REVIEW/SPECIAL ISSUE
SPORTS Orthopaedics and Traumatology
Sports Orthop. Traumatol. **xx**, xx–xx (2020)
© Elsevier GmbH
www.SOTjournal.com
https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2020.04.002

Zusammenfassung

Muskelverletzungen zählen als typische „time-loss Verletzungen'' und sind regelhaft mit Einschränkungen der Spiel- bzw. Wettkampffähigkeit verbunden. Selbst milde Verletzungsformen führen zu erheblichen Einschränkungen der muskulären Kraftentfaltung und letztlich der Leistungsfähigkeit im Sport. Die Versorgung von Muskelverletzungen erfolgt üblicherweise konservativ. Das Ziel der vorliegenden Übersichtsarbeit ist es, ausgewählte Aspekte auf dem Gebiet der Muskelverletzungen unter Berücksichtigung der vorliegenden Publikationen zum GOTS-Expertenmeeting 2016 im zeitlichen Verlauf erneut zu beleuchten und im Kontext pathophysiologischer und muskelbiomechanischer Erkenntnisse zu diskutieren. Kernthemen dieser Übersichtsarbeit fokussieren sich auf die konservative Therapie mit den Schwerpunkten der Akutversorgung, der komplexen Zusammenhänge mit der exzentrischen Muskelarbeit sowie der aktuellen Überlegungen zu überlastungsbedingten Verletzungen.

Schlüsselwörter
Muskelverletzungen – konservative Therapie – Rehabilitation – PRICE – Exzentrik – DOMS

T. Hotfiel et al.

Nonoperative Treatment of Muscle Injuries: An Update from Pathophysiological and Clinical perspectives

Summary

Muscle injuries are denoted as „time-loss injuries'' and are commonly associated with reduced participance in training or competition. Although some injuries can be classified as mild types of muscle damage, injuries are associated with compromised muscle and sportive performances in a significant manner. Most of the injuries can be treated conservatively or nonoperatively. The aim of the present work was to provide an overview on the nonoperative treatment strategies in regard to the results of the GOTS

REVIEW/SPECIAL ISSUE

Ausgewählte klinische und physiologische Aspekte zur Behandlung von Muskelverletzungen – Update 2020

T. Hotfiel[a,b,c], C. Grim[a], R. Heiss[c,d], L. Weisskopf[c,e], W. Bloch[f], M. Engelhardt[a]
[a]Osnabrücker Zentrum für Muskuloskelettale Chirurgie (OZMC), Klinikum Osnabrück, Osnabrück, Deutschland
[b]Orthopädische Universitätsklinik im Malteser Waldkrankenhaus Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Deutschland
[c]GOTS Komitee Muskel und Sehne, Gesellschaft für Orthopädisch-Traumatologische Sportmedizin (GOTS)
[d]Radiologisches Institut, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen, Deutschland
[e]Altius Swiss Sportmed Center, Rheinfelden, Schweiz
[f]Institut für Kreislaufforschung und Sportmedizin, Deutsche Sporthochschule Köln, Köln, Deutschland

Eingegangen/submitted: 14.02.2020; akzeptiert/accepted: 02.04.2020
Online verfügbar seit/Available online: xxx

Hintergrund

Akute und überlastungsbedingte Verletzungen der Skelettmuskulatur zählen im Leistungs- und Breitensport zu den häufigsten Verletzungen. Je nach Sportart wird ihre Inzidenz mit 10-55% angegeben [1–4]. Insbesondere in Sportarten, die schnellkräftige Bewegungsmuster aufweisen, ist die Inzidenz besonders hoch (Spielsportarten, Leichtathletik). Muskelverletzungen werden als typische „time-loss Verletzungen" angesehen und sind regelhaft mit Einschränkungen der Spiel- bzw. Wettkampffähigkeit verbunden. Über die Verletzungsdauer hinausgehend ist bei Athleten eine zum Teil erhebliche Einschränkung der muskulären Kraftentfaltung und damit Leistungsfähigkeit zu verzeichnen. Neben der großen Inzidenz an Primärverletzungen ist die hohe Rezidivrate von Muskelverletzungen von großer epidemiologischer Bedeutung, da diese Verletzungen bekanntlich mit einer verlängerten Rehabilitationszeit und Ausfall des Sportlers verbunden sind [5]. Die Versorgung von Muskelverletzungen ist üblicherweise eine Domäne der konservativen Therapie. Die zur Verfügung stehenden Therapieverfahren haben das gemeinsame Ziel, eine dem Schweregrad der Verletzung angepasste, zeitnahe und sichere Wiedererlangung der Trainings- und Wettkampffähigkeit im Rahmen eines kontinuierlichen Rehabilitationsprozesses zu ermöglichen. In der Beurteilung und Anwendung der Therapieverfahren müssen die zum Teil diskrepanten

(German-Austrian-Swiss Society for Orthopaedic Traumatologic Sports Medicine) Expert Meeting of 2016 with the focus on muscle and tendon injuries. The review includes recent considerations emphasizing the initial and on-field treatment, muscle biomechanics and it's relation to ultrastructural muscle injuries.

Keywords
Muscle injuries – Muscle Strain – Rehabilitation – Treatment – PRICE – DOMS

Ergebnisse der wissenschaftlich evidenzbasierten Datenlage, die empirisch erfolgreich angewandten Verfahren in der Praxis und die Erkenntnisse der Grundlagenforschung differenziert betrachtet und einbezogen werden.

Im Jahr 2016 hat es sich die Gesellschaft für Orthopädisch-Traumatologische Sportmedizin (GOTS) zur Aufgabe gemacht, dass in der Sportorthopädie herausfordernde Themenfeld der Muskel- und Sehnenverletzungen auf dem im zweijährigen Rhythmus ausgetragenen GOTS Expertenmeeting abzuhandeln. Der Themenblock der konservativen Therapie wurde im gleichnamigen Kapitel ,,Konservative Therapie" [6] im traditionellen GOTS Expertenheft sowie in englischer Sprache im Journal of Experimental Orthopaedics unter dem Titel ,,Nonoperative Treatment of Muscle Injuries – Guidelines and Recommendations from the 2016 GOTS Expert Meeting" [7] publiziert. Das Ziel der vorliegenden Übersichtsarbeit ist es, ausgewählte Aspekte auf dem großen Gebiet der Muskelverletzungen unter Berücksichtigung der vorliegenden Publikationen im zeitlichen Verlauf erneut zu beleuchten und im Kontext pathophysiologischer und muskelbiomechanischer Erkenntnisse zu diskutieren.

