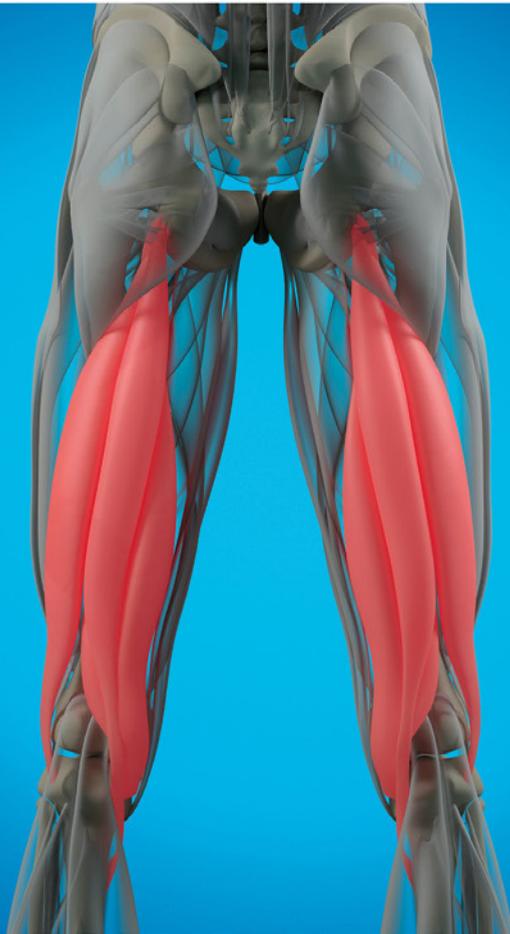


Thomas Gronwald
Thomas Ertelt

STARKE UND GESUNDE HAMSTRINGS

Mehr Beinkraft und Beweglichkeit sowie
weniger Verletzungen durch Training
der ischiocruralen Muskulatur



riva

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Für Fragen und Anregungen

info@rivaverlag.de

Wichtiger Hinweis

Dieses Buch ist für Lernzwecke gedacht. Es stellt keinen Ersatz für eine individuelle medizinische Beratung dar und sollte auch nicht als solcher benutzt werden. Wenn Sie medizinischen Rat einholen wollen, konsultieren Sie bitte einen qualifizierten Arzt. Der Verlag und die Autoren haften für keine nachteiligen Auswirkungen, die in einem direkten oder indirekten Zusammenhang mit den Informationen stehen, die in diesem Buch enthalten sind.

Originalausgabe

1. Auflage 2018

© 2018 by riva Verlag, ein Imprint der Münchner Verlagsgruppe GmbH

Nymphenburger Straße 86

D-80636 München

Tel.: 089 651285-0

Fax: 089 652096

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Redaktion: Stefanie Heim

Umschlaggestaltung: Pamela Machleidt, Melanie Kretschmar

Umschlagabbildung vorn: shutterstock/Anatomy Insider

Umschlagabbildungen hinten: Harry Schnitger

Alle Fotos im Innenteil von Harry Schnitger, außer:

iStockphoto/DaveLongMedia 58; iStockphoto/melis82 36; iStockphoto/stricke 10, 48; shutterstock/Aiila Medical Media 13; shutterstock/didesign021 56; shutterstock/Jacob Lund 32, 40, 46; shutterstock/lzf 26; shutterstock/Maridav 66; shutterstock/Serafino Mozzo 45; shutterstock/sportpoint 34; shutterstock/Syda Productions 180; Thomas Gronwald 203 u.; Max Metz 203 o.

Layout: Katja Muggli, www.katjamuggli.de, Manuela Amode

Satz: Daniel Förster, Belgern

Druck: Florjancic Tisk d.o.o., Slowenien

Printed in the EU

ISBN Print 978-3-7423-0480-3

ISBN E-Book (PDF) 978-3-7453-0003-1

ISBN E-Book (EPUB, Mobi) 978-3-7453-0002-4

Weitere Informationen zum Verlag finden Sie unter

www.rivaverlag.de

Beachten Sie auch unsere weiteren Verlage unter www.m-vg.de

Thomas Gronwald
Thomas Ertelt

STARKE UND GESUNDE HAMSTRINGS

Mehr Beinkraft und Beweglichkeit sowie
weniger Verletzungen durch Training
der ischiocruralen Muskulatur

riva

INHALT

Die Hamstrings – eine wichtige, aber verletzungsanfällige Muskelgruppe	6
Funktionell-anatomische Besonderheiten und biomechanische Grundlagen	11
Aufbau der ischiocruralen Muskulatur	12
Die wichtigsten Funktionen der Hamstringmuskulatur	14
Biomechanische Grundlagen	14
Biomechanik der Hamstrings	25
Mechanismen und Risikofaktoren für Verletzungen der Hamstrings	33
Verletzungsmechanismen	34
Risikofaktoren	35
Diagnostik der Kraft- und Dehnfähigkeit	43
Präventionsstrategien und Schutzfaktoren gegen Verletzungen der Hamstrings	47
Präventives Training als Schutz	48
Funktionelles Training der Hamstrings	57
Vielseitiges Training als Schutz vor Hamstringverletzungen	58
Warm-up – empfehlenswerte Strategien zur Bewegungsvorbereitung	62

Übungen für starke und gesunde Hamstrings ...	67
Warm-up-Übungen speziell für die Hamstrings	68
Überblick über die bewegungsvorbereitenden Übungen für das Warm-up	69
Übungen zur Aktivierung der Rumpf- und Hüftmuskulatur	94
Überblick über die Übungen zur Aktivierung der Rumpf- und Hüftmuskulatur	94
Funktionelles Krafttraining für die Hamstrings	118
Überblick über die Übungen zum funktionellen Krafttraining	119
Reaktiv-plyometrische Übungen	153
Überblick über die reaktiv-plyometrischen Übungen	153
So führen Sie die Übungen richtig aus	155
Übungen mit Sprint- und Richtungsänderungsanforderungen ..	174
Überblick über die Übungen des Sprinttrainings	174
Trainingsplanung und -steuerung.	187
Prinzipien für das Training	188
Parameter der Belastung	189
Empfehlungen für die Trainingsplanung	190
Beispieltrainingsplan für Fortgeschrittene	192
Beispieltrainingsplan für Einsteiger	196
Gelungene Rehabilitation – nur mit strukturiertem Training ...	200
Dank	202
Autorenviten	203
Sachregister	204
Übungsregister	206
Quellenverzeichnis	208

**Die Hamstrings –
eine wichtige, aber
verletzungsanfällige
Muskelgruppe**

Eine starke und gesunde ischiocrurale Muskulatur, im Englischen auch Hamstrings genannt, ist eine der wichtigsten Komponenten für funktionelle Bewegungsabläufe des Körpers. Die Muskelgruppe an den hinteren Oberschenkeln unterstützt den Körper bei zahlreichen Vorgängen: Sie hilft beim Beugen der Knie, beim Strecken der Hüfte oder stabilisiert die Ausrichtung des Beckens. Im sportlichen Kontext fördert sie die Stabilität der Körpermitte und sorgt für eine funktionelle Kraftübertragung der unteren Extremitäten auf den Rumpf. Deshalb sollten die Hamstrings gezielt trainiert werden, um ihr volles Potenzial zu erhalten und Verletzungen zu vermeiden.

