Biomechanische Besonderheiten der Hamstrings und Strategien zur Verletzungsprävention

Thomas Ertelt, Dirk Büsch, Thomas Gronwald

Verletzungen der ischiokruralen Muskulatur sind ein immer wiederkehrendes Thema im Sport. Sie sind schmerzhaft, häufig und bremsen die Karriere. Man kann daher nicht oft genug darüber schreiben, denn je mehr man darüber weiß, umso besser kann man damit umgehen – und das Risiko für solche Verletzungen vermindern.

Einleitung

Eine ausgeprägte und funktional arbeitende ischiokrurale Muskulatur, im Englischen auch Hamstrings genannt, ist eine der wichtigsten Komponenten für effektive Bewegungsabläufe des Stütz- und Bewegungssystems. Im sportlichen Kontext fördert sie die Stabilität des Kniegelenks und der Körpermitte und sorgt für eine funktionale Kraftübertragung der unteren Extremitäten auf den Rumpf und der daraus folgenden sportartspezifischen Bewegungsfertigkeit. Die Hamstrings sollten daher gezielt trainiert werden, um ihr leistungsbestimmendes Potenzial entfalten und um Verletzungen vermeiden zu können.

Verletzungen von Muskel- und Sehnenstrukturen, insbesondere der Hamstrings, gehören zu den häufigsten Verletzungen im Sport, bei denen kein äußerer Einfluss oder Kontakt beispielsweise mit einem Gegenspieler vorausgeht. Verletzungen dieser Muskelgruppe treten insbesondere in Sportarten mit hohen Laufgeschwindigkeiten und Richtungswechseln, vielen Sprüngen sowie schnell wechselnden Antritts- und Abstoppbewegungen wie beispielsweise im Fußball oder beim Tennis auf [62]. Auch leichtathletische Disziplinen und weitere Sportsportarten mit den genannten Anforderungen scheinen besonders risikobehaftet zu sein.

In einer Langzeitstudie konnte nachgewiesen werden, dass im europäischen Profifußball pro 1000 Stunden Belastung 8 Verletzungen in dieser Kategorie auftreten. Das entspricht pro Team und Saison etwa 50 Verletzungen [21]. Aktuell sind im sportlichen Kontext ohne Gegneinfluss Verletzungen der Hamstrings sogar die häufigste Verletzungsart [51]. In Abhängigkeit von der Sportart

und vom Anforderungsprofil betrifft das bis zu 25 Prozent der Verletzungen der unteren Extremitäten [20][36]. Etwa 83 Prozent der Hamstring-Verletzungen entfallen dabei auf den M. biceps femoris, ungefähr 11 Prozent auf den M. semimembranosus und ca. 5 Prozent auf den M. semitendinosus. Das Risiko einer erneuten Verletzung der Hamstrings nach einem Monat intensiver rehabilitativer Behandlung bewegt sich in Abhängigkeit von der Sportart zwischen 16 und 60 % [11][14][22][37], wobei das Wiederverletzungsrisiko für den M. biceps femoris am größten erscheint [23].

Der vorliegende Beitrag stellt funktionell-anatomische und biomechanische Besonderheiten der Hamstrings, insbesondere des häufig betroffenen M. biceps femoris sowie wesentliche Faktoren heraus, die zu Verletzungen der Hamstrings führen können. Abschließend werden praktische Handlungsempfehlungen für einen ganzheitlichen Ansatz zum Aufbau von Schutzfaktoren und zur Verletzungsreduktion gegeben, die in einem sportartspezifischen und anforderungsgerechten Training umgesetzt werden können.

Aufbau und wichtigste Funktionen der Hamstrings

Die Hamstrings sind eine Gruppe von 4 Muskeln auf der Rückseite des Oberschenkels. Sie bestehen aus dem langen Kopf des M. biceps femoris, dem M. semitendinosus und dem M. semimembranosus, sogenannten zweigelenkigen Muskeln, die über Knie- und Hüftgelenk ziehen, sowie dem kurzen Kopf des M. biceps femoris, der nur über das Kniegelenk zieht [39].

M. biceps femoris

Der M. biceps femoris ist ein zweiköpfiger Muskel und bildet den lateralen Anteil der Hamstrings. Der lange Kopf (Caput longum) entspringt am Sitzbein (Os ischii), konkret am Sitzbeinhöcker des Beckens (Tuber ischiadicum). Der kurze Kopf (Caput breve) entspringt an der knöchernen Leiste der Schenkelbeinrückseite (Labium laterale linea asperae), im distalen Drittel des Oberschenkelknochens (Femur) sowie am Septum intermusculare femoris laterale [41][46][61].

Bisher ging man davon aus, dass sich beide Muskelköpfe distal verbinden und ihren Ansatz lateral am Gelenkkopf des Wadenbeins (Caput fibulae) haben, wobei der kurze Kopf erst am distalen Ende als Verbindungsstück zum langen Kopf agiert. Tubbs et al. [56] konnten die Anatomie des M. biceps femoris um wichtige Aspekte erweitern und zeigten, dass die Ansatzsehne einen medialen sowie einen lateralen Teil mit jeweils einer Komponente anterior und posterior aufweist. Gleichzeitig wurde auch eine Verbindung zur Sehne des M. popliteus sowie zum Lig. arcuate poplitea festgestellt. Hieraus kann abgeleitet werden, dass ein synergetischer Effekt zwischen M. biceps femoris und M. popliteus existiert, der entscheidend zur Kniefunktion und -stabilität beiträgt. Weitere Untersuchungsergebnisse verweisen bezüglich des M. biceps femoris auf eine zusätzlich zu differenzierende Ansatzgeometrie, nach der dieser Muskel auch eine Ansatzfläche am Schienbein (Os tibia) aufweist [9]. Diese differenzierten Ansatzpunkte nehmen dabei nicht unerhebliche Flächen ein und sind daher nicht als punktuelle Ansätze anzusehen, was auch für die im Folgenden beschriebene Muskulatur gilt. Die neuen Erkenntnisse haben entscheidenden Einfluss auf das Verständnis über die Funktion und die Belastung der Muskulatur [28][29][30].

M. semitendinosus

Der M. semitendinosus entspringt am Tuber ischiadicum des Beckens und hat somit einen gemeinsamen Ursprung mit dem langen Kopf des M. biceps femoris [41][46]. Er gehört zum medialen Anteil der Hamstrings. Der Ansatz des M. semitendinosus befindet sich an der medialen Seite des Schienbeins (Pes anserinus superficialis). Der Muskel wird distal von einer großen Ansatzsehne umgeben [39][40].

