

Christian Steiner-Naef<sup>1</sup>, Hans Hoppeler<sup>1</sup>, Ruth Vock<sup>1</sup>, Verena Beutler<sup>2</sup>, Chris Boesch<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Anatomie, Universität Bern

<sup>2</sup> Departement klinische Forschung, Abt. Magnetresonanztomographie und Methodologie, Inselspital Bern

# Einsatz der MRT-Bildgebung zur Beurteilung von konzentrischer und exzentrischer Muskelaktivität: Pilotstudie zur Evaluierung einer Aktivierung der tiefen Rückenmuskeln

## Zusammenfassung

Im Rahmen einer Pilotstudie wurde die Eignung von Magnetresonanztomographie (MRT) zur Identifizierung von aktivierten Muskeln nach konzentrischer und exzentrischer Arbeit geprüft. Es konnte gezeigt werden, dass konzentrische Muskelarbeit in den belasteten Muskeln zu einer unmittelbaren Verstärkung der Signalintensität im T2-gewichteten Bild führt, welche innerhalb von 20–30 min wieder vollständig abklingt. Diese Veränderungen werden auf Flüssigkeitsverschiebungen in die Muskulatur zurückgeführt. Nach exzentrischer Belastung findet nur eine minimale unmittelbare Signalverstärkung statt. Eine deutliche Veränderung lässt sich nach 3 Tagen feststellen, wahrscheinlich verursacht durch das mit der Muskelzellschädigung assoziierte Ödem. In beiden Fällen gestatten die Signalveränderungen die Identifizierung der belasteten Einzelmuskeln. Bei der exzentrischen Belastung stellten wir zusätzlich fest, dass zweigelenkige Muskeln weniger oder keine Signalveränderungen zeigten, vermutlich weil diese üblicherweise exzentrisch eingesetzt werden und damit vor exzentrischer Muskelzellschädigung weitgehend geschützt sind. In unserer Versuchsanordnung liessen sich die lumbalen Rückenmuskeln *M. multifidus* und *M. iliocostalis* mit einer exzentrischen Belastung der Arme aktivieren, was neue Möglichkeiten für Training und Rehabilitation eröffnen könnte. Über eine exzentrische Belastung der unteren Extremität konnten wir hingegen keine nachweisbare Aktivierung der lumbalen Rückenmuskeln erzielen.

## Abstract

In the following pilot study the use of magnetic resonance tomography was proved to identify muscle work after concentric or eccentric use. After concentric muscle work, the signal intensity rised immediatly in the T2 weighted image and decreased within 20–30 minutes after performance. These changes are the result of fluid exchange in the muscle. After eccentric muscle work only a minimal change is recognizable. A big change is found after 3 days, probably as a result of the edema after muscle damage. In both cases, the MR imaging can be used to identify the muscle work (concentric vs eccentric). We found that in the eccentric muscle work the biarticular muscles were protected against eccentric muscle damage. This phenomenon is probably based on the fact, that biarticular muscles usually are already used in an eccentric manner. In addition we could show an activation of the lumbar muscles (*M. multifidus* and *M. iliocostalis*) after eccentric use of arm muscles. This finding might open novel possibilities both in training and rehabilitation.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 59 (3), 116–121, 2011

## Einleitung

Die Magnetresonanztomographie-Bildgebung (MRT) als nichtinvasive Technik zur Untersuchung von Weichteilgewebe ist eine viel benutzte Technik zur Diagnostik des normalen und des pathologisch veränderten Muskuloskelettsystems. Mit MRT-Bildern in Querrelaxation gemessen (T2-Gewichtung) können arbeitsinduzierte (extra- und intrazelluläre) Flüssigkeitsverschiebungen sichtbar gemacht werden (Fleckenstein et al., 1988), wobei sowohl nach dynamisch konzentrischer wie nach dynamisch exzentrischer Muskelarbeit Flüssigkeitsverschiebungen im MRT nachweisbar sind (Shellock et al., 1991).

Dynamisch konzentrische Muskelaktivierung ist als positive Arbeit (Produkt aus Kraft mal Weg) bei Muskelverkürzung definiert. Im Gegensatz dazu resultiert bei dynamisch exzentrischer Muskelaktivierung eine Bremsbewegung (negative Arbeit); der Muskel

setzt einer Verlängerung durch Aktivierung Widerstand entgegen. Die erzielbaren Drehmomente sind bei exzentrischer Arbeit bis zu 4x höher bei gleichzeitig geringer metabolischer Belastung im Vergleich zu konzentrischer Arbeit. Bei starken exzentrischen Kontraktionen kann es zu Mikrotraumen der Muskelzellen kommen. Zusätzlich werden ausgeprägte Hypertrophieerize gesetzt, und es resultieren neuronale Anpassungen (Higbie et al., 1996; Lastayo et al., 1999; Weineck, 1997). Gesamthaft gesehen ist also exzentrische Muskelarbeit oder Bremsarbeit assoziiert mit geringerem Sauerstoff-Verbrauch, einer kleineren Zahl aktivierter Motoneuron-Einheiten und niedrigerer Laktatproduktion (Armstrong, 1990; Armstrong et al., 1983; Asmussen, 1953).