Verletzungen von Muskel- und Sehnenstrukturen gehören zu den häufigsten Verletzungen im Sport, bei denen kein äußerer Einfluss oder Kontakt beispielsweise mit einem Gegenspieler vorausgeht. In einer Langzeitstudie konnte nachgewiesen werden, dass im europäischen Profifußball pro 1000 Stunden Belastung acht Verletzungen in dieser Kategorie auftreten. Das entspricht pro Team und Saison etwa 50 Verletzungen.¹ Bis zu 90 Prozent dieser Verletzungen können den unteren Extremitäten zugeordnet werden.² Muskel- und Sehnenverletzungen der Oberschenkelrückseite stellen Wissenschaft, Medizin und die Sportpraxis dabei vor zunehmende Probleme, da die Verletzungsraten während des Trainings seit

fünfzehn Jahren kontinuierlich ansteigen. Aktuell repräsentieren im sportlichen Kontext ohne Gegnereinfluss Verletzungen der Hamstrings sogar die häufigste Verletzungsart.³ Diese machen in Abhängigkeit der Sportart und des Anforderungsprofils bis zu 25 Prozent der Verletzungen der unteren Extremitäten aus.^{4,5}

Im Fußball stehen Verletzungen der Hamstrings, bezogen auf alle Verletzungsarten, in diesem Sport an erster oder zweiter Stelle.^{6,7,8} Etwa 83 Prozent der Verletzungen an den Hamstrings entfallen dabei allein auf den zweiköpfigen Oberschenkelmuskel (*Musculus biceps femoris*), etwa 11 Prozent auf den halbmembranösen Muskel (*Musculus semimembranosus*) und etwa 5 Prozent auf den Halbsehnenmuskel (*Musculus semitendinosus*), aus denen sich die Hamstrings zusammensetzen. Die Gefahr einer erneuten Verletzung der Hamstrings bewegt sich nach einem Monat trotz intensiver rehabilitativer Behandlung, abhängig von der Sportart, im Bereich von 16 bis 60 Prozent.^{9,10,11,12} Wiederverletzungen betrafen in einer Studie jedoch ausschließlich den *Musculus biceps femoris*.¹³

Grundsätzlich gilt, dass Verletzungen dieses Muskels insbesondere in Sportarten mit hohen Laufgeschwindigkeiten und Richtungswechseln, vielen Sprüngen sowie schnell wechselnden Beschleunigungs- und Abstopppmanövern, wie im Fußball oder beim Tennis, auftreten.¹⁴

Auch leichtathletische Disziplinen und sonstige Sportsportarten mit den genannten Anforderungen scheinen besonders risikobehaftet für Hamstringverletzungen zu sein. Ein Beispiel aus der Leichtathletik ereignete sich im WM-Finale der 4 x 100-Meter-Staffel 2017 in London. Ausgerechnet Schlussprinter Usain Bolt erlitt einen Krampf in der hinteren Oberschenkelmuskulatur und er musste das Rennen auf der Zielgeraden abbrechen. Ein möglicher Grund für den Krampf soll das kühle Wetter, gepaart mit einer relativ langen Wartezeit und einer ungenügenden Bewegungsvorbereitung vor dem Finale, gewesen sein. Ein weiterer Vorfall ereignete sich in einem Ligaspiel des FC Bayern München in Hamburg im Oktober 2017. Während einer einfachen Abstoppsituation zog sich Thomas Müller einen Muskelfaserriss in der hinteren Oberschenkelmuskulatur zu. Er sagte im Anschluss in einem Interview, dass es passiert sei, als er einen Ball mit der Hacke habe zurücklegen wollen. Beide Sportler verletzten sich ohne Einfluss von außen, was auf vielfältige Verletzungsursachen hinweist.

Die Muskelgruppe der Hamstrings zeichnet sich durch ein komplexes Zusammenspiel aus und zeigt wesentliche Besonderheiten in Bezug zur funktionellen Anatomie und biomechanischen Wirkungsweise bei sportlichen Belastungen. Obwohl die ischiocrurale Muskulatur mitt-

lerweile gezielt ins Training eingebunden wird – zumindest im Profibereich werden zahlreiche präventive Maßnahmen umgesetzt – und trotz zunehmender wissenschaftlicher Erkenntnisse zeigt sich, wie bereits erwähnt, ein Anstieg der Verletzungsraten der Hamstrings während des Trainings. Im Wettkampf scheinen die Raten zwar auf hohem Leistungsniveau konstant zu bleiben,¹⁵ die bisherigen Ausführungen machen jedoch offensichtlich, dass bezüglich der Hamstrings Wissenslücken existieren, die zahlreiche Fragen aufwerfen. Was läuft also verkehrt? Haben sich die sportlichen Anforderungen derart drastisch geändert, sodass unsere Hamstringmuskulatur damit nicht mehr zu recht kommt? Im Fußball können Veränderungen im Laufe der letzten Jahre durch höhere Trainings- und Wettkampftensivitäten sowie die Wettkampfdichte nachgewiesen werden.¹⁶ Aber auch auf breiten-sportlicher Ebene ist in den letzten Jahren eine zunehmende Professionalisierung mit höheren Trainings- und Wettkampfbelastungen registrierbar. Gleichzeitig machen mehr Menschen Sport. Es ist also an der Zeit, die Muskelgruppe der Hamstrings und ihre komplexen Funktionen näher zu betrachten, um die Verletzungsanfälligkeit nachhaltig zu reduzieren.

Das vorliegende Buch bietet den derzeit umfassendsten Ratgeber zur Muskelgruppe der Hamstrings im deutschsprachigen Raum. Wir klären über funktionell-ana-



tomische Zusammenhänge auf und verdeutlichen den Bezug zu biomechanischen Hintergründen. Die dargestellten Grundlagen werden anhand sportart-spezifischer Beispiele erläutert. Zudem werden wir übergeordnete Mechanismen und Risikofaktoren für Verletzungen der Hamstrings herausstellen und hieraus Schlussfolgerungen für die Sportpraxis ziehen. Faktoren, die vor Verletzungen schützen, werden als spezifische Präventionsstrategien praxisorientiert dargestellt.

