

(Aus: Sportwissenschaft. 27. Jg. (1997) 4:428-436)

KLAUS WIEMANN und THOMAS FISCHER

Ruhespannung und Muskelkater

Muscle resting tension and delayed onset muscle soreness

Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, zu prüfen, ob die Empfindung erhöhter Muskelspannung bei Muskelkater einer Erhöhung der Ruhespannung entspricht. 22 männliche Probanden führten ein rd. 15-min exzentrisches Krafttraining für die ischiokruralen Muskeln aus. Vor, unmittelbar nach und 2 Tage nach dem Training wurde das Ruhespannungs-Dehnungsverhalten der ischiokruralen Muskeln ermittelt. Zusätzlich schätzten die Probanden die Stärke des Muskelkaters 2 Tage nach dem Training mit Hilfe einer 5-stufigen Skala. Unmittelbar nach dem Training war die Ruhespannung zwar um bis zu 13% erhöht ($p < 0,01$), zur Zeit des stärksten Muskelkaters (nach 2 Tagen) zeigte sich dagegen eine geringfügige Absenkung der Ruhespannung gegenüber dem Vortest. Dies läßt vermuten, daß die Empfindung erhöhter Muskelspannung bei Muskelkater durch Propriozeptoren des muskulären Bindegewebes vermittelt wird.

Summary

Delayed onset muscle soreness (DOMS) usually is accompanied with a sensation of increased muscle tension. The purpose of this study was to investigate whether or not the feeling of increased muscle stress during DOMS corresponds to an instrumentally recordable increased passive muscle stretch tension. An experimental group of 22 males performed an eccentric resistance training (5 sets, 12 reps per set, 2 min rest per set) of the hamstring muscles. Before (t_1), immediately after (t_2), and two days after (t_3) the workout, a straight leg raising test was performed to record the stretch-tension behaviour of the hamstrings, using an experimental station. Two days after exercise DOMS was scored on a scale from 0 to 5. Immediately after exercise (t_2), the resting tension was increased by 13% ($p < 0.01$). At the time of greatest DOMS, after two days (t_3), there was a small decrease in resting tension (compared to t_1). No correlation between the DOMS scores and the stretch tension of t_3 could be detected. These results suggest that the sensation of increased muscle strain during DOMS cannot be attributed to increased stretch tension, but to proprioceptive sources of the muscular connective tissue, presumably.

(Aus: Sportwissenschaft. 27. Jg. (1997) 4:428-436)

KLAUS WIEMANN und THOMAS FISCHER

Ruhespannung und Muskelkater

Einleitung

Als *Ruhespannung* des Muskels bezeichnet man die elastische Spannung des inaktiven Muskels (bzw. der inaktiven Muskelfaser). Sie steigt mit zunehmender Dehnung des Muskels exponentiell an und wird u.a. laut MAGID & LAW (1985) und MARUYAMA et al. (1989) zumindest im unteren bis mittleren Dehnungsbereich (bis 130% Ruhelänge) vorwiegend durch die Titin-Filamente, die sich zwischen Z- und M-Scheiben des Sarkomers ausspannen, und durch das filamentäre Strukturgitter innerhalb der Muskelfaser (Abb. 1) erzeugt. Am lebenden Muskel des Menschen lässt sich die Ruhespannung durch den Widerstand bestimmen, den der inaktive Muskel einem Dehnungsvorgang entgegensetzt, wie bei WIEMANN (1991) beschrieben. In diesem Fall lässt sich die Ruhespannung auch als *Ruhedehnungsspannung* bezeichnen.

