5 Gewebe im menschlichen Körper

5.1 Prinzipieller Aufbau eines Gewebes

Nur wenige Zellen, wie z. B. die Blut- oder die Immunzellen, können ihren Aufenthaltsort im Körper verändern. Die meisten Zellen sind in **Zellverbänden** angeordnet und durch Kontakte mit benachbarten Zellen oder umliegenden Strukturen fest an ihrem Platz fixiert. Diese Zellen bilden zusammen mit der Interzellularsubstanz die **Gewebe** des Körpers. Als **Interzellularsubstanz** oder **Extrazellulärmatrix** werden alle Gewebsbestandteile zusammengefasst, die sich zwischen den Zellen befinden. Der Raum zwischen den Zellen, in dem die Interzellularsubstanz liegt, wird als **Interstitium** bezeichnet.

Die verschiedenen Gewebe unterscheiden sich in ihrem **Aufbau**, ihrer **Funktion** und ihrer **Regenerationsfähigkeit**. Unter Regenerationsfähigkeit versteht man die Fähigkeit der Gewebe, Zellverluste durch die Neubildung von Zellen zu ersetzen. Innerhalb eines Gewebes erfüllen die Zellen bestimmte Aufgaben, um die Funktion des Gewebes sicherzustellen. Solche Funktionen können beispielsweise die Gallebildung durch das Lebergewebe oder die Informationsweiterleitung über das Nervengewebe sein.

Histologie • Mit der Funktion und dem Aufbau von Geweben und dessen Zellen beschäftigt sich die **Histologie** (Gewebelehre). Sie geht da ins Detail, wo die Möglichkeiten der makroskopischen Anatomie (makroskopisch: mit bloßem Auge erkennbar) enden. Zusammen mit der Physiologie und der Biochemie trägt die Histologie dazu bei, die Abläufe zu verstehen, die im Körper auf Zell- und Gewebeebene ablaufen.

Organaufbau • Ein Organ setzt sich aus unterschiedlichen Geweben zusammen. Dabei wird dasjenige Gewebe, das für dieses Organ spezifisch und für dessen Funktion verantwortlich ist, in seiner Gesamtheit als **Parenchym** bezeichnet. Das Parenchym wird bei den meisten Organen von einem Stützgewebe durchzogen, dem **Stroma**. Hier verlaufen die Blutgefäße und die Nerven, die das Organ versorgen. Das Stroma trägt **nicht** zur Funktion des Organs bei, sondern gibt ihm seine Form. Bei einigen Organen untergliedert es das Parenchym in kleinere Einheiten, z. B. in Läppchen.

ACHTUNG

*Der Begriff **Interstitium** wird sowohl für die **Zellzwischenräume** innerhalb eines Gewebes benutzt als auch anstelle des Begriffs **Stroma** für das Stützgewebe der Organe.*

Gewebearten • Die unterschiedlichen Gewebearten entwickeln sich im Laufe der embryonalen und fetalen Entwicklung aus den Zellen des Embryoblasten (S. 587).

Nach ihrem Aufbau und ihrer Funktion unterscheidet man **4 Grundgewebearten**:

- Epithelgewebe,
- Binde-, Stütz- und Fettgewebe,
- Muskelgewebe und
- Nervengewebe.

Patho Veränderungen der Gewebe

Gewebe können sich durch Beanspruchung, äußere Einflüsse oder Stoffwechselprozesse verändern. Je nachdem, wie die Veränderung ausfällt, spricht man von:

- ***Hypertrophie:** Durch die Vergrößerung der einzelnen Zellen vergrößert sich auch das Organ bzw. Gewebe. Die Anzahl der Zellen ändert sich nicht. Eine Hypertrophie entsteht z. B. an der Muskulatur durch regelmäßiges Training.*

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

- ***Hyperplasie:*** *Hier nimmt die Zellzahl zu und die Zellgröße bleibt gleich. Ursache können z. B. hormonelle Einflüsse sein. Fällt der Einfluss weg, geht auch die Zellzahl wieder zurück. Eine Hypertrophie und eine Hyperplasie können gemeinsam auftreten.*
- ***Neoplasie:*** *Auch hier kommt es zu einer Gewebeneubildung durch einen Anstieg der Zellzahl. Im Gegensatz zur Hyperplasie verringert diese sich später allerdings nicht mehr. Im klinischen Sprachgebrauch wird der Begriff „Neoplasie" meist für bösartige Tumoren verwendet.*
- ***Atrophie:*** *Hierunter versteht man einen Gewebeschwund. Er kann auf eine Verminderung der Zellzahl, auf eine Verkleinerung der Zellen oder auf beides zurückzuführen sein.*
- ***Metaplasie:*** *Hierbei wandelt sich eine Gewebeart aufgrund einer dauerhaften mechanischen, chemischen, thermischen oder entzündlichen Reizung in eine andere Gewebeart um. So kann starkes Rauchen z. B. dazu führen, dass aus dem Flimmerepithel der Atemwege ein Plattenepithel wird.*

WISSEN TO GO

Gewebe

Ein Gewebe besteht aus einem **Zellverband** und dem Raum zwischen den Zellen, dem **Interstitium**. Im Interstitium befindet sich die **Interzellularsubstanz** oder Extrazellulärmatrix.

Unter **Parenchym** versteht man das Gewebe eines Organs, das für dessen Funktion verantwortlich ist. Es wird meist von einem Stützgewebe (**Stroma**) durchzogen, das das Parenchym gliedert und dem Organ seine Form gibt.

Als Grundgewebearten unterscheidet man Epithelgewebe, Binde-, Stütz- und Fettgewebe, Muskelgewebe und Nervengewebe.

5.2 Epithelgewebe

5.2.1 Aufgaben und Aufbau

Das **Epithelgewebe** bildet die Grenzen zwischen benachbarten Geweben oder zwischen Geweben und Hohlräumen. Es bedeckt die inneren und äußeren Oberflächen von Organen, auch Drüsen sind aus Epithelgewebe aufgebaut. Bei vielen Organen, wie z. B. der Leber, der Bauchspeicheldrüse oder der Lunge, ist das Epithelgewebe für die Organfunktion verantwortlich und stellt damit das Parenchym dar.

Epithelgewebe besitzt prinzipiell eine **gute Regenerationsfähigkeit**. Die Neubildung und das Absterben von Epithelzellen befinden sich im Gleichgewicht. Abhängig vom jeweiligen Epithel sind die Erneuerungszyklen aber unterschiedlich. Die Regeneration des Dünndarmepithels dauert z. B. 2–5 Tage, während die oberste Hautschicht innerhalb von 30 Tagen erneuert wird.

Je nach Lokalisation und Funktion unterscheidet man:
- Oberflächenepithel,
- Drüsenepithel und
- Sinnesepithel.

Alle Epitheltypen haben folgende Gemeinsamkeiten:
- Epithelgewebe enthält bis auf eine Ausnahme im Innenohr **keine Blutgefäße**.
- Die Zellen sitzen sehr dicht, es gibt nur **wenig Interzellularsubstanz**.
- Die Epithelzellen sind untereinander über **Zell-Zell-Kontakte** (S. 73) verbunden.
- Die Zellen sitzen mit ihrer Basis einer extrazellulären **Basalmembran** auf.

Die **Basalmembran** befestigt das Epithel am darunterliegenden Bindegewebe. Sie besteht nicht aus Zellen, sondern aus Proteinen. Dabei bildet sie allerdings keine undurchlässige Grenze: Immunzellen beispielsweise können sie durchdringen, an bestimmten Strukturen der Niere besitzt sie eine Filterfunktion.

WISSEN TO GO

Epithelgewebe

Epithelgewebe kann als **Oberflächenepithel** die Körperoberfläche und die Oberflächen der Organe bilden oder Hohlräume auskleiden. Als **Drüsenepithel** bildet es Drüsen und als **Sinnesepithel** nimmt es Reize auf.

Im Epithelgewebe gibt es keine Blutgefäße und nur wenig Interzellularsubstanz. Es besitzt eine gute Regenerationsfähigkeit.

5.2.2 Oberflächenepithel

Oberflächenepithelien werden auch als **Deckepithel** bezeichnet. Sie **schützen** die darunterliegenden Strukturen vor mechanischen Schäden und erschweren Mikroorganismen den Eintritt in den Körper. Außerdem sind viele Oberflächenepithelien an wichtigen **Transportprozessen**, z. B. für Ionen, beteiligt. Dabei erfolgt der Stofftransport entweder **parazellulär**, d. h. zwischen den Zellen hindurch, oder **transzellulär**, also direkt durch die Zellen.

Oberflächenepithelien bilden die äußere Schicht
- der **Schleimhäute** und kleiden die Hohlräume der Organe aus, z. B. des Magens, des Darms oder der Bronchien,
- der **äußeren Haut** und bedecken als Epidermis die äußere Körperoberfläche,
- der **serösen Häute**, wie z. B. von Bauch- und Lungenfell, und bedecken die Wände der Körperhöhlen.

Unter dem Oberflächenepithel liegt Bindegewebe, das über Diffusionsvorgänge für dessen Ernährung sorgt.

Mikrovilli • Die Zellen einiger Epithelien besitzen an ihrer Oberfläche bis zu 2 µm lange fingerförmige Fortsätze, sog. Mikrovilli. Ein dichter, gleichmäßiger Besatz der Zellen mit Mikrovilli wird als **Bürstensaum** bezeichnet. Durch die Mikrovilli vergrößert sich die Epitheloberfläche, wodurch Transportvorgänge vereinfacht werden.

Stereozilien • Längere Mikrovilli (bis zu ca. 10 µm) heißen Stereozilien. Weiche Stereozilien kommen beispielsweise auf den Epithelzellen des Nebenhodengangs vor. Auch die Sinneszellen im Innenohr besitzen Stereozilien. Diese sind allerdings steif. Sie dienen der Sinneswahrnehmung (**Sinneshärchen**), weshalb dieses Epithel nicht zu den Oberflächen-, sondern zu den Sinnesepithelien gezählt wird.

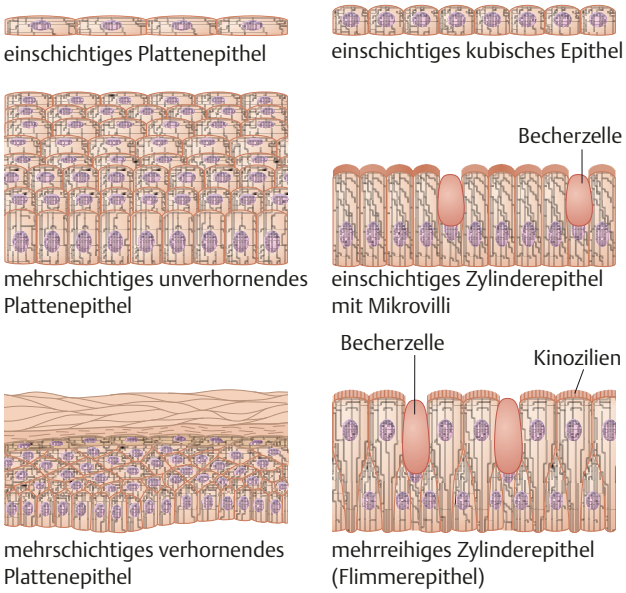
Kinozilien • Auch bei den Kinozilien handelt es sich um Zellfortsätze. Sie sind etwa 5 µm lang und können sich im Gegensatz zu den Stereozilien aus **eigenem Antrieb** bewegen. Sie werden auch als **Flimmerhärchen** bezeichnet, die Epithelien, die sie tragen, auch als **Flimmerepithel**. Solche Epithelien kommen beispielsweise im Eileiter und in den Atemwegen vor und können das Ei bzw. den Schleim der Luftwege aktiv in eine Richtung transportieren.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Tab. 5.1 Beispiele für die Lokalisation verschiedener Oberflächenepitheltypen.

Endotheltyp		Vorkommen (Beispiele)
Plattenepithel	einschichtig	Gefäßsystem (Endothel), Herzinnenräume (Endokard), Körperhöhlen (Mesothel)
	mehrschichtig verhornend	äußere Haut (Epidermis)
	mehrschichtig nicht verhornend	Schleimhäute von Mundhöhle, Speiseröhre, Vagina, Analkanal
kubisches Epithel	meist einschichtig	Nierenkanälchen, Ausführungsgänge von Drüsen
Zylinderepithel	einschichtig	Dünndarmepithel (mit Bürstensaum)
	einschichtig mehrreihig	Flimmerepithel der Atemwege
Übergangsepithel	mehrschichtig	ableitende Harnwege (Urothel)

Abb. 5.1 Einteilung der Oberflächenepithelien.



Die Oberflächenepithelien werden nach der Form ihrer Zellen und der Anzahl ihrer Zellschichten eingeteilt. *Aus: Aumüller G et al.: Duale Reihe Anatomie. Thieme 2017.*

Einteilung der Oberflächenepithelien • Oberflächenepithelien werden unter 2 Gesichtspunkten unterschieden (▶ **Tab. 5.1** und ▶ **Abb. 5.1**):

- nach der Form der beteiligten Zellen (platt, kubisch oder zylindrisch) und
- nach der Anzahl der Zellschichten (einschichtig oder mehrschichtig).

! *Merke* Oberflächenepithelien

Bei der Einteilung nach der Zellform sind immer die Zellen der obersten Epithelschicht ausschlaggebend.

Wenn z. B. die obere Zellschicht aus platten Zellen besteht, handelt es sich immer um ein Plattenepithel, auch wenn die Zellen der darunterliegenden Schichten eine zylindrische Form haben.

Plattenepithel

Die Zellen der Plattenepithelien sind flach, also breiter als hoch. Plattenepithelien können ein- oder mehrschichtig aufgebaut sein (▶ **Abb. 5.1**).

Einschichtiges Plattenepithel • Alle Zellen sitzen der Basalmembran direkt auf. Ein einschichtiges Plattenepithel kleidet z. B. als **Endothel** die Blut- und Lymphgefäße oder als **Endokard** die Vorhöfe und Kammern des Herzens aus. Auch die Lungenbläschen werden innen überwiegend von einem einschichtigen Plattenepithel bedeckt. Als Bestandteil der serösen Häute der Körperhöhlen wird es als **Mesothel** bezeichnet.

Mehrschichtiges Plattenepithel • Hier besteht nur die oberste Zellschicht aus Plattenepithelzellen, die darunterliegenden Zellen haben eine andere Form (▶ **Abb. 5.1**). Die unterste Zellschicht sitzt der Basalmembran auf, hier finden auch die Zellteilungen für den Zellersatz statt. Bei den mehrschichtigen Plattenepithelien unterscheidet man verhornendes und nicht verhornendes Epithel:

- Mehrschichtiges **verhornendes** Plattenepithel besteht meist aus mehr als 10 Zelllagen. Die obere Zellschicht besteht aus toten, kernlosen Zellen. Es bildet die äußerste Hautschicht, die Epidermis (S. 548). Es schützt insbesondere vor mechanischer Beanspruchung und Austrocknung.
- Mehrschichtiges **nicht verhornendes** Plattenepithel ist aus 5–20 Zellschichten aufgebaut, auch die Zellen der oberen Schicht besitzen noch einen Zellkern. Die Zellen sind untereinander durch eine Vielzahl von Desmosomen (S. 73) verbunden. Auch dieser Epitheltyp schützt vor Verdunstung und sorgt dafür, dass die inneren Körperoberflächen feucht gehalten werden.

Kubisches Epithel

Die Zellen des kubischen Epithels besitzen eine annähernd quadratische Form (▶ **Abb. 5.1** und ▶ **Abb. 5.2**), weshalb diese Epithelform auch als **isoprismatisches Epithel** bezeichnet wird. Das Epithel ist meist **einschichtig** aufgebaut.

Zylinderepithel

Weil seine Zellen höher als breit sind, wird das Zylinderepithel auch **hochprismatisches Epithel** genannt. Genauso wie das kubische Epithel kommt es meist als **einschichtiges** Epithel vor. Viele Zylinderepithelien bestehen aus unterschiedlichen Zelltypen und sind häufig mit einem Bürstensaum ausgestattet oder als Flimmerepithel angelegt (▶ **Abb. 5.1** und ▶ **Abb. 5.3**). Das Epithel des Dünndarms z. B. besitzt einen Bürstensaum und enthält neben den Epithelzellen auch Becherzellen, die Schleim bilden.

Beim **mehrreihigen Epithel** handelt es sich um eine Sonderform des einschichtigen Zylinderepithels, dessen Zellen zwar alle der Basalmembran aufsitzen, aber unterschiedlich hoch sind. Deshalb reichen nicht alle Zellen bis an die Epitheloberfläche. Diejenigen Zellen, die die Oberfläche erreichen, sind für die Funktion des Epithels verantwortlich, die niedrigen Basalzellen bilden die Grundlage für die Zellerneuerung. Ein

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Abb. 5.2 Einschichtiges kubisches Epithel.



Die Zellen des kubischen Epithels sind nahezu quadratisch. Zu sehen ist ein Querschnitt durch das Sammelrohr einer Niere (Färbung: Hämalaun-Eosin, 400-fach vergrößert). *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

Beispiel für ein mehrreihiges Zylinderepithel ist das Flimmerepithel der Atemwege, bei dem diejenigen Zellen, die bis an die Oberfläche reichen, die Kinozilien tragen.

Übergangsepithel

Weil das Übergangsepithel die harnableitenden Wege auskleidet, wird es auch als **Urothel** bezeichnet. Dabei handelt es sich um ein **mehrschichtiges** Oberflächenepithel aus 3–8 Schichten. Im Gegensatz zum mehrschichtigen Plattenepithel besteht die obere Zellreihe, die sog. **Deckzellen**, im entspannten Zustand aus eher kubischen Zellen (▶ **Abb. 5.4**). Das hat den Vorteil, dass das Epithel gedehnt werden kann. Diese Fähigkeit ist v. a. in der Harnblase wichtig, die – je nachdem, wie stark sie gefüllt ist – eine unterschiedliche Größe haben kann. Die Größenanpassung ist nur dann möglich, wenn ihr Oberflächenepithel **dehnbar** ist. Dehnt sich das Urothel, weil sich die Blase füllt, wird es insgesamt flacher. Insbesondere die Deckzellen nehmen dabei an Höhe ab und an Breite zu.

WISSEN TO GO

Oberflächenepithel

Oberflächenepithelien (**Deckepithelien**) bilden die äußere Schicht der Schleimhäute, der äußeren Haut und der serösen Häute. Sie **schützen** die darunterliegenden Strukturen und sind am **Ionentransport** beteiligt. Die Zellen der Oberflächenepithelien bilden häufig kleine Fortsätze aus:

- **Mikrovilli:** dichte kurze (2 µm) Fortsätze, sie bilden den **Bürstensaum**.
- **Stereozilien:** längere Mikrovilli (bis 10 µm), sie können weich oder steif (**Sinneshärchen**) sein.
- **Kinozilien:** Fortsätze mit ca. 5 µm Länge, die sich selbstständig bewegen können (**Flimmerhärchen**).

Nach der Form der Zellen der obersten Epithelschicht unterscheidet man:

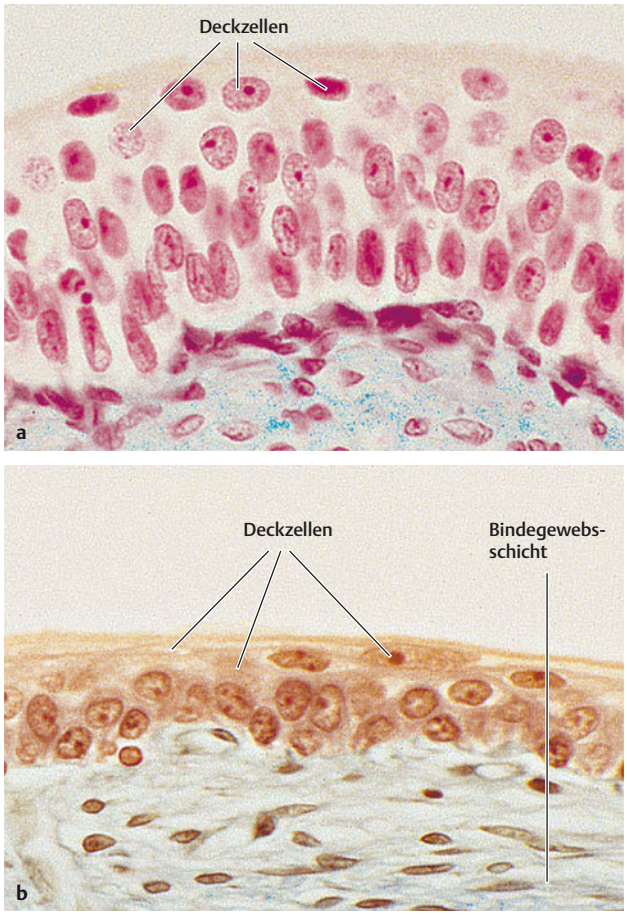
- **Plattenepithel:** Es kann ein- oder mehrschichtig sein, die oberen Zellen sind platt. Bei mehrschichtigen Plattenepithelien können die oberen Schichten verhornen, wie z. B. bei der äußeren Hautschicht, oder auch nicht, wie bei den Schleimhäuten.
- **kubisches Epithel:** Es ist meist einschichtig, die oberen Zellen sind nahezu quadratisch.

Abb. 5.3 Einschichtiges Zylinderepithel.



Die Zellen des Zylinderepithels sind höher als breit. Dargestellt ist das Epithel des Zwölffingerdarms. Es besitzt einen Bürstensaum und eingelagerte Becherzellen (Färbung Azan, 400-fach vergrößert). *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

Abb. 5.4 Übergangsepithel.



