse Anteile, die meist von serösen Halbmonden gesäumt sind (> Abb. 1.1).

### CHECK-UP

- Was ist das ultrastrukturelle Korrelat der basalen Streifung der Sekretrohre?
- Rein seröse Endstücke weist welche Speicheldrüse auf?

### 1.7.6 Physiologie

**Funktion** Speichel dient der Verflüssigung und dem **Verdau** der in die Mundhöhle aufgenommenen Nahrung sowie der **Abwehr** von Mikroorganismen. Pro Tag werden etwa 0,5–1,5l Speichel in den großen und kleinen Speicheldrüsen gebildet.  $\text{H}_2\text{O}$  macht mit 99% den Hauptbestandteil des Speichels aus, der Rest wird eingenommen von den Elektrolyten  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  und  $\text{HCO}_3^-$  sowie Muzinen, IgA, Enzymen – z. B.  $\alpha$ -Amylase, Lysozym – und anderen Proteinen. Unter den großen Speicheldrüsen produziert die Gl. parotis vorwiegend dünnflüssigen (serösen) Speichel, die Gll. submandibularis und sublingualis produzieren dagegen schleimigen (seromukösen) Speichel, der sich durch einen höheren Anteil von Muzinen auszeichnet.

**Sekretion** In den Azini der Speicheldrüsen wird zunächst ein plasmaisotoner Primärspeichel sezerniert (295 mmol/l). Hierbei wird  $\text{Cl}^-$  über basolaterale NKCC-Transporter sekundär aktiv in die Azinuszellen aufgenommen. Der Auswärtsgradient für  $\text{Cl}^-$ -Ionen bewirkt dann eine apikale Diffusion ins Lumen.  $\text{Na}^+$  strömt passiv parazellulär nach,  $\text{H}_2\text{O}$  ebenfalls sowie durch Aquaporine der apikalen Zellmembran. Muzine werden aktiv durch Exozytose freigesetzt. Der Primärspeichel wird in den Streifenstücken durch aldosteronabhängigen  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Entzug zunehmend **hypoton** (50–100 mosmol/l).  $\text{K}^+$  sowie  $\text{HCO}_3^-$  werden dagegen ins Lumen der Ausführungsgänge sezerniert.

**Zusammensetzung** Die Zusammensetzung der Elektrolyte ändert sich in Abhängigkeit der Sekretionsrate des Speichels. **Steigt das Sekretionsvolumen**, so können die Ionentransportmechanismen in den Ausführungsgängen nicht mit der Flussrate mithalten. Dies führt zu einem Anstieg der Konzentrationen von  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  sowie zu einem Abfall der Konzentrationen von  $\text{K}^+$  und  $\text{HCO}_3^-$  (> Abb. 1.2). Der **pH-Wert** ist bei niedrigen Flussraten leicht sauer und erreicht bei maximaler Sekretion deutlich alkalische Werte (bis 7,8).

**Regulation** Die Speichelsekretion wird durch verschiedene Mechanismen kontrolliert.

- **Neurogene Reize:** Erwartung, Appetit → Speichelsekretion ↑.
- **Reflektorische Mechanismen:** Geruch, Geschmack, mechanische Reizung der Mundschleimhaut, Kauen → Speichelsekretion ↑.
- Im Sinne eines Schutzreflexes bewirkt **Säure** eine verstärkte Produktion dünnflüssigen Speichels.
- Innerhalb des vegetativen Nervensystems bewirken sowohl Parasympathikus als auch Sympathikus eine Steigerung der Speichelsekretion. Der **Parasympathikus** bedingt jedoch über

Nils Hebach, Isa Jauch, Thomas Wenisch, Michelle Xi

Vorklinik Finale 20

# Verdauung & Abbau von Nährstoffen

1. Auflage

**Unter Verwendung von Inhalten von:**

Fabian Bock, Björn Jacobi, Maximilian Pfau, Ludwig Schlemm



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ökologie, Energie- und Wärmehaushalt</b> . . . . .	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>Abbau der Kohlenhydrate</b> . . . . .	<b>23</b>
1.1	Ökologie . . . . .	1	3.1	Glykolyse . . . . .	23
1.2	Energiehaushalt . . . . .	3	3.2	Pentosephosphatweg . . . . .	27
1.3	Wärmehaushalt und Temperaturregulation . . . . .	5	3.3	Stoffwechsel anderer Monosaccharide . . . . .	29
1.4	Übersicht des Stoffwechsels . . . . .	9			
<b>2</b>	<b>Nahrungsaufnahme</b> . . . . .	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>Fettsäureabbau und Ketonkörperstoffwechsel</b> . . . . .	<b>33</b>
2.1	Ernährung . . . . .	13	4.1	Fettsäureabbau . . . . .	33
2.2	Prinzipien der Verdauung und Resorption . . . . .	14	4.2	Ketonkörperstoffwechsel . . . . .	37
2.3	Wasser und Elektrolyte . . . . .	14			
2.4	Kohlenhydrate . . . . .	15	<b>5</b>	<b>Aminosäurestoffwechsel und Harnstoffzyklus</b> . . . . .	<b>39</b>
2.5	Proteine . . . . .	17	5.1	Reaktionen der Aminosäuren . . . . .	39
2.6	Lipide . . . . .	19	5.2	Stoffwechsel ausgewählter Aminosäuren . . . . .	41
2.7	Aufnahme der Mineralstoffe, Spurenelemente und Vitamine . . . . .	20	5.3	Abbau von Aminosäuren . . . . .	43
2.8	Intestinale Bakterienflora . . . . .	21	5.4	Harnstoffzyklus . . . . .	44
				<b>Register</b> . . . . .	<b>47</b>

# 1

# Ökologie, Energie- und Wärmehaushalt

## 1.1 Ökologie

Thomas Wenisch



### 1.1.1 Stoffkreisläufe

Die Gesamtheit aller Organismen in einem Biotop (Biozönose) einschließlich der abiotischen Faktoren der Umgebung wie Rohstoff- und Energiequellen bilden ein **Ökosystem**.

Innerhalb eines Ökosystems stehen die einzelnen Lebensformen in gegenseitigen Wechselbeziehungen.

Die **abiotische Umwelt** stellt anorganische Grundstoffe und die Versorgung mit Primärenergie zur Verfügung.

**Produzenten** erzeugen aus anorganischen Stoffen organische Verbindungen. Sie sind **autotrophe** Organismen, Grundlage ihres Stoffwechsels ist meist die Fotosynthese. Produzenten sind alle Pflanzen und Algen.

**Konsumenten** sind **heterotrophe** Organismen. Sie sind von der Syntheseleistung der Produzenten abhängig:

- **Primärkonsumenten** sind alle Herbivoren (Pflanzenfresser). Sie ernähren sich von den Produzenten.
- **Sekundärkonsumenten** sind Carnivoren (Fleischfresser). Ihre Nahrungsquelle bilden die Primärkonsumenten.

**Destruenten** sind ebenfalls heterotrophe Organismen. Ihre Energiequelle sind organische Abfälle, die sie wieder in ihre anorganischen Grundstoffe zerlegen.

In jedem Ökosystem finden ständig Energie- und Stoffumwandlungen statt. Die chemischen Elemente befinden sich in einem Kreislauf, sie werden ständig recycelt.

#### KLINIK

Für jedes biologisch bedeutende Element, z. B. Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Mineralien und Spurenelemente, besteht ein **Stoffkreislauf**.

### 1.1.2 Nahrungskette

Im Stoffkreislauf eines Ökosystems wird Biomasse in mehreren Stufen aufgebaut. Es bildet sich eine **Nahrungskette**: (pflanzlicher) Produzent → (herbivorer) Primärkonsument → (carnivorer) Sekundärkonsument.

Die Nahrungskette kann sich noch weiter fortsetzen, mit ebenfalls carnivoren Tertiär- oder Quartärkonsumenten. Die Ernährungsstufen einer Nahrungskette werden auch **trophische Stufen** genannt.

Entlang der Nahrungskette findet ein Energiefluss statt. Beim Übergang von jeder Stufe auf die nächstfolgende wird Energie umgewandelt. Dabei wird der Energieinhalt der aufgenommenen Nah-

rung auf der jeweils nächsten trophischen Stufe nur zu etwa 10% wieder in Biomasse umgewandelt. Aufgrund der Energieverluste zwischen den trophischen Stufen haben Nahrungsketten nicht mehr als 4–5 Stufen.

Die Bilanz einer Nahrungskette lässt sich in Form einer ökologischen Pyramide darstellen. An der Basis der Pyramide stehen die Primärproduzenten und mit jeder weiteren Stufe verjüngt sich die Pyramide nach oben.

Die **Produktionseffizienz** eines Organismus ist das Verhältnis der in Biomasse umgesetzten Energie zur insgesamt assimilierten Energie. Sie ist abhängig vom Stoffwechseltyp, dem Verhältnis zwischen Körpermasse und Körperoberfläche sowie den Umgebungsbedingungen. So muss ein Kolibri im Verhältnis zu seiner Masse wesentlich mehr Nahrung aufnehmen als ein Elefant.

### 1.1.3 Populationsdynamik

Individuen der gleichen Spezies, die sich in einem gemeinsamen Lebensraum fortpflanzen bilden eine **Population**. Die Größe einer Population bleibt im zeitlichen Verlauf nicht konstant. Sie wächst durch Geburten oder Einwanderung weiterer Individuen in den gemeinsamen Lebensraum. Todesfälle oder Abwanderung reduzieren die Populationsgröße.

Die Populationsdichte wird durch verschiedene Faktoren begrenzt. **Dichteunabhängige Faktoren** sind externe Faktoren, die nicht von der Zahl der Individuen beeinflusst werden:

- Umweltbedingungen wie Klima und Bodenbeschaffenheit
- Konkurrenz mit fremden Spezies um Nahrung und Lebensraum
- Plötzlich auftretende Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, Vulkanausbrüche etc.

**Dichteabhängige Faktoren** werden durch den gegenwärtigen Zustand der Population bestimmt:

- Intraspezifische Konkurrenz um Nahrung und Lebensraum
- Sozialer Stress
- Parasitenbefall und Verbreitung von Infektionskrankheiten
- Vermehrung von spezifischen Fressfeinden durch erhöhtes Beuteangebot

Es entsteht ein **Regelkreis**, bei dem die dichtebegrenzenden Faktoren dem weiteren Anwachsen der Population immer stärker entgegenwirken. So stellt sich ein **dynamisches Gleichgewicht** zwischen wachstumsfördernden und wachstumshemmenden Einflüssen ein und die Populationsdichte ändert sich nur noch geringfügig.

### 1.1.4 Wechselbeziehungen zwischen artverschiedenen Organismen

In jedem Ökosystem leben die verschiedenen Arten nicht voneinander isoliert, sondern sie teilen sich den gemeinsamen Lebens-

raum und befinden sich untereinander in ständiger Wechselwirkung. Eine solche Lebensgemeinschaft wird als **Biozönose** bezeichnet.

Das Zusammenleben der Organismen kann unterschiedliche Formen annehmen:

**Konkurrenz** Konkurrenz ist der Wettbewerb um einen Faktor wie Nahrung oder Lebensraum.

**Symbiose** Symbiose bezeichnet das Zusammenleben zweier Arten mit gegenseitigem Nutzen. Sie haben sich durch lange Prozesse gegenseitiger Anpassung und Selektion entwickelt. Die Veränderung eines Symbiosepartners beeinflusst auch die Überlebenschancen des anderen.

**Kommensalismus** Kommensalismus bedeutet in etwa Mitesser. Der Kommensale erhält oder nimmt sich Nahrung von seinem Wirt, ohne diesem zu nutzen. Er schädigt den Wirt aber auch nicht.

**Parasitismus** Parasitismus ist die Nutzung eines Wirtsorganismus, bei der der Wirt geschädigt wird. Im Extremfall führt der Parasitenbefall zum Tod des Wirts. Ein Beispiel hierfür ist die lytische Vermehrung der Viren. Milben, Zecken, Flöhe und Läuse sind **Ektoparasiten**, sie leben auf der Oberfläche ihrer Wirte. **Endoparasiten** leben im Inneren des Wirtsorganismus, z. B. Würmer und Protozoen.

### CHECK - UP

- Wie ist eine Nahrungskette aufgebaut?
- Welche Faktoren begrenzen das Wachstum einer Population?
- Nenne vier Formen des Zusammenlebens verschiedener Organismen.

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.2 Energiehaushalt

Isa Jauch, Voraufflage: Ludwig Schlemm, Fabian Bock



### 1.2.1 Grundlagen

Die Einheit der Energie (Arbeit) ist Joule (J), Kalorie (cal) oder Wattsekunde (Ws). Eine Kalorie entspricht ungefähr 4,2 J oder 4,2 Ws. Häufig verwendet wird auch die Einheit Kilokalorie (1 kcal = 1000 cal). Ein gesunder Erwachsener verbraucht pro Stunde ca. 420 kJ. Die Energie wird im menschlichen Körper (insb. in Fettzellen) in Form von Triacylglyceriden gespeichert. Bei der Nutzbarmachung der gespeicherten Energie wird intermediär ATP gebildet. Die Phosphorylierung von ADP zu ATP geschieht vorrangig in den Mitochondrien. Dabei wird O<sub>2</sub> zu H<sub>2</sub>O reduziert.

### 1.2.2 Energieumsatz

Der gesamte Energieumsatz im menschlichen Körper setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen (> Tab. 1.1).

Der Körper verbraucht im Ruhezustand zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur, also zur Wärmeproduktion, und zur Aufrechterhaltung der basalen Stoffwechselfunktionen ständig Energie. Der **Grundumsatz** ist der benötigte Energiebedarf, um die Homöostase unter thermoneutralen Bedingungen, nach 12-stündiger Nahrungskarenz und bei vollkommener körperlicher und mentaler Ruhe aufrechtzuerhalten. Dieser beträgt bei Männern ca. 7000 kJ/d. Der **Ruheumsatz** beinhaltet außerdem die Energie, welche durch Verdauungstätigkeit und leichte Bewegung wie z. B. Gehen benötigt wird. Er beträgt etwa 8000 kJ/d. Ruhe- und Grundumsatz werden stark beeinflusst von

- Fettfreier Körpermasse: Umsatz ↑
- Zunehmendes Alter: Umsatz ↓
- Geschlecht, männlich: Umsatz ↑
- **Schilddrüsenhormonen**: Umsatz ↑

Der Anteil einzelner Organe am gesamten Ruheumsatz findet sich in > Tab. 1.2. Der Energieumsatz erhöht sich nicht nur bei körperlicher, sondern auch bei geistiger Arbeit. Allerdings wird dies auf eine gleichzeitige unbewusste Erhöhung der Muskelaktivität zurückgeführt.

Tab. 1.1 Komponenten des Energieumsatzes

	Anteil [%]	Kommentar
Ruheenergieverbrauch	50–75	Sichert Zell- und Organfunktion
Aktivitätsabhängiger Energieverbrauch	15–40	Abhängig vom Lebenswandel
Nahrungsinduzierte Thermogenese	bis zu 10	Abhängig von der Ernährung

Tab. 1.3 Stoffwechselkennwerte der Makronährstoffe

Substrat	Physikalischer Brennwert [kJ/g]	Physiologischer Brennwert [kJ/g]	Kalorisches Äquivalent [kJ/l O <sub>2</sub> ]	RQ	Anteil an Gesamtnahrung (Soll in %)
Kohlenhydrate	17	17	21	1,0	55
Fette	39	39	19	0,7	30
Proteine	23	17	19	0,8	15

Der **Gesamtenergieumsatz** des Körpers kann mithilfe zweier Methoden quantifiziert werden:

- **Direkte Kalorimetrie**: Die vom Körper abgegebene Wärme wird direkt bestimmt.
- **Indirekte Kalorimetrie**: Nach Bestimmung des O<sub>2</sub>-Verbrauchs kann unter Zuhilfenahme der kalorischen Äquivalente (s. u.), die für die Hauptnahrungsbestandteile fast identisch sind, der Energieverbrauch wie folgt angenähert werden:

$$\text{Energieverbrauch [kJ/h]} = 20,2 \times \text{O}_2\text{-Verbrauch [l/h]}$$

### 1.2.3 Energiequellen

Der menschliche Körper nimmt Energie in Form verschiedener Substrate zu sich. Diese lassen sich im Wesentlichen in vier große Gruppen einteilen: **Kohlenhydrate**, **Fette**, **Proteine** und **Alkohole** (Ethanol). Die Stoffgruppen besitzen einen unterschiedlichen physikalischen und physiologischen Brennwert (> Tab. 1.3).

**Brennwerte** Man unterscheidet zwischen dem physikalischen und dem physiologischen Brennwert. Der **physikalische Brennwert** ist der Energiegehalt, der in einem Nährstoff steckt, wenn er vollständig verbrannt wird. Der **physiologische Brennwert** hingegen ist der biologische Brennwert, also der Energiegehalt, der aus einem Nährstoff gewonnen wird, wenn er im lebenden Organismus verbrannt wird. Der physikalische und der physiologische Brennwert eines Nährstoffs sind identisch, wenn der Nährstoff im Körper vollständig verbrannt wird. Für Kohlenhydrate, Fette und Alkohol trifft das zu, denn sie können vollständig zu CO<sub>2</sub> und Wasser abgebaut werden. Der physiologische Brennwert spiegelt die brutto in der Zelle entstehende Energie wider und berücksichtigt nicht die zum Abbau nötige, vom Körper aufzubringende Energie.

#### MERKE

Bei Proteinen entspricht der physiologische nicht dem physikalischen Brennwert. Denn die Aminogruppe lässt sich nur in Form von toxischem Ammoniak energieaufwendig entsorgen. Das endgültige Abbauprodukt **Harnstoff** ist zwar noch energiehaltig, wird aber ausgeschieden. Proteine werden also nicht vollständig zu CO<sub>2</sub> und Wasser abgebaut. Aus diesem Grund liegt der physikalische Brennwert mit 23 kJ/g über dem physiologischen Brennwert von 17 kJ/g.

Tab. 1.2 Ruheenergieverbrauch einzelner Organe (Mittelwert von Männern und Frauen)

Organ	Beteiligung [%]
Muskel	23
Gehirn	23
Herz	10
Leber	21
Nieren	10
Fettgewebe	6

**KLINIK**

Rechenbeispiel: Ein Patient in der Adipositas-therapie soll sich fettfrei ernähren und täglich 130 g Proteine zu sich nehmen. Das ist eine sog. High-Protein-Ernährung. Er nimmt damit  $130 \text{ g} \times 17 \text{ kJ/g} = 2210 \text{ kJ}$  auf. Um auf seinen täglichen Grundumsatz von  $7100 \text{ kJ/g}$  zu kommen, muss er aber noch  $7100 \text{ kJ} - 2210 \text{ kJ} = 4890 \text{ kJ}$  an Kohlenhydraten aufnehmen.  $4890 \text{ kJ}$  entsprechen  $4890 \text{ kJ} \div 17 \text{ kJ/g} \approx 290 \text{ g}$  Kohlenhydraten, die er aufnehmen muss, um seinen basalen Energiebedarf zu decken. Interessanterweise konnte in einer Studie gezeigt werden, dass sich die Erfolge einer High-Protein-, einer Low-Carb- und einer Low-Fat-Diät kaum unterscheiden.

**Kalorisches Äquivalent und respiratorischer Quotient** Bei der Energiegewinnung aus Nahrungsbestandteilen wird  $\text{O}_2$  verbraucht, und es entsteht  $\text{CO}_2$ . Ohne  $\text{O}_2$ -Verbrauch können Makromoleküle dem nicht oxidativen Substratstoffwechsel zugeführt werden (Speicherung, Synthesen). Das **kalorische** (oder auch energetische) **Äquivalent** eines Nahrungsstoffs [ $\text{kJ/l O}_2$ ] beschreibt, wie viel Energie im Körper entsteht, wenn ein Liter Sauerstoff verbraucht wird und die jeweilige Stoffgruppe das einzige Substrat darstellt. Der **respiratorische Quotient** (RQ) ist definiert als  $\text{CO}_2$ -Produktion/ $\text{O}_2$ -Verbrauch. Die leichte Messbarkeit dieser Größen macht man sich bei der indirekten Kalorimetrie (> Kap. 1.2.2) zunutze. Aufgrund der Stöchiometrie des Abbaus der verschiedenen Stoffe unterscheiden sich die Werte in den einzelnen Stoffklassen (> Tab. 1.3). Ebenfalls unterschiedlich ist die für die Verwertung der Nahrungsbestandteile von dem Organismus aufzubringende Energie. Diese ist besonders hoch für Proteine, weshalb der Energieumsatz nach einer eiweißreichen Mahlzeit besonders stark zunimmt.

**Alkohol** Der Brennwert von Alkohol ist mit **30 kJ/g** sehr hoch und muss bei Diätplänen berücksichtigt werden.

**FOKUS**

**Alkoholabusus** Wird aufgrund eines hohen Alkoholkonsums und der damit verbundenen hohen Energiezufuhr nicht ausreichend Nahrung zugeführt, kann es zu einem Mangel an Vitamin  $\text{B}_1$  (Thiamin) kommen. Dieses wird als Co-Faktor im Stoffwechsel benötigt, bei einem Mangel kommt es zu einer Enzephalopathie und Amnesien (**Wernicke-Korsakow-Syndrom**).

**Parenterale Ernährung** Parenterale Ernährung ist eine Form der künstlichen Ernährung, bei der der Magen-Darm-Trakt umgangen wird. In der Regel werden flüssige Nahrungsbestandteile über eine Vene infundiert.

**KLINIK**

In der parenteralen Ernährung werden einzelne Aminosäuren zugeführt und keine Proteine. Die Infusion von Proteinen würde Antikörperbildung und immunologische Reaktionen auslösen.

**KLINIK**

Eine 5% Glukoselösung enthält 5 g Glukose pro 100 ml also 50 g Glukose pro Liter. Das heißt in einem Liter der Glukoselösung stecken  $50 \text{ g} \times 17 \text{ kJ/g} = 850 \text{ kJ}$  Energie.

**CHECK-UP**

- Was ist der durchschnittliche Grundumsatz eines Erwachsenen und wovon hängt er ab?
- Aus welchen vier großen Stoffgruppen setzt sich die menschliche Nahrung zusammen?
- Wie ist das kalorische Äquivalent definiert und wozu wird es verwendet?
- Welche Organe tragen prozentual am meisten und am wenigsten zum Ruheumsatz bei?
- Wie viel Gramm Kohlenhydrate müssen einem Patienten zugeführt werden, der sich von 120 g Proteinen und fettfrei ernährt, um seinen täglichen Energiebedarf von 9000 kJ zu decken?
- Wie hoch ist der Energiegehalt von 2 Liter einer 10% Glukoselösung?

**Jetzt bist du dran!****Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Wärmehaushalt und Temperaturregulation

Isa Jauch, Voraufflage: Ludwig Schlemm



### 1.3.1 Körpertemperatur

#### Allgemeines und Definitionen

Der Mensch ist im Gegensatz zu Reptilien und Fischen ein gleichwarmes (**homiothermes**) Lebewesen, d. h. er besitzt eine von äußeren Einflüssen weitgehend unabhängige Körperkerntemperatur. Während die Temperatur der Körperschale (Extremitäten und Haut) bei sich verändernder Umgebungstemperatur variiert, behält der Körperkern (v. a. Herz, Gehirn und Leber) stets die Normaltemperatur. Diese liegt beim Menschen zwischen 36,4 °C und 37,4 °C. Liegt die Körperkerntemperatur unter 35,5 °C spricht man von Unterkühlung (**Hypothermie**), bei Werten von über 37,5 °C ohne eine Veränderung im Sollwert von Überwärmung (**Hyperthermie**). Ist der Sollwert im Hypothalamus nach oben verstellt, handelt es sich um Fieber.

Die Körperkerntemperatur unterliegt rhythmischen Schwankungen:

- Sie ist am niedrigsten in der zweiten Nachthälfte und am höchsten am späten Nachmittag.
- Sie liegt bei Frauen post-ovulatorisch (Lutealphase, zweite Hälfte des Zyklus), durch Progesteron vermittelt, ca. 0,5 °C höher als präovulatorisch.

Die Körpertemperatur kann auf verschiedene Weisen bestimmt werden:

- **Rektal:** Verzögerte Veränderung bei dynamischen Prozessen
- **Tympanal:** Schnelle Durchführung, ungenau
- **Sublingual, axillär:** Häufigste Methoden in der klinischen Praxis, größte Ungenauigkeit
- **Zentral:** Über Katheter in Aorta, Goldstandard, sehr invasiv, selten angewandt.

Für die gemessenen Temperaturen gilt die Reihenfolge: axillär (am niedrigsten), sublingual, tympanal, rektal, zentral (am höchsten).

Der Begriff der **thermischen Neutralzone** ist definiert als der Bereich der Umgebungstemperatur, in dem durch Anpassung der Hautdurchblutung eine ausgeglichene Wärmebilanz erzielt werden kann. Dieser Bereich liegt bei etwa 25–30 °C. Sowohl bei höheren als auch bei niedrigeren Temperaturen steigt der Grundumsatz merklich an. Die **Indifferenztemperatur** ist die als behaglich

empfundene Temperatur und hängt ab von Bekleidung, Grundumsatz, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit. Bei hoher Windgeschwindigkeit wird vermehrt die den Körper umgebende Warmluft konvektiv abgeführt, was die Verdunstungsrate erhöht und zu subjektivem Kälteempfinden führt.

