
Experimentelle Untersuchungen von Phänomenen der Willkürmotorik bei lokaler/differenzieller Muskelermüdung¹

Hans-Alexander Thorhauer (Projektleiter),
Sven Michel, Lutz Hoffmann, Falk Werner, Khaled Sorour

Universität Jena
Institut für Sportwissenschaft

1 Problem

Die Steigerung der sportlichen Leistung, ohne Doping und Pharmakamissbrauch, verlangt weitere Fortschritte im Verständnis des belastungsmethodischen Vorgehens in Trainingsprozessen. Insofern wird im Bereich der Trainingswissenschaft versucht, auf der Basis grundlagenorientierter Forschungsergebnisse (\Rightarrow Basis- und Kontaktwissenschaften: vgl. z.B. Scholle et al., 2001; Seyfarth et al., 2002), Gesetzmäßigkeiten, Prinzipien und Regeln des sportlichen Trainings zu formulieren (vgl. Thorhauer & Türk-Noack, 1997).

Ein Ansatz geht davon aus, dass der menschliche Körper in der Lage ist, lokal auftretende neuromuskuläre Funktionsdefizite zu kompensieren. National als auch international liegen wenige Ergebnisse vor, die zudem kontrovers diskutiert werden (vgl. Michel, 2003).

Die Arbeitsgruppe Trainingswissenschaft in Jena widmet sich Kompensationsmechanismen in Folge lokal/differenzieller muskulärer Belastungen. Ziel ist es, diese Mechanismen zu erkennen und so aufzubauen, dass das Nerv-Muskel-System im unermüdeten Zustand bei konkret sporttechnischen Anforderungen mit einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit reagiert (vgl. Thorhauer et al., 2001). Folglich lautet der zentrale Forschungsansatz:

Lokale/differenzielle Muskel-Vor-Ermüdung erlaubt den gezielten Aufbau neuromuskulärer Kompensationsmechanismen, die zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit muskulärer Antriebe des agierenden intermuskulären Systems im unermüdeten Zustand führen.

2 Methodik

Insgesamt wurden elf männliche, gesunde Sportler, welche in ihrer Freizeit wöchentlich seit mehr als fünf Jahren ein vier- bis achtmaliges kraftorientiertes Training absolvieren, in die Untersuchung einbezogen. Untersuchungsgegenstand war die lokale Ermüdung des *M. rectus femoris* (Vorzugsbein) unter Laborbedingungen. Die Ermüdung wurde mittels

¹ VF 0407/08/03/2001-03

externer Elektromyostimulation (Compex Sport P) vollzogen. Kontrollübung war ein drop jump (Fallhöhe 40 cm, Zielorientierung: Sprunghöhe, Analyse von Landung und Absprung A = Phase des 1. Bodenkontakts).

Tab. 1: EMS-Programm

Impulsstärke	40 mA
Impulsbreite	individuell nach folgender Gleichung: $CK * [1 + (450 - R / 300)] = IB$ $Ck = \text{Chronaxiekoeffizient des } M. \text{ rectus femoris}$ $R = \text{Körperhöhe}^2 / \text{Körpergewicht}$ $IB = \text{Impulsbreite}$
Impulsform	symmetrischer Zweiphasen-Rechteckimpuls
Impulsfrequenz	120 Hz
Kontraktionsdauer	4 s
Pausendauer	2 s
Zahl der Wiederholungen	10
Gesamtdauer	60 s
Gesamtarbeitsquantität eines Kontraktions-/Pausenzykluses, Gesamtarbeitsquantität	486 J, 4860 J

Mess- und Analyseverfahren:

- Videoaufzeichnung (digital „Canon XL 1“)
- Videodigitalisierungssystem (DIVAS von Datenhaus Berlin)
- Videoanalyseprogramm (2-D „Motiolyse“ ISW der Uni Bielefeld)
- Kurzzeitmesssystem („Opto Jump“ von Migrogate)
- Elektromyographie (32 Kanal, bipolare Oberflächenelektroden, BIOVISON Frankfurt/M.)
- Beschleunigungsaufnehmer, Druckkraftaufnehmer (BIOVISON Frankfurt a. Main)
- diverse medizinisch-physikalische Messverfahren (Hauttemperatur, Oberschenkel – umfang, et al.)