Im Übersichtsartikel von Clarkson & Hubal (2002) ist dargestellt, dass die verzögerten MRT-Veränderungen nach exzentrischer Belastung auf einem Muskelödem respektive einer Entzündungsreaktion

beruhen könnten. Die Zunahme der Signalstärke im T2-gewichteten MRT, entsprechend einer Muskelaufhellung im MRT, können bis zu 1 Monat nachgewiesen werden. Die zugrunde liegenden Mechanismen sind aber nicht vollständig bekannt. Die im MRT nachgewiesenen Signalverstärkungen sind mit Muskelzellschäden im Bereich der Z-Linien (Sarkomerverknüpfung via Aktinfilamente) und A-Banden (Myosinfilamente) assoziiert, die mittels elektronenmikroskopischer Analyse von Biopsien nachgewiesen wurden. Ebenfalls korreliert die MRT-Signalveränderung mit einer Erhöhung der Kreatinkinase (CK) und mit Muskelschmerzen. Letztere treten typischerweise mit einer Verzögerung von etwa 24 h auf (Larsen et al., 2007).

Shellock et al. (1991) zeigen, dass nach dynamisch konzentrischer Muskelarbeit im MRT eine unmittelbare und deutliche Signalintensitätsverstärkung sichtbar wird, während nach dynamisch exzentrischer Muskelarbeit dagegen nur eine minimale unmittelbare Veränderung beobachtet wird. Foley et al. (1999) haben nach exzentrischer Muskelarbeit Zeichen einer Muskelschädigung im MRT beschrieben. Nebst einer schwachen initialen T2-Antwort war nur bei exzentrischer Arbeit eine nach 1–6 Tagen verzögerte T2-Antwort zu beobachten, kombiniert mit einer Erhöhung von CK im Plasma und einer vorübergehenden Muskelschwellung. Eine schlüssige Erklärung für den verzögerten T2-Anstieg nach exzentrischer Arbeit fehlt aber zurzeit.

In der vorliegenden Pilotstudie wurde geprüft, inwieweit MRT zur Identifikation von konzentrischer und exzentrischer Arbeit individueller Muskeln oder Muskelgruppen herangezogen werden können. Das Augenmerk lag auf der Aktivierung der autochthonen lumbalen Muskulatur und deren Darstellung. Eine Aktivierung der autochthonen lumbalen Muskulatur wurde indirekt angestrebt, und zwar einerseits über eine exzentrische Belastung der Arme, andererseits über eine exzentrische Belastung der Beine. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit bestand darin, die technischen Randbedingungen für die Messung der Signalstärkenveränderungen zu optimieren (optimale Einstellungen des MR-Gerätes, optimale Messzeitpunkte, quantitative Analyse der Veränderungen).

## Material und Methoden

### Probanden

Es nahmen 5 gesunde, sportliche Männer (Alter 24–33 Jahre) an dieser Studie teil. Die kantonale Ethikkommission Bern hat die Studie bewilligt.

### Versuchsanordnung

In einem ersten Teil wurde mit 2 Probanden ein Vergleich dynamisch konzentrischer Belastung (auf dem Fahrradergometer) mit dynamisch exzentrischer Belastung (Exzentrik-Ergometer) der Oberschenkelmuskulatur vorgenommen (Abb. 1).

In einem zweiten Teil der Arbeit wurde mit 2 weiteren Probanden ein Vergleich dynamisch konzentrische Belastung vs. dynamisch exzentrische Belastung der lumbalen Rückenstrecker (M. multifidus) durch dynamisch exzentrische Belastung (Exzentrik-Ergometer-Bremsarbeit) der Arme durchgeführt. Durch die Bremsaktivität der Arme wurde dabei die tiefe lumbale Rückenmuskulatur mit Extensions- und Rotations-Bremsarbeit belastet (Abb. 2).

In einem dritten Teil wurde ein weiterer Proband analog dem ersten Teil einer starken exzentrischen Belastung der unteren Extremität (Exzentrik-Ergometer) ausgesetzt mit dem Ziel, die tiefe lumbale Rückenmuskulatur indirekt über Bremsarbeit der Beine zu aktivieren (Abb. 1).

Neben den MRT-Aufnahmen (siehe unten) wurden die subjektiven Muskelschmerzen mit einer Schmerz-Skala erfragt (0: keine Schmerzen, 2: sehr leichte, 4: leichte, 6: starke, 8: sehr starke und 10: sehr sehr starke Schmerzen). Vor jeder Belastung wurden MRT-Nativaufnahmen gemacht, nach jeder Belastung wurden im 3-min-Rhythmus Aufnahmen erstellt, bis kein sichtbarer Unterschied zu



Abbildung 1: Versuchsanordnung in der ersten und dritten Teilstudie: Der Proband verrichtet sitzend mit den Beinen Bremsarbeit gegen einen 5PS-Elektromotor (dynamisch exzentrisch).



