



Philipp Zimmer · Hans-Joachim Appell

Funktionelle Anatomie

Grundlagen sportlicher Leistung
und Bewegung

5. Auflage

Inklusive
SN Flashcards
Lern-App

 Springer

Funktionelle Anatomie

Philipp Zimmer • Hans-Joachim Appell

Funktionelle Anatomie

Grundlagen sportlicher Leistung und Bewegung

5., vollständig überarbeitete Auflage

 Springer

Philipp Zimmer
Institut für Sport und Sportwissenschaft
Abteilung für Leistung und Gesundheit
(Sportmedizin)
Technische Universität Dortmund
Dortmund, Deutschland

Hans-Joachim Appell
Deutsche Sporthochschule Köln
Köln, Deutschland

ISBN 978-3-662-61481-5 ISBN 978-3-662-61482-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61482-2>

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

Springer

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 1986, 1990, 1996, 2008, 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Umschlagsabbildung: (c) Adobe Stock Orlando Florin Ruso
Umschlaggestaltung: deblik Berlin

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Funktionelle Anatomie

Inhaltliche Struktur:
klare Gliederung durch alle Kapitel

Leitsystem:
Schnelle Orientierung über die Kapitel und Anhang

Lernziele: Was lerne ich in diesem Kapitel? Den Blick schärfen für das Wesentliche!

Verweise im Text – so kommen **Abbildungen** und **Tabellen** ins Blickfeld

Wichtig: Das wichtigste auf den Punkt gebracht

Tabelle: klare Übersicht der wichtigsten Fakten

3

3.2 Obere Extremität

Lernziele

In diesem Abschnitt werden der Schultergürtel und der Arm behandelt. Sie sollen erkennen, dass die bewegliche Konstruktion des Schultergürtels im Dienste der Beweglichkeit und Reichweite von Arm- und Handbewegungen steht. Von besonderer funktioneller Bedeutung ist außerdem das Zusammenwirken von Schultergürtel und Schultergelenk über vielfältige Muskelsysteme.

3.2.1 Schultergürtel und Schultergelenk

Die Skelettelemente des Schultergürtels vermitteln die Verbindung der oberen Extremität zum Rumpf. Im Vergleich zum Beckengürtel, der als Verbindung zum Bein eine starre und hoch belastbare Einheit mit der Wirbelsäule bildet, stellt der Schultergürtel eine in hohem Maße bewegliche Konstruktion dar, die mit dem Rumpfskelett nur zum Brustbein hin gelenkig verbunden ist. Seine Anteile sind das Schlüsselbein (*Clavicula*) und das Schulterblatt (*Scapula*), welches die Pfanne des Schultergelenks für die Aufnahme des Oberarms trägt (Abb. 3.29). Nach hinten ist der Schultergürtel offen;

! Das Schultergelenk ist aufgrund seiner Konstruktion das beweglichste Gelenk des Körpers. Da es keine knöchernen und eine zu vernachlässigende ligamentäre Sicherung besitzt, ist seine funktionelle Integrität in hohem Maß von den umgebenden Muskeln abhängig.



Abb. 3.35. Beispiel einer extremen Beweglichkeit im Schultergelenk

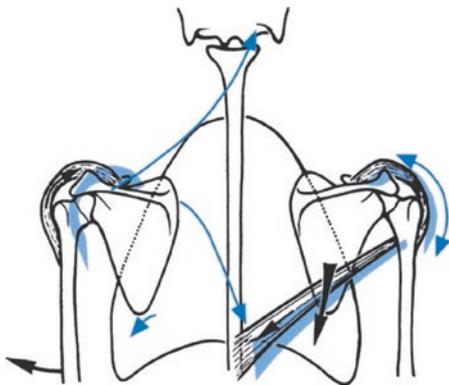
Schultergürtel offen; er stellt also keinen knöchernen Ring dar wie der Beckengürtel. Die Verbindung zur Wirbelsäule wird durch Muskelzüge hergestellt. Sie haben in all den Sportarten eine große funktionelle Bedeutung, bei denen eine Kraftübertragung von der oberen Extremität auf den Rumpf oder umgekehrt erfolgt (z. B. Turnen, Rudern, Schwimmen). Der größte Teil dieser Muskeln setzt am Schulterblatt an, dessen Gestalt dieser Anforderung Rechnung trägt.

Tab. 1.1 Vereinfachte Übersicht über die Organsysteme

System	Lage	Organe	Hauptfunktion
Bewegungssystem	Rumpfwand, Extremitäten	Skelettmuskulatur (mit Knochen und Gelenken)	Haltung, Fortbewegung
Blutkreislauf	Im gesamten Körper, Herz im Brustraum	Blut, Gefäße, Herz	Verteilung von Gasen, Nährstoffen, Botenstoffen, Wärme
Immunsystem	Im gesamten Körper	lymphatische Organe, Blut	Abwehr von körperfremden Stoffen
Atmungssystem	Brustraum	Lungen	Gaswechsel (O_2/CO_2) in das/aus dem Blut
Verdauungssystem	Hauptsächlich Bauchraum	Magen, Darm mit Leber und Pankreas	Aufnahme verdauter Nährstoffe ins Blut
Ausscheidungssystem	hinterer Bauchraum	Nieren und abführende Teile	Filtration des Blutes, Ausscheidung von Schadstoffen
Nervensystem	Zentren in Schädel und Spinalkanal, sonst im gesamten Körper	Gehirn, Rückenmark und periphere Nerven	Reizverarbeitung und -beantwortung, Motorik

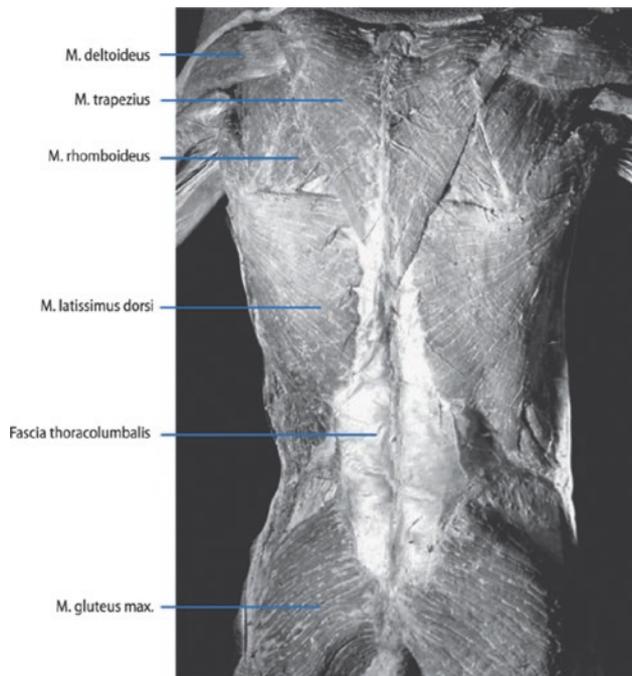
Navigation
 Wo bin ich? Seitenzahl und Kapitelnummer für die schnelle Orientierung?