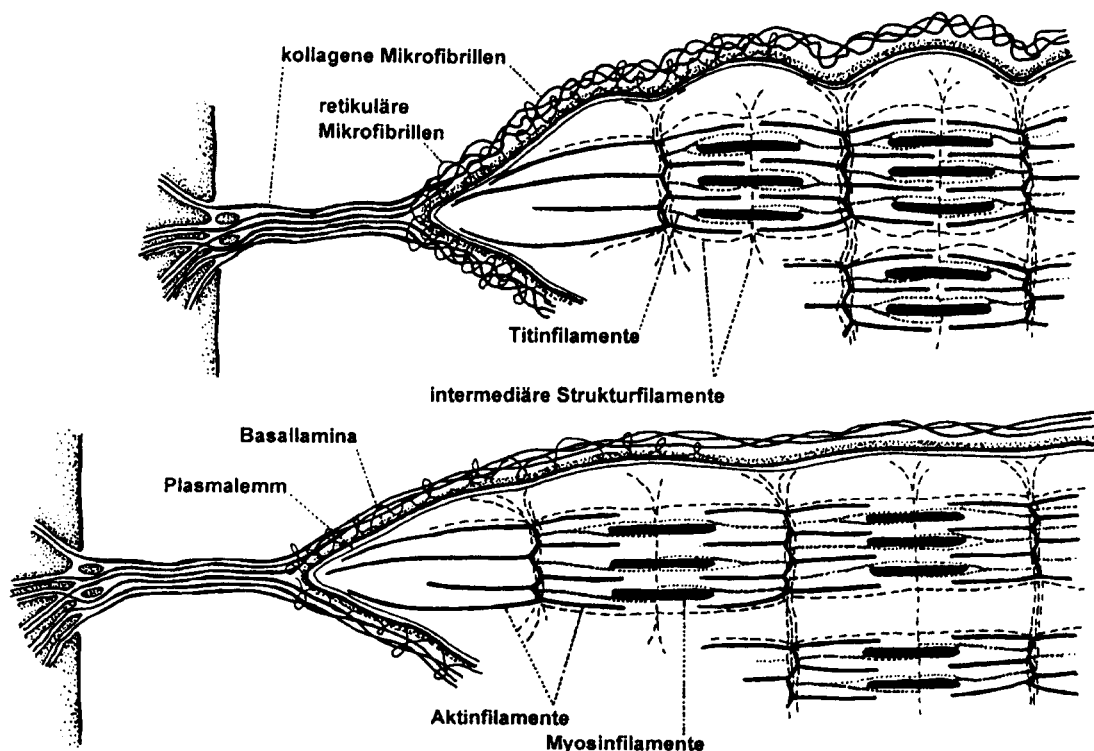


Abb. 1: Schematische Darstellung der fibrillären Struktur der Muskelfaser (verändert nach KRSTIC 1978, STREET 1983 und MARUYAMA et al. 1984). *oben:* entdehnter Zustand. *unten:* gedehnter Zustand

Obwohl Trainierende nach ausgiebigem Dehnungstraining bzw. Stretching die Empfindung haben, die muskulären Spannungen seien gegenüber dem Vor-Trainingszustand spürbar abgesenkt, läßt sich - von geringen Aufwärmeeffekten abgesehen - weder nach einem 15-minütigen Dehnungsprogramm (WIEMANN 1994), noch nach einem 10-wöchigen Dehnungstraining (WIEMANN 1991) eine gegenüber dem Vortestzustand abgesenkte Ruhedehnungsspannung registrieren. Die Empfindung reduzierter Muskelspannung nach Dehnungstraining muß demnach auf andere Ursachen zurückgeführt werden, etwa auf Anpassungs- (Adaptations-) Phänomene der Propriozeptoren z. B. der Dehnungs- und Spannungsrezeptoren des Muskels und/oder der Mechanorezeptoren des intramuskulären Bindegewebes. Sollten am Zustandekommen der Spannungsempfindung auch die Ib-Rezeptoren (GOLGI-Sehnenorgane) beteiligt sein, könnten die Befunde von HUTTON & NELSON (1986) über die Ib-Nacheffekte (= reduzierte Entladungen) im Anschluß an Spannungsbelastungen des Muskels dazu eine Erklärung beisteuern.