3 Ergebnisse

Von besonderem Interesse sind die Auswirkungen auf die Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit (Flugzeit, Flughöhe), auf die Muskelaktionspotentiale (IEMG, EMG-Maximum, VI-Dauer, IEMG (VI), EMG-Maximum (VI)), sowie auf kinematische Parameter der Bewegungsführung (Winkel/Winkelamplituden: Sprung-, Knie-, Hüftgelenk; Körperschwerpunkt).

Sportliche Leistung:

- kein signifikanter Leistungsverlust trotz lokaler Muskelermüdung

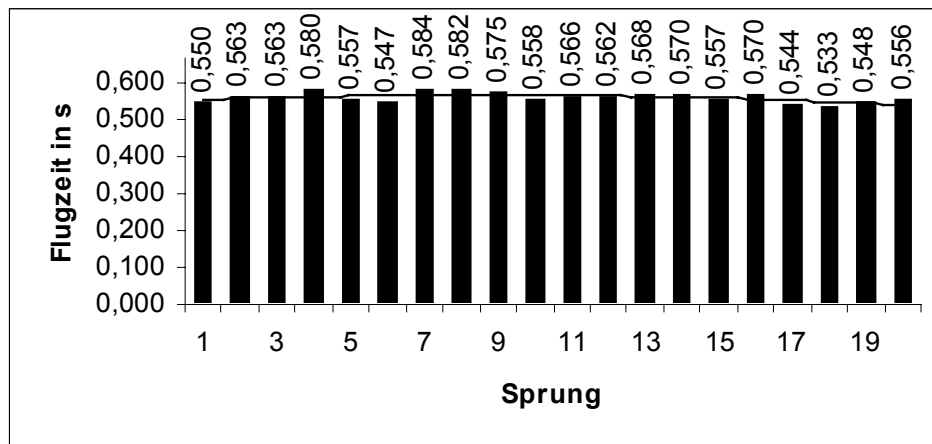


Abb. 1: Flugzeiten – Proband 1

- signifikanter Anstieg der Bodenkontaktzeiten

Kinematik:

Vergleich zwischen Winkel/Winkelamplituden (ermüdet) und Winkel/Winkelamplituden (unermüdet):

- signifikant stärkere Flexion im Sprunggelenk (Landung A, Sprung ermüdet \Rightarrow alle Probanden)
- signifikant stärkere Flexion im Kniegelenk (Landung A, Sprung ermüdet \Rightarrow alle Probanden)
- keine signifikant stärkere bzw. gleichbleibende Flexion im Hüftgelenk (Landung A, Sprung ermüdet \Rightarrow alle Probanden)
- mehrheitlich verstärkte Extension im Sprunggelenk (Absprung, Sprung ermüdet)
- keine signifikant stärkere bzw. gleichbleibende Extension im Kniegelenk (Absprung, Sprung ermüdet \Rightarrow alle Probanden)
- vereinzelt stärkere Extension im Hüftgelenk (Absprung, Sprung ermüdet)
- signifikante Zunahme der Sprunggelenk–Winkelamplitude (Landung A bis Absprung, Sprung ermüdet \Rightarrow alle Probanden)
- signifikante Zunahme der Kniegelenk–Winkelamplitude (Landung A bis Absprung, Sprung ermüdet \Rightarrow alle Probanden)
- vereinzelte Zunahme der Hüftgelenk–Winkelamplitude (Landung A bis Absprung, Sprung ermüdet)

Muskelaktionspotentiale:

mit steigender Ermüdung für die Parameter IEMG, EMG–Maximum, VI–Dauer, IEMG (VI), EMG–Maximum (VI):

- *M. biceps femoris*: signifikanter Anstieg (beidseitig)
- *M. vastus medialis*: signifikanter Anstieg (beidseitig)
- *M. adductor magnus*: signifikanter Anstieg (beidseitig)
- *M. peroneus longus*: signifikanter Anstieg (beidseitig)
- *M. gastrocnemius, caput mediale*: signifikanter Anstieg (beidseitig)
- *M. tibialis anterior*: signifikanter Anstieg (beidseitig)
- *M. rectus femoris*: signifikante Abfall (einseitig, EMS – belastetes Bein)
- *M. rectus femoris*: signifikanter Anstieg (einseitig, unbelastetes Bein)
- *M. erector iliocostalis*: vereinzelter Anstieg (beidseitig)
- *M. obliquus internus, M. obliquus externus, M. multifidus, M. gluteus medius, M. gluteus maximus*: kein für alle Probanden einheitliches Abnahme- oder Anstiegsmuster

Im Rechts-Links-Vergleich zeigt sich auf Seiten der EMS-Belastung für den *M. vastus medialis* und *M. adductor magnus* ein signifikant stärkerer Anstieg (alle EMG-Parameter).