3.2 · Obere Extremität



■ **Abb. 3.36** Zusammenwirken der Muskeln des Schultergürtels und des Schultergelenks bei der Abduktion des Armes und dem Senken des Schultergürtels (die farbigen Pfeile bezeichnen die fixierenden Muskeln, die schwarzen Pfeile die Bewegungsrichtung)

■ **Abb. 3.37** Anatomisches Muskelpräparat des Rückens. (Präparat und Aufnahme von J. Koebke, Köln)



Das **Schlüsselbein** ist in einem inneren Gelenk (*Art. sternoclavicularis*) mit dem Brustbein verbunden, in einem äußeren Gelenk (*Art. acromioclavicularis*) mit dem Schulterblatt (■ Abb. 3.29). Beide Gelenke sind funktionell Kugelgelenke. Im Sternoklavikulargelenk ist ein Discus aus Faserknorpel eingefügt, um die Inkongruenz der Gelenkflächen auszugleichen. Da sich über dieses Gelenk der Schultergürtel mit der Klavikula am Sternum gewissermaßen abstützt, ist es durch zahlreiche Bänder gesichert, welche zwischen Schlüsselbein und Brustbein (*Lig. sternoclaviculare*), zwischen beiden Schlüsselbeinen (*Lig. interclaviculare*) sowie zwischen Schlüsselbein und der 1. Rippe (*Lig. costoclaviculare*) ausgespannt sind. Das S-förmig gebogene Schlüsselbein ist auf seiner gesamten Länge gut

Praxis

Bei Stürzen auf die Schulter ist häufig das äußere Schlüsselbeingelenk (auch als Schulterreckgelenk bezeichnet) betroffen. Dabei wird der Schultergürtel in unterschiedlichem Ausmaß instabil, je nachdem, ob ein zelle oder mehrere Bänder dieses Gelenks gerissen sind oder sogar die Klavikula frakturiert ist.

Schlüsselbegriffe
 sind fett hervorgehoben

Praxis: Informationen zu praktischen Anwendungen anatomischen Wissens – im Alltag oder beim Training

Abbildungen:
 Bilder sagen mehr als 1000 Worte.

Vorwort zur 1. Auflage

„Was man nicht weiß, das eben braucht man, und was man weiß, kann man nicht brauchen.“ Dieses Wort aus Goethes „Faust“ spiegelt angesichts des heterogenen Schrifttums zu den anatomischen Grundlagen des Sports wohl treffend die Lage wider, in der sich Lehrende in diesem Bereich befinden. Die hauptsächlich für Mediziner verfassten Lehrbücher der Anatomie behandeln das Fach überwiegend nach deskriptiven und topographischen Gesichtspunkten, andere „Sportanatomien“ scheinen gelegentlich im Bestreben nach Praxisnähe allzu populärwissenschaftlich verfaßt. Dies war Anlaß genug, den außerordentlichen umfangreichen Stoff der Anatomie des Bewegungsapparates, des Nervensystems (soweit für die Motorik wichtig) und der Organsysteme unter funktionellen Gesichtspunkten für den Sport darzustellen. Die gewählte Vorgehensweise beschränkt sich nicht nur auf das „Wie“, sondern versucht wo möglich und nötig auch das „Warum“ zu erläutern. Notwendigerweise mussten Kompromisse zwischen Vollständigkeit und Übersichtlichkeit gemacht werden. So wurden die histologischen Grundlagen nur für die Gewebe des aktiven und passiven Bewegungsapparates ausführlicher behandelt und in den anderen Kapiteln, sofern zum Verständnis der Funktion erforderlich, nur kurz umrissen. Die Darstellung des Zentralnervensystems orientiert sich eng an der Motorik, wobei die Abhandlung anatomischer Einzelheiten hinter den physiologischen Funktionszusammenhängen zurückstehen musste. Auch das Kapitel über die Organsysteme konnte nur jene berücksichtigen, die für weiterführende Studien zur Anpassung des Organismus an Leistung innerhalb der Sportmedizin von Bedeutung sind. Die Beantwortung der Fragen nach biochemischen und komplexen physiologischen Prozessen muß den Lehrbüchern jener Disziplinen vorbehalten bleiben.

Somit wendet sich dieses Buch vor allem an Studenten der Sportwissenschaften, die sich möglichst umfassend und dennoch mit einem gewissen Praxisbezug über die funktionelle Anatomie informieren wollen. Aber auch interessierte Medizinstudenten, Krankengymnasten und Trainer werden einen funktionellen Einstieg in die Anatomie des menschlichen Körpers gewinnen können.

Vorwort zur 5. Auflage

Dieses Lehrbuch der Funktionellen Anatomie hat mich seit über 15 Jahren begleitet, zunächst in meiner Studentenzeit, später als anatomischer Tutor und seit jüngerer Vergangenheit als Leitfaden meiner eigenen Lehrveranstaltungen in diesem Bereich. Ebenso durfte ich an den Vorlesungen und Seminaren von Professor Appell teilnehmen, der später meine akademische Entwicklung begleitet und gefördert hat. Nachdem er sich nunmehr im Ruhestand befindet und der Springer-Verlag an ihn den Wunsch nach einer Neuauflage dieses Buches herangetragen hatte, hat er diese Aufgabe vertrauensvoll in meine Hände gegeben, was für mich gleichermaßen Verpflichtung und Freude bedeutet. Gleichwohl ist die Überarbeitung im engen konzeptionellen und inhaltlichen Austausch mit Professor Appell erfolgt.

Die funktionelle Anatomie verbindet in besonderer Weise Form und Funktion, später hat sich daraus aufgrund fortschreitender Erkenntnisse die Physiologie als eigenständiges Fach entwickelt. Folgerichtig haben wir bei der inhaltlichen Überarbeitung zunehmend physiologische Aspekte einfließen lassen, gewissermaßen als einfacher Einstieg in dieses Fach, dessen detailreichen Inhalte den entsprechenden Fachlehrbüchern vorbehalten bleiben müssen. Insofern ist dieses Buch nicht nur für Studierende der Sportwissenschaft oder der Physiotherapie, sondern auch denen der Medizin als einfacher Einstieg oder ergänzende Lektüre zu empfehlen.

Die bereits in der letzten Auflage erfolgte didaktische Bereicherung mit Kurzübersichten und praktischen Aspekten wurde in der vorliegenden Auflage um einen weiteren Baustein ergänzt, nämlich einer Kollektion von Multiple-choice-Fragen zu allen Kapiteln. Hierdurch soll eine sinnvolle Kontrolle des Lernfortschritts gewährleistet werden und bei Wissenslücken oder Unsicherheiten können die entsprechenden Inhalte leicht anhand des Stichwortverzeichnisses nachgearbeitet werden.

Wir haben Anlass zu der Hoffnung und Erwartung, dass diese inhaltlichen und konzeptionellen Ergänzungen der „Funktionelle Anatomie“ weiter ihren wichtigen Platz im Kanon entsprechender anderer Lehrbücher sichern können.