M. semimembranosus

Der M. semimembranosus entspringt ebenfalls am Tuber ischiadicum des Beckens und liegt damit seitlich und oberhalb von der Ursprungsstelle (Sehne) des langen Kopfes des M. biceps femoris und des M. semitendinosus [39]. Er gehört ebenfalls zum medialen Anteil der Hamstrings. Die Ansätze des M. semimembranosus sind der innere Schienbeinknorrn (Condylus medialis tibiae), das schräge Kniekehlenband (Lig. popliteum obliquum) und die Faszie des Kniekehlenmuskels (M. popliteus). Der M. semimembranosus bildet damit den längsten Muskel der Hamstrings [39][41][46].

M. biceps femoris, M. semitendinosus und M. semimembranosus beugen im Kniegelenk und tragen bis auf den kurzen Kopf des M. biceps femoris zur Streckung im Hüftgelenk bei. Sie gelten dabei als Unterstützer beziehungsweise Synergisten für die Glutealmuskulatur. Bei gebeugtem Kniegelenk tragen M. semitendinosus und M. semimembranosus zudem zur Innenrotation im Kniegelenk und der M. biceps femoris zur Außenrotation bei. Der M. semitendinosus und M. semimembranosus können das Bein zusätzlich im Hüftgelenk bei gestreckter Hüfte nach innen rotieren, der M. biceps femoris trägt in dieser Konstellation gering zur Außenrotation bei. Der M. semitendinosus stabilisiert unter Belastung das Kniegelenk gegenüber einer X-Beinstellung (Valgus-Stress), der M. biceps femoris gegenüber einer O-Beinstellung (Varus-Stress). Der M. semimembranosus arbeitet gegen die Abduktion im Hüftgelenk sowie der Außenrotation im Kniegelenk. Der M. biceps femoris arbeitet gegen die Innenrotation im Kniegelenk. Insgesamt trägt die beschriebene Muskulatur damit zur Anspannung des hinteren Kreuzbandes (Ligamentum cruciatum posterius) und zur Entlastung des vorderen Kreuzbandes (Ligamentum cruciatum anterius) bei, da die Muskeln das Tibiaplateau gegenüber den Femurkondylen nach dorsal ziehen.

Biomechanik der Hamstring-Muskulatur als zweigelenkige Muskulatur

Der menschliche Körper verfügt neben eingelenkigen auch über zwei- und mehrgelenkige Muskeln. Aufgrund ihres zum Teil differenzierten Verhaltens und ihres höheren Verletzungsrisikos sind die zweigelenkigen Muskeln von besonderem biomechanischem Interesse. Ihre Hauptwirkung entwickeln diese Muskeln in der Sagittalebene, da die Hebelarme dieser Muskeln in dieser Ebene zum jeweiligen Gelenk durchweg größer sind als im Vergleich zu anderen Dreh- und Bewegungsachsen. Die gesamte Hamstring-Muskulatur bis auf den kurzen Kopf des M. biceps femoris zählt zu den zweigelenkigen Muskeln der unteren Extremitäten.

Anatomisch betrachtet ist die Funktion zweigelenkiger Muskeln ähnlich der eingelenkiger Muskeln: Je nachdem auf welcher Seite eines Gelenkes sie angeordnet sind, tragen sie zur Flexion oder Extension des jeweiligen Gelenkes bei. Betrachtet man die Anatomie des Kniegelenks und hier beispielsweise die Ansatzgeometrie des M. rectus femoris und des M. biceps femoris, so ist zu erkennen, dass der M. rectus femoris ein Kniestrecker und der M. biceps femoris ein Kniebeuger ist. Diese Betrachtung und Funktionszuweisung erscheinen auf den zweiten Blick allerdings nicht schlüssig, da die simultane Aktivierung dieser unterschiedlichen Muskeln in zahlreichen Bewegungen nachgewiesen werden konnte [17][26][52]. Von daher erscheint die Reduzierung zweigelenkiger Muskeln auf eine spezielle Gelenkfunktion nicht zweckmäßig bzw. funktional. Gleichzeitig konnten bei unterschiedlichen Individuen mitunter

völlig entgegengesetzte Funktionen der Muskeln bei gleichen Bewegungen beobachtet [26] sowie unterschiedliche Aktivierungsmuster aufgezeigt werden [60]. Es ist festzuhalten, dass viele Prozesse und Bewegungsmuster sowohl von der funktionellen Anatomie [9][19], der Muskelmechanik als auch von der neuronalen Ansteuerung her noch nicht eindeutig geklärt und verstanden sind [23][25].

„Zweigelenkige Muskeln sind Problemlöser.“

Zweigelenkige Muskeln müssen als Problemlöser verstanden werden, die in Ergänzung zu einem mit eingelenkigen Muskeln ausgestatteten System einen elementaren Vorteil bieten [4]. Eingelenkige Muskeln bewegen ausschließlich ein Gelenk. Ihre Kraftfähigkeit, die durch spezifische Muskeleigenschaften, wie z. B. die Kraft-Längen-Funktion bestimmt wird, kann direkt über die jeweilige Gelenkstellung ermittelt werden. Ein ausschließlich darauf basierendes System erfordert allerdings eine enorme Steuerungs- und Kontrollleistung des Gehirns, da die Muskeln weitestgehend unabhängig voneinander aktiviert und deaktiviert werden müssen. Gleichzeitig können Kräfte, die an einer Stelle erzeugt werden, nicht auf andere Gelenke übertragen werden. Zweigelenkige Muskeln sind demgegenüber in der Lage, Kräfte von unterschiedlichen Gelenken auf andere Gelenke zu übertragen. Sie können aufgrund ihrer passiven Eigenschaften ähnlich wie ein Seilzug agieren und zum Beispiel die im Hüft- und Kniegelenk erzeugten Kräfte auf das Sprunggelenk transferieren, ohne dabei selbst aktiv zu sein [3]. Folglich sind sie maßgeblich an der Maximierung einer sportmotorischen Leistung beteiligt. Ein „nachgeschalteter“ eingelenkiger Muskel muss demnach nicht maximal kontrahieren, sondern kann die Kraft, die von einem anderen Gelenk durch einen zweigelenkigen Muskel zur Verfügung gestellt wird, zu seiner Kraft addieren, um die Netto-Leistung zu erhöhen.

Wollen wir besonders hoch springen oder schnell und effektiv aus dem Sprint abstoppen, so übernehmen die zweigelenkigen Muskeln das „Feintuning“ der relevanten Muskulatur, um eine optimale Positionierung der Gelenke und Segmente sowie eine Maximierung der Leistung durch die Weiterleitung von Kräften zu ermöglichen [57]. Die Feinabstimmung des „Gesamtsystems“ wird auch dadurch unterstützt, dass einige zweigelenkige Muskeln über mehr als das Doppelte an Feedback-Sensorik verfügen als eingelenkige Muskeln [25]. Diese Rückmeldung betrifft auch die Kopplung zu anderen Muskeln und deren Informationsverarbeitung, wie im besonderen Fall des M. biceps femoris als Teil der Hamstrings zum M. popliteus [56].

Ein Rückgriff auf „viel Information“ gestaltet ein System gegenüber möglichen Störgrößen robuster, da Ausfälle oder Abweichungen durch andere Vergleichsgrößen kompensiert werden können. Ein derartiges System ist dennoch

einfacher zu steuern. Zahlreiche Studien aus dem Bereich der Trainings- und Bewegungswissenschaft zeigen zudem, dass eine hohe neuronale Adaptation infolge von sensorischem oder reaktivem Training nachgewiesen werden kann und in Bezug auf den M. biceps femoris vor allem Anpassungen im Aktivierungsmuster des Muskels bewirken, interessanterweise jedoch, ohne Auswirkungen auf die Gesamtbewegung (Kinematik) zu zeigen [35][42][49]. Gleichzeitig besitzen zweigelenkige Muskeln eine immanente und einzigartige Funktion, deren Wirkung und Umfang vielfach unterschätzt und in vielen Fällen nicht eindeutig verstanden ist [29]. Das sogenannte Lombardsche Paradoxon kann einerseits in Hinblick auf die Leistungsoptimierung als Segen bezeichnet werden und andererseits, unter dem Aspekt der Überlastung und Verletzungsanfälligkeit, auch als Fluch.

Lombardsches Paradoxon

Zweigelenkige Muskeln sind in der Lage, ihre Funktion umzukehren. Dieses Phänomen, welches zum ersten Mal von W. P. Lombard beschrieben und nach ihm benannt wurde [43], beschreibt die Funktionsumkehr eines solchen Muskels aufgrund bestimmter äußerer Faktoren. Wichtige Bedingungen sind hierbei, dass eine geschlossene kinematische Kette und ein spezifisches Hebelarmverhältnis des zweigelenkigen Muskels zu seinen beiden umspannten Gelenken existieren müssen. Vielfach wurde die geschlossene kinematische Kette im Wesentlichen auf eine Verspannung des Körpers in einem Gerät erklärt, wie z. B. in einem Ruderboot/Ruderergometer oder Fahrrad/Fahrradergometer. Hier können weder Hüfte (fixiert auf dem Sitz/Sattel) noch die Füße (fixiert auf dem Stemmbrett/Pedal) frei bewegt werden. Sie sind im Gegensatz zu einer freien Bewegung in einer „funktionellen Zwangssituation“.

In den 1990er Jahren wurde dieses Phänomen erstmals im Sprint, d. h. in einer „freien Bewegung“, nachgewiesen und anhand von Modellannahmen erklärt [59]. Hier kann als eine Kenngröße der Durchzug des gestreckten Beins am Ende der Kontaktphase im Sprinten genannt werden. Gleiches gilt für die letzte Kick-Bewegung im vertikalen Sprung. Die hierdurch erreichte „Push-Bewegung“ wird im Wesentlichen durch die Hamstrings verursacht. Das bedeutet, dass die letzte Kniestreckung maßgeblich durch die Kontraktion des M. biceps femoris und dessen Funktionsumkehr am Kniegelenk realisiert werden kann und nicht wie anzunehmen durch die Streckbewegung des M. quadriceps. Die geschlossene kinematische Kette wird hierbei durch die Trägheit des Oberkörpers und seine Geschwindigkeitsrichtung begründet.

Angesichts der zugrunde liegenden Modellannahmen und diverser anthropometrischer Befunde wurde dieser Effekt jedoch auf eine annähernd gestreckte Kniegelenkstellung bei gleichzeitiger Überstreckung der Hüfte begrenzt [16]. Dieser Effekt scheint auch in anderen Posi-

tionen mit deutlich größeren Gelenkwinkeln aufzutreten [29]. Hintergrund hierbei sind Studien zur Muskelgeometrie und hieraus resultierenden veränderten Aktivierungsmustern in spezifischen Belastungssituationen [9][28][29][30][56]. Ein nicht aktivierter Muskel kann, wie oben beschrieben, allein durch seine passiven Strukturen eine Gegenkraft infolge seiner Verlängerung aufbauen und von daher einen Beitrag zu einer Gelenkstreckung der „echten“ Streckmuskulatur leisten. Ausgewählte empirische Befunde zeigen, dass die bisherige neuronale Inaktivität oder Hemmung eines solchen Muskels in bestimmten Bewegungsphasen durch gezieltes Training umgangen werden kann. Die Folge ist, dass durch die Aktivierung eines solchen Muskels nun aktiv eine Funktionsumkehr provoziert wird, die nicht mehr nur einen kleinen „passiven“ Beitrag, sondern einen erheblichen aktiven Teil zur Streckung leisten kann [27][29]. Gerade aufgrund seiner anfänglich pliometrischen (exzentrischen) Belastung kann durch die Überlagerung von passiven und kontraktiven Kräften die ursprüngliche Beugemuskulatur eine Streckung des Gelenks mit verhältnismäßig wenig Kraftaufwand realisieren. Zusammenfassend lässt sich aus den vorgenannten Gründen eine Bewegungs- und Funktionsbeschreibung der Hamstrings nur sehr eingeschränkt auf der Ebene antagonistischer und agonistischer Muskulatur bzw. der Reduzierung auf Beugung und Streckung eines Gelenks erklären. In Abhängigkeit von einer Vielzahl an Einflussgrößen kann die beschriebene Funktionsumkehr jedoch auch zu einer Erhöhung der Verletzungsanfälligkeit führen.

Verletzungsmechanismen und Risikofaktoren

BEGRIFFSERKLÄRUNG

Die griechischen Präfixe „iso“ = gleich, „mio“ = kürzer und „plio“ = länger sind die korrekten Kennzeichnungen von Muskelaktionen bei der Kraftentfaltung der Skelettmuskulatur. Der zuerst in den USA aufgekommene Begriff „Plyometric“ bezog sich ursprünglich nur auf die Dehnung der aktiven Muskulatur. Da die Intensitätsstufen eines Reaktivkrafttrainings über den pliometrischen Anteil abgeleitet werden, hat sich entgegen der korrekten sprachlichen Verwendung Plyometrie als Synonym für den Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (DVZ) eingebürgert. Ein DVZ ist aber eine Kombination aus plio für „verlängernd/nachgebend“ und mio „verkürzend“. Vollständig und korrekt wären demnach nur DVZ- oder Reaktivkrafttraining, da sie beide Muskelaktionsformen enthalten.

Die meisten Muskelverletzungen treten infolge einer (maximalen) pliometrischen bzw. nachgebenden Muskelaktion auf, wenn der Muskel maximal kontrahiert und gleichzeitig über seine anatomisch-funktionelle Länge hinaus gedehnt

wird. Hamstring-Verletzungen sind zum Beispiel die Folge einer plötzlichen Hüftbeugung in Verbindung mit einer plötzlichen Kniestreckung. Zudem ist die späte Schwungphase beim Laufen, verbunden mit der Bodenkontaktphase, eine besonders kritische Bewegungsphase. In dieser Phase sind die Hamstrings, insbesondere der M. biceps femoris, maximal angespannt und gleichzeitig auf ihre maximale Länge gedehnt, um die Kniestreckung zu verlangsamen und der Hüftbeugung entgegenzuwirken [15][46][53][54]. Die meisten Verletzungen an der Oberschenkelrückseite entstehen bei maximalen Sprints und Beschleunigungen. Richtungswechsel oder Abbremsbewegungen, beispielsweise beim Landen nach vorhergehendem Absprung, können abhängig von der Stellung des Hüft- und Kniegelenks ebenso als risikobehaftete Bewegungsmuster eingestuft werden [11][15][53]. Dabei können Muskel-Sehnen-Verletzungen auf einem Kontinuum zwischen Muskelkrampf über die Muskelzerrung bis zum Muskelfaser(an)riss sowie Muskelfaserbündel(an)riss auftreten.

Es gibt eine Vielzahl von Risikofaktoren für das Auftreten von Hamstring-Verletzungen, die nur zum Teil evidenzgesichert sind [32][48]. Im Folgenden handelt es sich vorwiegend um Aspekte, die ohne Einfluss eines sportlichen Gegners oder Gegenspielers auftreten können und die sich in personenbezogene sowie umwelt- bzw. sportartbezogene Risikofaktoren differenzieren lassen. Für eine ausführliche Beschreibung der benannten Risikofaktoren wird auf den praxisorientierten Ratgeber von Gronwald und Ertelt [34] verwiesen.

Wesentliche personenbezogene Risikofaktoren

- Alter: kalendarisches und biologisches Lebensalter sowie das Trainingsalter
- Geschlecht
- Körperbau und Körperzusammensetzung: Körperhöhe, Körpermasse, Relation zwischen fettfreier Masse und Fettmasse
- Verletzungshistorie
- Rumpfinstabilität und mangelhafte neuromuskuläre Bewegungskontrolle: Stellung des Beckens
- geringe Dehnfähigkeit der Hüftbeuger, zum Beispiel des Lenden-Darmbein-Muskels (M. iliopsoas)
- Kraftverhältnis zwischen der hinteren und der vorderen Oberschenkelmuskulatur
- schwache Gesäßmuskulatur
- geringe Dehnfähigkeit und Muskelfasienlänge der Hamstrings, besonders des M. biceps femoris
- geringe pliometrische Muskelkraft und Belastbarkeit des Muskel-Sehnen-Apparates der Hamstrings
- anatomische Besonderheiten der Hamstrings: Muskelansatzcharakteristik
- mangelhaftes sportartspezifisches Technik- und Koordinationsniveau
- Ermüdung: hochintensive Belastungen bei Vorermdung

- psychologische Faktoren: Motivation, Risikobewusstsein etc.

Umwelt- und sportartbezogene Risikofaktoren

- klimatische Bedingungen: niedrige Umgebungstemperatur, Regen oder Schnee
- Sportartspezifika: Boden- bzw. Rasenbeschaffenheit, Regeln und Ähnliches
- Equipment: Art und Eigenschaften der Schuhe
- sportartspezifische Anforderungen: häufige hohe Beschleunigungsbelastungen, Maximalsprints sowie Abbrems- und Stoppmanöver (zum Beispiel Ausfallschritte) aufgrund der Leistungsstruktur der Sportart (schnellkräftige pliometrische Belastungen)
- Position im Mannschaftssport und sich daraus ergebende Belastungen und Anforderungen: zum Beispiel als Innenverteidiger, Flügelspieler oder Stürmer im Fußball
- Gegenspieler-/Gegnerverhalten
- Überlastung durch eine zu schnelle Steigerung hochintensiver Trainingsinhalte: Maximalsprints, Sprünge etc.
- unspezifische Bewegungsvorbereitung
- fehlende Compliance und Kontinuität bei der Einführung und Umsetzung von Verletzungspräventionsprogrammen

Am Beispiel Fußball können wesentliche evidenzgesicherte Risikofaktoren exemplarisch dargestellt werden. In einer sportartspezifischen Analyse von Timmins et al. [55] und Bourne et al. [7] konnte gezeigt werden, dass Fußballspieler mit einer geringeren Muskelfasziolenge des langen Kopfes des M. biceps femoris und einer geringeren pliometrischen Kraft mehr als viermal verletzungsanfälliger waren als Spieler mit längeren Muskelfasziolen und größerer pliometrischer Kraft. Zuvor erlittene Verletzungen können zu Veränderungen des Muskel-Sehnen-Überganges (z. B. Narbengewebe) führen. Nach einer Hamstring-Verletzung ist der Muskel des betroffenen Beins deutlich verkürzt und das zu bewegendende Gelenk ist in seiner Bewegungsreichweite zumindest temporär eingeschränkt. Auch die Muskelfasziolenge des M. biceps femoris ist in diesen Fällen verringert [55]. Die Gefahr einer Verletzung ergibt sich dann daraus, dass die Muskelspannung schnell ihr Maximum erreicht und damit der Muskel-Sehnen-Übergang stärker belastet wird [32]. Eine geringe pliometrische Muskelkraft und Belastbarkeit des Muskel-Sehnen-Apparats führen ebenso zu einem erhöhten Verletzungsrisiko der Hamstrings. Viele Trainingsprogramme konzentrieren sich ausschließlich darauf, die pliometrische (konzentrische) Kraft der Hamstrings zu trainieren, ohne dabei die pliometrische Kraftentwicklung zu berücksichtigen, die aber für eine sportartspezifische Belastbarkeit essenziell und mit einem erheblichen Risiko assoziiert ist [13]. Während die pliometrische Arbeitsweise für die Kräfteerzeugung wichtig ist, ist die pliometrische entscheidend, um

Energie zu absorbieren. Die meisten Muskel- und Sehnenverletzungen, die ohne Kontakt mit einem Gegenspieler oder Hindernis auftreten, ereignen sich während der pliometrischen Phase einer Muskelaktion, wenn der Muskel-Sehnen-Apparat nur vermindert belastbar ist. Beim Sprinten und Springen werden die Hamstrings extrem pliometrisch beansprucht, um das Kniegelenk und das Becken zu stabilisieren. Zusammen mit einer verringerten Muskelfasziolenge korrespondiert eine verminderte pliometrische Muskelkraft der Hamstrings (verbunden auch mit einer spezifischen Verletzungshistorie) mit einem erheblichen Verletzungsrisiko [7][55].

Die bisher am häufigsten verwendete pliometrische Übung im Bereich der Sportspiele ist die Nordic Hamstring Exercise (NHE). Trainingsprogramme mit der NHE (► **Abb. 1**) zeigen, dass durch deren Einsatz die Verletzungshäufigkeit von neuen und wiederkehrenden Hamstring-Verletzungen im Fußball erheblich verringert werden konnte [1][2]. Nach nur 10 Tagen pliometrischem Training der Hamstrings wurde sogar eine Verschiebung des maximalen Drehmoments in Richtung größerer Muskellängen festgestellt, was wiederum als protektiv gegenüber Verletzungen eingeordnet werden kann [10][13]. Folglich führt ein Training mit dem Fokus auf der pliometrischen Arbeitsweise der Hamstring-Muskulatur neben der Steigerung der pliometrischen Kraft auch zu einer Verlängerung der Muskelfasziolen [7].

Allerdings ist dabei auch zu beachten, dass eine Schwäche der Gesäßmuskulatur, als primäre Streckmuskulatur der Hüfte, häufig zu einer Überlastung der Hamstrings in Bezug auf deren extensorische Funktion im Hüftgelenk führt. Da die Gesäßmuskulatur (M. gluteus maximus et medius) bei dieser Übung zusätzlich die Beckenstellung unter Belastung stabilisiert, muss bei deren Schwäche oder Hemmung die Hamstring-Muskulatur einspringen und die Hüftstreckung dominant ausführen. Dieses veränderte Kräfteverhältnis erhöht die pliometrische Beanspruchung der Hamstrings bei der Hüftstreckung erheblich, sodass diese bei hohen Belastungen extrem anfällig für Verletzungen werden [12]. Zusammenfassend ergibt sich aus den thematisierten Risikofaktoren wiederum, dass eine isolierte Betrachtung einzelner Muskeln oder Muskelgruppen nicht sinnvoll erscheint, sondern in spezifischen Trainingsprogrammen zur Verletzungsprävention ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt werden sollte.

Funktionales und vielseitiges Training zur Reduktion von Hamstring-Verletzungen

Trotz der verstärkten Implementierung von Verletzungspräventionsprogrammen in den letzten Jahren, vor allem in den Sportspielen, blieb die Anzahl der Hamstring-Verletzungen im Wettkampf konstant und stieg im Training leider an [24]. Im Training sollte daher in Abhängigkeit

► **Abb. 1** Nordic Hamstring Exercise (aus [34]): Isolationsübung mit pliometrischem Fokus auf den Hamstrings. (Quelle: Harry Schnitger Fotografie, Berlin; mit freundlicher Genehmigung des riva Verlags)

von den Sportartanforderungen und dem Leistungsziel verstärkt auf die beschriebenen Verletzungsmechanismen und Risikofaktoren eingegangen werden. Durch die Implementierung von funktionalem Krafttraining sollte gezielt Kraft für die sportartspezifischen Anforderungen und die Funktion der Hamstrings aufgebaut werden. Ideal ist eine individuelle Kombination aus hüft- und kniedominanten Übungen sowie Übungen, die die Muskulatur sowohl miometrisch als auch pliometrisch beanspruchen. Eine vermehrte pliometrische Belastung der Hamstrings beeinflusst vor allem die Muskelfaserlänge positiv [8]. Grundsätzlich gilt, dass sich die Muskelkraft den spezifischen Anforderungen im Training und Alltag anpasst, gemäß der Trainingsweisheit: „Use it or lose it!“ Durch ein vermehrt pliometrisches Training kann auch die pliometrische Kraft im Vergleich zur miometrischen Kraft gesteigert werden und umgekehrt [58]. Pliometrisches Training

► **Abb. 2** Split Squat (aus [34]): Kniedominante Komplexübung mit erhöhter Beanspruchung der Hüftstreckmuskulatur (primär im M. gluteus medius). (Quelle: Harry Schnitger Fotografie, Berlin; mit freundlicher Genehmigung des riva Verlags)

hat zudem positive Effekte auf die Sehnensteifigkeit und weitere leistungsbestimmende Faktoren [18]. Besonders Hüftstreckerübungen sind vorteilhaft für die funktionelle Kraft der gesamten Hamstrings ► **Abb. 2**.

Kräftigt man die gemeinsam arbeitende Hüftstreckmuskulatur im Gesäß, werden die Hamstrings entlastet. Bei der Übungsauswahl sollte darauf geachtet werden, Übungen zu wählen, die die medialen Anteile der Hamstrings mehr beanspruchen, zum Beispiel Kettlebell Swings und Deadlifts [44][47][63], sowie auch Übungen zu berücksichtigen, die die lateralen Anteile stärker fordern, z. B. Beinbeuge-Varianten, Hip-Extensions oder Lungen [31][38][44][63]. Das muskuläre Gesamtvolumen der medialen Anteile der Hamstrings ist größer als das der lateralen Anteile. Entsprechend sind die seitlichen Anteile mit einem höheren Verletzungsrisiko assoziiert, das sich auch in der Verletzungstatistik widerspiegelt. Demgegenüber werden die medialen Anteile der Hamstrings bei hohen Belastungen, wie maximalen Sprints, stärker aktiviert. Infolgedessen sollten verschiedene Übungen im Training berücksichtigt werden, um die medialen und lateralen Anteile bestmöglich zu entwickeln und somit auf hochintensive Belastungen wie z. B. Sprints vorzubereiten. Aus diesem Grund erscheint es ebenfalls notwendig, die Hamstrings mit unterschiedlichen Belastungsreizen und Durchführungsgeschwindigkeiten zu trainieren.

