



Appell · Stang-Voss

Funktionelle Anatomie

4. Auflage



Springer

Hans-Joachim Appell
Christiane Stang-Voss

Funktionelle Anatomie

Grundlagen sportlicher Leistung
und Bewegung

Unter Mitarbeit von Niels Battermann

4., vollständig überarbeitete Auflage

Mit 229 Abbildungen

 Springer

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Joachim Appell

Institut für Physiologie und Anatomie

Deutsche Sporthochschule Köln

50927 Köln

E-Mail: appell@dshs-koeln.de

ISBN-13 978-3-540-74862-5 Springer Medizin Verlag Heidelberg

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer Medizin Verlag

springer.de

© Springer Medizin Verlag Heidelberg 2008

Produkthaftung: Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag keine Gewähr übernommen werden. Derartige Angaben müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Planung: Peter Bergmann, Heidelberg

Fachlektorat: Dr. Ursula Loos, Heidelberg

Projektmanagement: Rose-Marie Doyon, Heidelberg

Umschlaggestaltung & Design: deblik Berlin

Titelbild: fotosearch.com

SPIN 12033157

Satz: Fotosatz-Service Köhler GmbH, Würzburg

Gedruckt auf säurefreiem Papier. 15/2117 – 5 4 3 2 1 0

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 4. Auflage

Nach nunmehr 20 Jahren auf dem Markt hatte dieses Buch eine gründliche Neubearbeitung verdient und präsentiert sich in neuem Layout unter Einbeziehung modernerer didaktischer Elemente. Nachdem meine verehrte Koautorin, Frau Prof. Dr. Christiane Stang-Voss aus dem aktiven akademischen Leben ausgeschieden war, wurde mir vom Springer-Verlag die Neubearbeitung allein in meine Hände gelegt. Jedoch schätze ich mich glücklich, meinen langjährigen Mitarbeiter Niels Battermann überzeugt zu haben, an dieser Neuauflage mitzuwirken, um neue Aspekte, auch aus seiner besonderen Sicht, mit einfließen zu lassen. So haben wir an zahlreichen Stellen den Stoff um die vereinfachte Darstellung physiologischer Zusammenhänge ergänzt, vermehrt auch praktische Aspekte mit eingebracht und einen Teil der Abbildungen neu gestaltet oder weitere eingefügt. Das ursprünglich angelegte erste Kapitel über den Bau der Zelle wurde ersatzlos gestrichen und hat einer allgemeinen Einführung, quasi als anatomisches Propädeutikum, Platz gemacht.

Besonderer Dank gilt meinem mir freundschaftlich verbundenen Fachkollegen Prof. Dr. Dr. h.c. Jürgen Koebke aus dem Zentrum Anatomie der Uniklinik Köln für seine Unterstützung, konstruktiven Anregungen sowie für die Bereitstellung eines Teils des neuen Bildmaterials. Weitere anatomische Darstellungen hat mir freundlicherweise mein geschätzter Kollege Prof. em. Dr. Bernhard Tillmann (Universität Kiel) überlassen. Für das kritische Gegenlesen besonderer funktioneller Aspekte der Organsysteme danke ich den Kollegen Prof. Dr. Dr. Dieter Eßfeld und Dr. Uwe Hoffmann aus dem eigenen Institut. Die äußerst konstruktive Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag hat die lange Phase der Neubearbeitung zu einem Vergnügen werden lassen. Aus fachlicher Sicht hat Herr Peter Bergmann mit seinen Wünschen, Hinweisen und Anregungen ebenfalls dazu beigetragen, dass diese Neuauflage nunmehr die Vorauflagen qualitativ deutlich übertreffen dürfte. Frau Rose-Marie Doyon stand mir stets hilfreich bei der Überwindung technischer Probleme in der Text- und Abbildungsgestaltung zur Seite; beiden gilt mein herzlicher Dank. Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Studentinnen und Studenten dafür bedanken, dass sie mir regelmäßig konstruktive Rückmeldungen zu diesem Buch und zu meinen Vorlesungen und Seminaren gegeben haben und verbinde dies mit der Hoffnung, dass sie an dem traditionell eher als trocken eingeschätzten Stoff der Anatomie weiter Freude entwickeln.

Köln, im Januar 2008
Hans-Joachim Appell

Autorenseite



Professor Dr. Dr. h.c. Appell
Institut für Physiologie und Anatomie
Deutsche Sporthochschule Köln

Funktionelle Anatomie

3 Funktionelle Anatomie des Bewegungsapparates

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 Schultergelenk für die Aufnahme des Oberarms trägt (Abb. 3.29). Nach hinten ist der

! 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.