Philipp Zimmer
Köln/Dortmund
Mai 2020

Inhaltsverzeichnis

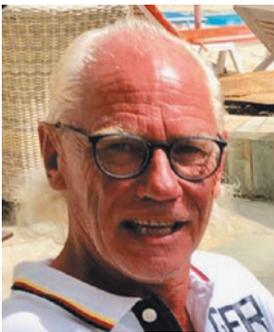
1	Einführung	1
1.1	Zur Einordnung der Funktionellen Anatomie	2
1.2	Die anatomische Nomenklatur	2
1.3	Übersicht über den Bauplan des Körpers	3
2	Allgemeine Anatomie des Bewegungsapparates	7
2.1	Skelettmuskulatur	8
2.2	Binde- und Stützgewebe	15
2.3	Bau der Gelenke	22
3	Funktionelle Anatomie des Bewegungsapparates	27
3.1	Rumpf	28
3.2	Obere Extremität	45
3.3	Untere Extremität	75
4	Bewegungskontrolle und -steuerung durch das Zentralnervensystem	105
4.1	Grundlagen	106
4.2	Spinale Steuerung	115
4.3	Supraspinale Steuerung	119
5	Funktionelle Anatomie der Organsysteme	127
5.1	Blut- und Abwehrsysteme	128
5.2	Herz-Kreislauf-System	134
5.3	Atmungssystem	145
5.4	Verdauungssystem	150
5.5	Ausscheidungssystem	158
5.6	Regulation der Organfunktionen	161
	Serviceteil	
	Glossar häufig verwendeter Begriffe und Abkürzungen	170
	Stichwortverzeichnis	175

Über die Autoren



Prof. Habil. Dr. Dr. Philipp Zimmer

geboren am 10.07.1983 in Ostfildern-Ruit, studierte zunächst Sportwissenschaften an der Deutschen Sporthochschule Köln (DSHS) und anschließend Neurowissenschaften an der medizinischen und naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln. Es erfolgte 2014 die Promotion zum Dr. rer. medic. an der Universität zu Köln und 2015 die Promotion zum Dr. Sportwiss. an der DSHS. Von 2014 bis 2019 war er als Dozent und Leiter der AG „klinische Sport- (Neuro-)Immunologie“ im Institut für Kreislaufforschung und Sportmedizin der DSHS tätig. Zwischen 2016 und 2019 war Herr Zimmer zusätzlich Post-Doc am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg. 2019 habilitierte er für „biomedizinische Sportwissenschaft“ an der DSHS und trat eine Vertretungsprofessur für „Sport und Gesundheit“ an der Leibniz Universität Hannover an. Im März 2020 folgte er einem Ruf an die Technische Universität Dortmund, wo er im Institut für Sport und Sportwissenschaft die Abteilung für „Leistung und Gesundheit (Sportmedizin)“ leitet. Wissenschaftlich beschäftigt sich Herr Zimmer mit dem Einfluss von Sport auf das menschliche Immunsystem und dessen Interaktion mit dem zentralen Nervensystem, bei Sportlern sowie Menschen mit Multipler Sklerose und Krebs.



Hans-Joachim Appell

geboren 1952 in Berlin, studierte Sportwissenschaft und Latein in Köln, danach Medizin in Aachen und Köln. 1977 wurde er mit Schwerpunkt Experimentelle Morphologie und Sportmedizin promoviert zum Dr. Sportwiss., 1981 habilitierte Herr Appell in Funktionelle Anatomie und Experimentelle Morphologie. Ernennung zum apl. Professor 1986 erfolgte die Ernennung zum apl. Professor. Neben zahlreichen internationalen Kooperationen hat Herr Appell eine ständige Gastprofessur an der Universität Porto inne, dort wurde ihm auch der Grad eines Dr.h.c. im Jahr 2006 verliehen. Neben der Tätigkeit in Forschung und Lehre erfüllt Herr Appell zahlreiche langjährige Positionen in der akademischen Selbstverwaltung (u. a. Dekan des Fachbereichs Medizin und Naturwissenschaften, Vorsitzender der Prüfungsausschüsse, Vorsitzender des Senats, Vorsitzender des Habilitationsausschusses). 2018 schied er aus dem aktiven Dienst aus und verlegte seinen Lebensmittelpunkt teilweise nach Kos, Griechenland.

Einführung

Inhaltsverzeichnis

- 1.1 Zur Einordnung der Funktionellen Anatomie – 2
- 1.2 Die anatomische Nomenklatur – 2
- 1.3 Übersicht über den Bauplan des Körpers – 3

Der Begriff Anatomie leitet sich aus dem Griechischen ab: *anatemnein* bedeutet auseinanderschneiden. Die Erkenntnisse der Anatomie rühren also von Sektionen des Körpers her, seien es tierische oder menschliche. Da dieses Lehrbuch vorwiegend für Studierende der Sportwissenschaft, jedoch auch für Physiotherapeuten, Trainer und andere verwandte Berufsgruppen verfasst ist, kann nicht davon ausgegangen werden, dass dieser Personenkreis in seiner Ausbildung Präparierübungen durchführt oder durchgeführt hat. Insofern ist eine besondere Herangehensweise an die Anatomie des Menschen notwendig: die der Funktionellen Anatomie. Dieser Begriff wird nachfolgend geklärt und in das Spektrum anderer Grundlagendisziplinen der Medizin integriert. Außerdem erfolgt in dieser Einführung ein Exkurs zur anatomischen Nomenklatur und der Bauplan des menschlichen Körpers wird kursorisch erläutert, bevor in den nachfolgenden Kapiteln der Lernstoff detailliert behandelt wird.

1.1 Zur Einordnung der Funktionellen Anatomie

Innerhalb des Faches Anatomie gibt es unterschiedliche Betrachtungsweisen:

Die **Deskriptive Anatomie** beschreibt minutiös und detailreich die Strukturen und Organe des menschlichen Körpers. Sie stellt z. B. dar, wie schwer ein Organ ist, welche Form es besitzt und wo sich Erhebungen, Eindellungen, Furchen o. ä. befinden, die dieses Organ in Untereinheiten teilen lassen oder die aufgrund der Lage und Form benachbarter Organe zustande kommen. An Knochen werden aus dieser Sichtweise Höcker, Leisten oder sonstige Erhabenheiten herausgearbeitet, ohne dass zunächst ersichtlich wird, warum diese Strukturen so und nicht anders angelegt sind.

Die **Topographische Anatomie** widmet sich den Organen und anderen Strukturen innerhalb des Körpers unter Betrachtung der Lagebeziehungen zu anderen Organen oder in ihrer schichtweisen Anordnung und beachtet dabei besonders auch die Leitungsbahnen (Gefäße und Nerven) in ihrem Verlauf oder deren möglichen Durchtrittsstellen durch Muskeln und andere Strukturen. Sie ist insbesondere für operativ tätige Ärzte wichtig, die genau wissen müssen, worauf sie treffen können, wenn sie das Skalpell führen.

Die **Funktionelle Anatomie** fragt immer nach dem ›Warum‹. Mit einer Struktur ist untrennbar auch eine Funktion verbunden: Die Struktur folgt der Funktion und umgekehrt. So gewinnt etwa die reine Beschreibung der Form von Knochenhöckern eine funktionelle Bedeutung, wenn bekannt wird, dass daran Muskeln an-

setzen und sie als Hebel benutzen. Mithilfe der funktionellen Anatomie kann man verstehen, wie das Zusammenspiel von Muskeln und Gelenken Bewegungsphänomene hervorbringt oder wie besondere Organfunktionen durch die Organisationsform der Organe möglich sind. Damit widmet sich die Funktionelle Anatomie nicht nur der Makroskopie (wie Deskriptive oder Topographische Anatomie), sondern in Teilen auch der mikroskopischen Anatomie. Erst durch die Betrachtung des geweblichen Feinbaus vieler Organe wird deren Funktion ersichtlich, z. B. beim Muskel durch die kontraktile Filamente oder bei Leber und Niere durch deren besondere Gewebsarchitektur.