Stellenwert der Initial- und Akuttherapie

Die Erstversorgung von Muskelverletzungen sollte bekanntermaßen unmittelbar und ohne zeitliche Verzögerung nach Auftreten der Verletzung erfolgen. Die Empfehlungen in der Literatur und die Ergebnisse des damaligen Meetings schreiben der Akuttherapie, die auch unter dem allgemeingültigen PRICE/PECH-Verfahren bekannt ist, eine große Bedeutung zu [7,8]. Dieses Kombinationsverfahren beinhaltet den Belastungsabbruch (**P**ause, **P**rotection, **R**est), die Anwendung von Kompression (**C**ompression), die Kühlung (**E**is, **I**ce) und die Hochlagerung (**H**ochlagerung, **E**levation). Bis heute sind viele weitere Akronyme wie ICE, RICE oder POLICE [9,10] beschrieben und seither häufig als Synonym verwendet worden (im weiteren Verlauf des Beitrags als ,,PRICE"). Das Verfahren gilt als 1. Wahl und sollte, abweichend vom üblichen Vorgehen, der gründlichen Anamneseerhebung, klinischen Untersuchung und bildgebenden Befunderhebung unter Aspekten des zeitlichen Ablaufs vorgezogen werden. Obwohl einheitlich Konsens über die Anwendung des PRICE-Schemas besteht [3,8,11–13], fehlen evidenzbasierte klinische Daten zur Effektivität dieser Maßnahme [7,14–18]. Dies betrifft nicht nur Muskelverletzungen, sondern akute traumatische Sportverletzungen im Allgemeinen. Auch in der heutigen Zeit liegen noch keine Studienergebnisse vor, die klinische Vorteile der im Alltag ca. 20-30 min. PRICE-Anwendung im Vergleich zu alternativen Verfahren oder auch im Vergleich zur Durchführung einer initialen Diagnostik, belegen. Das Muskelgewebe gehört, körperliche Aktivität vorausgesetzt, zu den am besten perfundierten Zellverbänden des Körpers. Wechselnde, miteinander konkurrierende Durchblutungsanforderungen im Körper bedingen die hohe Anpassungsfähigkeit der Muskulatur an unterschiedliche metabolische Anforderungen. Die Gesamtdurchblutung der Skelettmuskulatur ist auf ein Vielfaches des Ruheniveaus steigerbar, bei lokalen zyklischen Belastungen werden Spitzenflüsse von bis zu 50-60 ml/100 g Gewebe/min erreicht [19,20]. Ermöglicht wird diese Kapazität durch den Aufbau und Funktion der terminalen Strombahn. Die Muskulatur wird durch ein Netz von Arterien und Arteriolen

verschiedener Ordnung durchzogen. Gewöhnlich verläuft die terminale Arteriole senkrecht zur Muskellängsachse. In wiederum parallel verlaufender Richtung zur Muskelfaser speist eine terminale Arteriole etwa 15-20 Kapillaren, die über postkapilläre Venolen in eine terminale Venole münden (mikrovaskuläre Einheit) [20,21] (Abbildung 1). Durch den sympathisch-adrenerg vermittelten Ruhetonus (Arteriolen und vorgeschaltete Arterien von $> 100\ \mu m$) und dessen Reduktion zugunsten einer Vasodilatation im Zusammenspiel mit systemischen und lokalen (metabolischen) Mechanismen erklärt sich die enorme Perfusionskapazität [20–22]. Kommt es im Rahmen einer strukturellen Muskelverletzung zu Zerreißungen des Muskelparenchyms sind unweigerlich Verletzungen der empfindlichen terminalen Strombahn die Folge. Je nach Perfusionsaktivität zum Verletzungszeitpunkt und Ausmaß der Gefäßschädigung ist die Entstehung eines intramuskulären Hämatoms die Folge. Intramuskuläre Hämatome gilt es bekanntermaßen zu limitieren, um die physiologische

