

Adamantios Arampatzis/Sebastian Bohm/Falk Mersmann

INDIVIDUALISIERTE TRAININGS- STEUERUNG DURCH DIFFERENZIIERTE MUSKEL- SEHNEN-DIAGNOSTIK

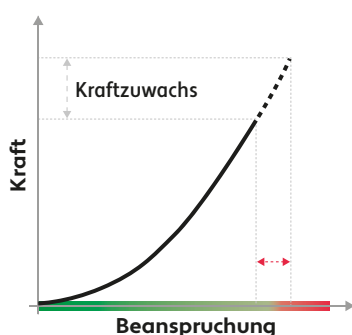
1. Hintergrund

Das Zusammenspiel von Muskel und Sehne ist für die sportliche Leistung und Gesundheit von Athleten von großer Bedeutung. Allerdings entwickeln sich Muskel und Sehne in einem Trainingsprozess nicht notwendigerweise ausgewogen. Eine Sehne kann also zu steif bzw. zu nachgiebig in Relation zur Kraftkapazität des Muskels werden, was sich wiederum auf die Leistungsfähigkeit bzw. Gesundheit der Sehne auswirkt. Eine differenzierte Diagnostik der Eigenschaften von Muskel und Sehne würde es ermöglichen, individuelle Trainingsreize besser zu definieren, um gezielt die Balance aus Muskelkraft und Widerstandsfähigkeit der Sehne zu optimieren. Im Folgenden beleuchten wir einen derartigen Ansatz der Diagnostik und Trainingssteuerung und diskutieren die potenzielle Umsetzung in der Praxis. Bei gegebenen technischen Voraussetzungen scheint ein erfolgreicher Transfer in den Leistungssport in greifbarer Nähe.

2. Zusammenspiel von Muskel und Sehne

Diagnostik und Trainingssteuerung sind im Leistungssport eine Grundvoraussetzung für die Entwicklung sportlicher Höchstleistungen. Es ist gemeinhin bekannt, dass die Muskelkraft eine wesentliche Determinante für sportliche Leistungen darstellt (Suchomel, Nimphius & Stone, 2016 für eine Übersicht), und somit sind Muskelfunktionsdiagnostik und Krafttraining als unverzichtbarer Bestandteil im Prozess der Leistungsentwicklung etabliert. Hingegen sind die Erkenntnisse, wie die Eigenschaften von Sehnen den mechanischen Energieaustausch in der Muskel-Sehnen-Einheit, die muskuläre Kraftgenerierung und damit

A Dysbalance der Adaptation



B Ausgewogene Adaptation

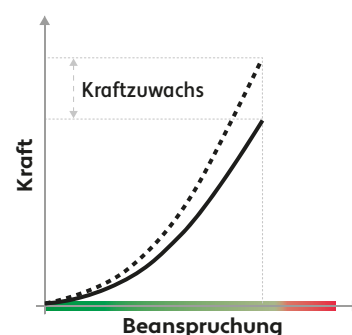


Abbildung 1: Steigt die Kraft, die ein Muskel auf die Sehne ausübt, ohne eine entsprechende Anpassung der Widerstandsfähigkeit der Sehne, erhöht sich die Beanspruchung des Sehnengewebes bei maximalen Muskelanspannungen (A) und damit das Verletzungsrisiko. Bei einer ausgewogenen Adaptation hingegen bleibt die Beanspruchung der Sehne bei maximalen Kontraktionen des Muskels trotz höherer Belastung konstant (B).

die sportliche Leistung mit beeinflussen, vergleichsweise jung, und Sehnendiagnostik beschränkt sich weitestgehend auf medizinische Untersuchungen im Fall von Verletzungen. An dieser Stelle soll dafür argumentiert werden, dass eine differenzierte Diagnostik der Muskel-Sehnen-Einheit in naher Zukunft die Trainingssteuerung hinsichtlich einer abgestimmten Entwicklung der muskulären Kraft- und Widerstandsfähigkeit der Sehne optimieren und damit einen wichtigen Beitrag zur sportlichen Leistungsentwicklung und Verletzungsprävention leisten könnte. Dabei sollen zunächst der Mehrwert einer differenzierten Analyse von Muskel- und Sehneneigenschaften begründet, die Struktur eines derartigen Ansatzes konkretisiert und abschließend die Realisierung in der Praxis thematisiert werden.