Abbildung 2: Versuchsanordnung in der zweiten Teilstudie: Der Proband verrichtet sitzend mit den Armen Bremsarbeit gegen einen 5PS-Elektromotor (dynamisch exzentrisch). Durch die Bremsaktivität der Arme wurde dabei die tiefe lumbale Rückenmuskulatur mit Extensions- und Rotations-Bremsarbeit belastet.

den Nativaufnahmen mehr wahrnehmbar war. Zur Beurteilung der exzentrischen Belastung wurde die entsprechende Bildgebung nach 3 Tagen eingesetzt. Die Probanden wurden angewiesen, in der Testwoche keine aussergewöhnlichen Muskelanstrengungen (Training usw.) auszuführen.

**Belastungsprotokoll Teil 1:** Die Belastung dauerte 5 min mit einer dynamisch konzentrischen Aktivierung der Oberschenkelmuskulatur. Der Proband hatte eine sitzende Haltung mit Belastungsnormativen von 300 Watt und 60 Pedalumdrehungen pro Minute (rpm) vorwärts. Unmittelbar danach erfolgte eine MRT-Bildkontrolle bis zum Wiedererreichen der Signalintensität der Ausgangsaufnahmen. Im Anschluss an eine Ruhepause im Liegen von 2 Stunden fand erneut eine Belastung über 5 Minuten mit einer dynamisch exzentrischen Aktivierung der Oberschenkel statt, ebenfalls sitzend mit Belastungsnormativen von 1200 Watt und 60 rpm rückwärts. Unmittelbar danach erfolgten MRT-Kontrollen der Oberschenkelmuskulatur, ebenso eine Kontrolle nach 3 Tagen. Es gilt dabei festzuhalten, dass die Oberschenkelmuskulatur nur dann analog belastet wird, wenn zwischen konzentrischer und exzentrischer Belastung die Drehrichtung geändert wird.

**Belastungsprotokoll Teil 2:** Bei 2 weiteren Probanden wurden die Arme zum Bremsen der Pedale eingesetzt, die Position war ebenfalls sitzend mit vornüber geneigtem Oberkörper (Abb. 2). Diese

Anordnung wurde gewählt, um die lumbale Rückenmuskulatur zur Stabilisierungsarbeit zu zwingen. Die Probanden wurden dabei für maximal 10 min mit 1000 Watt (trainierter Wettkampfkletterer) respektive 300 Watt (untrainierte Testperson) belastet. Eine Bildgebung fand unmittelbar nach Belastung sowie nach drei Tagen statt.

**Belastungsprotokoll Teil 3:** Ein fünfter Proband leistete, ebenfalls sitzend, starke Bremsarbeit mit den Beinen. Er arbeitete während 10 Minuten bei 1400 Watt. Da wir untersuchen wollten, ob sich durch eine derartige exzentrische Belastung der unteren Extremität eine indirekte Aktivierung der tiefen lumbalen Rückenmuskeln provozieren liesse, wurden sowohl unmittelbar nach der Belastung als auch nach 3 Tagen Messungen über der Rückenmuskulatur durchgeführt. Die Bildgebung der Oberschenkelmuskulatur fand nach 3 Tagen statt, weitere Kontrollmessungen wurden bis 12 Wochen nach Belastung generiert.

**Ergometer:** Als Gerät zur dynamisch konzentrischen Aktivierung der Quadrizeps-Muskulatur wurde ein Fahrradergometer (Hometrainer Kettler, Ergorace, Ense-Parsit, Deutschland) verwendet. Als Gerät zur dynamisch exzentrischen Aktivierung der Quadrizeps- und der Schultergürtel- und Multifidus-Muskulatur wurde ein speziell konstruiertes Exzentrik-Ergometer verwendet (Meyer et al., 2003; Mueller et al., 2009; Steiner et al., 2004).

**Bildgebung:** Für sämtliche Untersuchungen wurde das gleiche Gerät (General Electric 1.5 Tesla Signa Echospeed Horizon, Version 5.8, Milwaukee/WI, USA) mit standardisierter Aufnahme-technik verwendet. Die Probanden wurden in Rückenlage mit einem Keilkissen unter den Kniekehlen gelagert. Die Beine waren mit einer elastischen Binde zusammengebunden, um die Muskulatur vollständig zu entlasteten. Durch das Keilkissen wurden die Hüftgelenke in etwa 30 bis 40° Flexion gelagert, womit die Lendenwirbelsäulenlordose teilweise aufgehoben wurde. Die Aufnahmen wurden mit folgenden Parametern durchgeführt: Gradientenspinecho, Repetitionszeit (TR) 500 ms, Echozeit (TE) 30 ms, Flip-Winkel 15°, Field of View (FOV) 42 cm, Schichtdicke 8 mm, Schichtabstand 5 cm, Matrix 256x192, Aufnahmezeit 3 min 16 s, 2 NEX (Anzahl Signalmitteilungen), Ganzkörperspule (Bodycoil).