Den größten Teil des Buches nimmt jedoch der Praxisteil zum funktionellen Training der Hamstrings ein. Hierbei werden der Funktion entsprechende Übungen vorgestellt und Hinweise zur Trainingsplanung und -steuerung angeführt. Mit dem Ziel, auftretende Verletzungsmuster zu reduzieren, wurde ein ganzheitlicher An-

satz im Hinblick auf gemeinsam arbeitende Muskelgruppen gewählt. Aus diesem Grund betrachten wir nicht nur isoliert die Muskulatur der Hamstrings, sondern erläutern auch Übungen zur Rumpfstabilisierung für den Schulter- und vor allem den Beckengürtel sowie zur Kräftigung der Streck- und Beugemuskulatur der Hüfte. Aufgrund der Dynamik und Komplexität vor allem in Spielsportarten, wie zum Beispiel dem Fußball, werden zudem Übungen, die mit Sprüngen kombiniert werden, sowie Trainingsmöglichkeiten mit Sprint- und Richtungsänderungen beschrieben.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg beim Training der Hamstrings!

Thomas Gronwald
Thomas Ertelt



**Funktionell-anatomische
Besonderheiten und
biomechanische Grundlagen**

Aufbau der ischiocruralen Muskulatur

Die Hamstrings oder ischiocrurale Muskulatur sind eine Gruppe von vier Muskeln auf der Rückseite des Oberschenkels (Illustration auf Seite 13). Die Gruppe setzt sich zum einen zusammen aus dem zweiköpfigen, also aus zwei Muskelsträngen bestehenden Oberschenkelmuskel, *Musculus biceps femoris*, dessen kurzer Muskelstrang etwa in der Mitte des hinteren Oberschenkels entspringt und seitlich bis über das Kniegelenk verläuft, wohingegen sein langer, zweigelenkiger Strang vom Hüftgelenk bis zum Kniegelenk reicht. Zum anderen wird sie ergänzt durch den zweigelenkigen *Musculus semitendinosus*, den Halbsehnenmuskel, und den ebenfalls zweigelenkigen *Musculus semimembranosus*, den halbmembranösen Muskel. Beide verlaufen ebenfalls vom Hüft- bis zum Kniegelenk.¹⁷ Zweigelenkige Muskeln, also Muskeln, die über zwei Gelenke verlaufen, zählen zu den längsten Muskeln des Körpers, da diese zum Teil sehr lange Segmente über weit entfernte Gelenke miteinander verbinden.

Der zweiköpfige Oberschenkelmuskel und seine Funktion

Der *Musculus biceps femoris* ist ein zweiköpfiger Muskel und gehört zum lateralen, also seitlich beziehungsweise außen verlaufenden Anteil der Hamstrings. Der lange Muskelstrang, Kopf genannt, ent-

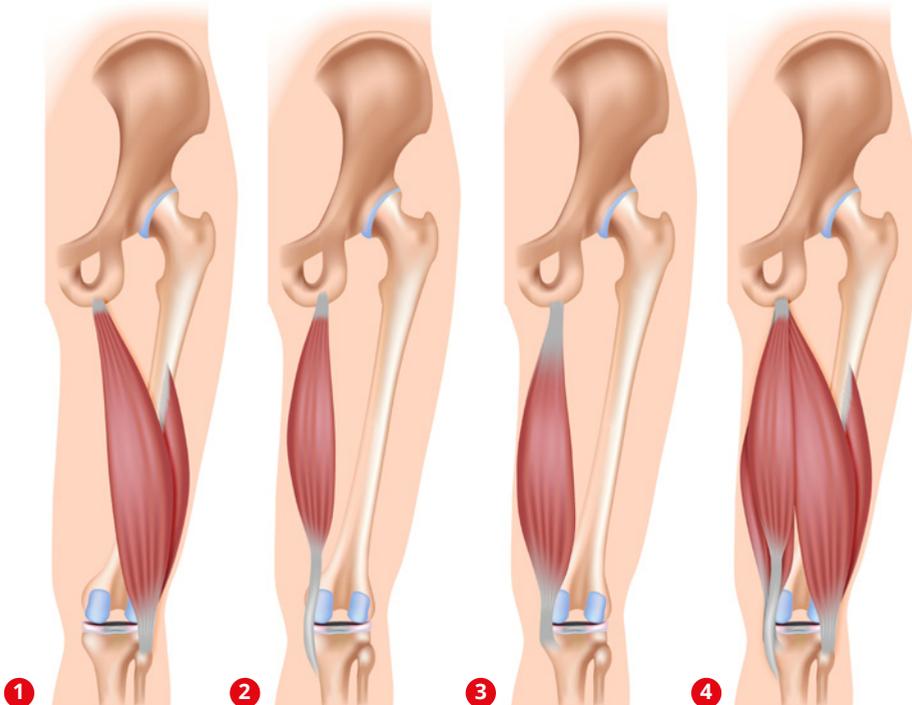
springt am Sitzbeinhöcker des Beckens. Der kurze Kopf hat seinen Ursprung an der knöchernen Leiste der Schenkelbeinrückseite sowie am hinteren unteren Drittel des Oberschenkelknochens.^{18, 19, 20} Beide Muskelköpfe verlaufen am hinteren Oberschenkel, über das Kniegelenk und setzen am oberen Ende des Wadenbeins wieder an. Der kurze Kopf agiert erst am Ende als Verbindungsstück zum langen Kopf.²¹ Neuere Studien konnten zudem zeigen, dass die Ansatzsehne dabei einen medialen, also zur Körpermitte hin gelegenen, sowie einen lateralen, also seitlich gelegenen Teil aufweist, mit jeweils einer vorderen und hinteren Komponente. Gleichzeitig gibt es eine Verbindung zur Sehne des Kniekehlenmuskels sowie zum Kniekehlenband, das den Kniekehlenmuskel am Kniegelenk fixiert. Hieraus kann geschlossen werden, dass der *Musculus biceps femoris* und der Kniekehlenmuskel die Kniefunktion und Kniestabilität in Zusammenarbeit entscheidend unterstützen.²² Allerneueste Untersuchungen haben gezeigt, dass der *Musculus biceps femoris* zusätzlich auch am Schienbein ansetzt.²³ Diese aufgedeckten differenzierten Ansatzpunkte sind hierbei nicht als punktuelle Ansätze anzusehen, sondern nehmen nicht unerhebliche Flächen ein. Dies gilt auch für die folgend beschriebene Muskulatur. Die Funktion und die Belastung des Muskels könnten also noch deutlich komplexer sein, als bisher bekannt.

Ursprung und Ansatz des Halbsehnenmuskels

Der *Musculus semitendinosus*, auch Halbsehnenmuskel genannt, entspringt am Sitzbeinhöcker des Beckens und hat somit einen gemeinsamen Ursprung mit dem langen Kopf des *Musculus biceps femoris*.^{24, 25} Er gehört zum medialen Anteil der Hamstrings. Der Ansatz, also das andere Ende des Halbsehnenmuskels, befindet sich an der Innenseite des Schienbeins.

Lage und Länge des halbmembranösen Muskels

Der *Musculus semimembranosus*, auch halbmembranöser Muskel oder Plattsehnenmuskel genannt, entspringt am Sitzbeinhöcker des Beckens und liegt seitlich und oberhalb der Ursprungsstelle des langen Kopfes des zweiköpfigen Oberschenkelmuskels und des Halbsehnenmuskels.²⁶ Er gehört ebenfalls zum medialen Anteil der Hamstrings. Die Ansätze des *Musculus semimembranosus* sind der



Abgebildet sind hier jeweils Ursprung und Ansatz sowie Zugrichtung der vier Muskelstränge der Hamstrings.

- 1 Kurzer und langer Kopf des zweiköpfigen Oberschenkelmuskels (*Musculus biceps femoris*)
- 2 Halbsehnenmuskel (*Musculus semitendinosus*)
- 3 Halbmembranöser Muskel (*Musculus semimembranosus*)
- 4 Komplette Muskelgruppe der Hamstrings

innere Schienbeinknollen, das schräge Kniekehlenband und die Faszie des Kniekehlenmuskels. Der *Musculus semimembranosus* bildet damit den längsten Muskel der Hamstrings.^{27, 28, 29}

Die wichtigsten Funktionen der Hamstringmuskulatur

Weshalb nun ist die Muskulatur der hinteren Oberschenkel so wichtig für die reibungslosen Bewegungsabläufe unseres Körpers und welche Funktionen hat sie? Alle Muskeln der Hamstrings beugen das Kniegelenk und tragen mit Ausnahme des kurzen Kopfes des *Musculus biceps femoris* zur Streckung im Hüftgelenk bei. Nicht nur im Sport, sondern auch im Alltag ist eine starke und gesunde Hamstringmuskulatur daher von größter Wichtigkeit und unterstützt die ebenso wichtige Gesäßbeziehungsweise Glutealmuskulatur. Dies bedeutet, dass erst durch die reibungslose Zusammenarbeit aus Glutealmuskulatur als Agonist, sprich ausführende Muskulatur, und Hamstringmuskulatur als Synergist, sprich unterstützende Muskulatur, bestimmte Bewegungen der streckenden Muskelkette in den Beinen möglich sind.

Bei gebeugtem Kniegelenk tragen *Musculus semitendinosus* und *Musculus semimembranosus* zudem zur Innenrotation im Kniegelenk und der *Musculus biceps femoris* zur Außenrotation bei. Der *Musculus semitendinosus* stabilisiert unter Be-

lastung das Kniegelenk gegenüber einer X-Beinstellung (Vagus-Stress), der *Musculus biceps femoris* gegenüber einer O-Beinstellung (Varus-Stress), wodurch eine Verletzung des Kniegelenks vermieden wird. Der *Musculus semitendinosus* und der *Musculus semimembranosus* können das Bein zusätzlich im Hüftgelenk bei gestreckter Hüfte nach innen rotieren, der *Musculus biceps femoris* trägt in dieser Konstellation gering zur Außenrotation bei. Der *Musculus semimembranosus* arbeitet zudem gegen die Abduktion (das Abspitzen des Beins) im Hüftgelenk sowie gegen die Außenrotation im Kniegelenk. Der *Musculus biceps femoris* arbeitet gegen die Innenrotation im Kniegelenk. Durch die benannten Funktionen stabilisieren die Hamstrings das gesamte Kniegelenk und unterstützen damit auch das vordere Kreuzband. Dieses verhindert, dass das Schienbein gegenüber dem Oberschenkelknochen nach vorn gleitet sowie das Kniegelenk rotiert.

Um die Funktionsweise, die Aufgaben und das Risiko für Verletzungen zu verstehen sowie gezielte Trainingsmethoden für die Hamstringmuskulatur daraus abzuleiten, werden im Folgenden die biomechanischen Grundlagen erläutert.

Biomechanische Grundlagen

Kraft und Bewegung umzusetzen basiert immer auf einem genau abgestimmten und hochkomplexen Zusammenspiel

aus Muskeln, Skelett, Nervensystem, Bewegungserfahrung und Genetik. Die Biomechanik beschreibt im Speziellen das Zusammenspiel aus aktiven und passiven Strukturen des Stütz- und Bewegungssystems auf der Grundlage mechanischer Gesetzmäßigkeiten. Beeinflusst wird Bewegung zudem durch mögliche Einschränkungen, die sich aus dem Kontext der aktuellen Situation ergeben. Ist der Körper akut oder chronisch beeinträchtigt, bestimmt dies die Verträglichkeit von Belastungen und damit das Risiko für Verletzungen. Letzteres erhöht sich zudem drastisch, wenn sich die aktuelle Bewegungssituation schlagartig und nicht entsprechend planbar ändert: beispiels-

weise in Sportarten, wenn eine Person aufgrund einer veränderten Spielsituation beim Laufen plötzlich abstoppt oder unvorhergesehen in eine Vertiefung oder auf eine Erhöhung tritt. Um die Prozesse und Bedingungen für Verletzungen zu verstehen und die passenden Präventionsstrategien wählen zu können, ist es notwendig, einige ausgewählte Grundlagen zur Muskulatur und im besonderen Maße zum Spezialfall der Hamstrings zu kennen.

Aufbau und Funktion von Muskeln

Wenn im Allgemeinen von Muskulatur oder einem Muskel gesprochen wird, dann handelt es sich bei genauerer Betrachtung

INFO

Kontraktionsformen der Muskulatur

Arbeitet ein Muskel und spannt sich an, spricht man von einer Muskelkontraktion. Hierbei unterscheidet man konzentrische von exzentrischen und isometrischen Kontraktionen der Muskulatur: Während einer **konzentrischen** Bewegung wird ein Widerstand überwunden, also zum Beispiel eine Last oder ein Gewicht gehoben. Der Muskel verkürzt sich infolgedessen zwischen Ursprung und Ansatz.

