

**Zentrale Ermüdung als leistungslimitierender Faktor  
bei schnellkräftigen Kontraktionen:  
Evaluation der Ermüdungswiderstandsfähigkeit  
vor und nach Training mit Hilfe von elektrischer Nervenstimulation  
und transkranieller Magnetstimulation**

Albert Gollhofer (Projektleiter), Wolfgang Taube & Christian Leukel

Universität Freiburg

Institut für Sport und Sportwissenschaft

## **1 Problem**

Aktivitätsbedingte Ermüdung reduziert die körperliche Leistungsfähigkeit. Diese drückt sich in einem reduzierten maximalen Kraftvermögen (Gandevia, 2001), verminderter Konzentrationsfähigkeit sowie verlängerten Reaktionszeiten aus (Rietjens et al., 2005). Aktivitätsbedingte Ermüdung steht in engem Zusammenhang mit Veränderungen des neuromuskulären Systems (Ross et al., 2001). Hierbei wird zwischen zwei Formen der Ermüdung unterschieden: Wohingegen die periphere Ermüdung Veränderungen auf der Ebene des Muskels beschreibt, sind bei zentraler Ermüdung Veränderungen von Strukturen und Prozessen des zentralen Nervensystems (Gandevia, 2001) gemeint.

Gerade in Sportarten mit dem Anspruch, hohe Kraftwerte in kurzer Zeit zu produzieren (schnellkräftige Kontraktionen), stellt Ermüdung einen limitierenden Faktor für die Bewegungsausführung und somit letztlich auch für die Trainingsgestaltung dar. Ein Beispiel aus der Praxis ist die Konzeption eines Sprinttrainings, welche vor dem Hintergrund der Ermüdung vor der Schwierigkeit steht, eine optimale Dosierung von Trainingshäufigkeit und Trainingsumfang vorzugeben (Ross et al., 2001). Das Ziel dieser Studie war es, den Anteil von zentraler und peripherer Ermüdung bei explosivkräftigen Kontraktionen mit neurophysiologischen Messtechniken zu erfassen und gleichzeitig der Frage nachzugehen, ob und wie zentrale und periphere Ermüdungsphänomene durch ein Schnellkrafttraining verbessert werden können. Zu diesem Zweck wurden Indikatoren zentraler und peripherer Ermüdung bei der Durchführung explosiver Kontraktionen mit Hilfe von transkranieller Magnetstimulation (TMS) und peripherer elektrischer Stimulation (PNS) erfasst. Dies ist Gegenstand dieses Kurzberichts. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf die Darstellung der Ergebnisse des Längsschnitts der Studie verzichtet.

## 2 Methoden

17 männliche Probanden (Alter  $26 \pm 3$  Jahre) nahmen an dieser Studie teil. Alle Teilnehmer wiesen weder orthopädische noch neurologische Erkrankungen auf.

### *Messprotokoll*

Nach einer kurzen zehnminütigen Aufwärmereinheit wurden der Zielmuskel M. tibialis anterior sowie der synergistische Muskel M. peroneus und der antagonistische Muskel M. soleus des rechten Beins präpariert und mit Ableitelektroden versehen. Die Probanden wurden anschließend gebeten, in einem speziell angefertigten Messstuhl Platz zu nehmen, der mit einer mechanischen Fußgelenkswippe gekoppelt war. Der rechte Fuß der Probanden wurde in einem Pedal der Fußgelenkswippe fixiert, Beine, Oberkörper und Kopf mit starren Bändern am Messstuhl fixiert. Danach wurde die Elektrode für die periphere Nervenstimulation sowie die TMS-Spule befestigt. Somit konnte lediglich das rechte Sprunggelenk des Probanden frei bewegt werden. Die Versuchsperson wurde durch mehrere Serien von je 20 schnellkräftigen Kontraktionen ermüdet. Vor und nach den ermüdenden Kontraktionen fanden neurophysiologische Messungen statt.

### *Verwendete Methoden*

#### *TMS und PNS*

Mithilfe der TMS wurden im rechten M. tibialis anterior motorisch evozierte Potentiale (MEPs) ausgelöst. Nach Fixierung der Spule wurde die individuelle motorische Schwelle bestimmt. Die individuelle motorische Schwelle ist als die minimale Reizstärke definiert, mit der MEPs im Elektromyogramm (EMG) des Zielmuskels erkennbar sind (Kujirai et al., 1993).