Bei den Rücken-aufnahmen lag die Referenzebene in Rückenlage auf Höhe des Beckenkamms, entsprechend dem 4. Lendenwirbelkörper. Von hier aus wurden nach kranial und nach kaudal alle 2 cm Schichten gelegt. Bei den Oberschenkel-aufnahmen war der Ausgangspunkt die Patellaunterkante bei gestrecktem Bein in Rückenlage. Von diesem Punkt wurden 25 cm nach kranial gemessen und dies als Referenzebene markiert. Auch von dieser Referenzebene aus wurden im Abstand von 2 cm nach kranial und kaudal Schichten gelegt.

**Bildanalyse:** Für die Bildanalyse wurden alle Schichten durchgesehen und bezüglich Qualität der Muskelquerschnitte und Störfaktoren wie Gelenke, Faszienn und Bandscheiben beurteilt. Bei allen Probanden wurde schliesslich für die Analyse der lumbalen Rückenmuskulatur einheitlich die Aufnahmeschicht S 15 ausgewertet, die 2 cm kranial des Beckenkamms lag, entsprechend der Muskulatur auf Höhe der Lendenwirbelkörper 3 und 4. Bei allen Probanden mit Oberschenkel-aufnahmen wurde die Aufnahmeschicht S 5 ausgewertet, die 25 cm kranial der Patellaunterkante lag (Referenzebene).

Die MRI-Bilder wurden auf einem Computerbildschirm analysiert: Die Muskelquerschnitte der Einzelmuskeln wurden auf ihre Signalintensität (optische Helligkeit) ausgewertet. Die ausgewertete Fläche (ROI = Region of interest) entsprach einem Kreis von 5.74 mm Durchmesser und einer Fläche von 30 mm<sup>2</sup>. Bei jedem Muskelquerschnitt wurde dieser Kreis unter Berücksichtigung von Gefässen, Faszienn und Fettgewebe bei den beurteilten Bildern auf eine unter allen Bildern vergleichbare Stelle gesetzt. Das Analyse-Programm lieferte dann jeweils die entsprechenden Signalintensitäten der gewählten Muskelregion.

#### Statistik

Aufgrund der kleinen Anzahl der Probanden (je n=2 für die Teile 1 und 2 der Studie, n=1 für Teil 3) sind nur qualitative Analysen

möglich, nämlich bezüglich der Veränderungen der Signalintensität im MRT über die Zeit.

Die Mittelwerte der Muskeln aller ausgewerteten Bilder wurden in Ruhe (Nativwerte) sowie unmittelbar nach der dynamisch konzentrischen respektive nach der dynamisch exzentrischen Aktivität und 3 Tage später verglichen. Im ersten Teil wurde der Verlauf der Intensitätsabnahme in der Oberschenkelmuskulatur unmittelbar nach der Belastung untersucht. In den Teilen 2 und 3 wurde der Verlauf der Signalintensitäten der Rückenmuskulatur unmittelbar nach Belastung sowie längerfristig untersucht. Im Teil 3 wurde zusätzlich der Verlauf der Oberschenkelmuskulatur über Wochen beobachtet. Dabei wurden sowohl die verschiedenen Muskeln eines Probanden untereinander als auch die entsprechenden Muskeln beider Seiten miteinander verglichen.

#### Resultate

Im Teil 1 konnte nach isolierter dynamisch konzentrischer Aktivierung eine Aufhellung der Muskulatur, insbesondere der Oberschenkelstrecker, zwischen 15 und 25% des Ausgangswerts festgestellt werden (Abb. 3 und Abb. 4a, b, c), welche im Verlauf von 30 min wieder auf den Ruhewert zurückging. Während nach der dynamisch exzentrischen Aktivierung unmittelbar nach der Belastung keine Veränderungen gemessen werden konnte, manifestierte sich in den folgenden Tagen eine zunehmende Aufhellung mit einem Maximum in der Signalintensität (+19.7%) nach 72 h. In der Schmerz-Skala wurde 3 Tage nach Belastung für die Oberschenkelstrecker ein Schmerz-Wert von 5 angegeben.

Der M. rectus femoris als zweigelenkiger Muskel zeigte im Vergleich zu den eingelenkigen Muskeln unmittelbar nach Belastung deutlich geringere Signaländerungen (links +9.3%, rechts keine Änderung); nach 3 Tagen waren die Signalverstärkungen besser sichtbar (links +14.5%, rechts +6.2%; Abb. 3 und 4a, b, c).