Es steht mittlerweile außer Frage, dass sich Sehnen, ähnlich wie die Muskulatur, an mechanische Belastung durch z. B. Training anpassen können (Bohm, Mersmann & Arampatzis, 2015 für eine Über-

sicht). Allerdings entwickeln sich die Eigenschaften von Muskel und Sehne in einem Trainingsprozess nicht notwendigerweise ausgewogen (Mersmann, Bohm & Arampatzis, 2017 für eine Übersicht). So passen sich Sehnen beispielsweise aufgrund der niedrigen Erneuerungsrate des Gewebes langsamer an Belastung an als Muskeln (Heinemeier, Schjerling, Heinemeier, Magnusson & Kjaer, 2013). Zudem sind nicht alle Belastungsformen, mit denen Muskelkraft und -leistung entwickelt werden können, geeignet, um die Widerstandsfähigkeit der Sehne zu erhöhen. Ermüdendes Widerstandstraining im mittleren Intensitätsbereich und plyometrisches Training (z. B. Sprungtraining) zeigen deutliche Effekte auf die Muskelkraft (Sáez-Sáez de Villarreal, Requena & Newton, 2010; Schoenfeld, 2013), sind jedoch vergleichsweise wenig wirksam hinsichtlich der Anpassung der Sehne (Arampatzis, Karamanidis & Albracht, 2007; Arampatzis, Peper, Bierbaum & Albracht, 2010; Bohm, Mersmann, Tettke, Kraft & Arampatzis, 2014; Kubo, Morimoto, Ko-

muro, Yata, Tsunoda, Kanehisa & Fukunaga, 2007). Das bedeutet, dass während eines Trainingsprozesses Dysbalancen zwischen der Kraft, die der Muskel erzeugen kann, und der Widerstandsfähigkeit der Sehne entstehen können. Wird die Kraftsteigerung eines Muskels nicht adäquat von einer Anpassung der Sehne begleitet, wird die Sehne bei einem gegebenen Kräfteinsatz relativ zum nun höheren Kraftmaximum (z. B. 90 % des willkürlichen Maximums) stärker gedehnt. Da die maximale Dehnung einer Sehne nicht veränderbar ist (LaCroix, Duenwald-Kuehl, Lakes & Vanderby, 2013), bedeutet dies eine größere Beanspruchung für die Sehne (Abbildung 1A). Bei einer ausgewogenen Entwicklung bliebe die Beanspruchung der Sehne trotz höherer absoluter Belastung hingegen gleich (Abbildung 1B).

Die Konsequenzen der beschriebenen muskulotendinösen Dysbalancen betreffen (a) die Leistungsfähigkeit des Sportlers, (b) das Verletzungsrisiko und (c) die Dosierung von Training. Durch die Entwicklung ultraschallbasierter Methoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Sehnen und dem Zusammenspiel von Muskel und Sehne am lebenden Menschen gibt es mittlerweile zahlreiche Belege, dass Sehnen mechanische Energie speichern und wieder abgeben können (Kawakami & Fukunaga, 2006 für eine Übersicht). Darüber hinaus beeinflusst die Nachgiebigkeit der Sehne die Arbeitsweise des Muskels und bestimmt durch ihren Einfluss auf das Muskelkraftpotenzial Bewegungsleistungen entscheidend mit (Arampatzis et al., 2006; Bohm, Marzilger, Mersmann, Santuz & Arampatzis, 2018; Farris, Lichtwark, Brown & Cresswell, 2016; Nikolaidou, Marzilger, Bohm, Mersmann & Arampatzis, 2017; Stafilidis & Arampatzis, 2007). Dabei sind die Eigenschaften von Muskel und Sehne und die neuromuskuläre Ansteuerung fein aufeinander abgestimmt (Lichtwark & Wilson, 2007; Orselli, Franz & Thelen, 2017; Sawicki, Robertson, Azizi & Roberts, 2015). So arbeiten die Muskelfasern beispielsweise bei einem Vertikalsprung nahe an der optimalen Verkürzungsgeschwindigkeit für maximale mechanische Leistung (Nikolaidou et al., 2017). Eine Dysbalance der Muskel- und Sehnenadaptation in einem Trainingsprozess würde das sensible Zusammenspiel des Zentralnervensystems mit der Muskel-Sehnen-Einheit stören. Durch die veränderten Kontrollanforderungen für das Zentralnervensystem und das geänderte Faserverhalten könnte die Ausnutzung der erhöhten Kraftkapazität im Bewegungsvollzug beeinträchtigt und damit