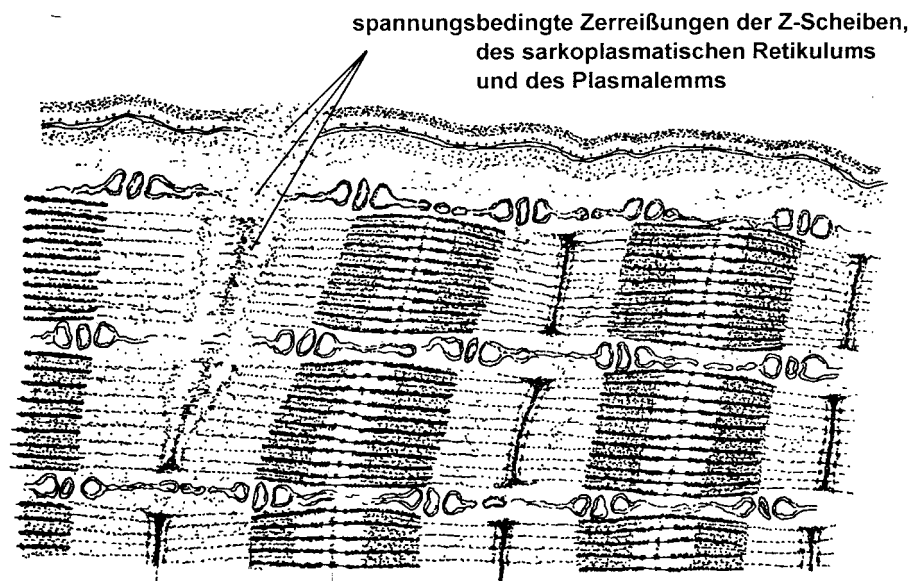


Abb. 2: Belastungsbedingte Mikrotraumen im Bereich des Sarkolemms und der Myofibrillen der Muskelfaser (verändert nach EVANS & CANNON 1987)

Zu fragen ist, ob demgegenüber die Empfindung **erhöhter** Muskelspannung, wie sie zum Beispiel im Zusammenhang mit Muskelkater (= „verzögert auftretender Muskelschmerz“) berichtet wird, auf einem realen Anstieg der Ruhespannung beruht oder durch andere Phänomene erklärt werden muß. Eine erhöhte muskuläre Spannung bei Muskelkater könnte darauf zurückgeführt werden, daß durch die bei Muskelkater vorliegenden Mikrotraumen - u.a. Zerreißen des sarkoplasmatischen Retikulums und des Sarkolemms (Abb. 2; EVANS 1987) - ein gesteigener Ca^{2+} -Gehalt des Sarkoplasmas beobachtet wurde (CLARKSON & TREMBLAY 1988), was im ruhenden

Muskel zur spontanen (nicht auf Erregungsprozessen beruhenden) Bildung von Querbrücken führen und eine Ursache der bei Muskelkater beschriebenen Muskelverkürzungen (CLEAK & ESTON 1992) darstellen könnte. Dies müßte sich im Dehnungstest als erhöhte Dehnungsspannung niederschlagen. Zur Prüfung dieser Vermutung wurde in der vorliegenden Studie das Ruhespannungs-Dehnungsverhalten der ischiokruralen Muskeln nach einem Muskelkater erzeugenden exzentrischen Training untersucht.

