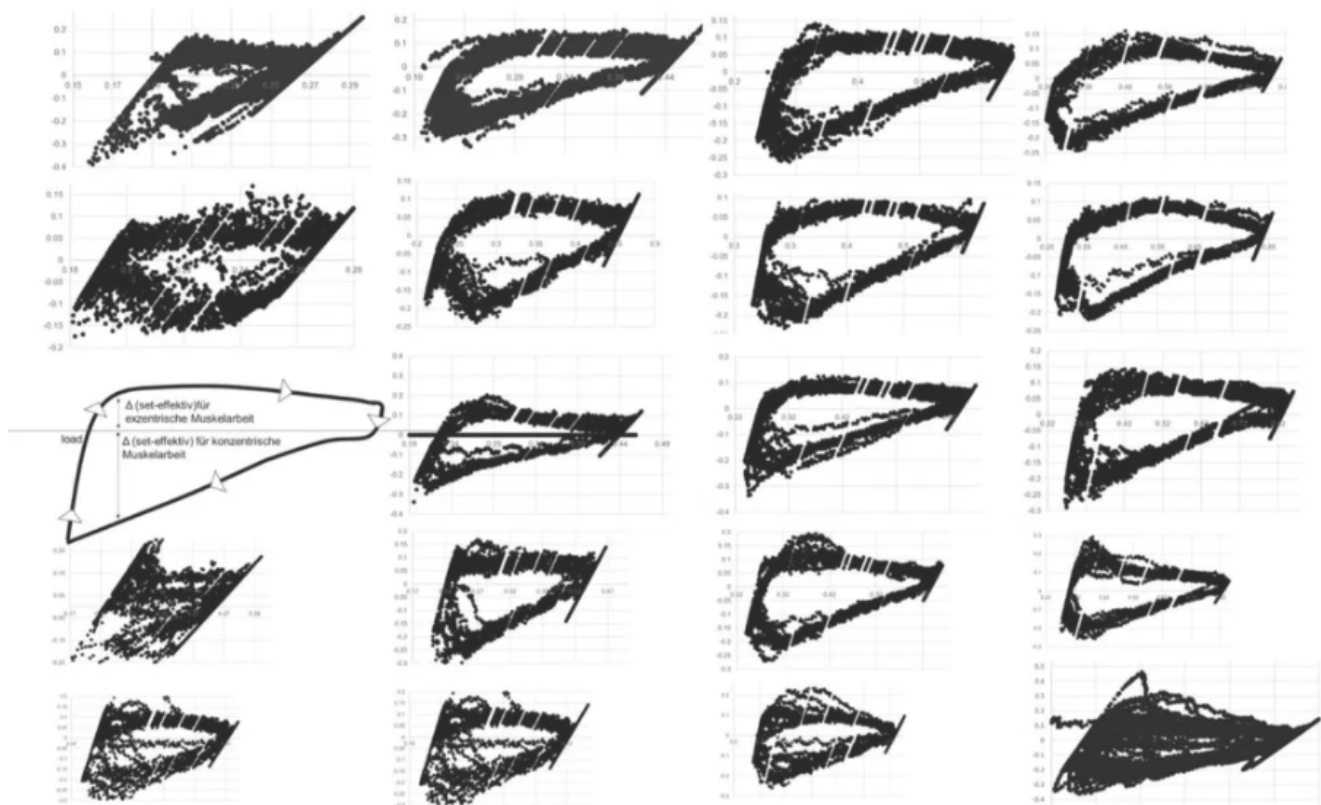


SHORT
COMMUNICATION

Differential coordination behaviour between concentric and eccentric contractions – many questions remain unanswered

EXERCISE PHYSIOLOGY / MUSCLE / MUSCLE / SPORTS SCIENCE



Unterschiedliches koordinatives Verhalten bei der exzentrischen und konzentrischen Muskelkontraktion – zahlreiche Fragen bleiben unbeantwortet

Gasser B^{*1}, Püntener O^{*1}, Lungarella M², Hoppeler H¹, Flück M³

***gleichberechtigte Erstautoren**

¹ Swiss Health & Performance Lab, Institute of Anatomy, University of Bern, Switzerland