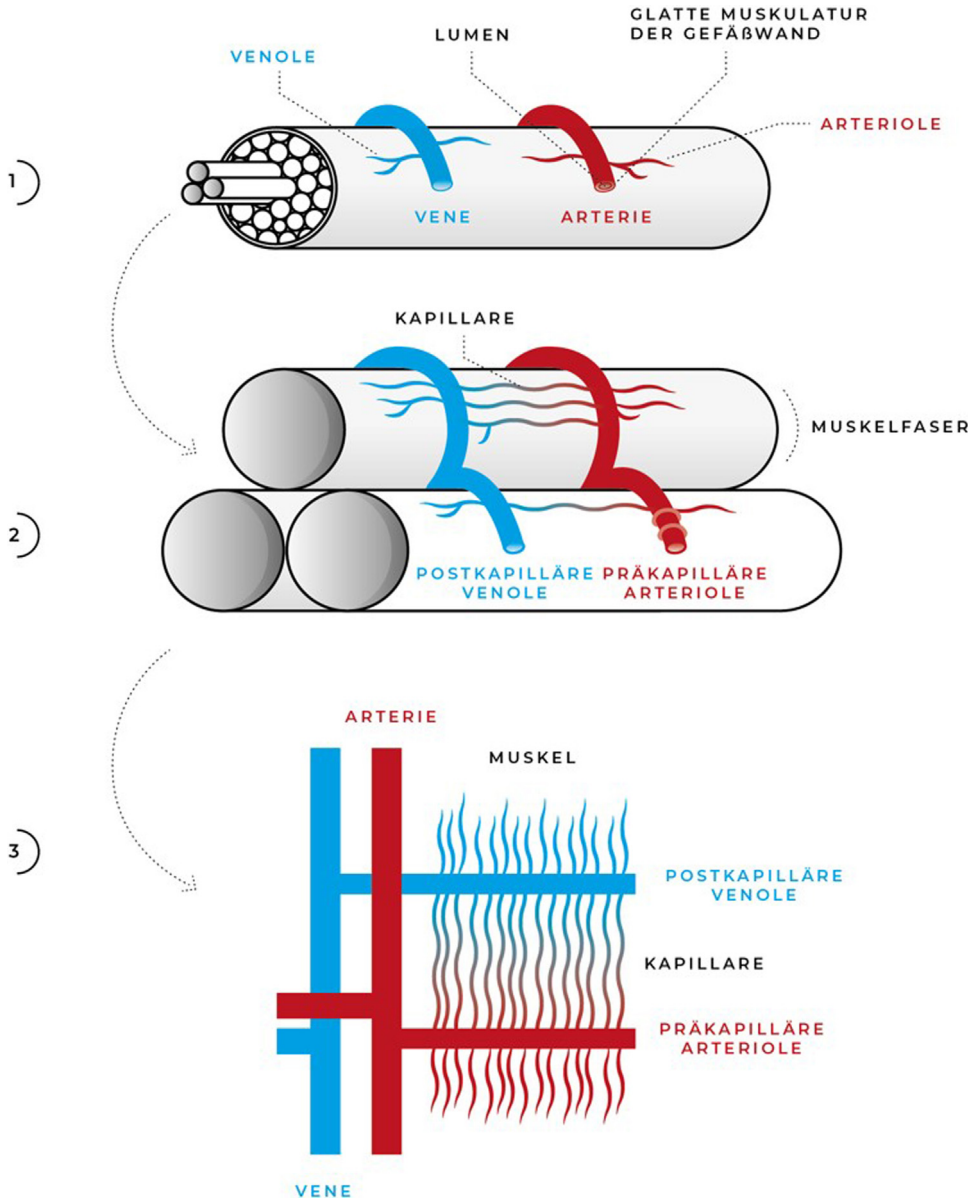

Abbildung 1
Aufbau und Architektur der gewebespezifischen terminalen Strombahn, modifiziert und angepasst nach [21]. Graphische Illustration: M. Weineck, Erlangen.

Entzündungsphase nicht über das physiologische Maß (48 h) hinaus zu triggern. Ein Hämatom mit einhergehenden Zelldebris muss bekanntlich zunächst von ortsständigen Zellpopulationen im Rahmen eines komplexen proinflammatorischen Prozesses resorbiert werden, bevor physiologische Reparationsmechanismen optimal ablaufen können [23,24]. Eine klinisch-experimentelle Studie ,,Clinical Practice meets Science: Wie beeinflusst eine PRICE-Therapie die intramuskuläre Gewebedurchblutung?" (Abstractbeitrag [25], Manuskript unter Begutachtung [26]) konnte 2019 erstmalig nachweisen, dass im sportspezifischen Setup eine PRICE-Intervention (hier Kompressionsklase II, $>$ 30 mmHg) zu einer signifikanten Reduktion des intramuskulären Blutflusses führt. Von diesem Effekt waren oberflächliche, genauso wie tiefe und knochennahe Gewebeschichten betroffen. Die verbreitete Annahme eines Rebound-Phänomens (reaktive Mehrdurchblutung) nach Beendigung einer PRICE-Intervention konnte für einen Zeitraum bis zu 60 min. nach Intervention widerlegt werden [25,26]. Das PRICE-Verfahren ist somit in der Lage, die intramuskuläre Perfusion auf Ebene der klinisch relevanten terminalen Strombahn anhaltend zu reduzieren und erklärt einen potentiellen Wirkungsmechanismus dieser Therapie. Nichtsdestotrotz sind zukünftige Studien notwendig, um die klinische Wirksamkeit unter Verletzungsbedingungen zu untersuchen.

,,Frieden und Liebe'' - Hat das PRICE-Schema etwa ausgedient?

Das jüngst im Jahr 2019 publizierte und Aufsehen erregende Akronym PEACE & LOVE zur Versorgung von Weichteilverletzungen [10] darf mit dem klassischen Erstversorgungsprinzip PRICE nicht verwechselt, oder gar als Synonym verwendet werden. Die Buchstaben der Begriffe vertreten weitere Therapiebausteine, die laut Autoren über den Zeitraum der Erstversorgung hinausgehend berücksichtigt werden sollten. Beispielsweise werden in diesem Zusammenhang auch Eckpfeiler der Aufklärung (E, Education), Belastungsfähigkeit (L, Load) oder Trainingstherapie (E, Exercise) beschrieben [10].

Management intramuskulärer Hämatome

Bei Vorliegen von strukturellen Verletzungen sind intramuskuläre Hämatome trotz erfolgter Initialtherapie nicht vollständig zu verhindern [27–29] (Abbildung 2). Prinzipiell besteht die Möglichkeit intramuskuläre Hämatome unter sterilen

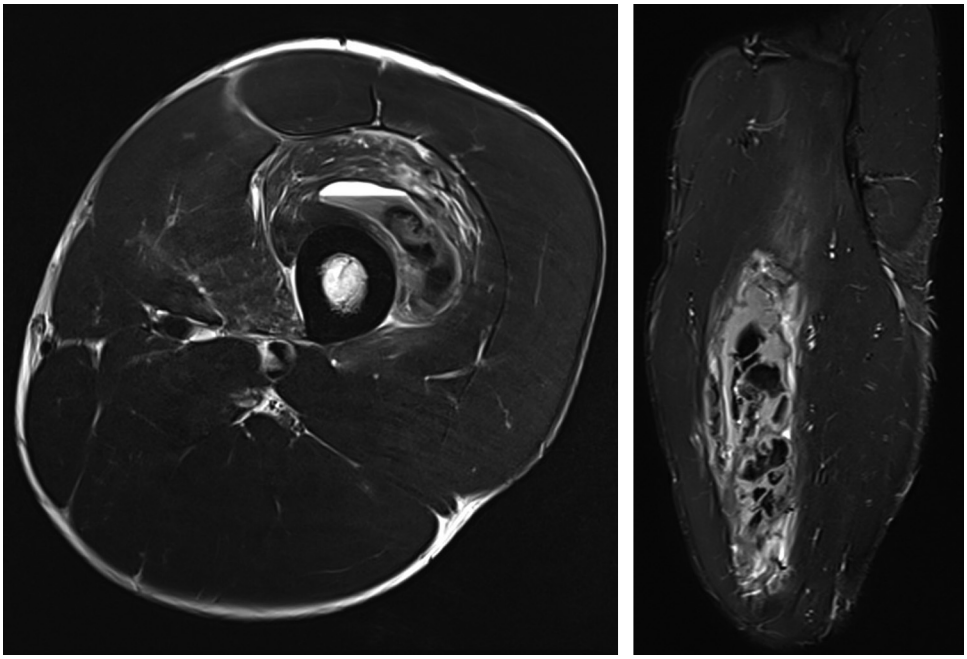

Abbildung 2
22-jähriger Fußballprofi mit Kontusionsverletzung des Oberschenkels (Anpralltrauma 14 Tage vor der abgebildeten 3T MRT Untersuchung). Es zeigt sich eine diffuse Gewebsverletzung des Musculus vastus intermedius links mit ausgedehntem, teils organisiertem, teils liquidem Hämatom.

Abbildung 3
Sterile Punktion eines intramuskulären Hämatoms bei struktureller Muskelverletzung Typ IIIa des M. gastrocnemius medialis.