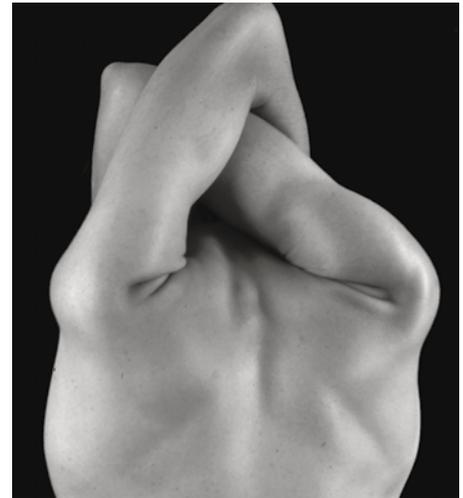


Abb. 3.35. Beispiel einer extremen Beweglichkeit im Schultergelenk

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

Inhaltliche Struktur: klare Gliederung durch alle Kapitel

Leitsystem: Schnelle Orientierung über die Kapitel und Anhang

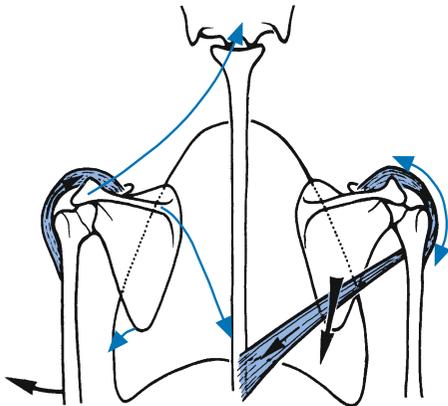
Lernziele: Was lerne ich in diesem Kapitel? Den Blick schärfen für das Wesentliche!

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

Wichtig: Das wichtigste auf den Punkt gebracht

Tabelle: klare Übersicht der wichtigsten Fakten

3.2 · 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)

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. sternoclavicularis*), zwischen beiden Schlüsselbeinen (*Lig. interclavicularis*) sowie zwischen Schlüsselbein und der 1. Rippe (*Lig. costoclavicularis*) ausgespannt sind. Das S-förmig gebogene Schlüsselbein ist auf seiner gesamten Länge gut

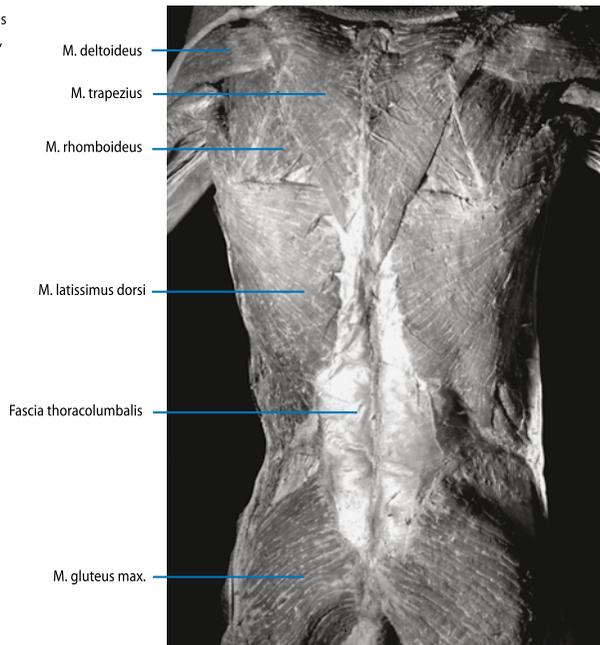
Praxis

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 einzelne 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