² Dynamic Devices AG, Zürich, Switzerland

³ Universität Zürich, Universitätsklinik Balgrist, Departement für Orthopädie, Zürich, Schweiz

Abstract

Background

Concentric and eccentric muscle work is characterized through different biochemical activating cascades. Concentric contraction is characterized by an ATP O₂ coupling dependent interaction of the myofibril proteins Aktin and Myosin. In eccentric contraction, according to the Winding-filament hypothesis, a rotation movement around the thin filament is caused which is ATP independent. In addition, the processes of motor anticipation vary greatly between the two. This leads to the aim of the study: What are the differences in concentric versus eccentric muscle work concerning anticipation, perception and execution.

Material and Methods

Five male (30 ± 9.6 years, 179 ± 3.1 cm, 78.6 ± 15.1 kg) participants absolved a test program on a Soft Robot. This entailed slow eccentric muscle work over 8 sec followed by a 2 sec concentric movement. Five male volunteers (30 ± 9.6 years, 179 ± 3.1 cm, 78.6 ± 15.1 kg) completed exercise tests on a soft robot. This included 5-minute cycles of pedaling exercise with a 8-second long eccentric braking phase of muscle work followed by a 2-second concentric extension phase at four external loads (15, 25, 35, 45 kg). Target and effective workload were online monitored and displayed to allow control of the movement cycle.

Results

In all participants a relatively equal interindividual pattern, characterized by the difference between the predetermined force of the program and the effective used force under variable weights, was found. In eccentric contraction the deviation is relatively constant in contrast to concentric contraction where an increase was detectable.

Discussion

The pattern of motoric control seems to differ in concentric versus eccentric muscle activity. The identified interindividual differences might be a consequence of different muscle fibers (slow versus fast twitching) resulting from a different state of base fitness e.g. stop and go type athletes versus endurance athletes. The concurrent measurement of Oxygen and EMG-activity combined with muscle biopsy and the respective correlation of findings could give further hints concerning differences in motor control of concentric versus eccentric muscle action and give hints concerning the, to date, undetermined involvement of biochemical cascades.

Zusammenfassung

Hintergrund

Konzentrische und exzentrische Muskelarbeit ist durch unterschiedliche biochemische Aktivierungskaskaden charakterisiert. Die konzentrische Muskelkontraktion ist durch eine ATP gekoppelte O₂ abhängige Interaktion der myofibrillären Proteine Aktin und Myosin gekennzeichnet. Bei der exzentrischen Kontraktion kommt es gemäss der «Winding Filament-Hypothese» unabhängig von ATP zu einer Rotationsbewegung um das dünne Filament. Weiter scheint sich die motorische Aktivierung zu unterscheiden was im Rahmen dieser Studie praktisch untersucht wurde.

Material und Methoden

Fünf männliche Probanden (30 ± 9.6 Jahre, 179 ± 3.1 cm, 78.6 ± 15.1 kg) absolvierten ein Testprogramm auf einem Softroboter. Dieses beinhaltete 5-minütige Zyklen einer beidbeinigen Knieflexion während 8 Sekunden exzentrisch gefolgt von einer 2 Sekunden dauernden konzentrischen Rückbewegungen bei vier unterschiedlichen Belastungen (15, 25, 35 und 45 kg). Ziel und effektive Arbeitsbelastung wurden auf einem Monitor angezeigt, um den Teilnehmern zu ermöglichen den Bewegungszyklus zu steuern.

Resultate

Bei allen Probanden zeigte sich ein relativ gut übereinstimmendes interindividuelles Muster charakterisiert durch die Differenz zwischen der durch das Programm vorgegebenen Kraft und der effektiv geleisteten Kraft jeweils bei variierenden Lasten. Bei der exzentrischen Kontraktion ist die Differenz über die gesamte Bewegung relativ konstant, wohingegen bei der konzentrischen Kontraktion eine zunehmende Abweichung während der Bewegungsausführung detektiert werden konnte.