Damit hat die Funktionelle Anatomie im Laufe vergangener Jahrhunderte mit verfeinerten Untersuchungsmethoden einen Wissensstand über Struktur und Funktionen hervorgebracht, der zur Entwicklung neuer Disziplinen geführt hat. Dem Detailreichtum zellulärer und regulativer Funktionen widmet sich dabei die **Physiologie**, als deren Mutterwissenschaften außerdem Physik und Chemie gelten können. So beschreibt sie z. B. an Zellmembranen ablaufende Prozesse, Stoffwechselwege oder komplizierte regulative Mechanismen. Da einiges davon auch für das Verständnis des Ganzen in seiner Funktion wichtig ist, wird es nicht verwundern, dass ein Lehrbuch der Funktionellen Anatomie nicht ohne einfache physiologische Exkurse auskommt.

Die spezielle Funktionelle Anatomie des Bewegungsapparats (Muskeln, Gelenke) kann über funktionelle Aspekte hinaus auch mechanistische Betrachtungen fokussieren, indem Hebel, Momente und Kräfte, die bei Bewegungen auftreten können, modellhaft analysiert werden. Diesem Spezialgebiet der funktionellen Anatomie widmet sich die **Biomechanik**, die dabei auf Mathematik und Physik zurückgreift. Aufgrund der Komplexität dieser Modelle sind biomechanische Aspekte in diesem Buch eher weniger und in stark vereinfachter Form berücksichtigt.

1.2 Die anatomische Nomenklatur

Wie jede Fachdisziplin verfügt auch die Anatomie über eine Nomenklatur fachspezifischer Begriffe, deren Ursprünge in der lateinischen, teilweise auch altgriechischen Sprache zu finden sind. Wer über keine entsprechenden altsprachlichen Kenntnisse verfügt oder nicht, wie Mediziner, einen Terminologiekurs in der Ausbildung genossen hat, dem wird sich der Sinn anatomischer Begriffe nicht unmittelbar erschließen. Der Bestand der ›**Terminologia Anatomica**‹ wird in seiner Systematik ständig von entsprechenden Gremien überprüft und gegebenenfalls angepasst.

Abkürzungen Ein Muskel (*Musculus*) wird allgemein M. abgekürzt; ist von mehreren Muskeln (*Musculi*) die Rede, kürzt man Mm. ab. Ähnliches gilt für Bänder (*Ligamentum/Ligamenta*; Lig., Ligg.), Arterien (*Arteria/Arteriae*; A., Aa.) und Venen (*Vena/Venae*; V., Vv.) sowie Nerven (*Nervus/Nervi*; N., Nn.). Gelenke werden systematisch als *Articulatio* (Art.) bezeichnet.

Beschreibung der Lage anatomischer Strukturen Lagebeziehungen, etwa von Organen oder Muskeln zueinander, werden in Bezug auf den gesamten Körper benannt. Dabei entstehen immer Wortpaare gegensätzlicher Bedeutung. Wenn die Hand sich *distal* vom Oberarm befindet, bedeutet dies, dass sie weiter vom Körperzentrum entfernt liegt als der Oberarm; der Oberarm hingegen ist *proximal* (näher zum Körperzentrum). *Medial* (mehr zur Mitte) und *lateral* (mehr seitlich) sind ebenfalls relative Lagebezeichnungen; eine Struktur dazwischen wird als *intermedial* bezeichnet. *Anterior* (vorne) steht *posterior* (hinten) gegenüber. Weiter oben wird als *superior*, weiter unten als *inferior* bezeichnet. Lagebeziehungen in Schichten werden entweder durch die Wortpaare *externus* (weiter außen) und *internus* (weiter innen) oder *superficialis* (oberflächlich) und *profundus* (tief) beschrieben. Längere Strukturen werden im Vergleich zu kürzeren (*brevis*) als *longus* bezeichnet, kleinere als *minor* und größere als *major*; eine Verlaufsrichtung wird gelegentlich in *rectus* (gerade), *transversus* (quer) oder *obliquus* (schräg) unterschieden.

Abgrenzung gleichartiger Strukturen gegeneinander Strukturen bekommen immer eines der o. g. Attribute, wenn es zur Abgrenzung gegen eine andere, im Prinzip gleichartige Struktur notwendig ist. Typische Beispiele sind drei breite Muskeln des Oberschenkels, die differenzierend als M. vastus medialis, M. vastus lateralis und M. vastus intermedius bezeichnet werden, oder der lange und kurze Kopf (*Caput longum*, *Caput breve*) des M. biceps brachii. Grundsätzlich gilt: Besitzt eine anatomische Struktur ein Attribut (oder mehrere), so gibt es wenigstens eine zweite Struktur ähnlicher Art (im einfachsten Fall z. B. obere/untere Extremität). So bezeichnet der Begriff *Spina iliaca anterior superior* einen dornartigen Vorsprung (*spina*), der zum Darmbein gehört (*iliaca*, von Os ilium); die beiden folgenden Attribute geben nicht nur darüber Auskunft, dass es neben diesem Vorsprung auf der Vorderseite (*anterior*) auch noch einen auf der Rückseite gibt, sondern darüber hinaus, dass es auf der Vorderseite zwei davon gibt, nämlich einen oberen (*superior*) und einen unteren (*inferior*).

1.3 Übersicht über den Bauplan des Körpers

Entwicklungsgeschichte und grundsätzliche Betrachtungen Der Mensch gehört zu den Wirbeltieren und stellt als *Homo sapiens* die höchste Entwicklungsstufe der *Primates* dar. Seine Entwicklung geht ursprünglich auf die

Chordaten zurück, deren Kennzeichen die *Chorda dorsalis* als axialer Stützstab ist. Wirbeltiere besitzen grundsätzlich drei Regionen: den Kopf, den Rumpf und den Schwanz. Der Kopf enthält Sinnesorgane sowie das Gehirn und den Mund- und Schlundbereich; er ist über den Hals mit dem Rumpf verbunden. Der Rumpf enthält eine Leibeshöhle, die den überwiegenden Teil der Eingeweide beherbergt. Bei Säugetieren ist die Leibeshöhle durch das Zwerchfell in eine Brust- und Bauchhöhle unterteilt. Im Bereich des Rumpfes entwickeln sich Fortbewegungsorgane: bei Fischen als Flossen, bei landlebenden Wirbeltieren als Gliedmaßen. Für den Körperbau der Wirbeltiere ist die Symmetrie als typisches Ordnungsprinzip charakteristisch. So gibt es eine **bilaterale Symmetrie** (rechte/linker Körperhälfte) und eine **segmentale Symmetrie**, die den wiederkehrenden Bauplan gleichartiger Strukturen über die Länge des Körpers beschreibt. Während beim Menschen die bilaterale Symmetrie noch recht gut nachzuvollziehen ist, ist die segmentale Symmetrie nur noch beispielsweise an den Segmenten der Wirbelsäule oder den Rippen erkennbar. Durch die Entwicklung des aufrechten Ganges beim Menschen haben sich die vorderen Gliedmaßen zu den Armen mit den Händen als Greifwerkzeugen umgeformt, während die hinteren Gliedmaßen nun als untere Extremität bzw. Beine allein für die Fortbewegung zuständig sind.

Die vorstehenden entwicklungsgeschichtlichen Betrachtungen sollen durch einige, gelegentlich stark vereinfachte Erläuterungen ergänzt werden, die den grundsätzlichen Bauplan beim Menschen leichter verstehen lassen.