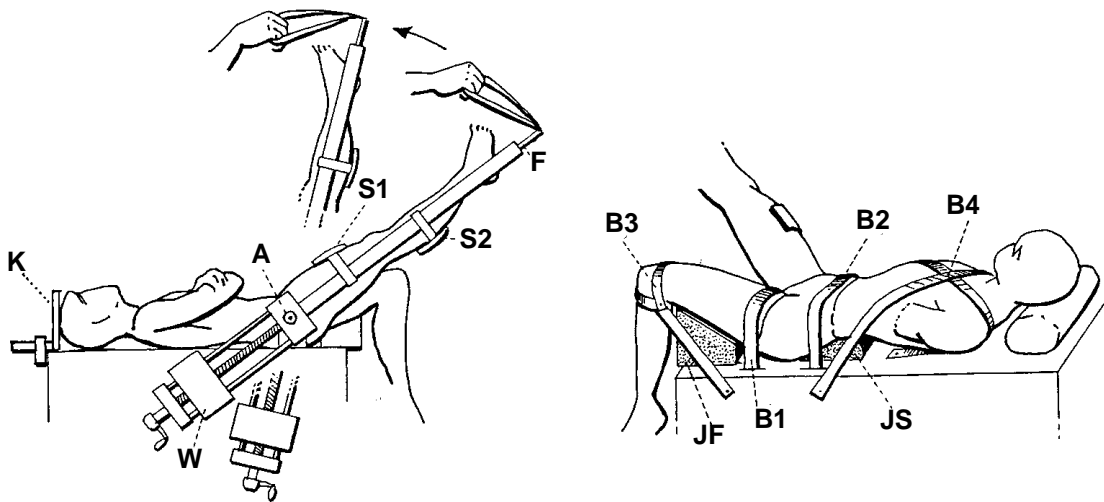


Abb. 3: Diagnosestation für Dehnungstests der ischiokruralen Muskeln. *oben:* Dehnungswaage. *unten:* Gurtung zur Fixierung der Versuchsperson. A Achse des den Hüftbeugewinkel messenden Goniometers. B1 Oberschenkelgurt. B2 Beckengurt (B1 und B2 verhindern in Verbindung mit JS ein Rotieren des Beckens um eine transversale Achse). B3 Kniegurt. B4 Schultergurte (B3 und B4 verhindern ein Verrutschen in cranialer oder caudaler Richtung). F Kraftaufnehmer zur Bestimmung der Dehnungsspannung. JF Oberschenkelstütze. JS Kreuzbeinstütze. K Kopfanschlag. S1 Oberschenkelauflage. S2 Wadenauflage. W Gegengewichte (K, S1, S2 und W justierbar)

Methoden

Als Versuchspersonen dienten 22 männliche Studenten im Alter von 24-29 Jahren, die vor dem Test über mögliche Risiken des Experimentes ausführlich unterrichtet wurden. Das Testen des Ruhespannungs-Dehnungsverhaltens der ischiokruralen Muskeln des rechten Beines vollzog sich auf der bei WIEMANN (1991) beschriebenen Diagnosestation (Abb. 3): Nach einem 10-minütigen Aufwärmen (Einlaufen ohne Dehnübungen) wurden vor (Vt) und unmittelbar nach (Zt) dem exzentrischen Training sowie zwei Tage später (Nt) jeweils drei Dehnungsprozeduren absolviert. Jede Dehnprozedur zeigte - bei in Streckstellung arretiertem Kniegelenk - eine gleichmäßig ansteigende und wieder abklingende Geschwindigkeit der Hüftbeugebewegung (im mittleren, schnellsten Abschnitt etwa 45°/sec, was einer Dehnungsgeschwindigkeit der ischiokruralen Muskeln von rund 0,14 Faserlängen/s entspricht) bis zu demjenigen

Hüftbeugewinkel, in dem die Vp ein Signal darüber gab, daß sie ein weiteres Ansteigen des Spannungsgefühl in den ischiokruralen Muskeln nicht mehr tolerieren wollte. Während des Dehnvorganges wurden fortlaufend in einer Frequenz von 1000 Hz der Hüftbeugewinkel und die Dehnungsspannung registriert. Als Meßwerte für die Ruhedehnungsspannung dienten diejenigen Spannungswerte, die ab 20° Hüftbeugewinkel (gestrecktes Hüftgelenk = 0°) in Schritten von 5° bis zum Hüftbeugewinkel von 65° (S_{20° - S_{65°) auftraten, sowie der pro Dehnungsprozedur erreichte maximale Hüftbeugewinkel (W_{max}) und die zur Erreichung des maximalen Hüftbeugewinkels erforderliche Dehnungsspannung (S_{max}). Zur exakten Reproduktion der Dehnungsbedingungen in Vt, Zt und Nt konnten die Einstellungen aller justierbaren Teile der Diagnosestation (Kopfanschlag, Gewichte, Ober- und Unterschenkelauflage; s. Abb. 3) auf 0,5 mm genau abgelesen und wieder eingestellt werden.

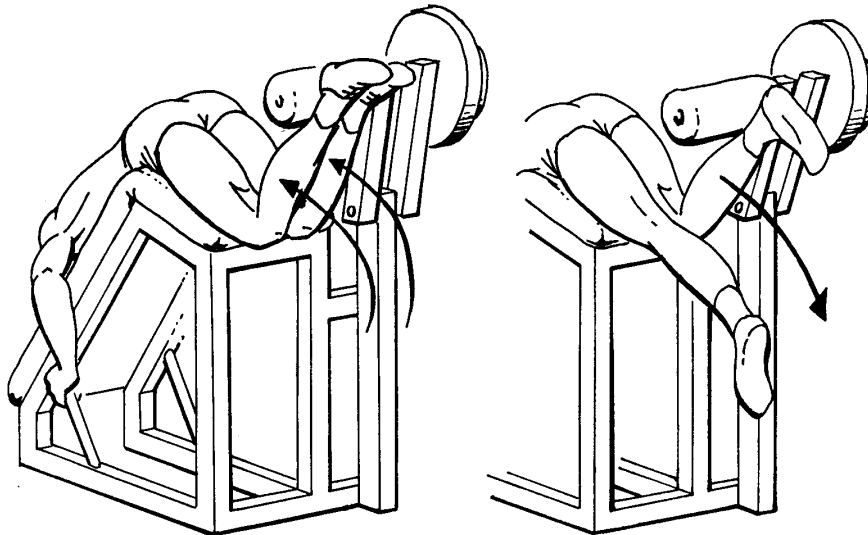


Abb. 4: Ablauf des exzentrischen Trainings der ischiokruralen Muskulatur. *links:* beidbeiniges (konzentrisches) Heben. *rechts:* einbeiniges (exzentrisches) Senken

Zum exzentrischen Training begaben sich die Probanden auf eine Beinbeugemaschine und trainierten 5 Sätze mit jeweils 12 maximalen Wiederholungen und 2 min Pause zwischen den Sätzen. Die pro Vp angepaßte Last wurde bei jeder Wiederholung mit *beiden* Unterschenkeln bis zum Anschlag gehoben (konzentrische Aktion), dann war das linke Knie zu strecken und die Last *allein mit dem rechten* Unterschenkel langsam abzusenken (exzentrische Belastung; Abb. 4).

Zwei Tage nach dem exzentrischen Training (zur Zeit des Nachttests) schätzten die Vpn die Stärke des Muskelkaters des rechten Beines auf einer 5-stufigen Skala von 0 (= kein Muskelkater) bis 4 (sehr schmerzhafter Muskelkater) ein.

Ergebnisse

Alle untersuchten Vpn berichteten 2 Tage nach dem exzentrischen Training über

Muskelkater im rechten Oberschenkel. Bei der subjektiven Einschätzung der „Stärke“ des Muskelkaters in die Skalengruppen 0 - 4 betrug die absoluten Häufigkeiten $n_0 = 0$, $n_1 = 7$, $n_2 = 5$, $n_3 = 7$ und $n_4 = 3$.

Unmittelbar nach dem exzentrischen Training (Zt) war im Dehnungstest die Ruhedehnungsspannung ab einem Hüftbeugewinkel von 40° an aufwärts signifikant bis hoch signifikant erhöht (Abb. 5). Die Prozentwerte des Anstiegs sind Tabelle I zu entnehmen. Ebenso wurde ein hoch signifikant größerer maximaler Hüftbeugewinkel bei einer ebenfalls hoch signifikant höheren maximalen Dehnungsspannung erreicht. Im Gegensatz dazu nahm im Nachtest zwei Tage nach dem exzentrischen Training die Ruhespannung im Durchschnitt niedrigere Werte als im Vortest an (Abb. 6). Diese Differenzen sind jedoch nur bei den Hüftbeugewinkeln von 20° und 25° signifikant. Darüber hinaus ergaben die Dehnungsprozeduren des Nachtests im Durchschnitt einen hoch signifikant niedrigeren maximalen Hüftbeugewinkel bei entsprechend niedrigerer maximalen Dehnungsspannung.