Diskussion

Das Muster der motorischen Kontrolle scheint sich bei der konzentrischen und exzentrischen Muskelarbeit zu unterscheiden. Die identifizierten interindividuellen Unterschiede könnten als Konsequenz unterschiedlicher Muskelfaserzusammensetzungen (slow versus fast-twitch) resultieren, vermutlich bedingt durch unterschiedliche Trainingsformen, beispielsweise «Stop-and-go-Sportler» versus Läufer. Die gleichzeitige Messung von Sauerstoffaufnahme und EMG-Aktivität verbunden mit Muskelbiopsien könnte weitere Hinweise zu den Unterschieden motorischer Kontrolle konzentrisch versus exzentrisch leisten und Hinweise hinsichtlich der involvierten und bis jetzt nicht verstandenen Kaskaden liefern.

Einleitung

Die arbiträre Einteilung in konzentrische, isometrische und exzentrische Muskelkontraktion hat sich weitgehend durchgesetzt. Die Formen scheinen sich bezüglich den Kontraktionsmechanismen und motorischen Aktivierung jedoch zu unterscheiden. Gut untersucht ist die konzentrische Muskelkontraktion, bei der es zur Verkürzung der Muskelfasern via ATP und somit O₂ abhängiger Ca²⁺ Interaktion der myofibrillären Proteine Aktin und Myosin kommt. Die Motorische Aktivierung der konzentrischen Muskelarbeit erfolgt via Rekrutierung

von Motoneuronen, die wiederum die von ihnen innervierten Muskelfasern aktivieren. De Luca et al. konnten hinsichtlich des Verständnisses einen wertvollen Beitrag machen mit der sogenannten Common Drive Theorie der Motoneurone [1,2,3].

Bei der exzentrischen (bremsenden) Muskelkontraktion geht man bisher von einer «Winding Filament-Hypothese» aus. Diese postuliert, dass sich Titin um das dünne Filament windet, was ebenfalls ausgelöst wird durch einen nach intrazellulär gerichteten Ca²⁺ Influx.

Die Mechanismen der exzentrischen Muskelkontraktion, insbesondere der motorischen Aktivierung und Koordination auf molekularer Ebene sind jedoch nach wie vor nicht abschliessend verstanden [4,5]. Bei beiden Kontraktionsformen zeigt sich mit zunehmender Muskelermüdung eine einhergehende Abnahme der Fähigkeit, diese adäquat durchzuführen [1,6,7,8].

Dies führte zur Zielsetzung der Studie, das Antizipations-, Perzeptions- und Ausführungsverhalten während konzentrischer versus exzentrischer Muskularbeit praktisch zu untersuchen. Als Hypothese mit potentieller Falsifizierung wurde postuliert, dass sich exzentrisches und konzentrisches Antizipations- und Ausführungsverhalten nicht unterscheiden [9].

Material und Methoden

Teilnehmer

Fünf männliche (30 ± 9.6 Jahre, 179 ± 3.1 cm, 78.6 ± 15.1 kg) Probanden absolvierten ein Testprogramm auf einem Softroboter. Es handelte sich um eine Validierungsstudie im Rahmen einer Untersuchung der kardialen Rehabilitation.

Teilnehmercharakteristika

Bei Teilnehmer eins handelte es sich um einen gesunden, physisch aktiven männlichen Teilnehmer (29 Jahre, 181 cm, 72 kg). Dieser hatte im Alltag hauptsächlich eine sitzende Tätigkeit, machte aber nebenbei drei bis viermal «Stop-and-go-Sport», also Training mit einem grossen Anteil an intermittierenden bzw. Intervallbelastungen. Dasselbe gilt für Teilnehmer zwei (41 Jahre, 175 cm, 77 kg), welcher neben seiner hauptsächlich sitzenden Tätigkeit ungefähr drei Mal pro Woche ins Fitnessstudio ging. Neben den zwei körperlich aktiven wurde das Trainingsprogramm auch von zwei sonst inaktiven gesunden Teilnehmern absolviert: Teilnehmer drei (24 Jahre, 178 cm, 70 kg) und Teilnehmer vier (18 Jahre, 183 cm, 105 kg). Bei Teilnehmer fünf (38 Jahre, 178 cm, 69 kg) handelte es sich um einen aktiven Läufer.