Übergangsepithel in ungedehntem (**a**) und in gedehntem (**b**) Zustand. Durch die Dehnung verlieren die Deckzellen ihre kubische Form und werden platt, das gesamte Epithel nimmt an Dicke ab. Dargestellt ist ein Schnitt durch die Harnblase einer Katze (Färbung: Azan, 400-fach vergrößert). *Aus: Asan E, Lüllmann-Rauch R: Taschenlehrbuch Histologie. Thieme 2019.*

- **Zylinderepithel:** Es ist meist einschichtig, die oberen Zellen sind höher als breit. Häufig sind sie mit einem Bürstensaum oder Flimmerhärchen ausgestattet.
- **Übergangsepithel:** Es ist mehrschichtig und besitzt eine gewisse Dehnbarkeit. Es kommt v. a. in der Harnblase vor und wird auch als Urothel bezeichnet.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

5.2.3 Drüsenepithelien

Drüsenepithelien bestehen hauptsächlich aus **Drüsenzellen**. Die Hauptaufgabe einer Drüsenzelle besteht darin, ein **Sekret** zu bilden und es abzugeben. Zu diesen Sekreten zählen beispielsweise Milch, Schweiß, Hormone oder Talg.

Je nachdem, wohin das Sekret abgegeben wird, unterscheidet man (▶ **Abb. 5.5**):

- **exokrine Drüsen:** Sie haben eine Verbindung zur Organ- oder Körperoberfläche und geben ihr Sekret daher **nach außen** ab. Zu den exokrinen Drüsen zählen beispielsweise die Speicheldrüsen, der Teil der Bauchspeicheldrüsen, der die Verdauungssäfte herstellt, und die Schweißdrüsen.
- **endokrine Drüsen:** Sie geben das Sekret in das umliegende Bindegewebe ab, von wo aus es über die **Blutbahn** abtransportiert wird. Die meisten hormonproduzierenden Organe zählen zu den endokrinen Drüsen, z. B. das Inselorgan der Bauchspeicheldrüse, die Schilddrüse, der Hypophysenvorderlappen oder die Nebennieren.

Neben den Drüsenzellen enthalten einige Drüsenepithelien, wie z. B. die Brust- und die Schweißdrüsen, auch **Myoepithelzellen**. Sie ähneln den Glattmuskelzellen und sind untereinander und mit den Drüsenzellen über Zellkontakte verbunden. Wenn sie sich zusammenziehen, wird das Sekret aus den Drüsenzellen gepresst.

Exokrine Drüsen

Bei den meisten **exokrinen Drüsen** besteht jede Drüse aus mehreren Drüsenzellen, die innerhalb des Drüsenepithels in einer bestimmten Form organisiert sind: Mehrere Drüsenzellen umgeben gemeinsam einen Hohlraum, in den sie ihr Sekret abgeben. Dieser sekretproduzierende Anteil der Drüse wird als **Drüsenendstück** bezeichnet. Das Drüsenendstück liegt meist im Bindegewebe unter dem Epithel, mit dem es über einen **Ausführungsgang** verbunden ist. Über den Ausführungsgang gelangt das Sekret aus dem Endstück auf die Organ- oder Körperoberfläche.

Allerdings gibt es auch **exokrine Einzelzelldrüsen**. Bei diesen Drüsen sind nicht mehrere Drüsenzellen zu einer Drüse organisiert, sondern jede Drüsenzelle stellt eine eigene Drüse dar. Hierzu zählen beispielsweise die **Becherzellen**, die in der Schleimhaut der Atemwege liegen und Schleim produzieren.

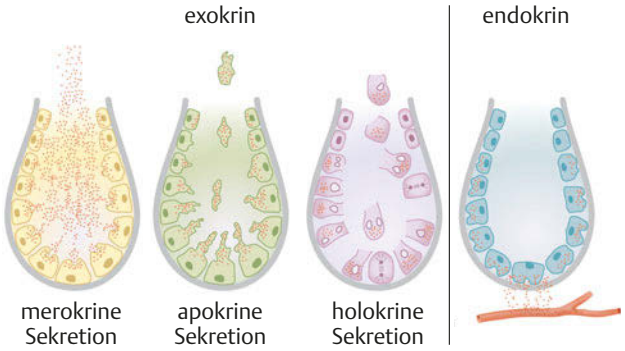
Exokrine Drüsen können unter verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden:

- Anzahl der Ausführungsgänge
- Form der Endstücke
- Sekretionsart
- Art des Sekrets

Anzahl der Ausführungsgänge • Je nachdem, ob eine Drüse nur einen oder mehrere Ausführungsgänge besitzt, spricht man von (▶ **Abb. 5.6**):

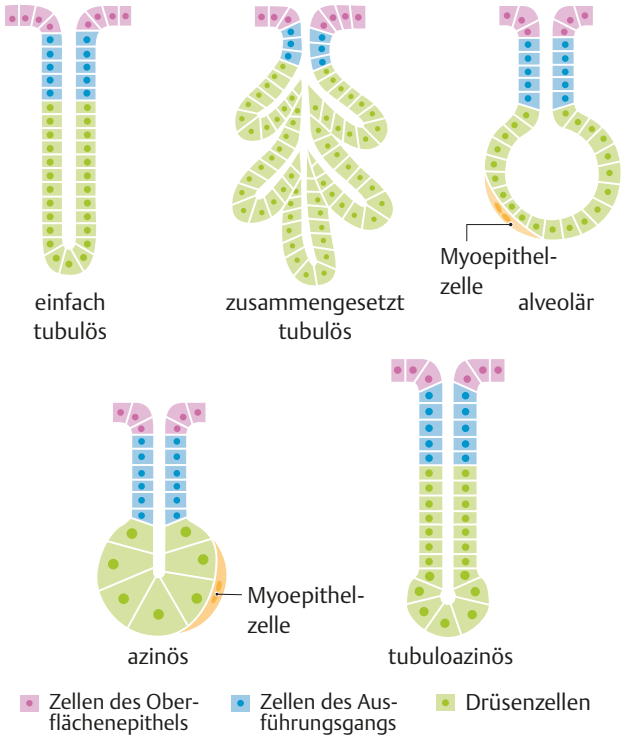
- **einfachen Drüsen:** Sie besitzen nur 1 Ausführungsgang, der allerdings auch fehlen kann. Dann mündet das Endstück direkt auf der Oberfläche. Geben mehrere Endstücke ihr Sekret in diesen 1 Ausführungsgang ab, spricht man von **verzweigten Drüsen**.
- **zusammengesetzten Drüsen:** Diese Drüsen haben eine baumartige Struktur. Sie bestehen aus mehreren Endstücken, die zunächst in verschiedene Gänge münden. Die Gänge vereinigen sich später zu einem gemeinsamen Ausführungsgang.

Abb. 5.5 Exokrine und endokrine Sekretion.



Bei der **exokrinen Sekretion** wird das Sekret an eine Oberfläche, also nach außen abgegeben. Je nachdem, wie das genau geschieht, unterscheidet man die holokrine, apokrine und merokrine Sekretion. Die ekkrine Sekretion ist nicht dargestellt. Bei der **endokrinen Sekretion** gelangt das Sekret in das umliegende Bindegewebe und wird über die Blutbahn weitertransportiert. *Aus: Aumüller G et al.: Duale Reihe Anatomie. Thieme 2017.*

Abb. 5.6 Einteilung der exokrinen Drüsen.



Exokrine Drüsen werden nach der Anzahl ihrer Ausführungsgänge und nach der Form ihrer Endstücke eingeteilt. Grün: Zellen des Drüsenendstücks. Blau: Zellen des (gemeinsamen) Ausführungsgangs. Lila: Zellen des Oberflächenepithels. *Aus: Endspurt Vorklinik Histologie. Thieme 2017.*

Form der Endstücke • Die Endstücke der exokrinen Drüsen können unterschiedlich geformt sein. Je nach Gestalt unterscheidet man (▶ **Abb. 5.6**):

- **tubulöse Drüsen** mit einem schlauchförmigen Endstück,
- **azinöse Drüsen** mit einem beeren- oder kugelförmigen Endstück, das nur einen kleinen Hohlraum besitzt,
- **alveoläre Drüsen** mit einem bläschenförmigen Endstück, dessen Innenraum geräumiger ist als bei den azinösen Drüsen.

Mit den tubuloazinösen und den tubuloalveolären Drüsen gibt es auch Mischformen zwischen den Drüsentypen.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Sekretionsart • Das Sekret kann auf unterschiedlichen Wegen die Drüsenzelle verlassen (▶ **Abb. 5.5**):

- **merokrine Sekretion:** Das Sekret verlässt die Zelle durch Exozytose (S. 78), die Zelle bleibt dabei intakt. Diese Art der Sekretion kommt v. a. bei Drüsen mit einem proteinhaltigen Sekret vor.
- **ekkrine Sekretion:** Hier werden die Ionen des Sekrets aktiv ausgeschleust und das Wasser folgt osmotisch nach. Schweißdrüsen nutzen diese Art der Sekretion.
- **apokrine Sekretion:** Die Drüsenzelle schnürt, um das Sekret abzugeben, ein Stück Zytoplasma und einen Teil der Zellmembran ab. Diese Sekretionsart findet sich z. B. bei der Brustdrüse oder den Ohrschmalzdrüsen.
- **holokrine Sekretion:** Bei dieser Sekretionsart stirbt die gesamte Zelle ab. Das Sekret setzt sich bei diesen Drüsen aus den Zellresten und den zuvor von der Zelle produzierten Substanzen zusammen. Die holokrine Sekretion kommt bei Talgdrüsen vor.

Zusammensetzung des Sekrets • Drüsensekrete bestehen hauptsächlich aus Wasser, Ionen, Proteinen und Schleimstoffen (Muzinen). Je nachdem, wie sie genau zusammengesetzt sind, unterscheidet man:

- **seröse Drüsen:** Ihr Sekret ist sehr wasserhaltig und dadurch dünnflüssig und proteinreich. Meist sind es azinöse Drüsen. Seröse Drüsen liegen z. B. in der Bauchspeichel- oder der Ohrspeicheldrüse.
- **muköse Drüsen:** Ihr Sekret ist reich an Muzinen und dadurch zähflüssig. Ihre Endstücke sind tubulös. Zu den mukösen Drüsen zählen z. B. die Becherzellen oder die Unterzungenspeicheldrüse.
- **seromuköse Drüsen:** Ihre Endstücke enthalten sowohl Zellen, die ein seröses Sekret abgeben, als auch solche, die ein muköses Sekret bilden. Die Endstücke sind meist tubuloazinös. Zu diesen Drüsen zählt z. B. die Unterkieferspeicheldrüse.

Endokrine Drüsen

Endokrine Drüsen besitzen **keine Ausführungsgänge**, da sie ihr Sekret an ihre direkte Umgebung abgeben. Bei den meisten endokrinen Drüsen handelt es sich um **Hormondrüsen**. Die freigesetzten Hormone wirken entweder direkt am Ort ihrer Freisetzung oder werden über das Blut zu ihrem Zielort transportiert (S. 280).



WISSEN TO GO

Drüsenepithelien

Drüsenepithelien bestehen aus sekretbildenden **Drüsenzellen**, einige enthalten zusätzlich **Myoepithelzellen**.

Man unterscheidet **exokrine Drüsen**, die ihr Sekret nach außen abgeben, von **endokrinen Drüsen**, die ihr Sekret in das umgebende Bindegewebe abgeben, von wo es über die Blutbahn abtransportiert wird.

Eine **exokrine Drüse** besteht aus einem **Drüsenendstück**, in dem das Sekret gebildet wird, und einem oder mehreren **Ausführungsgängen**. Je nach Form des Endstücks unterscheidet man **tubulöse** (schlauchförmige), **azinöse** (kugelförmige) und **alveoläre** (bläschenförmge) Drüsen.

Nach der Beschaffenheit ihres Sekrets teilt man die Drüsen in **seröse Drüsen** mit einem dünnflüssigen Sekret, **muköse Drüsen** mit einem zähflüssigen Sekret und **seromuköse Drüsen** mit einem gemischten Sekret ein.

Endokrine Drüsen besitzen keinen Ausführungsgang.

5.2.4 Sinnesepithelien

Bei den Sinnesepithelien handelt es sich um spezielle Epithelzellen, die in der Lage sind, Sinnesreize aufzunehmen und an das zentrale Nervensystem weiterzuleiten. Zu diesen Sinneszellen gehören zum Beispiel die Geschmacksknospen der Zunge, die Riechschleimhaut in der Nase und die Rezeptoren in der Haut. Sie werden näher in Kap. 15 besprochen.

5.3 Binde-, Stütz- und Fettgewebe

5.3.1 Aufgaben und Aufbau

Die **Binde-, Stütz-** und **Fettgewebe** erfüllen im Körper unterschiedliche Aufgaben. Sie bilden beispielsweise:

- die Stützstrukturen des Körpers, wie z. B. das Skelett,
- das Stroma der Organe und gliedern dadurch das Parenchym,
- die Organkapseln, z. B. der Niere und der Milz, und
- den Raum für den Stoffaustausch durch Diffusion.

Wie die Epithelgewebe haben auch viele Binde-, Stütz- und Fettgewebe eine **gute Regenerationsfähigkeit**. Außerdem dienen sie als Ersatzgewebe nach Verletzungen anderer Gewebearten: Das zugrunde gegangene Gewebe wird durch Bindegewebe ersetzt, und eine Narbe entsteht.

Bei den Binde-, Stütz- und Fettgeweben unterscheidet man hauptsächlich folgende Gewebetypen:

- **Bindegewebe im eigentlichen Sinne:** Es wird unterteilt in lockeres, straffes und retikuläres Bindegewebe.
- **Stützgewebe:** Hierzu zählen das Knorpel- und das Knochengewebe.
- **Fettgewebe:** Man unterscheidet weißes und braunes Fettgewebe.

Bei der Vielfalt der Aufgaben, die von den Binde-, Stütz- und Fettgeweben erfüllt wird, liegt es nahe, dass auch deren Aufbau recht unterschiedlich ist. Allen gemein ist aber, dass sie aus **viel Interzellularsubstanz** und nur **wenigen Zellen** bestehen.

Interzellularsubstanz

Die Interzellularsubstanz besteht prinzipiell aus **Wasser**, der **Grundsubstanz** und den **Bindegewebsfasern**. Je nach Gewebetyp ist die Interzellularsubstanz, die auch als **Extrazellulärmatrix** bezeichnet wird, allerdings unterschiedlich aufgebaut: Sowohl die Zusammensetzung der Grundsubstanz als auch die der Bindegewebsfasern kann variieren, genauso wie das Verhältnis von Grundsubstanz zu Fasern.

! *Merke* Bindegewebe

Im Bindegewebe bestimmen weniger die Zellen als vielmehr die Interzellularsubstanz über die Funktion des Gewebes.

Grundsubstanz

Die **Grundsubstanz** besteht aus Makromolekülen. Diese Makromoleküle (Glykosaminoglykane, Proteoglykane und Glykoproteine) sind u. a. für das **Wasserbindungsvermögen** der Interzellularsubstanz verantwortlich. Sie sind außerdem wichtig für die **Elastizität** des Bindegewebes und für die **Anheftung der fixen Zellen** (s. u.) an die Bindegewebsfasern der Extrazellulärmatrix.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Bindegewebsfasern

Bei den **Bindegewebsfasern** unterscheidet man 2 Faserarten: die Kollagenfasern und die elastischen Fasern.

Kollagenfasern • Sie kommen z. B. in Bändern, Sehnen, den Kapseln und dem Stroma von Organen und in der Haut vor. Sie sind sehr **zugfest**, dabei aber nicht steif, sondern **flexibel**. Bindegewebe ist deshalb relativ unempfindlich gegen mechanische Einflüsse. Die Kollagenfasern sind im Allgemeinen nur **wenig dehnbar**. Der Durchmesser einer Kollagenfaser kann zwischen 1 µm und 20 µm liegen.

Kollagenfasern setzen sich aus kleineren Einheiten zusammen, den **Kollagenfibrillen**. Diese wiederum bestehen aus Kollagenmolekülen, die sich spiralig umeinanderwinden. Bei **Kollagen** handelt es sich um ein Protein, das im Körper stark vertreten ist. Es macht etwa 25 % der gesamten Proteinmasse aus. Man unterscheidet zahlreiche **Kollagentypen**, die wichtigsten sind die Typen I–IV:

- **Kollagen Typ I:** Es ist der häufigste Typ. Kollagen Typ I kommt im straffen und im lockeren Bindegewebe (s. u.) und im Knochen (S. 101) vor. Teilweise verlaufen seine Fasern in Wellen, sodass eine begrenzte Dehnbarkeit gegeben ist.
- **Kollagen Typ II:** Dieser Typ findet sich im Knorpel (S. 100).
- **Kollagen Typ III:** Bei diesem Typ lagern sich die Fibrillen zu Kollagennetzen zusammen. Kollagen Typ III kommt in geringer Menge in vielen Organen vor, insbesondere in der Basalmembran der Epithel- und Muskelgewebe und im retikulären Bindegewebe (S. 99).
- **Kollagen Typ IV:** Bei diesem Typ bilden die Kollagenmoleküle keine Fibrillen, sondern zweidimensionale Netze. Kollagen Typ IV ist zusammen mit Kollagen Typ III am Aufbau der Basallamina der Epithel- und Muskelgewebe beteiligt.

Patho Osteogenesis imperfecta

*Bei der erblichen Osteogenesis imperfecta ist die Bildung des **Kollagens Typ I** gestört. Die Folge davon ist, dass die Knochen sehr brüchig sind. Die Erkrankung wird deshalb auch als **Glasknochenkrankheit** bezeichnet. Bei schwerer Ausprägung sind die Knochen verformt, und es kommt zu einem Minderwuchs. Die Betroffenen sind dann häufig auf den Rollstuhl angewiesen. Für diese Patienten ist es wichtig, auch kleine Traumata zu vermeiden, damit es nicht zu einem Knochenbruch kommt.*

Elastische Fasern • Sie kommen v. a. im Knorpel, in der Lunge und in den Wänden herznaher Arterien vor. Im Gegensatz zu den Kollagenfasern sind die elastischen Fasern **dehnbar**. Sie können unter Zug ihre Länge mehr als verdoppeln. Fällt der Zug weg, ziehen sie sich wie ein Gummiband wieder zusammen. Ihr Durchmesser beträgt ca. 2 µm. Sie stehen meist mit Kollagenfasern in Kontakt, die ihre Dehnbarkeit begrenzen. Elastische Fasern lagern sich zu **netzartigen Strukturen** zusammen, die z. T. wie eine Membran erscheinen.

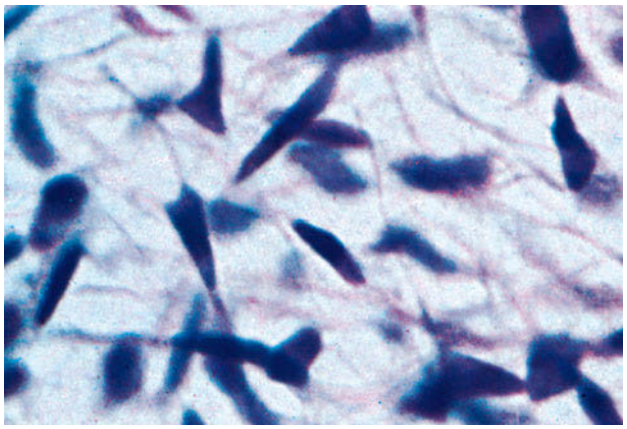
Elastische Fasern bestehen aus Elastin und Fibrillin. Bei **Elastin** handelt es sich um ein wasserabweisendes Protein, das als strukturlose Masse den Kern der elastischen Fasern bildet. Es wird von einem Gerüst aus **Mikrofibrillen** umgeben, die aus dem Protein **Fibrillin** bestehen und deren Durchmesser nur ca. 10 nm beträgt.

Zellen des Bindegewebes

Bei den Zellen des Bindegewebes können fixe und freie Zellen unterschieden werden.

Fixe Zellen • Sie werden, weil sie sich immer im jeweiligen Gewebe aufhalten, auch als **ortsständige Zellen** bezeichnet.

Abb. 5.7 Fibrozyten.



Die Fibrozyten sind verzweigte Zellen, die über ihre Fortsätze miteinander in Verbindung stehen. Ihr Aussehen kann sich je nach Bindegewebe unterscheiden. Die hier dargestellten Fibrozyten stammen aus dem Unterkiefer eines Fetus (Färbung: Hämalaun-Eosin, 500-fach vergrößert). *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

In den Bindegeweben heißen diese Zellen **Fibrozyten** oder Fibroblasten (▶ **Abb. 5.7**). Sie bilden die Grundsubstanz und die Bindegewebsfasern, kontrollieren deren Abbau, sind relativ langlebig und haben ein komplex aufgebautes Zytoskelett. Sie sind über bestimmte Makromoleküle der Grundsubstanz mit den Bindegewebsfasern verbunden, können diese Verbindung aber lösen und sich innerhalb des Gewebes fortbewegen.

Die fixen Zellen der Stützgewebe sind die **Chondrozyten** (Knorpelzellen) bzw. die **Osteozyten** (Knochenzellen), diejenigen des Fettgewebes die **Adipozyten** (Fettzellen). Alle 3 Zellarten sind eng mit den Fibrozyten verwandt.

Freie Zellen • Hierbei handelt es sich um Blut- und Abwehrzellen, die in das Gewebe einwandern. Vor allem Granulozyten, Lymphozyten, Makrophagen und Mastzellen sind im Gewebe anzutreffen. Sie zählen zu den **weißen Blutkörperchen** und werden in Kap. 12 (S. 322) näher beschrieben. Makrophagen, die sich im Gewebe aufhalten, werden auch als **Histiozyten** bezeichnet.

WISSEN TO GO

Binde-, Stütz- und Fettgewebe

Die Binde-, Stütz- und Fettgewebe erfüllen im Körper vielfältige Aufgaben. Zu ihnen zählen das **Bindegewebe** im eigentlichen Sinne, das **Knorpel-** und das **Knochengewebe** und das weiße und das braune **Fettgewebe**.

Die **Interzellularsubstanz** setzt sich aus Wasser, der Grundsubstanz und Bindegewebsfasern zusammen. Die **Grundsubstanz** besteht aus Makromolekülen und ist für das Wasserbindungsvermögen des Gewebes verantwortlich. Bei den **Bindegewebsfasern** unterscheidet man:

- **kollagene Fasern:** Sie sind zugfest, aber nur wenig dehnbar. Es gibt verschiedene Typen, die in unterschiedlicher Menge in den verschiedenen Geweben vorkommen.
- **elastische Fasern:** Sie sind dehnbarer als die kollagenen Fasern und ziehen sich nach Belastung wieder zusammen.