Der Bauplan des Menschen Das Achsen skelett des Menschen (zurückgehend auf die *Chorda dorsalis*) bildet die **Wirbelsäule**. Sie dient gleichermaßen als Stützstab für den **Rumpf** und für dessen Bewegungen; an ihrem oberen Ende trägt sie den Kopf. Über einen großen Abschnitt der Wirbelsäule sind in bilateraler wie auch segmentaler Symmetrie die Rippen angefügt, die in ihrer Gesamtheit den **Brustkorb** bilden. Mit ihrem unteren Abschnitt ist die Wirbelsäule in den **Beckengürtel** eingefügt, der durch seine Stabilität die Voraussetzung für die Fortbewegung bietet. Er nimmt in den Hüftgelenken die **Beine** auf. Am Brustkorb ist der **Schultergürtel** gelenkig angebracht, jedoch funktionell mit der Wirbelsäule hauptsächlich über Muskeln verbunden. Damit ist er im Gegensatz zum Beckengürtel sehr beweglich; so kann er den Bewegungsumfang der **oberen Extremität**, die über das Schultergelenk mit ihm verbunden ist, vergrößern. Die in verschiedensten Gelenken verbundenen Skelettelemente von Rumpf, oberer und unterer Extremität werden von **Muskeln** überzogen, sodass sich der Mensch aktiv bewegen kann. Der gesamte Körper wird von der **Haut** umhüllt, die als Schutzorgan Wasserverlust verhindert, den Wärmehaushalt regelt und außerdem ein wichtiges Sinnesorgan darstellt.

Der Rumpf enthält zwei durch das Zwerchfell getrennte Leibeshöhlen: die *thorakale* Leibeshöhle (**Brustraum**) und die *abdominelle* Leibeshöhle (**Bauchraum**). Der Brustraum beherbergt u. a. das Herz und die Lungen, der Bauchraum im Wesentlichen die Baueingeweide (Abb. 1.2). Beide Leibeshöhlen sind von einer serösen Haut ausgekleidet, die auch einen Großteil der Organe überzieht und diese über Flüssigkeitsabsonderung gegeneinander und innerhalb der jeweiligen Leibeshöhle verschiebbar macht. Als dritte ›Höhle‹ kann der *cranio-spinale* Hohlraum identifiziert werden, der innerhalb des Schädels und der Wirbelsäule liegt. Auch er ist von Häuten ausgekleidet, die einen Flüssigkeitsraum begrenzen. In ihm befindet sich das **Zentralnervensystem** (Gehirn und Rückenmark) (Abb. 1.1 und 1.2 rechts).

Durch alle Teile des gesamten Körpers zieht das in sich geschlossene **Blutgefäßsystem**, welches in Form des Blutkreislaufs zentral an das Herz als Pumpe angeschlossen ist. Das Gefäßsystem stellt damit eine innere Oberfläche dar, in dessen Gefäßen das Blut zirkuliert und die in ihm enthaltenen Stoffe im Körper verteilt, Stoffe aus Organen aufnimmt oder der Ausscheidung zuführt. Für diese Aufgabe lagern sich spezialisierte Gefäßabschnitte eng an die Gewebe aller Organe, sodass über dünnste Barrieren ein Stoffaustausch erfolgen kann.

In drei Organsystemen ist der Extrakorporalraum (quasi die Außenwelt) unter erheblicher Vergrößerung seiner Oberfläche tief in den Körper eingesenkt; er steht dort mit dem Blut über die innere Oberfläche des Gefäßsystems in Verbindung. So erlaubt das **Atmungssystem** mit den Lungen den Gasaustausch. Über den **Verdauungstrakt** wird Nahrung aufgenommen und mithilfe der beiden großen Drüsen Leber und Pankreas verdaut; schließlich werden die aufgespaltenen Nahrungsstoffe ins Blut aufgenommen, ehe nicht mehr verwertbare Stoffe ausgeschieden werden. Das **harnproduzierende**

und -ableitende System verfügt mit den Nieren über ein Organ, in dem das Blut ständig filtriert wird; so werden dem Organismus nicht zuträgliche Stoffe ausgeschieden (Tab. 1.1).

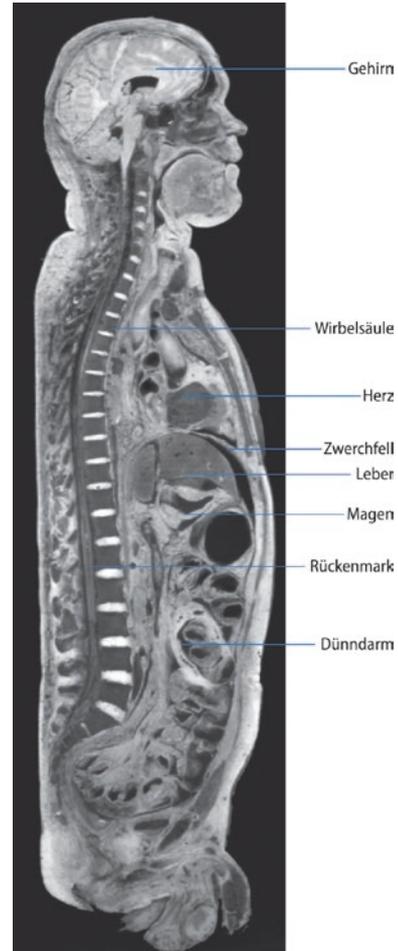


Abb. 1.1 Mediansagittalschnitt durch einen männlichen Rumpf, Ansicht von rechts (J. Koebe, Köln)

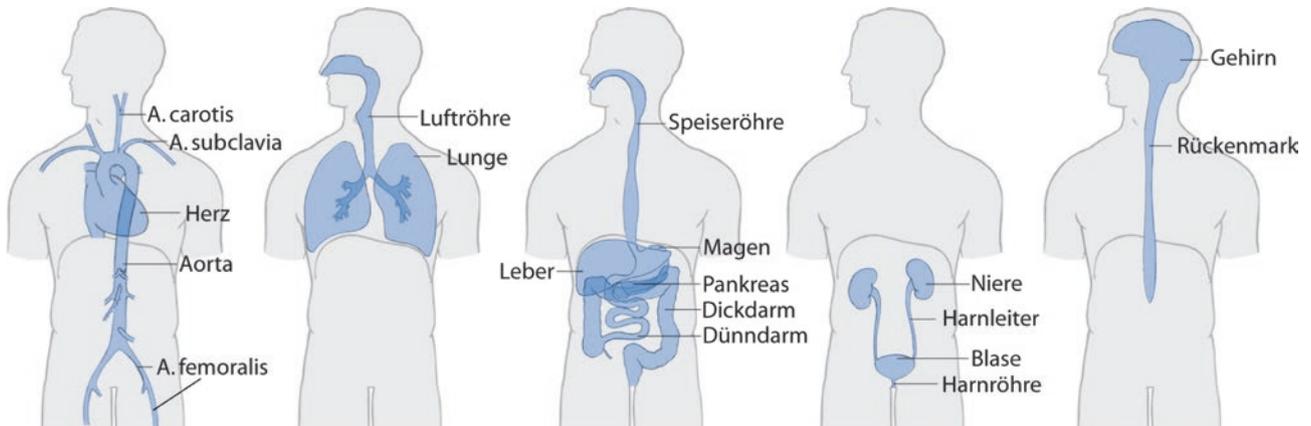


Abb. 1.2 Übersicht über die Lage der Organsysteme in den entsprechenden Körperhöhlen; von links nach rechts: Herz-Kreislauf-System, Atmungssystem, Verdauungstrakt, Ausscheidungssystem, Zentralnervensystem

■ **Tab. 1.1** Vereinfachte Übersicht über die Organsysteme

System	Lage	Organe	Hauptfunktion
Bewegungssystem	Rumpfwand, Extremitäten	Skelettmuskulatur (mit Knochen und Gelenken)	Haltung, Fortbewegung
Blutkreislauf	Im gesamten Körper, Herz im Brustraum	Blut, Gefäße, Herz	Verteilung von Gasen, Nährstoffen, Botenstoffen, Wärme
Immunsystem	Im gesamten Körper	lymphatische Organe, Blut	Abwehr von körperfremden Stoffen
Atmungssystem	Brustraum	Lungen	Gaswechsel (O_2/CO_2) in das/aus dem Blut
Verdauungssystem	Hauptsächlich Bauchraum	Magen, Darm mit Leber und Pankreas	Aufnahme verdauter Nährstoffe ins Blut
Ausscheidungssystem	hinterer Bauchraum	Nieren und abführende Teile	Filtration des Blutes, Ausscheidung von Schadstoffen
Nervensystem	Zentren in Schädel und Spinalkanal, sonst im gesamten Körper	Gehirn, Rückenmark und periphere Nerven	Reizverarbeitung und -beantwortung, Motorik

Die Organsysteme werden in ihren Funktionen koordiniert und über das **Hormonsystem** und das **vegetative Nervensystem** reguliert; beide Systeme ergänzen sich gegenseitig in Teilen. Dabei benutzt das Hormonsystem das Blut als Informations- und Kontrollvehikel, während die Funktion des vegetativen Nervensystems an

Nervenbahnen gebunden ist. Schließlich besitzt der Mensch mit dem **Immunsystem** ein mit seinen Bestandteilen über den gesamten Körper verteiltes Abwehrorgan, mit dem körperfremde Stoffe bekämpft werden und das der Gesunderhaltung dient.

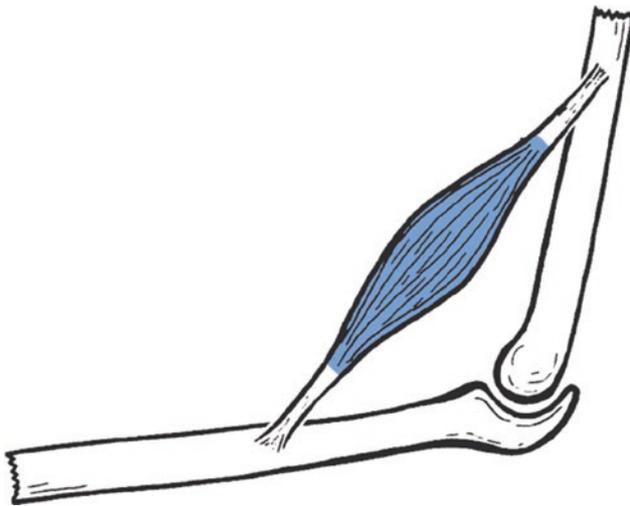
Allgemeine Anatomie des Bewegungsapparates

Inhaltsverzeichnis

- 2.1 Skelettmuskulatur – 8**
 - 2.1.1 Muskelkontraktion – 9
 - 2.1.2 Muskelfasern – 10
 - 2.1.3 Bau des Muskels – 11
 - 2.1.4 Funktion des Muskels – 11
 - 2.1.5 Wachstum und Trainingsanpassung – 13

- 2.2 Binde- und Stützgewebe – 15**
 - 2.2.1 Grundkomponenten – 15
 - 2.2.2 Sehnen und Faszien – 16
 - 2.2.3 Knorpelgewebe – 18
 - 2.2.4 Knorpelgewebe – 21

- 2.3 Bau der Gelenke – 22**
 - 2.3.1 Achsen und Ebenen – 23
 - 2.3.2 Formen echter Gelenke – 24



■ **Abb. 2.1** Kinetische Kette: Knochen – Sehne – Muskel – Sehne – Knochen

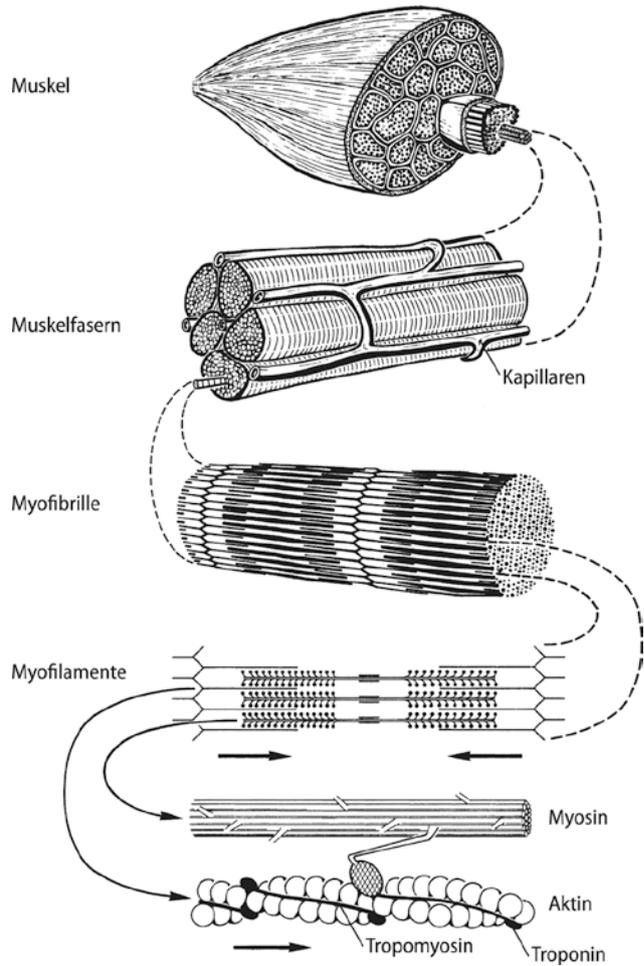
Form, Haltung und Bewegungen des menschlichen Körpers sind erst durch das Skelettsystem und die damit verbundene Muskulatur möglich. Dabei stellen die Elemente des Skeletts den passiven Bewegungsapparat dar (das, was bewegt wird). Der aktive Bewegungsapparat (das, was die Bewegungen bewirkt) wird durch die Muskulatur repräsentiert. Das Skelett besteht aus Teilstücken, den Knochen, die in unterschiedlich gebauten Gelenken gegeneinander beweglich sind und so ein komplexes Hebelsystem aufbauen. Eine Ganzkörperbewegung setzt sich stets aus Teilbewegungen zusammen, die in den einzelnen Gelenken nacheinander oder gleichzeitig ablaufen. Die Funktionsstrukturen einer Teilbewegung sind Glieder einer sog. *kinetischen Kette*, die aus der krafterzeugenden Muskulatur, der kraftübertragenden Sehne und dem im Gelenk bewegten Knochen besteht (■ Abb. 2.1). Der Bewegungsapparat des Menschen kann so als ein System koordiniert arbeitender kinetischer Ketten aufgefasst werden. Die Beweglichkeit ist dabei von dem spezifischen anatomischen Bau der Gelenke sowie der sie umgebenden Strukturen abhängig.

2.1 Skelettmuskulatur

Lernziele

In diesem Kapitel lernen Sie den Aufbau der Skelettmuskulatur als Grundlage der kontraktilen Funktion kennen. Sie sollen verstehen lernen, wie sich der grundlegende Kontraktionsmechanismus in unterschiedlicher Weise darstellen kann, und die Muskulatur als ein plastisches und anpassungsfähiges Organ begreifen.

Skelettmuskelgewebe besteht aus Muskelfasern, die die zellulären Einheiten bilden. Diese entstehen während



■ **Abb. 2.2** Aufbau der Skelettmuskulatur vom Gesamtmuskel bis zu den kontraktilen Filamenten

der Entwicklung durch Verschmelzung hintereinander gelegener Einzelzellen (Myoblasten), aus denen durch Differenzierung schließlich die vielkernige Faser gebildet wird. Reife Skelettmuskelfasern können mehrere tausend Kerne enthalten, bis zu 15 cm lang werden und ihr Durchmesser schwankt beim Menschen zwischen 10 und 100 µm. Sie enthalten Mitochondrien, endoplasmatisches Retikulum (hier: SR, *sarkoplasmatisches Retikulum*, griech. Sarx = Fleisch) sowie Filamente (hier: Myofilamente) als kontraktile Funktionsstrukturen über die gesamte Länge der Faser in spezieller und immer wiederkehrender Organisation.

Zwei für die Muskelkontraktion wesentliche Haupttypen von Myofilamenten lassen sich unterscheiden: das **Aktin** und das **Myosin** (■ Abb. 2.2). Die dünnen Filamente (Aktin) bestehen aus globulären Untereinheiten, dem G-Aktin, das nach seiner Synthese an Polyribosomen zu spiraligen Myofilamenten, dem F-Aktin, polymerisiert. In den Rinnen der Spirale liegen lang gestreckte **Tropomyosinmoleküle**, denen **Troponin** angelagert ist. Dadurch werden in Ruhe bestimmte reaktive Teile des

2.1 · Skelettmuskulatur

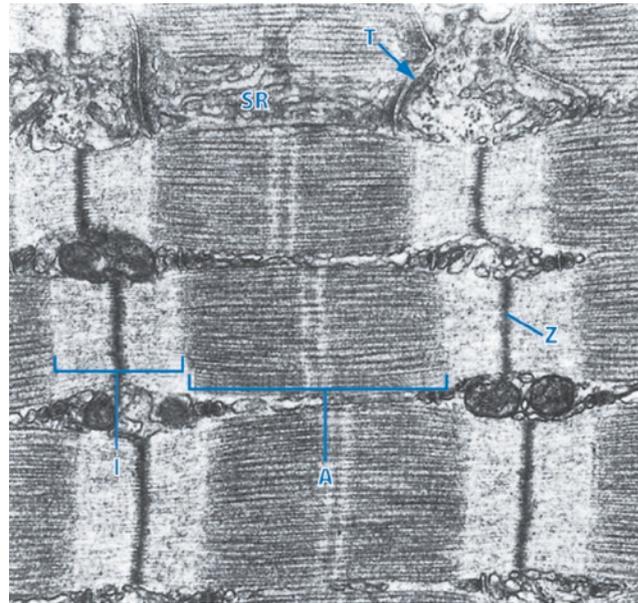
Aktinfilaments abgedeckt und die Struktur des F-Aktins stabilisiert. Das Myosin bildet die dicken Myofilamente. Ein Molekül besteht aus einem stäbchenförmigen Schaft (LMM = leichtes Meromyosin), dem ein Kopf über eine Art Hals beweglich angelagert ist (HMM = schweres Meromyosin). In einem Myosinfilament sind die stäbchenförmigen Anteile des LMM bündelartig zusammengefasst und die Köpfe des HMM ragen daraus hervor. Die Myosinmoleküle eines Filaments sind räumlich bipolar angeordnet, sodass die der einen Hälfte jeweils mit ihren LMM-Anteilen jenen der anderen Hälften zugewandt sind. Entsprechend sind die HMM-Köpfe zu beiden Filamentenden hin ausgerichtet. Das Myosinfilament ist also in sich spiegelbildlich gebaut.

2.1.1 Muskelkontraktion

Der Mechanismus der Muskelkontraktion beruht auf der spezifischen Interaktion des Myosinfilaments mit dem Aktinfilament. Wenn die Muskelfasermembran durch den Reiz einer motorischen Nervenendigung depolarisiert wird, kommt es zu einem Ausstrom von Kalziumionen aus dem SR in das Sarkoplasma. Hier kommt es unter dem Einfluss der Kalziumionen zu einer Konformationsänderung des Troponinkomplexes. Dadurch wirkt das Troponin derart auf das Tropomyosin, dass die reaktiven Teile des Aktinfilaments freigegeben werden. Die Köpfe des Myosins besitzen eine ATPase-Aktivität und eine natürliche Affinität zum Aktin. Sie treten unter ATP-Spaltung mit dem Aktin in Kontakt, die Hälse spreizen sich ab und das Aktinfilament wird durch einen Kippvorgang der Köpfe gegen das Myosinfilament bewegt. Es kommt hierbei also nicht zur Verkürzung von Einzelfilamenten, sondern es handelt sich um Gruppenverschiebungen unterschiedlicher Filamente gegeneinander. Demnach liegt der Muskelkontraktion der Mechanismus der sog. gleitenden Filamente zugrunde (■ Abb. 2.2).

! Die Myosinfilamente sind die Motoren der Muskelkontraktion.

Die Organisation und räumliche Anordnung der Myofilamente zueinander führt zur Bildung von **Sarkomeren**, die als die eigentliche Funktionseinheit der Muskelkontraktion betrachtet werden können und eine durchschnittliche Länge von 2,5 µm besitzen. Ein Sarkomer ist durch zwei **Z-Streifen** begrenzt, die räumlich gesehen auch Z-Scheiben genannt werden und aus dichtem, zugfestem Material bestehen (■ Abb. 2.3). Die Z-Streifen können wie eine Art mikroskopisch kleine Zwischensehne angesehen werden, die die simultane Kontraktion hintereinander geschalteter Sarkomere aufeinander überträgt. In den Z-Streifen sind die Aktin-



■ **Abb. 2.3** Ausschnitt aus einer Skelettmuskelfaser (längsgeschnitten); 3 Myofibrillen sind zu erkennen, davon jeweils ein Sarkomer vollständig; die Sarkomere werden von den Z-Streifen begrenzt, in denen sich die Aktinfilamente verankern, die insgesamt die I-Bande bilden; die A-Bande wird von Myosinfilamenten und den teilweise zwischen sie reichenden Aktinfilamenten gebildet (vgl. dazu auch Abb. 2.2); zwischen den Myofibrillen sind Anschnitte des sarkoplasmatischen Retikulums (SR) und T-Tubuli (T) zu erkennen; in Höhe der I-Bande einige kleine Mitochondrien. Elektronenmikroskopische Aufnahme, Vergr. vor Reprod. × 37.500

filamente, sich jeweils gegenüberstehend, mit einem Ende fest verankert; ihre freien Enden ragen zwischen die Myosinfilamente. Bei der Kontraktion werden die Aktinfilamente jedes Sarkomers zwischen die Myosinfilamente hinein- und aufeinander zu gezogen, sodass sich die Z-Streifen nähern. Dadurch kommt es zur Verkürzung der Sarkomere während der Kontraktion.

! Sarkomere sind die kleinsten funktionellen Einheiten der Kontraktion.