Das Gerät

Beim Allegro Medical Softroboter (Dynamic Devices AG, Zürich, Schweiz) handelt es sich um ein Trainings- und Rehabilitationsgerät mit der Funktionsweise einer dynamischen Beinpresse. Dieses ermöglicht je nach Programm exzentrische und/oder konzentrische Muskularbeit aus einer sitzenden Position [10]. Hauptsächlich beteiligt sind dabei die Oberschenkel- und Gesässmuskulatur (insbesondere M. gluteus maximus, M. quadriceps femoris, M. biceps femoris, M. semimembranosus und M. semitendinosus).

Messvorgehen und Testprotokoll

Während 5 Minuten wurden im Wechsel lange, kräftige exzentrische Phasen (8 Sekunden), gefolgt von kurzen lockeren konzentrischen Phasen (2 Sekunden) durchgeführt. Die kurze Phase diente dabei der Rückbewegung in die Ausgangsposition. Beide Beine waren während dem gesamten Bewegungsablauf separat gekoppelt und es musste versucht werden, die Beine parallel zurück zu bewegen. Der Bewegungsumfang im Kniegelenk wurde mit 5–90 Grad festgelegt. Der Softroboter wurde dafür für jeden Probanden mit Hilfe einer Winkelschablone kalibriert, um den individuell zu überwindende Abbremsweg zu bestimmen. Die konzentrische Rückbewegung in den eingestellten Nullpunkt (5 Grad Kniewinkel) konnte jeweils erst ausgeführt werden, sobald ein Winkel im Kniegelenk von 90 Grad erreicht wurde. Alle Probanden absolvierten vier fünfminütige Durchgänge mit jeweils 15, 25, 35 und 45 Kilogramm Last. Die Abbremsbewegung betrug ungefähr 0.5 Meter, was je nach Belastungsstufe und Körpergrösse zu einer variierenden Leistung von 6.1 bis zu 18.7 Watt geführt hat.

Die Probanden erhielten auf einem Bildschirm jeweils direkt ein Feedback zu der Koordination ihrer ausgeführten Bewegungen, was eine optimale Anpassung der aktuellen Bewegungsausführung ermöglichte. Es wurde eine graue Kurve mit der optimalen Bewegungsausführung gezeigt, welche während der Messung durch eine rote für das rechte und blaue Kurve für das linke Bein überlagert wurde. Die x-Achse repräsentierte dabei den zeitlichen Verlauf und die y-Achse den Kniewinkel.

Zeitgleich wurde vom Gerät alle 0.05 sec verschiedene Parameter gemessen und gespeichert. Dies ermöglichte eine Auswertung der Differenz der zu erbringenden (durch das Programm vorgegebene Last) und die tatsächliche (effektiv geleistete) Last sowie der prozentuale Anteil der maximal geleisteten Kraft.

Statistische Auswertungen

Für alle vier Durchgänge und alle fünf Teilnehmer wurde das Delta Δ zwischen der durch das Programm vorgegebenen Kraft und der effektiv geleisteten Kraft berechnet (Abszisse). Gleichzeitig wurde der prozentuale Anteil der maximal geleisteten Kraft berechnet (Ordinate) und dann beide Werte als Graph dargestellt. Dies führte theoretisch zu 20 Graphen, wobei bei einem Teilnehmer sich starke Messartefakte zeigten und deshalb die Graphik durch eine exemplarische Skizze ersetzt wurde. Die Berechnungen und Darstellungen wurden mit Microsoft Excel (Microsoft Inc., Redmond, Washington, USA) durchgeführt.