Die im Krafttraining absolvierten Übungen zur Steigerung der pliometrischen Kraft der Hamstrings werden jedoch vorwiegend langsamer ausgeführt als die entsprechenden Bewegungen in der eigentlichen Sportart, für die trainiert wird. Daher wird empfohlen, auch reaktive Übungen in unterschiedlichen Bewegungsebenen, in der Sagittal- und Frontalebene, sowie Sprints mit maximaler Geschwindigkeit in das Trainingsprogramm zu integrieren [45]. Reaktives Krafttraining führt im Vergleich zum klassischen Krafttraining zu anderen Adaptationen [6]. Reaktive Übungen begünstigen eine Verlängerung der Sehnen, insbesondere isometrisches Krafttraining hingegen fördert einen Anstieg der Sehnenfestigkeit [5]. Je geringer die pliometrische Kraft der Hamstrings, desto verletzungsanfälliger sind sie. Auch bei der Hüftstreckung sind die Hamstrings häufig überlastet, wenn die Gesäßmuskulatur pliometrisch arbeiten muss, jedoch zu schwach ausgebildet ist.

Ein funktionelles Krafttraining für die hintere Muskelkette, welches beide Aspekte aufgreift, beugt dementsprechend wirksam Verletzungen vor. Dabei sollten bilaterale Übungen (z. B. Squat oder Deadlift), sobald diese stabil und korrekt ausgeführt werden können, durch unilaterale Übungen (vermehrte Belastung auf einem Bein) ergänzt werden (z. B. Split Squat, siehe ► **Abb. 2** oder Single Leg Deadlift), um noch spezifischer die Anforderungen in der Sportart zu berücksichtigen: Nur wenige Sportarten werden im Parallelstand ausgeführt; Laufen besteht beispielsweise immer aus einer einbeinigen Stützphase, was auch im Training zu berücksichtigen ist. Entsprechend wird auch ein Athlet auf hohem Leistungsniveau durch eingeschränkte Freiheitsgrade in der Bewegungsausführung, z. B. in der Beinpresse oder -beuge in sitzender Position, keine zusätzliche Steigerung seiner funktionellen Leistung zum Aufbau von spezifischen Schutzfaktoren vor Verletzungen erreichen können.

Zusammenfassend kann nur ein ganzheitlicher Ansatz zur Reduzierung von Hamstring-Verletzungen empfohlen werden [50]. Ein ganzheitliches Trainingsprogramm, das die Muskulatur auf vielfältige Art fordert und sowohl präventiv als auch leistungssteigernd wirkt, sollte folgende Trainingsinhalte berücksichtigen [33][34]:

- Mobilisation und Aktivierung der Hüftmuskulatur
- Rumpfstabilisation: Anti-Rotation, Anti-Extension, Anti-Flexion
- pliometrisches, pliometrisches und isometrisches Krafttraining
- bilaterale und unilaterale Übungen für die unteren Extremitäten
- hüft- und kniedominante sowie integrative Übungen: Isolations- und Komplexübungen
- explosive Kraftentwicklung: maximale Sprints, reaktive Trainingsmethoden und -inhalte
- Techniktraining und Beinachsenstabilität: Sprintmechanik, Mechanik des Springens, Landens und Abfederns

- sportartspezifische Anforderungen im Rahmen von Richtungsänderungen: beschleunigen, abbremsen und wieder beschleunigen

TAKE HOME MESSAGE

Trainingsprogramme, die Hamstring-Verletzungen vorbeugen sollen, können vielfältig gestaltet und implementiert werden. Für den Leistungs-, Freizeit- und Breitensport ist ein ganzheitlicher Ansatz zu empfehlen, um Hamstring-Verletzungen zu reduzieren. Das ganzheitliche Vorgehen wird durch zahlreiche Studienergebnisse unterstützt. Ein ausführlicher Ansatz wird in einem aktuellen praxisgeleiteten Ratgeber für Übungsleiter und Trainer präsentiert [34]. Die Studienlage kann die Wirksamkeit solcher Programme hinsichtlich der Reduktion von Verletzungen eindeutig nachweisen, sodass letztendlich die Compliance und Kontinuität bei der Implementierung von solchen Präventionsprogrammen den entscheidenden Schutzfaktor für die Verletzungsreduktion darstellen.

Autorinnen/Autoren

Thomas Ertelt

Prof. Dr. Thomas Ertelt ist Biomechaniker und Professor für Bewegungswissenschaft und Biomechanik. Er war kommissarischer Leiter des Lehrstuhls für Sport und Bewegung an der Carl von Ossietzky Universität in Oldenburg und hatte eine Professur für Biomechanik und

Bewegungswissenschaft an der Deutschen Hochschule für Gesundheit und Sport in Berlin inne. Als ehemaliger Leichtathlet hat er sich schon früh dem Extremsport verschrieben und ist Pionier in Sachen Extremhindernislauf. Er ist Gründungsmitglied des erfolgreichsten Extremhindernislaufvereins Europas, des Getting Tough e. V., sowie des gleichnamigen Rennveranstalters. Er ist Co-Founder und Geschäftsführer der Senmotion GmbH aus Berlin, die sich u. a. im Digital-Health-Bereich mit einem AI-basierten Ansatz zur Prävention und Therapie von Verletzungen und Schäden des Stütz- und Bewegungsapparates im klinischen und sportlichen Setting auseinandersetzt.

Dirk Büsch

Prof. Dr. Dirk Büsch leitet als Professor für Sportwissenschaft den Arbeitsbereich Sport und Training am Institut für Sportwissenschaft der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Seine Forschungs- und Lehrinteressen liegen in der Trainings- und Bewegungswissenschaft, z. B. Sportspiele, Talent, Kraft, Fitness, Transfer, sowie in der Forschungsmethodologie und Diagnostik. Er ist u. a. Sprecher der Kommission Sportspiele in der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft (dvs), Koordinator Netzwerk Wissenschaft des Deutschen Handballbundes (DHB) und Mitglied der Potenzialanalysekommission (PotAS).