die sportliche Leistungssteigerung trotz Muskelkraftzuwachs eingeschränkt sein. Darüber hinaus steigt mit einer erhöhten Dehnung und damit Beanspruchung der Sehne während der Muskelkontraktion das Verletzungsrisiko. Je höher die durch eine gegebene Last ausgelöste initiale Dehnung, desto niedriger ist die Lebensdauer des Sehnengewebes bei zyklischer Belastung (Wren, Lindsey, Beaupré & Carter, 2003). Daher wird die mechanische Überbeanspruchung der Sehne durch starke Dehnungen als primäre Ursache für Tendinopathien und die begleitenden strukturellen Schädigungen des Gewebes gehandelt (Archambault, Wiley & Bray, 1995; Fredberg & Stengaard-Pedersen, 2008; Magnusson, Langberg & Kjaer, 2010). Und letztlich sind Abweichungen in der Anpassung von Muskel und Sehne aufgrund der Notwendigkeit zur Differenzierung zwischen Belastung und Beanspruchung auch für die Dosierung in der Trainingssteuerung von Bedeutung. Die Belastung für zwei Athleten, die eine Kniebeuge mit 100 kg auf der Langhantel durchführen, ist (akzeptiert man ein paar vereinfachte Annahmen) identisch. Doch stellt man sich hier einen Kraftsportler im Vergleich mit einem leptosomen Ausdauerathleten vor, wird intuitiv klar, dass die resultierende Beanspruchung auf muskulärer Ebene sehr unterschiedlich sein wird. Um den individuellen Kraftfähigkeiten gerecht zu werden, wird in der Praxis folglich die Intensität beispielsweise in Bezug auf das Einer-Wiederholungsmaximum (1-RM) gesteuert, sodass die muskuläre Beanspruchung von zwei Sportlern, die eine Kniebeuge mit 90 % ihres 1-RM durchführen, ähnlich ist. Ohne eine differenzierte Diagnostik der Eigenschaften von Muskel und Sehne ist eine derartige Trainingssteuerung jedoch immer noch unpräzise. Die Magnitude der Dehnung einer Sehne während Muskelkontraktionen ist ein entscheidender Faktor für die Wirksamkeit eines Trainings der Widerstandsfähigkeit der Sehne (Bohm et al., 2015 für eine Übersicht), da darüber die Beanspruchung des Sehnengewebes gesteuert werden kann. Insbesondere bei einer Abweichung des Gleichgewichts aus Muskelkraft und Widerstandsfähigkeit der Sehne werden beispielsweise bei einer isometrischen Kontraktion mit 90 % des Maximums nicht mehr zu erwartende adaptionsfördernde Sehnendehnungen von 4,5 bis 6,5 % erreicht (Arampatzis et al., 2007; Bohm et al., 2014), sondern deutlich höhere oder gegebenenfalls niedrigere. Damit wäre die gewählte Belastung für ein effektives Training der Widerstandsfähigkeit der Sehne nicht mehr optimal bzw. könnte sogar eine Degene-

ration auslösen (Pizzolato et al., 2018; Wang et al., 2013). Eine differenzierte Diagnostik innerhalb der Muskel-Sehnen-Einheit würde also Möglichkeiten eröffnen, die Beanspruchung im Training zu optimieren und dadurch gezielt Leistungsentwicklung und Verletzungsprävention zu fördern.

3. Ansatz der individualisierten Trainingssteuerung

Die Sehne als eine kollagene Struktur kann zwar keine Kräfte generieren, beeinflusst aber die Entwicklung der Muskelkraft und ist somit ein wichtiges Element des muskuloskeletalen Systems hinsichtlich der Steigerung der menschlichen Leistungsfähigkeit. Die Nachgiebigkeit der Sehne erlaubt nicht nur eine Speicherung von Verformungsenergie, sondern begünstigt auch die Muskelkraftgenerierung bei täglichen und sportlichen Aktivitäten durch eine Reduktion der Verkürzungsgeschwindigkeit der Muskelfasern (Bohm et al., 2018; Lai et al., 2018). Darüber hinaus ermöglicht die Nachgiebigkeit der Sehne dem Muskel, nahe an dem optimalen Bereich der Kraft-Längen-Relation zu arbeiten (Bohm et al., 2018; Ishikawa & Komi, 2008; Lichtwark, Bougoulas & Wilson, 2007). Die Reduktion der Verkürzungsgeschwindigkeit der Muskelfasern und die Kontraktion des Muskels nahe an der optimalen Länge sind zwei Mechanismen, die das Kraftpotenzial des Muskels steigern. Das Ausmaß der Sehnendeformation beeinflusst beide Mechanismen und erlaubt dem Muskel effektiv, in größeren Amplituden zu arbeiten.

Mehrere Studien aus den letzten 10 bis 15 Jahren liefern wichtige Informationen über die Deformation der Sehne während verschiedener Aktivitäten, wie z. B. beim Gehen (Lai et al., 2015; Lichtwark et al., 2007), Laufen (Lai, Lichtwark, Schache & Pandy, 2018; Lichtwark et al., 2007) und Springen (Ishikawa & Komi, 2008; Kurokawa, Fukunaga, Nagano & Fukashiro, 2003; Lichtwark & Wilson, 2005). Hierbei werden maximale Dehnungen der Sehne von 4,3 bis 6,0 % beim Gehen (Lichtwark et al., 2007) und langsamen Laufen (~2,0 m/s [Lai et al., 2018; Lichtwark et al., 2007]), 4,0 bis 8,3 % bei Sprüngen (Ishikawa & Komi, 2008; Kurokawa et al., 2003; Lichtwark & Wilson, 2005) und bis zu 9 % beim schnellen Laufen (5,0 m/s) berichtet. Diese Studien zeigen, dass eine gewisse Deformation in der Sehne im Sport und Alltag notwendig ist, um die Effektivität der Bewegung zu steigern. Dies wiederum bedeutet, dass der Muskel stark genug sein muss, die Sehne entsprechend zu deformieren, um das Zusammenspiel innerhalb der Muskel-Sehnen-Einheit adäquat