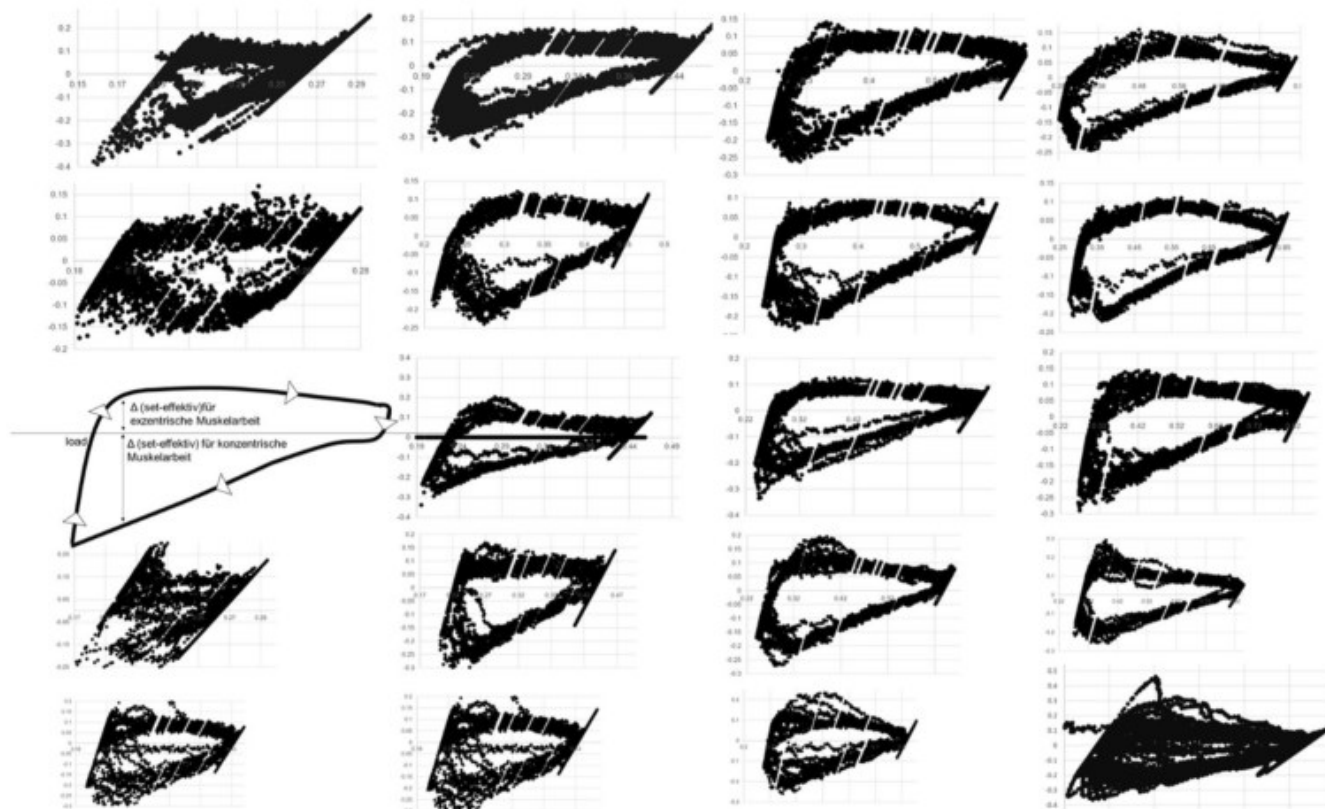


Abb. 1: Die obenstehenden Abbildungen zeigen jeweils von links nach rechts die wachsenden Load 15, 25, 35 und 45 kg. Jede Zeile gibt jeweils einen Probanden wieder. Die Skizze auf der linken Seite zeigt illustrativ die Bedeutung der jeweiligen Graphiken. Auf der x-Achse findet sich der variierende Load (prozentualer Anteil der höchsten geleisteten Kraft innerhalb eines Durchgangs der aktuell geleisteten Kraft). Die y-Achse gibt das Delta Δ zwischen der vorgegebenen Kraft und der effektiv geleisteten Kraft wieder.

Resultate

In der Grafik in Abbildung 1 werden allgemeine und individuelle Charakteristika der durchgeführten exzentrischen und konzentrischen Bewegungen dargestellt. Dabei lassen sich insbesondere Bewegungsmuster und die Präzision der Koordination (Delta Δ) erkennen.

Diskussion

Das Ziel dieser Studie war es, konzentrische und exzentrische Muskelarbeit hinsichtlich der Antizipation, Perzeption und Ausführung zu analysieren.

Anhand der Grafik in Abbildung 1 lassen sich individuelle und allgemeine koordinative Charakteristika erkennen. Es lassen sich dabei insbesondere die Bewegungsmuster und die Präzision der Koordination (Delta Δ , Abweichung zwischen vorgegebener Kraft und der effektiv geleisteten Kraft) der Probanden analysieren und vergleichen.

Die Koordination der exzentrischen Muskelarbeit war während dem gesamten Bewegungszyklus mehrheitlich konstant präzise. Die Koordination der konzentrischen Rückbewegung hingegen verschlechterte sich gegen Ende des Bewegungszyklus bei allen

Probanden. Eine mögliche Erklärung dafür sind die unterschiedlichen Mechanismen der Kontraktion und motorischen Aktivierung. Bei der konzentrischen Muskelarbeit werden möglicherweise vermehrt langsame Muskelfasern rekrutiert. Des Weiteren ist es auch möglich, dass die Perzeption bei der konzentrischen Muskelarbeit schlechter ist. Eine andere mögliche Erklärung ist, dass technisch bedingt für die konzentrische Rückführung in die Neutralposition nur ein Viertel der Zeit zur Verfügung stand (zwei versus acht Sekunden). Einerseits erforderte dies eine bessere Antizipation als bei der exzentrischen Muskelarbeit und andererseits hatten die Probanden weniger Zeit, die Koordination zu optimieren. Verzögert begonnene Rückbewegungen mussten gegen Ablauf der zur Verfügung stehenden Zeit bis zum Erreichen der Neutralposition verhältnismässig durch einen grösseren Krafteinsatz kompensiert werden, was zu einem höheren Delta Δ führt. Zu Verzögerungen kann es insbesondere durch eine suboptimale Antizipation kommen, andererseits kann es technisch bedingt auch zu einer verzögerten Rückmeldung zur aktuellen Bewegungsausführung am Bildschirm gekommen sein.

Das allgemeine Koordinationsverhalten für die exzentrische Muskelarbeit wird mit zunehmender Last (ab der zweiten Stufe mit einer Last von 25 kg) besser und das Bewegungsmuster unter den Probanden vergleichbarer. Niedrige Lasten (15 kg) scheinen somit für alle Probanden schwieriger koordinierbar zu sein. Eine mögliche Erklärung dafür ist die Anzahl der rekrutierten Muskelfasern pro Motoneuron, die nicht unterschritten werden kann und somit mehr Kraft zur Verfügung steht als benötigt, was die Koordination erschwert. Da jedoch bisher die genauen Mechanismen der motorischen Aktivierung der Exzentrischen Muskelarbeit noch nicht verstanden sind, lassen sich nur Vermutungen machen.