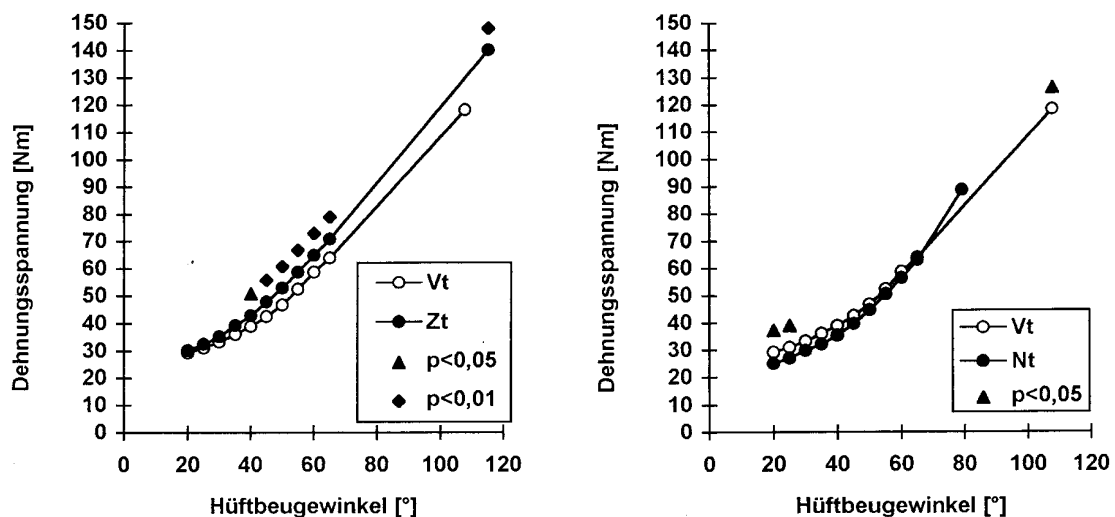


Abb. 5 (links): Ruhespannungs-Dehnungskurve der ischiokruralen Muskeln vor (Vt) und unmittelbar nach (Zt) einem exzentrischen Training

Abb. 6 (rechts): Ruhespannungs-Dehnungskurve der ischiokruralen Muskeln vor (Vt) und zwei Tage nach (Nt) einem exzentrischen Training

Zwischen den Zt-Vt-Differenzen der Ruhedehnungsspannungen und der Stärke des Muskelkaters ergaben sich eine positive Korrelationen (SPEARMANsche Rangkorrelation), die signifikante bis hoch signifikante Werte von $r = 0,476$ bei 30° Hüftbeugewinkel bis $r = 0,581$ bei 65° Hüftbeugewinkel annahmen. Das bedeutet: Je höher die Ruhespannung im Zwischentest (direkt nach dem exzentrischen Training) über dem Vortestniveau lag, desto stärker war der Muskelkater 2 Tage nach dem exzentrischen Training. Eine entsprechende Prüfung der Nt-Vt-Differenzen der Ruhedehnungsspannung mit dem Grad des Muskelkaters lieferte keine signifikanten

Koeffizienten. Demgegenüber korrelierten die im Nachtest erreichten Werte des maximalen Hüftbeugewinkels und der maximalen Dehnungsspannung hoch signifikant negativ mit dem Grad des Muskelkaters ($r = -0,612$ bzw. $r = -0,629$). Ebenso korreliert die Nt-Vt-Differenz des maximalen Hüftbeugewinkels und der maximalen Dehnungsspannung hoch signifikant negativ mit dem Grad des Muskelkaters ($r = -0,644$ bzw. $r = -0,510$).

Tabelle I: Ruhedehnungsspannung ($S_{20^\circ} - S_{65^\circ}$), maximaler Hüftbeugewinkel (W_{max}) und maximale Dehnungsspannung (S_{max}) der ischiokruralen Muskeln während des Hüftbeugetests (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen) vor (Vt), unmittelbar nach (Zt) und 2 Tage nach (Nt) einem exzentrischen Training