In einer Muskelfaser sind die Sarkomere hintereinander gelagert und werden in Längsrichtung durch Mitochondriensäulen und die Röhrensysteme des SR in **Myofibrillen** unterteilt. Die längs und damit parallel zu den Myofibrillen verlaufenden Netze des SR (L-System) verbinden sich in regelmäßigen Abständen zu zirkulär um die Fibrillen laufenden Zisternen (■ Abb. 2.3). Vor allem hier sind die für die Auslösung der Kontraktion erforderlichen Kalziumionen gespeichert. In diesem Bereich stülpt sich auch die Muskelfasermembran in schmalen Schläuchen in das Innere der Faser ein und umgibt jede Myofibrille ringförmig zwischen zwei SR-Zisternen (T-System). Eine Depolarisation des Sarkolemmes kann so in das Innere der Faser weitergeleitet und direkt an die Kalziumdepots herangebracht werden. Diese werden durch

Änderung der Membrandurchlässigkeit des sarkoplasmatischen Retikulums entleert und bringen dann das Gleiten der Myofilamente in Gang. Nach Abklingen der nervösen Erregung wird das Kalzium aktiv in das sarkoplasmatische Retikulum zurücktransportiert.

Aus der charakteristischen Anordnung der Sarkomere ergibt sich die lichtmikroskopisch sichtbare **Querstreifung** der Skelettmuskelfaser im Längsschnitt, die sich noch detailreicher elektronenmikroskopisch darstellt (vgl. [Abb. 2.3](#)). Die Z-Streifen erscheinen als dunkle Mittellinien innerhalb der **I-Bande**, d. h. dem Bereich, wo die Aktinfilamente nicht mit den Myosinfilamenten überlappt sind. Die I-Bande umfasst damit immer Teile von zwei benachbarten Sarkomeren. Sie hat im polarisierten Licht schwach doppelbrechende Eigenschaften, ist damit isotrop, woraus sich ihre Bezeichnung ergibt. Die Mitte der auf die I-Bande folgenden **A-Bande** wird durch eine helle Zone (H-Zone) gebildet, in diesem Bereich liegen nur Myosinfilamente vor. Im Rest der A-Bande überlappen sich Aktin und Myosin ([Abb. 2.3](#)). Die Mitte der H-Zone wird wiederum durch einen feinen dunklen Strich, den M-Streifen, markiert; hier befindet sich die Mitte der Myosinfilamente, d. h. der nur aus LMM gebildete Bereich und damit die physiologische Grenze der maximalen Muskelkontraktion. Mit Ausnahme seiner H-Zone liegen in der A-Bande die Aktinfilamente gemeinsam mit den Myosinfilamenten vor und bewirken so ihr anisotropes Verhalten in polarisiertem Licht.

Das Ausmaß der Verkürzung eines Sarkomers wird theoretisch dadurch limitiert, dass entweder die Aktinfilamente im Zentrum des Sarkomers (M-Streifen) gegeneinander- oder die Myosinfilamente gegen die Z-Scheibe stoßen. Während die Länge der A-Bande unter allen Umständen immer gleich groß bleibt, verringert sich die Länge der I-Bande mit zunehmender Verkürzung des Sarkomers, bis schließlich die I-Bande praktisch verschwinden kann. Umgekehrt ist vorstellbar, dass bei plötzlicher Dehnung eines Muskels über das physiologische Maß hinaus auf der Ebene der Sarkomere ein Kontinuitätsverlust der Überlappung von Myosin und Aktin zustande kommt, sodass die Myosinköpfe nicht mehr die Aktinfilamente erreichen können. Dieser Mechanismus wird in der Regel mehrere Fibrillen, Muskelfasern oder sogar Muskelfaserbündel erfassen, in diesem Fall würde man klinisch von einer Muskelzerrung sprechen.

2.1.2 Muskelfasern

Jede Skelettmuskelfaser ist außen von einer Basalmembran umgeben, einem feinen filzartigen Geflecht aus retikulären Fasern, das sich eng an das eigentliche Plasmalemma anlegt und der Verankerung der Muskelfasern untereinander und im umliegenden Gewebe dient. Plas-

malemm und Basalmembran zusammen bilden das eigentliche Sarkolemm der Muskelfasern. Unter der Basalmembran, aber außerhalb der Muskelfasern befinden sich die sog. Satellitenzellen. Dabei handelt es sich um noch undifferenzierte myogene Stammzellen, die einen Reservepool für Muskelwachstum und Regeneration nach Muskelverletzungen bilden. Wenn sie aktiviert werden, finden im Grundsatz die gleichen Vorgänge statt wie bei der Muskelentwicklung (Differenzierung zu Myoblasten, Fusion und Ausreifung). Neben den kontraktilen Proteinen und dem T-System des SR enthalten Muskelfasern eine variierende Menge von Mitochondrien als Organellen des oxidativen Stoffwechsels. Außerdem enthält das Sarkoplasma Myoglobin zur reversiblen Bindung von Sauerstoff sowie Glykogen und Neutralfettpartikel als Energiereserven.

Muskelfasertypen In einem Gesamtmuskel sind die Skelettmuskelfasern prinzipiell gleich gebaut, weisen aber Unterschiede im Mengenverhältnis zwischen Myofibrillen, Mitochondrien, Sarkoplasma sowie deren Glykogen-, Fett- und Myoglobingehalt auf. Dementsprechend können Muskelfasern nach klassischer Sichtweise in drei Typen eingeteilt werden, die unterschiedliche funktionelle Eigenschaften aufweisen ([Abb. 2.4](#)). Der **Fasertyp I** ist dünn und sarkoplasmareich. Die zahlreichen Mitochondrien sind reihenförmig zwischen den Myofibrillen angeordnet und das Sarkoplasma ist reich an Myoglobin und Fetteinlagerungen (dieser Typ wurde früher aufgrund des Reichtums an dem roten Muskelfarbstoff Myoglobin als rote Muskelfaser bezeichnet). Er zeichnet sich durch einen oxidativen Stoffwechsel aus, verkürzt sich langsam und ist zu lang andauernder Arbeit fähig. Bei Ausdauer-

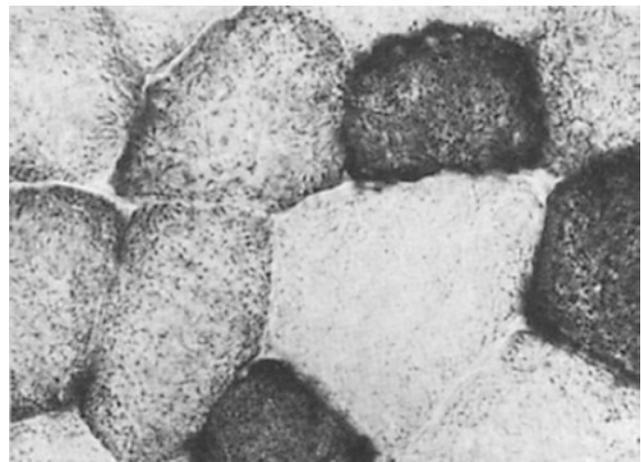


Abb. 2.4 Fasertypen der Skelettmuskulatur im lichtmikroskopischen Querschnitt; das in den Mitochondrien lokalisierte Enzym Succinatdehydrogenase wurde histochemisch dargestellt; die mitochondrienreichen, dunkel gefärbten Fasern entsprechen Typ I, die hellen Typ II, intermediäre Fasern nehmen eine Zwischenstellung ein. Vergr. vor Reprod. $\times 400$