Bei der konzentrischen Muskelarbeit ist bekannt, dass durch Training die Feinmotorik und maximale Kraft des Muskels beeinflusst werden kann. Einerseits kommt es zu einer neuronalen Adaption mit vermehrten Aktionspotentialen und somit einer erhöhten Rekrutierung von motorischen Einheiten bei gleichzeitiger Hemmung der antagonistisch arbeitenden Muskulatur [11,12]. Andererseits lässt sich die Zusammensetzung der Muskelfasern (fast-twitch und slow-twitch Fasern) innerhalb eines Muskels durch Training beeinflussen. In unserer Studie gibt es Hinweise dafür, dass dies auch für die exzentrische Muskelarbeit gilt. Proband eins und zwei, welche polysportiv aktiv sind und auch «Stop-and-go-Sportarten» betreiben, zeigen ein konstantes Bewegungsmuster beim exzentrischen Abbremsen. Die sportlich wenig aktiven Probanden drei und vier zeigen grössere Abweichungen der geleisteten Kraft im Vergleich zu der vorgegebenen Kraft (Delta Δ). Proband Nummer fünf zeigt ein sehr abruptes Bewegungsmuster und ebenfalls höheren Abweichungen (Delta Δ) als die ersten beiden Probanden. Im letzten Durchgang mit 45 Kilogramm hat er im Vergleich zu den anderen Probanden deutlich mehr Mühe, den Bewegungsablauf zu koordinieren. Es lässt sich vermuten, dass der Anteil an fast-twitch Fasern und Anzahl beziehungsweise Dichte der motorischen Neuronen bei den «Stop-and-go-Sportler» (Proband eins und zwei) höher sind als beim Läufer (Proband fünf) und den inaktiven Probanden drei und vier. Dies ist wiederum ein Hinweis, dass «Stop-and-go-Sportarten» mit intermittierendem Training und Intervalltraining einen positiven Einfluss auf die Koordination der exzentrischen Muskelkontraktion haben. Häufiges Training mit der Dauerethode beim Läufer scheint sich

jedoch nicht positiv auf die koordinative Fähigkeit der Muskulatur auszuwirken. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die exzentrische Muskelarbeit insgesamt präziser und konstanter koordiniert wurde als die konzentrische Muskelarbeit. Die Koordination von hohen Lasten (ab 25 Kilogramm) scheint für die Probanden einfacher zu sein als die Koordination von tiefen Lasten (15 Kilogramm). Die individuelle Koordinationsfähigkeit bei exzentrischen Muskelkontraktionen ist bei Sportlern mit einem hohen Anteil an intervall- und intermittierendem Training (beispielsweise Fussball) besser als bei inaktiven Probanden bzw. Probanden mit einem hohen Anteil an Training mit der Dauerperiode. Abschliessend darf festgehalten werden, dass sich das Muster der motorischen Kontrolle bei der konzentrischen und exzentrischen Muskelarbeit zu unterscheiden scheint. Die zu Beginn aufgestellte Hypothese, dass sich exzentrisches und konzentrisches Antizipations- und Ausführungsverhalten nicht unterscheiden, kann somit verworfen werden. Limitierend sind in der Studie die niedrige Probandenzahl und das heterogene Aktivitätsmuster. Die gleichzeitige Messung von Sauerstoffaufnahme und EMG-Aktivität verbunden mit Muskelbiopsien könnte zudem weitere Erkenntnisse zu den Unterschieden der motorischen Kontrolle bei konzentrisch versus exzentrischer Muskelarbeit geben und Hinweise hinsichtlich der involvierten biochemischen Kaskaden liefern. Aufgrund der positiven Effekte der exzentrischen Muskelarbeit auf den Sehnen-/Bänder- und Muskelaufbau bei gleichzeitig bis zu 75% geringerer Belastung des kardiovaskulären Systems als konzentrische Muskelarbeit, ermöglicht das Training exzentrischer Muskelarbeit eine optimale Stimulation der posturalen Stabilität und erlaubt es so das Sturzrisiko für Patienten selbst aus der kardialen Rehabilitation zu vermindern [1,10,13,14]. Falls sich zukünftig weitere Hinweise ergeben würden, dass die Koordination von exzentrischen Muskelkontraktionen einfacher ist, wäre dies ein weiterer Vorteil für die genannte Patientengruppe und Trainingsprotokolle könnten noch zielführender durchgeführt werden.

Danksagung und Interessenkonflikt

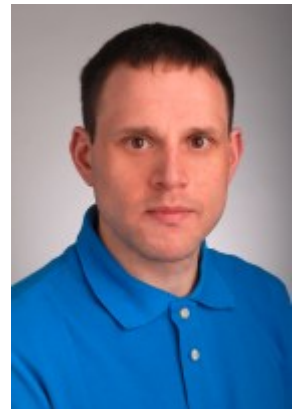
Die Verfasser bedanken sich beim Institut für Anatomie der Universität Bern für die Unterstützung. Spezieller Dank geht an Chris Johnson für das Gegenlesen des englischen Abstracts. Ein Interessenkonflikt zwischen Hersteller des Softroboters und oder den Betreibern von entsprechenden Fitnessstudios mit exzentrischen Geräten besteht nicht. Insbesondere bestehen keine finanziellen Zuwendungen durch die entsprechenden Parteien.