Bei der PNS wurde der N. peroneus communis elektrisch gereizt, der den M. tibialis anterior motorisch und sensibel versorgt. Aufzeichnet wurde mit der PNS der maximale motorische Output ( $M_{\max}$ ) des M. tibialis anterior vor und unmittelbar nach der Ermüdung. Zusätzlich zur  $M_{\max}$  wird durch die elektrische Stimulation des Muskels eine Kraft erzeugt. Dieser Kraftimpuls bei  $M_{\max}$  wird auch maximaler Resting Motor Twitch (RMT) genannt.

#### *MEP-Rekrutierungskurven*

Die MEP-Rekrutierungskurve wurde im M. tibialis anterior in Ruhe aufgezeichnet. Bei der MEP-Rekrutierungskurve werden verschiedene Reizstärken – ausgehend von der individuellen motorischen Schwelle – appliziert. In dieser Studie wurde bei jeder Reizstärke jeweils acht Mal stimuliert: Die Reize starteten bei 80 % der individuellen Schwelle, dann 100 %, 115 %, 130 % und weiter in 15%-Schritten bis zum maximalen Output des Stimu-

lators. Bei einer Versuchsperson, die eine individuelle motorische Schwelle von 65 % des maximalen Outputs des Stimulators aufwies, wurden sechs individuelle Reizstärken (52, 65, 75, 85, 94 und 100 % des maximalen Stimulatoroutputs) bestimmt. Bei jeder MEP-Rekrutierungskurve wurde die durchschnittliche Steigung der Gesamtkurve berechnet. Bei jedem Probanden wurde eine MEP-Rekrutierungskurve vor und unmittelbar nach der Ermüdung aufgezeichnet.

#### *TMS Doppelpuls-Stimulation – Intracortical facilitation (ICF) und intracortical inhibition (ICI)*

Dieses Verfahren wird angewandt, um den Einfluss von intracorticalen Hemm- und Bahnmechanismen zu evaluieren (Kujirai et al., 1993). Einem ersten TMS-Reiz, eingestellt unterhalb der individuellen motorischen Schwelle, folgt ein zweiter Reiz oberhalb der Schwelle. Der Abstand zwischen den beiden Stimuli setzt fest, ob bahnende oder hemmende corticale Kreisläufe untersucht werden. Das Interstimulus-Intervall für die ICI wurde in dieser Studie auf 2.5 ms festgesetzt, das für die ICF auf 10 ms. Insgesamt wurden pro Bedingung (ICI, ICF und Kontrollbedingung TMS oberhalb der Schwelle ohne Konditionierung) acht Stimuli aufgezeichnet. Die TMS-Doppelpuls-Stimulation wurde bei jedem Probanden vor und unmittelbar nach der Ermüdung angewandt.

#### *Auswertung*

Prä- und post-Werte von  $M_{\max}$ , RMT, der Steigung der MEP-Rekrutierungskurven, ICF, ICI und TMS-Kontrollbedingung wurden mit einem Student'schen T-Tests miteinander verglichen. Alle Ergebnisse sind als Gruppenmittelwerte $\pm$ Standardabweichung dargestellt.

### **3 Ergebnisse**

#### *PNS*

Es ergaben sich keine Unterschiede sowohl bei  $M_{\max}$  (vor Ermüdung:  $4.92\pm 1.61$  mV vs. nach Ermüdung:  $5.07\pm 1.8$  mV,  $p=0.34$ ) als auch bei RMT (vor Ermüdung:  $2.93\pm 1.29$  Nm vs. nach Ermüdung:  $3.15\pm 1.19$  Nm,  $p=0.99$ ).

#### *TMS*

Die durchschnittliche Steigung der MEP-Rekrutierungskurven unterschied sich signifikant (vor Ermüdung:  $18.82\pm 14.1$  mV vs. nach Ermüdung:  $11.22\pm 8.12$  mV).

Bei der TMS-Doppelpuls-Stimulation waren weder ICF (vor Ermüdung:  $0.73\pm 0.32$  mV vs. nach Ermüdung:  $0.55\pm 0.25$  mV,  $p=0.12$ ), ICI (vor Ermüdung:  $0.13\pm 0.12$  mV vs. nach

Ermüdung:  $0.08 \pm 0.03$  mV,  $p=0.22$ ), noch der TMS-Kontrollreiz (vor Ermüdung:  $0.46 \pm 0.22$  mV vs. nach Ermüdung:  $0.32 \pm 0.19$  mV,  $p=0.12$ ) unterschiedlich.

