

Entwicklung eines neuen Ansatzes zur Objektivierung von Muskelanpassungen mit Hilfe von Diffusion-Tensor MRT

Sebastian Vetter¹, Pierre Hepp², S. Schleifenbaum³, H. Steinke⁴, Maren Witt¹ & Christian Roth⁵

¹Sportbiomechanik der Universität, Leipzig

²Arthroskopische und spezielle Gelenkchirurgie am Universitätsklinikum, Leipzig

³ZESBO am Universitätsklinikum, Leipzig

⁴Institut für Anatomie am Universitätsklinikum, Leipzig

⁵Kinderradiologie am Universitätsklinikum, Leipzig

E-Mail: sebastian.vetter@uni-leipzig.de

Schlüsselwörter: Exzentrisches Krafttraining, Muskelanpassung, DTI

Einleitung

Exzentrische Übungen sind im Athletiktraining ein etablierter Bestandteil. Im Gegensatz zu eindimensionalen Anpassungen durch konventionelle Trainingsmethoden wie Kraft- (Gérard et al., 2020) und Dehntraining (Konrad & Tilp, 2014), führt exzentrisches Krafttraining zu Beweglichkeits- und Kraftzuwächsen (Vetter et al., 2022). Diese Effekte werden zu einem Teil auf Faszikelverlängerung der betroffenen Muskulatur zurückgeführt (Franchi et al., 2014). Mittelfristige Verlängerungen einer Muskelfaszikel werden mit Sarkomerogenese erklärt (Butterfield, 2010).

Zur Darstellung der Veränderung der Muskeleigenschaften eignen sich neben gängigen Messmethoden zur Kraft- und Beweglichkeitserfassung auch Verfahren, die vorwiegend in der Grundlagenforschung Anwendung finden und einen größeren Einblick in den Muskel-Sehnen-Apparat ermöglichen. So gibt es biopsische und bildgebende Verfahren die je nach Fragestellung Vor- und Nachteile aufweisen. Gängige Messmethode zur Bestimmung einer longitudinalen Muskelhypertrophie (Vermehrung von Sarkomeren in Serie) ist eine Muskelbiopsie (Boakes et al., 2007). Diese Messtechnik kann Veränderungen auf kleinster struktureller Ebene zeigen, ist jedoch im Kontext einer Feldstudie aufgrund ethischer und praktischer Bedenken nicht ohne weiteres umsetzbar. Um Effekte eines exzentrischen Krafttrainings auf die Muskelarchitektur darstellen zu können, werden in diesem Forschungsfeld (Vetter et al., 2022) nicht-invasive Verfahren aus der Bildgebung zur Bestimmung der Faszikellänge als Surrogat-Parameter für longitudinale Muskelhypertrophie angewandt.

Aus testökonomischen Gründen finden insbesondere Ultraschallmessungen breite Anwendung. Praxisrelevanter Kritikpunkt an diesem Verfahren ist die eingeschränkte Reproduzierbarkeit (Kwah et al., 2013). Ein 2D-Ultraschall muss anhand von anatomischen Landmarkern orientiert werden und stellt lediglich einen Teil des Muskels aus einer gewählten Perspektive dar, die wiederum zwischen den Zeitpunkten und Anwendern stark variieren kann. Konkret kann eine Faszikellänge auf Basis eines Bildausschnitts lediglich für oberflächliche Strukturen selektiv bestimmt werden. Möchte man einen Muskel mit umliegenden Strukturen ganzheitlich und in allen Ebenen darstellen, so bietet sich eine sogenannte Diffusion-Tensor-Bildgebung (DTI) an. Da muskuloskelettale MR-Scans eine zu geringe Auflösung zur Darstellung der Muskelarchitektur bieten, sind zusätzliche DTI-

Aufnahmen mit einem MRT-Gerät notwendig. Die DTI ermöglicht die Rekonstruktion von sogenannten Trakten (Traktographie), die durch Messung der Streuung von Wassermolekülen rekonstruiert werden (Damon et al., 2011). Entwickelt wurde diese Methode in den Neurowissenschaften, da das Gehirn einen hohen Wassergehalt aufweist und so erstmalig komplexe Strukturen von Nervengewebe dargestellt werden konnten (Mori & Zhang, 2006). Die Muskulatur beinhaltet ebenso eine beträchtliche Menge Flüssigkeit, weshalb diese Technologie auch vermehrt zur Darstellung der Muskelarchitektur eingesetzt wird (Oudeman et al., 2016). Das Ergebnis dieser Aufnahmen ist ein dreidimensionaler und vollständiger Einblick in Ziel- sowie umliegende Strukturen wodurch sich eine Vielzahl von Parametern ableiten lassen. Der Vorteil dieser Methode ist zudem die Objektivität und Reliabilität (Oudeman et al., 2016; Behan et al., 2019). Durch Vergleiche mit Kadavernmessungen (Bolsterlee et al., 2018) und 2D-Ultraschall (Bolsterlee et al., 2015) konnte die Validität dieses Verfahrens im Laborexperiment gezeigt werden.