Bedingungen zu punktieren (Abbildung 3). Die Indikation hängt von der Lokalisation, aber auch der Beschaffenheit eines Hämatoms ab. Insbesondere knochennahe Hämatome tendieren eher zur Genese einer Myositis ossificans und sind deswegen forcierter zu entlasten. Zur Beurteilung intramuskulärer Raumforderungen bzw. Hämatome hat sich die Sonographie als wertvolles bildgebendes Mittel bewährt, mithilfe dieser die Punktion sonographieunterstützt oder -gesteuert (simultane Positionskontrolle der Punktionskanüle) durchgeführt werden kann [30–32]. Die Punktion sollte zeitnah nach Demaskierung eines Hämatoms erfolgen, da mit zeitlichem Fortschritt mit der Ausprägung von Koageln oder einer Suffusion zu rechnen ist, die eine Punktion erheblich erschweren – wenn nicht sogar unmöglich machen. Im weiteren Verlauf kann bei Formierung eines (Hämato-)Seroms mit der Punktion zumindest fluider Anteile gerechnet werden (klinische Erfahrung der Autoren). Einige Behandler wenden zur Hämatomentlastung struktureller Verletzungen endoskopische Techniken an. Publizierte technische Vorgehensweisen oder klinische Ergebnisse liegen unseres Wissens hierzu allerdings nicht vor. Von der minimalinvasiven Vorgehensweise zur Hämatomentlastung ist die Fasziotomie zur Hämatomentfernung prinzipiell abzugrenzen. Bei Kontusionsverletzungen können aufgrund der diffusen und potentiell großen Gewebeschädigung erhebliche Einblutungen mit teils massiven ödematösen Schwellungen die Folge sein. Sofern ein (manifestes) Kompartmentsyndrom vorliegt, ist die Indikation zur notfallmäßigen Fasziotomie großzügig indiziert. Dabei geht es nicht um die Optimierung der Muskelheilung, sondern schlichtweg um den Erhalt der Extremität.

Bedeutung der Muskelbiomechanik für die Entstehung, Prävention und Therapie von Muskelverletzungen

Um Verletzungen der Muskulatur verstehen zu können, ist die Betrachtung der Physiologie und Muskelbiomechanik notwendig. Die Muskelfaser entspricht terminologisch der Muskelzelle, die eine Vielzahl randständiger Zellkerne enthält. Diese Besonderheit einer Muskelzelle beruht auf dem Zusammenschluss mehrerer Vorläuferzellen (Myoblasten) zu einer Muskelzelle [24]. Die Muskulatur verfügt über Satellitenzellen, die während der Embryonalzeit, am Sarkolemn anliegend, als differenzierungsfähige myogene Vorläuferzellen hinterlegt werden [33]. Satellitenzellen werden neben der elementaren regenerotischen Kapazität (u.a. Differenzierung zu Myoblasten und Myotuben und Bildung neuer Zellkerne im Verletzungsfall) vielfältige Funktionen zugesprochen.
Nach neueren Erkenntnissen sind Satellitenzellen z.B. auch elementar an der Differenzierung der extrazellulären Matrix bei Verletzungen, aber auch bei physiologischen Anpassungsvorgängen (z.B. trainingsbedingte Hypertrophie) beteiligt [34]. Unter biomechanischen Gesichtspunkten nimmt die Muskelfibrille einen wichtigen Stellenwert ein. Die Fibrille wird durch Z-Scheiben (,,Z-discs") in Sarkomere eingeteilt, dessen Reihenschaltung eine kontraktile Einheit bildet. In den Sarkomeren finden sich die Filamente Myosin, Aktin, Titin und viele weitere regulatorische Eiweiße. Die Autorengruppe um die Gebrüder Huxley hat bereits in den 1950er Jahren die Hypothese der Gleitfilamenttheorie aufgestellt [35]. Mit Hilfe elektronenmikroskopischer Messverfahren konnten sie darlegen, dass sich die Länge der Filamente unter Verlängerung des Gesamtmuskels nicht ändert, stattdessen das Bündel der dünnen Filamente (Aktin) aus der Anordnung der dicken Filamente (Myosin) herausgezogen wird [35]. Diese Erkenntnis ist bis heute als Meilenstein der Muskelbiomechanik anzusehen. Neben vielen weiteren Erkenntnissen (u.a. Querbrückenzyklus, 1957 [36]; Kraft-

Längen-Kurve 1966 [37]), beobachtete Herzog 2002 eine Kraftzunahme des Muskels unter dessen aktiver Verlängerung [38]. Neben Aktin und Titin scheint unter dieser exzentrischen Muskelarbeit dem Strukturprotein Titin (,,The Giant Titin" [39]) eine entscheidende Bedeutung zuzukommen [38–40]. Die daraus abgeleitete Dreifilamenttheorie postuliert eine aktive Bindung zwischen Titin und Aktin unter Ca2 + Einstrom während exzentrischer Muskelarbeit [38–41] (Abbildung 4).

Folgende Merkmale sind der exzentrischen Arbeitsweise bisweilen zugesprochen worden [39,42–45]:

- Steigerung der Kraftentfaltung
- Effektive Trainingsform zur Behandlung der Osteoporose, Sarkopenie, Herz-Kreislauferkrankungen
- Effektive Trainingsform zur Behandlung von Tendinopathien sowie in der Therapie und Prävention von Muskelverletzungen
- Energetisch günstig (,,Low cost and high force")
- Strukturelle Mehrbelastung aktivierter Fasern
- Beeinflussung der willkürlichen Innervation und verändertes neuromuskuläres Innervationsmusters
- Auftreten von akuten und überlastungsbedingten Verletzungen der Muskulatur
- Auftreten von (peri-)artikulären Verletzungen