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



Abbildungen:
 Bilder sagen mehr als 1000 Worte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1	3.3.5	Oberschenkelmuskeln	86
1.1	Zur Einordnung der Funktionellen Anatomie	2	3.3.6	Unterschenkel und Fuß	90
1.2	Die anatomische Nomenklatur	2	3.3.7	Unterschenkel- und Fußmuskeln	93
1.3	Übersicht über den Bauplan des Körpers	3	3.3.8	Fußgewölbe	95
			3.3.9	Der Fuß in Bewegung	98
2	Allgemeine Anatomie des Bewegungsapparates	7	4	Bewegungskontrolle und -steuerung durch das Zentralnervensystem	101
2.1	Skelettmuskulatur	8	4.1	Grundlagen	102
2.1.1	Muskelkontraktion	9	4.1.1	Neuron und Synapse	103
2.1.2	Muskelfasern	10	4.1.2	Afferenz und Efferenz	106
2.1.3	Bau des Muskels	11	4.1.3	Funktioneller Bau von Gehirn und Rückenmark	107
2.1.4	Funktion des Muskels	12	4.2	Spinale Steuerung	111
2.1.5	Wachstum und Trainingsanpassung	14	4.2.1	Muskelspindeln	112
2.2	Binde- und Stützgewebe	15	4.2.2	Sehnenspindeln	113
2.2.1	Grundkomponenten	16	4.2.3	Spinale Fremdreflexe	114
2.2.2	Sehnen und Faszien	17	4.3	Supraspinale Steuerung	115
2.2.3	Knochengewebe	18	4.3.1	Vestibularorgan	115
2.2.4	Knorpelgewebe	22	4.3.2	Motorische Zentren	117
2.3	Bau der Gelenke	23	4.3.3	Bewegungsentwurf und -ausführung	119
2.3.1	Achsen und Ebenen	24	4.3.4	Motorisches Lernen	120
2.3.2	Formen echter Gelenke	25	5	Funktionelle Anatomie der Organsysteme	123
3	Funktionelle Anatomie des Bewegungsapparates	27	5.1	Blut- und Abwehrsysteme	124
3.1	Rumpf	28	5.1.1	Blutzellen	125
3.1.1	Wirbelsäule	28	5.1.2	Immunabwehr	127
3.1.2	Beckengürtel	33	5.1.3	Lymphatische Organe	129
3.1.3	Brustkorb	35	5.2	Herz-Kreislauf-System	130
3.1.4	Muskeln des Rumpfes	36	5.2.1	Blutgefäße	131
3.2	Obere Extremität	46	5.2.2	Funktionelle Teilkreisläufe	136
3.2.1	Schultergürtel und Schultergelenk	46	5.2.3	Herz	137
3.2.2	Muskeln des Schultergürtels	49	5.3	Atmungssystem	143
3.2.3	Die »tragende Rolle« des Schultergürtels	57	5.3.1	Luftröhre und Bronchialsystem	143
3.2.4	Ellenbogengelenk	59	5.3.2	Lungenalveolen	144
3.2.5	Muskeln des Armes	61	5.3.3	Atemmechanik und -regulation	146
3.2.6	Gelenke der Hand	65	5.3.4	Atmung und Säure-Basen-Gleichgewicht	148
3.2.7	Muskeln des Unterarmes und der Hand	67	5.4	Verdauungssystem	148
3.2.8	Die obere Extremität als komplexes Bewegungssystem	74	5.4.1	Speiseröhre und Magen	150
3.3	Untere Extremität	75	5.4.2	Dünndarm	151
3.3.1	Hüftgelenk	75	5.4.3	Dickdarm	152
3.3.2	Hüftmuskeln	77	5.4.4	Pankreas	153
3.3.3	Statik des Oberschenkels	82	5.4.5	Leber	153
3.3.4	Kniegelenk	83	5.5	Ausscheidungssystem	155
			5.5.1	Bau der Nieren	156

5.5.2 Nephron	156	Anhang	167
5.5.3 Der juxtaglomeruläre Apparat	158	Glossar häufig verwendeter Begriffe und Abkürzungen .	168
5.6 Regulation der Organfunktionen	158	Sachverzeichnis	173
5.6.1 Hormonsystem	159		
5.6.2 Vegetatives Nervensystem	163		

1 Einführung

- 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 auseinander schneiden. 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 detailliert 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 Durchtrittstellen 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 ansetzen und sie als Hebel benutzen. Mit Hilfe 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 kontraktilen 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 anstellen, 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

1.3 · Übersicht über den Bauplan des Körpers

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*; Lig., Ligg.), Arterien (A., Aa.) und Venen (V., Vv.) sowie Nerven (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 Verlaufrichtung 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/linke 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.