Die für das Bindegewebe typischen Zellen sind die **Fibrozyten**. Daneben findet man weiße Blutkörperchen, die als **freie Zellen** in das Gewebe eingewandert sind.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

5.3.2 Bindegewebe

Beim Bindegewebe im eigentlichen Sinne unterscheidet man hauptsächlich lockeres, straffes und retikuläres Bindegewebe. Bei diesen 3 Formen sind mehr kollagene als elastische Fasern vorhanden. Die elastischen Fasern überwiegen dagegen bei den elastischen Bändern, die allerdings eher selten vorkommen.

Lockeres Bindegewebe

Das **lockere Bindegewebe** kommt im Körper am häufigsten vor. Es wird auch als **interstitielles Bindegewebe** bezeichnet, weil es Zwischenräume zwischen benachbarten Strukturen ausfüllt. So bildet es beispielsweise:

- das Stroma epithelialer Organe, z. B. der Leber, der Niere und der Lunge,
- die Hüllen von Muskeln, Organen und Organteilen,
- eine Verschiebeschicht unter den Epithelien der Schleimhäute und der Blutgefäße.

Im lockeren Bindegewebe verlaufen **Blutgefäße** und **Nerven**.

Das lockere Bindegewebe besteht hauptsächlich aus **Grundsubstanz**, in der nur wenige Zellen und auch relativ wenige Kollagenfasern vom Typ I und III liegen. Die Kollagenfasern sind gewellt und verlaufen in unterschiedlichen Richtungen (▶ **Abb. 5.8**). Zwischen ihnen finden sich vereinzelte elastische und retikuläre Fasern. Wegen des hohen Wasserbindungsvermögens der Grundsubstanz stellt das lockere Bindegewebe einen wichtigen **Wasserspeicher** des Körpers dar.

Straffes Bindegewebe

Im Gegensatz zum lockeren Bindegewebe besteht das straffe Bindegewebe hauptsächlich aus **Kollagenfaserbündeln**. Diese sind überwiegend in Richtung der Zugkräfte angeordnet, die auf das Gewebe wirken. Dabei unterscheidet man:

Parallelfaseriges Bindegewebe • Es kommt v. a. in **Sehnen** und **Bändern** vor. Da hier die Zugkräfte vorwiegend in derselben Richtung wirken, sind die Kollagenfaserbündel parallel in Zugrichtung angeordnet (▶ **Abb. 5.9**). Sie sind von lockerem Bindegewebe umhüllt.

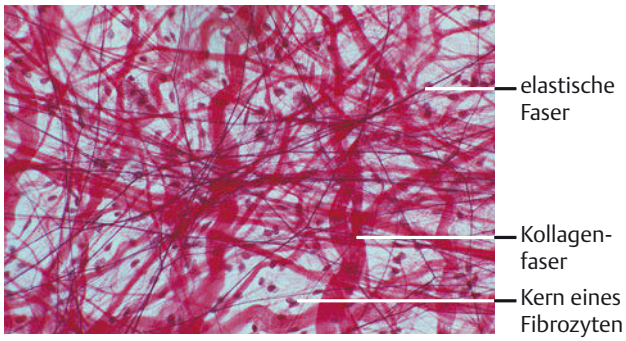
Geflechtartiges Bindegewebe • Es findet sich vorwiegend in **Organkapseln**. Da die Zugkräfte hier aus verschiedenen Richtungen wirken, kreuzen sich die Kollagenfaserbündel und bilden ein Geflecht. Zwischen den Kollagenfaserbündeln liegen elastische Fasern. Dadurch, dass diese sich nach Beendigung der Zugeinwirkung wieder zusammenziehen, kehrt das Gewebe in seine Ausgangsform zurück. Geflechtartiges Bindegewebe ist sehr widerstandsfähig gegen mechanische Beanspruchungen.

Außer in Organkapseln kommt das geflechtartige straffe Bindegewebe z. B. auch in der harten Hirnhaut (S. 473), den Gelenkkapseln, der Knochenhaut und den Herzklappen vor.

Retikuläres Bindegewebe

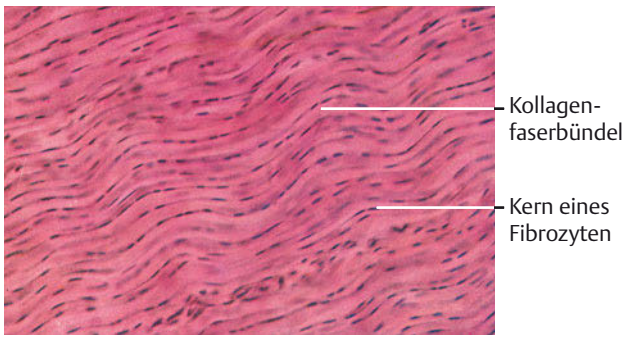
Aus retikulärem Bindegewebe sind die Milz, die Lymphknoten, die Mandeln und das rote Knochenmark aufgebaut, die alle zu den **lymphatischen Organen** gehören.

Abb. 5.8 Lockeres Bindegewebe.



Im lockeren Bindegewebe überwiegt die Grundsubstanz. Es enthält nur relativ wenige Zellen und Fasern. Sowohl die Kollagen- als auch die elastischen Fasern verlaufen ungeordnet in unterschiedlichen Richtungen. Die Abbildung zeigt lockeres Bindegewebe aus dem Gekröse des Darms (Färbung: Eisenhämatoxylin-Fuchsin nach van Gieson, 200-fach vergrößert). *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

Abb. 5.9 Straffes parallelfaseriges Bindegewebe.



Die zahlreichen Kollagenfasern verlaufen im straffen parallelfaserigen Bindegewebe in derselben Richtung. Sie sind zu Faserbündeln zusammengefasst, zwischen denen die Fibrozyten liegen. Zu sehen ist ein Längsschnitt durch eine Fingersehne (Färbung: Hämalaun-Eosin, 240-fach vergrößert). *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

Die Fibrozyten des retikulären Bindegewebes haben eine sternförmige Gestalt und werden als **Retikulumzellen** bezeichnet. Sie produzieren Typ-III-Kollagen, das sich zu sog. **retikulären Fasern** zusammenlagert, die von Ausläufern der Retikulumzellen umhüllt werden. Dadurch bildet sich ein Netz, in dessen Maschen sich viele freie Zellen aufhalten, v. a. Lymphozyten (S. 331). Aufgrund der relativ flexiblen retikulären Fasern können sich die Organe, wenn auch nur geringfügig, an Form- und Volumenänderungen anpassen.

Elastische Bänder

Bei elastischen Bändern überwiegen die **elastischen Fasern**. Diese sind stark verzweigt, in ihren Zwischenräumen liegen kollagene und retikuläre Fasern und Fibrozyten. Nur wenige Bänder sind elastisch, die meisten Bänder bestehen aus straffem Bindegewebe. Zu den elastischen Bändern zählen die Stimmbänder und die kurzen Bänder, die zwischen den Wirbelbögen verlaufen, die Ligg. flava (S. 406).

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

WISSEN TO GO

Bindegewebe im eigentlichen Sinne

Das **lockere Bindegewebe** kommt von allen Bindegewebsarten am häufigsten vor. Es bildet das Stroma der Organe, auch unter Oberflächenepithelien liegt eine Schicht lockeren Bindegewebes. Im lockeren Bindegewebe verlaufen Gefäße und Nerven. Hauptbestandteil ist die **Grundsubstanz**, weshalb die Wasserbindungsfähigkeit hoch ist. Zellen und Bindegewebsfasern kommen nur vereinzelt vor.

Hauptbestandteil des **straffen Bindegewebes** sind **Kollagenfaserbündel**. Diese verlaufen in Sehnen und Bändern parallel, in den Organ- und Gelenkkapseln, der Knochenhaut und den Herzklappen dagegen geflechtartig.

Die Kollagenfasern des **retikulären Bindegewebes** bilden ein dichtes Netz, in dem sich zahlreiche **freie Zellen** aufhalten. Das retikuläre Bindegewebe bildet das Gerüst lymphatischer Organe, wie z. B. der Milz, der Lymphknoten oder des roten Knochenmarks.

Elastische Fasern sind der Hauptbestandteil von **elastischen Bändern**, von denen es allerdings nur wenige gibt.

5.3.3 Stützgewebe

Zu den Stützgeweben zählen das Knorpel- und das Knochengewebe.

Knorpelgewebe

Knorpel kommt vor allem im **Skelett** vor, z. B. als Gelenkknorpel, Zwischenwirbelscheibe oder Meniskus (S. 372). Aber auch in anderen Organen, wie z. B. in der Luftröhre oder der Ohrmuschel, erfüllt Knorpel eine **Stützfunktion**. Außerdem stellt er die **Vorläufersubstanz des Knochengewebes** bei der Skelettentwicklung dar.

Das Knorpelgewebe ist **fest** und **druckelastisch**. Nachdem es verformt wurde, kehrt es wieder in seine Ausgangsform zurück. Durch seine glatte Oberfläche ermöglicht es außerdem die Gleitbewegungen der Knochen in den Gelenken.

Knorpelgewebe enthält weder Nerven noch Gefäße. Seine Ernährung erfolgt über Diffusion, weshalb die **Regenerationsfähigkeit schlecht** ist.

Interzellularsubstanz des Knorpels

Die **Grundsubstanz** der Extrazellulärmatrix enthält große Mengen an Proteoglykanen und dem Glykosaminoglykan Hyaluronan (Hyaluronsäure). Sie besitzt dadurch ein hohes Wasserbindungsvermögen, das für die große Elastizität des Knorpelgewebes wichtig ist. Für die Festigkeit des Gewebes sind in erster Linie die **Kollagenfibrillen** der Extrazellulärmatrix verantwortlich.

Knorpelzellen

Sie stellen die Grundsubstanz des Knorpelgewebes her. Abhängig von ihrem Reifegrad unterteilt man die Knorpelzellen in:

- **Chondroblasten:** Die Jugendform der Knorpelzellen ist noch teilungsfähig.
- **Chondrozyten:** Die reifen Knorpelzellen können sich nicht mehr teilen.

WISSEN TO GO

Knorpelgewebe

Knorpelgewebe ist fest und druckelastisch. In **Gelenken** verteilt es den Druck und sorgt für eine glatte Oberfläche, an der Ohrmuschel und der Luftröhre z. B. wirkt es formgebend.

Seine **Grundsubstanz** verfügt über ein hohes Wasserbindungsvermögen, für die Festigkeit sind **Kollagenfibrillen** verantwortlich. Die Knorpelzellen werden als **Chondrozyten**, ihre Jugendform als Chondroblasten bezeichnet.

Knorpelarten und Knorpelhaut

Man unterscheidet 3 Arten von Knorpelgewebe: den hyalinen Knorpel, den elastischen Knorpel und den Faserknorpel (▶ **Abb. 5.10**).

Hyaliner Knorpel • Er ist die Knorpelart, die beim Erwachsenen am häufigsten vorkommt. Der hyaline Knorpel bildet den **Gelenk-** und den **Rippenknorpel** und gibt der Nase, dem Kehlkopf, der Luftröhre und den Bronchien ihre Form. Darüber hinaus bildet hyaliner Knorpel die **Wachstumsfugen** der Röhrenknochen und ist damit Ausgangspunkt für das Längenwachstum.

Hyaliner Knorpel ist besonders druckelastisch. Diese Eigenschaft liegt in der **reichlich vorhandenen Interzellularsubstanz** (▶ **Abb. 5.10a**) begründet: Wird der Knorpel zusammengedrückt, wird Wasser aus der Extrazellulärmatrix gepresst; lässt der Druck nach, strömt das Wasser wieder hinein. Hyaliner Knorpel besitzt nur **relativ dünne Kollagenfibrillen**, die sich nicht zu Fasern zusammenlagern.

Außer an den Gelenken wird der hyaline Knorpel von einer **Knorpelhaut (Perichondrium)** überzogen. Sie besteht aus straffem Bindegewebe und unreifen Zellen, die sich zu Chondroblasten weiterentwickeln können. Die Knorpelhaut verhindert, dass Knorpel bei Biegung bricht, indem sie die entstehenden Zugkräfte abfängt.

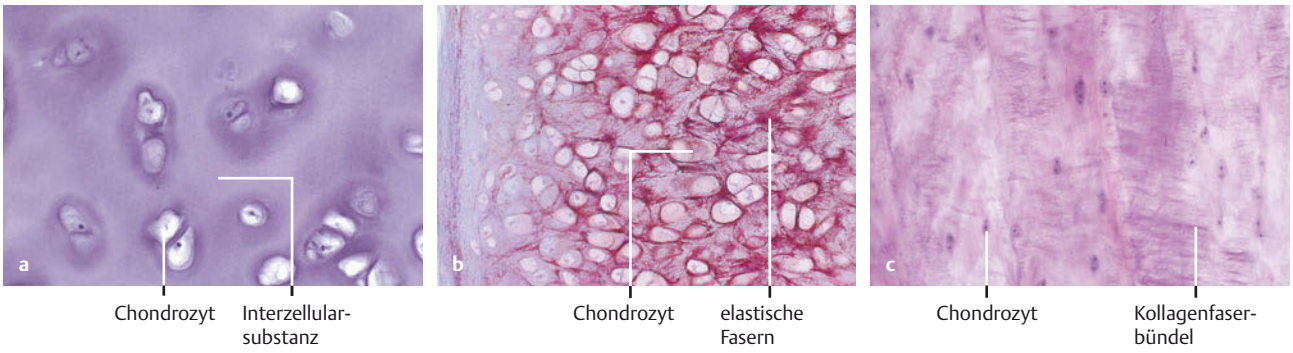
Elastischer Knorpel • Er kommt im Gerüst der Ohrmuschel, des äußeren Gehörgangs, der Ohrtrompete und des Kehldeckels (Epiglottis) vor. Er unterscheidet sich vom hyalinen Knorpel vor allem dadurch, dass er auch zahlreiche **elastische Fasern** enthält, die netzartig angeordnet sind (▶ **Abb. 5.10b**). Dadurch ist der elastische Knorpel nicht nur druckelastisch, sondern auch **biegsam**. Die elastischen Fasern strahlen in die **Knorpelhaut** ein, die den elastischen Knorpel umgibt.

Faserknorpel • Aus dieser Knorpelart bestehen die Schambeinfuge (Symphyse), die Zwischenwirbelscheiben, die Menisken des Knie- und die Knorpelscheibe des Kiefergelenks. Faserknorpel besitzt **keine Knorpelhaut**.

Faserknorpel enthält **dicke kollagene Faserbündel** und nur wenig Knorpelzellen (▶ **Abb. 5.10c**). Zusätzlich zur Druckelastizität besitzt er durch diesen Aufbau eine **hohe Zugfestigkeit** und ähnelt darin dem straffen Bindegewebe. Neben Druck hält er auch Zug- und Scherkräften stand.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Abb. 5.10 Die verschiedenen Knorpelarten.



a Hyaliner Knorpel. Hier überwiegt die Interzellularsubstanz, Fasern kommen nur vereinzelt vor. *Aus: Aumüller G et al.: Duale Reihe Anatomie. Thieme 2017.*

b Elastischer Knorpel. Er enthält zahlreiche elastische Fasern, die netzartig angeordnet sind. *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

c Faserknorpel. Hier finden sich relativ wenig Chondrozyten, es überwiegen dicke Bündel aus Kollagenfasern. *Aus: Aumüller G et al.: Duale Reihe Anatomie. Thieme 2017.*

WISSEN TO GO

Knorpelarten

Die häufigste Knorpelart ist der **hyaline Knorpel**. Er bildet u. a. den Gelenkknorpel. Da er viel Grundsubstanz enthält, ist er besonders **druckelastisch**. Außerhalb der Gelenke wird er von der **Knorpelhaut** (Perichondrium) verstärkt, in der Vorläuferzellen der Chondroblasten liegen.

Elastischer Knorpel kommt z. B. im Kehldeckel und in der Ohrmuschel vor. Neben den kollagenen enthält er auch elastische Fasern, die ihn **biegsam** machen. Auch er wird von **Knorpelhaut** überzogen.

Der **Faserknorpel** bildet die Menisken und die Zwischenwirbelscheiben. Er besteht hauptsächlich aus dicken Kollagenbündeln, Zellen sind selten. Er ist besonders **zugfest** und besitzt **keine** Knorpelhaut.

Knochengewebe

Knochengewebe ist das härteste Bindegewebe und weist eine hohe Festigkeit gegen Zug-, Druck- und Scherkräfte auf. Aufgrund seiner Form- und Biegefestigkeit erfüllt es im Körper in erster Linie eine **Stütz- und Schutzfunktion** (S. 364). Außerdem dient es als **Kalziumspeicher**, rund 99 % des gesamten Kalziums des Körpers befinden sich in den Knochen.

Interzellularsubstanz des Knochens

Neben Wasser, das rund 25 % ausmacht, besteht die Extrazellulärmatrix des Knochengewebes zu etwa 45 % aus anorganischen und zu ca. 30 % aus organischen Substanzen:

- **anorganischer Anteil:** Er setzt sich aus verschiedenen **Mineralien** zusammen, Hauptbestandteil ist Hydroxylapatit, eine kristalline Form des Kalziumphosphats. Die Mineralsalze sorgen für die Festigkeit des Knochengewebes.
- **organischer Anteil:** Er besteht hauptsächlich aus **Kollagenfibrillen** des Typs I, an die sich die Hydroxylapatit-Kristalle anlagern.

Knochenzellen

Knochengewebe wird nicht einmal gebildet und bleibt dann unverändert bestehen, sondern wird **stetig umgebaut** (S. 367). Dafür sind die Knochenzellen verantwortlich, bei denen man 3 Arten unterscheidet: die Osteoblasten, die Osteozyten und die Osteoklasten.

Osteoblasten • Sie bilden die Grundsubstanz des Knochens und die Vorstufe des Kollagens und sind damit für den **Knochenaufbau** verantwortlich. Direkt nach ihrer Bildung ist die Extrazellulärmatrix des Knochens noch nicht verkalkt und wird als **Osteoid** bezeichnet. Sie liegt, genauso wie die Osteoblasten, an der inneren und der äußeren Oberfläche des Knochens. Nach etwa 2 Tagen beginnt die Grundsubstanz zu mineralisieren, indem sich die Mineralsalze an die Kollagenfasern anlagern und auskristallisieren. Das Gewebe verhärtet sich, und die Knochenstruktur entsteht. Die Osteoblasten werden von der entstehenden Knochensubstanz eingemauert und wandeln sich in Osteozyten um.

Die Osteoblasten werden durch Belastung des Knochens aktiviert. Ihre Anzahl nimmt mit steigendem Lebensalter ab.

Osteozyten • Sie entstehen aus den Osteoblasten und sind die häufigsten Knochenzellen. Die Osteozyten liegen in kleinen Höhlen, den **Lakunen**, im Knochengewebe und sind von einer dünnen Schicht nicht mineralisierter Knochensubstanz umgeben. Sie sind mit anderen Osteozyten über Zellkontakte verbunden.

Die Osteozyten dienen wahrscheinlich als Messfühler für die Belastung des Knochens (Mechanosensoren) und beeinflussen die Aktivität der Osteoblasten. Damit sind sie an der Erhaltung der Knochensubstanz beteiligt.

Osteoklasten • Sie bauen die verkalkte Interzellularsubstanz ab und sind damit für den **Knochenabbau** verantwortlich. Zusammen mit den Osteoblasten sorgen sie dafür, dass Knochenaufbau und Knochenabbau im Gleichgewicht stehen. Die Botenstoffe, die die Aktivität der Osteoklasten regulieren, werden u. a. von Osteoblasten freigesetzt.

Die Osteoklasten sind mit den Makrophagen (Fresszellen) des Immunsystems (S. 326) verwandt. Sie enthalten bis zu 50 Zellkerne und liegen in Einbuchtungen an der Oberfläche des Knochens (Howship-Lakunen), die sie selbst geschaffen haben.

! *Merke* Klasten oder Blasten?

*Was welche Knochenzelle macht, kann man sich leicht merken: Osteo**b**lasten **b**auen, Osteo**k**lasten **k**lauen.*

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

WISSEN TO GO

Knochengewebe

Knochengewebe ist extrem **form-** und **biegefest**. Es hat eine Stütz- und Schutzfunktion und dient als Kalziumspeicher. Knochengewebe ist einem ständigen Umbauprozess unterworfen.

Seine Interzellularsubstanz besteht überwiegend aus **Mineralien** und **Kollagenfibrillen**. Bei den Knochenzellen unterscheidet man:

- **Osteoblasten:** Sie dienen dem **Knochenaufbau**, indem sie die Interzellularsubstanz bilden.
- **Osteozyten:** Sie gehen aus den Osteoblasten hervor, wenn diese in der mineralisierenden Grundsubstanz eingemauert werden. Sie messen wahrscheinlich die Belastung des Knochens.
- **Osteoklasten:** Sie dienen dem **Knochenabbau**, indem sie verkalkte Interzellularsubstanz abbauen.

Knochenarten und Knochenhaut

Mit dem Geflecht- und dem Lamellenknochen unterscheidet man 2 Arten von Knochen, die sich in ihrer Bauweise und der Zusammensetzung des Knochengewebes unterscheiden.

Geflechtknochen • Er ist die Knochenform, die bei jeder Knochenbildung (S. 370) als erste entsteht. Deshalb stellt der Geflechtknochen die Hauptform beim **Kleinkind** dar, wird aber bereits in den ersten Lebensjahren größtenteils zu Lamellenknochen umgebaut. Beim Erwachsenen findet sich Geflechtknochen nur noch an wenigen Stellen, wie z. B. an den Schädelnähten, dem Innenohr und den Zahnfächern. Geflechtknochen entsteht zunächst auch bei der Heilung von **Knochenbrüchen**.

Der Geflechtknochen besteht aus zahlreichen Knochenzellen und **ungeordneten** Kollagenfasern, die ein unregelmäßiges Geflecht bilden. Dieses Grundgerüst ist nur **wenig mineralisiert** und weist einen hohen Wassergehalt auf. Daher ist es biege- und zugfest.