#### Hyperthermie

Eine nicht fieberbedingte erhöhte Körperkerntemperatur (> 37,5 °C) wird durch ein Missverhältnis zwischen Wärmeproduktion und -aufnahme einerseits, und Wärmeabgabe andererseits verursacht, und kann Werte von bis zu 41 °C erreichen. Sie ist nach Beseitigung der Ursache reversibel. Es kommen externe oder interne Gründe infrage:

- **Exogene Hyperthermie** ist Folge großer Hitzeexposition und führt klinisch zu Sonnenbrand, Hitzekrämpfen, Hitzekollaps, Hitzerschöpfung und Hitzschlag
- **Endogene Hyperthermie** in Form von **maligner Hyperthermie** kann bei Patienten mit seltenen Erbkrankheiten beim Verabreichen von Muskelrelaxanzien auftreten. Mutationen im RyR führen bei diesen Patienten zu einer unkontrollierten  $\text{Ca}^{2+}$ -Freisetzung aus dem SR ins Zytosol quergestreifter Muskelzellen. Eine andere Ursache ist das maligne Neuroleptika-Syndrom (MNS) nach Gabe potenter antipsychotisch wirkender Medikamente.

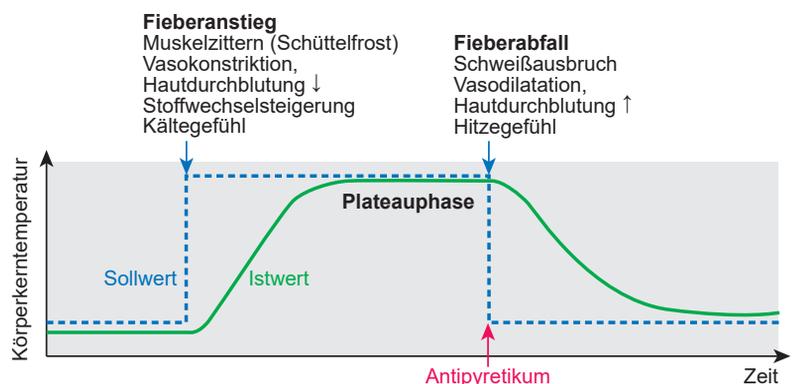
#### KLINIK

**Therapie der Hyperthermie** Für die **exogene Hyperthermie**: Beendigung der Hitzeexposition (z. B. Lagern im Schatten), Flüssigkeitszufuhr und Sicherung der Vitalparameter. Bei **endogener Hyperthermie** ist oftmals aktives Kühlen mit Eisbeuteln nötig. Bei der Behandlung der **malignen Hyperthermie** kommt der RyR<sub>1</sub>-Antagonist Dantrolen zum Einsatz.

#### Fieber

Fieber ist durch eine **Erhöhung des Temperatur-Sollwerts** in der Area praeoptica des Hypothalamus gekennzeichnet. Dies kann geschehen durch exogene und endogene Pyrogene:

- **Exogene Pyrogene:** Bestandteile von Viren und Bakterien
  - **Endogene Pyrogene:** von Granulozyten als Antwort auf Eindringlinge gebildete Signalstoffe (IL-1, IL-6, TNF- $\alpha$ , Interferon).
- Neben Infektionen kann Fieber auch verursacht werden durch maligne Neoplasien, Autoimmunerkrankungen Gewebeerstörungen, Thromboembolien, metabolische Störungen u. a. Findet sich keine Ursache, spricht man von Fieber unbekannter Ursache (FUO).



**Abb. 1.1** Typischer dreiphasiger Fieberverlauf.

Dargestellt sind die zeitliche Veränderung des Sollwerts (blau) und der tatsächlichen Temperatur (grün), sowie die physiologischen Mechanismen, die der Körper verwendet, um die tatsächliche Temperatur dem Sollwert anzupassen. [L231]

Im Fieberverlauf (> Abb. 1.1) tritt zuerst ein Temperaturanstieg ein, gekennzeichnet durch Kälteempfinden, Schüttelfrost und periphere Vasokonstriktion zum Anpassen der Ist- an die Solltemperatur (**Stadium incrementi**). Es folgt eine Plateauphase unterschiedlicher Länge und schließlich der Fieberabfall, bei dem der Sollwert wieder unter die aktuelle Körperkerntemperatur fällt. Dies führt dazu, dass der Organismus beginnt, Wärme abzugeben, was sich klinisch durch Schwitzen und gesteigerte Hautdurchblutung (Röte) äußert (**Stadium decrementi**).

### KLINIK

**Antipyretika** Zur Fiebersenkung können auch Medikamente gegeben werden, diese nennt man Antipyretika. Prominente Vertreter sind ASS, Paracetamol und Metamizol. Sie wirken z.T. über eine Hemmung der Prostaglandinbiosynthese im Hypothalamus, womit der Effekt der Pyrogene aufgehoben wird und es schneller zur Entfieberung kommt.

## Hypothermie

Ein Absinken der Körperkerntemperatur unter 35,5°C tritt ein, wenn die Wärmeverluste die Wärmeproduktion über längere Zeit übersteigen. Ursachen können sein:

- Kälteexposition: Begünstigt durch alkoholinduzierte verminderte Kälteempfindung (plus zusätzliche Vasodilatation)
- Krankheit und Medikamente: Urämie, Neuroleptika

O<sub>2</sub>-Mangel kann über einer Herabsetzung des Sollwerts im Hypothalamus zu **Anapyrexie** (Gegenteil des Fiebers) führen. Dies ist im strengen Sinne keine Hypothermie.

### KLINIK

**Therapeutische Wiedererwärmung** Hierbei ist zu beachten, dass es bei ausschließlich externer Wärmezufuhr zu einem Wiedererwärmungsschock (After drop) kommen kann. Dieser wird verursacht durch die periphere Vasodilatation, wodurch das kalte azidotische Blut der Peripherie den Körperkern erreicht. Oftmals besser ist interne Wiedererwärmung mit Blasenspülung, Beatmung mit erwärmter Luft oder Hämodialyse. Letztere erlaubt auch eine Korrektur von ursächlichen Elektrolytstörungen und des Säure-Basen-Haushalts.

## 1.3.2 Wärmebildung

Um eine konstante Körperkerntemperatur zu gewährleisten, muss der Organismus Wärme produzieren. Dies erfolgt unter Ruhebedingungen in erster Linie durch die Stoffwechselprozesse der zentral gelegenen Organe. Bei physischer Arbeit können bis zu 90% der Wärmeproduktion von der Skelettmuskulatur stammen. Bei niedriger Umgebungstemperatur verfügt der Organismus über verschiedene Mechanismen, um die Wärmeproduktion zu steigern und/oder die Wärmeabgabe zu verringern:

- **Periphere Vasokonstriktion** zur Minderung der Wärmeabgabe
- **Kältezittern**: unwillkürlich, erst tonische, dann phasische motorische Einheiten.
- **Verhaltensanpassung**: Bekleidung, physische Aktivität

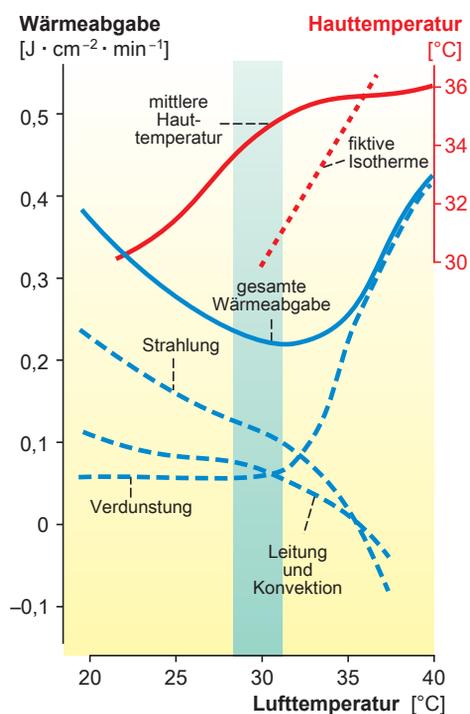
Dem Neugeborenen fehlt die Möglichkeit, über Kältezittern Wärme zu produzieren. Jedoch kann es, anders als Erwachsene, zitterfrei Wärme aus dem **braunen Fettgewebe** generieren. Dabei bewirkt **Thermogenin** (Uncoupling Protein 1, UCP1) eine mechanische Entkopplung von mitochondrialer Aktivität und ATP-Bildung, in-

dem es den Protonengradienten der inneren Mitochondrienmembran kurzschließt.

## 1.3.3 Wärmeabgabe und -aufnahme

Die an der Wärmeabgabe beteiligten Mechanismen lassen sich in den äußeren und inneren Wärmestrom untergliedern. Der **innere Wärmestrom** führt die Wärme vom Ort ihrer Entstehung an die Körperoberfläche ab. Dies erfolgt mit dem Blutstrom (**Konvektion**). Ist eine verstärkte Wärmeabgabe nötig, wird über einen verminderten Sympathikotonus die Durchblutung der Akren gesteigert, bei kalter Umgebung erfolgt eine Vasokonstriktion. Dies kann in Extremfällen zu einem Abfall bzw. Anstieg des arteriellen Blutdrucks führen. Das in den Extremitäten etablierte **Gegenstromprinzip** erlaubt es, einen Temperaturgradienten zwischen dem Körperkern und den Akren aufrechtzuerhalten. Dies schützt vor Wärmeverlust bei Kälte und verhindert ein Aufheizen des Kerns bei Hitze. Von der Körperoberfläche wird die Wärme mit dem **äußeren Wärmestrom** an die Umgebung abgegeben. Dies erfolgt über drei Mechanismen:

- **Konduktion (Leitung)**: direkter Kontakt zweier Medien, Wärmeaustausch proportional zur Temperaturdifferenz der Medien, direkter konvektiver Abtransport im Luftstrom
- **Radiatio (Strahlung)**: ca. 50–60% der gesamten Wärmeabgabe bei Ruhebedingungen
- **Evaporation (Verdunstung)**: limitiert durch hohen Wasserdampfdruck; aufgeteilt in Perspiratio insensibilis (passiv, 500 ml/d) und Perspiratio sensibilis (Schwitzen, sympathisch-



**Abb. 1.2** Gesamtwärmeabgabe und ihre Teilkomponenten sowie mittlere Hauttemperatur bei verschiedenen Lufttemperaturen (Windgeschwindigkeit 0,1 m/s, relative Feuchtigkeit 50%) für den unbekleideten Erwachsenen unter Ruhebedingungen. Gesamtwärmeabgabe und Teilkomponenten (blaue durchgezogene und gestrichelte Kurven, linke Ordinate), mittlere Hauttemperatur (rote durchgezogene Kurve, rechte Ordinate), Indifferenzbereich (grün), fiktive Isotherme von Haut und Lufttemperatur (gepunktete rote Linie). [L106]

cholinerg gesteuert); wichtig bei schwerer körperlicher Arbeit und in der Sauna

Die Anteile der verschiedenen Mechanismen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen sind in > Abb. 1.2 dargestellt.

### 1.3.4 Temperaturregulation

Der Mensch ist darauf angewiesen, seine Kerntemperatur in einem Bereich zwischen 36,4 und 37,4°C zu halten. Dazu steht ihm ein ausgeklügeltes **Regulationssystem** zu Verfügung, das die Wärmeproduktion, -aufnahme und -abgabe anpasst. Gelingt ihm dies nicht, können Hyper- oder Hypothermie die Folge sein. Umgebungseinflüsse, die das Regulationssystem überfordern, sind z. B. extreme Hitze oder Kälte, der schnelle Wärmeverlust in kaltem Wasser, oder die Wärmeaufnahme nach Strahlung bei Reaktorunfällen.

Die **Körperkerntemperatur** wird konstant von zentralen und dermalen Thermosensoren überwacht und in der Area praeoptica im frontalen **Hypothalamus** verarbeitet. Die Information wird dort mit einem Sollwert verglichen, der Normaltemperatur. Ist die gemessene Temperatur zu hoch, werden Mechanismen zur Wärmeabgabe eingeleitet, andererseits zur Wärmekonservierung und -erzeugung. Folgende Mechanismen spielen eine Rolle (> Abb. 1.3):

- Eine vermehrte oder verminderte **Durchblutung** der Extremitäten und der Haut, vermittelt durch den sympathisch gesteuerten Gefäßtonus.
- Vermehrte oder verminderte Aktivierung der ekkrinen **Schweißdrüsen**, welche cholinerg sympathisch innerviert werden: ACh bindet an postsynaptische muskarinerge Rezeptoren (v. a. M3).
- **Kältezittern**.
- Kognitiv gesteuerte **Verhaltensanpassung**.

Bei Kleinkindern und älteren Menschen ist das Risiko einer Temperaturentgleisung, insbesondere einer Unterkühlung, aber auch einer Überwärmung erhöht. Dies liegt bei Neugeborenen und Kleinkindern an der relativ zum Körpergewicht vergrößerten Körperoberfläche, den geringen Energiereserven und dem kaum vorhandenen Unterhautfettgewebe, welche das braune Fettgewebe nicht ausgleichen kann. Beim älteren Menschen spielen eine herabgesetzte Stoffwechselrate und verminderte Vasomotorik eine Rolle.

### 1.3.5 Akklimatisation

Der menschliche Organismus kann sich in begrenzter Weise an das Klima in seiner Umgebung **adaptieren**. Die größte Bedeutung haben hier **Verhaltensänderungen** (Bekleidung, Behausung,

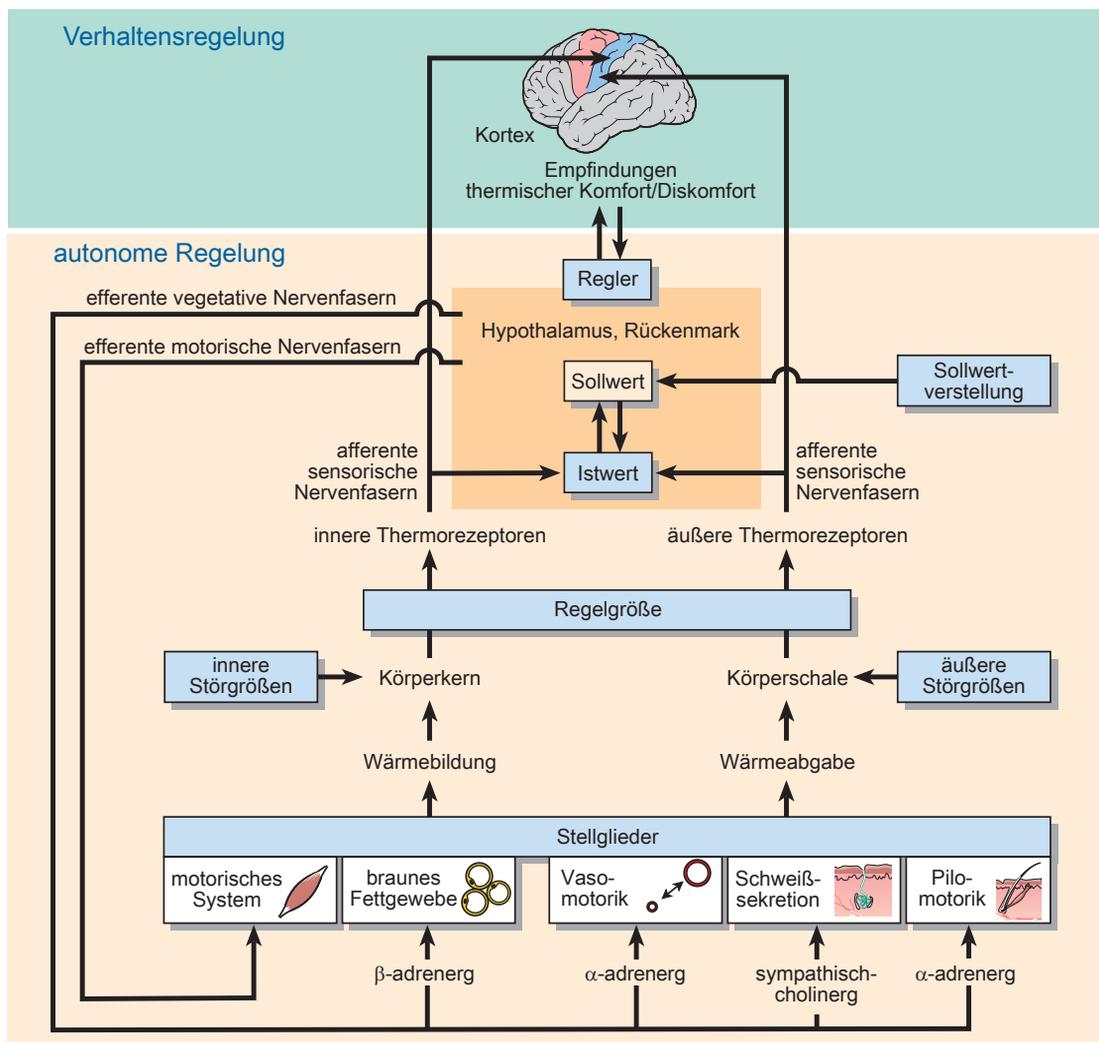


Abb. 1.3 Temperaturregulation [L106]

Nils Hebach, Vanessa Maaßen, Michelle Xi

Vorklinik Finale 21

# Energiestoffwechsel & Anabole Stoffwechselwege

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Fabian Bock, Maximilian Pfau



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Citratzyklus und Atmungskette</b> .....	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>Nukleotidstoffwechsel</b> .....	<b>27</b>
1.1	Pyruvatdehydrogenasekomplex .....	1	4.1	Purinstoffwechsel .....	27
1.2	Citratzyklus .....	3	4.2	Pyrimidinstoffwechsel .....	31
1.3	Atmungskette und oxidative Phosphorylierung ...	6	4.3	Synthese der Desoxyribose-Formen .....	33
<b>2</b>	<b>Gluconeogenese und Glykogenstoffwechsel</b> .....	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>Stoffwechsel der Leber</b> .....	<b>35</b>
2.1	Gluconeogenese .....	11	5.1	Funktion und Anatomie der Leber .....	35
2.2	Glykogenstoffwechsel .....	14	5.2	Biotransformation .....	37
<b>3</b>	<b>Lipidsynthese</b> .....	<b>17</b>	5.3	Alkoholstoffwechsel .....	38
3.1	Fettsäuresynthese .....	17	5.4	Galle und Gallensäuren .....	40
3.2	Lipogenese .....	18	5.5	Bilirubinstoffwechsel .....	42
3.3	Cholesterinsynthese .....	19	<b>6</b>	<b>Fettgewebe</b> .....	<b>45</b>
3.4	Lipoproteinstoffwechsel .....	20	6.1	Braunes und weißes Fettgewebe .....	45
3.5	Synthese der Membranlipide .....	24	6.2	Hormone und Fettgewebe .....	46
			6.3	Lipidhaushalt .....	47
				<b>Register</b> .....	<b>49</b>

## 1

## Citratzyklus und Atmungskette

## 1.1 Pyruvatdehydrogenasekomplex

Nils Hebach, Voraufgabe: Maximilian Pfau



Das Pyruvat aus der Glykolyse gelangt mittels eines **Pyruvat-/H<sup>+</sup>-Symporters** in die **mitochondriale Matrix**. Damit Pyruvat in den Citratzyklus eingeschleust werden kann, muss es dort in Acetyl-CoA umgewandelt werden (> Abb. 1.1). Diese Reaktion wird von einem **Multienzymkomplex** namens **Pyruvatdehydrogenasekomplex** katalysiert. Da es sich um eine stark exergone Reaktion handelt, ist dieser Schritt **irreversibel**.

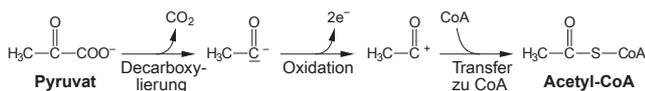


Abb. 1.1 Die Gesamtreaktion des Pyruvatdehydrogenasekomplexes [0523]

## 1.1.1 Reaktionsschritte

Der Pyruvatdehydrogenasekomplex besteht aus mehreren Kopien dreier Enzym-Untereinheiten (E1–E3), die jede für sich eine Teilreaktion katalysieren.

## Pyruvatdehydrogenase (E1)

Die erste Enzymuntereinheit enthält aktiviertes **Thiaminpyrophosphat** (Vitamin B<sub>1</sub>) als Co-Enzym. Das sehr reaktive C2-Atom des Thiazolrings bildet eine kovalente Bindung mit der Ketogruppe des Pyruvats aus.

Durch Mesomeriestabilisierung wird der Pyruvatrest anschließend unter Freisetzung von CO<sub>2</sub> **decarboxyliert** (> Abb. 1.2). Es entsteht ein Hydroxyethyl-Rest.

## Dihydrolipoyl-Transacetylase (E2)

Im nächsten Schritt wird der C<sub>2</sub>-Körper auf den Co-Faktor **Liponamid** übertragen und dabei **oxidiert**. Es entsteht S-Acetyl-Hydroliponamid (> Abb. 1.2).

Nun wird der Acetyl-Rest auf CoA übertragen und es entsteht der **energiereiche Thioester Acetyl-CoA**.

## Dihydrolipoyl-Dehydrogenase (E3)

Das **Dihydroliponamid** muss wieder zu **Liponamid oxidiert** werden. Dabei wird FAD<sup>+</sup> zu FADH<sub>2</sub> reduziert (> Abb. 1.2). FADH<sub>2</sub> gibt anschließend seine Elektronen an NAD<sup>+</sup> weiter. So entsteht letztendlich **NADH + H<sup>+</sup>**.

## 1.1.2 Regulation

## Produktthemmung

Der Pyruvatdehydrogenasekomplex wird durch seine Produkte gehemmt, also durch Acetyl-CoA und NADH/H<sup>+</sup> (> Abb. 1.3).

## Interkonvertierung

Im Pyruvatdehydrogenasekomplex ist sowohl eine **Kinase** als auch eine **Phosphatase** enthalten, sodass er sich selbst ATP-abhängig phosphorylieren und auch dephosphorylieren kann. Der Komplex ist dephosphoryliert aktiv und phosphoryliert inaktiv (> Abb. 1.3). Aktivatoren der Pyruvatdehydrogenasekomplex-Kinase sind Acetyl-CoA und NADH/H<sup>+</sup>.

## MERKE

Da sich der Pyruvatdehydrogenasekomplex in der mitochondrialen Matrix befindet, ist er nicht cAMP-gesteuert.

## CHECK-UP

- Nenne die fünf Co-Faktoren des Pyruvatdehydrogenasekomplexes?
- Wann liegt der Pyruvatdehydrogenasekomplex phosphoryliert und somit inaktiv vor?