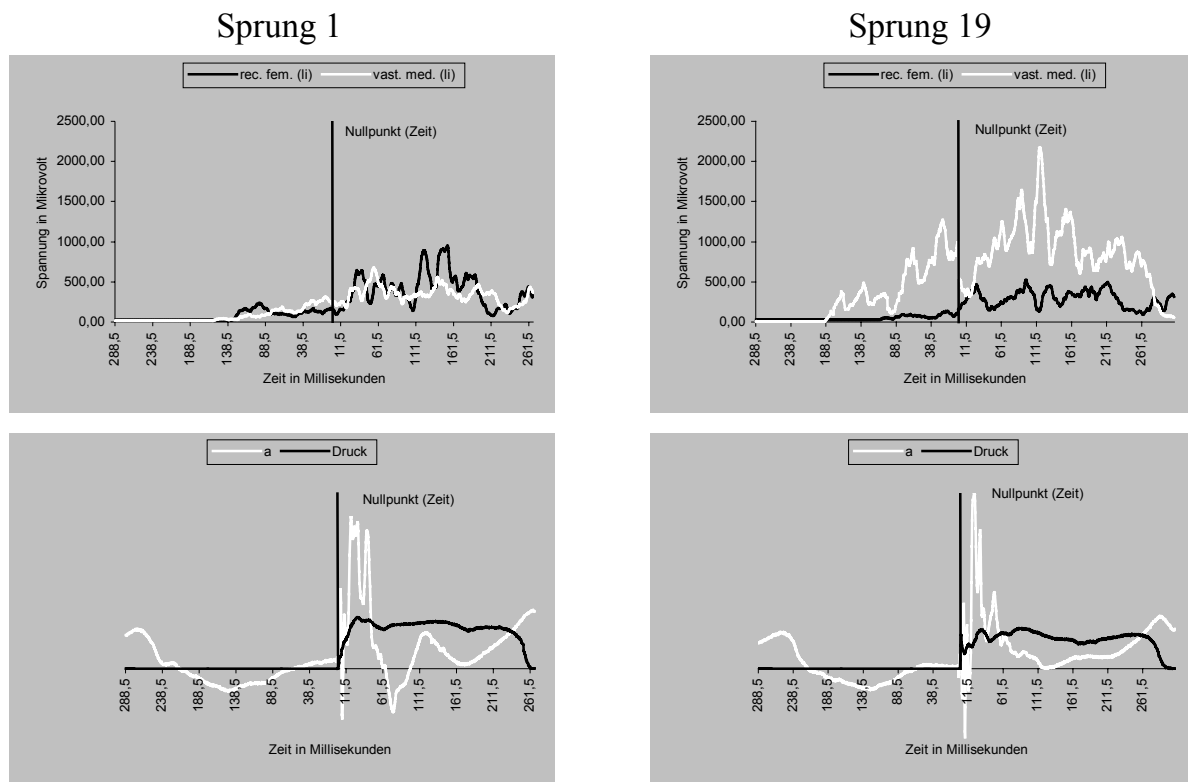


Abb. 2: EMG (*M. vastus medialis* und *M. rectus femoris*, links, EMS) – Proband 1

4 Zusammenfassung und Folgerungen

Als Methode der Muskelbelastung ist die externe Elektromyostimulation (eEMS) zur „punktgenauen“ Ermüdung einzelner Kinetoren geeignet. Die befürchteten „Nebenwirkungen“ wie Erwärmung/Überwärmung der stimulierten Muskeln, Rötung der Haut, Schwellung des Muskels verbunden mit Druckschmerz sowie Reiz-Stimulus-Schmerzen und Ängste bei Grenzwertigkeit von Stimulationsparametern sind nach individualisierten Anpassungs-TE beherrschbar, nicht leistungsmindernd oder motivationshemmend.

Die lokale Muskelermüdung mittels eEMS bestätigt frühere Untersuchungen, dass eine Reihe von weitgehend autonomen Regulationsmechanismen in der Lage sind, die im Verlaufe von Ermüdungsbelastungen reversiblen Einschränkungen der sportlichen Leistung weit hinaus zu schieben. Das heißt, der partielle Rückgang der Leistungsfähigkeit des ermüdeten Muskels, der sich mittels EMG quantifizieren lässt, wird durch teilweise verschiedene und individualisiert benutzte bzw. entwickelte Kompensationsmechanismen ausgeglichen.