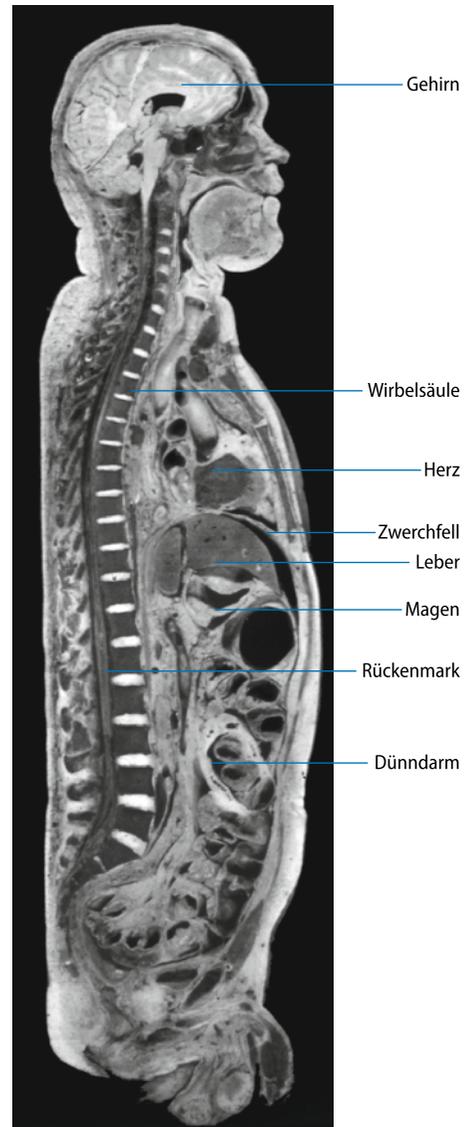
Der Bauplan des Menschen. Das Achsenskelett des Menschen (zurückgehend auf die *Chorda dorsalis*) bildet die **Wirbelsäule**. Sie dient gleichermaßen als Stützstab für den **Rumpf** und für dessen Bewegungen; an ihrem oberen Ende trägt sie den Kopf. Über einen großen Abschnitt der Wir-

belsäule 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, so dass 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. 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, 1.2).

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, so dass 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



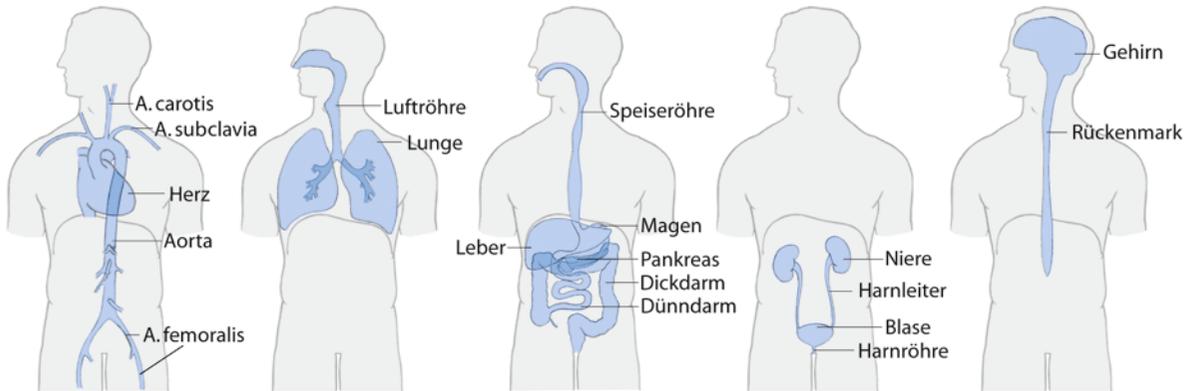
■ **Abb. 1.1.** Mediansagittalschnitt durch einen männlichen Rumpf, Ansicht von rechts (J. Koebke, Köln)

Nahrung aufgenommen und mit Hilfe 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.

1.3 · Übersicht über den Bauplan des Körpers

■ **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



■ **Abb. 1.2.** Übersicht über die Lage der Organsysteme in den entsprechenden Körperhöhlen; von links nach rechts: Herz-Kreislauf-

System, Atmungssystem, Verdauungstrakt, Ausscheidungssystem, Zentralnervensystem

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.

2 Allgemeine Anatomie des Bewegungsapparates

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 – 12
- 2.1.5 Wachstum und Trainingsanpassung – 14

2.2 Binde- und Stützgewebe – 15

- 2.2.1 Grundkomponenten – 16
- 2.2.2 Sehnen und Faszien – 17
- 2.2.3 Knochengewebe – 18
- 2.2.4 Knorpelgewebe – 22

2.3 Bau der Gelenke – 23

- 2.3.1 Achsen und Ebenen – 24
- 2.3.2 Formen echter Gelenke – 25

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 kontraktiven 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 der