Bei der **exzentrischen** Kontraktion wird einer großen Last nachgegeben, also zum Beispiel die Langhantel beim Bankdrücken abgesenkt – dadurch verlängert sich der Muskel zwischen Ursprung und Ansatz.

Muss die Muskulatur Haltearbeit leisten, beim Halten einer Last oder bei der Arbeit gegen einen unüberwindbaren Widerstand, spricht man von statischer beziehungsweise **isometrischer** Kontraktion. Die Muskellänge bleibt (annähernd) gleich und die Muskelspannung verändert sich.

um einen ganzen Muskel-Sehnen-Komplex, der je nach physiologischem Aufbau aus Sehnen, Bindegewebe (Faszien-gewebe) sowie den Muskelzellen besteht. Häufig finden sich am Ansatz von Muskeln sogenannte Aponeurosen, flächige Strukturen aus Bindegewebe, die die einzelnen Muskelfasern mit einer Sehne verbinden. Sehnen stellen wiederum die Verbindung zwischen Muskel und Knochen her. Sehnen werden vor allem stark belastet, wenn sich ein Muskel verlängert oder verkürzt und die Sehne dadurch unter Zug gerät oder zusammengedrückt wird. Unter diesem Aspekt müssen Sehnen, Aponeurosen und auch das Bindegewebe, mechanisch gesehen, die Eigenschaften einer Feder aufweisen. Dadurch haben sie wiederum direkten Einfluss auf die Funktion des Muskels sowie seine Fähigkeit, Kraft zu erzeugen und auf den Knochen zu übertragen. Weil sie unterschiedlich steif sind – Sehnen sind sehr steif, Bindegewebe dagegen eher weich –, sind sie in der Lage, mechanische Energie, also den Zug an ihnen, in sogenannte Verformungsenergie umzuwandeln und zu speichern beziehungsweise später wieder abzugeben. Sie stellen somit die passiven Kraftproduzenten eines Muskel-Sehnen-Komplexes dar.

Dieser scheinbar einfachen Struktur steht die deutlich komplizierter aufgebaute Muskelzelle gegenüber. Da sie sich infolge eines Reizes eigenständig zusammenziehen beziehungsweise verkürzen kann,

stellt sie das aktive kontraktile Bauelement eines Muskelkomplexes dar. Chemische Energie wird durch die »Verbrennung« in der Muskelzelle in mechanische Energie umgewandelt. Der Muskel kontrahiert und erzeugt Kraft. Die Kraft, die der Muskel erzeugen kann, hängt dabei nicht nur von den chemischen beziehungsweise energetischen Bedingungen ab, sondern auch von seiner jeweiligen Länge (vergleiche Kraft-Längen-Funktion, Seite 17) und von der Geschwindigkeit, mit der er die Kraft aufbringen soll (vergleiche Kraft-Geschwindigkeit-Funktion ab Seite 20). Während die erste Funktion maßgeblich von der individuellen Körperpositionierung des Sportlers abhängt, also wie seine Körpersegmente und Gelenke angeordnet sind, hängt die zweite Funktion von der Bewegungsgeschwindigkeit beziehungsweise der zu bewegenden Last ab. Um diese Abhängigkeiten und ihre Wirkung zu verstehen, muss der Aufbau dieser kontraktile Bauteile näher betrachtet werden.

Eigenschaften der Kraft-Längen-Funktion

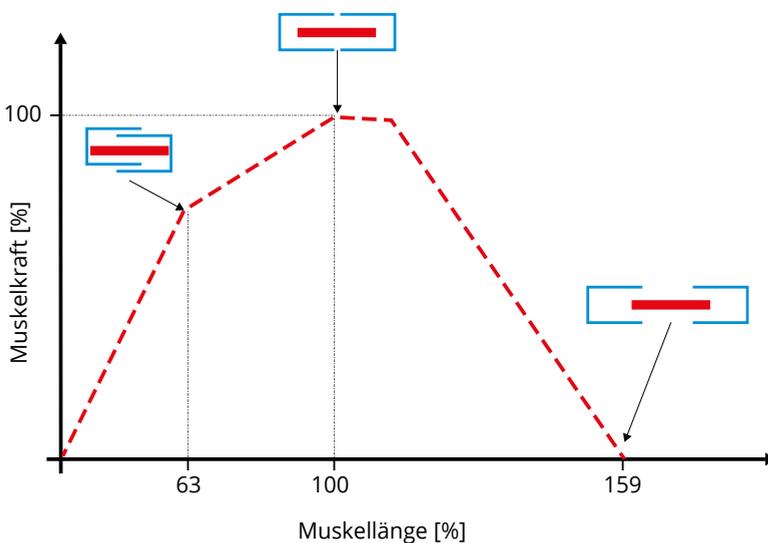
Die Kraft-Längen-Funktion beschreibt, wie viel Kraft der Muskel abhängig von seiner Länge erzeugen kann. Das Phänomen zeigt sich beispielsweise, wenn wir beim Tragen von schweren Gegenständen eine bestimmte Armposition einnehmen. Wir sorgen durch das Beugen des Arms dafür, dass der Muskel in einem optimalen

Längenbereich ausgerichtet wird, um das Gewicht zu heben und zu tragen. Bei sogenannten eingelenkigen Muskeln, also Muskeln, die über nur ein Gelenk ziehen, steht die Kraft-Längen-Funktion unmittelbar in Relation zum Gelenkwinkel.