Thomas Gronwald

Prof. Dr. Thomas Gronwald ist Trainingswissenschaftler mit dem Schwerpunkt Belastungs- und Beanspruchungssteuerung im Department Performance, Neuroscience, Therapy and Health an der MSH Medical School in Hamburg. Im Speziellen beschäftigt

er sich mit Auswirkungen von Ermüdungsprozessen auf das autonome und zentrale Nervensystem und daraus folgend mit Neuroenhancement- und Verletzungspräventionsstrategien im sportlichen Training. Er ist Co-Founder und Director of Exercise and Training Prescription der Senmotion GmbH.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. phil. Thomas Gronwald, MBA HCM

MSH Medical School Hamburg
University of Applied Sciences and Medical University
Faculty of Health Sciences
Department of Performance, Neuroscience,
Therapy and Health
Am Kaiserkai 1
20457 Hamburg
Deutschland
E-Mail: thomas.gronwald@medschool-hamburg.de

VERLOSUNG

Wir verlosen 3 Exemplare des Buches „Starke und gesunde Hamstrings“ von Thomas Gronwald und Thomas Ertelt, die uns der riva Verlag München freundlich zur Verfügung gestellt hat. Schreiben Sie bis zum 18.12.2020 eine Mail an Sportphysio@thieme.de. Viel Glück!

Literatur

- [1] Al Attar WS, Soomro N, Sinclair PJ et al. Effect of injury prevention programs that include the Nordic Hamstring Exercise on hamstring injury rates in soccer players: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 2017; 47: 907–916
- [2] Arnason A, Andersen TE, Holme I et al. Prevention of hamstring strains in elite soccer: An intervention study. *Scand J Med Sci Sports* 2008; 18: 40–48
- [3] Bobbert MF, van Ingen Schenau GJ. Coordination in vertical jumping. *J Biomech* 1988; 21: 249–262
- [4] Bobbert MF, van Soest AJ. Two-joint muscles offer the solution, but what was the problem? *Motor Control* 2000; 4: 48–52
- [5] Bohm S, Mersmann F, Arampatzis A. Human tendon adaptation in response to mechanical loading: A systematic review and meta-analysis of exercise intervention studies on healthy adults. *Sports Med Open*; 7: epub.
- [6] Booth MA, Orr R. Effects of plyometric training on sports performance. *Strength & Cond J* 2016; 38: 30–37
- [7] Bourne MN, Timmins RG, Opar DA et al. An evidence-based framework for strengthening exercises to prevent hamstring injury. *Sports Med* 2018; 48: 251–267
- [8] Bourne MN, Williams MD, Opar DA et al. Impact of exercise selection on hamstring muscle activation. *Brit J Sports Med* 2016; 51: 1021–1028
- [9] Branch EA, Anz AW. Distal insertions of the biceps femoris: A quantitative analysis. *Orthop J Sports Med* 2015; 3: 2325967115602255
- [10] Brockett CL, Morgan DL, Proske U. Human hamstring muscles adapt to eccentric exercise by changing optimum length. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 783–790
- [11] Brooks JH, Fuller CW, Kemp SP et al. Incidence, risk, and prevention of hamstring muscle injuries in professional rugby union. *Am J Sports Med* 2006; 34: 1297–1306
- [12] Brughelli M, Cronin J. Preventing hamstring injuries in sport. *Strength & Cond J* 2008; 30: 55–64
- [13] Brughelli M, Nosaka K, Cronin J. Application of eccentric exercise on an Australian Rules football player with recurrent hamstring injuries. *Phys Ther Sport* 2009; 10: 75–80
- [14] Brukner P. Hamstring injuries: Prevention and treatment – an update. *Brit J Sports Med* 2015; 49: 1241–1244
- [15] Chumanov ES, Schache AG, Heiderscheit BC et al. Hamstrings are most susceptible to injury during the late swing phase of sprinting. *Brit J Sports Med* 2012; 46: 90
- [16] Delp SL, Loan JP, Hoy MG et al. An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures. *IEEE Trans Biomed Eng* 1990; 37: 757–767
- [17] Doorenbosch CA, Harlaar J, Roebroeck ME et al. Two strategies of transferring from sit-to-stand; the activation of monoarticular and biarticular muscles. *J Biomech* 1994; 27: 1299–1307
- [18] Douglas J, Pearson S, Ross A et al. Chronic adaptations to eccentric training: A systematic review. *Sports Med* 2017; 47: 917–941
- [19] Duda GN, Brand D, Freitag S et al. Variability of femoral muscle attachments. *J Biomech* 1996; 29: 1185–1190
- [20] Eirale C, Ekstrand J. Hamstrings are dangerous for sport and sport is dangerous for hamstrings. *ASPETAR 2013 (targeted topic – hamstring injuries)*: 7
- [21] Ekstrand J, Häggglund M, Walden M. Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *Am J Sports Med* 2011; 39: 1226–1232
- [22] Ekstrand J, Häggglund M, Walden M. Injury incidence and injury patterns in professional football: The UEFA injury study. *Brit J Sports Med* 2011; 45: 553–558
- [23] Ekstrand J, Healy JC, Walden M et al. Hamstring muscle injuries in professional football: The correlation of MRI findings with return to play. *Brit J Sports Med* 2012; 46: 112–117
- [24] Ekstrand J, Walden M, Häggglund M. Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001: A 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *Brit J Sports Med* 2016; 50: 731–737
- [25] English AW, Weeks OI. An anatomical and functional analysis of cat biceps femoris and semitendinosus muscles. *J Morphol* 1987; 191: 161–175
- [26] Ertelt T, Blickhan R. Group specific behaviour of bi-articular upper leg muscles exemplified by sledge hopping. *J Mech Med Biol* 2011; 11: 16
- [27] Ertelt T, Ertelt H-J, Blickhan R. The geometry-critical functional dependence of the M. gastrocnemius. *Int J Appl Mech* 2011; 3: 14