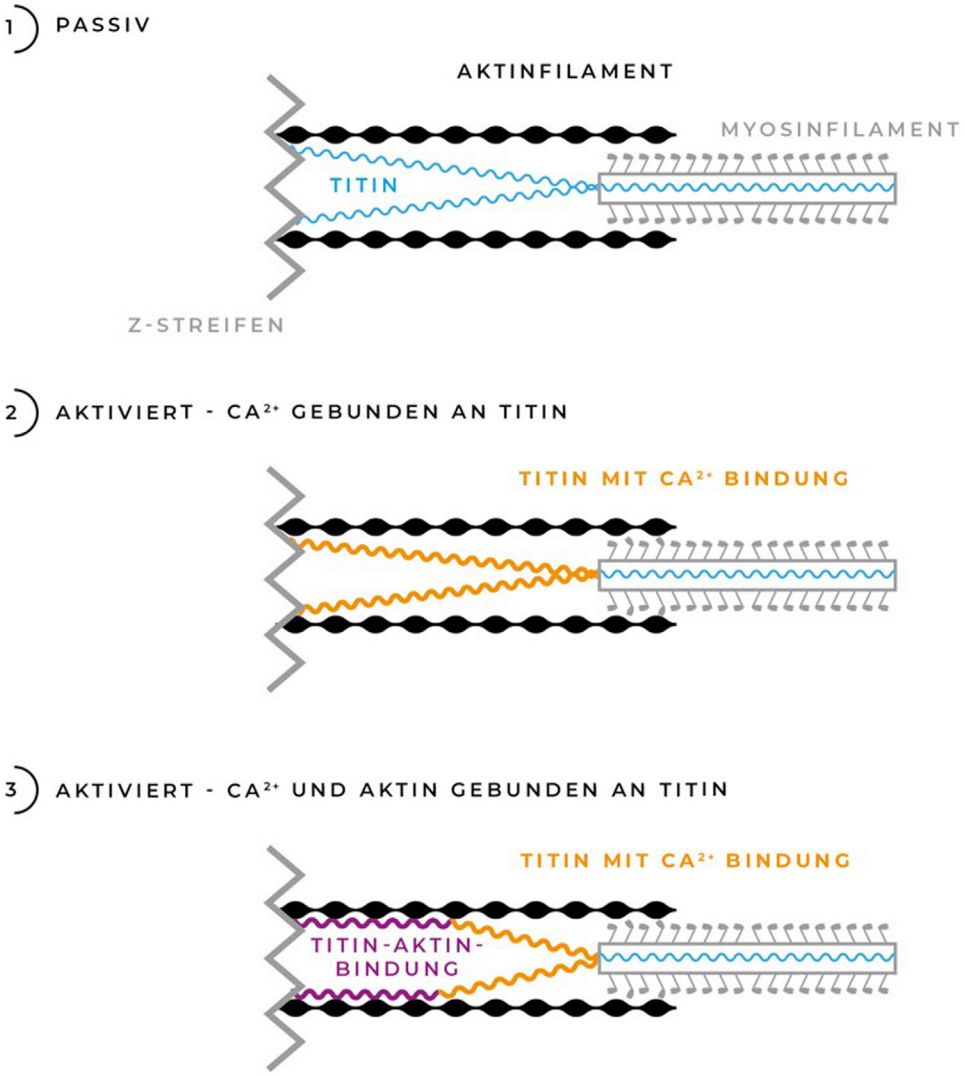

Abbildung 4
Modell der exzentrischen Arbeitsweise auf Sarkomerebene unter Einbezug von Titin, modifiziert und angepasst nach [41]. Graphische Illustration: M. Weineck, Erlangen.

Die exzentrische Muskelarbeit bzw. exzentrisch dominierende Arbeitsphasen stellen bekanntermaßen einen Risikofaktor für das Auftreten von indirekten Muskelverletzungen dar. Ein verändertes biomechanisches Belastungsprofil und eine möglichweise gestörte neuromuskuläre Feinkoordination scheinen laut aktuellen Überlegungen eine mögliche Ursache für die hohe Inzidenz von Verletzungen während der exzentrischen Arbeitsweise darzustellen.

Aus o.g. Annahmen erklärt sich allerdings auch die Notwendigkeit, diese Arbeitsform gezielt in der Therapie, Rehabilitation und Prävention von Muskelverletzungen einzusetzen (Abbildung 5). Das exzentrische Training der ischiokruralen Muskulatur hat sich im Rahmen der Übungsform ,,Nordic Hamstrings" seit Jahren im Praxisalltag etabliert [43,44]. Diese gezielte Trainingsform, aber auch die Implementierung allgemeiner Präventionsprogramme (z.B. Fifa 11 +) sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Seit jüngerer Zeit liegen belastbare klinische Daten vor, die den Nutzen der Trainingstherapie im Rahmen der Rehabilitation und Prävention belegen [43,44]. Eine aktuelle, systematische Metaanalyse (Einbezug von 8 randomisierten kontrollierten Studien, 8459 Athleten, verschiedene Sportarten) konnte darlegen, dass die Inzidenz von Muskelverletzungen bei Durchführung exzentrischer Trainingsübungen in Form von Nordic Hamstrings bis zu 51% gesenkt werden konnte [43].

Die exzentrische Arbeitsweise sollte gezielt in der Rehabilitation und Prävention von Muskelverletzungen unter der Berücksichtigung qualitativer Aspekte (z.B. zunächst kontrollierte, isolierte Übungsformen, anschließend im sportspezifischen und schnellkräftigen Kontext) implementiert werden.

Funktionelle oder ultrastrukturelle Muskelverletzungen – Was gibt es Neues?

Die Terminologie und Klassifikation funktioneller und überlastungsbedingter Muskelverletzungen ist bis dato nicht einheitlich definiert. Übergänge und Wechselwirkungen zwischen physiologischer, metabolischer und neuromuskulärer Ermüdung, der Einfluss neuromuskulärer Fehlinnervationen und der Entstehung von Strukturverletzungen im eigentlichen Sinne sind fließend [46]. Exemplarisch für die funktionelle Muskelverletzung Typ 1b nach Müller-Wohlfahrt [47] konnten ultrastrukturelle Verletzungen der Sarkomerintegrität aufgezeigt werden [48]. Auch wenn die Kausalität und ebenso die Therapiemaßnahmen durchaus unter funktionellen Gesichtspunkten betrachtet werden sollten, so ist auch bei diesen erst- bis zweitgradigen Verletzungen (Typ 1a-2b [47]) von einer (ultra)strukturellen Verletzung auf lokaler Ebene auszugehen. Als Synonym für die Typ 1b-Verletzung wird auch ,,verzögert einsetzender Muskelkater" oder international die ,,Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS)" genannt. Nicht nur um terminologisch die Exercise Induced Muscle Damage (EIMD) oder Muscle Soreness abzugrenzen, sondern um diese überlastungsbedingte Verletzung im klinischen Kontext adäquat behandeln zu können, sind pathophysiologische Kenntnisse für jeden Sportarzt unabdingbar. Der