für die Bewegungsleistung zu nutzen. Zu hohe Deformationen können jedoch die Sehne überlasten, da die Rissdehnung bei ca. 12 % liegt (Wren, Yerby, Beaupré & Carter, 2001) und nicht signifikant verändert werden kann (Loitz, Zernicke, Vailas, Kody & Meals, 1989; Nakagawa, Hayashi, Yamamoto & Nagashima, 1996). Auf der anderen Seite wirken geringe Deformationen der Sehne (< 4 % Dehnung) ähnlich wie zu hohe Deformationen (> 9 % Dehnung) degenerativ auf die Struktur der Sehne und schwächen ihre Integrität (Wang et al., 2013).

In unseren früheren Studien (Arampatzis et al., 2007; 2010; Bohm et al., 2014) haben wir gezeigt, dass eine zyklische Belastung der Sehne, die eine Dehnung von ca. 4,5 bis 6,5 % verursacht und über eine gewisse Dauer pro Muskelkontraktion (3 Sekunden) appliziert wird, den effektivsten Stimulus zur Verbesserung der Sehneigenschaften darstellt. Darüber hinaus konnten wir belegen, dass Trainingsbelastungen von ca. 3 % Dehnung keine signifikanten Sehnenanpassungen hervorrufen (Arampatzis et al., 2007; 2010). Weitere Studien (Pizzolato et al., 2018; Wang et al., 2013) berichten ebenfalls adaptionsfördernde Sehnenbelastungen zwischen 4,5 und 6,5 % Dehnung und unterstützen unsere Befunde bezüglich eines optimalen Trainingsstimulus zur Maximierung der Adaptation der Sehne (Arampatzis et al., 2007; 2010; Bohm et al., 2014; Mersmann, Bohm & Arampatzis, 2016). Während des Trainings kann die Deformation der Sehne durch die Muskel-

kraft gesteuert werden: Je höher die Muskelkraft bei einer Trainingsübung ist, desto höher fällt auch die Sehnendeformation aus. Damit der Muskel die anpassungsfördernde Sehnendehnung von 4,5 bis 6,5 % im Rahmen von 5 Serien mit jeweils 4 Wiederholungen beim Training realisieren kann (Mersmann et al., 2016), sollte während der maximalen willkürlichen Kontraktion (MVC) eine Dehnung von > 6,5 % erreicht werden. Die Dehnung der Sehne bei einer MVC sollte jedoch wiederum nicht über 9 % liegen, da bei solchen Beanspruchungen der Sehne Degenerationserscheinungen wahrscheinlich werden (Wang et al., 2013).

Es gibt zwei Parameter, die die maximale Dehnung der Sehne beeinflussen, jedoch gegenseitig wirken: einerseits die maximale Muskelkraft, andererseits die Sehnensteifigkeit. Eine Dysbalance hat zur Folge, dass die maximale Dehnung der Sehne entweder zu gering oder zu hoch ausfällt – mit negativen Konsequenzen für die Leistungsfähigkeit und die Gesundheit der Sehne. Auf der Basis der dargestellten Befunde und Überlegungen kann also argumentiert werden, dass ein optimales Verhältnis zwischen Muskelkraft und Sehnensteifigkeit gegeben sein sollte, damit sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die physiologische Anpassung der Sehne begünstigt werden. Es besteht experimentelle Evidenz hinsichtlich von Dysbalancen im Leistungssport (Mersmann et al., 2016), wobei sich die maximal erreichte Sehnendehnung während einer MVC zu gering oder zu hoch in-

nerhalb einer Jahresperiode zeigte. Solche Dysbalancen belegen unterschiedliche Defizite innerhalb der Muskel-Sehnen-Einheit und deuten auf die Relevanz eines differenzierten Trainings hin. Ist die maximale Dehnung zu hoch (> 9 %) bedeutet dies, dass die Steifigkeit der Sehne im Verhältnis zur Muskelkraft zu gering ist, was ein konzentriertes Sehnentraining zur Steigerung der Steifigkeit erfordert. Ist dagegen die maximale Dehnung zu niedrig (< 4,5 %) heißt das, dass die Muskelkraft im Verhältnis zur Sehnensteifigkeit zu gering ist und konsequenterweise ein konzentriertes Training zur Steigerung der Muskelkraft angezeigt ist. Solche Situationen können individuell bei verschiedenen Athleten auftreten und erfordern somit eine individualisierte Steuerung des Trainings innerhalb der Muskel-Sehnen-Einheit.