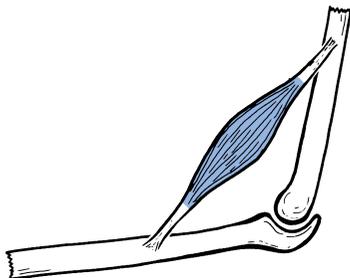


Abb. 2.1. Kinetische Kette: Knochen – Sehne – Muskel – Sehne – Knochen

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

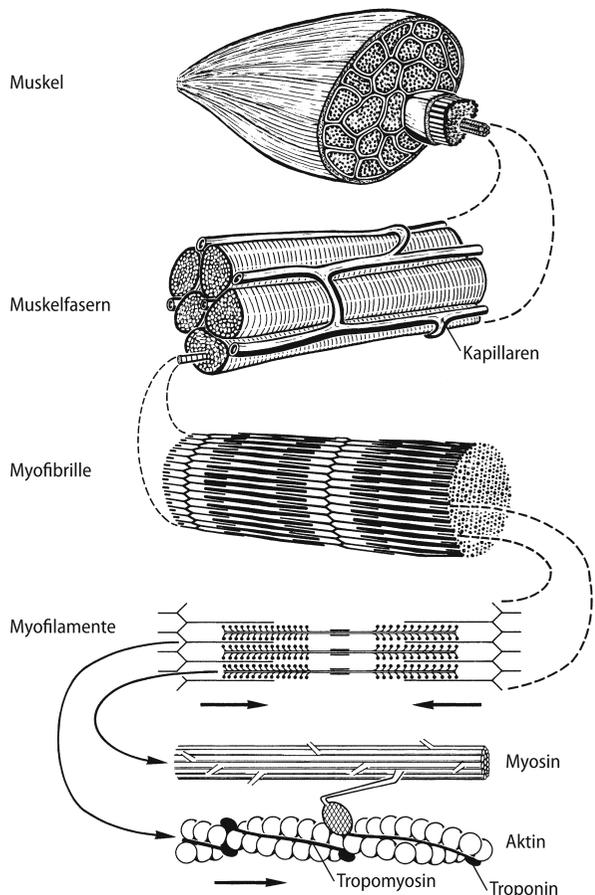


Abb. 2.2. Aufbau der Skelettmuskulatur vom Gesamtmuskel bis zu den kontraktiven Filamenten

2.1 · Skelettmuskulatur

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 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, so dass 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

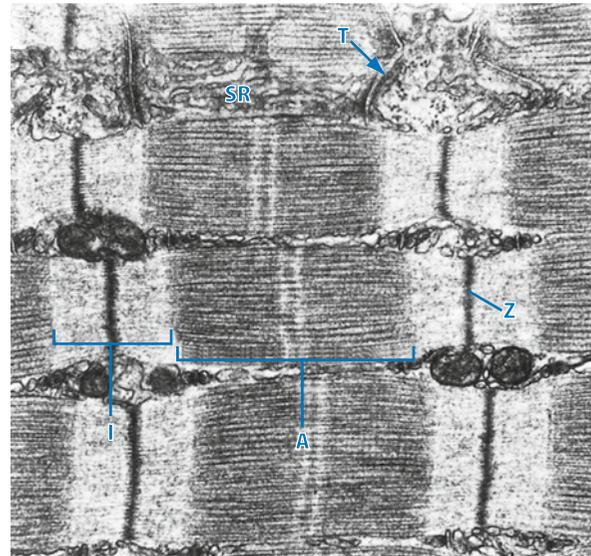
Der Mechanismus der Muskelkontraktion beruht auf der spezifischen Interaktion des Myosin mit dem Aktin. Wenn die Muskelfasermembran durch den Reiz einer motorischen Nervenendigung depolarisiert wird, kommt es zu einem Ausstrom von Kalziumionen aus dem SR in das Sarkoplasma. Hier kommt es unter dem Einfluß der Ca^{++} -Ionen zu einer Konformationsänderung des Troponincomplexes. 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 als Z-Scheiben benannt werden und aus dichtem, zugfesten Material bestehen (▣ Abb. 2.3). Die Z-Streifen können wie eine Art mikroskopisch kleiner Zwischensehnen angesehen werden, die die simultane Kontraktion hintereinander geschalteter Sarkomere aufeinander übertragen. In den Z-Streifen sind die Aktinfilamente, 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, so dass sich die Z-Streifen nähern. Dadurch kommt es zur Verkürzung der Sarkomere während der Kontraktion.

! Sarkomere sind die kleinsten funktionellen Einheiten der Kontraktion.



▣ **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. $\times 37\,500$