Ziel der Arbeit war es, ein praxistaugliches Auswertverfahren zur Quantifizierung von Faszikellängen im Kontext von Training und Rehabilitation zu entwickeln.

Methode

Um Anhand von MRT-Aufnahmen eine Faszikellänge berechnen zu können, sind bestimmte technologische Voraussetzungen und Arbeitsschritte zu erfüllen. Da bisher keine Anwendungsbeispiele einer DTI im Kontext von Krafttraining am Menschen vorhanden sind, haben wir uns an Empfehlungen aus der Grundlagenforschung orientiert (Körting et al., 2019; Oudeman et al., 2016).

Mit Hilfe eines 3T-Magnet-Resonanz-Tomographen (Siemens MAGNETOM Prisma Scanner) und einer Schulerspule XL 16-Kanal wurden anatomische- und DTI-Scans an 15 männlichen Probanden einmalig durchgeführt. Die verwendeten Sequenzen sind beim Hersteller kommerziell erhältlich. Zur Durchführung der Traktographie wurde sich an Körting et al. (2019) orientiert und wie folgt vorgegangen:

1. Muskelsegmentierung durch anatomische MRT-Bilder → Modellerstellung (Abb. 1)
2. Überprüfung und Korrektur der DTI-Daten
3. Registrierung der MRT und DTI-Bilder zueinander
4. Integration des Modells in DTI als „region of interest“
5. Definition der Stopp-Kriterien für Traktographie → Ausführung (Abb. 2)
6. Ausschluss von nicht plausiblen Faszikeln (wenn anderweitige Ausrichtung oder über Muskelmodell hinaus)
7. Berechnung der mittleren Faszikellänge über die Funktion „statistics“ in DSI-Studio

Die Segmentierung der Muskulatur (Schritt 1) ist notwendig um ein individuelles Muskelmodell eines jeden Probanden zu erstellen. Das Modell dient als „region of interest“, so dass die Traktographie innerhalb des Modells (seeding area) und damit ausschließlich für die Zielmuskulatur durchgeführt wird. Die Segmentierung beansprucht 30-45 Min. Zeit und wurde Bild-für-Bild mit Hilfe der Software MIMICS (Materialise, Leuven, Belgium) durchgeführt. Zur Traktographie wurde die Software DSI-Studio verwendet (Version vom 30. Juni 2021, <http://dsi-studio.labsolver.org/>). Die Einstellung der Stopp-Kriterien (Schritt 5) sind notwendig, um die Morphologie einer typischen Muskelfaszikel zu definieren, so dass Strukturen mit anderweitigen Charakteristiken aus der Traktographie ausgeschlossen werden.

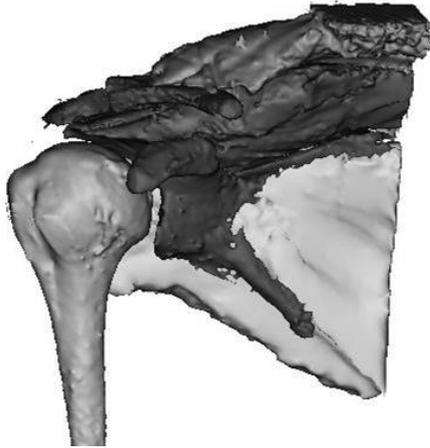


Abbildung 1: Modell r. Schulter

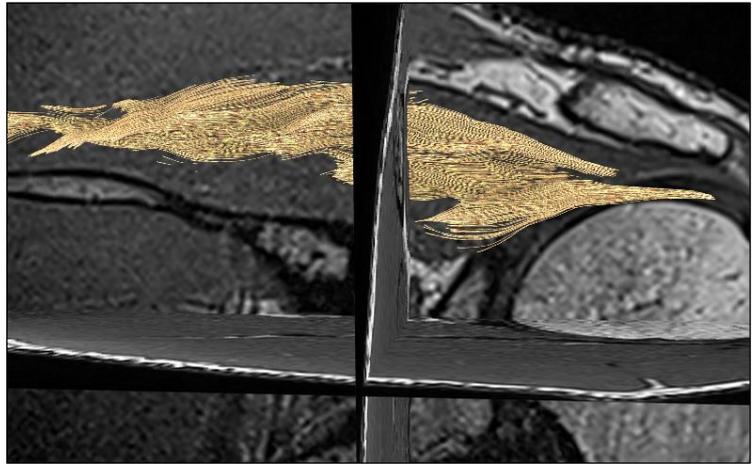


Abbildung 2: Traktographie m. Supraspinatus

Ergebnisse

15 männliche Sportstudenten ($24,1 \pm 3,8$ Jahre; $183,7 \pm 6,5$ cm; $79,5 \pm 7$ kg) wurden in die Analysen eingeschlossen. Das Ergebnis der Traktographie innerhalb des M. supraspinatus ist homogen und normalverteilt ($p > .05$). Die mittlere Faszikellänge reicht von 4,5 bis 5,4 cm. Im Durchschnitt ergab die Traktographie eine mittlere Faszikellänge von $4,8 \pm 0,3$ cm über die gesamte Stichprobe (Tab. 1).