Im Teil 2 manifestierte sich die exzentrische Belastung der Arme im MRT als deutlich sichtbare Aufhellung des M. multifidus. Eine erste Aufhellung (Abb. 5) wurde unmittelbar nach der Bremsarbeit verzeichnet, wonach die Intensität innerhalb von 20 min auf den Ruhewert zurückkehrte. Nach 3 Tagen zeigte sich in denselben Muskeln erneut ein deutlicher Anstieg (+25–40%) der Signalintensität (Abb. 5 und 6). Bei beiden Probanden waren beidseits die Mm. multifidus und longissimus deutlich aufgehellt. Ferner wurden 3 Tage nach Belastung in der Schmerz-Skala für den M. multifidus Werte von 6, respektive 7 von 10 angegeben.

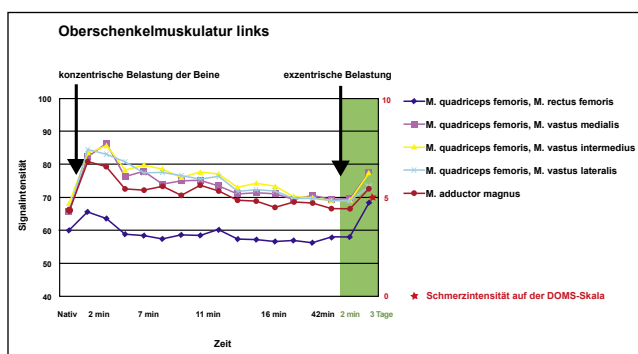


Abbildung 3: Erste Teilstudie: Messwerte der Signalintensität über die Zeit für die Oberschenkelmuskulatur links. Auf der X-Achse sind links die Nativwerte ersichtlich. Nach der dynamisch konzentrischen Belastung steigen die Signalintensitäten der einzelnen Muskeln unmittelbar an, um in den folgenden Minuten wieder auf das Ausgangsniveau zurückzukehren. Am wenigsten Veränderung zeigt der zweigelenkige M. rectus femoris. Nach einer 2-stündigen Pause wird eine exzentrische Belastung der Beine vorgenommen. Unmittelbar danach steigen die Werte kaum an, hingegen ist nach 3 Tagen eine deutliche Zunahme der Signalintensität zu verzeichnen. Dunkel hinterlegt sind die Messwerte nach exzentrischer Belastung.

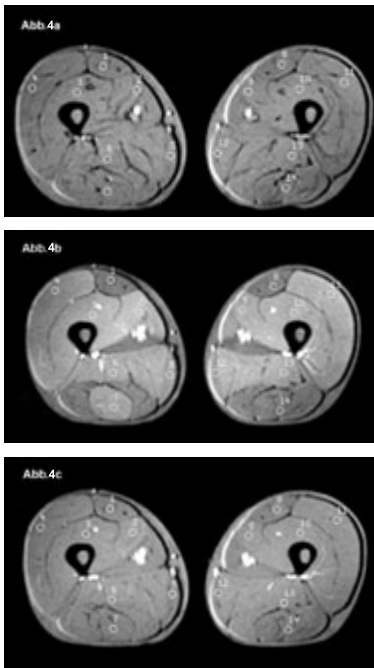


Abbildung 4: Zu sehen ist die Bildabfolge mit a) Nativzustand (keine Belastung), b) Aufhellung (d.h. Zunahme der Signalintensität) nach dynamisch konzentrischer Belastung und c) Rückgang der Signalintensität nach etwa 45 Min, entsprechend dem ersten Teil der Versuchsanordnung. Die Zunahme der Signalintensität nach 3 Tagen entspricht Abb. 8.

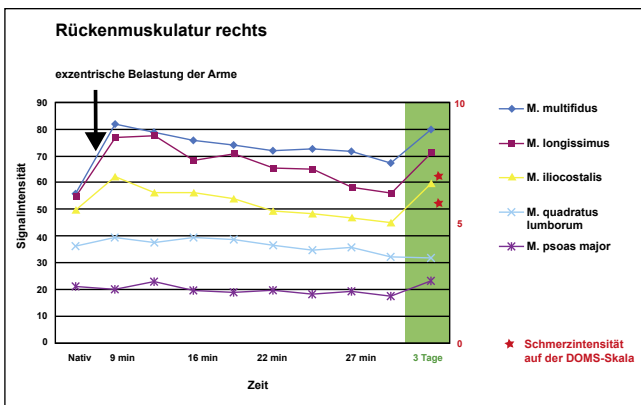


Abbildung 5: Zweite Teilstudie: Messwerte der Signalintensität über die Zeit für die Rückenmuskulatur rechts. Dunkel hinterlegt sind die Messwerte nach 3 Tagen. Analog der Abb. 3 sind auf der X-Achse links die Nativwerte der Rückenmuskulatur dargestellt. Unmittelbar nach Bremsarbeit durch die Arme mit weiterlaufender Bremsarbeit der Rückenmuskulatur steigen die Signalintensitäten in der lumbalen Rückenmuskulatur an und kehren innerhalb von etwa 30 Minuten wieder auf die Ausgangswerte zurück. Nach 3 Tagen ist ein erneuter deutlicher Anstieg der Signalintensität zu verzeichnen. Die angegebene Schmerzintensität war genau im Bereich des M. multifidus lokalisiert. Dunkel hinterlegt sind die Messwerte nach exzentrischer Belastung.