Als Konsequenz für die Trainingspraxis ist es damit besonders wichtig, ein Markersystem zu etablieren, um das optimale Verhältnis zwischen Muskelkraft und Sehnensteifigkeit zu bewerten, frühzeitig Dysbalancen zu erkennen und athletenbezogene Entscheidungen für den weiteren Trainingsprozess treffen zu können. Durch ein solches Markersystem kann eine präzise und individualisierte Steuerung des Trainings hinsichtlich einer abgestimmten Adaptation zwischen Muskelkraft und Sehnensteifigkeit begünstigt werden. Abbildung 2 zeigt die maximale Dehnung der Patellarsehne bei einer MVC der Knieextensoren von 134 jungen Athletinnen und Athleten (9 bis 18 Jahre). In der

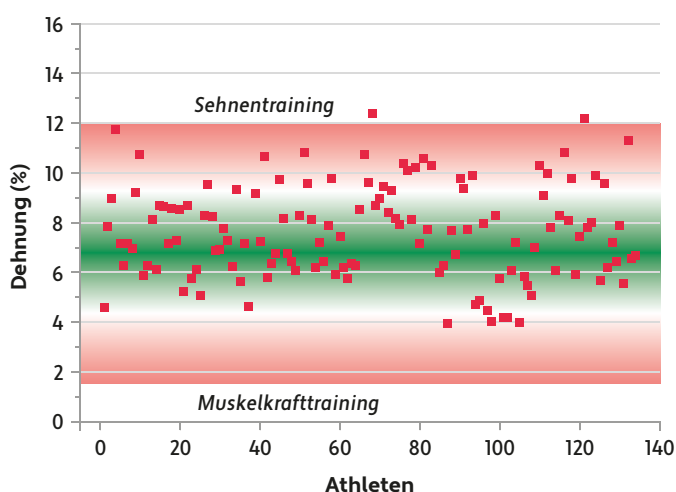


Abbildung 2: Individuelle (n = 134) Werte der maximalen Dehnung der Patellarsehne während einer maximalen willkürlichen isometrischen Kontraktion (MVC) der Knieextensoren. Der grüne Bereich belegt eine ausgewogene Adaptation zwischen Muskelkraft und Sehnensteifigkeit, während die roten Bereiche Dysbalancen kennzeichnen. Die Athletinnen und Athleten im oberen roten Bereich benötigen spezifisches Training, um die Steifigkeit der Sehne zu steigern, im unteren roten Bereich Training, um die maximale Muskelkraft zu verbessern.

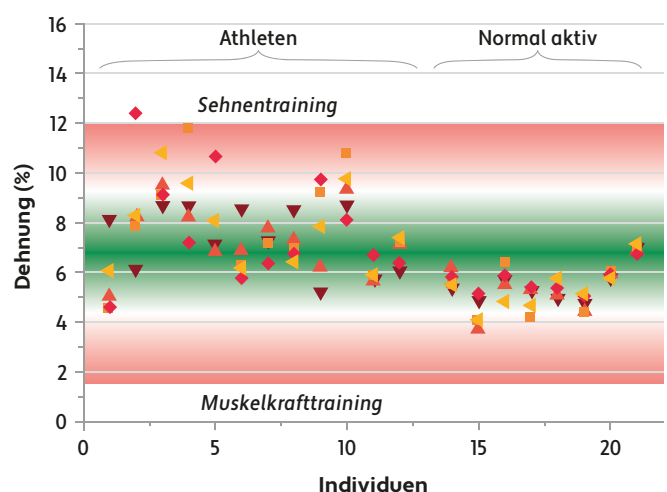


Abbildung 3: Individuelle Werte der maximalen Dehnung der Patellarsehne von jungen Volleyballern (n = 12) und Nichtsportlern (n = 8) innerhalb eines Jahres (insgesamt 5 Messungen). Dieses experimentelle Design erlaubt eine individuelle und präzise Evaluation der Muskel-Sehnen-Adaptation, um Trainingskorrekturen vornehmen zu können (Daten aus Mersmann et al., 2016).

Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass Personen existieren, die sowohl zu hohe als auch zu geringe Sehnenstretkungen aufweisen und daher unterschiedliche Ziele im Training (Muskelkraft- vs. Sehnenstraining) verfolgen müssen. Darüber hinaus wird auch deutlich, dass die Notwendigkeit des differenzierten Trainings individuell zu gestalten ist. Es gibt Fälle, bei denen die maximale Dehnung über 11 bis 12 % liegt und die Bedeutung eines Sehnenstrainings sehr hoch ist, und andere mit maximalen Dehnungen von 9 bis 10 %, bei denen eine Trainingskorrektur einfacher zu gestalten ist. Abbildung 3 zeigt die maximale Dehnung der Patellarsehne einer Gruppe von Athletinnen und Athleten (16 bis 17 Jahre) und einer normal aktiven Gruppe gleichen Alters im Rahmen von 5 Messungen innerhalb eines Jahres (Daten aus Mersmann, Bohm, Schroll, Marzilger & Arampatzis, 2016). Es wird auch hier deutlich, dass Phasen im Trainingsprozess existieren, die eine individuelle und präzise Steuerung des Trainings erfordern, um Korrekturen der Muskel-Sehnen-Adaptation innerhalb einer Trainingsperiode rechtzeitig vornehmen zu können. Es ist auch erkennbar, dass die Gruppe der Nichtsportler eher ein Muskelkraft- als ein Sehnenstraining benötigt. Die Information über das Verhältnis zwischen Muskelkraft und Sehnenstetigkeit kann darüber hinaus bedeutsam für die Auswahl der individuell-optimalen Intensität des Sehnenstrainings sein. Der Muskel kann sowohl morphologisch (Muskelvolumen) als auch funktionell (Muskelkraft) mit geringen Intensitäten (30 % des 1-RM) adaptieren, wenn die Wiederholungen bis zur Ermüdung durchgeführt werden (Mitchell et al., 2012). Bei solchen Intensitäten wird jedoch keine Adaptation

der Sehne stattfinden. Wie zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben wurde, ist die adaptionsfördernde Belastung für die Sehne hoch und sollte Dehnungen von 4,5 bis 6,5 % erreichen. Im Mittelwert ist diese Belastung in etwa bei 90 % der MVC gegeben (Arampatzis et al., 2007; 2010; Bohm et al., 2014). Allerdings kann das individuell unterschiedliche Verhältnis von Muskelkraft und Sehnenstetigkeit der Athleten die Auswahl der Intensität, basierend auf den MVC, verfälschen. Erreicht ein Athlet bei der MVC beispielsweise eine maximale Dehnung von 9 %, wird die 90 % MVC für das Training oberhalb der 6,5 % Dehnung liegen und Überbelastungen an der Sehne einleiten. Ist aber die individuelle Kraft-Dehnungs-Relation bekannt, kann der optimale Bereich der Intensität (4,5 bis 6,5 % Dehnung) identifiziert, individuell auf die MVC angepasst und so für ein personenbezogenes Training genutzt werden.

4. Realisierung des Konzeptes

Für eine personalisierte Trainingssteuerung der Muskel-Sehnen-Einheit ist eine valide In-vivo-Messung der maximalen Muskelkraft, Sehnenstetigkeit und maximalen Dehnung eine wichtige Voraussetzung. Die den Sehneigenschaften zugrunde liegende Sehnenkraft-Elongations-Relation (Sehnenstetigkeit) erfordert die Bestimmung der Sehnenkraft als Produkt von Gelenkmoment und Sehnenhebelarm während einer maximal willkürlichen Kontraktion, die Erfassung der korrespondierenden Elongation der Sehne sowie die Messung der Ruhelänge der Sehne zur Berechnung der Dehnung (zur Ruhelänge normalisierte Längenänderung). Die äußerst präzise Bestimmung dieser Parameter erfordert allerdings ei-

nen erheblichen messmethodischen und kalkulatorischen Aufwand (detaillierte Darstellung in Mersmann et al., 2016), der unter normalen Gegebenheiten kaum zu realisieren ist. Es ist mit einigen akzeptablen Vereinfachungen jedoch möglich, die Methodik in ein valides mobiles diagnostisches Setup zu überführen. Im Folgenden wird das Konzept eines solchen mobilen Ansatzes vorgestellt sowie eine komplexe und vereinfachte Version für die Patellarsehne diskutiert.

Zur Vereinfachung der Messung der Sehneigenschaften wird zum Ersten anstelle der Sehnenkraft auf den willkürlich erzeugbaren muskulären Output zurückgegriffen, der sich als Gelenkmoment mittels eines einfachen Kraftsensors (z. B. Dehnmesstreifen) und der Messung des Hebelarms zur Kniegelenkachse quantifizieren lässt und als annähernd proportional zur Sehnenkraft angenommen werden kann. Damit ist gleichzeitig die Bestimmung der Muskelkraft sichergestellt. Infolge der guten Standardisierung erfolgt die Bestimmung in einem vorgegebenen Gelenkwinkel und durch maximal willkürliche isometrische Kontraktionen (maximale Kontraktion gegen einen unüberwindbaren Widerstand, MVC) (Caldwell et al., 1974). Für die Knieextension wird ein Winkel von 90° im Kniegelenk bei flektierter Hüfte (90°) vorgesehen, womit eine Anordnung des Kraftsensors in Kraftvektorrichtung leicht zu kontrollieren ist und gleichzeitig passive Gewichtskräfte des Unterschenkel-Fußsegments entfallen (Abbildung 4).