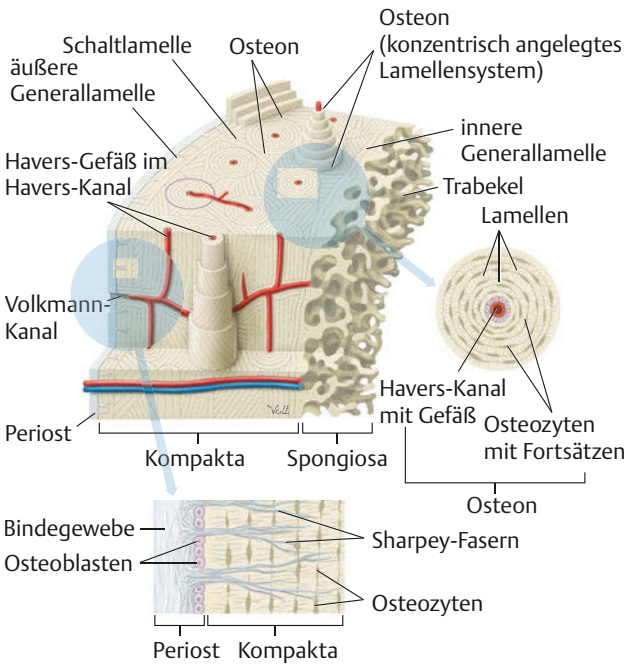
Lamellenknochen • Er ist mechanisch stärker belastbar als der Geflechtknochen. Er stellt die Hauptform beim **Erwachsenen** dar und entsteht durch den Umbau des Geflechtknochens. Dieser Umbau besteht darin, dass das ungeordnete Geflecht aus Kollagenfibrillen eine **regelmäßige** Struktur annimmt. Dafür lagern sich die mineralisierten Kollagenfibrillen zu dünnen (3–5 µm) Schichten, den **Lamellen**, zusammen. Die Kollagenfibrillen einer Schicht verlaufen dabei immer in derselben Richtung. Die Lamellen werden jeweils durch eine Schicht aus Osteozyten voneinander getrennt.

Je nach Anordnung der Lamellen unterscheidet man an einem Skelettknochen 2 Anteile, die Spongiosa und die Kompakta (S. 367):

Die **Spongiosa** liegt im Inneren des Knochens. Die Lamellen lagern sich hier zu einem Gerüst aus feinen Knochenbälkchen, den **Trabekeln**, zusammen, das in seinem Aufbau an die Struktur eines Schwamms erinnert. Die Trabekel sind in Richtung der größten Beanspruchung ausgerichtet, die Lamellen verlaufen parallel zur Trabekeloberfläche. Die Trabekel enthalten keine Blutgefäße. Zwischen ihnen befindet sich Knochenmark oder Fett. Durch die Luftigkeit der Spongiosa wird bei größtmöglicher Stabilität Gewicht eingespart.

Die **Kompakta** stellt die dichte äußere Schicht der Skelettknochen dar. In der Kompakta bilden die Lamellen die **Osteone** (▶ **Abb. 5.11**). Das sind kleine „Lamellenzylinder", die

Abb. 5.11 Aufbau des Lamellenknochens.



Der äußere Mantel des Lamellenknochens besteht aus der dichten Kompakta, die schwammartige Innenstruktur wird als Spongiosa bezeichnet. Innerhalb der Kompakta bilden die Knochenlamellen kleine Zylinder, die Osteonen. In den Osteonen verlaufen die Havers-Kanäle, die Gefäße enthalten und über die quer verlaufenden Volkmann-Kanäle miteinander in Verbindung stehen. Zwischen den Osteonen liegen die Schaltlamellen. Die Generallamellen bilden die äußere und die innere Schicht der Kompakta. Die Knochenhaut ist über die Sharpey-Fasern im Knochengewebe verankert. *Aus: Schünke M, Schulte E, Schumacher U: Prometheus LernAtlas der Anatomie. Illustrationen von Voll M und Wesker K. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2018.*

meist in Längsrichtung des Knochens verlaufen und mehrere Zentimeter lang werden können. Jedes Osteon besteht aus 5–20 ringförmig angeordneten Lamellen. In der Mitte des Osteons befindet sich ein kleiner Kanal, der **Havers-Kanal**, in dem 2 kleine Gefäße (Havers-Gefäße) verlaufen.

Unter den Havers-Kanälen bestehen Querverbindungen, die **Volkmann-Kanäle**. Sie enthalten Äste der Havers-Gefäße, die Volkmann-Gefäße.

WISSEN TO GO

Knochenarten

Bei der Knochenbildung und der Frakturheilung entsteht als Erstes **Geflechtknochen**. Er wird später zu Lamellenknochen umgebaut. Geflechtknochen enthält **viele Knochenzellen** und **ungeordnete Kollagenfasern** und ist nur wenig mineralisiert.

Der **Lamellenknochen** ist belastbarer als der Geflechtknochen, aus dem er entsteht. Dazu lagern sich die ungeordneten Kollagenfasern zu regelmäßig angeordneten **Lamellen** zusammen

In der **Spongiosa** im Inneren des Knochens bilden die Lamellen feine Knochenbälkchen (**Trabekel**) und verleihen ihr so eine schwammartige Struktur. In der dichten Außenschicht des Knochens, der **Kompakta**, lagern sich die Lamellen zu kleinen Zylindern, den **Osteonen**, zusammen. Im Zentrum der Osteonen liegt der **Havers-Kanal** mit den Havers-Gefäßen. Die Havers-Kanäle sind über die **Volkmann-Kanäle** miteinander verbunden.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Knochenhaut • Das Knochengewebe wird von Knochenhaut überzogen. Die innere Knochenhaut (**Endost**) kleidet die Hohlräume des Knochens aus, sie liegt den Spongiosabälkchen und der Innenseite der Havers- und der Volkmann-Kanäle an. Die äußere Knochenhaut (**Periost**) umgibt die Kompakta (▶ **Abb. 5.11**). Nur die Gelenkflächen sind frei von Periost.

Sowohl das Endost als auch das Periost bestehen aus Bindegewebe, das als Besonderheit **Vorläuferzellen der Osteoblasten** enthält. Aus diesen Vorläuferzellen können neue Osteoblasten entstehen.

Im **Periost** verlaufen Blut- und Lymphgefäße, die der Versorgung des Knochengewebes dienen. Außerdem finden sich hier Nervenfasern, weshalb das Periost sehr **schmerzempfindlich** ist. Einige der Kollagenfasern des Periosts, die sog. **Sharpey-Fasern**, reichen bis in die Kompakta und verankern so das Periost am Knochen (▶ **Abb. 5.11**).

WISSEN TO GO

Knochenhaut

Die Knochenhaut besteht aus Bindegewebe. Die schmerzempfindliche äußere Knochenhaut (**Periost**) liegt der Kompakta außen auf, während die innere Knochenhaut (**Endost**) die Hohlräume des Knochens auskleidet.

5.3.4 Fettgewebe

Fettgewebe kommt nahezu überall im Körper vor. Es besteht aus Fettzellen und wenig Interzellularsubstanz. Aufgabe des Fettgewebes ist es, **Energie** in Form von Triglyzeriden (S. 35) zu **speichern**. Fettzellen bilden auch Hormone, u. a. Leptin (S. 309), das eine Rolle bei der Steuerung des Hungers (S. 248) spielt.

Die nahezu kugelförmigen Fettzellen (**Adipozyten**) bilden sich aus Vorläuferzellen der Fibrozyten. Sie verfügen über Enzyme, die es ihnen ermöglichen, die Ausgangsstoffe für die Triglyzeride aufzunehmen bzw. Triglyzeride zu **freien Fettsäuren** abzubauen und als Energiequelle für den Körper freizusetzen. Auch wenn viele Triglyzeride gespeichert werden, steigt die Anzahl der Fettzellen normalerweise nicht. Vielmehr vergrößert sich das Volumen der einzelnen Fettzelle, zum Teil bis auf das Tausendfache.

Die Fettzellen speichern die Triglyzeride in Form von **Fetttropfen**. Nach der Anzahl der Fetttropfen und seinem Aussehen unterscheidet man weißes (univakuoläres = „eintropfiges“) Fettgewebe und braunes (plurivakuoläres = „mehrtropfiges“) Fettgewebe.

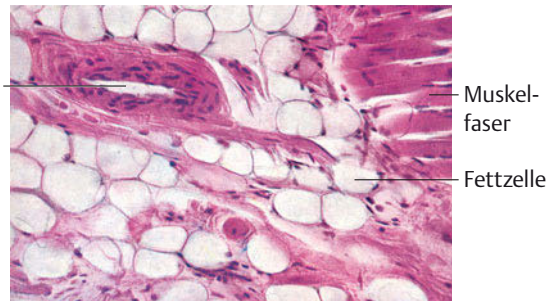
Weißes Fettgewebe

Das weiße Fettgewebe ist im Körper weit verbreitet. Seine Zellen enthalten nur **1 großen Fetttropfen**, der das Zytoplasma und den Zellkern an den Rand der Zelle verdrängt (▶ **Abb. 5.12**). Unter dem Mikroskop erinnert die Zelle deshalb ihrer Form nach an einen **Siegelring**. Weißes Fettgewebe ist nur wenig durchblutet.

Nach seiner Funktion lässt sich das weiße Fettgewebe in Speicherfett und Baufett unterteilen:

- **Speicherfett:** Es dient in erster Linie als Energiespeicher und wird deshalb bei Energiebedarf vom Körper abgebaut. Seine Menge ist vom Ernährungszustand abhängig. Das Speicherfett befindet sich vor allem im Bauchraum und in der Unterhaut. Hier bildet es auch eine Isolationsschicht gegen Kälte.
- **Baufett:** Es bildet an bestimmten Körperstellen, z. B. hinter dem Augapfel oder in der Umgebung der Nieren, ein Lager für die Organe und hält diese so in ihrer Position. An anderen Stellen, wie z. B. den Handflächen, den Fußsohlen und am Gesäß, dient es als druckelastisches Polster. Baufett wird erst bei länger andauerndem Energiemangel abgebaut.

Abb. 5.12 Weißes Fettgewebe.



Die Zellen des weißen Fettgewebes enthalten einen großen Fetttropfen, der den Kern an den Rand drängt. Auf dem Bild zu sehen ist in einen Skelettmuskel eingelagertes Speicherfett (Färbung: Hämalaun-Eosin, 300-fach vergrößert). *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

Braunes Fettgewebe

Die Zellen des braunen Fettgewebes enthalten **mehrere kleine Fetttropfen**. Seine braune Farbe erhält das Fett durch die **große Anzahl von Mitochondrien** in den Fettzellen.

Das braune Fettgewebe spielt vor allem beim **Säugling** eine Rolle, der es zur **Wärmeproduktion** nutzt: Die Mitochondrien der Fettzellen bauen die Fettsäuren ab, wodurch Wärme entsteht. Da das braune Fettgewebe viele kleine Blutgefäße enthält, kann diese Wärme über das Blut im Körper verteilt werden. Beim Erwachsenen, der Wärme wesentlich besser als der Säugling über Muskelzittern produzieren kann, kommt braunes Fettgewebe nur noch an wenigen Stellen vor, z. B. im Halsbereich.

WISSEN TO GO

Fettgewebe

Das Fettgewebe besteht überwiegend aus Fettzellen (**Adipozyten**). Es dient in erster Linie als **Energiespeicher**. Dazu speichert es Triglyzeride in Form von Fetttröpfchen. Man unterscheidet:

- **weißes Fettgewebe:** Es dient der Energiegewinnung (**Speicherfett**) oder als Polster (**Baufett**). Die Fettzellen enthalten nur 1 großen Fetttropfen.
- **braunes Fettgewebe:** Es dient dem Säugling zur **Wärmeproduktion**. Die Fettzellen enthalten mehrere kleine Fetttröpfchen.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

5.4 Muskelgewebe

5.4.1 Aufgaben und Aufbau

Muskelzellen (**Myozyten**) haben die Fähigkeit, sich zusammenzuziehen und wieder zu entspannen. Das Zusammenziehen wird als **Kontraktion**, das Entspannen als **Relaxation** bezeichnet. Dabei verhalten sich immer alle Muskelzellen eines Muskels gleich, d. h., sie kontrahieren oder relaxieren nahezu zur selben Zeit. Als Folge verkürzt oder verlängert sich der Muskel, und es kommt zur **Bewegung** eines Körper- oder Organteils.

Hauptverantwortlich für die Fähigkeit zur Kontraktion sind Bestandteile des **Zytoskeletts** der Muskelzellen: die **Aktinfilamente** und das **Motorprotein Myosin** (S. 70). Je nachdem, wie diese Strukturen in der Zelle angeordnet sind, ergibt sich unter dem Mikroskop ein unterschiedliches Erscheinungsbild, nach dem man das Muskelgewebe in die **quergestreifte** und die **glatte Muskulatur** einteilt. Die quergestreifte Muskulatur wiederum kommt in 2 Formen vor, sodass insgesamt 3 Arten von Muskelgewebe unterschieden werden (▶ **Tab. 5.2**):

- die quergestreifte Skelettmuskulatur,
- die quergestreifte Herzmuskulatur und
- die glatte Muskulatur.

WISSEN TO GO

Muskelgewebe

Muskelzellen (**Myozyten**) besitzen die Fähigkeit, sich zusammenzuziehen (**Kontraktion**) und sich wieder zu entspannen (**Relaxation**). Dadurch entstehen Bewegungen. Ermöglicht wird die Kontraktion durch die Proteine **Aktin** und **Myosin**. Je nach deren Anordnung unterscheidet man die **quergestreifte** von der **glatten Muskulatur**.

5.4.2 Quergestreifte Skelettmuskulatur

Die quergestreifte Skelettmuskulatur ist für die **Körperbewegungen** verantwortlich (S. 378). Um diese Aufgabe zu erfüllen, sind die einzelnen Muskeln über Sehnen mit dem Skelett verbunden. Da die Muskeln der Zunge, des Rachens, des Kehlkopfs und des oberen Teils der Speiseröhre denselben Aufbau zeigen, werden sie ebenfalls zu dieser Gruppe gerechnet. Sie sind allerdings nicht mit dem Skelett verbunden.

Die quergestreifte Skelettmuskulatur wird in der Regel **willentlich** vom zentralen Nervensystem gesteuert.

Aufbau des Skelettmuskels

Ein Skelettmuskel wird durch mehrere bindegewebige Hüllen in seine Unterstrukturen unterteilt (▶ **Abb. 5.13**):

- Die **Muskelfaszie** bildet die äußere Hülle eines jeden Muskels. Sie besteht aus straffem Bindegewebe, das durch eine Schicht aus lockerem Bindegewebe, dem **Epimysium**, unterlagert wird.
- Das **äußere Perimysium** unterteilt den Muskel in die nächstkleineren Einheiten, die **Sekundärbündel**.
- Die Sekundärbündel bestehen aus mehreren **Primärbündeln**, die durch das **innere Perimysium** voneinander abgegrenzt werden.
- Ein Primärbündel setzt sich aus ca. 100 **Muskelfasern** zusammen. Eine Muskelfaser entspricht dabei einer einzelnen Muskelzelle. Jede Muskelfaser besitzt eine Hülle aus Bindegewebe mit retikulären Fasern, das **Endomysium**.

Über die verschiedenen Muskelhüllen wird der Zug, der bei der Kontraktion des Muskels entsteht, auf die Sehnen übertragen. Außerdem verlaufen hier Gefäße und Nerven.

WISSEN TO GO

Aufbau der quergestreiften Skelettmuskulatur

Die Skelettmuskeln können willentlich gesteuert werden und sind für die Körperbewegungen verantwortlich. Sie bestehen aus einzelnen **Muskelfasern**. Mehrere Muskelfasern werden durch bindegewebige Hüllen zu **Primärbündeln** und mehrere Primärbündel zu **Sekundärbündeln** zusammengefasst. Alle Sekundärbündel gemeinsam bilden den Muskel, der von der **Muskelfaszie** umgeben wird.

Aufbau einer Skelettmuskelfaser

Bei jeder Muskelfaser handelt es sich um 1 große, längliche **Muskelzelle**. Sie kann 20–30 cm lang werden und entsteht dadurch, dass zahlreiche Vorläuferzellen (Myoblasten) während der Entwicklung der Muskulatur miteinander verschmelzen. Die Zellkerne der Myoblasten bleiben bei der Verschmelzung erhalten, sodass jede Muskelfaser **mehrere Zellkerne** enthält. Sie liegen am Rand der Muskelzelle, ihre Zahl kann bis zu 500 betragen.

ACHTUNG

Die Bezeichnungen für einige Bestandteile der Muskelzellen weichen von den allgemeinen Bezeichnungen ab:

- *Das Zytoplasma wird **Sarkoplasma** genannt.*
- *Das glatte endoplasmatische Retikulum heißt **sarkoplasmatisches Retikulum**.*
- *Die Zellmembran (Plasmalemm) wird als **Sarkolemm** bezeichnet.*

Die für die Kontraktion wichtigsten Strukturen der Skelettmuskelfaser sind die Myofibrillen, das sarkoplasmatische Retikulum und die Mitochondrien.

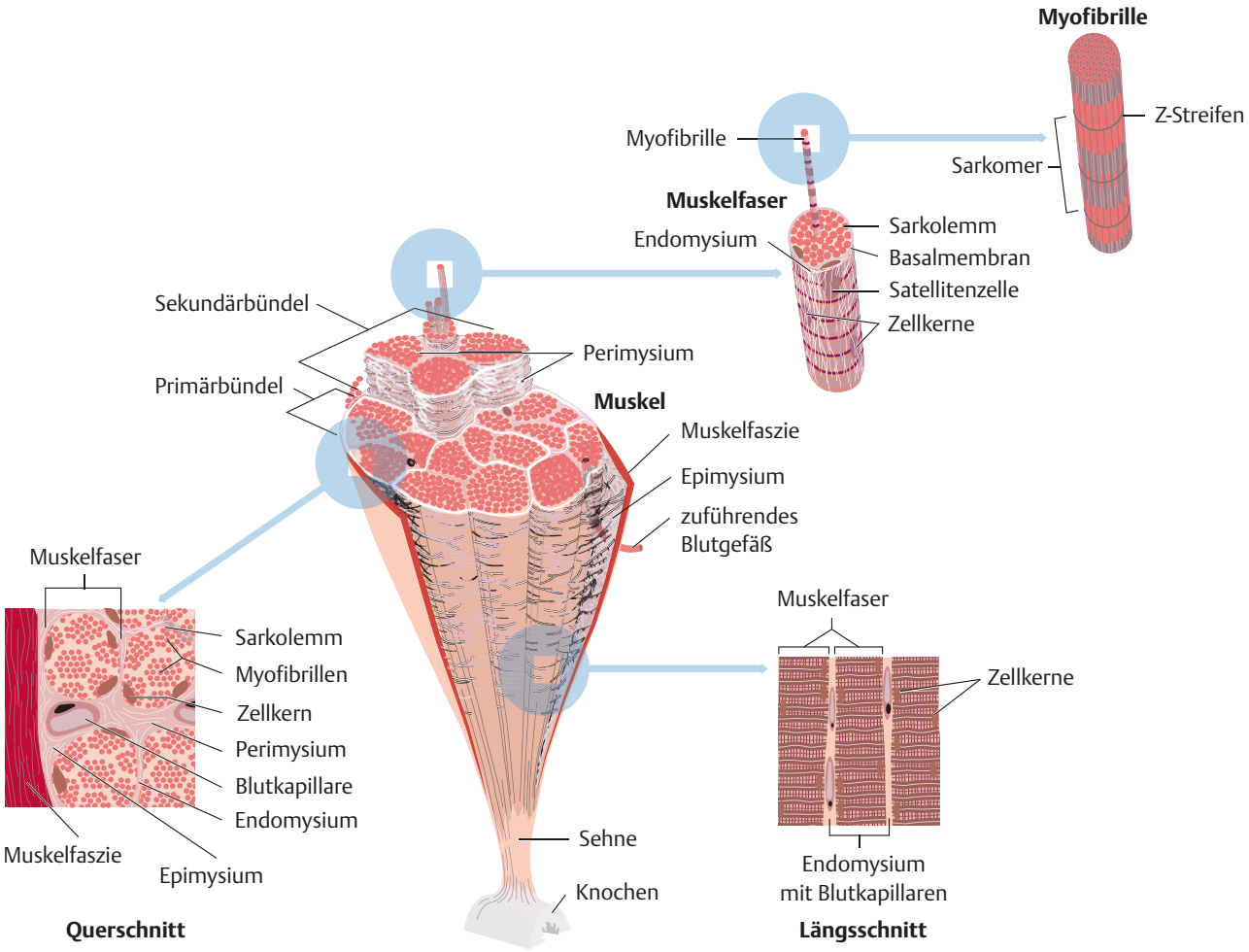
Myofibrillen • Sie sind mit beiden Enden an der Zellmembran befestigt und durchspannen die Muskelfaser auf ihrer ganzen Länge. Jede Skelettmuskelzelle enthält mehrere Hundert Myofibrillen (▶ **Abb. 5.13**).

Die Myofibrillen setzen sich aus verschiedenen **Myofilamenten** zusammen, die sich in einer regelmäßigen Abfolge wiederholen: den dünnen **Aktinfilamenten** und den dicken **Myosinfilamenten**. Da die Myofibrillen parallel zueinander angeordnet sind und sich gegeneinander auch nicht verschieben können, liegen die Aktinfilamente immer neben Aktinfilamenten und Myosinfilamente immer neben Myosinfilamenten. Die Bereiche, die aus Aktinfilamenten bestehen, erscheinen im Lichtmikroskop hell, diejenigen, die sich aus Myosinfilamenten zusammensetzen, dunkel. Dadurch entsteht unter dem Lichtmikroskop der Eindruck einer **Querstreifung** (▶ **Abb. 5.14**):

- Die hellen Streifen aus **Aktin** werden als **I-Streifen** bezeichnet,
- die dunklen Streifen aus **Myosin** als **A-Streifen**.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Abb. 5.13 Aufbau eines Skelettmuskels.