Tab. 1. *Ergebnisse Faszikellänge.*

Proband	Mittlere Faszikellänge (cm)
VP01	5,2
VP02	5,0
VP03	4,5
VP04	4,9
VP05	4,7
VP06	4,7
VP07	4,7
VP08	4,7
VP09	4,8
VP10	4,6
VP11	5,4
VP12	4,6
VP13	4,9
VP14	4,6
VP15	4,5
Mittelwert	4,8
Standardabweichung	0,3

Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Methode innerhalb der untersuchten Stichprobe zu homogenen Ergebnissen führte. Weiter zeigen Studien am Kadaver (Kim et al., 2007), dass die in dieser Studie rekonstruierten Strukturen als faszikuläre Strukturen des M. supraspinatus interpretiert und als plausibel erklärt werden können. Festzuhalten ist, dass die ermittelte Faszikellänge auf dem Mittelwert aller Faszikel, die innerhalb des gesamten Muskelmodells bis in die Randbereiche des Muskels identifiziert wurden, basiert. Diese umfangreiche Identifizierung von Strukturen ist am Kadaver nicht ohne weiteres möglich. Damit erscheint die hier ermittelte mittlere Faszikellänge mit 4,8 cm gering unterdurchschnittlich, aber dennoch im Rahmen einer typischen Faszikellänge des m. Supraspinatus, die im Durchschnitt zwischen 2,8 und 8,3 cm Länge aufweisen kann (Kim et al., 2007). Berechnet man die mittlere Faszikellänge wie Bolsterlee et al. (2015) ausschließlich im Muskelbauch, so ergibt sich eine mittlere Faszikellänge von 6,5 cm.

Damit kann die muskuläre DTI als praxisrelevantes Tool betrachtet werden. Konkret kann eine DTI bei der Quantifizierung von Trainingseffekten auf struktureller Ebene entscheidende Vorteile gegenüber dem Ultraschall aufzeigen und bei der Optimierung von Trainingsinhalten durch Monitoring der Faszikellänge und weiteren Parametern unterstützen. Ebenso ist der breite Einsatz dieses Verfahrens in der Medizin zur Begleitung von rehabilitativen Maßnahmen denkbar, da hiermit, im Gegensatz zu gewöhnlichen anatomischen MRT-Aufnahmen, auch die Genesung des Muskel-Sehnen-Apparates auf Basis der Darstellung der Muskelarchitektur objektiviert und besser interpretiert werden kann.

Limitationen der DTI bestehen unter anderem im Verfahren selbst, denn eine DTI ermöglicht die Rekonstruktion von Strukturen auf Basis von Wassermolekülen. Damit ist keine direkte Messung von Faszikeln oder Sarkomeren in Serie möglich. Aufwendige Verfahren wie Muskelbiopsie oder Mikro-CT können damit nicht ersetzt werden. Weiter ist es problematisch die Ergebnisse einer Traktographie mit Kadavermessungen zu vergleichen, da nicht ein und dieselbe Faszikel innerhalb beider Verfahren identifiziert und verglichen werden kann.

Zusammengefasst kann die DTI in Verbindung mit gängigen Darstellungsmethoden weitere exklusive Einblicke in die Muskelarchitektur bieten und so in Zukunft ein wichtiges Tool im Kontext von Sport und Medizin darstellen.

Literatur

- Butterfield, T. A. (2010). Eccentric exercise in vivo: strain-induced muscle damage and adaptation in a stable system. *Exercise and sport sciences reviews*, 38(2), 51-60.
- Kim, S. Y., Boynton, E. L., Ravichandiran, K., Fung, L. Y., Bleakney, R., & Agur, A. M. (2007). Three-dimensional study of the musculotendinous architecture of supraspinatus and its functional correlations. *Clinical Anatomy: The Official Journal of the American Association of Clinical Anatomists and the British Association of Clinical Anatomists*, 20(6), 648-655.
- Oudeman, J., Mazzoli, V., Marra, M. A., Nicolay, K., Maas, M., Verdonschot, N., ... & Froeling, M. (2016). A novel diffusion-tensor MRI approach for skeletal muscle fascicle length measurements. *Physiological reports*, 4(24), e13012.
- Vetter, S., Schleichardt, A., Köhler, H. P., & Witt, M. (2022). The Effects of Eccentric Strength Training on Flexibility and Strength in Healthy Samples and Laboratory Settings: A Systematic Review. *Frontiers in Physiology*, 738.