Nach einigen Konditionierungsversuchen zur Vorbereitung der Sehne (Maganaris, 2003) erfolgt eine entsprechend instruierte (Caldwell et al., 1974) maximale Kontraktion mit langsamem Kraftanstieg

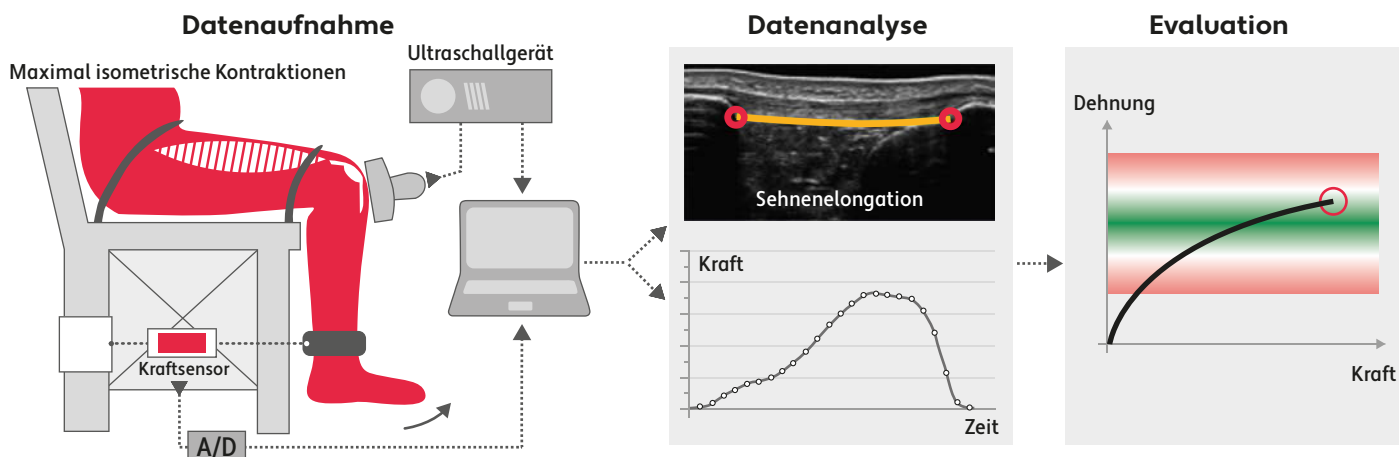


Abbildung 4: Konzept einer mobilen Diagnostik beispielhaft für die Muskel-Sehnen-Einheit der Knieextensoren mit der kraftübertragenden Patellarsehne, die eine Bestimmung des maximalen Outputs der Knieextensoren mittels Kraftsensor und durch integrierte ultraschallbasierte Analyse der Sehnenelongation ermöglicht.

(> 5 Sekunden bis zum Maximum) (Kös- ters, Wiesinger, Bojsen-Møller, Müller & Seynnes, 2014; Pearson, Burgess & Onambele, 2007; Theis, Mohagheghi & Korff, 2012), wobei die Sehnenelongation mittels Ultraschallgerät synchron zum muskulären Output erfasst wird. Die Sonde wird dazu in longitudinaler Achse über der Patellarsehne mittels Manschette oder Gummibändern fixiert. Leitendes Gel und ein Gelkissen verbessern die Aufnahmequalität, wobei Letzteres infolge der knöchernen Oberfläche des Knies unbedingt notwendig ist. Zur Analyse kommt eine große Linearsonde (> 6 cm) zum Einsatz, die eine Visualisierung eines möglichst großen Gewebebereichs erlaubt (Seynnes et al., 2015). Somit kann sichergestellt werden, dass die gesamte Länge der Sehne von der Insertion an der Apex der Patella zur Tuberositas tibiae für die Analyse genutzt werden kann (Mersmann, Seynnes, Legerlotz & Arampatzis, 2018; Seynnes et al., 2015). Darüber hinaus sollte der Punkt der Kraftübertragung am Unterschenkel weit distal liegen, um Effekte einer Tibiaplateautranslation auf die Analyse zu minimieren (Mersmann et al., 2018). Zur Analyse der Sehnenelongation aus den Ultraschallbildsequenzen werden anatomische Kennstellen identifiziert (Apex der Patella zur Tuberositas tibiae) und über den Verlauf der Kontraktion verfolgt (Abbildung 4). Das Tracking erfolgt aktuell über selbstprogrammierte (Mersmann, Charcharis, Bohm & Arampatzis, 2017; Mersmann et al., 2018) oder entsprechende (semi-)professionelle Videoanalysesoftware (z. B. ImageJ® oder Tracker®). Zum jetzigen Zeitpunkt erfolgt die Analyse im Wesentlichen manuell bzw. semiautomatisiert und setzt daher etwas Erfahrung voraus. Vollautomatisierte validierte Ansätze sind derzeit nicht publiziert und so bleibt nur der Verweis auf zukünftige Entwicklungen. Zur Ge-

währleistung einer hohen Reliabilität der Elongationsanalyse sollten 3 bis 5 Versuche aufgenommen und anschließend gemittelt werden (Schulze, Mersmann, Bohm & Arampatzis, 2012).