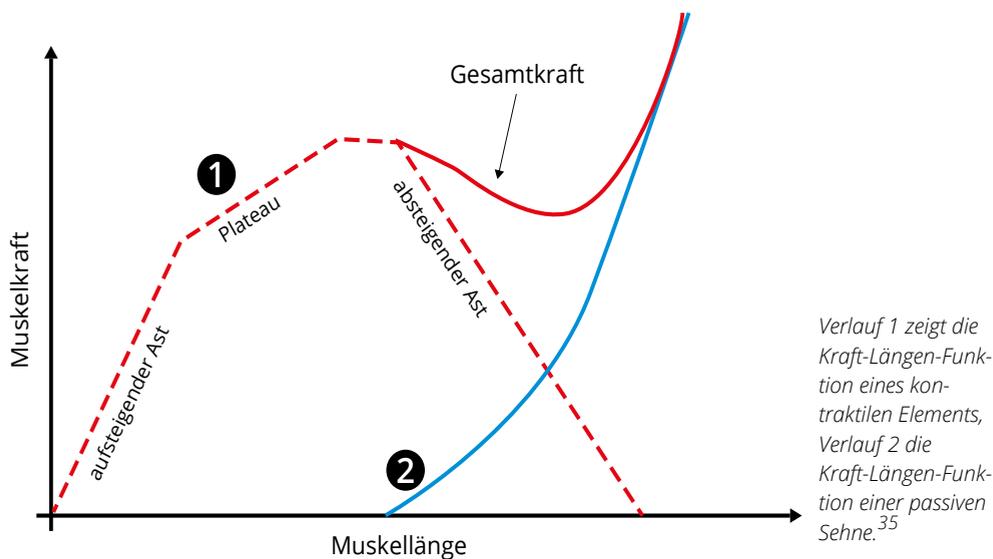
Das kleinste kontraktile Element eines Muskels stellt das Sarkomer dar. Dieses ist der »Motor« des Muskels, welcher durch chemische Vorgänge zur Verlängerung und Verkürzung wie auch zur Generierung der Kraft führt.^{30,31,32} Ein solches Sarkomer ist nur etwa 3 Mikrometer (μm) groß. Viele solcher Sarkomere hintereinander können Muskelfasern von mehreren Zentimetern ergeben.

In einer starken Vereinfachung besteht ein Sarkomer aus drei Einheiten, wobei

zwei dieser Einheiten einem in der Mitte durchgeschnittenen Röhrchen entsprechen (Aktinfilamente) und das dritte einer innerhalb der beiden Röhrchen befindlichen Führungsschiene (Myosinfilament). Diese scheinbar freie Führungsschiene besitzt entlang ihrer Achse zahlreiche »Myosinköpfchen«, die zentriert und symmetrisch gegeneinander verdreht angeordnet sind.³³ Die Myosinköpfchen können infolge chemischer energieverbrauchender Prozesse an die Aktinfilamente andocken und umklappen – dieser Vorgang nennt sich »Brückenbindung«. Aufgrund der symmetrischen Anordnung bewirkt das Umklappen der Köpfchen in Richtung des Zentrums der Führungsschiene, dass sich die beiden Aktinfilamente annähern und in Richtung Sarkomermitte gezogen werden.



Dargestellt ist hier die Kraft-Längen-Funktion eines Sarkomers.³⁴



Je mehr Myosinköpfchen gleichzeitig an die Aktinfilamente andocken können, umso mehr Kraft kann erzeugt werden. Die Zahl der möglichen Andockstellen, »Querbrücken« genannt, hängt jedoch von der Distanz der beiden Aktinfilamente ab. Bei einer optimalen Länge von 2,5 bis 2,8 Mikrometern ist die Zahl der Querbrücken am größten³⁶ und der Muskel ist in der Lage, seine größte aktive Kraft zu generieren. Übersteigt die Muskellänge diesen Bereich, so sinkt die Zahl der möglichen Andockstellen. Da hierdurch weniger Querbrücken ausgeprägt werden können, kann der Muskel auch nicht mehr so viel Kraft erzeugen. Ähnlich verhält es sich, wenn die Muskellänge unter das Maß der optimalen Länge reduziert wird. Dann sind zwar alle Myosinköpfchen von Aktinfilamenten umgeben, jedoch überlagern

sich die Andockstellen. Nicht mehr alle Anheftungsstellen können genutzt werden und aufgrund der fehlenden Querbrückenverbindungen vermindert sich die mögliche Muskelkraft. Diese Beziehung zwischen der möglichen Anzahl an Querbrücken und der Muskellänge nennt man Kraft-Längen-Funktion.

Der Muskel besteht jedoch, wie bereits beschrieben, nicht nur aus den aktiven kontraktiven Elementen, sondern auch aus den passiven Eigenschaften der Sehne, Aponeurose und des Bindegewebes. Diese passiven Elemente bewirken infolge ihrer mechanischen Verformung, dass die vom Muskel generierte Kraft mitunter deutlich höher ausfällt als die aktiv erzeugten Kräfte: Hintergrund sind die durch die passiven »Federn« ausgeübten

Rückstellkräfte, die bei entsprechend verlängertem Muskel zusätzlich Kräfte provozieren. Diese Extrakräfte addieren sich zum ursprünglichen Kraftpotenzial.³⁷ Die Abbildung auf Seite 18 zeigt ein solches Verhalten.

INFO**Der Muskel passt sich seiner Nutzung an**

Wird infolge von immer wiederkehrenden gleichen Gelenkkonstellationen kontinuierlich in bestimmten Muskellängen trainiert, wie zum Beispiel beim Radfahren mit geringem Hüftwinkel oder beim Laufen mit großem Hüftwinkel, kann dies dazu beitragen, dass sich die Sarkomerzahl und -länge je nach Sportart unterschiedlich entwickelt. Aus ökonomischen und Effizienzgründen ist der Muskel nämlich immer bestrebt, in seiner optimalen Länge zu arbeiten. So wird bislang vermutet, dass Radfahrer durch das regelmäßige Training in sitzender Position im Vergleich zu Läufern eine geringere Sarkomerzahl in der vorderen Oberschenkelmuskulatur besitzen. Diese geringere Sarkomerzahl sorgt dafür, dass der Oberschenkelmuskel eines Radfahrers in einer gestreckteren Gelenkkonstellation, also zum Beispiel beim Laufen, schon bei kleiner Längenänderung vorrangig im absteigenden Verlauf der Kraft-Längen-Funktion arbeitet, sprich, aufgrund seiner Verlängerung von vornherein weniger Kraft besitzt. Läufer bilden im Umkehrschluss aufgrund der »Überstreckung« im Hüftgelenk durch die Laufbewegung deutlich mehr Sarkomere in der vorderen Oberschenkelmuskulatur aus und arbeiten auf dem Fahrrad infolge der sitzenden Position eher im aufsteigenden Verlauf der Kraft-Längen-Funktion.³⁸ Das Gleiche gilt für die Hamstrings, denn die Körperposition beim Laufen wirkt sich nicht nur auf die Sarkomerzahl in der vorderen Oberschenkelmuskulatur aus, sondern verringert gleichzeitig die Sarkomerzahl in den Hamstrings, insbesondere im *Musculus biceps femoris*.

Rein mechanisch betrachtet, bedeutet eine reduzierte Sarkomerzahl in einem Muskel immer auch, dass seine maximale Länge schneller erreicht ist, sofern hier die Sehne nicht ausgleicht. Ein Läufer, der es gewohnt ist, immer mit aufrechtem Oberkörper und gestreckter Hüfte zu laufen, gerät bei unvorhergesehenen Situationen, in welchen es kurzfristig zu einer drastischen Längenänderung im *Musculus biceps femoris* kommt, schnell in den Grenzbereich der Belastbarkeit bezüglich der Muskellänge. Ein Beispiel ist ein kurzes Abstoppen, das den Oberkörper um die Hüfte nach vorn rotiert. Verletzungen wie zum Beispiel Zerrungen sind die Folge.

Zusammenhang von isometrischer und maximaler Kraft

Es existieren zahlreiche Tests, mit denen sich die maximale Kraftfähigkeit ermitteln lässt. Ein wichtiges Kriterium ist hierbei, dass sich die Muskellänge während der getesteten Anspannung nicht verändert. Man spricht dann von einer isometrischen Kontraktion: Der Muskel kontrahiert, ohne dabei seine Länge zu ändern (Kasten »Kontraktionsformen der Muskulatur«, Seite 15). Diese isometrische Kraft entspricht in der Regel unserer maximal möglichen Muskelkraft.

Die isometrische Kraft ist allerdings immer auch abhängig von der aktuellen Muskel­länge (Grafik, Seite 18). In unterschiedlichen Gelenkstellungen besitzen wir temporär unterschiedliche Maximalkräfte. Die absolute Maximalkraft (auch als F_{iso} bezeichnet) ist die Kraft, die durch das Ausrichten des Muskels auf die optimale Muskellänge generiert werden kann.

Über die gemessene absolute Maximalkraft lässt sich das Muskeltraining gezielt steuern und je nach Körperbau, Geschlecht und Sportart individuell anpassen. Ein Praxisbeispiel ist die stark individuell variierende Positionierung der Startblöcke beim Sprint. Ziel ist es, nicht eine allgemeine Position einzunehmen, sondern jeden Muskel auf eine möglichst optimale Länge einzustellen, damit zum Start die höchsten Kräfte zur Beschleunigung aktiviert werden können.

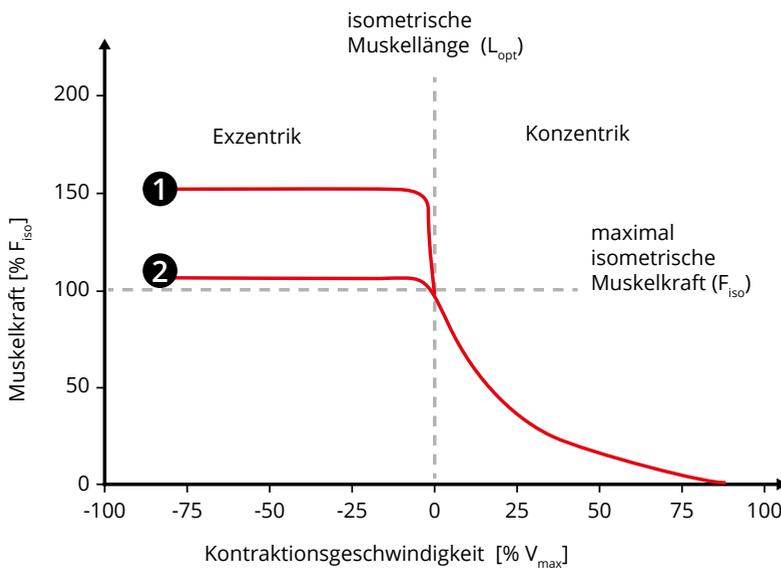
Eigenschaften der Kraft-Geschwindigkeit-Funktion

Im Alltag und vor allem im Sport ist die erzeugte Muskelkraft nicht nur von der Länge des Muskels abhängig, sondern auch von der Last, die bewegt werden soll, und der Geschwindigkeit, mit der eine Bewegung ausgeführt werden soll. So können wir ein kleines Gewicht deutlich schneller bewegen als ein hohes Gewicht. Ebenso ist ein kleines Gewicht nahe am Körper deutlich schneller bewegbar als ein weit vom Körper entferntes. In sitzender Position auf einem Ruderergometer mit keinem oder kleinem Widerstand können wir, da wir unser Körpergewicht nicht tragen müssen, die Beine deutlich schneller strecken als beispielsweise im Stehen aus einer ähnlichen Position heraus, also aus einer Kniebeuge oder einer Hockposition bei einem Strecksprung (zum Beispiel Squat Jump, Seite 158). Ein großer Mensch mit langen Beinen kann im Allgemeinen seine Beine nicht so schnell bewegen wie ein kleinerer Mensch. Das ist mit ein Grund, weshalb sich Kinder mit schnelleren Schritten bewegen als Erwachsene beziehungsweise wieso Sprinter, um konkurrenzfähig zu sein, eine gewisse Körpergröße nicht überschreiten sollten.

Die Bewegungsgeschwindigkeit nimmt durch Belastung mit zusätzlichem Gewicht weiter ab und erreicht null, wenn wir das Gewicht nicht mehr bewegen können. Wir generieren dann zwar die maximale Kraft

des Muskels, sind aber nicht mehr in der Lage, das Gewicht zu bewegen. Die Muskulatur arbeitet, wie beschrieben, isometrisch. Sobald die Last jedoch verringert wird, ist der Muskel wieder in der Lage, das Gewicht zu bewegen. Dabei verkürzt sich der Muskel aktiv, er arbeitet konzentrisch (Kasten »Kontraktionsformen der Muskulatur«, Seite xx). Das Verhältnis zwischen Kraft und Geschwindigkeit ist jedoch nicht linear, sondern entspricht bei konzentrischer Muskelarbeit einer steilen Hyperbel.

Anhand einer solchen exemplarischen Kurve wird offensichtlich, dass die zu erbringende Kraft nachhaltig reduziert werden muss, wenn nur wenig Bewegungsgeschwindigkeit erforderlich ist. Sollen beispielsweise nur 10 Prozent der maximalen Kontraktionsgeschwindigkeit erreicht werden, so fällt die zur Verfügung stehende maximale isometrische Kraft um etwa 35 Prozent ab. Bei 17 Prozent der maximalen Kontraktionsgeschwindigkeit sind sogar nur noch 50 Prozent der maximalen Kraft realisierbar.³⁹



Die schematische Darstellung zeigt die Kraft-Geschwindigkeit-Funktion für konzentrische und exzentrische Muskelarbeit.^{40,41} Verlauf 1 zeigt die Funktion für eine trainierte Person, Verlauf 2 für eine untrainierte Person.