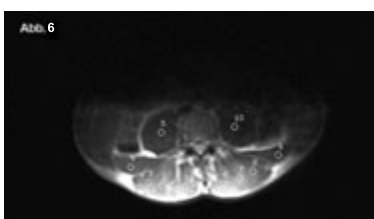


Abbildung 6: Aufhellung der Rückenmuskulatur 3 Tage nach dynamisch exzentrischer Belastung der Arme auf dem Exzentrik-Ergometer. Zu beachten sind vor allem die Aufhellungen der Multifidus- und Longissimus-Muskelanteile.

Im Teil 3 konnten trotz hoher Bremsarbeit der Beine von 1400 Watt während 10 min kaum Signalintensitätsänderungen der Rückenmuskeln festgestellt werden. Jedoch wurde an den Oberschenkeln nach der Schmerz-Skala ein grosser Muskelschaden gesetzt. Die Werte betrugen nach 3 Tagen am rechten Oberschenkel Stärke 10, links Stärke 9, nach 7 Tagen beidseits Stärke 7. Danach gingen die Werte rasch zurück. Im MRT war nach 3 und nach 14 Tagen im Bereich des M. quadriceps die grösste Signalintensität (bis zu +25%) zu verzeichnen (Abb. 7 und 8). Auch in diesem Versuch zeigte der zweigelenkige M. rectus femoris nur geringfügige Veränderungen (Abb. 7).

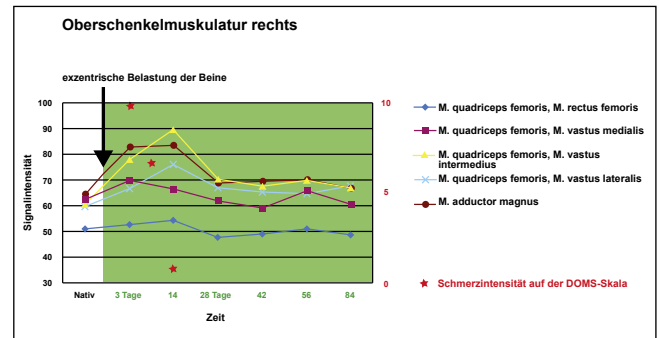


Abbildung 7: Dritte Teilstudie: Beim Versuch, durch massive Bremsarbeit der Oberschenkel eine weiterlaufende Bewegung mit Aktivierung der autochthonen Rückenmuskeln zu erwirken, waren wir nicht erfolgreich. Es konnte jedoch über 14 Tage eine deutliche Signalintensitätserhöhung in der Oberschenkelmuskulatur gezeigt werden. Die Schmerzintensität (Muskelskater) war am 3. Tag am grössten und nach 7 Tagen stark regredient. Interessant auch hier, dass der zweigelenkige M. rectus femoris kaum Alterationen in der Signalintensität zeigt.

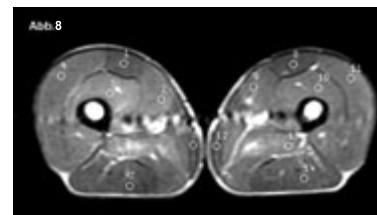


Abbildung 8: Aufhellung der Oberschenkelmuskulatur (Zunahme der Signalintensität) 3 Tage nach dynamisch exzentrischer Belastung (Bremsarbeit).

### Diskussion und Schlussfolgerung

Unsere Resultate zeigen, dass unmittelbar nach einer dynamisch konzentrischen Belastung im MRT Signalintensitätszunahmen festgestellt werden konnten. Diese Signalintensitätszunahmen sind innerhalb von maximal 30 bis 45 min regredient. Nach einer dynamisch exzentrischen Belastung sind unmittelbar nach der Aktivität kaum Signalintensitätszunahmen zu verzeichnen. Mit einer Verzögerung von etwa 3 Tagen sind jedoch deutliche Signalintensitätszunahmen im MRT festzustellen. Beide Phänomene treten sowohl bei direkter Muskelaktivierung als auch nach indirekter Aktivierung der autochthonen Rückenmuskulatur (M. multifidus) via Bremsbewegung der Arme auf. Im ersten Teil fanden konzentrische und exzentrische Belastungen konsekutiv in derselben Trainingssitzung statt. Die Zuordnung der beobachteten unmittelbaren Bildveränderungen zur konzentrischen Belastung erscheint unproblematisch. Da die Probanden unmittelbar vor der 3-Tages-Messung keinen muskulären Belastungen ausgesetzt waren, gehen wir davon aus, dass die 2. Erhöhung der Signalintensität der exzentrischen Belastung zuzuordnen ist. In Übereinstimmung mit der Literatur konnten wir, wie Shellock et al. (1991), die dynamisch konzentrische von der exzentrischen Aktivität unterscheiden. Zwar sind die Mechanismen, die bei der exzentrischen Belastung zur Signalerhöhung führen, nicht im Detail bekannt. Es wird jedoch



ein Zusammenhang mit der Muskelschädigung (Abb. 7) mit Entzündungsreaktionen und Ödem postuliert (Clarkson & Hubal, 2002).

Die Schmerzerte korrelierten sehr gut mit den MRT-Befunden, indem die Stellen respektive die spezifischen Muskelregionen mit den grössten Schmerzen den Muskeln mit der grössten Signalintensitätszunahme auf den Bildern entsprachen. Dies waren an den Oberschenkeln der M. quadriceps femoris, pars vastus medialis, und am Rücken der M. multifidus. Dies ist in Übereinstimmung mit Clarkson & Hubal (2002). Die Muskelschmerzen als Entzündungszeichen gehen jedoch den Änderungen in der Bildgebung voraus (Abb. 7). Kubota et al. (2007) stellten fest, dass die Hamstrings-Muskulatur auf exzentrische Belastung mit unterschiedlichen Signalstärkenveränderungen reagiert: Der M. semitendinosus als zweigelenkiger, dünner und fusiformer Muskel reagierte am stärksten (nach 3 Tagen) und ist der potenziell am leichtesten zu beschädigende Muskel der Hamstrings-Gruppe. Bei uns zeigten sich unter den verschiedenen Muskeln einer Gruppe ebenfalls Unterschiede bezüglich der Signalintensität: Im Vergleich der eingelenkigen mit den zweigelenkigen Muskeln des Oberschenkels reagierten insbesondere die eingelenkigen Kniestrecker (M. vastus intermedius sowie Mm. vasti medialis und lateralis) und der M. adductor magnus am stärksten. Der M. adductor magnus reagierte wohl deshalb sehr stark, weil er in dieser sitzenden Flexions-Haltung als Hüftstrecker wirkte und somit in der Muskelkette mitarbeitete. Die zweigelenkigen Muskeln wie der M. rectus femoris zeigten kaum eine Signalintensitätsänderung. Dies erklärt sich am wahrscheinlichsten daraus, dass die zweigelenkigen Muskeln auch im Alltagsgebrauch mehrheitlich exzentrisch aktiv sind und somit bei exzentrischer Aktivierung wenig geschädigt wurden.

Im zweiten Teil, beim Versuch der indirekten Belastung der tiefen Rückenmuskeln (M. multifidus), konnte nach der dynamisch exzentrischen Aktivierung der Armmuskulatur sowohl unmittelbar nach der Belastung eine Signalaufhellung von 46.5% mit einem Rückgang auf die gemessenen Nativwerte als auch eine erneute Signalaufhellung von 42.9% nach 3 Tagen gezeigt werden. Die lumbalen Muskelschmerzen waren eindeutig im Bereich des M. multifidus lokalisiert und wurden auf der Schmerz-Skala mit einer Stärke von 6 respektive 7 von 10 bewertet. Aufgrund der deutlichen Signalaktivitätsänderung des M. multifidus unmittelbar und 3 Tage nach dynamisch exzentrischer Belastung der Armbeuger darf sowohl eine unmittelbare dynamisch konzentrische Aktivierung als auch eine exzentrische Aktivierung angenommen werden. Die Möglichkeit der indirekten Aktivierung der tiefen Rückenmuskulatur könnte sowohl im Spitzensport als auch im Rehabilitationsbereich wichtig sein. Dies deshalb, da eine Muskelhypertrophie eines adäquaten Trainingsreizes bedarf und die Bedeutung des M. multifidus in Rehabilitation und Training durch folgende Untersuchungen bestätigt wurde: Einerseits liess sich mittels Computertomographie bei chronischen Rückenschmerzen-Patienten eine selektive Atrophie des M. multifidus nachweisen (Danneels et al., 2000), andererseits wird mit Hilfe des MRT gezeigt, dass 80% dieser Patienten eine Atrophie des M. multifidus aufweisen (Kader et al., 2000).

Im dritten Teil waren wir beim Versuch, durch massive Bremsarbeit der Oberschenkel eine weiterlaufende Bewegung mit Aktivierung der autochthonen Rückenmuskeln zu erwirken, nicht erfolgreich. Trotz hoher Bremsarbeit der Beine konnten kaum Signalintensitätsänderungen der Rückenmuskeln festgestellt werden. Beiarbeit, mindestens in sitzender Stellung, stellte damit keine grosse Belastung der tiefen Rückenmuskulatur dar und scheint daher als Trainingsmodalität weniger geeignet als die Aktivierung via obere Extremität (wie in Teil 2).