Die zur Berechnung der Dehnung erforderliche Ruhelänge der Sehne kann aus den ersten Ultraschallbildern vor der Kontraktion bei inaktivem Muskel extrahiert werden. Zwar ist die Patellarsehne in der beschriebenen Gelenkwinkelkonfiguration infolge passiv auftretender Spannung nicht mehr komplett unbelastet und deshalb etwas vorgedehnt, dieser Effekt kann jedoch als annähernd konstant angesehen werden und überwiegt den nicht trivialen Aufwand einer präzisen Bestimmung der Ruhelänge (De Monte, Arampatzis, Stogiannari & Karamanidis, 2006; Hoang, Herbert, Todd, Gorman & Gandevia, 2007). Anhand der aus den maximal willkürlichen isometrischen Kontraktionen resultierenden Kraft-Elongations-Relation und Ruhelänge kann nun die maximale Muskelkraft, die maximale Dehnung sowie ein angenähertes Äquivalent zur Sehnensteifigkeit (Steigung im linearen Bereich der Kurve, in der Regel im Intervall 50-100 % der maximalen Kraft) berechnet werden.

Eine vereinfachte Version dieses mobilen Diagnostikansatzes könnte darüber hinaus auf die Erhebung der Kraft-Elongations-Relation verzichten und ausschließlich die Zielparame- ter maximales Gelenkmoment als Bewertungsindikator für die maximale Kraft der Knieextensoren sowie maximale Sehnen- dehnung bestimmen. Das apparative Setup bliebe identisch, sodass der entscheidende Vorteil im Wegfall des zeitaufwendigen vollständigen Trackings der Ultraschallvideos läge. Wird ein Plateau während der maximalen Kontraktion für kurze Zeit gehalten, reicht es demnach aus, den Abstand der Tracking-Kennpunkte in Ruhe und während

des Plateaus zu bestimmen, wozu üblicherweise auch die Bediensoftware des Ultraschallsystems genutzt werden kann. Auch die Synchronisation der Messsysteme könnte somit entfallen. Steht ein instrumentiertes Knieextensionsgerät zur Verfügung, könnte dieses zur Kraftdiagnostik genutzt und lediglich durch die ultraschallbasierte Sehnenelongationsbestimmung ergänzt werden.

Abbildung 4 illustriert die vorangegangenen konzeptionellen Überlegungen zu einer mobilen Diagnostikapparatur, die in unserer Forschungseinrichtung (Abteilung Trainings- und Bewegungswissenschaften, Humboldt-Universität zu Berlin) entwickelt wurde, beispielhaft für die Patellarsehne. Das Gerät erlaubt maximale isometrische Kniestreckungen im fixierten rechten Winkel, wobei die Kraftdaten über einen Kraftsensor erfasst und über einen A/D-Wandler in den Laptop eingespeist werden. Die korrespondierende Sehnenelongation wird mittels synchronisiertem Ultraschall aufgenommen und anschließend in Bezug auf die resultierende Dehnungs-Kraft-Relation analysiert. Zum Einsatz kommt dazu ein mobiles Ultraschallgerät mit größerer Linearsonde. Die extrahierten Parameter dienen dann der individuellen Evaluation und der entsprechenden Ableitung von Trainingsempfehlungen. Wird eine vereinfachte Diagnostik angestrebt, werden lediglich das maximale Moment und die maximale Dehnung bestimmt.

Die Literatur zu diesem Beitrag steht auf www.leistungssport.net zum Download bereit.

Korrespondenzadresse

Univ.-Prof. Dr. Adamantios Arampatzis, Humboldt-Universität zu Berlin, Department of Training and Movement Sciences, Philippstr. 13, Haus 11, 10115 Berlin
E-Mail: a.arampatzis@hu-berlin.de

ANZEIGE



Trainingsgestaltung im Kindes- und Jugendalter

Dieses Buch vermittelt wesentliche Erkenntnisse einer entwicklungsgemäßen, belastbarkeitssichernden und -fördernden Trainingsgestaltung im Kindes- und Jugendalter sowie im späteren Leben.

Gesundheit und Leistungssport schließen sich also nicht aus, im Gegenteil: Ein richtig dosiertes Training, eine systematische Belastungsgestaltung und die Beachtung präventiver Strategien sind die besten Voraussetzungen für Gesunderhaltung und Leistungsfähigkeit im Kindes- und Jugendalter.

Gudrun Fröhner: Die Belastbarkeit als zentrale Größe im Nachwuchstraining.

200 Seiten, € 9,90



02 51/23 00 5-11


buchversand@philippka.de

 Weitere Informationen auf www.philippka.de