L_{opt} : optimale Länge des Muskels

F_{iso} : Maximalkraft des Muskels bei optimaler Länge

Skalierung x-Achse: prozentual in Abhängigkeit der maximalen Kontraktionsgeschwindigkeit (V_{max})
y-Achse: prozentual in Abhängigkeit der maximalen isometrischen Kraft (F_{iso})

Anders sieht es bei exzentrischer Muskelarbeit aus, den Bewegungsphasen, in denen der Muskel sich verlängert, während er kontrahiert (Kasten »Kontraktionsformen der Muskulatur«, Seite 15). Hier nimmt die Muskelkraft zu, wenn man sich schneller bewegt. Grund ist, dass unsere Muskulatur infolge ihrer passiven Elemente (zum Beispiel Sehnen) und deren Eigenschaften durchaus in der Lage ist, deutlich mehr Kraft zu erzeugen, als aufgrund ihrer aktiven kontraktiven Elemente möglich wäre. Dieses Phänomen wurde bereits näher beschrieben und besitzt einen elementaren Einfluss auf die Kraft-Geschwindigkeit-Funktion. Arbeitet der Muskel exzentrisch, kann die Muskelkraft in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit die maximal isometrische Kraft um 50 bis 100 Prozent übertreffen.⁴² Typische Bewegungen, in denen derartige Effekte zum Tragen kommen, sind Landungen, abrupte Stopps, Bergabläufe sowie insbesondere das Laufen auf dem Vorderfuß. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit erreicht die realisierbare Kraft jedoch ihren Maximalwert. Das Kraftniveau kann dann bei steigender Geschwindigkeit zwar gehalten, jedoch nicht weiter gesteigert werden.

Überraschenderweise konnte eine derartige Überhöhung der maximal isometrischen Kraft nur für gut trainierte Personen nachgewiesen werden. Bei weniger oder untrainierten Personen steigt die

isometrische Kraft während exzentrischer Muskelarbeit bei höherer Bewegungsgeschwindigkeit nur gering an.⁴³ Erklärt werden kann dieser Unterschied zwischen den Gruppen durch Defizite in der Kraftfähigkeit der aktiven und kontraktiven Elemente des Muskels: Bei trainierten Personen ist der »aktive« Teil des Muskel-Sehnen-Komplexes in der Lage, sich zu versteifen, indem er schneller kontrahiert und so mehr Kraft erzeugt. Der Muskel-Sehnen-Komplex kann dann quasi statisch maximal isometrisch arbeiten, ohne seine Länge zu verändern. Dieser Muskelteil ist dann deutlich steifer als die Sehne, weshalb die Längenänderung fast ausschließlich über diese erfolgt. Da in einem solchen Fall nun die Sehne verlängert ist, wird Verformungsenergie in ihr gespeichert beziehungsweise durch sie abgegeben (vergleiche Kraft-Längen-Funktion, Seite 18). Bei untrainierten oder weniger trainierten Personen ist es dem aktiven Teil des Muskels nicht möglich, sich derart zu aktivieren. Die Sehne ist bei diesen Personen fast ausnahmslos steifer als die aktiven kontraktiven Elemente. Aus diesem Grund wird der Muskel vorrangig durch eine passive Verlängerung des aktiven Elements verlängert.

Trainierte Personen verletzen sich daher aufgrund der hohen Steifigkeit des aktiven Muskelements eher im Bereich der Sehne, während untrainierte oder weniger

trainierte Personen verstärkt Verletzungen des aktiven Muskelteils aufweisen.⁴⁴

Der dargestellte Zusammenhang der Kraft-Längen- und der Kraft-Geschwindigkeit-Funktion zeigt, dass Muskelkraft auf identischem Level sowohl durch konzentrische Muskelarbeit erzeugt werden kann als auch durch exzentrische Kraft. Hierbei überlagern sich passive Kräfte und der Muskel wird deutlich geringer aktiviert. Typischerweise gehen in sportlichen Situationen exzentrische Muskelbelastungen immer mit hohen Kräften einher, die ein hohes Risiko für Verletzungen bedeuten. Das gilt auch, wenn die exzentrische Muskelkraft nicht maximal ist, wie beispielsweise beim Bergablaufen. In solchen Fällen kann insbesondere bei untrainierten Personen Muskelkater auftreten. Muskelkater ist die Folge von Muskelzerstörung, sogenannten Mikrotraumen. Ein geringes Maß dieser »Zerstörung« ist ein erwünschter Effekt, der den Muskel entsprechend auf kommende Belastungen vorbereitet, indem dieser sich anpasst.^{45, 46}

Grundlagen mehrgelenkiger Muskulatur

Unser Körper verfügt über sogenannte eingelenkige Muskeln, die über ein Gelenk arbeiten, sowie zwei- oder mehrgelenkige Muskeln, die über zwei oder mehrere Gelenke arbeiten. Vor allem die zweigelenkigen Muskeln sind aufgrund ihres zum Teil sehr komplexen Verhaltens und eines er-

höhten Verletzungsrisikos von biomechanischem Interesse. Ihre Hauptwirkung entwickeln diese Muskeln in der sagittalen Bewegungsebene, also bei linearen Bewegungen gerade nach vorn oder hinten. Auf dieser Ebene sind die Hebelarme dieser Muskeln zum jeweiligen Gelenk anatomisch durchweg größer als im Vergleich zu anderen Dreh- und Bewegungsachsen. Zu den zweigelenkigen Muskeln der unteren Extremitäten zählen am Unterschenkel der zweiköpfige Wadenmuskel und am Oberschenkel unter anderem der gerade Muskel der vorderen Oberschenkelmuskulatur sowie die gesamte Hamstring-Muskulatur mit Ausnahme des kurzen, eingelenkigen Kopfs des *Musculus biceps femoris*.

Anatomisch betrachtet, ist die Funktion zweigelenkiger Muskeln ähnlich der der eingelenkigen Muskeln: Je nachdem, auf welcher Seite eines Gelenks sie angeordnet sind, tragen sie zur Beugung oder Streckung des jeweiligen Gelenks bei. Von daher ist es durchaus gerechtfertigt, dass man nach dem »Mehrwert« derartiger Muskeln fragt, wenn diese Aufgaben ebenso gut von eingelenkigen Muskeln realisiert werden könnten. Zweigelenkige Muskeln sind genauso wie unsere anderen Körperstrukturen im Rahmen eines Anpassungsprozesses über Jahrtausende entstanden. Von daher muss davon ausgegangen werden, dass sie einen elementaren Vorteil ausweisen, der ihre Existenz begründet. Betrachtet man die Anatomie des Kniege-