Der Skelettmuskel besteht aus mehreren Sekundärbündeln, die sich aus Primärbündeln zusammensetzen. Er wird von der Muskelfaszie und dem Epimysium umhüllt, die Sekundär- und Primärbündel von Perimysium. Jedes Primärbündel enthält zahlreiche Muskelfasern, die jeweils von Endomysium umgeben sind. In den Muskelfasern befinden sich die Myofibrillen, die aus hintereinandergeschalteten Sarkomeren bestehen. *Aus: Aumüller G et al.: Duale Reihe Anatomie. Thieme 2017.*

Abb. 5.14 Quergestreifte Skelettmuskulatur.



Die Querstreifung ist im Längsschnitt (Färbung: Azan, 1125-fach vergrößert) gut zu erkennen. Die dunklen A-Streifen bestehen aus Myosin, die hellen I-Streifen aus Aktin. In der Mitte der I-Streifen liegen die schmalen Z-Streifen, an denen das Aktin ansetzt. Der Abschnitt zwischen 2 Z-Streifen wird als Sarkomer bezeichnet. *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

Dabei reichen die Aktinfilamente noch ein kleines Stück in den A-Streifen hinein; in diesem Grenzbereich kommt es zur Überlappung der Aktin- und Myosinfilamente. Das andere Ende der Aktinfilamente ist an einer kleinen Faserscheibe verankert, die senkrecht etwa in der Mitte der I-Streifen verläuft. Sie erscheint im Lichtmikroskop als dunkle Linie, der **Z-Streifen** (▶ **Abb. 5.14**).

Der Bereich zwischen 2 Z-Streifen wird als **Sarkomer** bezeichnet. Jedes Sarkomer ist also folgendermaßen aufgebaut:

- Z-Streifen,
- ½ I-Streifen,
- A-Streifen,
- ½ I-Streifen,
- Z-Streifen.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Eine Myofibrille kann sich aus mehreren Hundert bis über 1000 Sarkomeren zusammensetzen. Die Länge eines einzelnen Sarkomers beträgt ca. 2,5 µm.

An den Sarkomeren laufen die Vorgänge der Muskelkontraktion (S. 108) ab. Diese kommt dadurch zustande, dass sich die Aktinfilamente in der Überlappungszone tiefer zwischen die Myosinfilamente schieben, wodurch sich das Sarkomer verkürzt. Das Sarkomer stellt damit die kleinste funktionelle Einheit des Muskels dar. In entspanntem Zustand ist ein Sarkomer ca. 2 µm lang.

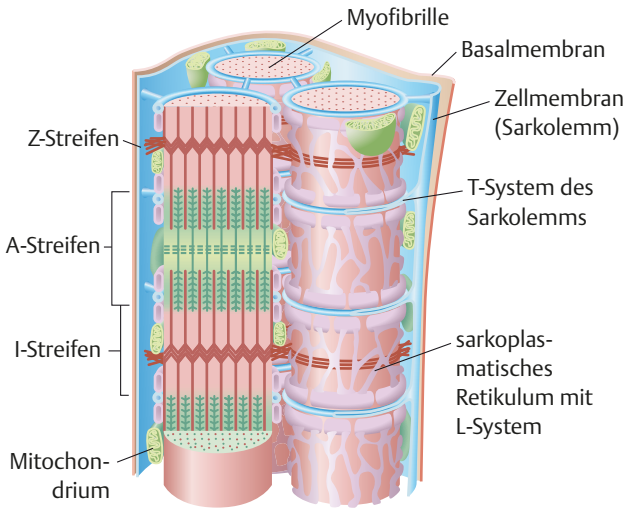
Sarkoplasmatisches Retikulum • Es spielt als **Kalziumspeicher** eine große Rolle bei der Muskelkontraktion. Das sarkoplasmatische Retikulum bildet um jede Myofibrille ein eigenes Röhrensystem. Da dieses längs der Myofibrillen verläuft, wird es als **L-System** bezeichnet (▶ **Abb. 5.15**).

Mitochondrien • Sie liegen zwischen den Myofibrillen und zwischen Myofibrillen und Zellmembran (▶ **Abb. 5.15**). Je nachdem, wie viele Mitochondrien eine Muskelfaser enthält, werden Typ-I- und Typ-II-Fasern (S. 386) unterschieden.

Sarkolemm • Die Zellmembran der Muskelfasern enthält spezielle Proteine, die sie gegen die mechanischen Kräfte stabilisieren, die bei der Kontraktion auftreten. Diese Festigkeit ermöglicht auch, dass die Kontraktion über das Sarkolemm zunächst auf das Endomysium und dann über die anderen Bindegewebshüllen auf die Sehnen übertragen wird.

Das Sarkolemm bildet zudem Ausstülpungen, die sich zwischen die Myofibrillen ins Innere der Muskelzelle schieben. Weil diese Ausstülpungen quer (transversal) zur Muskelfaser verlaufen, werden sie gemeinsam als **T-System** bezeichnet (▶ **Abb. 5.15**). Das T-System ist wichtig, damit sich bei der Erregung der Muskelzelle alle Myofibrillen zeitgleich kontrahieren und nicht die äußeren früher als die inneren.

Abb. 5.15 Aufbau einer Skelettmuskelfaser.



Ausstülpungen des Sarkolemms bilden das quer verlaufende T-System, das sarkoplasmatische Retikulum das längs verlaufende L-System. Die Mitochondrien liegen zwischen den Myofibrillen und zwischen Myofibrillen und Sarkolemm. An der angeschnittenen Myofibrille ist der Aufbau eines Sarkomers aus A-, I- und Z-Streifen dargestellt. *Aus: Aumüller G et al.: Duale Reihe Anatomie. Thieme 2017.*

WISSEN TO GO

Aufbau der Skelettmuskelfaser

Jede Muskelfaser entspricht 1 Muskelzelle (**Myozyt**). Skelettmuskelzellen sind bis zu 30 cm lange, mehrkernige, längliche Zellen. Ihre Membran (**Sarkolemm**) bildet Einstülpungen, die bis ins Innere der Zelle reichen. Dort liegen die **Myofibrillen**, die aus den Myofilamenten **Aktin** und **Myosin** bestehen. Um die Myofibrillen spannt sich das **sarkoplasmatische Retikulum**, das als Kalziumspeicher dient.

Die **Aktin-** und **Myosinfilamente** sind hintereinander (jeweils Aktin-Myosin-Aktin) angeordnet, wobei es zwischen Aktin und Myosin zu Überschneidungen kommt. Diese **regelmäßige Anordnung** ist für die Querstreifung des Muskelgewebes verantwortlich. Eine Aktin-Myosin-Aktin-Einheit wird als **Sarkomer** bezeichnet.

5.4.3 Quergestreifte Herzmuskulatur

Die **Herzmuskulatur** (Myokard) besitzt einen ähnlichen Aufbau wie die Skelettmuskulatur. Sie weist ebenso wie die Skelettmuskulatur eine **Querstreifung** auf. Die Herzmuskelzellen (**Kardiomyozyten**) unterscheiden sich aber von den Skelettmuskelzellen insbesondere in folgenden Punkten:

- Sie erreichen nur eine Länge von 50–120 µm.
- Sie verzweigen sich.
- Sie besitzen in der Regel nur 1 Kern, der in der Zellmitte liegt.
- Ihr sarkoplasmatisches Retikulum (L-System) ist weniger ausgeprägt.
- Sie sind an ihren Enden mit den benachbarten Herzmuskelzellen über sog. Glanzstreifen verbunden.

Die **Glanzstreifen** (▶ **Abb. 5.16**) liegen auf Höhe der Z-Streifen. Hier sind die Aktinfilamente verankert. Innerhalb der Glanzstreifen liegen Desmosomen und Adhärenzkontakte, die einen festen Zusammenhalt zwischen den einzelnen Myozyten herstellen. Außerdem enthalten die Glanzstreifen Gap Junctions (S. 73), über welche die elektrische Erregung einer Zelle an die nächste weitergegeben wird.

Im Gegensatz zur Skelettmuskulatur ist die Herzmuskulatur **nicht** dem Willen unterworfen. Sie wird vielmehr über ein **eigenes Erregungsbildungssystem** (S. 132) gesteuert, das aus spezialisierten Kardiomyozyten besteht.

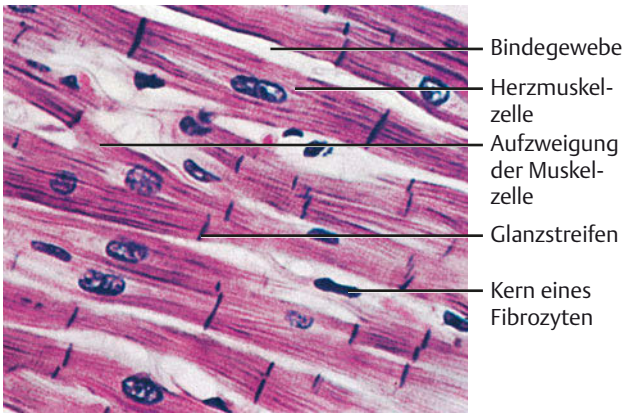
WISSEN TO GO

Aufbau der quergestreiften Herzmuskelfaser

Die Herzmuskelzelle (**Kardiomyozyt**) ist eine einkernige, **verzweigte** Zelle mit einer Länge bis zu 120 µm. Die Kardiomyozyten sind untereinander über **Glanzstreifen** verbunden, über die ein Reiz direkt von Zelle zu Zelle weitergegeben werden kann. Die Anordnung der **Myofilamente** gleicht derjenigen der Skelettmuskelzelle.

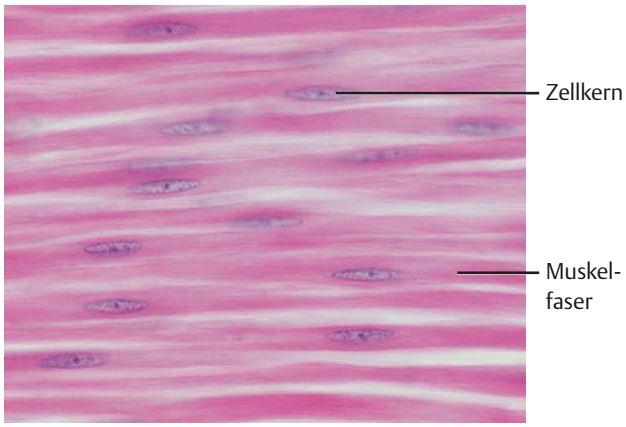
I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Abb. 5.16 Quergestreifte Herzmuskulatur.



Die Kardiomyozyten sind im Gegensatz zu den Zellen der Skelettmuskulatur verzweigt. Mit den Nachbarzellen sind sie über die Glanzstreifen verbunden, die nicht nur den Kontakt zwischen den Zellen herstellen, sondern über Gap Junctions auch Erregungen weiterleiten können. Gezeigt ist ein Längsschnitt durch die linke Herzkammer (Färbung: Brillantschwarz-Toluidinblau-Safranin, 200-fach vergrößert). *Aus: Kühnel W: Taschenatlas Histologie. Thieme 2014.*

Abb. 5.17 Glatte Muskulatur.



Da die Myofilamente der glatten Muskulatur nicht zu Sarkomeren angeordnet sind, ist an den Muskelfasern keine Querstreifung erkennbar. Dargestellt ist ein Längsschnitt durch die Wand des Dünndarms (Färbung: Hämatoxylin-Eosin, 600-fach vergrößert). *Aus: Endspurt Vorklinik Histologie. Thieme 2017.*

5.4.4 Glatte Muskulatur

Die glatte Muskulatur befindet sich v. a. in den Wänden von **Hohlorganen**. So werden Organe bezeichnet, die in ihrem Inneren einen Hohlraum besitzen, wie z. B. der Magen, der Darm, die Harnblase, die Speiseröhre oder die Gebärmutter. Auch die **Gefäßwände** besitzen eine Schicht aus glatter Muskulatur.

Die Zellen der glatten Muskulatur sind langgestreckt und spindelförmig. Ihre Länge kann bis zu 200 µm betragen. Wie auch die Kardiomyozyten besitzen die Glattmuskelzellen nur **1 Zellkern** in der Zellmitte.

Die glatte Muskulatur hat ihren Namen daher, dass – im Gegensatz zur Skelett- und Herzmuskulatur – mikroskopisch **keine Querstreifung** zu erkennen ist (▶ **Abb. 5.17**). Dies liegt daran, dass in den Glattmuskelzellen die Myofilamente **keine Sarkomere** bilden. Vielmehr sind die Aktin- und Myosinfilamente in unregelmäßigen Bündeln angeordnet, die meist schräg in der Zelle verlaufen und am Zytoskelett ansetzen.

Darüber hinaus fehlen den Glattmuskelzellen ein sarkoplasmatisches Retikulum und das T-System der Zellmembran.

Die glatte Muskulatur kann nicht willentlich beeinflusst werden.

WISSEN TO GO

Aufbau einer Glattmuskelzelle

Die **glatte Muskulatur** kommt insbesondere in Organen und Gefäßen vor. Sie ist nicht willentlich beeinflussbar. Ihre Zellen sind einkernig, spindelförmig und bis zu 200 µm lang. Die **Myofilamente** sind unregelmäßig angeordnet, weshalb die glatte Muskulatur **keine Querstreifung** aufweist.

5.4.5 Ablauf der Muskelkontraktion

Sowohl in der quergestreiften als auch in der glatten Muskulatur kommt die Kontraktion dadurch zustande, dass die Aktinfilamente weiter zwischen die Myosinfilamente gleiten. Die Sarkomere verkürzen sich und damit auch die Muskelfaser. Bei der Relaxation des Muskels kehren die Aktinfilamente wieder in ihre Ausgangsposition zurück.

Während bei den Vorgängen, die bei der Kontraktion ablaufen, Energie verbraucht wird, ist die Relaxation des Muskels ein passiver Vorgang ohne Energieverbrauch.

Der Mechanismus der Kontraktion ist bei allen 3 Muskelarten prinzipiell derselbe. Die wichtigsten Unterschiede sind in ▶ **Tab. 5.2** zusammengefasst.

Prinzipieller Mechanismus der Muskelkontraktion

Damit die Aktin- und die Myosinfilamente aneinander vorbeigleiten können, muss das Myosin an das Aktin binden. Auslöser für diese Bindung ist ein **Anstieg** der intrazellulären **Kalziumkonzentration**.

Aktinfilamente • Sie bestehen aus einzelnen Aktin-Molekülen, die als **G-Aktin** bezeichnet werden und Bindungsstellen für Myosin besitzen. Indem sich jeweils 2 Ketten aus G-Aktinen umeinanderwinden, bilden sie ein Aktinfilament (▶ **Abb. 5.18**). Um seine Aufgabe zu erfüllen, benötigt das Aktinfilament allerdings noch bestimmte Begleitproteine:

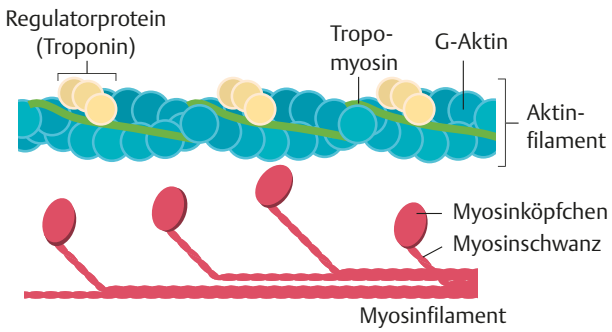
- **Tropomyosin:** Das fadenförmige Strukturprotein blockiert bei entspanntem Muskel die Aktin-Myosin-Bindungsstellen, indem es sich um das Aktinfilament windet (▶ **Abb. 5.18**).
- **Regulatorprotein:** Es bindet Ca^{2+}-Ionen und löst dadurch den Kontraktionsvorgang aus. Das Regulatorprotein im quergestreiften Muskel heißt **Troponin**, das im glatten Muskel **Calmodulin**.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Tab. 5.2 Hauptunterschiede der verschiedenen Muskelarten.

	quergestreifte Skelettmuskulatur	quergestreifte Herzmuskulatur	glatte Muskulatur
Muskelzelle	• länglich (bis 30 cm) • Durchmesser 40–100 µm • unverzweigt • mehrkernig	• länglich (bis 120 µm) • Durchmesser 15–20 µm • verzweigt • einkernig • Glanzstreifen mit Gap Junctions	• spindelförmig (bis 200 µm) • Durchmesser 3–10 µm • unverzweigt oder verzweigt • einkernig • mit (Single-Unit-Typ) oder ohne (Multi-Unit-Typ) Gap Junctions
Anordnung der Myofilamente	• Sarkomer	• Sarkomer	• ungeordnet
Regulatorprotein	• Troponin	• Troponin	• Calmodulin
Erregungs-auslösung	• Motoneuron mit motorischer Endplatte	• herzeigenes Erregungssystem	• verschiedene Reize
Erhöhung der Kalzium-konzentration	• hauptsächlich aus intrazellulärem Speicher • schnell	• aus intrazellulärem Speicher und durch Einstrom von extrazellulär • schnell	• hauptsächlich durch Einstrom von extrazellulär • langsam

Abb. 5.18 Aufbau der Myofilamente.



Der Aufbau der Myofilamente ist hier am Beispiel der quergestreiften Muskulatur dargestellt. Das Aktinfilament besteht aus 2 Ketten aus G-Aktin, die sich umeinanderwinden. An diese Ketten lagern sich Tropomyosin und ein Regulatorprotein (hier Troponin) an. Das Myosinfilament setzt sich aus einzelnen Myosinmolekülen zusammen, die wiederum aus einem Schwanz und einem Köpfchen bestehen. *Aus: Endspurt Vorklinik Physiologie 3. Thieme 2017.*

Myosinfilamente • Sie setzen sich aus ca. 300 einzelnen Myosin-Molekülen zusammen, die aus einem Köpfchen und einem Schwanz bestehen. Während sich die Schwänze zusammenlagern, ragen die **Köpfchen** seitlich aus dem Filament heraus (▶ **Abb. 5.18**). Jedes Köpfchen ist mit einem **ATP-Molekül** (S. 26) gekoppelt. Mit den Köpfchen bindet das Myosin an das Aktin (▶ **Abb. 5.19**).

WISSEN TO GO

Aufbau von Aktin und Myosin

Die **Myosinfilamente** setzen sich aus mehreren Myosinmolekülen mit jeweils einem Schwanzanteil und einem **Köpfchen** zusammen. An das Köpfchen ist **ATP** gebunden.

Ein **Aktinfilament** besteht aus Aktinmolekülen, die eine **Bindungsstelle** für das Myosinköpfchen besitzen. Diese Bindungsstelle wird in Ruhe durch das Protein **Tropomyosin** blockiert. Tropomyosin steht mit einem Regulatorprotein in Verbindung, in der quergestreiften Muskulatur ist das **Troponin**, in der glatten **Calmodulin**.

Kontraktionszyklus • Steigt die Kalziumkonzentration in der Muskelzelle über einen bestimmten Wert (etwa 1 µmol/L), bindet das **Regulatorprotein** Ca^{2+}-Ionen. Dies führt dazu, dass die Myosin-Bindungsstellen des Aktins freigelegt werden und der Kontraktionsvorgang beginnen kann. Dabei spielen die **Myosinköpfchen** eine aktive Rolle:

Nachdem seine Bindungsstelle am Aktin freigelegt wurde, lagert sich das Myosinköpfchen an das G-Aktin an. Dadurch wird die Enzymaktivität des Köpfchens (ATPase) aktiviert, wodurch das an das Köpfchen gebundene ATP-Molekül gespalten wird. Die dadurch freiwerdende Energie verwendet das Myosin dafür, den Winkel zwischen Schwanz und Köpfchen von ca. 90° auf 45° zu verkleinern und dadurch das Aktinfilament zu verschieben (▶ **Abb. 5.19**).

Sobald ein neues ATP-Molekül an das Myosinköpfchen bindet, löst sich das Köpfchen vom Aktin, und der Winkel zwischen Schwanz und Köpfchen wird wieder 90°. Ist zu diesem Zeitpunkt die intrazelluläre Kalziumkonzentration noch immer hoch, wiederholt sich der Vorgang. Da das Myosinköpfchen eine Art Brücke zwischen Aktin und Myosin bildet, wird dieser Ablauf auch als **Querbrückenzyklus** bezeichnet.

Ist die Konzentration inzwischen abgesunken, wird die Bindungsstelle wieder durch das Tropomyosin blockiert und die Kontraktion damit beendet.