- [28] Ertelt T, Gronwald T. Hamstring injury risk factors in elite sports: The role of muscle geometry and function. *Acta Physiologica* 2019; 227: e13253
- [29] Ertelt T, Gronwald T. M. biceps femoris – A wolf in sheep's clothing: The downside of a lower limb injury prevention training. *Med Hypoth* 2017; 109: 119–125
- [30] Ertelt T, Gronwald T. The critical behavior of the M. biceps femoris for the risk of injury – A simulation study. *J Mech Med Biol* 2019; 19: 1950069
- [31] Fiebert IM, Spielholz NI, Applegate EB et al. Comparison of EMG activity of medial and lateral hamstrings during isometric contractions at various cuff weight loads. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2001; 8: 145–150
- [32] Freckleton G, Pizzari T. Risk factors for hamstring muscle strain injury in sport: A systematic review and meta-analysis. *Brit J Sports Med* 2013; 47: 351–358
- [33] Gronwald T, Büsch D, Ertelt T. Bevor es zwickt: Richtig kräftigen – Funktionelles Krafttraining der rückseitigen Oberschenkelmuskulatur zur Verletzungsreduktion im Fußball. *Fußballtraining* 2019; 37: 60–67
- [34] Gronwald T, Ertelt T. Starke und gesunde Hamstrings: Mehr Beinkraft, Beweglichkeit und weniger Verletzungen durch Training der ischiocruralen Muskulatur. München: riva Verlag; 2018
- [35] Gruber M, Bruhn S, Gollhofer A. Specific adaptations of neuromuscular control and knee joint stiffness following sensorimotor training. *Int J Sports Med* 2006; 27: 636–641
- [36] Häggglund M, Walden M, Ekstrand J. Injury incidence and distribution in elite football – A prospective study of the Danish and the Swedish top divisions. *Scand J Med Sci Sports* 2005; 15: 21–28
- [37] Häggglund M, Walden M, Ekstrand J. Risk factors for lower extremity muscle injury in professional soccer: The UEFA Injury Study. *Am J Sports Med* 2013; 41: 327–335
- [38] Jakobsen MD, Sundstrup E, Randers MB et al. The effect of strength training, recreational soccer and running exercise on stretch-shortening cycle muscle performance during counter-movement jumping. *Hum Mov Sci* 2012; 31: 970–986
- [39] Kaeding CC, Borchers JR. Hamstring and quadriceps Injuries in athletes a clinical guide. New York: Springer; 2014
- [40] Koulouris G, Connell D. Evaluation of the hamstring muscle complex following acute injury. *Skeletal Radiol* 2003; 32: 582–589
- [41] Koulouris G, Connell D. Hamstring muscle complex: An imaging review. *Radiographics* 2005; 25: 571–586
- [42] Kramer A, Ritzmann R, Gruber M et al. Four weeks of training in a sledge jump system improved the jump pattern to almost natural reactive jumps. *Eur J Appl Physiol* 2012; 112: 285–293
- [43] Lombard WP, Abbott FM. The mechanical effects produced by the contraction of individual muscles of the thigh of the frog. *Am J Physiol* 1907; 20: 60
- [44] Lynn SK, Costigan PA. Changes in the medial-lateral hamstring activation ratio with foot rotation during lower limb exercise. *J Electromyogr Kinesiol* 2009; 19: e197–205
- [45] Markovic G, Mikulic P. Neuro-musculoskeletal and performance adaptations to lower-extremity plyometric training. *Sports Med* 2010; 40: 859–895
- [46] Marovic P, Koulouris G. Imaging of the hamstring muscle complex in elite athletes. *ASPETAR* 2016; 5: 6
- [47] McAllister MJ, Hammond KG, Schilling BK et al. Muscle activation during various hamstring exercises. *J Strength & Cond Res* 2014; 28: 1573–1580
- [48] Mendiguchia J, Alentorn-Geli E, Brughelli M. Hamstring strain injuries: Are we heading in the right direction? *Brit J Sports Med* 2012; 46: 81–85
- [49] Nagano Y, Ida H, Akai M et al. Effects of jump and balance training on knee kinematics and electromyography of female basketball athletes during a single limb drop landing: Pre-post intervention study. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol* 2011; 3: 14
- [50] Oakley AJ, Jennings J, Bishop CJ. Holistic hamstring health: Not just the Nordic hamstring exercise. *Brit J Sports Med* 2018; 52: 816–817
- [51] Opar DA, Williams MD, Shield AJ. Hamstring strain injuries: Factors that lead to injury and re-injury. *Sports Med* 2012; 42: 209–226
- [52] Prilutsky BI, Gregor RJ, Ryan MM. Coordination of two-joint rectus femoris and hamstrings during the swing phase of human walking and running. *Exp Brain Res* 1998; 120: 479–486
- [53] Schache AG, Kim HJ, Morgan DL et al. Hamstring muscle forces prior to and immediately following an acute sprinting-related muscle strain injury. *Gait & Posture* 2010; 32: 136–140
- [54] Thelen DG, Chumanov ES, Hoerth DM et al. Hamstring muscle kinematics during treadmill sprinting. *Med Sci Sports Exerc* 2005; 37: 108–114
- [55] Timmins RG, Bourne MN, Shield AJ et al. Short biceps femoris fascicles and eccentric knee flexor weakness increase the risk of hamstring injury in elite football (soccer): A prospective cohort study. *Brit J Sports Med* 2015; 50: 11
- [56] Tubbs RS, Caycedo FJ, Oakes WJ et al. Descriptive anatomy of the insertion of the biceps femoris muscle. *Clin Anat* 2006; 19: 517–521
- [57] van Ingen Schenau GJ, Boots PJ, de Groot G et al. The constrained control of force and position in multi-joint movements. *Neurosci* 1992; 46: 197–207
- [58] Vikne H, Refsnes PE, Ekmark M et al. Muscular performance after concentric and eccentric exercise in trained men. *Med Sci Sports Exerc* 2006; 38: 1770–1781
- [59] Wiemann K. Präzisierung des Lombardschen Paradoxon in der Funktion der ischiocruralen Muskeln beim Sprint. *Sportwissenschaft* 1991; 21: 413–428
- [60] Winter DA, Yack HJ. EMG profiles during normal human walking: Stride-to-stride and inter-subject variability. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 1987; 67: 402–411
- [61] Woodley SJ, Storey RN. Review of hamstring anatomy. *ASPETAR* 2013 (targeted topic – hamstring injuries): 7
- [62] Woods C, Hawkins RD, Maltby S et al. The Football Association Medical Research Programme: An audit of injuries in professional football – analysis of hamstring injuries. *Brit J Sports Med* 2004; 38 (1): 36–41
- [63] Zebis MK, Skotte J, Andersen CH et al. Kettlebell swing targets semitendinosus and supine leg curl targets biceps femoris: An EMG study with rehabilitation implications. *Brit J Sports Med* 2013; 47: 1192–1198

Bibliografie

DOI <https://doi.org/10.1055/a-1247-9047>
 Sportphysio 2020; 8: 249–257
 © 2020. Thieme. All rights reserved.
 Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14,
 70469 Stuttgart, Germany
 ISSN 2196-5951