## Schlussfolgerungen

Die MRT-Bildgebung ist zur Beurteilung dynamischer und exzentrischer Muskelarbeit gut geeignet. Anhand der zeitlichen Beziehung der Signalintensitätszunahmen zur Muskelarbeit dürfen Rückschlüsse auf die Belastungsform im Sinne einer dynamisch

konzentrischen, respektive exzentrischen Aktivierung gemacht werden. Nach einer dynamisch konzentrischen Belastung folgt eine unmittelbare Signalintensitätserhöhung, nach einer dynamisch exzentrischen Belastung tritt eine Erhöhung der Signalintensität im MRT mit einer Verzögerung von etwa 3 Tagen auf. Dieses Reaktionsmuster der Muskulatur konnte sowohl für die Oberschenkelmuskulatur wie auch für die autochthonen Rückenmuskeln gezeigt werden. Die autochthonen Rückenmuskeln wurden dabei indirekt via exzentrische Belastung der Arme angesteuert.

## Korrespondenzadresse

Christian Steiner-Naef, Bürgerspital Solothurn, 4500 Solothurn, Tel. 078 810 00 26, christian.steiner@spital.so.ch

## Literaturverzeichnis

- Armstrong RB (1990): Initial events in exercise-induced muscular injury. *Med Sci Sports Exerc* 22: 429–435.
- Armstrong RB, Laughlin MH, Rome L, Taylor CR (1983): Metabolism of rats running up and down an incline. *J Appl Physiol* 55: 518–521.
- Asmussen E (1953): Positive and negative muscular work. *Acta Physiol Scand* 28: 364–382.
- Clarkson PM, Hubal MJ (2002): Exercise induced muscle damage in humans. *Am J Phys Med Rehabil* 81(11): 52–69.
- Danneels LA, Vanderstaeten GG, Cambier DC, Witvrouw EE, De Cuyper HJ (2000): Computer tomography imaging of trunk muscles in chronic low back pain patients and healthy control subjects. *Eur Spine J* 9: 266–272.
- Fleckenstein JL, Canby RC, Parkey RW, Peshock RM (1988): Acute effects of exercise on MR imaging of skeletal muscle in normal volunteers. *AJR Am J Roentgenol* 151(2): 231–237.
- Foley JM, Jayaraman RC, Prior BM, Pivarnik JM, Meyer RA (1999): MR measurements of muscle damage and adaptation after eccentric exercise. *J Appl Physiol* 87: 2311–2318.
- Higbie EJ, Cureton KJ, Warren III GL, Prior BM (1996): Effects of concentric and eccentric training on muscle strength, cross-sectional area and neural activation. *J Appl Physiol* 81: 2173–2181.
- Kader D, Wardlaw D, Smith F (2000): Correlation between MRI changes in the lumbar multifidus muscles and leg pain. *Clin Radiol* 55: 145–149.
- Kubota J, Ono T, Araki M, Torii S, Okuwaki T, Fukubayashi T (2007): Non-uniform changes in MR measurements of the semitendinosus muscle following intensive eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol* 101: 713–720.
- Larsen RG, Ringgaard S, Overgaard K (2007): Localization and quantification of muscle damage by magnetic resonance imaging following step exercise in young women. *Scand J Med Sci Sports* 17: 76–83.
- Lastayo PC, Reich TE, Urquhart M, Hoppeler H, Lindstedt SL (1999): Chronic eccentric exercise improvements in muscle strength can occur with little demand for oxygen. *Am J Physiol* 276: R611–R615.
- Meyer K, Steiner R, Lastayo P, Lippuner K, Allemann Y, Eberli F, Schmid J, Saner H, Hoppeler H (2003): Eccentric exercise in coronary patients: central hemodynamic and metabolic responses. *Med Sci Sports Exerc* 35: 1076–1082.
- Mueller M, Breil FA, Vogt M, Steiner R, Lippuner K, Popp A, Klossner S, Hoppeler H, Däpp C (2009): Different response to eccentric and concentric training in older men and women. *Eur J Appl Physiol* 107: 145–153.
- Shellock FG, Fukunaga T, Mink JH, Edgerton VR (1991): Acute effects of exercise on MR imaging of skeletal muscle: concentric vs eccentric actions. *AJR Am J Roentgenol* 156(4): 765–768.
- Steiner R, Meyer K, Lippuner K, Schmid JP, Saner H, Hoppeler H (2004): Eccentric endurance training in subjects with coronary artery disease: a novel exercise paradigm in cardiac rehabilitation? *Eur J Appl Physiol* 2004; 91(5–6): 572–578.
- Weineck J. (1997): *Optimales Training: leistungsphysiologische Trainingslehre*. Spitta Verlag, Balingen, 10. Auflage, S. 236–317.