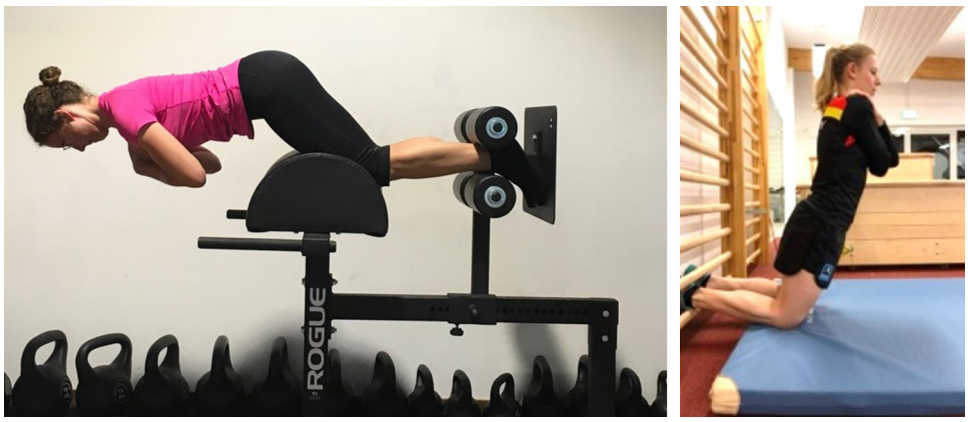

Abbildung 5
Exemplarische Darstellung exzentrischer Übungsformen in Form von Modifikationen der ,,Nordic Hamstrings''. Linke Bildhälfte: Mit freundlicher Genehmigung: S. Kistmacher, Erlangen. Rechte Bildhälfte: Deutsche Triathlon Union, DTU.

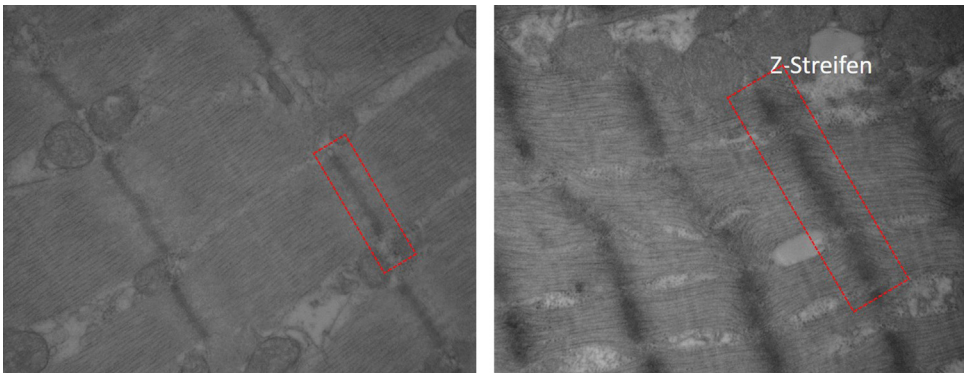

Abbildung 6
Elektronenmikroskopische Darstellung von ultrastrukturellen Schädigungen in der Muskelfaser und dem umgebenden Endomysium 24 Stunden nach einem exzentrischem Krafttraining mit 70 s „Time under tension im Musculus vastus lateralis [24]. Abbildung stammt aus: Bloch W, Hotfiel T, Ueblacker P, Tischer T., Bily W, Engelhardt M. Anatomie/Physiologie der Muskelheilung. In: Engelhardt M, Mauch F, eds. Muskel- und Sehnenverletzungen: Rolle-Verlag; 2017.10.

muskelbiomechanische Zusammenhang zwischen ultrastrukturellen Verletzungen und exzentrischer Arbeitsweise wird unter o.g. Abschnitt der Muskelbiomechanik deutlich. Ursächlich werden vorausgegangene exzentrische Kontraktionsformen oder ungewohnte Muskelbelastungen angesehen. Selbst wenn der genaue ursächliche Mechanismus bis heute nicht exakt geklärt ist, wird eine mechanische, die ultrastrukturelle Belastungsfähigkeit übersteigende indirekte Lasteinwirkung als primärer Schädigungsmechanismus angenommen [46]. Eine inflammatorische Phase mit weiterer Proteindegradation, Autophagie und einer lokalen Entzündungsantwort ist die Folge. Klinisch imponieren nach einem initialen symptomarmen Intervall schmerzhafte Bewegungseinschränkungen und Schwellungen, eine reduzierte Kraftentfaltung, eine Erhöhung des Muskeltonus sowie Funktionseinschränkungen angrenzender Gelenke [46,49]. Die DOMS ist in der Regel eine milde Verletzung und selbstlimitierend. Für den Leistungssportler ist sie allerdings mit erheblich leistungseinschränkenden Folgen (in der Regel kurzfristig) verbunden. Ein direkter Nachweis der Verletzungen auf struktureller Ebene ist bislang elektronenmikroskopischen Verfahren vorbehalten [48] (Abbildung 6). Einhergehende funktionelle Veränderungen der Skelettmuskelperfusion konnten mittels kontrastmittelverstärkter Sonographie im Sinne einer reflektorischen Hyperperfusion nachgewiesen werden [50]. Mitglieder der Autorengruppe haben es sich derzeit zur Aufgabe gemacht, mittels Ultra-Hochfeld-7-Tesla-MRT Strukturveränderungen auf ultrastruktureller Ebene erstmalig MR-tomographisch zu visualisieren – die Studienergebnisse gilt es abzuwarten. Die Prävention dieser folglich komplexen, mehrstadigen Verletzung zielt darauf ab, die Entstehung der primären Schädigung (Exercise Induce Muscle Damage, EIMD) zu verhindern oder bei bestehender Primärschädigung die inflammatorische Reaktion und die damit einhergehende klinische Manifestation zu beeinflussen [49]. Sofern eine manifeste DOMS vorliegt, gilt es Verfahren anzuwenden um einhergehende Symptome zu lindern und eine schnellstmögliche Wiedererlangung der Muskelfunktion zu erzielen. Aufgrund der komplexen Pathophysiologie existieren auch hier fließende Übergänge zwischen Regeneration und Rehabilitation sowie Prävention und Therapie [49,51]. Die Autoren verweisen diesbezüglich auch auf von ihnen verfasste weiterführende Literatur [49,51].

Interessenkonflikte

Die Autoren Bloch, Hotfiel, Heiss und Weisskopf sind Mitglieder des GOTS Komitee Muskel/Sehne.

Literatur

[1] T.M. Best, K.D. Hunter, Muscle injury and repair, Phys Med Rehabil Clin N Am 11 (2) (2000) 251–266.
[2] J. Huard, Y. Li, F.H. Fu, Muscle injuries and repair: current trends in research, The Journal of bone and joint surgery American volume 84-A (5) (2002) 822–832.
[3] T.A. Jarvinen, T.L. Jarvinen, M. Kaariainen, et al., Muscle injuries: biology and treatment, The American journal of sports medicine 33 (5) (2005) 745–764, doi: 10.1177/0363546505274714.
[4] P. Edouard, P. Branco, J.M. Alonso, Muscle injury is the principal injury type and hamstring muscle injury is

the first injury diagnosis during top-level international athletics championships between 2007 and 2015, Br J Sports Med 50 (10) (2016) 619–630, doi: 10.1136/bjsports-2015-095559.