Die durch eEMS ausgelöste Ermüdung (hier: *M. rectus femoris*) führt zu einer Verringerung der sogenannten Gelenksteifigkeit. Dies wird aus der stärkeren Flexion im Knie- und Sprunggelenk geschlussfolgert, verbunden mit einer Vergrößerung der Arbeits- und Beschleunigungswege. Im konkreten Fall der Kontrollübung „drop jump“ korrespondiert damit eine intensivere Extension im Hüftgelenk, die stärkere Absenkung des Körperschwerpunktes und der Anstieg der Bodenkontaktzeit.

Für die vorliegende Untersuchung können eine Reihe von Kompensationsmechanismen mit Hilfe kinematischer Analysen sowie mittels EMG-Parameter beschrieben werden. Was Ursache bzw. Wirkung ist kann jedoch nicht hinreichend geklärt werden. Fakt ist, dass eine veränderte Bein kinematik und eine in vielen Details veränderte neuromuskuläre Regulationen quantifiziert werden kann.

Abschließend sind – durch Retest gesichert – folgende Mechanismen für den der Erhalt der sportlichen Leistung trotz lokal-muskulärer Funktionsdefizite herauszustellen:

1. Bewegungskinematik:

- Verstärkung der Flexion im Sprung- und im Kniegelenk;
- Verstärkung der Extension im Hüftgelenk;
- Verlängerung der Bodenkontaktzeiten;
- Absenkung des Körperschwerpunktes;
- Vergrößerung der Winkelamplituden (Sprung-, Knie- und Hüftgelenk).

2. (neuro-) muskuläres System:

- Erhöhung der Muskelaktionspotentiale (verstärkte Vorinnervation, verstärkte Aktivität in der Hauptaktivitätsphase) von beteiligten Kinetoren (vor allem „Synergistenaufschaltung“);
- verstärkte Einbeziehung der Muskulatur der Gegenseite/des Gegenbeins (Ausgleichsstrategie);
- Aktivitätserhöhung des *M. vastus medialis* bei lokaler Ermüdung des *M. rectus femoris* (intramuskuläre Regulation);

Für den zentralen Forschungsansatz ist fundamental: alle Probanden regeln ohne Ausnahme die nachlassende Leistungsfähigkeit des *M. rectus femoris* durch den *M. vastus femoris*.

Weitere Untersuchungen müssen vor allem überprüfen, ob es sich um einen generellen Mechanismus handelt, welcher durch eine zweiseitige Fragestellung exponiert werden kann. Vorgesehen ist deshalb ein Nachfolgeexperiment mit eEMS des *M. vastus medialis*.

5 Literatur

- Michel, S. (2001). Muskuläre Ermüdung. Theoretische Grundlagen und experimentelle Befunde. In Tectum Verlag (Hrsg.), *Edition Wissenschaft*. Marburg.
- Michel, S. (2003). Externe Elektromyostimulation und lokale Muskelermüdung. Auswirkungen auf ausgewählte Bewegungsparameter der unteren Extremitäten. In Tectum Verlag (Hrsg.), *Edition Wissenschaft*. Marburg.
- Olivier, N. (1996). *Techniktraining unter konditioneller Belastung*. Schorndorf.
- Scholle, H.-C. et al. (2001). Ermüdung und koordinative Leistung. In H.-A. Thorhauer et al. (Hrsg.), *Muskel-Ermüdung. Forschungsansätze in der Trainingswissenschaft* (S. 17-28). Köln.
- Seyfarth, A. (1999). Dynamics of the long jump. *J. of Biom.*, 32, 1259-1267.
- Seyfarth, A. et al. (2002). A movement criterion for running. *J. of Biom.*, 5, 648-655.
- Thorhauer, H.-A.; Türk-Noack, U. (1997). Der Spitzensport an der Schwelle ins 21. Jahrhundert. *Leipziger Sportwissenschaftliche Beiträge*, 2, 1-23.
- Thorhauer, H.-A. et al. (2003). Experimentelle Untersuchungen von Phänomenen der Willkürmotorik bei lokaler/differenzieller Muskelermüdung. Zwischenbericht zu BISp-Projekt. Jena.