Key Points

- Höhere Belastungen führen zu einer präziseren Koordination der exzentrischen Muskelarbeit.
- Intermittierendes- und Intervalltraining scheint einen positiven Einfluss auf das Koordinationsverhalten bei exzentrischer Muskelarbeit zu haben.
- Die exzentrische Muskelarbeit wird auf dem Softroboter besser koordiniert als die konzentrische Muskelarbeit, was einen weiteren Vorteil beim Durchführen von Trainingsinterventionen neben der verhältnismässig geringeren Beanspruchung des kardiovaskulären Systems beispielsweise zur Sturzprophylaxe darstellt.

Korrespondenzadresse

Benedikt Gasser
Swiss Health & Performance Lab
Institute of Anatomy,
University of Bern
Baltzerstrasse 2, CH-3000 Bern
Tel: +41 31 631 84 68
Fax: +41 31 631 38 07
benedikt.gasser@yahoo.com □



Olivia Püntener
Cand. med.
Swiss Health & Performance Lab
Institute of Anatomy,
University of Bern
Baltzerstrasse 2, CH-3000 Bern
olivia.puentener@students.unibe.ch



References

1. Beck TW, Defreitas JM, Stock MS, Dillon MA. Effects of resistance training on force steadiness and common drive. *Muscle Nerve*. 2011; 43: 245–250.
2. De Luca CJ, LeFever RS, McCue MP, Xenakis AP. Control scheme governing concurrently active human motor units during voluntary contractions. *J Physiol*. 1982;329:129–142.
3. De Luca CJ, LeFever RS, McCue MP, Xenakis AP. Behaviour of human motor units in different muscles during linearly varying contractions. *J Physiol*. 1982;329:113–128.
4. Nishikawa K. Eccentric contraction: unraveling mechanisms of force enhancement and energy conservation. *Journal of Experimental Biology*. 2016; 219:189-196.
5. Hoppeler H, Baum O, Mueller M, Lurman G. Molekulare Mechanismen der Anpassungsfähigkeit der Skelettmuskulatur. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*. 2011;59:6-13.
6. Missenard O, Mottet D, Perrey S. The role of contraction in the impairment of movement accuracy with fatigue. *Exp Brain Res*. 2008; 185:151–156.
7. Missenard O, Mottet D, Perrey S. Factors responsible for force steadiness impairment with fatigue. *Muscle Nerve*. 2009;40:1019–1032.
8. Gates DH, Dingwell JB. Muscle fatigue does not lead to increases instability of upper extremity repetitive movements. *J Biomech*. 2010; 43:913–919.

9. Popper KR. Logik der Forschung. Mohr Siebeck, Tübingen, 1969.
10. Mike JN, Cole N, Herrera C, VanDusseldorp T, Kravitz L, Kerksick CM. The Effects of Eccentric Contraction Duration on Muscle Strength, Power Production, Vertical Jump, and Soreness. *J Strength Cond Res.* 2017; 31(3):773–786.
11. De Vries HA. “Efficiency of electrical activity” as a physiological measure of the functional state of muscle tissue. *Am J Phys Med.* 1968;47:10–22.
12. Moritani T, de Vries HA. Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med.* 1979;58:115–130.
13. Hoppeler H. Der Muskelkater – Schaden an der Skelettmuskulatur. *Leistungssport.* 1991;3:5-7.
14. Peñailillo L, Blazevich A, Numazawa H, Nosaka K. Metabolic and muscle damage profiles of concentric versus repeated eccentric cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 2013;45:1773–81.

CONCENTRIC MUSCLE CONTRACTION COORDINATION ECCENTRIC MUSCLE CONTRACTION MOTORIC
CONTROL