## Jetzt bist du dran!

## Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

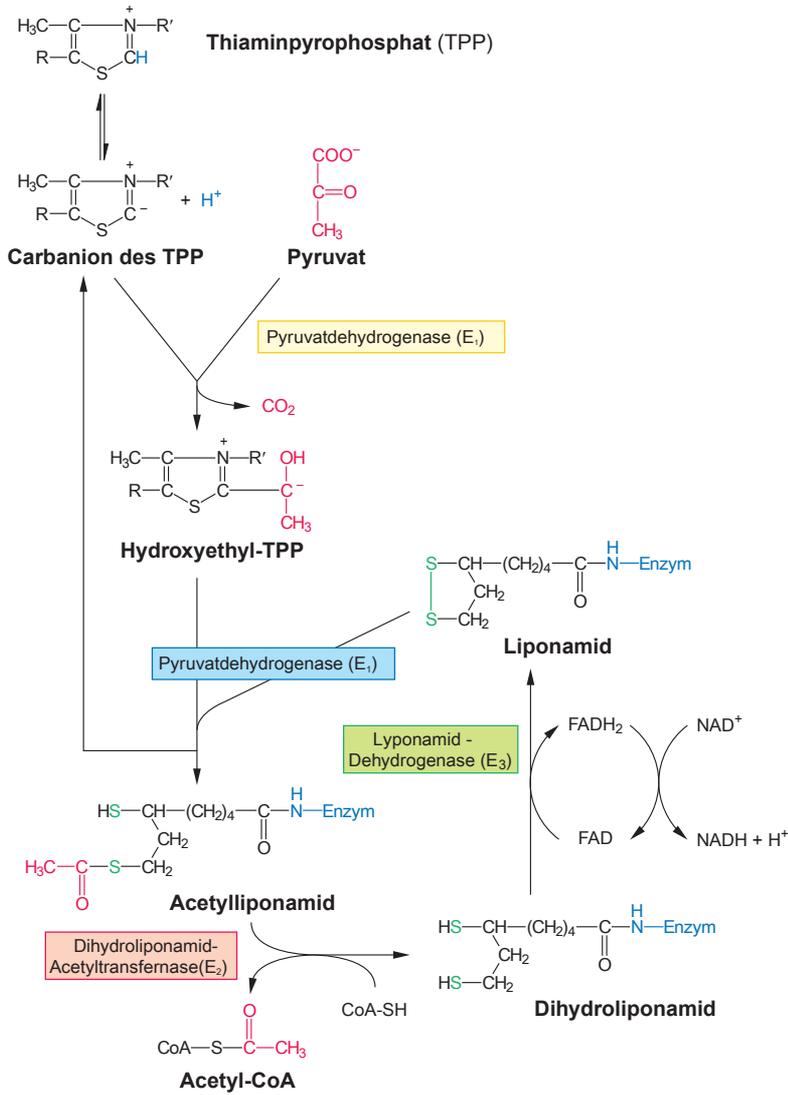


Abb. 1.2 Die einzelnen Reaktionsschritte des Pyruvatdehydrogenasekomplexes im Detail [0523]

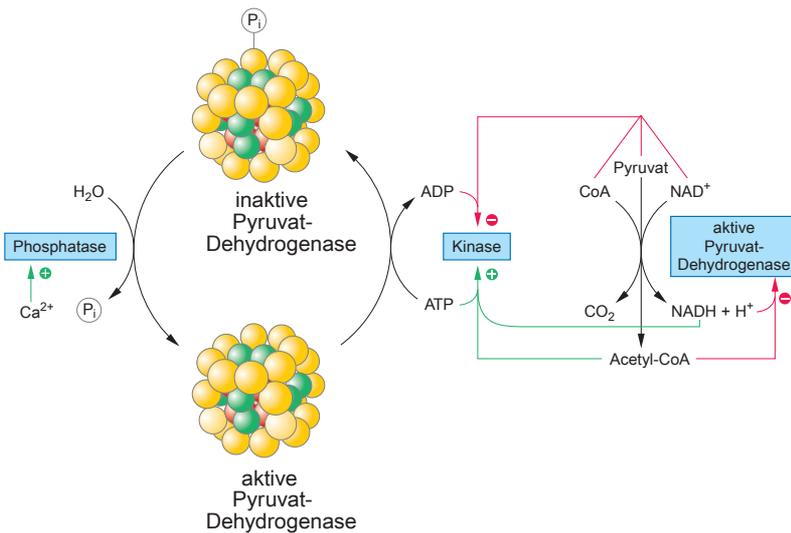


Abb. 1.3 Regulation des Pyruvatdehydrogenasekomplexes [0523]

## 1.2 Citratzyklus

Nils Hebach, Voraufgabe: Maximilian Pfau



Die Aufgabe des Citratzyklus ist es, **Acetyl-CoA** oxidativ vollständig zu  $\text{CO}_2$  abzubauen. Die bei den Oxidationsschritten frei werdenden Elektronen werden in Form von  $\text{NADH} + \text{H}^+$  und  $\text{FADH}_2$  fixiert. Zusätzlich wird durch Substratkettenphosphorylierung ein **GTP** gebildet. Der Citratzyklus findet in der **mitochondrialen Matrix** statt.

Kohlenhydrate werden in der Glykolyse in Pyruvat und über den Pyruvatdehydrogenasekomplex in Acetyl-CoA umgewandelt und dann in den Citratzyklus eingespeist. Fette können direkt als Acetyl-CoA in den Citratzyklus einfließen, während Aminosäuren an verschiedenen Stellen einfließen können.

### 1.2.1 Reaktionen des Citratzyklus

Zum besseren Verständnis kann man sich den Citratzyklus in zwei Teile gliedern:

- **Oxidativer Acetyl-CoA-Abbau:** Alle Reaktionen bis zum Succinat dienen dem oxidativen Abbau des  $\text{C}_2$ -Körpers Acetyl-CoA. Insgesamt entstehen in diesem Teil 2  $\text{CO}_2$ , 2  $\text{NADH} + \text{H}^+$  und 1 **GTP**.
- **Oxalacetat-Regeneration:** Succinat wird durch Oxidation, Hydratisierung und erneute Oxidation wieder in Oxalacetat umgewandelt. Dabei entstehen 1  $\text{FADH}_2$  und 1  $\text{NADH} + \text{H}^+$ .

#### Oxidativer Acetyl-CoA-Abbau

- Im ersten Schritt reagiert Acetyl-CoA mit Oxalacetat und  $\text{H}_2\text{O}$  zu Citrat ( $\text{Abb. 1.4}$ ). Citrat ist ein tertiärer Alkohol und lässt

sich nicht oxidieren. Die Reaktion wird durch die **Citratsynthase** katalysiert.

- Da sich Citrat als tertiärer Alkohol nicht oxidieren lässt, wird es mithilfe der **Aconitase** durch Wasserumlagerung in cis-Aconitat und anschließend in Isocitrat umgewandelt. Isocitrat ist ein sekundärer Alkohol.
- $\text{NAD}^+$ -abhängig wird Isocitrat durch die **Isocitrat-Dehydrogenase** zu dem Keton Oxalsuccinat oxidiert. Oxalsuccinat zerfällt anschließend unter Abgabe von  $\text{CO}_2$  zu  $\alpha$ -Ketoglutarat. Bei dieser Reaktion entsteht das erste  $\text{NADH} + \text{H}^+$ .
- $\alpha$ -Ketoglutarat wird schließlich mithilfe der  **$\alpha$ -Ketoglutarat-Dehydrogenase** durch dehydrierende Decarboxylierung zu Succinyl-CoA oxidiert. Bei dieser Reaktion wird das zweite  $\text{CO}_2$  frei und es entsteht ein weiteres  $\text{NADH} + \text{H}^+$ . Der  $\alpha$ -Ketoglutarat-Dehydrogenasekomplex (OGDC) weist sowohl strukturell als auch funktionell große Ähnlichkeiten mit dem Pyruvatdehydrogenasekomplex (PDC) auf ( $\text{Abb. 1.1}$ ).

Tab. 1.1 Vergleich OGDC und PDC

Untereinheiten OGDC	Untereinheiten PDC
$\alpha$ -Ketoglutarat-Dehydrogenase ( $E_1$ )	Pyruvatdehydrogenase ( $E_1$ )
Dihydroliipoamid-Succinyltransferase ( $E_2$ )	Dihydroliipoyl-Transacetylase ( $E_2$ )
Dihydroliipoamid-Dehydrogenase ( $E_3$ )	Dihydroliipoyl-Dehydrogenase ( $E_3$ )

#### Regeneration von Oxalacetat

- Die Energie der Thioesterbindung, die bei der Abspaltung von CoA von Succinyl-CoA frei wird, wird durch Substratkettenphosphorylierung in **GTP** fixiert. Übrig bleibt neben **GTP**, CoA-SH und Succinat ( $\text{Abb. 1.5}$ ). Die Reaktion wird durch die **Succinyl-CoA-Synthetase** katalysiert.

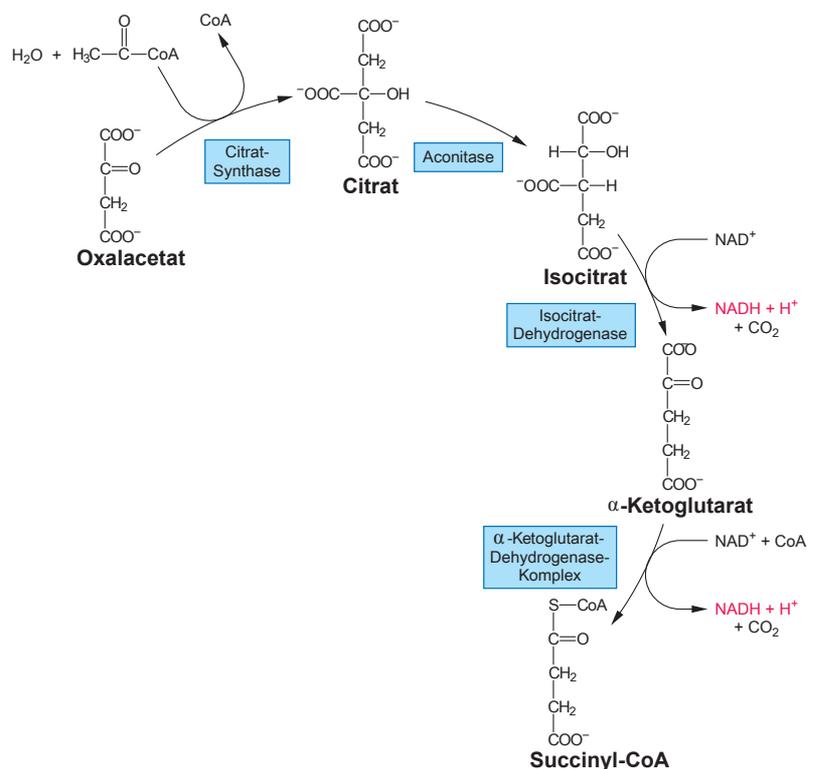


Abb. 1.4 1. Teil des Citratzyklus: Oxidativer Abbau des Acetyl-CoA [0523]

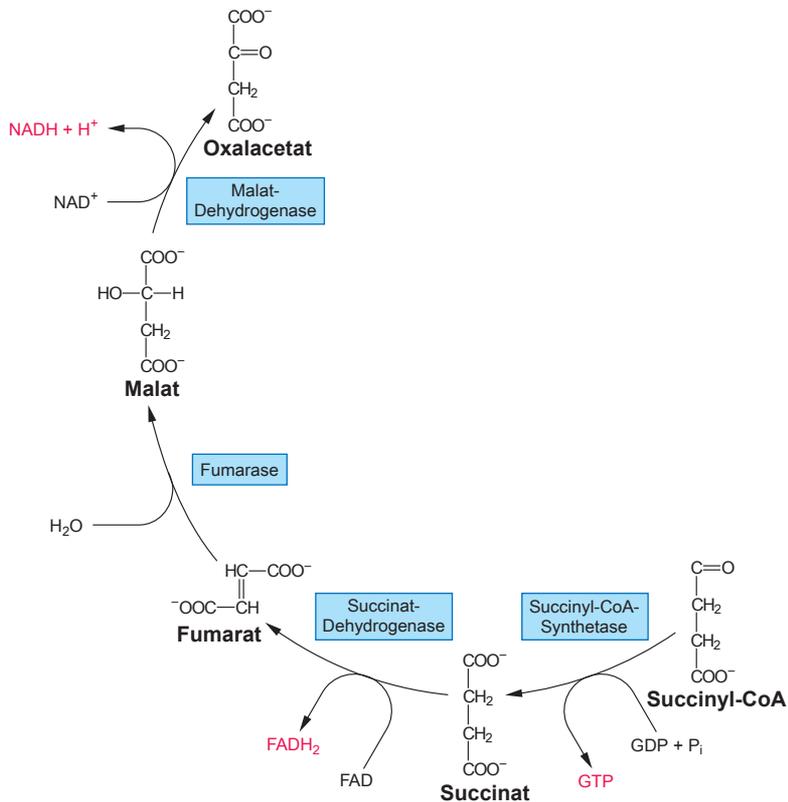


Abb. 1.5 2. Teil des Citratzyklus: Regeneration von Oxalacetat [0523]

- Die **Succinat-Dehydrogenase**, die auch ein Teil der Atmungskette ist, oxidiert Succinat FAD-abhängig zu Fumarat. Dabei entsteht ein **FADH<sub>2</sub>**.
- Nun wird Fumarat durch die **Fumarase** hydratisiert. Es bildet sich Malat.
- Malat wird im letzten Schritt durch die **Malat-Dehydrogenase** NAD<sup>+</sup>-abhängig oxidiert. Dabei entstehen das letzte **NADH + H<sup>+</sup>** und Oxalacetat. Der Zyklus kann dann wieder von vorne beginnen.

### KLINIK

Folgende Reaktionen des Citratzyklus laufen nach diesem Prinzip ab:

- **1. Oxidation:** Es kommt zur Einführung einer Doppelbindung. Hierbei wird ein Reduktionsäquivalent gewonnen (NADH/H<sup>+</sup> oder FADH<sub>2</sub>).
- **Hydratisierung:** Eine Hydratisierung führt zur Bildung einer Alkoholgruppe.
- **2. Oxidation:** Die Alkoholgruppe wird zu einer Carbonylgruppe oxidiert. Ein weiteres Reduktionsäquivalent wird gewonnen.

Das Muster dieser aufeinanderfolgenden Reaktion findet sich sowohl im **Citratzyklus** als auch bei der **β-Oxidation**. In umgekehrter Form findet sich das Muster bei der Fettsäure-Biosynthese.

## 1.2.2 Bilanz des Citratzyklus

Im Citratzyklus wird ein Acetylrest vollständig oxidiert:

In folgenden Schritten wird Energie fixiert:

- 3 NADH + H<sup>+</sup>
  - **Isocitrat-Dehydrogenase**
  - **α-Ketoglutarat-Dehydrogenase**
  - **Malat-Dehydrogenase**
- 1 FADH<sub>2</sub>
  - **Succinat-Dehydrogenase**

- 1 GTP

### – Succinyl-CoA-Synthetase

Pro NADH + H<sup>+</sup> werden in der Atmungskette ca. 2,3 ATP gewonnen, pro FADH<sub>2</sub> sind es 1,5 ATP. Es werden somit pro Citratzyklus 9 ATP und 1 GTP gewonnen, also insgesamt **10 energiereiche Triphosphate**.

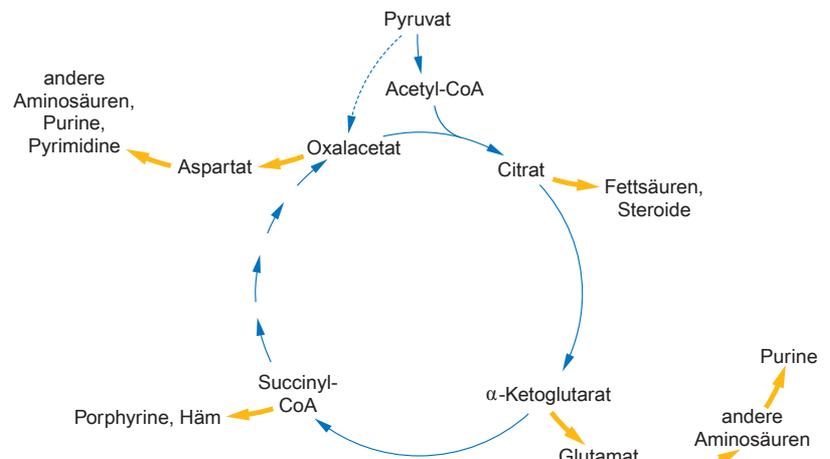
## 1.2.3 Regulation des Citratzyklus

Besonders die stark exergonen Teilschritte des Citratzyklus werden reguliert. Dazu zählen die Reaktionen, die durch die **Citrat-synthase**, die **Isocitrat-Dehydrogenase** und die **α-Ketoglutarat-Dehydrogenase** katalysiert werden. Auch die Succinat-Dehydrogenase wird stark reguliert. Die Regulation erfolgt über drei Mechanismen:

- **Produktthemung:** Die Citratsynthase wird durch Citrat gehemmt, die **Isocitrat-Dehydrogenase** und die **α-Ketoglutarat-Dehydrogenase** durch NADH.
- **Aktivatoren:** ADP, Mg<sup>2+</sup> und Mn<sup>2+</sup> sind allosterische Aktivatoren der Isocitrat-Dehydrogenase.
- **Inhibitoren (Rückkopplung):** Neben der direkten Produktinhibition hemmen auch später folgende Stoffwechselintermediate manche Enzyme. Die meisten Enzyme des Citratzyklus lassen sich durch ATP hemmen. Die Succinat-Dehydrogenase wird durch Oxalacetat gehemmt.

## 1.2.4 Zentrale Rolle des Citratzyklus

Im Citratzyklus werden nicht nur Reduktionsäquivalente für die Atmungskette gewonnen, die Intermediate des Citratzyklus gehen auch in andere Stoffwechselwege ein (➤ Abb. 1.6).



**Abb. 1.6** Anabole Synthesen ausgehend vom Citratzyklus [0523]

## Anabole Reaktionen

- **Citrat:** Da Acetyl-CoA die mitochondriale Matrix nicht verlassen kann, reagiert es zusammen mit Oxalacetat zu Citrat. Dieses Citrat kann anschließend ins Zytosol. Dort wird es wieder in Oxalacetat und Acetyl-CoA gespalten und bildet die Grundlage für die Synthese von Fettsäuren und Cholesterin.
- **α-Ketoglutarat:** α-Ketoglutarat bildet die Grundlage für die Aminosäuren Glutamat, Glutamin und Prolin. Außerdem wird aus Glutamat der Neurotransmitter GABA synthetisiert.
- **Succinyl-CoA:** Zusammen mit Glycin kondensiert Succinyl-CoA zu δ-Aminolävulinat und bildet so die Grundlage für die Häm-Biosynthese.
- **Oxalacetat:** Durch Transaminierung entsteht aus der α-Ketosäure Oxalacetat die Aminosäure Aspartat. Oxalacetat verbindet den Citratzyklus also mit dem Harnstoffzyklus.

## Katabole Reaktionen

Neben zahlreichen anabolen Reaktionen enden auch einige katabole Reaktionen im Citratzyklus, deshalb ist der Citratzyklus **amphibol**. Zu diesen katabolen Reaktionen gehört beispielsweise der Aminosäureabbau.

## Anaplerotische Reaktionen

Da dem Citratzyklus ständig Intermediate für anabole Reaktionen entnommen werden, muss er wieder aufgefüllt werden. Diese Auf-

füllreaktionen werden auch **anaplerotische Reaktionen** genannt. Vor allem das Enzym **Pyruvatcarboxylase** spielt dabei eine wichtige Rolle:

Pyruvat kann mittels Glykolyse fast beliebig nachgeliefert werden. Weitere wichtige Enzyme sind die Aminotransferasen und das Malatenzym. Außerdem fließen Kohlehydratgerüste aus dem Aminosäureabbau in den Citratzyklus ein.

## CHECK-UP

- Nenne alle Schritte des Citratzyklus, bei denen  $\text{CO}_2$  frei, ein Reduktionsäquivalent oder ein energiereiches Triphosphat gewonnen wird.
- Wie wird der Citratzyklus reguliert?
- Was versteht man unter anaplerotischen Reaktionen?

## Jetzt bist du dran!

### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

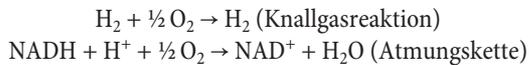
## 1.3 Atmungskette und oxidative Phosphorylierung

Nils Hebach, Voraufgabe: Maximilian Pfau

### Biochemie

Nur ein sehr kleiner Teil der im Stoffwechsel frei werdenden Energie wird direkt durch Substratkettenphosphorylierung in Triphosphaten fixiert. Der Großteil der Energie, der in der Glykolyse,  $\beta$ -Oxidation und dem Citratzyklus frei wird, wird in Co-Enzymen wie **NADH** oder **FADH<sub>2</sub>** fixiert.

Die Redoxreaktion der Co-Enzyme mit Sauerstoff ähnelt der **Knallgasreaktion**:



Die Energiebeträge, die bei dieser Oxidation von NADH und FADH<sub>2</sub> und **der Reduktion des Sauerstoffs frei werden**, sind weit aus höher als die  $-32,3 \text{ kJ/mol}$  der ATP-Hydrolyse.

### MERKE

Die Aufgabe der Atmungskette besteht darin, die Energie von NADH und FADH<sub>2</sub> in kleinere Stücke aufzuteilen. Dies geschieht, indem die bei der Oxidation der Co-Enzyme frei werdende Energie in der **oxidativen Phosphorylierung** zur ATP-Gewinnung genutzt wird.

### 1.3.1 Atmungskette

Die Atmungskette selbst besteht aus den Proteinkomplexen I–IV. Diese Enzyme sind in die innere Mitochondrienmembran eingelagert und katalysieren die Redoxreaktionen der Atmungskette (> Abb. 1.7).

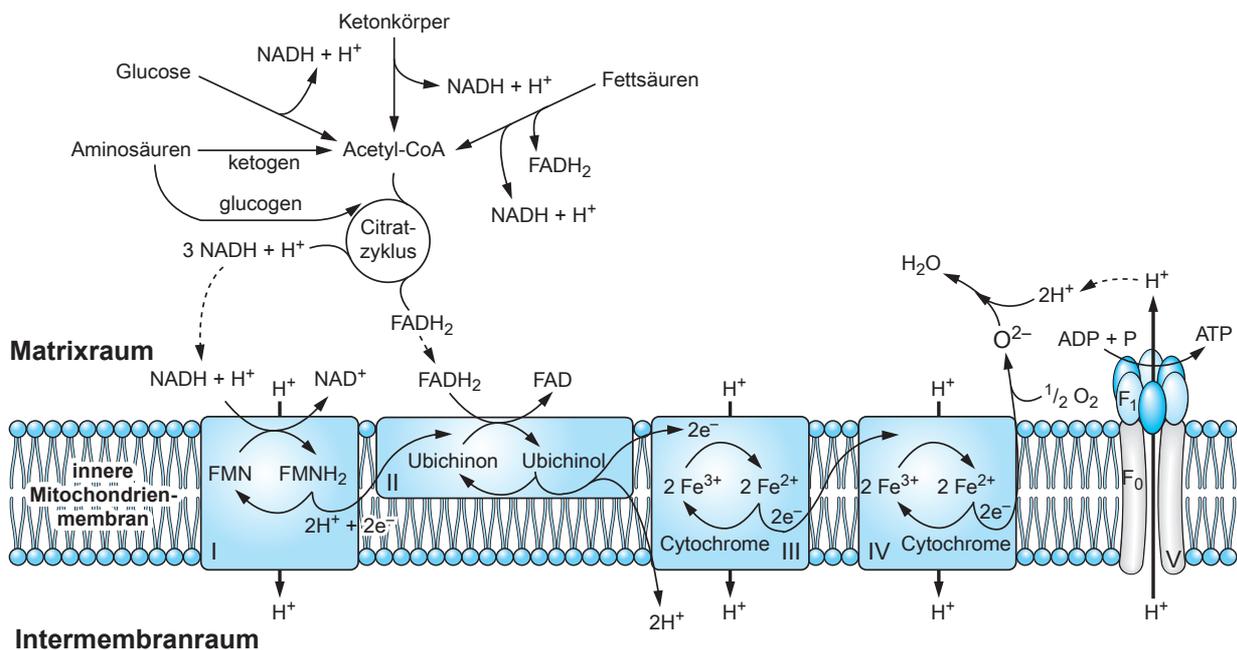


Abb. 1.7 Die Atmungskette und die oxidative Phosphorylierung [0523]

### Komplex I: NADH-Ubichinon-Oxidoreduktase

Der Komplex I überträgt von NADH/H<sup>+</sup> **2 Protonen** und **2 Elektronen** auf Ubichinon (Co-Enzym Q), das dabei zu **Ubichinol** reduziert wird.

Die prosthetische Gruppe von Komplex I ist **Flavinmononucleotid** (FMN), das zunächst die Elektronen von NADH/H<sup>+</sup> aufnimmt und dabei zu FMNH<sub>2</sub> reduziert wird. Die Elektronen werden anschließend an **Eisen-Schwefel-Cluster** weitergegeben und zuletzt auf Ubichinon übertragen. Gleichzeitig werden **4 Protonen** in den **Intermembranraum** gepumpt.

### Komplex II: Succinat-Ubichinon-Oxidoreduktase

Komplex II ist auch Teil des Citratzyklus und wird auch **Succinat-Dehydrogenase** genannt. Bei der Oxidation von Succinat werden die Elektronen zunächst auf FAD übertragen, welches so zu FADH<sub>2</sub> reduziert wird. Danach durchlaufen die Elektronen wiederum Eisen-Schwefel-Cluster und werden zusammen mit 2 Protonen in Form von Ubichinol fixiert.

### MERKE

Als einziger Proteinkomplex der Atmungskette befördert der Komplex II keine Protonen in den Intermembranraum und ist somit nicht direkt am Aufbau des Protonengradienten beteiligt.