	Vt		Zt		Nt		Zt-Vt-Diff.			Nt-Vt-Diff.		
	MW	± SD	MW	± SD	MW	± SD	[%]	df	p	[%]	df	p
S_{20°} [Nm]	29,2	± 7,5	30,2	± 8,6	25,2	± 8,6	3,5	21		-13,8	21	p < 0,05
S_{25°} [Nm]	31,0	± 8,0	32,6	± 9,0	27,1	± 9,2	5,0	21		-12,6	21	p < 0,05
S_{30°} [Nm]	33,3	± 8,7	35,3	± 9,7	29,8	± 9,9	6,1	21		-10,4	21	
S_{35°} [Nm]	36,1	± 9,8	39,4	± 10,1	32,1	± 10,0	9,0	21	p < 0,1	-11,2	21	p < 0,1
S_{40°} [Nm]	38,9	± 10,2	42,9	± 11,1	35,3	± 10,6	10,1	21	p < 0,05	-9,3	21	
S_{45°} [Nm]	42,5	± 11,0	47,9	± 11,7	39,6	± 12,7	12,5	21	p < 0,01	-6,3	21	
S_{50°} [Nm]	46,8	± 12,0	52,9	± 12,8	44,6	± 14,6	13,0	21	p < 0,01	-4,7	19	
S_{55°} [Nm]	52,5	± 13,3	58,8	± 13,8	50,6	± 17,1	12,2	21	p < 0,01	-3,5	17	
S_{60°} [Nm]	58,7	± 15,5	65,0	± 14,9	56,4	± 18,9	10,7	21	p < 0,01	-4,0	16	
S_{65°} [Nm]	62,7	± 15,7	70,7	± 16,3	64,6	± 29,9	12,7	21	p < 0,01	3,0	16	
S_{max} [Nm]	118,1	± 27,9	139,9	± 34,3	88,8	± 42,5	18,4	21	p < 0,01	-24,8	21	p < 0,01
W_{max} [°]	107,6	± 24,4	114,9	± 23,1	79,1	± 24,6	6,8	20	p < 0,01	-26,4	21	p < 0,01

Diskussion

Trotz der subjektiven Empfindung erhöhter muskulärer Spannung bestand 2 Tage nach dem exzentrischen Training, also zu dem Zeitpunkt, zu dem der Muskelkaterschmerz in der Regel die höchste Intensität zeigte, keine nennenswerte Differenz der Ruhedehnungsspannung des trainierten Muskels zur Ruhespannung in der Vortestsituation. Somit müssen die Empfindungen erhöhter Spannung anderen Quellen zugeschrieben werden, etwa Sensationen aus dem Bereich des intramuskulären Bindegewebes, indem z.B. oedematöse Schwellungen, die häufig mit Muskelkater in Verbindung stehen (MILES & CLARKSON 1995), zu Reizungen von Propriozeptoren führten. Als wesentliche Ursache für die reduzierte Hüftbeugefähigkeit bei den Dehnungprozeduren des Nachtests muß der Muskelkaterschmerz gewertet werden; denn der maximale Hüftbeugewinkel korreliert im Nachtest negativ mit der Intensität des Muskelkaters. Demgegenüber kann die erhöhte Dehnfähigkeit der ischiokruralen Muskeln im Zwischentest, erkennbar an dem größeren maximalen Hüftbeugewinkel und an der erhöhten maximalen Dehnungsspannung, durch eine mit der exzentrischen Belastung verbundenen Gewöhnung der Probanden an Dehnungsspannungen erklärt werden. Die Hypothese, durch erhöhten Ca^{2+} -Gehalt bedingte spontane Querbrückenbildung erzeuge im inaktiven Muskel eine erhöhte Ruhespannung, kann zumindest für den

Nachtest nicht akzeptiert werden, obwohl gerade zu diesem Zeitpunkt die Intensität der Spannungsempfindung und des Muskelkaters dem Maximum zustrebt. Möglicherweise sind 2 Tage nach dem exzentrischen Training die Defekte in der Membran des Ca^{2+} -speichernden sarkoplasmatischen Retikulums (sowie im Sarkolemm) wieder behoben, so daß die Funktion des sarkoplasmatischen Retikulums völlig wiederhergestellt ist. Dies kann nicht für das Ergebnis des Zwischentests gelten. Hier ist die Wahrscheinlichkeit, daß die erhöhte Dehnungsspannung auf dem oben vermuteten Wirkungszusammenhang (Konsequenzen der akuten Mikrotraumen) beruht, recht bedeutend. Die Korrelation der Spannungserhöhung direkt nach dem exzentrischen Training mit der Intensität des zwei Tage später auftretenden Muskelkaters stützt diese Vermutung. Allerdings darf nicht übersehen werden, daß für die Erhöhung der Ruhespannung direkt nach dem exzentrischen Training noch weitere Ursachen verantwortlich sein können. Vor allem ist zu vermuten, daß neuronale Nacheffekte nach dem exzentrischen Training (vor allem Ib-Nacheffekte, s. HUTTON & NELSON 1986) eine gesteigerte Erregbarkeit der α -Motoneurone erzeugen, was eine vermehrte reflektorische Aktivität und - verbunden damit - einen gesteigerten Widerstand des Muskels im Dehntest zur Folge hätte. Dies wäre durch multivariate EMG-Untersuchungen zu überprüfen.