Patho Totenstarre

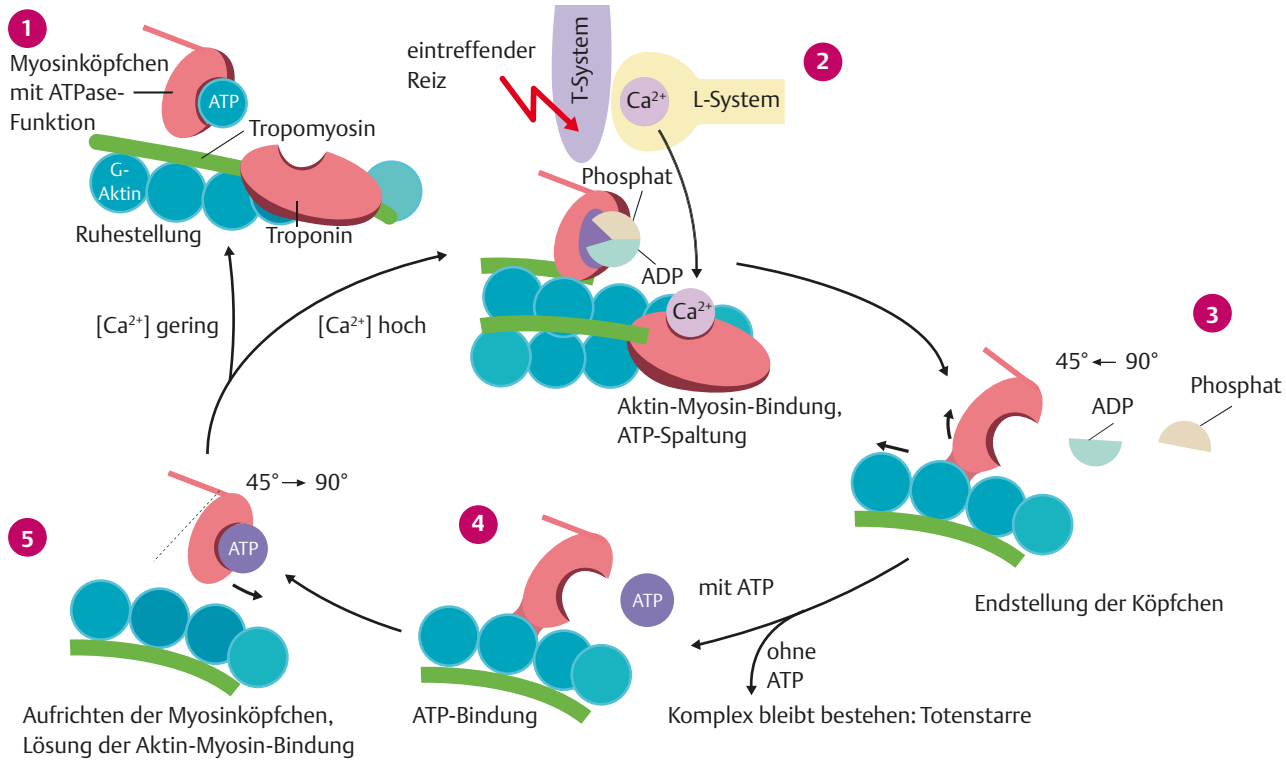
Die Totenstarre (Rigor mortis) kommt dadurch zustande, dass nach dem Tod kein neues ATP mehr gebildet wird. Die Bindung zwischen Myosinköpfchen und Aktin bleibt deshalb bestehen und die Muskelkontraktion kann nicht gelöst werden. Die Totenstarre setzt – je nach äußeren Bedingungen – nach etwa 1 Stunde an den Augenlidern und den kleinen Gelenken ein und hat sich nach 6–12 Stunden über den gesamten Körper ausgebreitet. Sie löst sich nach 1–2 Tagen, wenn sich die Körperzellen durch enzymatische Prozesse aufzulösen beginnen.

Elektromechanische Kopplung

Das Signal zur Muskelkontraktion wird in Form eines elektrischen Impulses gegeben, der über einen Nerv die Muskelzelle erreicht. Dieser elektrische Impuls wird als **Aktionspotenzial** (S. 117) bezeichnet. Er wird bei der Muskelkontraktion in mechanische Arbeit, nämlich die Muskelverkürzung, umgewandelt. Alle Abläufe, die bei der Umwandlung des elektrischen

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Abb. 5.19 Kontraktionszyklus im quergestreiften Skelettmuskel.



In der Ruhestellung (**1**) blockiert Tropomyosin die Bindungsstelle für das Myosinköpfchen. Trifft ein Reiz ein, steigt die Kalziumkonzentration. Ca^{2+} bindet an Troponin, und die Bindungsstelle wird frei. Das Myosinköpfchen mit ATPase-Funktion bindet an G-Aktin, wobei ATP gespalten wird (**2**). Durch die freiwerdende Energie wird das Myosinköpfchen angewinkelt und verschiebt das Aktinfilament (**3**). Neues ATP bindet an das Myosinköpfchen (**4**), wodurch es sich vom G-Aktin löst und wieder seine ursprüngliche Stellung einnimmt (**5**). Ist die Kalziumkonzentration inzwischen abgesunken, kehren die Myofilamente in ihre Ruhestellung zurück. Ist sie noch immer hoch, folgt ein neuer Kontraktionszyklus. *Aus: Endspurt Vorklinik Physiologie 3. Thieme 2017.*

Reizes in mechanische Arbeit ablaufen, werden unter dem Begriff der **elektromechanischen Kopplung** zusammengefasst.

WISSEN TO GO

Ablauf der Muskelkontraktion

Bei der Muskelkontraktion verkürzen sich die Sarkomere, indem sich die Aktinfilamente unter Energieverbrauch tiefer zwischen die Myosinfilamente schieben. Dieser Vorgang wird dadurch ausgelöst, dass die intrazelluläre **Kalziumkonzentration** ansteigt.

Die Kontraktion läuft wie folgt ab:

- Kalzium-Ionen binden an das Regulatorprotein.
- Tropomyosin wird verlagert und gibt die Bindungsstelle frei.
- Das Myosinköpfchen lagert sich an das Aktinmolekül.
- Das an das Köpfchen gebundene ATP wird gespalten, wodurch Energie frei wird.
- Das Köpfchen winkelt sich ab und verschiebt das Aktinfilament, wodurch sich das Sarkomer verkürzt.
- Neues ATP bindet an das Köpfchen, das sich daraufhin vom Aktin löst und in seine Ausgangsposition zurückkehrt.

Dieser Prozess wird auch als **Querbrückenzyklus** bezeichnet. Er wiederholt sich so lange, bis die Kalziumkonzentration in der Zelle wieder abgesunken ist.

Der Anstieg der Kalziumkonzentration wird durch einen **elektrischen Impuls** ausgelöst, der von einer anderen Zelle auf die Muskelzelle übertragen wird. Die Umwandlung des elektrischen Reizes in mechanische Arbeit heißt **elektromechanische Kopplung**.

Kontraktion der quergestreiften Skelettmuskulatur

Elektrischer Impuls • An der quergestreiften Skelettmuskulatur erreicht der elektrische Impuls die Muskelzelle über einen **motorischen Nerv**. Als motorischer Nerv oder **Motoneuron** (S. 382) werden solche Nerven bezeichnet, die Bewegungsbefehle vom zentralen Nervensystem (Gehirn, Rückenmark) an die Skelettmuskulatur weiterleiten. Unter **Motorik** versteht man alle vom zentralen Nervensystem aus gesteuerten, aktiven und koordinierten Bewegungen.

Dadurch, dass sich das Motoneuron aufzweigt, kann es bis zu 2000 Muskelfasern gleichzeitig erreichen. Eine Muskelfaser dagegen wird immer nur von 1 Nerv versorgt. Der Nerv und alle mit ihm in Verbindung stehenden Muskelfasern werden zusammen als **motorische Einheit** bezeichnet.

Übertragung auf die Muskelfaser • Das Ende des Motoneurons ist über eine besondere Struktur mit der Muskelfaser verbunden, die **motorische Endplatte** (▶ **Abb. 5.20**). Sie besteht aus dem Endkolben der Nervenfaser (S. 113), dem schmalen Spalt zwischen Endkolbenmembran und Muskelfaser (synaptischer Spalt) und dem benachbarten Abschnitt des Sarkolemms (postsynaptische Membran). Die Endkolben enthalten zahlreiche Vesikel, in denen sich der Überträgerstoff **Acetylcholin** befindet. Wenn das Aktionspotenzial die motorische Endplatte erreicht, wird Acetylcholin in den Spalt zwischen der Nerven- und Muskelfaser freigesetzt und bindet an passende Rezeptoren in der Membran der Muskelfaser.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Patho Myasthenia gravis

*Die Autoimmunerkrankung **Myasthenia gravis** wird dadurch verursacht, dass **Autoantikörper** gegen die **Acetylcholin-Rezeptoren** der motorischen Endplatten gebildet werden. Sie besetzen die Rezeptoren, ohne jedoch einen Reiz auszulösen. Es kommt zu einer Muskelschwäche, die meist zuerst an den Augen- und Gesichtsmuskeln auftritt und sich bei schweren Verläufen auf die Muskulatur von Rumpf und Gliedmaßen ausdehnen kann. Bei etwa 10–20 % der Betroffenen bessern sich die Symptome von selbst oder verschwinden sogar ganz. Ist dies nicht der Fall, kann eine Entfernung des Thymus Besserung bringen, da vermutlich dort die Autoantikörper gebildet werden.*

Patho Muskelrelaxierende Medikamente

*Die synaptische Übertragung durch die Neurotransmitter an der motorischen Endplatte kann medikamentös gehemmt werden. Die betreffenden Wirkstoffe werden als **periphere Muskelrelaxanzien** bezeichnet. Sie blockieren die Bindungsstellen für das Acetylcholin, sodass der Muskel nicht erregt werden kann. Sie kommen v. a. bei Operationen im Rahmen der Narkose zum Einsatz, um optimale Operationsbedingungen zu schaffen.*

*Auch **Botox** (Botulinumtoxin) zählt zu den muskelrelaxierenden Wirkstoffen. Es wird als Injektion derzeit häufig mit dem kosmetischen Ziel verwendet, v. a. Stirnfalten zu reduzieren, indem die entsprechende mimische Gesichtsmuskulatur stillgelegt wird.*

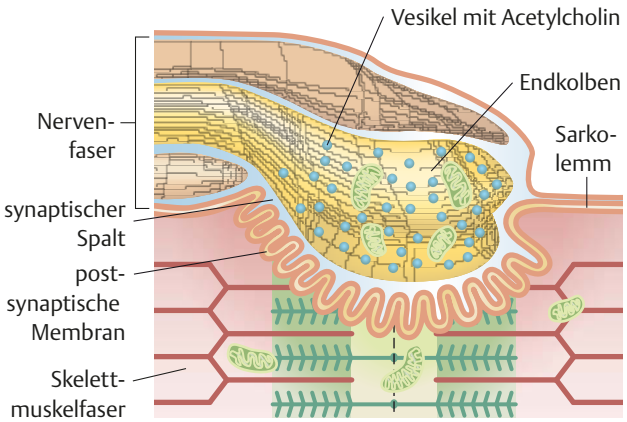
Anstieg der Kalziumkonzentration • Die Rezeptorbindung bewirkt, dass sich **Natriumkanäle** im Sarkolemm öffnen und Natrium-Ionen in die Muskelfaser strömen. Normalerweise ist die Natriumkonzentration in der Zelle wesentlich niedriger als außerhalb der Zelle, weshalb an der Zellmembran eine Spannung, das Ruhepotenzial (S. 116), besteht. Durch den Natriumeinstrom steigt die Natriumkonzentration in der Muskelzelle an, und aus dem Ruhepotenzial wird ein Aktionspotenzial (S. 117). Das Aktionspotenzial erreicht über das **T-System** des Sarkolemms auch das Innere der Muskelfaser und bewirkt eine Freisetzung von **Kalziumionen** aus dem **sarkoplasmatischen Retikulum**, wodurch die intrazelluläre Kalziumkonzentration steigt. Die Ca^{2+}-Ionen binden an das Regulatorprotein der quergestreiften Muskulatur, das **Troponin**. Dieses ändert daraufhin seine räumliche Struktur und bewegt so das **Tropomyosin** aus dessen ursprünglicher Lage. Die Bindungsstellen für das Myosinköpfchen werden frei, und der Querbrückenzyklus wird ausgelöst (▶ **Abb. 5.19**).

Die Verkürzung des Muskels entsteht nicht durch eine Dauerkontraktion, sondern durch **viele einzelne Kontraktionen**, bei denen sich das Myosinköpfchen immer wieder vom Aktin löst und anschließend wieder bindet. Auf diese Weise können sich manche Muskeln bis auf die Hälfte ihrer Ruhelänge verkürzen.

Nach dem **Alles-oder-nichts-Prinzip** ziehen sich dabei immer alle Muskelfasern einer **motorischen Einheit** zusammen, sobald ein ausreichend starker Reiz bis zur motorischen Endplatte gelangt. Da ein Muskel aus mehreren motorischen Einheiten besteht, kann seine Kontraktionskraft gesteuert werden, indem je nach Bedarf unterschiedlich viele motorische Einheiten erregt werden.

Nach Beendigung der Muskelkontraktion werden die Ca^{2+}-Ionen in das sarkoplasmatische Retikulum zurückgepumpt.

Abb. 5.20 Aufbau der motorischen Endplatte.



An der motorischen Endplatte wird der Reiz von der Nervenfaser auf die Muskelzelle übertragen. Sie besteht aus dem Endkolben der Nervenfaser, dem synaptischen Spalt und der postsynaptischen Membran und enthält zahlreiche Vesikel mit dem Überträgerstoff Acetylcholin. *Aus: Aumüller G et al.: Duale Reihe Anatomie. Thieme 2017.*

WISSEN TO GO

Kontraktion der quergestreiften Skelettmuskulatur

Der elektrische Impuls erreicht die Skelettmuskelzelle über einen **Nerv**, dessen Ende mit der Muskelzelle über eine **motorische Endplatte** in Verbindung steht. Ein Nerv kann dabei mehrere Muskelfasern versorgen; der Nerv und die von ihm innervierten Muskelfasern bilden eine **motorische Einheit**. Abhängig davon, wie viele seiner motorischen Einheiten aktiviert werden, variiert die vom Muskel entwickelte Kraft. Eine Erregungsweiterleitung zwischen den einzelnen Muskelfasern ist nicht möglich.

Bei Erregung setzt der Nerv an der motorischen Endplatte den chemischen Überträgerstoff **Acetylcholin** frei, der an Rezeptoren im Sarkolemm bindet und dort eine Erregung auslöst. Die Erregung führt dazu, dass Kalzium aus dem **sarkoplasmatischen Retikulum** freigesetzt wird und sich die Kalziumkonzentration in der Zelle erhöht. Es werden immer alle Muskelfasern einer motorischen Einheit gemeinsam erregt.

Kontraktion der quergestreiften Herzmuskulatur

Elektrischer Impuls • Die Erregung der Herzmuskelzellen, die für die Kontraktion zuständig sind (**Arbeitsmyokard**), erfolgt nicht über Nerven, sondern über das herzeigene **Erregungsleitungs- und Erregungsbildungssystem** (S. 132), das aus spezialisierten Herzmuskelzellen besteht.

Übertragung auf die Muskelfaser • Am Herzen sind **keine** motorischen Endplatten ausgebildet. Vielmehr sind die Zellen des Erregungsleitungssystems mit den Zellen des Arbeitsmyokards über **Gap Junctions** (S. 73) verbunden, durch die der elektrische Impuls direkt und schnell an die Muskelfasern weitergegeben wird. Da auch die Muskelfasern untereinander über Gap Junctions in den Glanzstreifen verbunden sind, breitet sich die Erregung von Zelle zu Zelle über

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

den gesamten Herzmuskel aus. Im Gegensatz zum Skelettmuskel werden also immer **alle Muskelfasern** des Herzens erregt, das **Alles-oder-nichts-Prinzip** gilt für den kompletten Herzmuskel.

Anstieg der Kalziumkonzentration • Auch beim Anstieg der Kalziumkonzentration gibt es Unterschiede zum Skelettmuskel: Während an der Skelettmuskelfaser die zusätzlichen Ca^{2+}-Ionen hauptsächlich vom sarkoplasmatischen Retikulum – also intrazellulär – freigesetzt werden, stammen sie an der Herzmuskelfaser sowohl von **extra-** als auch von **intrazellulär**. Nachdem an der Herzmuskelfaser durch den Einwärtsstrom von Na^{+}-Ionen ein Aktionspotenzial entstanden ist, öffnen sich in der Zellmembran Kalziumkanäle und Ca^{2+}-Ionen fließen in die Zelle (S. 133). Dieser Kalziumeinstrom von extrazellulär führt dazu, dass auch das sarkoplasmatische Retikulum Ca^{2+}-Ionen freisetzt.

WISSEN TO GO

Kontraktion der quergestreiften Herzmuskulatur

Der elektrische Impuls stammt von speziellen Herzmuskelzellen, die das **herzeigene Erregungsbildungs- und Erregungsleitungssystem** bilden. Die Erregung wird über die Glanzstreifen von Zelle zu Zelle weitergegeben. Daher kontrahieren immer **alle Muskelfasern** des Herzmuskels.

Die **Kalziumkonzentration** steigt in der Herzmuskelzelle durch die **intrazelluläre** Freisetzung aus dem sarkoplasmatischen Retikulum und durch einen Einstrom von **extrazellulär** durch Kanäle in der Zellmembran.

Kontraktion der glatten Muskulatur

Die Kontraktionen der glatten Muskulatur verlaufen **langsamer** als die der quergestreiften Muskulatur. Anders als die quergestreiften Muskelfasern befindet sich die glatte Muskulatur vieler Organe in einem gewissen Kontraktionszustand (**Tonus**), der gesteigert oder gesenkt werden kann. Dieser Tonus wird dadurch möglich, dass sich einige Myosinköpfchen fest an das Aktin binden können. Dieser Mechanismus ist wichtig, um Energie zu sparen. Würde sich, wie bei der quergestreiften Muskulatur, das Köpfchen immer wieder vom Aktin lösen und unter ATP-Verbrauch neu anlagern, wäre der Energieverbrauch ungleich höher. Die **tonische Kontraktion** spielt vor allem bei der Spannung der Gefäßwände oder bei Schließmuskeln eine wichtige Rolle.

Erregung • Die glatte Muskulatur unterliegt ebenso wie die Herzmuskulatur keiner bewussten Kontrolle, weshalb auch sie **nicht** von Motoneuronen gesteuert wird. Je nachdem, in welchem Organ sie sich befinden, können die glatten Muskelfasern vielmehr durch unterschiedliche Reize erregt werden, u. a. durch:

- **elektrische Impulse:** Sie erreichen die Glattmuskelzellen über sympathische und parasympathische Fasern des **autonomen Nervensystems** (S. 497) oder über Fasern des selbstständig arbeitenden **Darmwandnervensystems** (S. 503). Die nervale Steuerung der glatten Muskulatur ist unwillkürlich.
- **Dehnung:** Über Dehnungsrezeptoren in der Muskulatur wird eine Füllung des Organs wahrgenommen, woraufhin sich die glatten Muskelzellen zusammenziehen. Dieser Mechanismus spielt z. B. bei einigen Gefäßen eine Rolle.
- **Hormone:** Hierzu zählen z. B. **Oxytocin** (S. 288), das auf die Muskulatur der Gebärmutter und der Brustdrüse wirkt, **Histamin**, das die Bronchien und die Gefäße beeinflusst, oder **Stickstoffmonoxid** (NO), das die Muskulatur der Gefäße entspannt.
- **lokale Reize:** Beispielsweise können auch der pH-Wert oder die Sauerstoff- oder Kohlendioxidkonzentration im Blut eine Kontraktion oder Relaxation bewirken.

Für die Kontraktion der Glattmuskelzellen sind Aktionspotenziale nicht unbedingt notwendig.

Übertragung auf die Muskelzellen • Wird der Reiz durch einen elektrischen Impuls übermittelt, werden – genauso wie bei der Skelettmuskulatur – von den Nervenenden verschiedene Überträgerstoffe freigesetzt. Allerdings ist **keine motorische Endplatte** ausgebildet, sondern die Botenstoffe werden von den Nervenenden einfach in unmittelbarer Nähe der Muskelzelle abgegeben.

Als Reaktion auf einen Reiz (Aktionspotenzial, Hormone oder Dehnung) öffnen sich im Sarkolemm **Kalziumkanäle**. Ca^{2+}-Ionen strömen in die Zelle und die intrazelluläre Kalziumkonzentration steigt. Bei den Glattmuskelzellen spielt das von **extrazellulär** einströmende Kalzium die Hauptrolle bei der Kontraktion. Aus intrazellulären Speichern werden nur geringe Kalziummengen freigesetzt.

Die weitere Erregungsausbreitung ist abhängig davon, wie die glatte Muskulatur aufgebaut ist. Man unterscheidet 2 Typen:

- **Single-Unit-Typ:** In einigen Organen, wie dem Darm, der Gebärmutter oder dem Harnleiter, stehen die Glattmuskelzellen wie beim Herzmuskel über Gap Junctions miteinander in Verbindung. Dies hat zur Folge, dass sich die Erregung über alle Zellen ausbreitet. Dieser Typ verfügt häufig über sog. Schrittmacherzellen, die spontan Erregungen auslösen können.
- **Multi-Unit-Typ:** In der glatten Muskulatur der größeren Blutgefäße und der Bronchien sind keine Gap Junctions ausgebildet. Die Zellen werden über Nervenimpulse erregt, wobei jede Nervenfaser – ähnlich wie bei der Skelettmuskulatur – eine bestimmte Zahl von Muskelfasern versorgt. Darüber, wie viele dieser Einheiten erregt werden, kann das Ausmaß der Kontraktion abgestuft werden.

Anstieg der Kalziumkonzentration • Er kommt bei der glatten Muskulatur hauptsächlich durch den Kalziumeinstrom von **extrazellulär** zustande. Genauso wie bei der quergestreiften Muskulatur ist der Anstieg der Kalziumkonzentration Voraussetzung für die Kontraktion. Der Mechanismus der Kontraktion unterscheidet sich allerdings etwas von dem der quergestreiften Muskulatur:

Anstelle des Troponins besitzt die Glattmuskelzelle als Regulatorprotein **Calmodulin**, das mit den Ca^{2+}-Ionen Komplexe bildet. Diese Komplexe lösen auf 2 Wegen die Kontraktion aus:

- Der Calmodulin-Kalzium-Komplex bindet an ein zusätzliches Protein, das **Caldesmon**, das an Tropomyosin gebunden ist. Daraufhin löst sich das Calmodulin ab, und die Bindungsstelle für das Myosinköpfchen wird frei.
- Er aktiviert außerdem ein Enzym, das eine **Phosphorylierung des Myosinköpfchens** bewirkt. Erst nach dieser Phosphorylierung kommt es zur Spaltung des an das Köpfchen gebundenen ATPs und zur Auslösung des Querbrückenzyklus.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

WISSEN TO GO

Kontraktion der glatten Muskulatur

Die Kontraktionen verlaufen an der glatten Muskulatur **langsam**. Im Gegensatz zur quergestreiften Muskulatur sind einige Myosinköpfchen dauerhaft an Aktin gebunden, wodurch die Muskulatur eine gewisse Grundspannung (**Tonus**) aufweist. Dadurch wird weniger ATP und damit Energie verbraucht.

Die Kontraktion kann durch Nerven, Dehnung, Hormone oder sonstige Reize ausgelöst werden. Auf den Reiz hin öffnen sich Kalziumkanäle in der Zellmembran und Kalzium strömt von **extrazellulär** in die Zelle. Die intrazelluläre Freisetzung spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Die Glattmuskelzellen können entweder wie die Herzmuskelzellen untereinander über Gap Junctions gekoppelt oder wie die Skelettmuskelzellen in Form motorischer Einheiten organisiert sein.