#### 4 Diskussion

Das wichtigste Ergebnis aus diesem Teil der Studie ist die signifikante Verringerung der Steigung der MEP-Rekrutierungskurven, wohingegen sich  $M_{\max}$  und RMT vor und nach der Ermüdung nicht voneinander unterschieden. ICF, ICI und die TMS-Kontrollbedingung waren vor und nach der Ermüdung nicht unterschiedlich.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann vermutet werden, dass die Verringerung der Muskelkraft bei wiederholenden schnellkräftigen Kontraktionen stärker zentraler und weniger peripherer Ermüdung zuzuschreiben ist. Bei ermüdenden Maximalkraftkontraktionen scheinen dagegen periphere Mechanismen eine wesentlich größere Rolle zu spielen (Linnamo et al., 1998). Die Frage, welche Strukturen und Prozesse des zentralen Nervensystems bei schnellkräftigen Kontraktionen ermüdet werden, kann mit der vorliegenden Arbeit nicht endgültig geklärt werden. Zwar können Veränderungen von intracortikalen Kreisläufen (ICF, ICI) in dieser Studie nicht bestätigt werden, ermüdungsbedingte Modulationen supraspinaler Zentren (beispielsweise von subcorticalen Strukturen) sind dadurch jedoch nicht ausgeschlossen. Veränderungen könnten sich auch auf Ebene des Rückenmarks ergeben. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf.

Die Beobachtung, dass vor allem zentrale und nicht periphere Faktoren zu einer überdauernden Leistungseinbuße führen, unterstreicht, dass der Athlet in der Trainingspraxis nur mental ausgeruht und voll motiviert an die Grenzen seiner explosiven Leistungsfähigkeit geführt werden kann. Die Beobachtung von überwiegend supraspinalen Adaptationsvorgängen nach Schnellkrafttraining (Beck et al., 2007) und primär zentral ausgerichteter Ermüdung nach ballistischen Kontraktionen legt den Schluss nahe, dass vor allem kortikale Ermüdungserscheinungen für den Abfall der Leistung verantwortlich sind. In den noch unveröffentlichten Daten des Längsschnitts dieser Studie finden sich Hinweise, dass durch Schnellkrafttraining Prozesse des zentralen Nervensystems verändert werden, die dazu beitragen, die Ermüdungswiderstandsfähigkeit zu erhöhen. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, ob es andere Trainingsformen gibt, die dieses Ziel effektiver bzw. weniger belastungsintensiv gewährleisten. Beispielsweise konnte auch nach einem sensomotorischen Training die Explosivkraft signifikant verbessert werden (Gruber & Gollhofer, 2004). Darüber hinaus wurde gezeigt, dass durch solch eine Trainingsform ebenfalls neuronale Plastizität supraspinaler Zentren stattfindet (Taube et al., 2007). Weiterführende Studien müssen Aufschluss über die genaue Lokalisation der Ermüdung geben und den Vergleich verschiedener Trainingsformen durchführen.

## 5 Literatur

- Beck, S., Taube, W., Gruber, M., Amtage, F., Gollhofer, A. & Schubert, M. (2007). Task-specific changes in motor evoked potentials of lower limb muscles after different training interventions. *Brain Research* (25.08.2007, 17889840).
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev.*, 81, 1725-1789.
- Gruber, M. & Gollhofer, A. (2004). Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *Eur. J Appl. Physiol*, 92, 98-105.
- Kujirai, T., Caramia, M. D., Rothwell, J. C., Day, B. L., Thompson, P. D., Ferbert, A., Wroe, S., Asselman, P. & Marsden, C. D. (1993). Corticocortical inhibition in human motor cortex. *J Physiol*, 471, 501-519.
- Linnamo, V., Hakkinen, K. & Komi, P. V. (1998). Neuromuscular fatigue and recovery in maximal compared to explosive strength loading. *Eur. J Appl. Physiol Occup. Physiol*, 77, 176-181.
- Rietjens, G. J., Kuipers, H., Adam, J. J., Saris, W. H., van Breda, E. & Hamont, D. (2005). Physiological, biochemical and psychological markers of strenuous training-induced fatigue. *Int J Sports Med.*, 26, 16-26.
- Ross, A., Leveritt, M. & Riek, S. (2001). Neural influences on sprint running: training adaptations and acute responses. *Sports Med.*, 31, 409-425.
- Taube, W., Gruber, M., Beck, S., Faist, M., Gollhofer, A. & Schubert, M. (2007). Cortical and spinal adaptations induced by balance training. Correlation between stance stability and corticospinal activation. *Acta Physiologica*, 189 (4), 347-358.