### Ubichinol als Sammelpool

Ubichinon kann nicht nur in der Atmungskette zu Ubichinol reduziert werden:

- **Glycerophosphatzyklus:** Zytosolisches NADH/H<sup>+</sup> aus der Glykolyse reduziert Dihydroxyacetonphosphat zu Glycerophosphat. Diese Reaktion wird von der **Glycerophosphatdehydrogenase** katalysiert. Anschließend wird das Glycerophosphat an

Felix Hollmann, Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski,  
Vanessa Maaßen, Thomas Wenisch

**Vorklinik Finale 22**

# **Harnorgane und Elektrolythaushalt**

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Ludwig Schlemm



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Harnorgane</b> .....	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>Säure-Basen-Reaktionen</b> .....	<b>27</b>
1.1	Überblick .....	1	3.1	Definition von Säuren und Basen nach von Brönsted .....	27
1.2	Entwicklung .....	1	3.2	Dissoziationsabhängige Größen, pH-Wert .....	28
1.3	Niere .....	2	3.3	Neutralisation, Puffer .....	33
1.4	Ableitende Harnwege .....	6	3.4	Definition von Säuren und Basen nach Lewis .....	35
<b>2</b>	<b>Nierenfunktion</b> .....	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>Säure-Basen-Haushalt</b> .....	<b>37</b>
2.1	Funktionelle Anatomie .....	11	4.1	Biochemische Grundlagen .....	37
2.2	Nierendurchblutung .....	11	4.2	Puffersysteme .....	37
2.3	Filtration .....	13	4.3	Störungen des Säure-Basen-Gleichgewichts .....	39
2.4	Transportvorgänge im Tubulussystem .....	15	<b>5</b>	<b>Wasser- und Elektrolythaushalt</b> .....	<b>43</b>
2.5	Regulation der Harnkonzentrierung .....	20	5.1	Allgemeine Grundlagen .....	43
2.6	Globale Nierenfunktion und ihre Regulation .....	21	5.2	Wasser- und Elektrolytbilanz .....	43
2.7	Messung der Nierenfunktion .....	21	5.3	Flüssigkeitsräume .....	44
2.8	Stoffwechsel in der Niere .....	23	5.4	Elektrolyte .....	45
2.9	Glutaminstoffwechsel .....	24	5.5	Hormonale Regulation .....	46
				<b>Register</b> .....	<b>50</b>

# 1

## Harnorgane

### 1.1 Überblick

Christoph Jaschinski



Die Harnorgane lassen sich in 2 Gruppen unterteilen:

- **Harnbereitende Organe:** Nieren
- **Harnableitende Organe:** Nierenbecken, Harnleiter, Harnblase und Harnröhre

Die Nieren (**Ren**) filtern das Blut und scheiden Abfallprodukte mit dem Urin aus. Pro Tag produzieren sie 150l Primärharn. Dieser wird größtenteils wieder resorbiert, sodass nur 1,5l Restharn täglich ausgeschieden werden. Jedoch resorbieren die Nieren nicht nur, sondern sezernieren auch. Somit tragen sie einen wesentlichen Teil zu einer ausgeglichenen Stoffwechsellage und einem ausgewogenen Elektrolythaushalt bei. Die Nieren produzieren zudem die blutdrucksteigernde Protease Renin sowie Erythropoetin, das im Knochenmark die Differenzierung der Stammzellen zu Erythrozyten stimuliert.

### 1.2 Entwicklung

Christoph Jaschinski



#### 1.2.1 Niere

Die **Niere** entsteht zu Beginn der 5. EW aus der **Nachniere** (Metanephros). Diese geht aus dem **intermediären Mesoderm** des unteren Lumbal- und ersten Sakralsegments hervor. Sie besteht aus 2 Anteilen: der **Ureterknospe** und dem **metanephrogenen Blastem**. Aus der Ureterknospe entstehen der Ureter, das Nierenbecken, die Kelche des Nierenbeckens und die **Sammelrohre**. Die Nierenkörperchen, der proximale, intermediäre und distale Tubulus sowie das Nierenstroma bilden sich aus dem metanephrogenen Blastem. Von der Aorta kommende, kleine Gefäße stülpen sich in die Nierenkörperchen ein, sodass in der Gesamtheit die Glomeruli entstehen. Ab der 8. EW sezerniert die Niere Harn in die Amnionflüssigkeit.

Der Entwicklung der Nachniere gehen 2 embryonale Probestufen voraus: die **Vorniere** (Pronephros) und die **Urnieren** (Mesonephros). Während die Vorniere unproduktiv ist, funktioniert die Urnieren schon teilweise. Aus ihr entspringt auch der Urnierenkanal (**Ductus mesonephrici, Wolff-Gang**).

#### MERKE

Im Laufe der embryonalen Entwicklung steigt die Niere aus dem Becken bis in Höhe des 12. Thorakalsegments auf (**Asensus der Niere**). Dieser relative Aufstieg kommt durch das Längenwachstum des Fetus bzw. Säuglings zustande.

#### 1.2.2 Harnblase und Harnröhre

Die Harnblase wächst aus dem oberen Teil des **Sinus urogenitalis**. Der Sinus urogenitalis gliedert sich in 4 Teile:

- **Pars versicalis:** Harnblase und Urachus (Relikt aus dem Allantois-Divertikel)
- **Pars pelvina:** Harnröhre und Prostata
- **Pars phallica:** ♂ Pars spongiosa der Harnröhre und Cowper-Drüsen (Gll. bulbourethrales) bzw. ♀ Scheidenvorhof und Bartholin-Drüsen (Gll. vestibulares majores)
- **Pars genitalis:** äußere Genitalorgane.

#### KLINIK

Beim Mann kann die Mündung der Harnröhre fehlgebildet sein. Bei der **Hypospadie** befindet sich die Urethralöffnung auf der Penisunterseite. Tritt die Urethra auf der Oberseite des Penis aus, bezeichnet man das als **Epispadie**.

#### Jetzt bist du dran!

##### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Niere

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski

### Anatomie, Histologie

#### 1.3.1 Makroskopischer Aufbau

Nieren sehen in der Regel bohnenförmig aus. Eine Niere wiegt in etwa 150 g und ist ca. 12 cm lang, 5–6 cm breit und 4 cm dick. Morphologisch lassen sich der konvexe laterale Rand (**Margo lateralis**) und der konkave mediale Rand (**Margo medialis**) unterscheiden. Am Margo medialis befindet sich die Nierenpforte (**Hilum renale**), an der die Gefäße und die Harnleiter ein- und austreten. Des Weiteren wird die Niere in eine Vorderfläche (**Facies anterior**) und eine Rückfläche (**Facies posterior**) sowie einen oberen Pol (**Extremitas superior**) und einen unteren Pol (**Extremitas inferior**) eingeteilt.

#### MERKE

Am Nierenhilum reihen sich von dorsal nach ventral: A. renalis, V. renalis und Ureter.

Die Niere wird von 3 Hüllen umgeben. Von innen nach außen sind das:

- **Capsula fibrosa renalis:** Die Faserkapsel liegt der Nierenrinde auf.
- **Capsula adiposa renalis:** Aufgrund der weichen Konsistenz des Fetts bei Körpertemperatur sagt man, dass die Niere in der Fettkapsel „schwimmt“. Wird bei Abmagerung das Fettpolster abgebaut, kann die Niere bis ins kleine Becken wandern. Das bezeichnet man auch als Senk- oder Wanderniere (Ren mobilis).
- **Fascia renalis (Gerota-Faszie):** setzt sich aus einer dünnen Fascia praerenalis und einer dicken Fascia retrorenalis zusammen, die nach oben und seitlich verschlossen sind. Nach mediokaudal ist die Fascia renalis jedoch geöffnet, sodass Gefäße und Harnleiter hindurchtreten können. Verbunden ist sie nach oben mit der Zwerchfellfaszie und seitlich mit der Fascia transversalis.

#### KLINIK

**Hufeisenniere** Fusionsanomalie, bei der die Nieren zumeist am unteren Pol miteinander verwachsen sind. Sie tritt bei 1 : 500 Geburten auf. Normalerweise ist die Funktion der Nieren nicht beeinträchtigt. Schlicht der embryonale Aszensus ist beeinträchtigt, weil die fusionierten Nieren am Stamm der A. mesenterica inferior „hängen bleiben“. Eine Hufeisenniere ist gehäuft mit weiteren Anomalien des Urogenitaltrakts oder systemischen, genetischen Erkrankungen, z. B. dem Ullrich-Turner-Syndrom, vergesellschaftet.

#### 1.3.2 Topografie

Die Nieren liegen **retroperitoneal** im Nierenlager zwischen dem **M. psoas major** und dem **M. quadratus lumborum**. Sie liegen i. H. BWK 12–LWK 3, wobei die rechte Niere aufgrund der Leber etwa einen halben Wirbelkörper tiefer steht. Die Längsachsen beider Nieren konvergieren nach kranial, sodass sich die oberen Pole näherstehen als die unteren.

Vor der rechten Niere befinden sich der rechte Leberlappen, die Pars descendens duodeni, das Colon ascendens und die Flexura coli dextra. Die linke Niere hat Kontakt zum Magen, zur Milz, zum Pankreas, zum Colon descendens sowie zur Flexura coli sinistra. Hinter dem muskulären Nierenlager laufen die N. subcostalis, N. iliohypogastricus und N. ilioinguinalis, die bei Nierenirritationen die Schmerzen bis in die Leistenregion fortleiten können.

#### 1.3.3 Feinstruktur

Das Nierenparenchym wird unterteilt in die **Nierenrinde** und das **Nierenmark**. Die Nierenrinde befindet sich als bis zu 1 cm breiter dunkler Streifen an der äußeren lateralen, kranialen und kaudalen Oberfläche der Niere. Teile der Rinde strahlen als sog. **Columnae renales** (Nierensäulen) in das Innere der Niere ein. Dazwischen befindet sich das hellere Nierenmark, das pro Niere in Form von sieben bis neun **Markpyramiden** vorliegt, deren Basis zur Rinde zeigt. Das Mark gliedert sich in:

- **Markstrahlen:** ziehen fingerförmig in die Rinde. Zwischen den Strahlen liegt das Rindenlabyrinth.
- **Äußeres Mark:** mit Außen- und Innenstreifen.
- **Inneres Mark:** mündet nach medial über jeweils eine Papille in die Kelche des Nierenbeckens (Pelvis renalis).

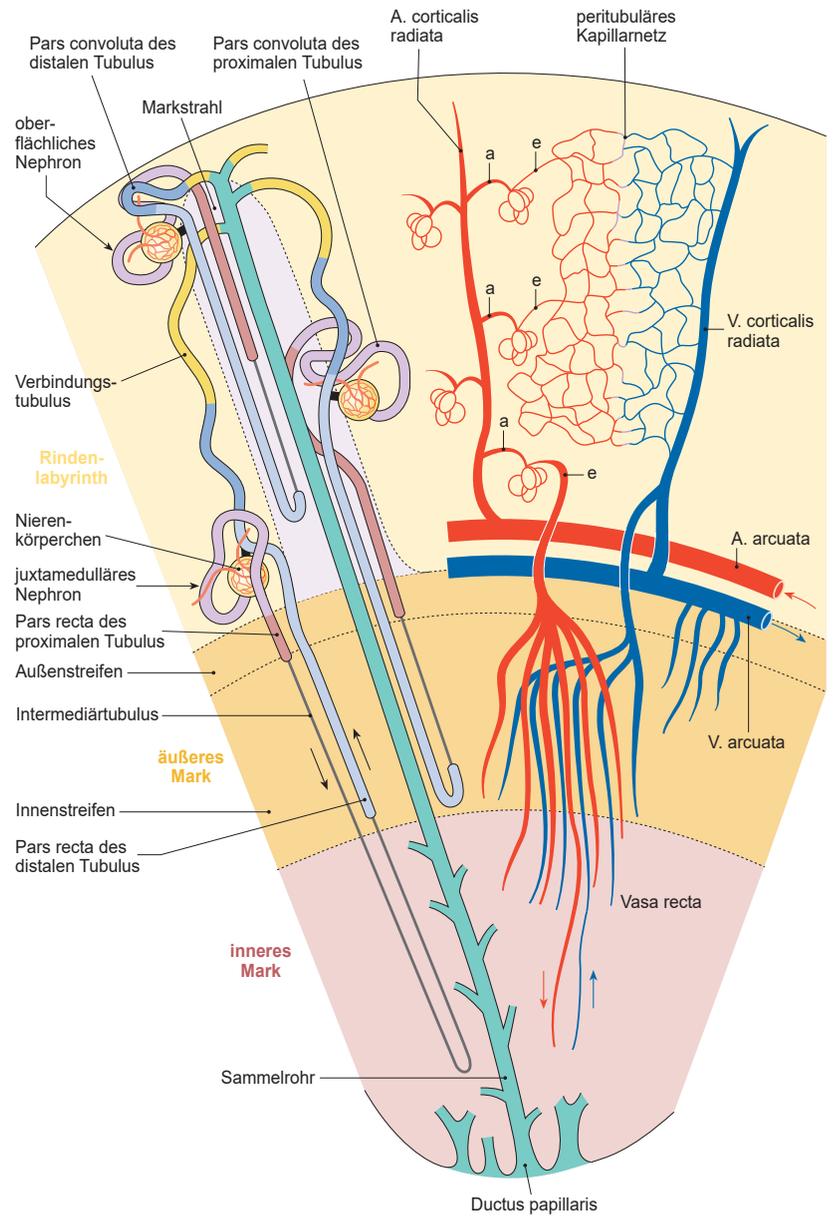
Eine Markpyramide mit umliegender Rinde wird als **Lobus renalis** bezeichnet. Das Nierenbecken ist das Sammelbecken für den Urin aus den einzelnen Sammelrohren. Es verjüngt sich medial zum Ureter, der den Harn zur Harnblase ableitet. Die Gesamtheit aus Nierenbecken, Kelchen, das Becken umziehendem Fettgewebe, Gefäßen und Nerven bildet den **Sinus renalis** (Nierenbucht); dieser verjüngt sich zum **Nierenhilum** (Nierenpforte), wo Nierenarterie und -vene sowie Ureter ein- bzw. austreten.

Histologisch lässt sich die Niere in Nephronen und Interstitium einteilen. Nephronen sind die Funktionseinheiten der Niere. Sie setzen sich aus den Nierenkörperchen, den **Glomeruli renales (Malpighi-Körperchen)** und den Nierenkanälchen (**Tubuli renales**) zusammen (> Abb. 1.1).

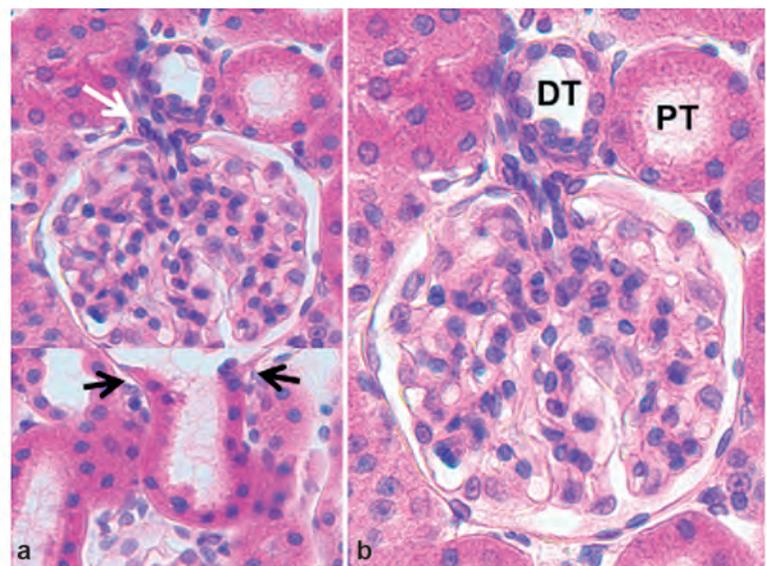
#### Nierenkörperchen

Jede Niere enthält ca. 1,5 Mio. Nierenkörperchen (> Abb. 1.2; > Abb. 1.3 o.). Diese bestehen aus einem Blutkapillarknäuel, das einen Glomerulus im eigentlichen Sinne darstellt, der **Bowman-Kapsel** und dem **Mesangium**. Letzteres besteht aus Mesangiumzellen, die durch Gap junctions verbunden sind, und EZM. Das Mesangium liegt teils inmitten des Blutkapillarknäuels (**intraglomerulär**), teils außerhalb (**extraglomerulär**). Zu seinen Aufgaben zählt die Bildung von EZM und Bestandteilen der glomerulären Basalmembran (s. u.). Daneben sind Mesangiumzellen phagozytisch aktiv und in der Lage zu kontrahieren, was der Stabilität und dem Zusammenhalt der Blutkapillarwände dient.

Die Bowman-Kapsel besteht aus einem **äußeren parietalen Blatt** aus einschichtigem flachem Epithel, das auf einer Basallamina liegt, und einem **inneren viszeralem Blatt** aus Podozyten, das dem Glomerulus anliegt. Inneres und äußeres Blatt der Kapsel gehen am Gefäßpol ineinander über. Zwischen beiden Blättern liegt der Kapselraum, in den der Primärharn abfiltriert wird. Der Primärharn geht am Harnpol, der dem Gefäßpol gegenüberliegt, in den proximalen Tubulus über.



**Abb. 1.1** Lage einzelner Nephronanteile und Gefäßarchitektur der Niere (a = Vas afferens, e = Vas efferens) [L141]



**Abb. 1.2** Nierenkörperchen und Tubulusabschnitte (H. E.; derselbe Abschnitt bei mittlerer Vergrößerung [a] und hoher Vergrößerung [b]): Gefäßpol (weißer Pfeil), Harnpol (schwarze Pfeile), proximaler Tubulus (PT) und distaler Tubulus (DT). [T1077/P668]

Die etwa 30 Kapillarschlingen jedes Glomerulus sind untereinander durch Anastomosen verbunden. Diese Schlingen werden aus einem **Vas afferens** (afferente Arteriole) gespeist, über welches Blut in das Nierenkörperchen eintritt. Das Blut aus den Schlingen verlässt das Körperchen wieder über ein **Vas efferens** (efferente Arteriole).

## Blut-Harn-Schranke

Kapillaren (innen) sowie Podozyten und intraglomeruläres Mesangium (beide außen) bilden gemeinsam die Blut-Harn-Schranke. Diese besteht aus drei Schichten (> Abb. 1.3 u.):

- Fenestriertes Kapillarendothel: ohne Diaphragma. Ist von einer stark anionischen Glykokalix zur Blutseite hin überzogen. Die Fenster sind bis zu 100 nm weit.
- **Glomeruläre Basalmembran (GBM)**. Setzt sich aus drei Laminae zusammen:
  - Lamina rara interna: zeigt zum Endothel
  - Lamina densa
  - Lamina rara externa: zeigt zu den Podozyten und dem intraglomerulärem Mesangium
- Podozytenfüße und intraglomeruläres Mesangium: Die Podozytenfüße werden ebenfalls von einer stark anionischen Glykokalix – hier in Richtung Harn – überzogen. Die Räume zwischen den Podozytenfüßen, die ca. 40 nm weiten Filtrationsporen, werden von einem **Schlitzdiaphragma**, das überwiegend aus dem Protein **Nephrin** besteht, überbrückt.

Die Blut-Harn-Schranke lässt Moleküle mit einem Durchmesser von bis zu 4 nm durch. Grund hierfür ist die gröÙenselektive Lamina densa der GBM. Daneben lassen sich aufgrund der anionischen Ladungen der Glykokalices besonders neutrale und kationische Moleküle filtrieren. Aufrechterhalten wird die Filtration durch das Druckverhältnis zwischen Kapillaren (55 mmHg) und Kapselraum (15 mmHg).

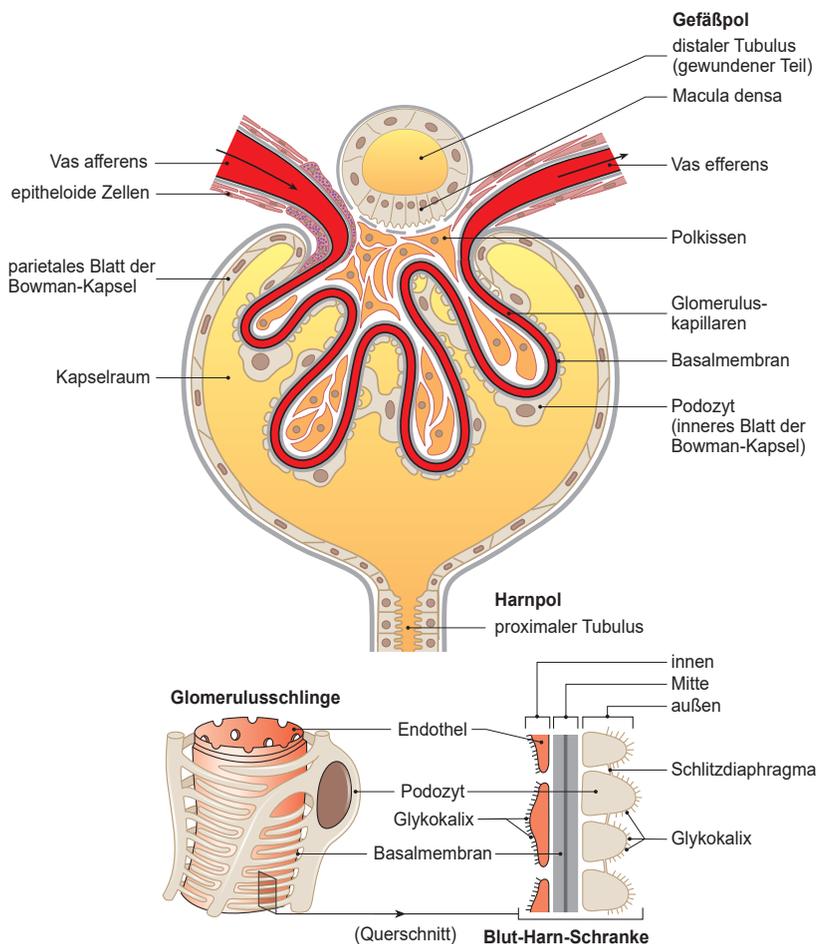
## MERKE

Nierenkörperchen finden sich ausschließlich in der Nierenrinde. Anhand der Lage der Glomeruli unterscheidet man:

- **Kortikale Nephron**: mit kapselnahen Nierenkörperchen
- **Mediokortikale Nephron**: mit Nierenkörperchen in der mittleren Rinde
- **Juxtamedulläre Nephron**: mit Nierenkörperchen in Marknähe.

## Proximaler Tubulus

Die Nierenkanälchen beginnen mit dem **proximalen Tubulus** (> Abb. 1.2), der sich in zwei Teile gliedert, die proximale gewundene **Pars contorta** und die distal gelegene gerade **Pars recta**. Das den proximalen Tubulus auskleidende isoprismatische Epithel besitzt einen dichten Bürstensaum. Das Zytoplasma ist aufgrund des Mitochondrienreichtums azidophil und die Zellgrenzen erscheinen unter dem Lichtmikroskop verwaschen. Unter dem EM ist die starke Fältelung der basalen Zellmembran mit hochkant gestellten Mitochondrien zu erkennen. Entsprechend der vergrößerten



**Abb. 1.3** Nierenkörperchen (o.) und die Blut-Harn-Schranke (u.) [L141]

Membranfläche enthält die Zellmembran eine große Menge an  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPasen. Durch die Fältelung mit den in den Falten liegenden azidophilen Mitochondrien hat der untere Teil des Zellleibs eine basale, azidophile Streifung und wird auch als basales Labyrinth bezeichnet. Daneben findet sich das ultrastrukturelle Korrelat für den Bürstensaum (lange, dicht stehende Mikrovilli), und die einzelnen Epithelzellen sind durch Tight junctions und Zonulae adhaerentes miteinander verbunden. Außerdem lassen sich reichlich Endozytosevesikel, Lysosomen und Peroxisomen als Hinweis auf die Transportaktivität des Epithels sichern.

Im proximalen Tubulus werden dem Primärharn ca. 80% des Wassers parazellulär und transzellulär über Aquaporine entzogen. Daneben werden über einen  $\text{Na}^+$ -Symport Glukose, Aminosäuren, Elektrolyte und Harnstoff aus dem Primärharn zurückgeholt. Im proximalen Tubulus wird unter Einfluss von Parathormon Calcidiol zu Calcitriol umgebaut.

## Intermediärtubulus

Auf die Pars recta des proximalen Tubulus folgt der **Intermediärtubulus**. Seine Epithelzellen sind schlank und flach. Endozytosevesikel, Lysosomen und Mikrovilli finden sich dort kaum. Der Intermediärtubulus dient der weiteren Wasserresorption, parazellulär oder transzellulär über Aquaporine. Er ist im histologischen Schnitt leicht mit Blutkapillaren zu verwechseln (wenn Erythrozyten fehlen).

## Distaler Tubulus

Ihm schließt sich die **Pars recta** und dieser wiederum die **Pars contorta** des distalen Tubulus (> Abb. 1.2) an. Am Übergang beider Abschnitte findet sich die **Macula densa**, die sich dem extraglomerulären Mesangium der Glomeruli anlagert.

Das Epithel des distalen Tubulus ist isoprismatisch und etwas flacher als im proximalen Tubulus. Es zeigt ultrastrukturell nur wenige Mikrovilli und kaum Lysosomen. Dafür hat es eine höhere  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase-Dichte, mehr Tight junctions und ein ausgeprägteres basales Labyrinth im Vergleich zum proximalen Tubulus. Im distalen Tubulus wird  $\text{NaCl}$ , aber kaum Wasser resorbiert.

### MERKE

Der Intermediärtubulus und die beiden geraden Anteile des proximalen und distalen Tubulus werden gemeinsam als **Henle-Schleife** bezeichnet.

## Verbindungstubulus

Der Verbindungstubulus verbindet die Pars recta des distalen Tubulus mit dem Sammelrohr. Das ihn bedeckende Epithel gleicht dem der Sammelrohre.

## Sammelrohr

Das Sammelrohrepithel besteht aus **Haupt-** und **Schaltzellen**, die mittels Tight junctions fest verbunden sind. Die Hauptzellen sind isoprismatisch, ihr Zytoplasma ist hell. ADH-abhängig holen sie mithilfe von Aquaporinen transzellulär Wasser aus dem Harn zu-

rück. Aldosteron steigert den Einbau von  $\text{H}^+/\text{K}^+$ -ATPasen in die basolaterale Membran und von  $\text{Na}^+$ -Kanälen in die apikale Membran der Hauptzellen. Hierdurch steigt die  $\text{Na}^+$ -Resorption und damit indirekt auch die Wasserresorption.

Die etwas dunkleren Schaltzellen, vom Typ A wie vom Typ B, dienen der  $\text{H}^+$ - und  $\text{K}^+$ -Feinregulation. Sie sind mit Mikroplicae besetzt, besitzen viele Mitochondrien und haben in den Membranen eine hohe Dichte an  $\text{H}^+$ - und  $\text{H}^+/\text{K}^+$ -ATPase.

Mehrere Sammelrohre vereinigen sich zu immer größeren Sammelrohren und münden über den **Ductus papillaris** in das Nierenbecken.

## Juxtaglomerulärer Apparat

Der juxtaglomeruläre Apparat umfasst folgende Zellen:

- **Polkissen mit juxtaglomeruläre Zellen:** epitheloide Zellen (spezialisierte Myozyten) zwischen dem Endothel und der Media des Vas afferens
- Palisadenförmige Zellen der Macula densa
- **Goormaghtigh-Zellen:** extraglomeruläre Mesangiumzellen, die zwischen den juxtaglomerulären und den Zellen der Macula densa liegen

Der juxtaglomeruläre Apparat reguliert die  $\text{NaCl}$ -Konzentration (lokal) und den Blutdruck (systemisch). Die Zellen der Macula densa messen die  $\text{Na}^+$ -Konzentration. Ist diese zu hoch, werden die Mediamyozyten des Vas afferens zur Vasokonstriktion stimuliert. Die juxtaglomerulären Zellen sezernieren bei Druckabfall oder Aktivierung durch den Sympathikus im Vas afferens **Renin**, das wiederum das hepatische **Angiotensinogen** in **Angiotensin I** spaltet. Letzteres wird durch das Angiotensinkonversionsenzym (**ACE**) in **Angiotensin II** gespalten, das die Aldosteronsekretion in der Nebennierenrinde erhöht und eine Vasokonstriktion an allen Arterien des Körpers bewirkt. Aus beidem resultiert eine Blutdruckerhöhung.

## Niereninterstitium

Neben Bindegewebe und freien Bindegewebszellen beinhaltet das Interstitium der Niere Nerven, Gefäße und hormonproduzierende Zellen wie die peritubulären Fibroblasten der Rinde, die bei Hypoxie **Erythropoetin** sezernieren. Die Gefäßversorgung jeder Niere erfolgt über eine A. renalis, die sich in Aa. interlobares gliedert, aus denen Aa. **arcuatae** hervorgehen, die parallel zur Rinden-Mark-Grenze verlaufen. Aus diesen ziehen Aa. **corticales radiatae** zur konvexen Oberfläche der Niere empor, aus denen die **Vasa afferentia** entspringen, die zusammen mit den intraglomerulären Kapillaren das **1. Kapillarbett** bilden.

Die postglomerulären **Vasa efferentia** drainieren zum einen direkt über Vv. **corticales radiatae** und zum anderen über lange, in das Mark ziehende **Vasa recta**, die ein **2. Kapillarbett** mit fenestriertem Endothel bilden, in Vv. **Arcuatae**. Diese münden dann über Vv. interlobares in die V. renalis (> Abb. 1.1).

### KLINIK

Entzündliche Erkrankungen der Nierenkörperchen (**Glomerulonephritiden**) führen häufig zu einer erhöhten Durchlässigkeit der Blut-Harn-Schranke für Proteine. Die Folgen sind Hypoproteinämie, Infektanfälligkeit und generalisierte Ödeme.

**CHECK - UP**

- Beschreibe den Aufbau der Blut-Harn-Schranke!
- Was bezeichnet man als juxtaglomerulären Apparat und was ist seine Aufgabe?
- Wo wird Erythropoetin gebildet?

**Jetzt bist du dran!****Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

**1.4 Ableitende Harnwege**

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski

 **Anatomie, Histologie**

Zu den ableitenden Harnwegen zählen die paarigen Nierenbecken, die paarigen Harnleiter, die Blase sowie die Harnröhre.

**1.4.1 Gemeinsame histologische Strukturen**

Die Wandung der ableitenden Harnwege ist dreischichtig:

- Tunica mucosa mit Übergangsepithel und Lamina propria
- Tunica muscularis
- Tunica adventitia, mit Ausnahme des Blasendachs

**Übergangsepithel (Urothel)** Die Tunica mucosa besteht aus **Urothel**, einem Übergangsepithel, das sich den verschiedenen Füllungszuständen anpassen kann. Außerdem dient es als Permeabilitätsbarriere zwischen hypertonem Harn und umliegendem Gewebe.

Urothel findet sich nicht in den gesamten Harnwegen. Es beginnt in den Kelchen des Nierenbeckens und endet im Anfangsteil der Harnröhre. Die oberste Zellschicht bilden die eosinophilen **Deckzellen** (Umbrella cells, Schirmchenzellen), die häufig mehrere Zellkerne besitzen und wohl mit einem Füßchen bis zur Basallamina reichen. Benachbarte Deckzellen sind untereinander durch Haftkomplexe verbunden und bilden damit eine Schranke gegen den aggressiven Harn. Sie selbst schützen sie vor dem Harn durch sog. **Uroplakine**, bei denen es sich um transmembranäre Glykoproteine der zum Lumen hin gerichteten Lipiddoppelschicht der Plasmamembran handelt.

Je nach Füllungszustand verlagern die Deckzellen Teile der apikalen Zytoplasmamembran einschließlich der Uroplakine in Form kleiner Vesikel in das apikale Zytoplasma. Dieses erscheint dadurch im Vergleich zum restlichen Zytoplasma lichtmikroskopisch azidophil und wird häufig als **Crusta** bezeichnet.

**1.4.2 Nierenbecken**

Das Nierenbecken (**Pelvis renalis**) liegt i. H. LWK 1 in der Nierenbucht (**Sinus renalis**). Diese enthält neben dem Pelvis renalis auch Gefäße, Nerven, Lymphbahnen und Fettgewebe. Die 10–30 Papillengänge münden in den Markpapillen (**Papillae renales**), die jeweils von einem Nierenkelch (**Calyx renalis minor**) umschlossen werden. Jeweils zwei Calices renales minores vereinigen sich zu einem **Calyx renalis major**, der dann in das Nierenbecken mündet. Das Nierenbecken verjüngt sich am Nierenhilum zum Harnleiter, über den der Urin weiter zur Harnblase fließt. Prinzipiell lassen sich 2 verschiedene Typen unterscheiden:

- **Ampullärer Typ:** zeichnet sich durch kurze, plumpe Kelche aus, die direkt in ein weites Nierenbecken münden
- **Dendritischer Typ:** hat lange, verzweigte Kelche, die in einem wesentlich kleineren Nierenbecken zusammenlaufen.

Zwischen den beiden Extremformen gibt es verschiedenste Mischformen.

**Feinstruktur**

Die Tunica muscularis ist am Übergang zum Harnleiter sphinkterartig verdickt.

**1.4.3 Harnleiter**

Die **Harnleiter (Ureteren)** liegen retroperitoneal und sind jeweils ca. 25–30 cm lang. Der Durchmesser beträgt etwa 5 mm. Sie transportieren den Harn mittels peristaltischer Wellen vom Nierenbecken zur Harnblase. Auf dem schrägen Weg über den M. psoas major **unterkreuzen** sie die Vasa testicularia beim Mann bzw. die Vasa ovarica bei der Frau, **überkreuzen** die Vasa iliaca communis und **unterkreuzen** den Ductus deferens beim Mann bzw. die A. uterina bei der Frau. Durch den schrägen Eintrittswinkel in die Blasenwand wird ein Verschluss der Ureteren bei Blasenkontraktion gewährleistet.

**MERKE**

Die Ureteren haben **3 physiologische Engen:**

- Abgang des Ureters aus dem Nierenbecken
- Überkreuzungsstelle mit den Vasa iliaca communis
- Durchtritt durch die Harnblasenwand.

Hier bleiben Harnsteine besonders oft stecken.

**Feinstruktur**

Seine Besonderheit ist das sternförmig aussehende Lumen im Querschnitt, welches im entleerten Zustand durch die Mukosa entsteht. Im makroskopischen Längsanschnitt entspricht dies Längs- bzw. Reservefalten für die Füllung. Die Muskularis besteht aus spiralig verlaufenden Muskelzellen in Gestalt einer Ringmuskelschicht, die von einer inneren und äußeren Längsmuskelschicht umgeben ist (dreischichtige Muskularis). Sie ist von reichlich Bindegewebe durchsetzt.

Henrik Holtmann, Christoph Jaschinski, Isa Jauch, Michelle Xi

## Vorklinik Finale 23

# Endokrines System

1. Auflage

**Unter Verwendung von Inhalten von:**  
Oliver Adolph, Ludwig Schlemm



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Endokrines System</b> .....	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>Nebenschilddrüsen</b> .....	<b>31</b>
1.1	Funktionsprinzipien .....	1	6.1	Makroskopischer Aufbau .....	31
1.2	Hormone .....	2	6.2	Feinstruktur .....	31
1.3	Hormonrezeptoren .....	4	6.3	Kalzium- und Phosphathaushalt .....	32
1.4	Endokrine Drüsen .....	7			
<b>2</b>	<b>Epiphyse</b> .....	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>Endokrine Funktionen der Niere</b> .....	<b>35</b>
2.1	Feinstruktur .....	9	7.1	Renin .....	35
2.2	Funktion .....	9	7.2	Erythropoetin (EPO) .....	35
			7.3	Kalzitriol (Vitamin D) .....	35
			7.4	Weitere renale Hormone .....	35
<b>3</b>	<b>Hypothalamus-Hypophysen-System</b> .....	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>Nebenniere</b> .....	<b>37</b>
3.1	Übersicht .....	11	8.1	Entwicklung .....	37
3.2	Feinstruktur .....	11	8.2	Makroskopischer Aufbau .....	37
3.3	Hypothalamus .....	13	8.3	Topografie .....	37
3.4	Regelkreise .....	14	8.4	Blutversorgung .....	37
3.5	Hypothalamische und adenohipophysäre Hormone .....	14	8.5	Feinstruktur der Nebenniere .....	37
3.6	Nichtglandotrope Hormone .....	15	8.6	Nebenniere und Paraganglien .....	39
3.7	Hormone der Neurohypophyse .....	18	8.7	Hormone der Nebennierenrinde .....	39
			8.8	Katecholamine .....	42
<b>4</b>	<b>Endokrines Pankreas</b> .....	<b>21</b>	<b>9</b>	<b>Diffuses neuroendokrines System (DNES)</b> .....	<b>47</b>
4.1	Feinstruktur der Pankreasinseln .....	21	9.1	Aufbau und Bestandteile .....	47
4.2	Insulin .....	21			
4.3	Glukagon .....	24	<b>10</b>	<b>Gewebshormone</b> .....	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Schilddrüse</b> .....	<b>27</b>	10.1	Eicosanoide .....	49
5.1	Entwicklung .....	27	10.2	Biogene Amine .....	50
5.2	Makroskopischer Aufbau .....	27	10.3	Kinine .....	51
5.3	Feinstruktur .....	28	10.4	Stickstoffmonoxid .....	51
5.4	Schilddrüsenhormone .....	28		<b>Register</b> .....	<b>54</b>

# 1

# Endokrines System

## 1.1 Funktionsprinzipien

Isa Jauch, Voraufgabe: Oliver Adolph und Ludwig Schlemm

### Biochemie, Physiologie

Die Kommunikation zwischen Organsystemen und zwischen Zellen eines Organismus ist Grundlage für die Homöostase und ermöglicht eine adäquate Reaktion auf innere und äußere Reize. Das **endokrine System** gehört neben dem **Nervensystem** zu den übergeordneten Regulationssystemen des menschlichen Körpers. Beide steuern zahlreiche Körperfunktionen in einem komplexen Netzwerk aus Neurotransmittern und Botenstoffen. In den letzten Jahren ist die Kenntnis von Rezeptoren, Signalwegen und lokalen Botenstoffen wie Zytokinen und Wachstumsfaktoren stark gewachsen. Oft verschwimmen dabei die Grenzen: So wird z. B. EPO (> Kap. 7.2) in der Niere gebildet und gelangt wie ein Hormon über den Blutweg zu seinen Zielzellen im Knochenmark. Dort besitzt es jedoch typische Wirkungen eines Interleukins und Wachstumsfaktors: Es fördert Zellwachstum und -differenzierung. Die Einteilung der Botenstoffe des menschlichen Körpers ist > Tab. 1.1 zu entnehmen.

Im Vergleich zum Nervensystem, das Signale schnell übermittelt, setzen hormonale Signale verzögert ein und wirken oft länger. Dennoch bestehen zwischen beiden Systemen zahlreiche Verbindungen. Diese finden sich sowohl in den Effektororganen als auch in den höheren Kontrollzentren des ZNS. Die höchste Hierarchieebene bei der Kontrolle der vegetativen Körperfunktionen ist der **Hypothalamus**. Er enthält **neuroendokrine Zellen**, welche auf neuronale Signale hin selbst Hormone produzieren können. Zusätzlich besitzt der Hypothalamus direkte und indirekte Verbindungen zur Hypophyse, die zahlreiche **glandotrope Hormone** produziert. Diese steuern wiederum die Hormonproduktion in endokrinen Drüsen des Körpers, wie der Schilddrüse, den Gonaden, der Leber oder der Nebennierenrinde.

**Endokriner Regelkreis** Regelkreise halten durch eine ständige Überwachung, Kommunikation und Anpassung gewisse Größen im menschlichen Körper konstant (z. B. Körpertemperatur und Blut-pH-Wert) und sorgen für die Regulation lebenswichtiger Körperfunktionen. Das RAAS ist ein Beispiel eines **endokrinen Regelkreises** (> Abb. 1.1). Es stellt u. a. den Blutdruck ein. Wichtige Elemente eines Regelkreises sind:

- **Regelgröße:** Messgröße, die reguliert wird (in diesem Fall der Blutdruck)
- **Sollwert:** physiologischer Zielwert der Regelgröße (wird durch komplexe zentralnervöse und zelluläre Mechanismen eingestellt)
- **Istwert:** derzeitiger Wert der Regelgröße (aktueller Blutdruckwert)
- **Störgröße:** Effekte, die den Wert der Regelgröße verändern (z. B. ein Blutverlust)
- **Sensor:** Rezeptoren zur Detektion des Istwerts (z. B. Zellen der MD)
- **Stellglieder:** physiologische Parameter, welche der Einstellung der Regelgröße dienen (z. B. der Gefäßwiderstand, intravasales Volumen)
- **Stellgrößen:** neuronale oder endokrine Mechanismen, welche die Stellglieder direkt beeinflussen (z. B. die Hormonkonzentrationen von Renin, AT II, Aldosteron im Blut)
- **Negatives Feedback:** Häufig hemmt ein Hormon/Botenstoff am Ende eines hierarchisch gegliederten Systems die Produktion übergeordneter Hormone (z. B. hemmt AT II die Reninproduktion).
- **Positives Feedback:** Seltener führt die Steigerung der Konzentration eines Effektorhormons zur vermehrten Freisetzung eines übergeordneten Hormons, das die Freisetzung des Effektorhormons fördert.

Tab. 1.1 Einteilung der Botenstoffe

Typ	Beispiele	Mechanismus der Signalweiterleitung
Klassische Hormone	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corticotropin-Releasing-Hormon</li> <li>• Thyreotropin</li> <li>• Insulin</li> <li>• Kortisol</li> <li>• Adrenalin</li> <li>• Thyroxin ...</li> </ul>	<b>Endokrin:</b> produziert in endokrinem Organ, Transport über den Blutweg zu diversen Zielorganen
Zytokine <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interleukine</li> <li>• Wachstumsfaktoren</li> <li>• Interferone</li> <li>• Chemokine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IL-1, IL-6</li> <li>• EGF, VEGF, TGF-β</li> <li>• Interferon-α</li> <li>• IL-8, C5b</li> </ul>	Meist produziert von (mobilen) Zellen des Bindegewebes und Wirkung überwiegend lokal: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Parakrin:</b> durch Diffusion auf Zellen der Umgebung</li> <li>• <b>Autokrin:</b> auf die Bildungszelle selbst</li> <li>• <b>Juxtakrin:</b> Botenstoff und Rezeptor sind membrangebunden, kommunizierende Zellen haben eine physische Bindung</li> </ul>

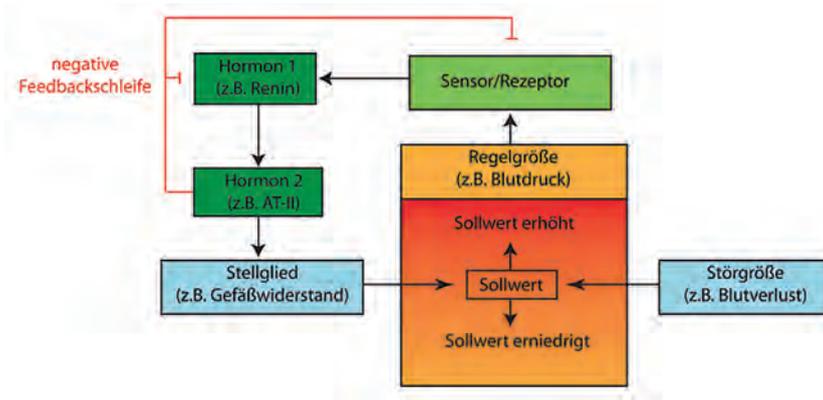


Abb. 1.1 Prinzip eines endokrinen Regelkreises mit der kaskadenartigen Aktivierung mehrerer Hormone [L253]

Jetzt bist du dran!

Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

1.2 Hormone

Isa Jauch, Voraufgabe: Ludwig Schlemm und Oliver Adolph

Biochemie, Physiologie

MERKE

Hormone sind vom Körper gebildete Signalmoleküle, die eine gerichtete Reaktion der Zielzelle auslösen. Die Zielzelle muss hierfür den zum Signalmolekül passenden Rezeptor tragen. Die **Ligand-Rezeptor-Kopplung** erfolgt nach dem **Schlüssel-Schloss-Prinzip**.

Hormone lassen sich anhand ihrer Struktur, ihrer Eigenschaften und ihres Bildungsort unterscheidern und klassifizieren (> Abb. 1.2).

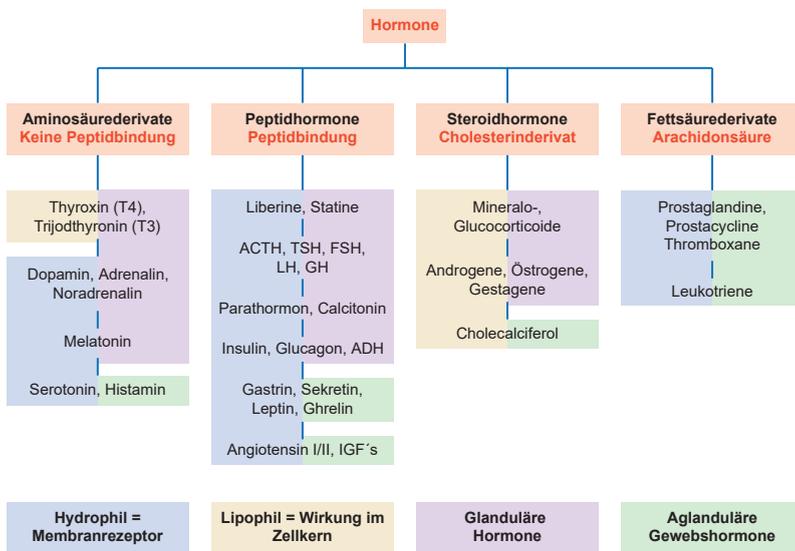


Abb. 1.2 Einteilung der Hormone nach Struktur, Eigenschaften und Bildungsort [L231]

## 1.2.1 Einteilung nach Bildungsort

Je nach Bildungsort unterscheidet man glanduläre und aglanduläre Hormone

### Glanduläre Hormone

**Glanduläre Hormone** werden in spezialisierten, anatomisch definierten endokrinen Drüsen produziert. Über das Blut gelangen sie zu den Zielzellen. Übergeordnete Hormone, die auf endokrine Drüse wirken, nennt man **glandotrope Hormone**.

Endokrine Drüsen sind:

- **Hypothalamus** und **Hypophyse**
- **Schilddrüse** und **Nebenschilddrüsen**
- **Nebennierenrinde** und **-mark**
- Endokriner Anteil des **Pankreas**
- **Gonaden** (Testes und Ovarien)
- Plazenta

Die in Hypothalamus und Nebennierenmark produzierten Hormone werden auch als neurosekretorische Hormone bezeichnet, da sie von spezialisierten Nervenzellen gebildet werden.

### Aglanduläre Hormone

Die aglandulären Hormone oder auch **Gewebshormone** werden von einzelnen, in verschiedenen Geweben verstreuten Zellen gebildet. Beispiele sind Histamin, Serotonin, Prostaglandine, Stickstoffmonoxid und  $\gamma$ -Aminobuttersäure (GABA). Sie wirken meist parakrin oder autokrin, seltener endokrin.

Im **Magen** finden sich beispielsweise **Gastrin**-produzierende G-Zellen, **Somatostatin**-produzierende D-Zellen und **Histamin**-produzierende Enterochromaffin-like-Zellen (ECL-Zellen). Zu den Gewebshormonen zählt auch die große Gruppe der **Zytokine**.

## 1.2.2 Einteilung nach Struktur

Gemäß ihrer chemischen Struktur kann man vier Hormonklassen unterscheiden:

- **Aminosäurederivate**
- **Peptidhormone**
- **Steroidhormone**
- **Fettsäurederivate**

Die strukturellen Unterschiede bestimmen beispielsweise die Halbwertszeit der Hormone und die Transportform im Blut, aber auch die Rezeptorklassen, an welchen die Hormone binden können.

### Aminosäurederivate

Zu den Aminosäurederivaten gehören die **biogenen Amine** Adrenalin, Noradrenalin und Dopamin und die **Schilddrüsenhormone** Thyroxin ( $T_4$ ) und Trijodthyronin ( $T_3$ ). Hinzu kommen Serotonin und Histamin, die aus Tryptophan bzw. Histidin entstehen. Aminosäurederivate haben **keine Peptidbindung**. Außer den Schilddrüsenhormonen wirken alle Hormone dieser Gruppe über **membranständige Rezeptoren**.

### MERKE

**Achtung:**  $T_3$  und  $T_4$  sind lipophil, wirken über **nukleäre Rezeptoren** und werden im Blut proteingebunden transportiert.

### Peptidhormone

Peptid- oder Proteohormone verfügen über **Peptidbindungen** und bestehen aus einer oder mehreren Peptidketten. Häufig werden sie aus größeren Vorstufen durch limitierte Proteolyse gebildet. Peptidhormone werden in Vesikeln gespeichert und bei Bedarf durch **Exozytose** freigesetzt. Ihre Halbwertszeit im Blut beträgt meist wenige Minuten und nur selten länger als eine Stunde und hängt von der Molekülgröße und dem Grad der **Glykosylierung** ab. Sie wirken über **membranständige Rezeptoren**.

### Steroidhormone

Steroidhormone sind **Cholesterinderivate** und besitzen als gemeinsames Strukturelement das aus **17 C-Atomen** bestehende **Sterangerüst**. Entsprechend können sie Membranen passieren und wirken über **nukleäre Rezeptoren** auf ihre Zielzellen. Da sie nicht vesikulär gespeichert werden, müssen sie auf einen Sekretionsreiz hin stets neu produziert werden.

### Fettsäurederivate

**Eicosanoide** (von griechisch εἴκοσι = zwanzig) sind die wichtigsten Vertreter der Fettsäurederivate. Sie entstehen aus der **C-20-Fettsäure Arachidonsäure**. Eicosanoide wirken meist über membranständige, G-Protein-gekoppelte Rezeptoren. Es gibt jedoch auch Eicosanoide, die an den nukleären Rezeptor PPAR- $\gamma$  (Peroxisome Proliferator Activated Receptor Gamma) binden.

## 1.2.3 Hormonbildung

Je nach chemischer Struktur des Hormons erfolgt die Bildung auf typischen Synthesewegen:

- **Biogene Amine** entstehen durch Decarboxylierung aus Aminosäurevorläufern, z. B. Serotonin, Histamin, Dopamin.
- **Schilddrüsenhormone** werden extrazellulär in Follikeln durch Jodierung von Tyrosinresten des Thyreoglobulins synthetisiert.
- **Peptid- und Proteohormone** werden im exozytotischen Pathway synthetisiert und häufig im Golgi-Apparat proteolytisch aktiviert. **Prä-Prohormone** besitzen eine ER-Signalsequenz, die zunächst abgespalten wird. **Prohormone** werden dann in ER und Golgi-Apparat posttranslational modifiziert (z. B. glykosyliert) und durch **Prohormon-Konvertasen** proteolytisch gespalten. Zudem können sie in Granula bis zu ihrer Freisetzung gespeichert werden. Diese Speicherung kann dauerhaft (konstitutiv) erfolgen oder auf spezifische Reize hin (reguliert). Zur effektiven Abgabe ins Blut sind endokrine Organe häufig mit einem dichten, großvolumigen Kapillarnetz (**Sinusoide**) durchzogen.
- **Steroidhormone** werden aus Cholesterin in ER und Zytosol gebildet und besitzen lipophilen Charakter.
- **Fettsäurederivate** entstehen durch Umbauprozesse von Fettsäuren, z. B. Prostaglandine und Leukotriene aus Arachidonsäure.

**Tab. 1.2** Wichtige Transportproteine lipophiler Hormone

Transportprotein	Transportierte Hormone
Albumin	Steroidhormone, Schilddrüsenhormone, Kalzitriol
Retinolbindendes Protein (RBP)	Vitamin A
Transkortin (CBG)	Kortisol, Aldosteron, Progesteron
Sexualhormonbindendes Globulin (SHBG)	Androgene, Östrogene
Transthyretin, Thyroxin-bindendes Globulin (TBG)	T <sub>4</sub> , T <sub>3</sub>
Growth-Hormon-bindendes Protein (GHBP)	Growth Hormon (GH)
Transcaliferin (DBP)	Kalzitriol (Vitamin D <sub>3</sub> )

## 1.2.4 Hormontransport

**Hydrophile Hormone**, wie die meisten Proteohormone mit Ausnahme von Growth Hormon (GH) und Insulin-Like-Growth-Faktor (IGF), können frei im Blut zirkulieren. **Hydrophobe Hormone** wie Steroidhormone oder auch T<sub>4</sub> und T<sub>3</sub> sind selbst in Wasser nicht löslich und müssen deshalb zum Transport im Blut an bestimmte Proteine binden. Diese werden in der Leber produziert. Die Produktion wird reguliert und unterliegt Umweltbedingungen, sodass sich die Konzentration eines Transportproteins im Blut ändern kann. Dies kann die Wirkung des transportierten Hormons beeinflussen, da Hormone nicht an ihre Rezeptoren binden können, während sie noch an ihre Transportproteine gebunden sind. Eine Übersicht über Transportproteine und transportierte Hormone bietet > Tab. 1.2.

## 1.2.5 Hormonaktivierung

Einige Hormone werden als inaktive Vorstufen synthetisiert und transportiert und erst in der Peripherie aktiviert. Hierzu gehört z. B. T<sub>4</sub>, das in seinen Zielzellen durch eine **5'-Dejodase** in das biologisch aktivere T<sub>3</sub> umgewandelt wird. Testosteron wird durch die **5-Reduktase** zu 5-Dihydrotestosteron reduziert.

### CHECK-UP

- Was sind typische Produktionsorte glandulärer Hormone?
- Welche strukturellen Hormonklassen gibt es?
- Über welche Rezeptortypen wirken Peptidhormone und Steroidhormone?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Hormonrezeptoren

Isa Jauch, Voraufgabe: Oliver Adolph und Ludwig Schlemm

### Biochemie, Physiologie

Hormone wirken, indem sie an Hormonrezeptoren der Zielzelle binden. Da die meisten Hormone spezifische Reaktionen in spezifischen Zellen auslösen sollen, ist die Rezeptor-Ligand-Interaktion **hochspezifisch**. Man unterscheidet drei große Rezeptorklassen:

- **Membranrezeptoren**
- **Ligandengesteuerte Ionenkanäle**
- **Intrazelluläre Rezeptoren**

Die Kenntnis der Rezeptoren und ihrer Signalkaskaden spielt v. a. in der Pharmakologie eine wichtige Rolle, da viele Medikamente als Agonisten (z. B. orale Kontrazeptiva, synthetische Insuline) oder Antagonisten (z. B.  $\beta$ -Blocker, Aldosteron-Antagonisten) an Hormonrezeptoren wirken.

### 1.3.1 Membranrezeptoren

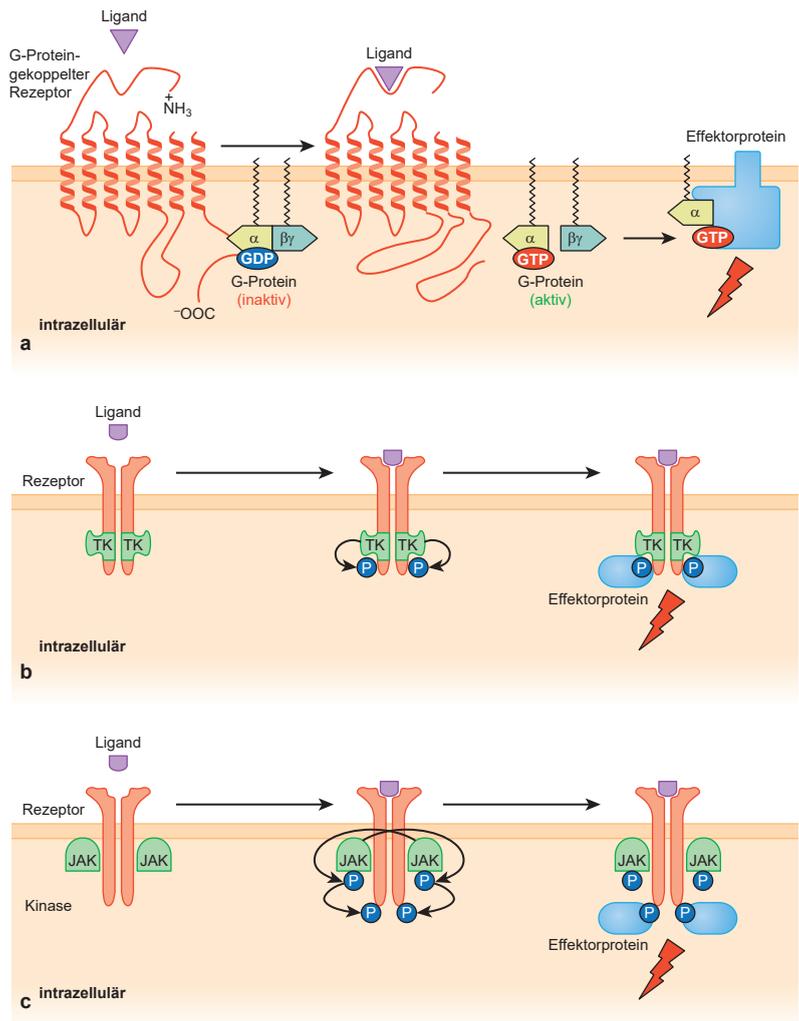
**G-Protein-gekoppelte Rezeptoren** G-Protein-gekoppelte Rezeptoren (GPCR) haben sieben helikale Transmembrandomänen und werden auch heptahelikale Rezeptoren genannt. Sie interagieren mit **heterotrimeren G-Proteinen** im Zellinneren (> Abb. 1.3) und setzen je nach gekoppeltem Protein spezifische Signalkaskaden in Gang.

Beispiele für Hormone, die an GPCR binden, sind: **Katecholamine**, **TSH** (Thyroidea-stimulierendes Hormon), **Gastrin**, **ACTH** (adrenokortikotropes Hormon), **ADH** (antidiuretisches Hormon), **Parathormon** und **Kalzitinin**.

**Rezeptor-Tyrosinkinasen** Rezeptor-Tyrosinkinasen bestehen aus einer extrazellulären Ligandenbindungsstelle, einer Transmembrandomäne und einem **zytosolischen Teil** mit Tyrosinresten und **Tyrosinkinaseaktivität** (> Abb. 1.3). Über das kleine G-Protein **Ras** können entweder mitogenaktivierte Proteinkinasen (MAPK) oder über die Phosphatidylinositol-3-Kinasen (PI3K) die Proteinkinase B aktiviert werden. Oder es kommt zur Aktivierung der PLC $\gamma$ , die wie die PLC $\beta$  PIP<sub>2</sub> in DAG und IP<sub>3</sub> spaltet. Dies führt zur Freisetzung von Ca<sup>2+</sup> und Aktivierung der PKC.

Hormone, die über Rezeptortyrosinkinasen wirken, sind z. B. **Insulin** und **PDGF** (Platelet-derived Growth Factor).

**Rezeptor-Serin-/Threoninkinasen** Nach Ligandenbindung an Rezeptor-Serin/Threoninkinasen werden Serin- und Threoninreste von assoziierten Proteinen phosphoryliert. Dies führt zur Aktivierung von **transkriptionsregulierenden** Proteinen.



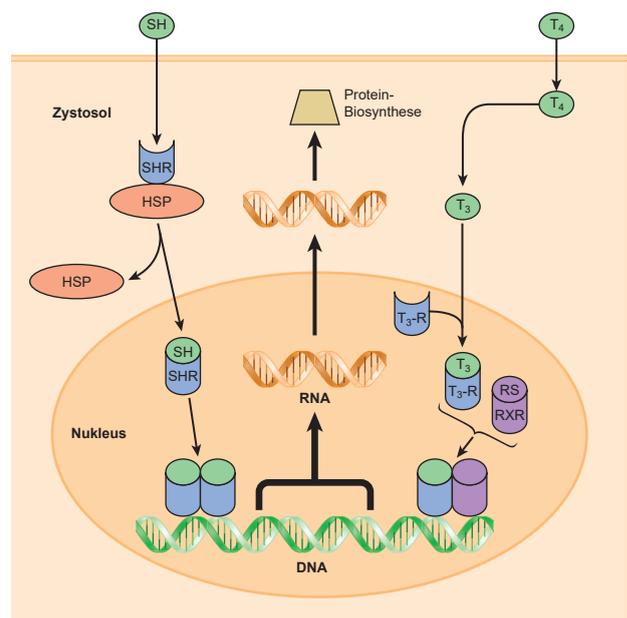
**Abb. 1.3** Membranrezeptoren. **a** G-Protein-gekoppelte Rezeptoren, **b** Rezeptor-Tyrosinkinase, **c** Rezeptor mit assoziierter Tyrosinkinase [L231]  
TK = Tyrosinkinase, P = Phosphat, JAK = Janus-Kinase

Zu den Hormonen, die an Rezeptor-Serin/Threoninkinasen binden, gehört TGF- $\beta$ .

**Assoziierte Tyrosinkinase-Rezeptoren** Die Rezeptoren dieser Gruppe haben die Tyrosinkinaseaktivität nicht selbst inne, sondern sind mit Tyrosinkinasen assoziiert (> Abb. 1.3). Eine dieser assoziierten Kinasen ist beispielsweise die **Januskinase (JAK)**. Auch hier kommt es zur Transkriptionsregulation, z. B. über MAPK und STAT (Signal Transducer and Activator of Transcription).

Beispiele für Hormone, die über assoziierte Tyrosinkinasen wirken, sind das **Wachstumshormon (GH)**, **Prolaktin** und **Erythropoetin**.

**Guanylatzyklase-Rezeptoren** Membranebundene Guanylatzyklasen fungieren als homodimere Rezeptoren für natriuretische Peptide wie **ANP (atriales natriuretisches Peptid)** und **BNP (Brain Natriuretische Peptide)**. Nach Ligandenbindung kommt es zur Aktivierung der Zykaseaktivität und zur Bildung des Second Messenger **cGMP aus GTP**. → Nicht mit der **löslichen Guanylatzyklase (sGC)** verwechseln, die als Heterodimer vorliegt und durch Stickstoffmonoxid (NO) aktiviert wird!



**Abb. 1.4** Intrazelluläre Rezeptoren. Wirkmechanismus von Steroidhormonen und Schilddrüsenhormonen bzw. Kalzitriol [L231]  
SH = Steroidhormon, SHR = Steroidhormon-Rezeptor, HSP = Hitzeschockprotein,  $T_3$ -R =  $T_3$ -Rezeptor, RS = Retinsäure, RXR = Retinsäure-X-Rezeptor

### 1.3.2 Ligandengesteuerte Ionenkanäle

Binden Liganden an Ionenkanäle, verändert sich direkt der Öffnungszustand der Kanäle und es kommt zum verstärkten oder verminderten Ein- oder Ausstrom von Ionen. **Ligandengesteuerte Ionenkanäle** vermitteln daher die schnellste zelluläre Reaktion auf ein Hormon. Auch intrazellulär gibt es ligandengesteuerte Ionenkanäle wie den  $IP_3$ - und den Ryanodin-Rezeptor am glatten ER.

Hormone, die an Ionenkanäle binden, sind **GABA, Serotonin, Acetylcholin** und **Glutamat**.

### 1.3.3 Intrazelluläre Rezeptoren

Intrazelluläre Rezeptoren werden häufig als **nukleäre Rezeptoren** bezeichnet, obwohl manche zunächst nicht im Nukleus, sondern zytosolisch vorliegen. Sie können jedoch auch permanent im Nukleus lokalisiert sein (> Abb. 1.4).

### 1.3.4 Signaltransduktion

Innerhalb einer Zelle regulieren Hormone vielfältige Funktionen:

- Genexpression
- Membranpotenzial
- Enzymaktivität
- Kontraktion
- Sekretion
- Adhäsion

Nachdem ein Hormon seinen Rezeptor gebunden hat, muss das Signal also an seinen spezifischen Wirkungsort in der Zelle gelangen. Dafür müssen die hormonalen Signale intrazellulär verstärkt und weitergeleitet werden. Hierfür ist eine Vielzahl von zellulären Signalmolekülen zuständig, die häufig kaskadenartig aktiviert werden. Daher bezeichnet man die nach Aktivierung eines Rezeptors ablaufende zelluläre Signalweiterleitung und -verstärkung auch als **Signalkaskade**. Bei diesen Kaskaden kommt es typischerweise zur Synthese oder Freisetzung von **Second Messengern** – kleine, lösliche, zytoplasmatische Stoffe, deren Konzentration in Abhängigkeit des Signals schwankt. Zu den Second Messengern gehören cAMP, cGMP,  $IP_3$ , DAG und  $Ca^{2+}$  (> Abb. 1.5).

**Zyklische Nukleotide** cAMP und cGMP werden mithilfe von **Adenylatcyclasen** bzw. **Guanylatzyklen** im Zytosol aus ATP

und GTP synthetisiert. Adenylatcyclasen sind integrale Membranproteine und werden durch  **$G_s$ -Proteine** der Zellmembran aktiviert. **Guanylatzyklen** kommen als zytoplasmatische Domänen in Membranrezeptoren oder **in löslicher Form im Zytosol** vor. Sie werden durch den Botenstoff **Stickstoffmonoxid (NO)** aktiviert, der durch die Zellmembran diffundieren kann. Zyklische Nucleotide können an Enzyme oder Membrankanäle binden und diese in ihrer Aktivität beeinflussen. So aktiviert cAMP die **PKA** und cGMP die **PKG**. Der Abbau erfolgt schnell durch **Phosphodiesterasen (PDE)** zu AMP bzw. GMP.

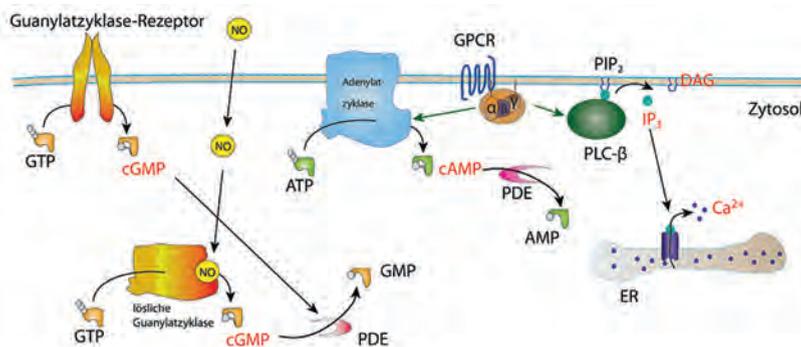
**Inositoltrisphosphat und Diacylglycerol** Aus dem Membranlipid Inositol-4,5-bisphosphat kann durch die **Phospholipase C (PLC)** die Kopfgruppe samt verbindendem Phosphatrest abgespalten werden, sodass  **$IP_3$**  und **DAG** entstehen. Die PLC wird z. B. durch  **$G_q$ -Proteine** aktiviert. DAG kann in der Membran Enzyme (z. B. die Proteinkinase C, PKC) aktivieren.  $IP_3$  diffundiert ins Zytosol und kann am ER  $Ca^{2+}$ -Kanäle öffnen.

**Kalziumionen**  $Ca^{2+}$ -Ionen werden ständig aktiv durch eine Pumpe (**SERCA**) in das ER einer Zelle gepumpt (Konzentration ca. 1 mmol). Sie können bei Bedarf ins Zytosol freigesetzt werden. Hier ist die  $Ca^{2+}$ -Konzentration normalerweise niedrig (ca. 100 nmol), sodass ein hoher Konzentrationsgradient über die ER-Membran besteht. Bei der Öffnung von  $Ca^{2+}$ -Kanälen in der ER-Membran kommt es also zum Fluss von  $Ca^{2+}$ -Ionen ins Zytosol. Ein wichtiger Freisetzungsmechanismus erfolgt über  **$IP_3$** . Im Zytosol können  $Ca^{2+}$ -Ionen eine Vielzahl von Enzymen aktivieren, u. a. über die Bindung an **Calmodulin (CaM)**.

Neben den Second Messengern spielen bei der intrazellulären Signaltransduktion **Proteine** eine wichtige Rolle. Diese übernehmen Funktionen als

- Adapterproteine
- Gerüstproteine
- Kleine G-Protein
- Enzyme (z. B. Kinasen, Phosphatasen, Ubiquitinligasen)
- Transkriptionsfaktoren.

**Kinasen** Eine zentrale Rolle bei der zellulären Signaltransduktion spielt die reversible Phosphorylierung. Dabei werden Phosphatgruppen durch Kinasen von ATP (selten GTP) auf ein Substrat übertragen. Wenn mehrere Kinasen sich hintereinandergeschaltet aktivieren, spricht man von einer Kinasekaskade. Ein Beispiel ist die **Ras-Kaskade**, welche die Proliferation und Zellteilung fördert. Sie wird z. B. durch Insulin und IGF1 über Rezeptor-Tyrosinkinasen in Gang gesetzt.



**Abb. 1.5** Synthese- und Freisetzungswege der wichtigsten Second Messenger [L253]

Gregor Däubler, Thomas Fink, Henrik Holtmann,  
Christoph Jaschinski, Fabian Rengier

**Vorklinik Finale 24**

# **Geschlechtsorgane und Reproduktion**

1. Auflage

Unter Verwendung von Inhalten von:  
Oliver Adolph



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Entwicklung der Geschlechtsorgane</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>Blutgefäße, Lymphgefäße, vegetative Innervation</b>	<b>27</b>
1.1	Gonadenanlage	1	5.1	Arterien	27
1.2	Deszensus der Gonaden	1	5.2	Venen	30
1.3	Genitalwege	2	5.3	Lymphknoten und Lymphgefäße	32
1.4	Äußere Genitalorgane	2	5.4	Vegetative Innervation	32
<b>2</b>	<b>Weibliche Geschlechtsorgane</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>Sexualhormone</b>	<b>35</b>
2.1	Eierstock	5	6.1	Einteilung und Regulation	35
2.2	Eileiter	6	6.2	Allgemeine Wirkungsweise	35
2.3	Gebärmutter	7	6.3	Weibliche Sexualhormone	36
2.4	Scheide	10	6.4	Menstruationszyklus	37
2.5	Äußere Geschlechtsorgane	11	6.5	Androgene	39
2.6	Weibliche Brust	12	<b>7</b>	<b>Sexualität und Reproduktion</b>	<b>41</b>
2.7	Alter	13	7.1	Geschlechtsentwicklung	41
<b>3</b>	<b>Männliche Geschlechtsorgane</b>	<b>15</b>	7.2	Kohabitation und Befruchtung	42
3.1	Hoden	15	7.3	Sexualität	43
3.2	Nebenhoden	17	<b>8</b>	<b>Schwangerschaft und Geburt</b>	<b>45</b>
3.3	Samenleiter	17	8.1	Befruchtung, Furchung und Implantation beim Menschen	45
3.4	Prostata	18	8.2	Hormone	45
3.5	Bläschendrüse	19	8.3	Plazentation	46
3.6	Cowper-Drüsen	20	8.4	Mehrlingsbildung, Mehrfachbildung, Fehlbildung	49
3.7	Littre-Drüsen	20	8.5	Fetus	50
3.8	Glandulae praeputiales	20	8.6	Geburt	51
3.9	Äußere Geschlechtsorgane	21	<b>Register</b>	<b>53</b>	
3.10	Penis	21			
3.11	Alter	22			
<b>4</b>	<b>Angewandte und topografische Anatomie</b>	<b>25</b>			
4.1	Dammregion	25			

# 1

## Entwicklung der Geschlechtsorgane

### 1.1 Gonadenanlage

Christoph Jaschinski



In der 5. EW entwickeln sich medial der **Urnieren** durch Proliferation des Zölomepithels und des darunterliegenden Mesenchyms die **Genitalleisten**.

Beim Mann wandern in diese primären Keimstränge Urkeimzellen (**primordiale Geschlechtszellen**) aus dem Endoderm des Dottersacks ein. Unter dem Einfluss der geschlechtsbestimmenden Region auf dem kurzen Arm des Y-Chromosoms (**SRY-Gen**) differenzieren sich die Genitalleisten ab der 7. EW zu **Hoden**.

Bei der Frau entwickeln sich etwas verzögert – ab der 10. EW – unter dem Einfluss mehrerer autosomaler und gonosomaler Chromosomen aus den Genitalleisten die Eierstöcke.

**MERKE**

Die **Gene** bestimmen die Entwicklung des **gonadalen Geschlechts**.

**Jetzt bist du dran!**

**Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

### 1.2 Deszensus der Gonaden

Christoph Jaschinski



Durch das Längenwachstum des Embryos wandern die Keimdrüsen im Laufe der Entwicklung relativ betrachtet nach kaudal. Als Leitstrukturen dienen dabei die sog. Keimdrüsenbänder.

Beim Mann bildet sich das obere Keimdrüsenband (**Zwerchfellband**) zurück. Das untere Keimdrüsenband (**Gubernaculum tes-**

**Tab. 1.1** Die Hüllen des Hodens als Abkömmlinge der Bauchwand

Hodenhülle	Entspricht in der Bauchwand
<b>Tunica vaginalis testis</b> • Lamina visceralis (Epiorchium) • Lamina parietalis (Periorchium)	Peritoneum • Lamina visceralis • Lamina parietalis
<b>Fascia spermatica interna</b>	Fascia transversalis
<b>M. cremaster mit Fascia cremasterica</b>	M. obliquus internus abdominis mit Faszie
<b>Fascia spermatica externa</b>	Faszie des M. obliquus externus abdominis + äußere Körperfaszie (Fascia investiens superficialis)
<b>Tunica dartos</b>	Tela subcutanea
<b>Skrotalhaut</b>	Bauchhaut

**tis**) leitet den Hoden bei seinem Abstieg aus dem Bauchraum über den Leistenkanal in den Hodensack. Dabei zieht der Hoden einige Gewebeschichten mit sich, sodass sich von innen nach außen eine charakteristische Schichtung ergibt (> Tab. 1.1).

Bei der Frau vollziehen die Eierstöcke auch einen Deszensus, wenn auch nur geringfügig bis ins kleine Becken. Das obere Keimdrüsenband bleibt als **Lig. suspensorium ovarii** erhalten. Das untere Keimdrüsenband wird durch das Lig. latum uteri in 2 Abschnitte geteilt: **Lig. ovarii proprium** und **Lig. teres uteri**.

**KLINIK**

**Maldescensus testis** Bleibt der Hoden in der Bauchhöhle (**Kryptorchismus**) oder im Leistenkanal liegen, werden meistens aufgrund der dort höheren Temperatur keine Spermien gebildet.

**Jetzt bist du dran!**

**Überblick gewinnen**

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.3 Genitalwege

Christoph Jaschinski



Bei der Frau ist der **Ductus paramesonephricus (Müller-Gang)** die Vorläuferstruktur der Genitalwege (> Tab. 1.2). Der Müller-Gang entsteht lateral des Wolff-Gangs aus Zölomepithel. Als Ausstülpung, die nach distal offen ist, überkreuzt er kaudal den Wolff-Gang und fusioniert in der Medianebene mit dem Müller-Gang der Gegenseite. So entsteht der **Uterovaginalkanal**, aus dem sich der Uterus und der obere Teil der Vagina bilden.

Beim Mann entwickeln sich die Genitalwege aus dem **Wolff-Gang**. Treibende Kraft sind dabei die Leydig- und Sertoli-Zellen der männlichen Keimstränge. Leydig-Zellen bilden bis zum 5. EM **Testosteron**, das die Differenzierung des Wolff-Gangs vorantreibt. Danach stellen sie die Testosteronproduktion bis zur Pubertät wieder ein. Sertoli-Zellen produzieren das **Anti-Müller-Hormon**, das zu einer Rückbildung des Müller-Gangs führt.

Tab. 1.2 Entwicklung embryonaler Anlagen bei Mann und Frau

Embryonale Anlage	Mann	Frau
<b>Wolff-Gang</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ductus epididymidis</li> <li>• Ductus deferens</li> <li>• Glandula vesiculosa</li> </ul>	Gartner-Gang (Rudiment)
<b>Müller-Gang</b>	Appendix testis (Rudiment)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fimbriae tubae uterinae</li> <li>• Tuba uterina</li> <li>• Uterus</li> <li>• Vagina</li> </ul>

### KLINIK

Ist die Verschmelzung der Müller-Gänge unvollständig, kann es zu einem **Uterus bicornis** (Uterus mit 2 Hörnern) kommen.

### CHECK-UP

- In welchen Zellen wird Testosteron produziert?
- Welche Strukturen entstehen aus dem Wolff-Gang, welche aus dem Müller-Gang?

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

## 1.4 Äußere Genitalorgane

Christoph Jaschinski



Im Zeitraum der 4.–7. EW formen sich bei beiden Geschlechtern aus der Pars genitalis des Sinus urogenitalis die Vorläuferstrukturen der **äußeren Genitalorgane**: **Genitalhöcker**, **Genitalfalte** (Urethralfalte) und **Genitalwulst**.

Unter dem Einfluss von Testosteron entwickelt sich beim männlichen Embryo aus dem Genitalhöcker die Eichel (Glans penis). **Die Genitalfalten vereinigen sich zur Harnröhre** und die Genitalwülste wachsen zum Hodensack (Skrotum) heran.

Beim weiblichen Geschlecht steht die weitere Entwicklung maßgeblich unter dem Einfluss des Östrogens aus Plazenta und Eierstöcken. Aus dem Genitalhöcker entsteht der Kitzler (Clitoris). Die Genitalfalten differenzieren sich zu den kleinen Schamlippen (Labia minora pudendi) und die Genitalwülste zu den großen Schamlippen (Labia majora pudendi).

### MERKE

Die **Hormone** bestimmen die Entwicklung der Genitalwege und äußeren Genitalorgane (**geschlechtsspezifischer Phänotyp**).

### Jetzt bist du dran!

#### Überblick gewinnen

Notiere dir ca. 5 Stichwörter aus diesem Unterkapitel.

---

**Jetzt bist du dran!**

---

**Zeichenaufgabe**

Skizziere den Rumpf in frontaler Ansicht und zeichne (grob) den Descensus testis in die Skizze ein. Auf welcher Höhe werden die Testes angelegt? Woraus entstehen sie? Wie heißt ihre Leitstruktur?

**Anregungen zur weiteren Wiederholung**

Skizziere in ähnlicher Weise grob den Descensus der weiblichen Gonaden. Wie heißt hier die Leitstruktur?

Lege eine Zeitleiste an (waagrechte Linie, Zeitverlauf von links nach rechts) und markiere die wichtigsten Punkte der weiblichen und männlichen Genitalentwicklung.

**Überblick gewinnen**

Nutze deine gesammelten Stichwörter für eine Mindmap oder eine gegliederte Stichwortliste.

Merle Sophie Schenk

**Vorklinik Finale 25**

# **Medizinstudium: Lernen, Organisation, Physikum**

1. Auflage



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>How to ... Vorklinik</b> .....	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>Lernpläne</b> .....	<b>13</b>
1.1	Die Vorbereitung .....	1			
1.2	Die richtigen Materialien .....	2	<b>4</b>	<b>Kreuzen</b> .....	<b>27</b>
1.3	Lesen und Lernen .....	3	4.1	Filter nutzen .....	27
1.4	Lernumfeld .....	4	4.2	Examen auswählen .....	27
1.5	Work-Life-Balance und Psyche .....	4	4.3	Bearbeitungsstand .....	28
1.6	Time Management .....	4	4.4	Kreuzpläne .....	28
1.7	Die Lerntypen .....	5		<b>Register</b> .....	<b>55</b>
<b>2</b>	<b>How to ... Physikum</b> .....	<b>9</b>			
2.1	Aufbau der Prüfungen .....	9			
2.2	Schriftliche Prüfung .....	9			
2.3	Mündliche Prüfung .....	11			
2.4	Die Prüfungstage .....	12			

Wenn du dieses Heft aufschlägst, dann hast du vermutlich eine Zulassung zum Medizinstudium ergattert, also zunächst einmal: **Herzlichen Glückwunsch!** Das erfordert zumeist sehr viel Fleiß und Ehrgeiz, somit bringst du schon viele wichtige Voraussetzungen mit, um dieses Studium mit Bravour zu meistern!

Dennoch kann man zu Beginn des Studiums recht verunsichert sein. Für die meisten von euch beginnt außerdem ein ganz neuer Lebensabschnitt, welcher viel Selbstständigkeit, besonders im Rahmen des Studiums, erfordert. Darüber hinaus liegen sechs lange und durchaus intensive Jahre vor einem, an deren Ende man hoffentlich seine Approbation erhält.

Hier erstmal ein paar ermutigende Fakten: Die Abbrecherquote im Studiengang Humanmedizin ist gering – gerade einmal 5–10 % der Studierenden brechen das Studium vorzeitig ab (ganz so schlimm scheint es also nicht zu sein). Auch wenn das Physikum die größte Hürde im Studium ist, so bestehen dennoch rund 90 % der Anretenden die erste ärztliche Prüfung pro Durchgang. Die zweite ärztliche Prüfung hat sogar mit Bestehensquoten von rund 97 % eine noch höhere Erfolgsrate.

Wir haben in diesem Heft für dich einige Tipps und Tricks zum Thema Lernstrategien gesammelt, die dir hoffentlich helfen, gut durch die Vorklinik und das Physikum zu kommen. Viel Spaß damit und vor allem viel Erfolg und Freude bei deinem Studium!

### 1.1 Die Vorbereitung

Wie sagt man so schön? Eine gute Vorbereitung ist die halbe Miete. Sehr wahre Worte, insbesondere im Medizinstudium. Was kannst du tun, wenn du dich schon auf deinen Studienstart einstimmen möchtest? Vorab alle Lehrbücher zu kaufen können wir nicht unbedingt empfehlen. Warte hierfür lieber auf die ersten Vorlesungen und die Empfehlungen des Lehrstuhls bzw. deiner Kommiliton\*innen. Hierzu findest du auch noch mehr Hinweise in > Kap. 1.2.

Stattdessen sieh dir lieber an, welche Rahmenwerke das Medizinstudium definieren und welche Inhalte dich erwarten. > Abb. 1.1 zeigt dir eine Übersicht über die Fächer und Strukturierung der Vorklinik.

Es ist auf der anderen Seite absolut sinnvoll, vor dem ersten Tag einen Blick in die zur Verfügung gestellten Lehrmaterialien und den Stundenplan bzw. das **Curriculum** zu werfen. Besonders vor den Praktikumstagen und Seminaren wird eine gewisse Vorbereitung von den Studierenden erwartet. Eine gute Vorbereitung ermöglicht es dir wiederum, mehr aus den Veranstaltungen mitzunehmen.

Wenn du vorab schon etwas zu einem Thema gelesen hast, gibt es dir die Gelegenheit, offene Fragen direkt beim Dozierenden anzusprechen. Außerdem musst du für Praktikumstage häufig Materialien mitbringen und ein Blick ins Skript verhindert, dass du der/ die Einzige ohne Laborkittel im Chemiepraktikum bist.

Veranstaltungen bzw. Rahmenwerk							Kommentar
Physikum (IMPP)							Verpflichtend (Ausnahme: Modellstudiengänge). Schriftliche Prüfung bundesweit einheitlich, mündliche Prüfung durch Prüfer deiner Fakultät
Vorlesungen		Seminare		Praktische Kurse		Prüfungen der Institute: schriftlich und mündlich	Lehr- und Prüfungsveranstaltungen
Anatomie	Biochemie	Physiologie	Biologie	Chemie	Physik	Med. Psychologie, Med. Soziologie	Vorklinische Fächer
Lernzielkataloge der Institute							Unbedingt ansehen! Gibt auch Hinweise für Prüfungen
Studien- und Prüfungsordnung der Fakultät							Sollte man mal gesehen haben: z. B. benötigte Nachweise, Fristen etc.
Gegenstandskatalog (IMPP)			NKLM (Medizinischer Fakultätentag)				Bei Interesse; v. a. für die Fakultäten wichtig zur Gestaltung der Lehre
Approbationsordnung für Ärzte							Die gesetzliche Grundlage, definiert u. a. die Staatsexamensprüfungen, Zulassungsverfahren etc.; Querlesen empfohlen

Abb. 1.1 Übersicht Vorklinik [L307]

Ein genereller Punkt, der für das gesamte Medizinstudium gilt: Wenn es dir hilft, kannst du dir natürlich gerne in den Vorlesungen oder zu Hause zum Wiederholen **Notizen** machen. Jedoch ist der Lernstoff des Medizinstudiums dermaßen umfangreich, dass insgesamt nicht empfohlen werden kann, alles mitzuschreiben, wie das in der Schule meist noch möglich war. Wenn du dennoch etwas handschriftlich mitschreiben möchtest, empfehlen wir dir, dich auf Stichwörter und/oder auf Lerninhalte zu beschränken, die du nicht verstanden hast und auf diese Weise wiederholen möchtest.

Wie du dir außerdem die Lerninhalte am besten näherbringst, zeigen wir in den folgenden Kapiteln.

## 1.2 Die richtigen Materialien

Du sparst dir enorm viel Zeit und Energie, wenn du gleich zu Beginn die richtigen Lernformate aussuchst. Niemand erwartet von dir, dass du eigenständig das gesamte Curriculum lernst. Für das Medizinstudium gilt wahrhaft: **Teamwork makes the dream work!** Von der klassischen Lehre über die weitergegebenen Weisheiten der höheren Semester, Lerngruppen, Skripte, Anatomie-lernkarten und noch vieles mehr: Du hast viele kleine Helferlein und ein ganzes Semester voller Leidensgenossen, mit denen du durchs Studium kommst.

### 1.2.1 Die Universität: Vorlesungen, Vorlesungsfolien und -aufzeichnungen

Die Anfänge eines formal gegliederten Studiengangs Medizin an einer Universität gehen auf das 13. Jahrhundert zurück. Aber keine Sorge, seitdem hat sich das Medizinstudium sowohl inhaltlich als auch didaktisch um einiges weiterentwickelt, und in der Regel ist das medizinische Dekanat sehr bemüht, eine gut konzipierte Lehre anzubieten. Dadurch, dass die Vorklinik jedoch von vielen verschiedenen Instituten koordiniert wird, welche bis auf die vorklinische medizinische Lehre wenige Überschneidungen haben (z. B. die Lehrstühle für Chemie und Anatomie), fallen die Lehrangebote teilweise sehr unterschiedlich aus.

Wir empfehlen grundlegend, die **Vorlesungen** zu Beginn des Semesters zu besuchen und dann individuell zu entscheiden, wie viel man daraus tatsächlich mitnimmt. Da allerdings Dozierende während des Semesters meist wechseln, solltet ihr auch zwischen durch einem neuen Dozenten eine Chance geben!

Außerdem ist es immer, wirklich immer hilfreich, **höhere Semester** zu fragen! Sie haben das ganze schon einmal durchgemacht und können oftmals Tipps geben, welche Lehrveranstaltungen sich lohnen.

Aber auch wenn du dich gegen einen regelmäßigen Besuch der Vorlesungen entscheidest, lohnt sich der Blick in die **Vorlesungsunterlagen oder aufgezeichnete Vorlesungen**. Kleiner Tipp bei so mancher langwierigen Vorlesungsaufzeichnung: Das Video einfach in **1,5- bis 2-facher Geschwindigkeit** abspielen. So bleibt dir auch die Zeit, schwierige Passagen noch mal anzuschauen!

Wie bereits erwähnt, macht es in der Regel wenig Sinn, die gesamte Vorlesung über mitzuschreiben, daher empfehlen wir, die **Vorlesungsfolien** entweder auszudrucken oder auf dem **Tablet** dabei zu haben und so lediglich wichtige Notizen zu ergänzen. Das spart eine Menge Zeit und ihr könnt eure volle Aufmerksamkeit der Vorlesung widmen.

**Tipp!** Schaut euch unbedingt zu Semesterbeginn die **Lernzielkataloge** der Lehrstühle (vgl. > Abb. 1.1) an! Immerhin konzipieren eben diese Lehrstühle auch eure Klausuren im Semester.

### 1.2.2 Lehrbücher: Anatomie-Atlas, großes Lehrbuch, Kurzlehrbuch, Kompendium ...

Von ausführlichen Lehrbüchern über Kurzlehrbücher und Physikumsskripten: Die Auswahl an Lehrbüchern ist riesig! Die meisten Dozierenden geben zwar ohnehin **Lehrbuchempfehlungen** ab und das kann auch sehr hilfreich sein, aber zum Teil wird auch sehr detaillierte und sehr teure Fachliteratur empfohlen, obwohl ein Kurzlehrbuch ebenfalls ausreichen könnte. Daher frag deine Kommiliton\*innen und im Idealfall auch **höhere Semester** nach geeigneten Lehrbüchern.

**Anatomie-Atlanten** Tatsächlich ist die Anschaffung von Anatomie-Atlanten für die allermeisten Studierenden empfehlenswert und man behält diese in der Regel ein Leben lang. Die Anatomie-Atlanten bestehen, wie du es vielleicht schon aus dem Geografieunterricht kennst, überwiegend aus Bildern. Sie sind die Landkarten des Körpers und bestehen aus drei Bänden. Der erste Bildband befasst sich mit knöchernen Strukturen, Muskeln, Bändern und Gelenken. Der zweite Atlas mit dem sogenannten Situs, den Organen, und der dritte Atlas ist der Kopf-Hals-Region und der Neuroanatomie gewidmet. Anatomie lernt sich am besten mit Bildern. Darüber hinaus ist der Atlas besonders für die chirurgischen Fächer, aber auch für die Orthopädie beispielsweise ein wichtiges Nachschlagewerk für den klinischen Studienabschnitt sowie den Klinikalltag, sodass auch viele Ärztinnen und Ärzte im Beruf vor einem operativen Eingriff nochmals die Anatomie wälzen.

**Große Lehrbücher** werden für die „großen“ Fächer Anatomie, Biochemie und Physiologie angeboten und sind hier eine Überlegung wert. Sie erklären ausführlicher, stellen Zusammenhänge dar und geben dir auch Hintergrundwissen mit, das auch im klinischen Abschnitt noch interessant sein kann; außerdem sind weitere Inhalte wie z. B. Angaben zu weiterführender Literatur dabei. Es gibt auch Varianten mit Zusammenfassung in der Randspalte.

**Kurzlehrbücher, Taschenatlanten** und ähnliche sind etwas knappere Formate, die dir die Inhalte erklären, aber den Fokus auf Prüfungsinhalte richten; Hintergrundinfos sind hier spärlicher vorhanden. Meist gibt es auch Markierungen, die auf besonders prüfungsrelevante Inhalte hinweisen.

**Physikumsskripten** fassen die Inhalte fürs Physikum knapp zusammen. Hier geht es um Wiederholung und Fakten, als alleinige Werke zum Erstlernen und Verstehen sind sie weniger geeignet. Es ist trotzdem empfehlenswert, frühzeitig einen Blick reinzuwerfen! Wenn du von vornherein (auch) damit lernst, brauchst du die Inhalte für das Physikum lediglich wiederholen und du weißt bereits, worauf du ein Augenmerk legen solltest. Oft wird einem nämlich in der Vorklinik gesagt: „Das braucht ihr jetzt noch nicht wissen, sondern erst fürs Physikum.“ Dabei ist es doch viel praktischer, alles gleich mitzulernen!

**Weitere Formate** Abgesehen von Büchern gibt es auch spannende Lernkarten für die Fächer Anatomie und Histologie sowie sehr praktische Übersichtsposter, zum Beispiel für die Stoffwechselprozesse der Biochemie, die durchaus eine Überlegung wert sind.

Und jetzt stehst du in der Buchhandlung oder stöberst im Internet und dir bleibt bei den Preisen fast das Herz stehen? Ja, gute Lehrbücher sind leider teuer, aber kein Grund zur Sorge. Die meisten Unis veranstalten jährlich oder jedes Semester einen Bücherbazar, wo du gut erhaltene Bücher und Lernkarten aus zweiter Hand kaufen kannst. Ansonsten kannst du dir einen Großteil der Literatur auch in der Bibliothek ausleihen. Von beliebten Lehrbüchern gibt es gleich ein Dutzend Exemplare. Und wenn du dich für den Neukauf entscheidest, kannst du die Bücher später weiterverkaufen.

### 1.2.3 Die Fachschaft: Fachschaftstutorien, Repetitorien und Fachschaftsskripte

**Fachschaftstutorien** Auch wenn sich die Angebote der Universitäten hier natürlich unterscheiden, gibt es in aller Regel für die vorklinischen Fächer spezielle Fachschaftstutorien, in welchen dir Tutoren aus dem klinischen Abschnitt in kleineren Gruppen den Stoff noch einmal näherbringen. Da die Tutorinnen und Tutoren meist selbst nur wenige Jahre weiter im Studium sind als du, wissen sie oft sehr genau, woran es bei den Studierenden hapert und worauf die Dozierenden Wert legen.

Vor besonders gefürchteten Klausuren werden zum Teil noch mal Crashkurse zur Wiederholung angeboten. Die Tutorien sind nach unserer Erfahrung wirklich überaus empfehlenswert und sehr liebevoll konzipiert.

**Repetitorien** Für das Physikum wird von vielen Fachschaften ein gesondertes Repetitorium über mehrere Wochen angeboten, was dir dabei helfen kann, den Alltag in dieser intensiven Lernzeit zu strukturieren. – Ist aber natürlich nicht für jeden der richtige Weg.

**Fachschaftsskripte** An vielen Unis kursieren Fachschaftsskripte oder auch über viele Semester weitergeschickte Zusammenfassungen von ehemaligen Studierenden oder Lehrenden, welche sehr hilfreich sein können, da sie speziell auf deine Universität und die Lehrenden zugeschnitten sind, allerdings kannst du dich nicht immer auf jedes Detail verlassen. Wie du das in Erfahrung bringst? Du hast es erraten – die höheren Semester!

### 1.2.4 Digitale Angebote

**Plattformen** Das Internet als Lernressource ist schon längst nicht mehr aus dem Medizinstudium wegzudenken. Plattformen wie ClinicalKey Student, ViaMedici und Amboss sind ein allumfassendes Onlinenachschlagewerk für Vorklinik und Klinik. Ein Großteil der Studierenden verwendet spätestens zur Vorbereitung auf die ärztlichen Prüfungen eines dieser Portale. Da die Universitäten auch darum wissen, bieten viele von ihnen mittlerweile eine Campuslizenz an, welche Medizinstudierenden einen kostenlosen Zugang zu einem der Anbieter ermöglicht.

**Audio und Video** Darüber hinaus bieten Youtube, Spotify und viele weitere Onlinedienste Video- und Audioformate zur Vertiefung eures Wissens an. „Ninja Nerd“ ist nur einer von vielen toll konzipierten Youtube Channels, welcher regelmäßig Erklärvideos zu komplizierten Sachverhalten aus Vorklinik und Klinik mit anschaulichen Grafiken veröffentlicht – und dazu noch völlig kostenfrei.

**Anatomie** Speziell für die Anatomie gibt es Complete Anatomy – hier kannst du ein detailliertes virtuelles Modell personalisieren, die Ebenen (Knochen, Muskeln, Gefäße, Nerven, Organe ...) ein- und ausblenden, dir einzelne Elemente erklären lassen, das Ganze frei im Raum drehen usw.

**Merksprüche** Wenn du ein Fan von Merksprüchen, Eselsbrücken und Akronymen bist, dann gibt es auch dafür Webseiten, z. B. eine kostenpflichtige Plattform, auf der in Kurzvideos kleine Geschichten rund um ein medizinisches Thema gesponnen werden. Die Charaktere und ihre Geschichte dienen hierbei als Eselsbrücke, um dir komplizierte Inhalte leichter zu merken. Auch bei anderen Anbietern gibt es Eselsbrücken für Vorklinik und Klinik.

**Weitere kleine Helfer** sind zum Beispiel Websites mit Pomodoro Timer und vielen individuell einstellbaren Features. Mit der Pomodoro-Technik lernst du z. B. 25 Minuten, gefolgt von 5 Minuten Pause. Nach vier Durchgängen gibt es eine längere, 15-minütige Pause. Die Dauer der Lernphasen kannst du selbst festlegen. Weitere Angebote sind Produktivitätshelfer, bei denen du soziale Netzwerke oder andere verlockende Websites für die Dauer deiner Lernphasen blockieren kannst. So kommst du gar nicht erst in Versuchung, etwas anderes zu machen.

## 1.3 Lesen und Lernen

Jetzt hast du endlich die passenden Unterlagen ausgesucht, aber wie gehst du auch richtig damit um? Was ist wichtig, was kann weg? Schau dir zunächst die **Gliederung** an, um dir einen Überblick zu verschaffen. Stell dir die Frage, ob das gewählte Medium überhaupt angemessen ist oder ob es thematisch einen anderen Fokus setzt als für dich relevant.

Dann ist die Frage, ob der **Umfang** der Quelle stimmt. Wenn du nur noch zwei Tage bis zur Prüfung hast, ist ein großes Lehrbuch beispielsweise zu umfangreich und du greifst lieber zum Kurzlehrbuch. Große Lehrbücher mit Randspalte sind zwar ebenfalls sehr ausführlich, jedoch bieten sie in den Spalten am Seitenrand eine knappe Zusammenfassung der wichtigsten Fakten. Selbstredend muss nicht jedes Buch von Anfang bis Ende gelesen und große Lehrwerke können auch zum Nachschlagen einzelner Fragestellungen statt als kontinuierliche Lektüre verwendet werden.

Aber unabhängig von den Unterlagen ist **das aktive Lesen** der weitaus wichtigere Faktor. Wer kennt es nicht, bei mangelnder Konzentration, am Ende einer Seite angekommen zu sein, ohne auch nur ein Wort in Erinnerung behalten zu haben? Hilfreich hierbei kann es sein, wenn du laut vorliest, mit einem Textmarker in der Hand liest, um die wichtigsten Schlagwörter zu unterstreichen, oder versuchst, aus deiner Erinnerung Notizen zu machen.

Wenn du dir **Notizen** machst, etwas farblich markierst oder dir einzelne Inhalte von einer Onlineplattform in ein separates Dokument hineinkopierst, dann sollten es wirklich nur die allerwichtigsten Punkte sein oder aber das, was du noch mal zu einem späteren Zeitpunkt wiederholen möchtest.

**Für mündliche Prüfungen** läuft die Vorbereitung in der Regel anders. Verabrede dich zum Beispiel mit einem **Lernpartner** oder einer ganzen **Lerngruppe**. Das freie Sprechen für Testate zu üben ist ungeheuer wichtig und wird oft unterschätzt. An dieser Stelle sei das MEX-Vorklinik Buch noch erwähnt, welches die wichtigsten Fragen für das mündliche Examen behandelt und eine gute Hilfe zur Prüfungssimulation darstellt.

## 1.4 Lernumfeld

### 1.4.1 Lernzeit

Bist du eher eine Lerche oder eher eine Eule? Jeder hat seinen individuellen Rhythmus und es ist nicht für jeden sinnvoll, bereits um 8 Uhr am Schreibtisch zu sitzen. Wenn du erst in den späten Abendstunden aufblühst, kannst du dir auch feste Lernsessions zu späterer Stunde einplanen. Analysiere in Ruhe deinen Tag und schau, wann du am produktivsten arbeiten kannst. Du hast nach dem Mittagessen immer ein Konzentrationstief? Dann nutze doch diese Zeit für eine Pause oder für alltägliche Erledigungen und fange erst später wieder an, dich an den Schreibtisch zu setzen.

Wenn es dir auch innerhalb einer Lernsession schwerfällt, lange konzentriert zu arbeiten, dann setze dir jeweils kleine Ziele und feste Lern- und Pausenzeiten (> Tab. 1.1). Ob du jetzt alle halbe Stunde, nach 10 Seiten oder 20 Lernkarten eine kurze Pause machst, kannst du für dich ausloten. Einen strukturierten Tag mit festen Zeitvorgaben zu haben, ist jedoch sinnvoll, um das festgelegte Pensum erfolgreich zu meistern. Du kannst dir außerdem überlegen, wie du deine kurzen Pausen am besten nutzt, um wieder mit voller Konzentration in die nächste Einheit zu starten.

Tab. 1.1 Beispielstrukturierung einer Lernsession

Uhrzeit	Inhalte
8.30–9.00	Dünndarm und Dickdarm
9.00–9.10	Pause
9.10–9.30	Leber und ableitende Gallenwege
9.30–9.50	Pankreas und Milz
9.50–10.00	Pause

### 1.4.2 Lernort

Den passenden (und produktivsten!) Lernort zu finden, ist am Anfang nicht einfach. Wenn du leicht abgelenkt wirst oder zu Hause viel Trubel ist, kannst du ausprobieren, in der Bibliothek zu lernen. Da bist du nicht nur konzentriert ohne Ablenkung, sondern auch unter Gleichgesinnten. Für Studierende, die nur ein kleines Zimmer haben, kann die Bibliothek auch eine gute Möglichkeit sein, Lernen/Arbeiten von Entspannung zu trennen. Oder hast du lieber dein eigenes Lernreich am eigenen Schreibtisch?

**Kleiner Tipp** Wenn du beim Auswendiglernen oft im Bett liegst, hinterfrage einmal, ob du dort auch wirklich produktiv bist oder nach kurzer Zeit doch einnickst. Wichtig ist, dass du dich zwar wohl fühlst, aber gleichzeitig auch produktiv sein kannst!

## 1.5 Work-Life-Balance und Psyche

Eine gesunde Work-Life-Balance ist nicht nur für das Medizinstudium, sondern auch für das spätere Berufsleben von großer Bedeutung. Nicht nur ist der Studiengang lang und durchaus zeitintensiv, sondern der spätere Arztberuf meistens mit einem stressigen Berufsalltag, langen Arbeitstagen und einer hohen Verantwortung verknüpft.

Versuche dir frühzeitig einen gesunden Umgang mit dem Stress und einen Ausgleich dazu zu suchen. Das kann alles Mögliche

sein, was dir dabei hilft, abzuschalten: **Sport, Musik, Freunde, Meditation ...** Auch hier kannst du mal darüber nachdenken, was dir wirklich guttut. Du bist konzentrierter, wenn du mehrmals die Woche joggen warst oder mittags lange in der Mensa geplaudert hast? Dann plane diese Dinge als festen Bestandteil deiner Woche mit ein!

Ein Studium zu beginnen und von zu Hause auszuziehen oder auch in eine neue Stadt zu ziehen, kann schon ganz schön viel auf einmal sein. Und dann kommen noch die Klausuren dazu und man hat das Gefühl, es wächst einem alles über den Kopf?

**Sei großzügig mit dir!** Wenn nicht alles auf Anhieb klappt und du mal einen schlechten Tag hast beim Kreuzen, dann versuch dich nicht zu sehr davon runterziehen lassen. Morgen ist auch noch ein Tag!

**Tausch dich mit deinen Kommiliton\*innen aus!** Im Zweifelsfall geht es ihnen ganz genauso und du kannst deine ganzen Sorgen und Bedenken aussprechen. Geteiltes Leid ist halbes Leid!

**Vergleich dich nicht mit anderen!** Natürlich kann man sich ab und zu erkundigen, wie es bei Kommiliton\*innen läuft, jedoch solltest du versuchen, dich nicht zu vergleichen und unter Druck setzen zu lassen, weil andere „weiter“ sind als du oder viel mehr lernen. Jeder lernt anders, hat andere Ansprüche und tut sich bei einem Fach leichter und beim anderen schwerer.

**Feiere Zwischenerfolge** und gönn dir ab und an eine **Belohnung**, denn du kannst stolz auf deinen Fleiß sein! Selbst wenn es „nur“ das erste Anatomie-Testat und noch nicht das ganze Semester oder die gesamte Vorklinik ist? So what? Jeder Schritt bringt dich deinem Ziel näher und verdient eine Belohnung! Zum Beispiel kannst du dir auch nach jedem Lernpaket etwas gönnen – lass es das Lieblingsessen, eine Auszeit oder ein neues Kleidungsstück sein – ganz egal, Hauptsache es zaubert dir ein Lächeln ins Gesicht. Das belohnt dich zum einen für die geleistete Arbeit und motiviert dich zum anderen für das nächste Lernpaket.

**Und falls wirklich mal alles zu viel wird:** In der Regel bietet jede Universität eine **psychologische Beratung** für Studierende an. Und auch der Lehrstuhl ist meist verständnisvoller als man denkt, wenn es darum geht, Veranstaltungen zu verschieben, um sich auch mal Luft zum Durchatmen zu erlauben. Es muss nicht jeder das gleiche Tempo beim Studieren haben!

## 1.6 Time Management

### 1.6.1 Carpe diem

Dein Stundenplan ist voll, du hast noch einen Nebenjob, Freunde, Hobbys und der Tag hat nur 24 Stunden? Versuche, wirklich das Maximum aus deinem Tag rauszuholen und nutze auch „verlorene“ Zeit, wie zum Beispiel unterwegs in der U-Bahn. Hier bietet es sich nicht an, immer ein schweres Buch unterm Arm zu haben, aber ein paar Lernkarten, ein Podcast auf dem Handy oder auch eine Lernapp können unterwegs sehr hilfreich sein, um kleine verschenkte Minuten sinnvoll zu nutzen. Jeden Tag 15 Minuten sind über das Semester verteilt mehrere Lerntage, die du nun anderweitig nutzen kannst!

Hier sind einige Tipps, wo du gegebenenfalls noch Zeit zum Lernen nutzen könntest:

**Sämtliche Reisen** Egal ob nur mit dem Bus zur Arbeit oder die mehrstündige Zugfahrt nach Hause: Immer ein paar Lernkarten dabei haben und bei jeder Gelegenheit rausholen!

**Wartezeiten** Mal wieder eine lange Schlange beim Kaffee holen? Deine Verabredung kommt 15 Minuten später? Schon wieder eine Lernkarte weniger zum Wiederholen.

**Zu Hause** Hänge dir Lernzettel, Post-its und Abbildungen gut sichtbar in deiner Wohnung verteilt auf: am Kleiderschrank, am Badezimmerspiegel zum Wiederholen beim Zähneputzen ... Du kannst dir auch Lernkarten laminieren und mit unter eine lange heiße Dusche oder mit in die Badewanne nehmen – da lernt es sich doch gleich viel leichter!

**Beim Sport** Klingt anstrengend? Probier doch mal, beim Joggen statt der gewohnten Playlist einen Lernpodcast oder eine Vorlesungsaufzeichnung zu hören!

## 1.6.2 Lernpläne

Ein guter Lernplan ist viel Wert – nicht nur, weil er deinen Alltag strukturiert, sondern auch, weil er dir das Gefühl geben kann, dass noch genug Zeit bleibt, diese vielen Themen bis zur Klausur zu schaffen!

Es gibt die drei großen ärztlichen Prüfungen im Regel- und Reformstudiengang Humanmedizin an deutschen Fakultäten. Diese sind vom M1 bis M3 durchnummeriert. In der Regel sprechen die Studierenden jedoch vom Physikum (M1), dem STEX/Staatsexamen (M2) und dem M3 oder dem Mündlichen. Das M1, das Physikum, beinhaltet eine schriftliche und eine mündliche Prüfung, während das M2 ausschließlich schriftlich und das M3 ausschließlich mündlich stattfindet. Das Physikum wird nach vier Semestern Regelstudienzeit am Ende der Vorklinik absolviert, das M2 am Ende des klinischen Abschnitts nach zehn Semestern und das M3 schlussendlich nach dem klinisch-praktischen Jahr und ist somit die letzte Hürde zur Approbation.

Für diese drei großen ärztlichen Prüfungen gibt es Lernpläne aller großen Anbieter wie zum Beispiel den 50- und 30-Tage-Lernplan für das Physikum. Auch in diesem Heft haben wir ein Kapitel speziell zu diesem Thema vorbereitet (➤ Kap. 3).

Aber auch schon während des Semesters und zur Klausurvorbereitung ist ein guter Plan die halbe Miete: Eine grobe Übersicht bieten meist die Studien- und Prüfungsordnung deiner Fakultät. Da die Klausuren vor dem Physikum von deinen Dozierenden konzipiert werden, ist aber vor allem ein Blick in die offiziellen **Lernzielkataloge der einzelnen Lehrstühle** ein heißer Tipp zur Orientierung. Viele Lehrende stellen diese zur Verfügung – und

zum Teil sind schon kleine Hinweise zu der ein oder anderen Klausurfrage dabei!

## 1.7 Die Lerntypen

Jeder von uns lernt und versteht anders. In Anlehnung an die Sinnesorgane des Menschen, die beim Lernen beteiligt sind, spricht man deshalb von auditiven, visuellen, kommunikativen und motorischen Lerntypen nach Vester (➤ Abb. 1.2). Finde für dich raus, welcher Lerntyp du bist, und passe dementsprechend deine Lernmethoden an. Je nachdem kannst du auch ernsthaft hinterfragen, ob du aus den Vorlesungen viel mitnimmst oder den Stoff besser selbst zu Hause verinnerlichst. Viele von euch sind vermutlich mehr als einer Kategorie zuzuordnen und profitieren daher durchaus von einer kunterbunten Mischung der Methoden. Daher schaut am besten alle Tipps durch.

### 1.7.1 Der visuelle Typ

Du bist ein visueller Lerntyp und behältst alles am besten im Gedächtnis, wenn du die Inhalte mit eigenen Augen gesehen hast? Dann sind hier ein paar Tipps für dich, um dein Gedächtnis noch besser zu unterstützen:

**Farben** sind ein großes Stichwort – egal ob farbige Textmarker, bunte Post-its, Mindmaps, bunte Karteikarten oder bunte Bildchen. Sie sind ein Spitzenwerkzeug, um deinem Gedächtnis noch besser auf die Sprünge zu helfen. Hier ein paar Beispiele:

- Du kannst **zusammengehörige Themen** in der gleichen Farbe markieren (z. B. Knochen, Muskeln und Bänder).
- Oder du kannst verschiedene Farben für **wichtige Themen und Key Facts** verwenden.
- Des Weiteren kannst du **wiederkehrende Themen** farblich markieren (z. B. aktivierende Neurotransmitter, inhibierende Neurotransmitter).

**Bilder und Videos** Die Medizin lebt von Bildern, daher ist dies für jeden Lerntyp ein zentrales Thema. Besonders die Anatomie und die Histologie sind durch reine Fließtexte beinahe unmöglich zu lernen. Darüber hinaus kann beispielsweise ein Video von einer orthopädischen Untersuchung dabei helfen, sich die Funktionen von Muskeln besser einzuprägen, oder ein Lernvideo über eine Muskelkontraktion kann die Abläufe im sarkoplasmatischen Retikulum verbildlichen.

## Die 4 Lerntypen

nach Frederic Vester

### Der visuelle Lerntyp:

Farben, Bilder, Grafiken – alles, was anschaulich ist und verbildlicht.



### Der auditive Lerntyp:

Podcasts, Vorlesungen, referieren – alles, was durchs Gehör aufgenommen wird.

### Der kommunikative Lerntyp:

Lerngruppen, Seminare – alles, was den Austausch fördert.



### Der motorische Lerntyp:

Lernen am Modell, im Präparierkurs und am Patientenbett – alles, was praktisch erlebt wird.

Abb. 1.2 Die vier Lerntypen nach Frederic Vester [L307]

**Eselsbrücken** Ob selbst ausgedacht oder vorgefertigt übernommen – nicht für jedermann, aber für viele Studierende sind (bildliche) Eselsbrücken eine immense Merkhilfe.

**Übersichtsposter und Mindmaps** Besonders für den Anfang sehr hilfreich, um einen Überblick zu erlangen, welche Themen relevant sind. Nach einigem Vertiefen sind Mindmaps sehr wertvoll, um den Kontext beispielsweise von Stoffwechselwegen herzustellen.

**Whiteboard** Für dich könnte ein Whiteboard, eine Tafel oder ein großer leerer Zettel ein wirksames Lerntool sein, um deine Gedanken zu verbildlichen. Eine effektive Wiederholung, wenn man mal ein ganzes Hämoglobin oder Cholesterin selbst aufgezeichnet hat, das vergisst man so schnell nicht wieder. Du hast keinen Platz für ein riesiges Whiteboard in deiner Wohnung? Du kannst dir auch spezielle wasserlösliche Stifte kaufen, mit denen du auf die Fenster schreiben kannst. Alternativ gibt es dünne Folien, die du auf der Wand anbringen und somit auch wunderbar als Tafelersatz verwenden kannst.

## 1.7.2 Der auditive Typ

Für dich gilt der beliebte Merkspruch: „Durchs Gehör ins Gehirn“? Dann haben wir für dich genau die richtigen Lerntools, um dich durch die Vorklinik zu bringen.

**Podcasts** Ein beliebtes neues Lernformat, das leider noch nicht ganz so ressourcenreich ist wie die klassischeren Medizinlektüren. Aber nichtsdestotrotz gibt es mittlerweile schon von den gängigen Anbietern sowie Privatnutzern bei Youtube und weiteren Plattformen toll konzipierte Lernsessions in reinem Audioformat. Dein Vorteil: Du kannst sie überall hören und nebenher auch noch die Wohnung putzen oder dich in die Badewanne legen. Aber Vorsicht! Wenn du merkst, dass du dadurch wenig inhaltlich mitnimmst, solltest du es wohl doch bei der Tasse Tee als Nebenaktivität belassen.

**Vorlesungen und Aufzeichnungen** Du könntest ebenso besonders von Vorlesungen profitieren, da dein Gehirn besonders gut verschiedene Stimmen mit den Lerninhalten verknüpfen kann. Nach demselben Schema sind auch sämtliche weiteren Lernvideos ein heißer Tipp für dich.

**Laut vorlesen** Dir die Lerninhalte selbst laut vorzulesen bindet genauso dein Gehör mit ein. Wenn du magst, kannst du dich dabei auch selbst aufnehmen und zu einem späteren Zeitpunkt, vielleicht beim Spaziergang oder beim Kochen, einfach nebenher noch mal abspielen.

**Eselsbrücken** Eine Verknüpfung über den Hörsinn kann auch eine Eselsbrücke oder ein Akronym, aber auch eine Melodie sein. Deiner Kreativität sind keine Grenzen gesetzt. Du könntest auch gleich ein ganzes Lied komponieren, wie es zum Beispiel auch das Periodensystem vertont gibt.

## 1.7.3 Der kommunikative Typ

Du bist der kommunikative Lerntyp? Toll, dann schnapp dir deine Kommiliton\*innen und los geht's!

**Lerngruppen und Study Buddies** Für dich sind Lerngruppen ein essenzieller Bestandteil der Wiederholung! Eine zu große Lerngruppe kann jedoch dazu führen, dass der Einzelne wenig zu Wort kommt, daher halte die Gruppe lieber klein. Ein Treffen zu zweit ermöglicht dir außerdem ein Frage-Pingpong, sodass die Beteiligten gleichermaßen profitieren.

**Fragensimulation aka Selbstgespräche** Wenn du gerade keinen Study Buddy zur Hand hast? Dann simuliere doch einfach ein Gespräch mittels Frage-Antwort-Karteikarten (vielleicht besser zu Hause als im Ruhebereich der Bibliothek). Ansonsten ist die Bibliothek bzw. die Universität ein guter Lernmittelpunkt für dich, da dir hier der meiste Austausch und Dialog ermöglicht werden.

**Seminare und Vorlesungen** Für dich können sämtliche Universitätsveranstaltungen oder auch Fachschaftstutorien besonders hilfreich sein, da du hier die Möglichkeit hast, direkt mit den Lehrenden zu interagieren und Fragen zu stellen.

**Präsentationen** Du kannst auch wunderbar lernen, indem du Lerninhalte wie ein Minireferat vorbereitest und dir selbst oder auch deiner Lerngruppe vorstellst. Wenn dir so etwas Spaß macht, vielleicht hast du ja Lust, selbst Tutor zu werden. Frei nach dem Motto: See one, do one, teach one. Indem du es anderen erklärst, wirst du selbst merken, ob noch irgendwelche Unklarheiten bestehen, und wenn du dann noch die Fragen der anderen beantworten kannst, dann bist du Profi!

## 1.7.4 Der motorische Typ

Der motorische oder auch der haptische Lerntyp nach Vester lernt am besten mit praktischen Ansätzen. Das funktioniert in der Medizin auch wunderbar, da es nach wie vor ein sehr praxinaher Beruf ist. Selbst die Vorklinik lebt von Modellen und Praktika.

**Lernen am Modell** Die meisten medizinischen Bibliotheken haben eine große Auswahl an Modellen für die medizinische Lehre. Da wäre natürlich das klassische Skelett für die Knochen, jedoch gibt es daneben auch Skelette mit eingezeichneten Muskel- und Sehnenansätzen, separate Schädel- und Gehirnmodelle, Situsmodelle, Herzmodelle und so weiter. Dies kann sehr hilfreich sein, um sich die Anatomie sowie Physiologie zu verinnerlichen. Einfach mal eine Sonde nehmen und durch jedes Foramen des Schädels bohren – und schon merkst du dir, wo die Strukturen hinführen.

Für die ganz Kreativen: Modelle kann man auch selbst basteln. Egal ob ein sarkoplasmatisches Retikulum mit Knete oder ein Vierkammermodell des Herzens aus Pappe, dir sind keine Grenzen gesetzt. Du solltest nur beachten, dass der Nutzen tatsächlich die Zeitanforderung nicht überschreitet.

**Das menschliche Modell und Lernen am Patienten** Auch wenn dies insbesondere im klinischen Abschnitt des Studiums relevant ist, könnten dir dennoch Untersuchungen am echten Patienten helfen, bestimmte Sachverhalte der Vorklinik zu verstehen. Beispielsweise hilft dir eine Untersuchung der Rotatorenmanschette in der orthopädischen Ambulanz, die Funktionen und Bewegungsgrade der Muskeln und Gelenke des Schultergelenks ganz einfach selbst herzuleiten, anstelle des mühsamen Auswendiglernens! Wenn du dafür nicht extra ins Krankenhaus gehen willst: Schnapp dir doch einfach mal deinen Kommilitonen und bewege einmal die ganze Schulter durch. Wenn er oder sie es dir erlaubt, könnt ihr auch die Verläufe der großen Armernerven auf die Arme malen!

**Hospitationen** Medizinstudierende sind im Krankenhaus grundsätzlich immer gern gesehen und du kannst in jedem Krankenhaus und jeder Arztpraxis einfach mal auf gut Glück anfragen, ob eine Hospitation möglich ist. Schau doch auch mal im OP vorbei! Selbst für ein paar Stunden kann sich das sehr lohnen! Die Topografie des Abdomens und die intra- und retroperitonealen Lageverhältnisse sind manchmal schwer zu begreifen und da im Anatomiekurs in der Regel zehn bis zwanzig Studierende an einer Leiche herumschneiden, kann dieser Aspekt hier manchmal etwas zu kurz kommen.

**Präparier- und Histosaal** Wie eben schon angesprochen, sind die Leichen während der vorgeschriebenen Präpzeiten dicht umkreist und es ist schwer, sich in Ruhe alles anzuschauen. Daher

verabrede dich doch mal mit einer Kommilitonin im Präpariersaal und erkläre euch gegenseitig die Fußmuskeln oder Ähnliches.

Dies gilt im Übrigen ebenso für den Histosaal. Je mehr Präparate du unter dem Mikroskop siehst, desto leichter wird es dir fallen, Gewebe voneinander zu unterscheiden, sodass dich in der mündlichen Prüfung und im Physikum nichts mehr aus der Bahn werfen kann. Die Histologie gründlich zu lernen kann außerdem nicht schaden, da es im Rahmen der Pathologie auch in der Klinik relevant ist.

**3-D-Modelle** Auch außerhalb der Öffnungszeiten der Anatomie können für dich virtuelle 3-D-Modelle nützlich sein. Informiere dich bei deiner Fakultät, was in dieser Hinsicht angeboten wird.

**Praktika** Du könntest außerdem ganz besonders von Praktikumstagen profitieren. Es empfiehlt sich, diese besonders ausführlich vor- oder auch nachzubereiten, damit du dein theoretisches Wissen direkt anwenden und vertiefen kannst!

**Studentisches Trainingszentrum** An vielen Universitäten gibt es bereits studentische Simulations- und Trainingszentren, in denen Lerninhalte praktische Anwendung finden. Entweder im Rahmen eines Kurses oder auch allein nach dem Seminar, kann hier sogenanntes POL (problemorientiertes Lernen) geübt und können ärztliche Skills trainiert werden. Oftmals fehlt den Studierenden (im Regelstudiengang) in der Vorklinik der klinische Bezug der Lehrinhalte, welcher somit hergestellt werden kann. Dadurch kann auch die Motivation gesteigert werden.

Das Physikum am Ende der Vorklinik kann sehr angsteinflößend erscheinen und meist wirst du auch von höheren Semestern wenig Positives über diese nervenaufreibende und intensive Zeit zu hören bekommen. Daher sagen wir es dir vorab: Mach dich nicht verrückt! Du hast bereits alle Fächer individuell bestanden und vier Semester erfolgreich abgeschlossen – du schaffst das!

## 2.1 Aufbau der Prüfungen

Das Physikum besteht aus einem schriftlichen und einem mündlichen Teil (➤ Tab. 2.1)

Im schriftlichen Physikum werden Biologie, Chemie und Physik als Nebenfächer sowie Anatomie (umfasst neben der makroskopischen auch die mikroskopische Anatomie), Biochemie, Physiologie und die Medizinische Psychologie/Medizinische Soziologie als Hauptfächer geprüft. Die Prüfung findet an zwei aufeinanderfolgenden Tagen statt und umfasst jeweils 160 Multiple-Choice-Fragen pro Prüfungstag. Du hast vier Stunden Zeit, was bedeutet, dass du ca. 90 Sekunden pro Frage Zeit hast.

In der mündlichen Prüfung werden Anatomie (mikroskopisch und makroskopisch), Physiologie und Biochemie geprüft. Eine Prüfungsgruppe besteht in der Regel aus vier Prüflingen und drei Prüfern, jeweils einem pro Fachbereich. Die Prüfung dauert ca. eine Stunde pro Prüfling, für alle drei Fächer zusammen.

**Tab. 2.1** Ablauf der Physikumsprüfung

Das Physikum	Fächer	Fragenanzahl, wichtige Inhalte
Das schriftliche Physikum • 2 Tage • 4 Stunden Prüfzeit pro Tag • 320 Fragen	Anatomie	80 Fragen
	Physiologie	60 Fragen
	Biochemie	60 Fragen
	Med. Psychologie und Med. Soziologie	60 Fragen
	Biologie	20 Fragen
	Chemie	20 Fragen
	Physik	20 Fragen
Das mündliche Physikum • 1 Tag • Etwa 1 Stunde pro Prüfling • Prüfgruppe 1–4 Studierende	Anatomie	Histologische Präparate, Prüfung am Modell, Skelett, an der Leiche
	Physiologie	Ggf. Diagramme zeichnen
	Biochemie	Moleküle aufzeichnen oder erkennen

## 2.2 Schriftliche Prüfung

### 2.2.1 Vorbereitungszeit

Empfohlen werden meist **etwa 60 Tage Vorbereitungszeit bzw. volle Lerntage**. Während das mit Sicherheit ein praktischer Richtwert ist, sind hier jedoch nur bedingt Pausentage und Puffertage eingeplant, falls du nicht jedes Lernpaket an einem Tag schaffen solltest. Plane auch Puffertage für Unvorhergesehenes ein – und lass es nur fehlende Konzentration oder privaten Ärger sein.

Bedenke, dass dir manche Themen leichter fallen als andere, so dass die Vorbereitungszeit allein hierdurch **individuell variiert**. Diesen Aspekt kannst du dir aber auch zunutze machen, indem du kürzere Lerntage oder Themen, in denen du dich bereits gut auskennst, auf Tage legst, an denen du weniger Zeit hast, beispielsweise falls du noch Lehrveranstaltungen besuchen musst. Falls dir nicht mehr genügend Tage bis zur Prüfung bleiben, ist das auch ein guter Weg, um sich doch noch etwas Puffer zu verschaffen.

Wiederholungen sind in den offiziellen Lernplänen lediglich in reduzierter Form integriert. Plane aber unbedingt genügend Zeit für das **Wiederholen am Ende** ein! Du lernst innerhalb kürzester Zeit unwahrscheinlich viel. Damit dein Kopf nicht platzt, rutschen viele Informationen wieder unten durch, da hilft leider nur wiederholen. Um auf der sicheren Seite zu sein, sind, wenn möglich, zwei Wochen Wiederholungszeit zusätzlich durchaus sinnvoll.

Zusammengefasst lässt sich feststellen: Fang lieber früher an, damit du mehr Puffer hast und weniger Stress. Das sagt sich natürlich leichter als es dann schlussendlich mit einem vollen Stundenplan umzusetzen ist.

Versuch daher, deinen Wissensstand realistisch einzuschätzen, ob du auf ein solides Grundwissen zurückgreifen kannst oder ob du ggf. länger brauchst als manch anderer oder ob du besonders stressempfindlich bist. Wenn du es schaffst, jede Woche ab den Semesterferien zwischen drittem und viertem Semester einen Lerntag unterzubringen oder die Basics zu wiederholen, dann wäre das natürlich toll. Aber lass dich davon nicht verunsichern. Für die meisten Studierenden reicht der Zeitraum nach der letzten Klausur bis zum Physikum auch aus.

**Achtung** Die mündlichen Termine stehen in der Regel erst recht spät fest. Die frühesten Termine sind teilweise zwei Wochen vor dem schriftlichen Examen. Und: Auf die Prüfer solltest du dich individuell vorbereiten. Generell ist eine Woche als spezifische Lernvorbereitung auf die mündliche Prüfung (➤ Kap. 2.3) ein grober Richtwert.

# Die Bände der Reihe „Vorklinik Finale“