[5] J. Ekstrand, M. Hagglund, M. Walden, Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer), The American journal of sports medicine 39 (6) (2011) 1226–1232, doi: 10.1177/0363546510395879.

[6] T. Hotfiel, W. Bily, W. Bloch, et al., Konservative Therapie von Muskelverletzungen, in: M. Engelhardt, F. Mauch (Eds.), Muskel- und Sehnenverletzungen, Rolle-Verlag, 2017, pp. 145–153.

[7] T. Hotfiel, R. Seil, W. Bily, et al., Nonoperative treatment of muscle injuries - recommendations from the GOTS expert meeting, J Exp Orthop 5 (1) (2018) 24, doi: 10.1186/s40634-018-0139-3 [published Online First: 2018/06/23].

[8] P. Ueblacker, L. Haensel, H.W. Mueller-Wohlfahrt, Treatment of muscle injuries in football, J Sports Sci (2016) 1–9. http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2016.1252849.

[9] C.M. Bleakley, P. Glasgow, D.C. MacAuley, PRICE needs updating, should we call the POLICE? British Journal of Sports Medicine 46 (4) (2012) 220, doi: 10.1136/bjsports-2011-090297.

[10] B. Dubois, J.F. Esculier, Soft tissue injuries simply need PEACE & LOVE, British Journal of Sports Medicine (2019).

[11] B.C. Heiderscheit, M.A. Sherry, A. Silder, et al., Hamstring strain injuries: recommendations for diagnosis, rehabilitation, and injury prevention, J Orthop Sports Phys Ther 40 (2) (2010) 67–81, doi: 10.2519/jospt.2010.3047.

[12] T. Hotfiel, H.D. Carl, B. Swoboda, et al., [Current Conservative Treatment and Management Strategies of Skeletal Muscle Injuries], Z Orthop Unfall 154 (3) (2016) 245–253. http://dx.doi.org/10.1055/s-0042-100479.

[13] H.W.H.L. Mueller-Wohlfahrt, P. Ueblacker, Muskelverletzungen im Sprt, Thieme (2010).

[14] C. Bleakley, S. McDonough, D. MacAuley, The use of ice in the treatment of acute soft-tissue injury: a systematic review of randomized controlled trials, The American journal of sports medicine 32 (1) (2004) 251–261.

[15] C.M. Bleakley, P. Glasgow, M.J. Webb, Cooling an acute muscle injury: can basic scientific theory translate into the clinical setting? Br J Sports Med 46 (4) (2012) 296–298, doi: 10.1136/bjsm.2011.086116.

[16] T.J. Hubbard, C.R. Denegar, Does Cryotherapy Improve Outcomes With Soft Tissue Injury? Journal of athletic training 39 (3) (2004) 278–279.

[17] G.A. Malanga, N. Yan, J. Stark, Mechanisms and efficacy of heat and cold therapies for musculoskeletal injury, Postgrad Med 127 (1) (2015) 57–65. http://dx.doi.org/10.1080/00325481.2015.992719.

[18] D. Tomchuk, M.D. Rubley, W.R. Holcomb, et al., The magnitude of tissue cooling during cryotherapy with varied types of compression, Journal of athletic training 45 (3) (2010) 230–237, doi: 10.4085/1062-6050-45.3.230.

[19] S.P. Mortensen, B. Saltin, Regulation of the skeletal muscle blood flow in humans, Experimental physiology 99 (12) (2014) 1552–1558, doi: 10.1113/expphysiol.2014.081620 [published Online First: 2014/09/07].

[20] B. Saltin, G. Radegran, M.D. Koskolou, et al., Skeletal muscle blood flow in humans and its regulation during exercise, Acta physiologica Scandinavica 162 (3) (1998) 421–436. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-201X, 1998.0293e.x [published Online First: 1998/05/13].

[21] E.J. Barrett, S. Rattigan, Muscle perfusion: its measurement and role in metabolic regulation, Diabetes 61 (11) (2012) 2661–2668, doi: 10.2337/db12-0271 [published Online First: 2012/10/25].

[22] K.H. Mertz, J. Bulow, L. Holm, Contrast-enhanced ultrasound using bolus injections of contrast agent for assessment of postprandial microvascular blood volume in human skeletal muscle, Clinical physiology and functional imaging 38 (5) (2018) 864–871, doi: 10.1111/cpf.12496 [published Online First: 2017/12/29].

[23] W. Bloch, Entzündung und Geweberegeneration /Eine wechselnde Wirkung, Sports Orthopaedics and Traumatology 35 (4) (2019) 364–371. http://dx.doi.org/10.1016/j.orthtr.2019.11.004.

[24] W. Bloch, T. Hotfiel, P. Ueblacker, et al., Anatomie/Physiologie der Muskelheilung, in: M. Engelhardt, F. Mauch (Eds.), Muskel- und Sehnenverletzung, Rolle-Verlag, 2017.

[25] T. Hotfiel, R. Forst, R. Heiß, et al., Clinical Practice meets Science: Wie beeinflusst eine PRICE-Therapie die intramuskuläre Gewebedurchblutung?. 34 GOTS Jahreskongresss, Posterbeitrag. (2019).

[26] Hotfiel T, Hoppe MW, Heiss R, et al. From lab to field: PRICE therapy is associated with the downregulation of intramuscular tissue perfusion but not with reactive hyperemia. In: review U, ed., 2020.

[27] P. Peetrons, Ultrasound of muscles, European radiology 12 (1) (2002) 35–43. http://dx.doi.org/10.1007/s00330-001-1164-6.

[28] C. Courthaliac, A. Lhoste-Trouilloud, P. Peetrons, [Sonography of muscles], J Radiol 86 (12 Pt 2) (2005) 1859–1867.

[29] R. Balius, G. Rodas, C. Pedret, et al., Soleus muscle injury: sensitivity of ultrasound patterns, Skeletal radiology 43 (6) (2014) 805–812. http://dx.doi.org/10.1007/s00256-014-1856-z.

[30] Y. Guillodo, R. Bouttier, A. Saraux, Value of sonography combined with clinical assessment to evaluate muscle injury severity in athletes, Journal of athletic training 46 (5) (2011) 500–504.

[31] E. McCarthy, T.M. Hegazi, A.C. Zoga, et al., Ultrasound-guided Interventions for Core and Hip Injuries in Athletes, Radiol Clin North Am 54 (5) (2016) 875–892. http://dx.doi.org/10.1016/j.rcl.2016.04.008.