Aus dem vorliegenden Experiment wird - in Ergänzung der Ergebnisse von Untersuchungen über die Wirkung von Dehnungsübungen auf die Muskelruhespannung (WIEMANN 1991 und 1994) - einmal mehr deutlich, daß die Ruhespannung sich als ein intrapersonell relativ stabiler Funktionsparameter der Muskeln präsentiert. Ebenso zeigt sich, daß sich individuell-subjektive Spannungsempfindungen in den Muskeln einerseits und die objektive Ausprägung der Ruhespannung andererseits nicht entsprechen müssen, so daß es nicht geboten erscheint, zur Prüfung und Erklärung der Wirkung von Trainingsbehandlungen (Stretching, Krafttraining) auf den biologischen Parameter *Muskelruhespannung* die subjektiven Muskelspannungsempfindungen des Behandelten zugrunde zu legen.

Literatur

- CLARKSON, P.M. / TREMBLAY, I.: Exercise-induced muscle damage, repair and adaptation in humans. In: Journal of Applied Physiology 65 (1988): 1, 1-6.
- CLEAK, M.J. / ESTON, R.G.: Muscle soreness, swelling, stiffness and strength loss after intense eccentric exercise. In: Br. J. Sp. Med. 26 (1992) 4, 267-271.
- EVANS, W.J.: Exercise-induced skeletal muscle damage. In: The Physician and Sportsmedicine 15 (1987), 89-100.
- EVANS, W.J. / CANNON, J.G.: The metabolic effects of exercise-induced muscle damage. In: Exercise and Sports Science Reviews. 1987, 99-125.

- HUTTON, R. S. / NELSON, D. L.: Stretch sensitivity of golgi tendon organs in fatigued gastrocnemius muscle. In: *Med. Sci. Sports Exerc.* 18 (1986), 69-74.
- KRSTIC, R.V.: *Die Gewebe des Menschen und der Säugetiere.* Berlin u.a. 1978.
- MAGID, A. / LAW, D.J.: Myofibrils bear most of the resting tension in frog skeletal muscles. In: *Science* 230 (1985), 1280-1282.
- MARUYAMA, K. / SAWADA, H. / KIMURAS, S. u.a.: Connectin filaments in stretched skinned fibers of frog skeletal muscle. In: *Journal of Cell Biology* 99 (1984), 1391-1397.
- MARUYAMA, K. / MATSUNO, A. / HIGUCHI, H. / SHIMAOKA, S. / KIMURA, S. / SHIMIZU, T.: Behavior of connectin (titin) and nebulin in skinned muscle fibres released after extreme stretch as revealed by immunoelectron microscopy. In: *J. Musc. Res. Cell. Motil.* 10 (1989), 350-359.
- MILES, M.P. / CLARKSON, P.M.: Exercise-induced muscle pain, soreness, and cramps. In: *The Journal of Sports and Physical Fitness* 3 (1995), 203-216.
- STREET, S.F.: Lateral transmission of tension in frog myofibres: A myofibrillar network and transverse cytoskeletal connections are possible transmitters. In: *Journal of Cellular Physiology* 114 (1983) 3, 346-364.
- WIEMANN, K.: Beeinflussung muskulärer Parameter durch ein 10-wöchiges Dehnungstraining. In: *Sportwissenschaft* 21 (1991), 295-306.
- WIEMANN, K.: Beeinflussung muskulärer Parameter durch unterschiedliche Dehnverfahren. In: *HOSTER, M. / NEPPER, H.-U. (Hrsg.): Dehnen und Mobilisieren.* Waldenburg 1994, 40-71.