5.5 Nervengewebe

5.5.1 Aufgaben und Aufbau

Das gesamte Nervengewebe des Körpers bildet ein eigenes Organsystem, das **Nervensystem** (S. 466). Es nimmt Informationen auf, verarbeitet sie, steuert Bewegungen und die Organfunktionen und ermöglicht höhere Leistungen wie z. B. Bewusstsein, Gedächtnis, Emotionen und Denken.

Das Nervengewebe ist aus 2 Zellarten aufgebaut:

- **Neurone:** Sie stellen die eigentlichen Nervenzellen dar und sind für die Informationsübermittlung zuständig.
- **Gliazellen:** Sie umhüllen, stützen und ernähren die Neurone und sind damit für deren Funktion notwendig.

WISSEN TO GO

Nervengewebe

Das Nervengewebe besteht aus den eigentlichen Nervenzellen, den **Neuronen**, und Stützzellen, den **Gliazellen**. Über das Nervengewebe werden Informationen in Form von **elektrischen Impulsen** transportiert.

5.5.2 Neuron

Über die **Neurone** nimmt das Nervengewebe Informationen auf, leitet sie an andere Zellen (z. B. Nerven-, Drüsen- oder Muskelzellen) weiter und verarbeitet sie. Die Informationen sind dabei als elektrische Impulse verschlüsselt. Voraussetzung für die Funktion der Neurone ist, dass ihre Membran **elektrisch erregt** werden kann.

Das gesamte Nervensystem besteht aus 100 Milliarden bis 1 Billion Neuronen. Sie bilden ein komplexes Netzwerk, in dem jedes Neuron mit mindestens einem weiteren Neuron in Verbindung steht. Die meisten Neurone sind mit mehreren – teilweise weit über 1000 – Neuronen verbunden. An den Kontaktstellen zwischen den Neuronen sind spezielle Strukturen, die **Synapsen**, ausgebildet. Über sie wird die Information von Zelle zu Zelle übertragen.

Jedes Neuron setzt sich aus einem Zellkörper (Soma, Perikaryon), vielen Dendriten und einem Axon zusammen (▶ **Abb. 5.21**):

- **Dendriten:** Sie stellen kürzere Fortsätze dar und leiten die Informationen in Richtung des Zellkörpers.
- **Zellkörper:** Er bildet die „Zentrale" des Neurons und enthält die Zellorganellen.
- **Axon:** Dieser meist lange Fortsatz leitet die Informationen vom Zellkörper in Richtung Zielzelle.

Dendrit

Die **Dendriten** nehmen über Synapsen die Informationen von anderen Nervenzellen auf und leiten sie in Richtung Zellkörper. Sie stellen – meist eher kurze – Ausstülpungen von Zellmembran und Zytoplasma dar, die sich baumartig verzweigen (▶ **Abb. 5.21**). Durch die Dendriten vergrößert sich die Oberfläche des Neurons, sodass mehr Platz für synaptische Verbindungen mit anderen Neuronen entsteht. Die meisten Neurone besitzen mehrere Dendriten.

Zellkörper

Neurone haben eine hohe Stoffwechselaktivität. Im Zellkörper (**Perikaryon** oder **Soma**) werden alle für die Funktion des Neurons benötigten Proteine gebildet und von dort in die Fortsätze transportiert. Daher liegen hier zahlreiche Zellorganellen: Kern, raues und glattes endoplasmatisches Retikulum, viele Mitochondrien und ein ausgedehnter Golgi-Apparat. Das rER der Neurone wird auch als **Nissl-Substanz** bezeichnet. Der Durchmesser des Perikaryons kann von 10 bis 100 µm reichen.

Nicht nur an den Dendriten, sondern auch am Zellkörper können Informationen von anderen Nervenzellen eingehen. Bis zu einem Viertel der Oberfläche des Zellkörpers kann mit **Synapsen** bedeckt sein.

Axon

Das **Axon** setzt sich aus dem Neuriten und einer Hülle aus spezialisierten Gliazellen zusammen, die den Neuriten umgibt. Es leitet den elektrischen Impuls vom Zellkörper weg zu anderen Zellen. Es ist wesentlich länger als die Dendriten, seine Länge kann bis zu 1 m betragen.

! *Merke* Fortsätze der Nervenzellen

*Jedes Neuron kann **mehrere Dendriten** besitzen, aber nur **1 Axon**.*

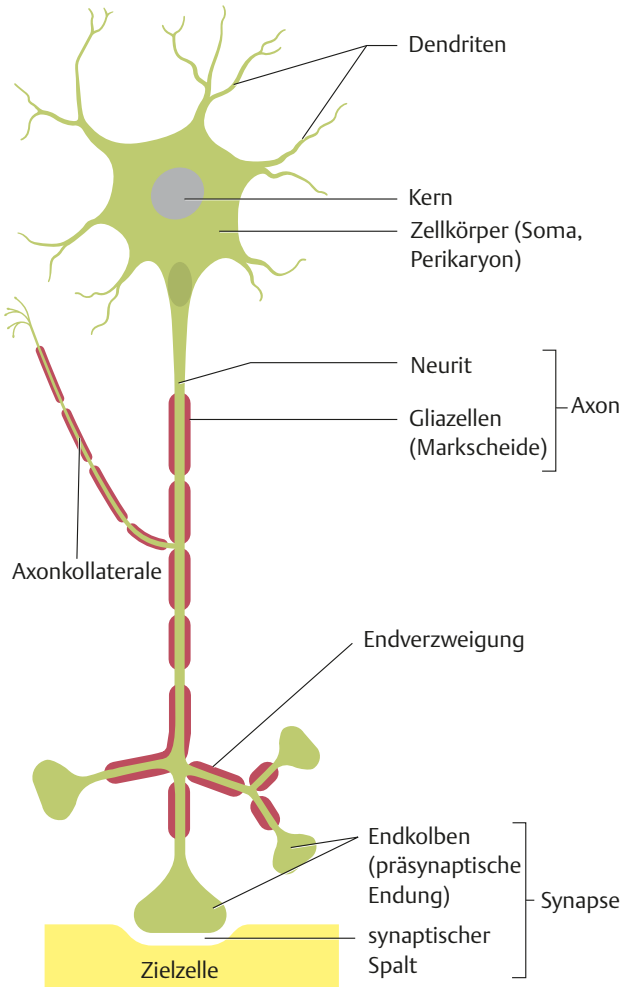
In seinem Verlauf kann das Axon Seitenäste, sog. **Axonkollateralen**, abgeben (▶ **Abb. 5.21**). Diese können dieselbe Zelle erreichen wie das Hauptaxon, aber auch zu anderen Zielen oder zurück zum Zellkörper ziehen. Das Ende des Axons ist meist stark verzweigt. Es bildet kleine Auftreibungen aus, die **Endkolben** (Boutons), die bereits Teil der Synapse sind.

Die **Gliazellen** bilden die sog. Mark- oder **Myelinscheide**. Von deren Ausprägung hängt ab, mit welcher Geschwindigkeit das Axon den elektrischen Impuls leitet (S. 116).

Axone sind außerdem in der Lage, Stoffe entlang ihres Zytoskeletts zu transportieren. Dies ist z. B. wichtig, um die Botenstoffe, die für die synaptische Reizübermittlung notwendig sind, vom Zellkörper an die Enden des Axons zu bringen. Auch bei der Freisetzung der Hormone Oxytocin und ADH aus der Hirnanhangdrüse (S. 288) ist dieser **axonale Transport** von Bedeutung. Er funktioniert übrigens in beide Richtungen: Es können auch Stoffe von den Enden des Axons

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Abb. 5.21 Aufbau eines Neurons.



Ein Neuron besitzt mehrere Dendriten und 1 Neuriten, der von spezialisierten Gliazellen umgeben ist und als Axon bezeichnet wird. Das Axon kann in seinem Verlauf Seitenäste abgeben. Seine Enden sind zu Endkolben ausgebildet, die Teil einer Synapse sind. Der Zellkörper wird als Perikaryon oder Soma bezeichnet.
Aus: Endspurt Vorklinik Histologie. Thieme 2017.

aufgenommen und von dort zum Perikaryon transportiert werden.

WISSEN TO GO

Nervenzelle

Die Nervenzelle (**Neuron**) gliedert sich in:
- **Dendriten:** Über diese kurzen, verzweigten Fortsätze werden Informationen aufgenommen.
- **Zellkörper:** Er enthält die Zellorganellen und sammelt die Informationen.
- **Axon:** Über diesen bis zu 1 m langen Fortsatz gibt die Nervenzelle die Information weiter. An seinem Ende verzweigt sich das Axon und bildet Synapsen mit seinen Zielzellen.

Entlang des Axons können nicht nur Reize, sondern über das Zytoskelett auch Substanzen transportiert werden (**axonaler Transport**).

Synapsen

Synapsen sind Kontaktstellen zwischen 2 Zellen, über die Informationen weitergegeben werden.

Synapsenarten • Prinzipiell unterscheidet man chemische und elektrische Synapsen:
- **chemische Synapsen:** Hier werden die Informationen mithilfe chemischer Botenstoffe (Transmitter) von einer Zelle an die andere übergeben. Diese Botenstoffe im Nervensystem werden als **Neurotransmitter** bezeichnet. Sie werden bei Erregung der Nervenzelle ausgeschüttet und lösen an den Zellen, die synaptisch gekoppelt sind, entweder ebenfalls eine Erregung aus oder hemmen die Erregungsweiterleitung.
- **elektrische Synapsen:** Bei dieser Form der Synapse sind die Zellen über **Gap Junctions** (S. 73) elektrisch miteinander verbunden. Die Erregung wird direkt an die nächste Zelle weitergegeben, indem Ionen durch die kleinen Kanäle der Gap Junctions von der einen in die andere Zelle strömen. Es ist weder eine Übertragung auf weiter entfernte Zellen noch eine hemmende Übertragung möglich.

Neurone geben ihre Informationen in der Regel über **chemische Synapsen** an andere Zellen weiter. Die nachfolgende Zelle kann dabei eine weitere Nervenzelle oder auch eine Muskel- oder Drüsenzelle sein. Die motorischen Endplatten der Motoneurone (S. 109) zählen ebenfalls zu den Synapsen.

Die **elektrischen Synapsen** kommen im Nervensystem nur vereinzelt vor, z. B. im Innenohr und in der Netzhaut des Auges. Wesentlich häufiger sind sie in der quergestreiften Herzmuskulatur und in der glatten Muskulatur (S. 111).

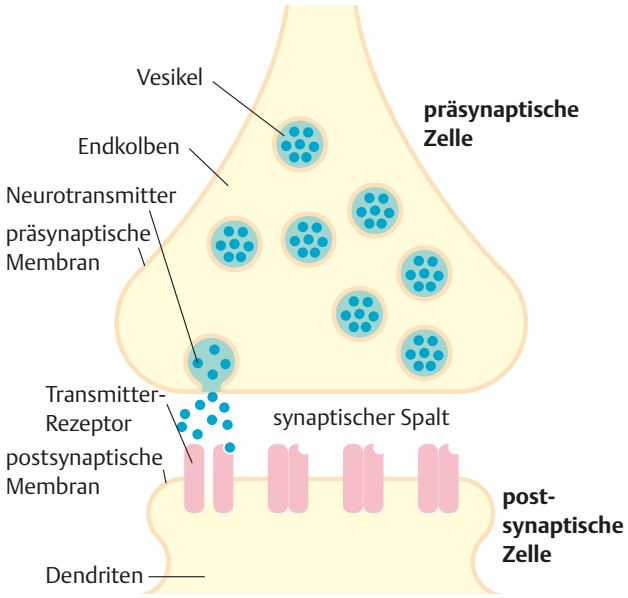
Aufbau einer chemischen Synapse • Die Nervenzelle, über deren Axon die Information an der Synapse eintrifft, wird als **präsynaptische Zelle** bezeichnet, die Nervenzelle, auf deren Dendriten oder deren Perikaryon die Erregung per Synapse übertragen wird, als **postsynaptische Zelle**. Die Begriffe leiten sich vom lateinischen „prae“ für „vor“ und „post“ für „nach“ ab.

An der Synapse selbst unterscheidet man 3 Abschnitte (▶ **Abb. 5.22**):
- **präsynaptische Membran:** Dabei handelt es sich um den Membranabschnitt des präsynaptischen Axons (genauer seines Endkolbens), der der postsynaptischen Zelle zugewandt ist.
- **postsynaptische Membran:** So wird der Membranabschnitt des Dendriten oder des Perikaryons bezeichnet, der der präsynaptischen Membran benachbart ist.
- **synaptischer Spalt:** Er liegt zwischen prä- und postsynaptischer Membran und ist ca. 20 nm breit.

Im Endkolben des Axons befinden sich **Vesikel**, die mit dem **Neurotransmitter** gefüllt sind. Diese werden im Perikaryon gebildet und gelangen über den axonalen Transport an das Ende des Axons. Trifft nun eine Erregung am Endkolben ein, verschmelzen diese Vesikel mit der präsynaptischen Membran und der Neurotransmitter gelangt in den **synaptischen Spalt**. Er diffundiert zur **postsynaptischen Membran**. Dort befinden sich spezielle Proteine zur Bindung der Neurotransmittermoleküle, sog. **Rezeptoren**. Wenn der Neurotransmitter an diese Rezeptoren bindet, wird die postsynaptische Zelle erregt und die Information dadurch weitergeleitet.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Abb. 5.22 Aufbau einer chemischen Synapse.



Chemische Synapsen übertragen den Reiz von einer Nervenzelle auf deren Zielzelle. Sie bestehen aus einer prä- und einer postsynaptischen Membran und dem synaptischen Spalt. An der präsynaptischen Membran werden auf einen Reiz hin Neurotransmitter ausgeschüttet, die an Rezeptoren der postsynaptischen Membran binden, wodurch diese erregt wird. *Aus: Gekle M et al.: Taschenlehrbuch Physiologie. Thieme 2015.*

Nach der Erregungsweiterleitung wird der Neurotransmitter wieder über die präsynaptische Membran aufgenommen – entweder als komplettes Molekül oder nachdem er durch Enzyme aufgespalten wurde.

Neurotransmitter • An den verschiedenen Synapsen des Nervensystems kommen unterschiedliche Neurotransmitter zum Einsatz. Abhängig von dem verwendeten Transmitter lassen sich hemmende und erregende Synapsen unterscheiden:

- **erregende Synapsen:** Sie führen zu einer Erregung der postsynaptischen Zelle und leiten damit die Information bzw. den elektrischen Impuls weiter.
- **hemmende Synapsen:** Sie senken die Erregbarkeit der postsynaptischen Membran und hemmen so die Erregungsleitung.

Zu den wichtigsten **erregenden Neurotransmittern** zählen:

- **Glutamat:** Die Aminosäure wirkt an den Synapsen des zentralen Nervensystems (S. 468) als erregender Neurotransmitter.
- **Acetylcholin:** Es überträgt die Erregung an den motorischen Endplatten und im autonomen Nervensystem (S. 497).

Die häufigsten **hemmenden Neurotransmitter** sind:

- **GABA:** Die Gamma-Aminobuttersäure ist ein Abkömmling des Glutamats. Sie kommt v. a. an hemmenden Synapsen des Gehirns vor.
- **Glycin:** Die Aminosäure dient im Rückenmark als hemmender Neurotransmitter.

WISSEN TO GO

Synapsen

Man unterscheidet elektrische und chemische Synapsen. Die **elektrischen Synapsen** bestehen aus **Gap Junctions**, der elektrische Reiz wird über Ionenströme direkt von Zelle zu Zelle fortgeleitet. Sie kommen im Nervengewebe so gut wie nicht vor.

Bei den **chemischen Synapsen** wird der elektrische Reiz in ein chemisches Signal umgewandelt, das an der Zielzelle wiederum einen elektrischen Reiz auslöst. Sie sind aufgebaut aus:

- **präsynaptischer Membran:** Sie bildet das Ende des Axons, das den Reiz herantransportiert. Hier werden die chemischen Überträgerstoffe (Neurotransmitter) freigesetzt.
- **postsynaptischer Membran:** Membranabschnitt der Zielzelle, die der präsynaptischen Membran gegenüberliegt. Hier befinden sich Rezeptoren für die Neurotransmitter.
- **synaptischem Spalt:** Er liegt zwischen prä- und postsynaptischer Membran.

Je nachdem, welcher Neurotransmitter von der Synapse verwendet wird, kann eine Synapse **erregend** sein und die Information weiterleiten oder **hemmend** und das Signal abschwächen. Wichtige erregende Neurotransmitter sind Glutamat und Acetylcholin, wichtige hemmende Neurotransmitter GABA (Gamma-Aminobuttersäure) und Glycin.

5.5.3 Gliazellen

Im Nervengewebe kommen etwa 10-mal mehr Gliazellen als Neurone vor. Es gibt verschiedene Arten von Gliazellen, die unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Die Gliazellen des Gehirns und des Rückenmarks (zentrales Nervensystem, ZNS) unterscheiden sich von den Gliazellen des übrigen Nervensystems. Man spricht deshalb von einer zentralen und einer peripheren Glia.

Zentrale Glia • In Gehirn und Rückenmark kommen folgende 4 Gliazelltypen vor:

- **Astrozyten:** Sie sind die häufigsten und größten Gliazellen des ZNS und besitzen meist zahlreiche Fortsätze. Sie haben v. a. eine **Stützfunktion** und übernehmen **Stoffwechselaufgaben**. Dazu zählen beispielsweise die Aufrechterhaltung des Ionengleichgewichts im Extrazellularraum und die Speicherung von Glukose zur Ernährung der Neurone. Die Astrozyten bilden außerdem die Blut-Hirn-Schranke (S. 486).
- **Oligodendrozyten:** Sie umhüllen die Nervenfasern und bilden so die **Markscheiden** des ZNS. Sie verzweigen sich weniger stark als die Astrozyten und besitzen nur wenige Fortsätze.
- **Ependymzellen:** Sie kleiden die Hirnkammern und den Zentralkanal des Rückenmarks (S. 474) aus und sind am Austausch der Hirn- und Rückenmarksflüssigkeit beteiligt.
- **Mikrogliazellen:** Sie übernehmen im ZNS hauptsächlich **Abwehrfunktionen**. Sie können Erreger, Fremdkörper oder Zelltrümmer aufspüren und aufnehmen und zählen zu den Makrophagen (S. 326). Außerdem sind sie zur Antigenpräsentation (S. 343) in der Lage.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Periphere Glia • Hier unterscheidet man 2 Gliazelltypen:
- **Schwann-Zellen:** Sie umhüllen die Axone der Nervenzellen und bilden die **Markscheiden** der Nervenfasern. Sie spielen eine wichtige Rolle bei der Ernährung des Neurons und der Erregungsleitung.
- **Mantelzellen:** Sie bilden eine Schicht um den Zellkörper derjenigen Neurone, die in Zellansammlungen, den Ganglien (S. 487), zusammenliegen. Sie dienen ebenfalls der Ernährung der Nervenzelle und werden auch als **Satellitenzellen** bezeichnet.

WISSEN TO GO

Gliazellen

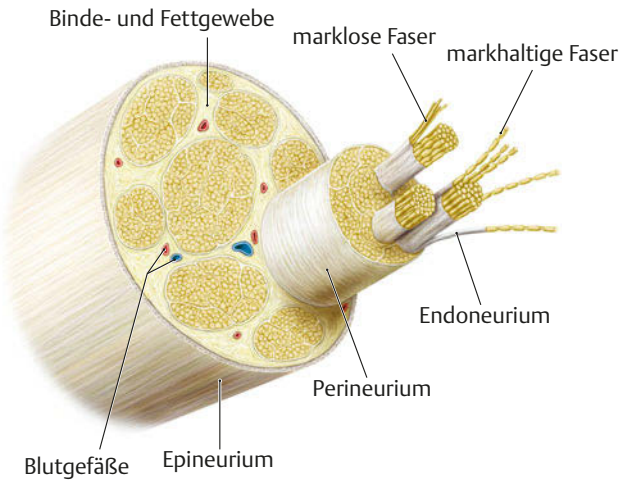
Im zentralen Nervensystem (Gehirn und Rückenmark) kommen folgende Gliazellen vor:
- **Oligodendrozyten:** Sie bilden die Markscheide der Axone.
- **Astrozyten:** Sie stützen und ernähren die Nervenzellen des zentralen Nervensystems.
- **Ependymzellen:** Sie kleiden die Hohlräume des zentralen Nervensystems aus und sind am Austausch der Hirn- und Rückenmarksflüssigkeit beteiligt.
- **Mikrogliazellen:** Bei ihnen handelt es um Abwehrzellen.

Außerhalb des zentralen Nervensystems finden sich:
- **Schwann-Zellen:** Sie bilden die Markscheide der peripheren Nerven.
- **Mantelzellen:** Sie ernähren die Neurone.

5.5.4 Nervenfaser

Das Axon eines Neurons und seine Gliazellschicht bilden gemeinsam eine **Nervenfaser**. Lagern sich mehrere Nervenfasern zusammen, entsteht ein **Nerv** (▶ **Abb. 5.23**).

Abb. 5.23 Aufbau eines Nervs.



Ein Nerv besteht aus zahlreichen Nervenfasern, die vom Endoneurium umhüllt werden. Das Perineurium fasst mehrere Fasern zu Nervenfaserbündeln zusammen, während das Epineurium den gesamten Nerv umgibt. Zwischen den Nervenfaserbündeln liegen Binde- und Fettgewebe und kleine Blutgefäße. *Aus: Schünke M, Schulte E, Schumacher U: Prometheus LernAtlas der Anatomie. Illustrationen von Voll M und Wesker K. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2018.*

Bindegewebshüllen

Jede Nervenfaser besitzt eine eigene Hüllschicht, das **Endoneurium**. Es besteht aus einer Basalmembran, die direkt den Gliazellen anliegt, und einer darüberliegenden Bindegewebsschicht.

Das **Perineurium** wiederum fasst mehrere Nervenfasern zu Nervenfaserbündeln zusammen. Alle Nervenfaserbündel eines Nervs werden zusammen vom **Epineurium** umgeben. Es stellt die äußere Bindegewebsschicht eines Nervs dar.

Zwischen den Nervenfaserbündeln befindet sich Fett- und Bindegewebe, in dem kleine Blutgefäße verlaufen.

Einteilung der Nervenfasern

Nervenfasern können nach mehreren Kriterien eingeteilt werden. Die wichtigsten sind:
- in welche Richtung die Information transportiert wird,
- welcher Art die Information ist und
- ob die Nervenfaser eine Markscheide besitzt oder nicht.

Richtung des Informationsflusses • Nervenfasern, die Informationen in Richtung Gehirn und Rückenmark leiten, werden als **afferente** Nervenfasern oder kurz Afferenz bezeichnet. Die Fasern, die Informationen vom zentralen Nervensystem in die Peripherie transportieren, heißen **efferente** Nervenfasern oder Efferenz. In einem Nerv können sowohl afferente als auch efferente Fasern vorkommen.

Faserqualitäten • Nervenfasern transportieren immer nur eine Art von Information. Je nach Funktion unterscheidet man:
- **motorische Nervenfasern:** Sie sind efferent und transportieren Bewegungsbefehle vom zentralen Nervensystem zu den Muskeln (sog. Motoneurone).
- **sensible Nervenfasern:** Sie sind afferent und bringen Informationen, wie z. B. Sinneswahrnehmungen, von der Körperperipherie zum ZNS. Im deutschen Sprachraum wird häufig – wenn auch nicht immer konsequent – zwischen sensiblen (Fühlen, Spüren) und **sensorischen** (Sehen, Hören, Riechen, Schmecken) Fasern unterschieden. Im englischen Sprachraum gibt es diese Unterscheidung nicht.
- **autonome Nervenfasern:** Sie sind efferent und leiten die Befehle des autonomen Nervensystems (S. 497) zu den Organen.

Innerhalb eines Nervs können Fasern aller 3 Faserqualitäten verlaufen.

WISSEN TO GO

Aufbau einer Nervenfaser

Unter einer Nervenfaser versteht man das **Axon** einer Nervenzelle und seine **Hülle** aus Gliazellen. Mehrere Nervenfasern werden von einer bindegewebigen Hülle zu Nervenfaserbündeln zusammengefasst, mehrere Nervenfaserbündel bilden gemeinsam einen **Nerv**.

Afferente Nervenfasern leiten die Informationen in Richtung des zentralen Nervensystems. Sie sind **sensibel**, d. h., sie transportieren Sinneseindrücke. **Efferente** Nervenfasern leiten die Information in die entgegengesetzte Richtung. Sie können **motorisch** sein und Befehle an die Skelettmuskulatur transportieren (Motoneurone) oder **autonom** und der Steuerung der Organe dienen.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Markscheide • Die Axone der Nervenzellen werden von einer Gliazellschicht umgeben. In Gehirn und Rückenmark wird diese Hülle von den Oligodendrozyten, an den peripheren Nerven von den Schwann-Zellen gebildet. Nach ihrem Aufbau unterscheidet man die markhaltigen von den marklosen Nervenfasern:

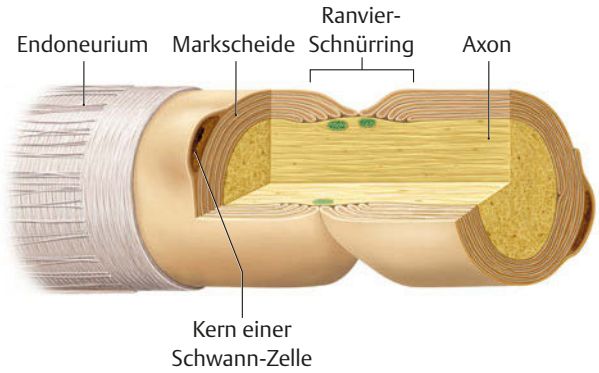
Bei den **markhaltigen Nervenfasern** bilden die Gliazellen dünne Lamellen aus, die sich in bis zu 100 Lagen um das Axon wickeln. Sie bestehen aus einem Gemisch aus Lipiden und Proteinen, das auch als **Myelin** bezeichnet wird. Nervenfasern mit einer Markscheide werden daher auch **myelinisierte Nervenfasern** genannt. Dort, wo die Wicklungen der einen Gliazelle enden und die der nächsten beginnen, ist die Markscheide kurz unterbrochen. Diese Einkerbungen heißen **Ranvier-Schnürringe** (▸**Abb. 5.24**). Die Markscheide dient dazu, die **Erregungsausbreitung** entlang des Axons zu **beschleunigen**.

Patho Multiple Sklerose

*Bei der **Multiplen Sklerose** kommt es zu einer Schädigung (**Demyelinisierung**) der Markscheiden vorwiegend im Gehirn. Sie wird von körpereigenen Abwehrzellen verursacht, die irrtümlich das Myelin angreifen. Durch den Abbau der Markscheiden wird die Erregungsleitung verzögert bzw. gestört, wodurch es im Verlauf der Erkrankung u. a. zu Sehstörungen, schneller Ermüdbarkeit, Lähmungen und Störungen der Sensibilität kommen kann. Eine Heilung der Erkrankung ist derzeit noch nicht möglich.*

Marklose oder **nicht myelinisierte Nervenfasern** haben keine Myelinscheide, sind aber auch von Gliazellen umhüllt. Die Gliazellen hüllen dabei mehrere Axone auf einmal ein, im ZNS können die Fasern aber auch ohne Hülle sein. Die marklosen Fasern sind dünn. Die Leitungsgeschwindigkeit von marklosen Fasern ist deutlich geringer als bei markhaltigen. Marklose Fasern findet man v. a. im vegetativen Nervensystem.

Abb. 5.24 Aufbau einer markhaltigen Nervenfaser.



Bei markhaltigen Nervenfasern legen sich dünne Lamellen der Gliazellen in mehreren Schichten um das Axon. Dort, wo die Lamellen der einen Gliazelle enden und die der nächsten beginnen, weist die Myelinhülle eine Einkerbung auf, den Ranvier-Schnürring. *Aus: Schünke M, Schulte E, Schumacher U: Prometheus LernAtlas der Anatomie. Illustrationen von Voll M und Wesker K. 5. Aufl. Stuttgart: Thieme; 2018.*

Erreicht ein solches Aktionspotenzial die Endkolben eines Axons und damit die **Synapse**, werden **Neurotransmitter** in den synaptischen Spalt freigesetzt. Dadurch wird das elektrische Signal in ein **chemisches Signal** umgewandelt. Die Neurotransmitter binden an Rezeptoren der postsynaptischen Membran und führen dort zu einer Änderung des Membranpotenzials. Dieses jetzt wieder **elektrische Signal** wird über die Dendriten zum Perikaryon geleitet, wo die Information verarbeitet wird. Da an den Dendriten und am Perikaryon eines Neurons zahlreiche Synapsen vorkommen, entscheidet die Summe der Reize, ob eine Erregung fortgeleitet wird oder nicht. Für die Erregungsweiterleitung entsteht dann am Anfangsteil des Axons ein Aktionspotenzial, das sich zum Endkolben und damit zur nächsten Synapse fortpflanzt.

WISSEN TO GO

Markhaltige und marklose Nervenfasern

Bei den **markhaltigen Nervenfasern** bilden die Gliazellen eine **Markscheide**, indem sie die Axone mit dünnen Lamellen aus Proteinen und Lipiden (**Myelin**) umwickeln. Dort, wo die Lamellen der einen Gliazelle enden und die der nächsten beginnen, bildet sich in der Markscheide eine Einziehung, der **Ranvier-Schnürring**.

Auch **marklose Fasern** sind von Gliazellen umhüllt, diese bilden allerdings keine Myelinhülle. Markhaltige Fasern können Reize wesentlich schneller transportieren als marklose Fasern.

WISSEN TO GO

Erregungsweiterleitung

Nervenfasern leiten Informationen in Form von elektrischen Impulsen. Dies funktioniert nur, wenn die Zelle **erregbar** ist, also an ihrer Membran eine Spannung ausgebildet ist, die sich verändern kann. Die Spannung, die bei der nicht erregten Zelle besteht, ist das **Ruhemembranpotenzial**. Es wandelt sich bei entsprechender Erregung in ein **Aktionspotenzial** um.

5.5.5 Erregungsleitung

In den Nervenfasern werden die Informationen in Form von **elektrischen Impulsen** weitergeleitet. Voraussetzung hierfür ist, dass an den Zellmembranen der Neurone eine elektrische Spannung herrscht, die sich verändern kann. Die Spannung, die an der Membran einer ruhenden, also nicht erregten Zelle vorliegt, wird als **Ruhemembranpotenzial** bezeichnet. Bei der Erregungsweiterleitung verändert sich diese Spannung, die Zellmembran **depolarisiert**. Aus dem Ruhemembranpotenzial wird ein **Aktionspotenzial**.

Ruhemembranpotenzial

Die Grundlage der Erregungsleitung bildet die **Ruhespannung an der Zellmembran**. Dieses Ruhemembranpotenzial kommt dadurch zustande, dass die Konzentrationen der verschiedenen Ionen auf beiden Seiten der Membran unterschiedlich hoch sind. Dabei spielen die Natrium- und die Kalium-Ionen die wichtigste Rolle:

- Die **Natriumkonzentration** ist im Extrazellularraum hoch und im Zytoplasma niedrig.
- Die **Kaliumkonzentration** ist im Zytoplasma hoch und im Extrazellularraum niedrig.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

Entstehung des Ruhemembranpotenzials • Könnten nun die Ionen die Zellmembran ungehindert durchdringen, würden so lange Na^+-Ionen in die Zelle und K^+-Ionen aus der Zelle strömen, bis sich die Konzentrationen innerhalb und außerhalb der Zelle ausgeglichen hätten. Diesem Konzentrationsausgleich stehen aber 2 Umstände entgegen:

- **die selektive Permeabilität der Membran:** Da in der ruhenden Zellmembran die Ionenkänale für Kalium geöffnet und die für Natrium weitestgehend geschlossen sind, ist sie für **K^+ wesentlich besser durchgängig** als für Na^+. Daher strömen viel mehr Kalium-Ionen entlang ihres osmotischen Gradienten aus der Zelle als Natrium-Ionen in die Zelle.
- **der elektrische Gradient:** Mit jedem K^+, das die Zelle verlässt, geht dieser eine positive Ladung verloren und das Zellinnere wird negativer. Diese Negativität wird dadurch verstärkt, dass sich im Zytoplasma viele negativ geladene Proteine befinden, die die Zelle nicht verlassen können. Die wachsende negative Ladung des Zellinneren verhindert schließlich, dass weitere Kalium-Ionen und damit positive Ladungen die Zelle verlassen, auch wenn sich die intra- und die extrazelluläre Kaliumkonzentration noch nicht angeglichen haben.

Das **Ruhemembranpotenzial** ist also die Spannung, die an der Zellmembran anliegt, wenn der osmotische und der elektrische Gradient sich gegenseitig aufheben. Es liegt bei Nervenzellen bei **–70 mV**. Das bedeutet, dass die Zelle gegenüber ihrer Umgebung negativ geladen ist.

Auch die **Muskelzellen** zählen zu den erregbaren Zellen. Das Ruhemembranpotenzial einer quergestreiften Muskelzelle beträgt ca. **–90 mV.**

Aufrechterhaltung des Ruhemembranpotenzials • Da sich beim Ruhepotenzial der osmotische und der elektrische Gradient aufheben, müsste der Ionenfluss eigentlich zum Erliegen kommen. Tatsächlich ist es aber so, dass die Zellmembran für Natrium-Ionen nicht völlig undurchlässig ist und deshalb Na^+ in das Zellinnere gelangt. Dieser Einstrom von geringen Mengen Na^+ nennt man **Leckstrom**. Er würde nach und nach dazu führen, dass sich die intra- und extrazelluläre Natriumkonzentration angleichen und sich die Negativität des Zellinneren verringert – das Ruhemembranpotenzial würde aufgehoben. Damit dies nicht geschieht, muss dem Leckstrom entgegengewirkt und der Konzentrationsunterschied zwischen Zytoplasma und Extrazellularraum aufrechterhalten werden. Dies geschieht mithilfe einer Ionenpumpe in der Zellmembran, der **Natrium-Kalium-ATPase** (S. 77). Sie pumpt Na^+ aus der Zelle und gleichzeitig K^+ in die Zelle – und damit entgegen dem jeweiligen Konzentrationsgefälle, was nur unter **Energieverbrauch** möglich ist. Die notwendige Energie wird durch die Spaltung von ATP bereitgestellt, woher auch der Name der Pumpe rührt.

WISSEN TO GO

Ruhemembranpotenzial

Das Ruhemembranpotenzial kommt durch eine **Konzentrations-** und eine **Spannungsdifferenz** zwischen Intra- und Extrazellularraum zustande.

Wichtig ist v. a. die Konzentration der **Kalium-** und der **Natrium-Ionen**. Für K^+ ist sie in der Zelle hoch und außerhalb der Zelle gering, für Na^+ ist es umgekehrt. Da die Zellmembran nur für K^+ durchlässig ist, strömen Kalium-Ionen aus der Zelle. Dadurch entsteht ein Ungleichgewicht hinsichtlich der elektrischen Ladung: Das Zellinnere wird immer negativer, da positive Ladung verloren geht. Letztlich steigt die Negativität im Zytoplasma so stark an, dass keine Kalium-Ionen mehr die Zelle verlassen können, obwohl das Konzentrationsgefälle noch nicht ausgeglichen ist. Dies ist der Fall, wenn an der Zellmembran eine Spannung von **–70 mV** herrscht, das Ruhemembranpotenzial. Bei den ebenfalls erregbaren Muskelzellen beträgt es –90 mV.

Aktionspotenzial

Bei der Weiterleitung von elektrischen Reizen spielt das **Aktionspotenzial** eine wesentliche Rolle. Dafür öffnen sich in der Zellmembran **Natriumkanäle** und Na^+ strömt in großen Mengen in die Zelle. Dies führt dazu, dass sich die Ladungsverhältnisse umkehren: War während des Ruhemembranpotenzials das Zellinnere gegenüber der Umgebung negativ geladen, ist es nun im Vergleich zum Extrazellularraum positiv geladen.

Nervenzellen sind übrigens nicht die einzigen Zellen im menschlichen Körper, die Aktionspotenziale bilden können. Auch Muskel- und Sinneszellen sind dazu fähig. An den Muskelzellen werden die Aktionspotenziale für das Auslösen einer Kontraktion benötigt.

Depolarisation • Dem Aktionspotenzial geht eine kleine Änderung des Membranpotenzials voraus, die **Depolarisation**. Sie stellt das Signal für die Öffnung der Natriumkanäle und damit für die Entstehung des Aktionspotenzials dar. Diese Depolarisation kann z. B. durch den Neurotransmitter an der Synapse verursacht werden, durch die Erregung des benachbarten Membranabschnitts oder durch die Reizung einer Sinneszelle.

Voraussetzung dafür, dass ein Aktionspotenzial entsteht, ist, dass durch die Depolarisation das Membranpotenzial von –70 mV auf den **Schwellenwert von –50 mV** angehoben wird. Für ein Aktionspotenzial gilt das **Alles-oder-nichts-Prinzip**: Wird der Schwellenwert nicht erreicht, wird auch kein Aktionspotenzial ausgebildet. Wird er erreicht, entsteht ein Aktionspotenzial, und zwar unabhängig davon, wie stark der Reiz war. Stärkere Reize führen also nicht zu stärkeren Aktionspotenzialen – diese sind immer gleich.

Entstehung des Aktionspotenzials • Wird der Schwellenwert von –50 mV erreicht, öffnen sich in der Zellmembran vor allem **spannungsabhängige Natriumkanäle** und Na^+ strömt in die Zelle. Dadurch verringert sich das Konzentrationsgefälle für Na^+ und die Negativität des Zellinneren und das Membranpotenzial erreicht positive Werte. Diese zunehmende Depolarisation der Zellmembran führt zur Öffnung weiterer Natriumkanäle und das Aktionspotenzial pflanzt sich ohne Verlust der Reizstärke entlang des Axons fort.

Ende des Aktionspotenzials • Bereits nach 1–2 Millisekunden schließen sich die Natriumkanäle wieder und spannungsabhängige **Kaliumkanäle** öffnen sich. Der Na^+-Einstrom wird damit beendet, und K^+-Ionen strömen ihrem Konzentrationsgefälle folgend aus der Zelle heraus. Das Membranpotenzial normalisiert sich und erreicht schließlich das Ruhemembranpotenzial. Die eingeströmten Natrium-Ionen werden von der Natrium-Kalium-ATPase wieder aus der Zelle gepumpt.

Refraktärzeit • Nachdem das Aktionspotenzial beendet ist, kann die Zelle über einen bestimmten Zeitraum nicht wieder erregt werden. Diese Zeitspanne wird als **absolute Re-**

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.

fraktärzeit bezeichnet. Sie dauert bei Nervenzellen ca. 2 Millisekunden und ist dadurch bedingt, dass die spannungsabhängigen Natriumkanäle zunächst inaktiviert bleiben, also sich nicht sofort wieder öffnen können. Die Refraktärzeit bewirkt, dass sich die Aktionspotenziale am Axon in nur eine Richtung ausbreiten können: Ein rückwärts gerichteter Transport ist nicht möglich, da der Membranabschnitt, von dem der Reiz kam, vorübergehend nicht erregbar ist.

An die absolute schließt sich die **relative Refraktärzeit** von meist mehreren Millisekunden an. Während dieser Zeit öffnen sich die Natriumkanäle zwar, das Schwellenpotenzial dafür liegt aber höher. Es ist also ein stärkerer Reiz nötig, um ein Aktionspotenzial auszulösen. Außerdem sind weniger Natriumkanäle verfügbar. Aus diesem Grund fallen Aktionspotenziale, die während der relativen Refraktärzeit entstehen, schwächer aus.

Dauer der Aktionspotenziale • Ein Aktionspotenzial dauert an der Nervenzelle **1–2 Millisekunden** und am Skelettmuskel ca. 10 Millisekunden. Die Aktionspotenziale der Herzmuskelzellen sind mit ca. 300 Millisekunden deutlich länger, weil hier noch eine Plateauphase (S. 133) vorkommt.

WISSEN TO GO

Aktionspotenzial

Bei der Weiterleitung eines Reizes ändert sich das Membranpotenzial, und es bildet sich ein **Aktionspotenzial** aus. Verantwortlich dafür sind **Natriumkanäle** in der Zellmembran. Sie öffnen sich, wenn ein Reiz in dem Membranabschnitt eintrifft. Dieser Reiz kann z. B. die Neurotransmitterausschüttung an der Synapse oder die Erregung des benachbarten Membranabschnitts sein. Er löst allerdings nur dann ein Aktionspotenzial aus, wenn er groß genug ist, um das Membranpotenzial von – 70 mV auf den **Schwellenwert** von –50 mV anzuheben. Erst ab diesem Schwellenwert öffnen sich die Natriumkanäle.

Na^+ fließt dann entlang seines Konzentrationsgefälles in die Zelle, sodass das Zellinnere im Bereich der Erregung **positiv** wird. Dadurch öffnen sich in den benachbarten Membranabschnitten ebenfalls Natriumkanäle, und das Aktionspotenzial pflanzt sich entlang des Neurons fort. Erreicht es am Ende des Axons die präsynaptische Membran, löst es die Ausschüttung des Neurotransmitters aus, und der Reiz wird auf die nächste Zelle übertragen.

Nach 1–2 Millisekunden schließen die Kanäle wieder und können auch durch erneut eintreffende Reize für eine gewisse Zeit (**Refraktärzeit**) nicht wieder öffnen.

Leitungsgeschwindigkeit

Wie schnell sich eine Erregung entlang des Axons ausbreitet, hängt von der Hülle des Axons ab. Bei markhaltigen Fasern ist die Leitungsgeschwindigkeit wesentlich höher.

Marklose Nervenfasern • Hier werden Erregungen **kontinuierlich** weitergeleitet, indem sich Stück für Stück die Natriumkanäle öffnen und die Membran nach und nach depolarisiert. Dabei wird eine Geschwindigkeit von maximal 2 m/s erreicht. Sie ist abhängig von der Dicke des Axons – je dicker das Axon, desto höher die Leitungsgeschwindigkeit. Marklose Fasern kommen in erster Linie im autonomen Nervensystem vor und dienen der Steuerung der Organfunktionen.

Markhaltige Nervenfasern • Bei den myelinisierten Fasern wird die Erregung sprunghaft (**saltatorisch**) und damit schneller weitergeleitet. Verantwortlich hierfür sind die **Ranvier-Schnürringe** (S. 116). An ihnen konzentrieren sich die Natriumkanäle, sodass nur dort Aktionspotenziale entstehen können. Die Erregung „springt" deshalb von Schnürring zu Schnürring, die dazwischenliegenden Membranabschnitte depolarisieren nicht. Die Leitungsgeschwindigkeit erreicht bei der saltatorischen Erregungsleitung Maximalwerte von 120 m/s.

Die Leitungsgeschwindigkeit an den markhaltigen Fasern wird außerdem von der Dicke der Myelinscheide beeinflusst. Je dicker die Myelinscheide ist, desto schneller wird die Erregung geleitet.

WISSEN TO GO

Reizleitungsgeschwindigkeit am Neuron

Bei **marklosen Fasern** pflanzt sich die Erregung entlang der gesamten Zellmembran **kontinuierlich** fort. Die Leitungsgeschwindigkeit beträgt max. 2 m/s.

Bei **markhaltigen Fasern** springt die Erregung von Ranvier-Schnürring zu Ranvier-Schnürring, da sich nur in diesen Bereichen Natriumkanäle befinden. Daher ist die **saltatorische Erregungsleitung** mit bis zu 120 m/s wesentlich schneller als die kontinuierliche.

I care Anatomie, Physiologie (ISBN 978-3-13-241820-2), © 2020. Thieme. All rights reserved. Dieses Dokument ist nur für den persönlichen Gebrauch bestimmt und darf in keiner Form an Dritte weitergegeben werden!
Usage subject to terms and conditions of license.