[32] T. Hotfiel, R. Heiss, B. Swoboda, et al., Contrast-Enhanced Ultrasound as a New Investigative Tool in Diagnostic Imaging of Muscle Injuries—A Pilot Study Evaluating Conventional Ultrasound CEUS, and Findings in MRI, Clinical journal of sport medicine: official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine (2017), http://dx.doi.org/10.1097/JSM, ahead of print 0000000000000470.

[33] L.C. Ceafalan, T.E. Fertig, A.C. Popescu, et al., Skeletal muscle regeneration involves macrophage-myoblast bonding, Cell adhesion & migration 12 (3) (2018) 228–235. http://dx.doi.org/10.1080/19336918.2017.1346774 [published Online First: 2017/08/02].

[34] K.A. Murach, C.S. Fry, T.J. Kirby, et al., Starring or Supporting Role?. Satellite Cells and Skeletal Muscle Fiber Size Regulation, Physiology (Bethesda, Md) 33 (1) (2018) 26–38, doi: 10.1152/physiol.00019.2017 [published Online First: 2017/12/08].

[35] H. Huxley, J. Hanson, Changes in the cross-striations of muscle during contraction and stretch and their structural interpretation, Nature 173 (4412)

(1954) 973–976. http://dx.doi.org/10.1038/173973a0 [published Online First: 1954/05/22].
[36] A.F. Huxley, Muscle structure and theories of contraction, Progress in biophysics and biophysical chemistry 7 (1957) 255–318 [published Online First: 1957/01/01].
[37] A.M. Gordon, A.F. Huxley, F.J. Julian, The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres, The Journal of physiology 184 (1) (1966) 170–192, doi: 10.1113/jphysiol.1966.sp007909 [published Online First: 1966/05/01].
[38] W. Herzog, T.R. Leonard, Force enhancement following stretching of skeletal muscle: a new mechanism, The Journal of experimental biology 205 (Pt 9) (2002) 1275–1283 [published Online First: 2002/04/12].
[39] A.L. Hessel, S.L. Lindstedt, K.C. Nishikawa, Physiological Mechanisms of Eccentric Contraction and Its Applications: A Role for the Giant Titin Protein, Front Physiol 8 (2017) 70, doi: 10.3389/fphys.2017.00070 [published Online First: 2017/02/25].
[40] W. Herzog, The role of titin in eccentric muscle contraction, The Journal of experimental biology 217 (Pt 16) (2014) 2825–2833, doi: 10.1242/jeb.099127 [published Online First: 2014/08/15].
[41] W. Herzog, G. Schappacher, M. DuVall, et al., Residual Force Enhancement Following Eccentric Contractions: A New Mechanism Involving Titin, Physiology (Bethesda, Md) 31 (4) (2016) 300–312, doi: 10.1152/physiol.00049.2014 [published Online First: 2016/06/03].
[42] W. Herzog, The mysteries of eccentric muscle action, Journal of sport and health science 7 (3) (2018) 253–254. http://dx.doi.org/10.1016/j.jshs.2018.05.006 [published Online First: 2018/10/26].
[43] N. van Dyk, F.P. Behan, R. Whiteley, Including the Nordic hamstring exercise in injury prevention programmes halves the rate of hamstring injuries: a systematic review and meta-analysis of 8459 athletes, Br J Sports Med 53 (21) (2019) 1362–1370, doi: 10.1136/bjsports-2018-100045 [published Online First: 2019/02/28].
[44] L. Ishoi, K. Krommes, R.S. Husted, et al., Diagnosis, prevention and treatment of common lower extremity muscle injuries in sport - grading the evidence: a statement paper commissioned by the Danish Society of Sports Physical Therapy (DSSF), Br J Sports Med (2020), doi: 10.1136/bjsports-2019-101228 [published Online First: 2020/01/16].
[45] B.P. Boden, G.S. Dean, J.A. Feagin Jr., et al., Mechanisms of anterior cruciate ligament injury, Orthopedics 23 (6) (2000) 573–578 [published Online First: 2000/06/30].
[46] T. Hotfiel, J. Freiwald, M.W. Hoppe, et al., Advances in Delayed-Onset Muscle Soreness (DOMS): Part I: Pathogenesis and Diagnostics, Sportverletzung Sportschaden: Organ der Gesellschaft fur Orthopadisch-Traumatologische Sportmedizin 32 (4) (2018) 243–250. http://dx.doi.org/10.1055/a-0753-1884 [published Online First: 2018/12/12].
[47] H.W. Mueller-Wohlfahrt, L. Haensel, K. Mithoefer, et al., Terminology and classification of muscle injuries in sport: the Munich consensus statement, Br J Sports Med 47 (6) (2013) 342–350, doi: 10.1136/bjsports-2012-091448.
[48] A. Ulbricht, S. Gehlert, B. Leciejewski, et al., Induction and adaptation of chaperone-assisted selective autophagy CASA in response to resistance exercise in human skeletal muscle, Autophagy 11 (3) (2015) 538–546. , http://dx.doi.org/10.1080/15548627.2015.1017186.
[49] R. Heiss, C. Lutter, J. Freiwald, et al., Advances in Delayed-Onset Muscle Soreness (DOMS) - Part II: Treatment and Prevention, Sportverletzung Sportschaden: Organ der Gesellschaft fur Orthopadisch-Traumatologische Sportmedizin 33 (1) (2019) 21–29. , http://dx.doi.org/10.1055/a-0810-3516 [published Online First: 2019/03/14].
[50] M.H.M. Kellermann, B. Swoboda, K. Gelse, J. Freiwald, C. Grim, A. Nagel, M. Uder, D. Wildner, T. Hotfiel, Intramuscular Perfusion Response in Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS): A Quantitative Analysis with Contrast-Enhanced Ultrasound (CEUS), International journal of sports medicine (2017), http://dx.doi.org/10.1055/s-0043-112501.
[51] T. Hotfiel, I. Mayer, M. Huettel, et al., Accelerating Recovery from Exercise-Induced Muscle Injuries in Triathletes: Considerations for Olympic Distance Races, Sports (Basel) 7 (6) (2019), doi: 10.3390/sports7060143 [published Online First: 2019/06/16].

Korrespondenzadresse:
PD Dr. med. Thilo Hotfiel,
Osnabrücker Zentrum für Muskuloskelettale Chirurgie (OZMC), Klinikum Osnabrück GmbH. Telefon: +49 (0) 541- 405-6245.
Fax: +49 (0) 541 – 405-6299.
E-Mail: thilo.hotfiel@klinikum-os.de

Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect