

(Aus: TW Sport + Medizin Jg. 8, 1996, 2:103 – 108)

K. Wiemann/S. Leisner

## Haben Turner „längere“ ischiokrurale Muskeln?

Eine der wesentlichsten leistungsbestimmenden Einflußgrößen im Gerätturnen ist die Hüftbeugefähigkeit. In einem Ausmaß wie in kaum einer anderen sportlichen Disziplin wird im Gerätturnen vom Sportler verlangt, bei völlig gestreckten Kniegelenken die Hüfte beugen zu können, so daß die Oberschenkel entweder unmittelbar den Rumpf berühren oder sich sogar - bei leicht gegrätschter Beinhaltung - neben dem Rumpf bzw. den Schultern befinden (Abb. 1). Auf diese Weise bilden die gestreckten Beine mit dem Rumpf einen Winkel, der weniger als  $20^\circ$  betragen kann (gestreckte Hüfte =  $180^\circ$ ), während der Durchschnittssportler allenfalls Winkelwerte von annähernd  $90^\circ$ - $70^\circ$  erreicht.



**Abb. 1:** Extreme Dehnung der IM im Gerätturnen. (unten: verändert aus WIEMANN, M. 1993)

Diese Hüftbeugefähigkeit wird aus biomechanischen bzw. turntechnischen Gründen vor allen Dingen bei gebückten oder gegrätschten Sturzhangfolgen (Abb. 1a) verlangt (WIEMANN, K. 1990). Weiterhin kommt eine gute Hüftbeugefähigkeit vielen gymnastischen Elementen zugute wie etwa einem Grätschwinkelstütz (Abb. 1b).

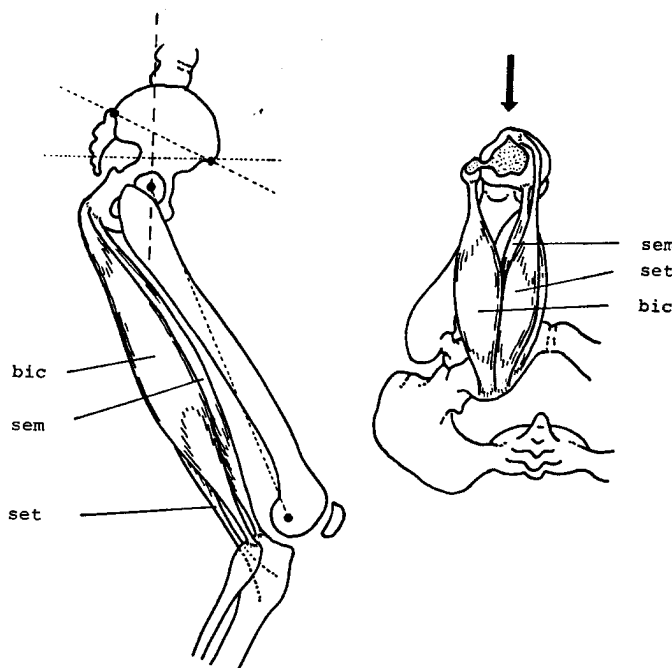
Da die Hüftbeugebewegung (bei gestreckten Kniegelenken) ausschließlich einer **muskulären** Hemmung (durch die ischiokruralen Muskeln) unterliegt, die sich - im Gegensatz zu anderen Formen der Gelenkhemmung - sehr gut durch Training

beeinflussen läßt, ist es nicht verwunderlich, daß sich ein wesentlicher Teil der gymnastischen Grundausbildung im Gerätturnen auf Dehnübungen für die ischiokruralen Muskeln erstreckt. Das Ergebnis sind die erstaunlichen Gelenkreichweiten im Hüftgelenk, die in Abb. 1 dargestellt sind.

Nun fragt man sich, welche Konsequenz das intensive Dehnungstraining für die verschiedenen muskulären Parameter bedeutet bzw. durch welche Anpassungserscheinungen die enorme Dehnfähigkeit ermöglicht wird. Sind die ischiokruralen Muskeln (**IM**) der Turner „länger“ als diejenigen anderer Sportler? Wenn ja, haben sich vornehmlich die Sehnen oder die Muskelfasern (der „fleischige“ Anteil der Muskeln) verlängert? Oder sind die IM der Turner nur „weicher“, nachgiebiger geworden und/oder setzen sie dehnenden Übungen eine reduzierte Ruhespannung entgegen?

## Definitionen und Hypothesen

Um diese Fragen abklären zu können, müssen zuerst einige muskuläre Funktionsparameter definiert werden; denn die Begriffe „Muskellänge“, „Muskeldehnfähigkeit“ oder „Ruhespannung“ werden häufig im gleichen Bedeutungszusammenhang verwendet.



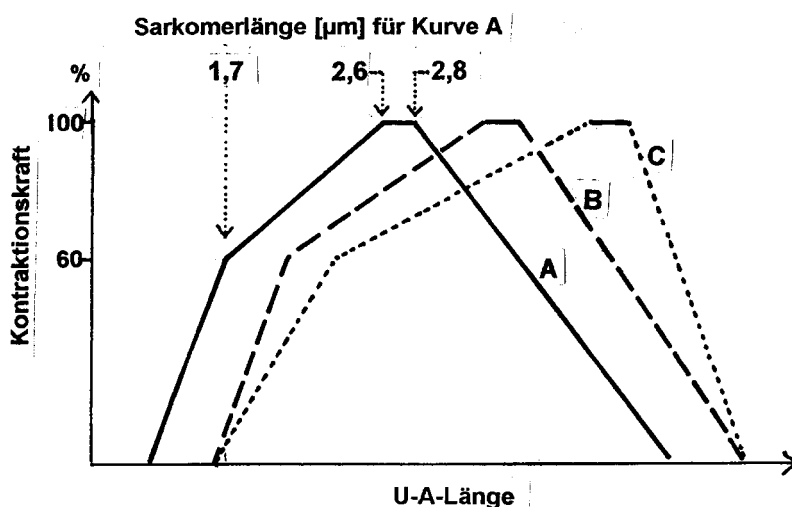
**Abb. 2:** Die ischiocruralen Muskeln; links von lateral, rechts von unten. Die Beckenneigung ergibt sich aus dem physiologischen Neigungswinkel von  $12^\circ$ , plus  $10^\circ$  Sprintvorlage. bic: M. biceps femoris caput longum. sem: M. semimembranosus. set: M. semitendinosus. Der Pfeil gibt die Bewegungsrichtung des Beines in bezug zum Becken in der Stützphase des Sprints an. (Quelle: WIEMANN 1991b)

Die IM sind als zweigelenkige Muskeln zwischen Sitzbein und Unterschenkel ausgespannt (Abb. 2). Bei großen Personen ist zwangsläufig in ein und derselben Körperstellung der Abstand zwischen Muskelursprung und Muskelansatz, die absolute **U-A-Länge**, größer als bei kleinen Personen. Man muß also - um eine Vergleichbarkeit herstellen zu können - die Muskellänge auf die Körpergröße beziehen, indem man die relative U-A-Länge bestimmt. Nach Berechnungen mit Hilfe unseres Modells (WIEMANN,

K. 1991b) beträgt die relative U-A-Länge des M. biceps femoris caput longum im aufrechten Stand 24,7% der Körpergröße (KG). Der M. semitendinosus ist aufgrund seines Ansatzes etwas länger, während der M. semimembranosus geringfügig kürzer ist. (Alle Längensparameter beziehen sich im folgenden auf den M. biceps femoris caput longum). Sobald sich entweder der Hüftwinkel oder der Kniewinkel ändert, ändert sich auch der Abstand vom Muskelursprung zum Muskelansatz. Er beträgt im aufrechten Sitz mit gestreckten Beinen (Hüftwinkel = 90°) etwa 31,7% KG, im aufrechten Sitz mit rechtwinklig gebeugten Knien 28,5% KG und in der in Abb. 1a dargestellten Hüftbeugung etwa 33,5% KG. Die relative U-A-Länge hängt somit ausschließlich von der Stellung der beteiligten Gelenke ab. Es wird deutlich, daß sie kein brauchbares Maß darstellt, unterschiedliche Längeneigenschaften der Muskeln einzelner Personen zu vergleichen.

### Die Kraft-Längen-Kurve

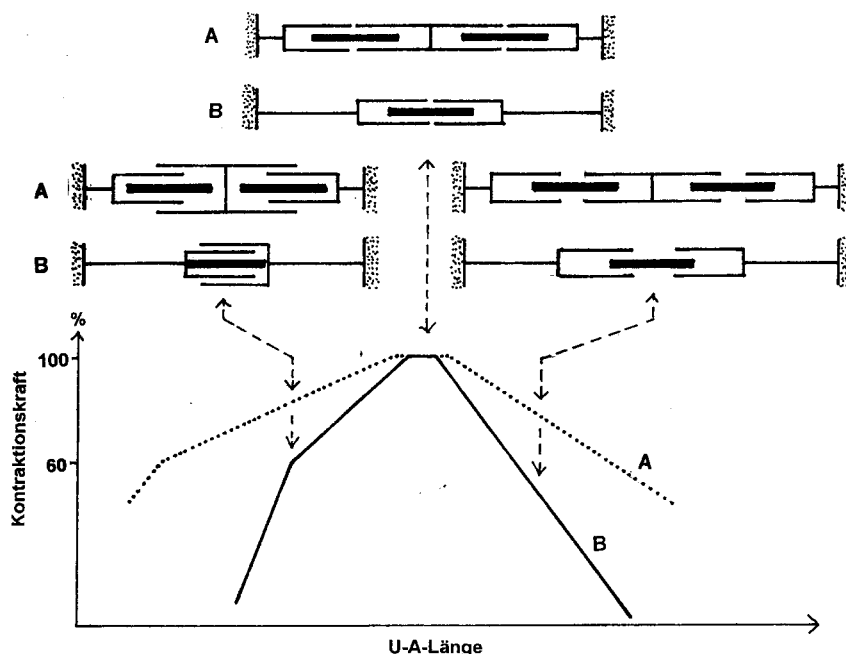
Unterschiede in den Längeneigenschaften von Muskeln lassen sich mit Hilfe der Kraft-Längen-Kurve darstellen, die verdeutlicht, welche maximale Kontraktionskraft ein Muskel in unterschiedlichen relativen U-A-Längen freisetzen kann. Diejenige (mittlere) relative U-A-Länge, in der der Muskel aufgrund optimaler Filamentüberlappung (bei einer Sarkomerlänge von 2,6 bis 2,8  $\mu\text{m}$ ; WALKER/SCHRODT 1973) das Kraftmaximum erreicht, ist die **Optimallänge** (bzw. die Mediallänge) des Muskels. „Rechts“ und „links“ der Optimallänge fällt die Kraft-Längen-Kurve (Abb. 3) ab, weil entweder die Filamente soweit auseinandergezogen werden, daß sich zunehmend weniger Querbrücken bilden können, oder sich die Myosinfilamente an der Z-Scheiben stauchen (Abb. 4). Erzeugt ein Sportler in einer größeren relative U-A-Länge das Kraftmaximum als ein anderer, erkennbar an einer Verschiebung der Kraft-Längen-Kurve nach rechts (Abb. 3, Kurve B), muß man ihm eine größere „funktionelle Länge“ bescheinigen.



**Abb. 3:** Hypothetisches Kraft-Längen-Diagramm.  
*Kurve B:* Größere funktionelle Länge bei gleicher Faserlänge gegenüber *Kurve A*.  
*Kurve C:* reduzierte serienelastische Stiffness gegenüber *Kurve B*.  
 (verändert nach WALKER & SCHRODT 1973)

Sollten also Turner durch ihr intensives Dehnungstraining ihre Optimallänge nach „rechts“ verlagert haben? Bevor diese Frage beantwortet wird, muß noch auf andere muskuläre Parameter eingegangen werden:

Mit Hilfe des Verlaufs der Kraft-Längen-Kurve läßt sich auch die Faserlänge verschiedener Personen miteinander vergleichen. Längere Muskelfasern (= eine höhere Anzahl hintereinander geketteter Sarkomere bei gleicher relativer U-A-Länge) sind daran zu erkennen, daß sie über einen größeren Bereich der relativen U-A-Länge hohe Kontraktionskräfte freisetzen können, als kürzere Fasern (Abb. 4). Sollte das langjährige Dehnungstraining von Turnern zu einer Faserverlängerung geführt haben, müßte dies an flacheren Schenkeln der Kraft-Längen-Kurve abzulesen sein.



**Abb. 4:** Hypothetisches Kraft-Längen-Diagramm zweier Modellmuskeln mit gleicher funktioneller Länge, aber unterschiedlicher Faserlänge

Andererseits könnte ein langjähriges Dehnungstraining die serienelastischen Elemente des Muskels „weicher“ (= nachgiebiger) gemacht haben. Dies ließe sich auch an der Kraft-Längen-Kurve erkennen, und zwar daran, daß diese zwar einen flacheren linken Schenkel, aber einen steileren rechten Schenkel besitzt (Abb. 3, Kurve C) als eine Vergleichskurve (Abb. 3, Kurve B).

## Die Ruhespannungs-Dehnungskurve

Ein Muskel erzeugt nicht nur im *aktiven* Zustand eine Kraft (die Kontraktionsspannung), sondern ein Muskel setzt auch im *passiven* Zustand einer Dehnung eine Spannung entgegen (die passive **Dehnungsspannung**, die im folgenden im Hinblick auf den inaktiven, unerregten, „*ruhenden*“ Zustand des Muskels **Ruhespannung** genannt werden soll). Die Quelle der Ruhespannung ist in erster Linie die Elastizität bzw. die *elastische Stiffness* der Connectin- (bzw. Titin-) Filamente innerhalb der Sarkomere (HIGUCHI et al. 1992) sowie - bei höheren Dehnungszuständen - die elastischen Eigenschaften der

Faserhüllen (MAGID & LAW 1985) im Zusammenspiel mit einem unbestimmten Anteil des Zellturgors. Im Laufe eines Dehnungsvorganges steigt somit die Spannung, die der Muskel der dehnenden Wirkung entgegensetzt, an, und zwar nicht gradlinig, sondern exponentiell: Im Diagramm erhält man die bekannte „Ruhespannungs-Dehnungs-Kurve“. Die obige Annahme, Turner hätten aufgrund ihres langjährigen intensiven Dehnungstrainings längere ischiocrurale Muskeln, müßte gleichbedeutend sein mit einer „Rechts“-Verschiebung der Ruhespannungs-Dehnungskurve; denn längere Muskeln müßten in einer größeren relativen U-A-Länge diejenige Spannung der elastischen Elemente erreichen, die bei kürzeren Muskeln schon in einer kleineren relativen U-A-Länge auftritt.

## Überprüfung der Vermutungen

Um die hypothetischen Annahmen über die Parameter der IM von Turnern überprüfen zu können, wurden 22 Landes- und Oberligaturner (Tu) mit 25 Sportstudenten (= Kontrollgruppe, Stu) ohne Turnspezialisierung verglichen. Als Testgerät kam eine an der Universität Wuppertal entwickelte Muskeldiagnosestation zum Einsatz, die in einer früheren Veröffentlichung beschrieben wurde (WIEMANN, K. 1991a). Sie erlaubt einerseits das Registrieren der Kraft maximaler isometrischer Willkürkontraktionen (MVC) der IM in 11 unterschiedlichen relativen U-A-Längen von 23,2% KG bis 30,9% KG und auf diese Weise die Entwicklung einer Kraft-Längen-Relation. Andererseits läßt sich mittels einer „Dehnungswaage“, auf der das gestreckte rechte Bein der in Rückenlage befindlichen Vp befestigt wird, ein „*straight leg raising test*“ durchführen, wobei während des Dehnungsvorganges der Hüftwinkel fortlaufend registriert wird, dazu diejenige Kraft, die vom Versuchsleiter aufgebracht werden muß, um den Dehnungsvorgang zu realisieren. Die Kraftsensoren sind dabei derart am Gerät plaziert, daß das registrierte dehnende Drehmoment mit dem Moment der Dehnungsspannung der IM identisch ist. Aus den registrierten Hüftwinkeln läßt sich nach dem vorn erwähnten Modell die zugehörige relative U-A-Länge berechnen, so daß eine Ruhespannungs-Dehnungskurve ermittelt werden kann. Alle Vpn absolvierten nach einem 5minütigen Aufwärmen (ohne Dehnübungen) 3 Dehnungstests im Abstand von 30 sec und danach die isometrischen Maximalkontraktionen mit ebenfalls 30 sec Abstand, beginnend mit der kleinsten relativen U-A-Länge.

## Ergebnisse und Diskussion

### a) Längenparameter

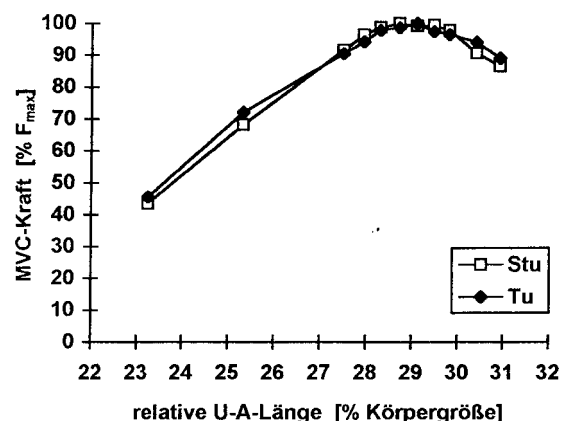
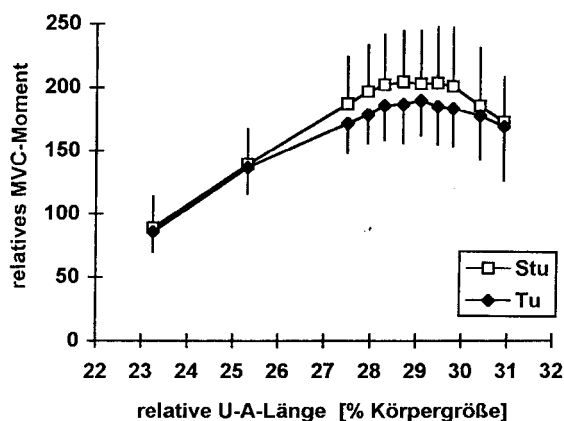
Der Krafttest ergab, daß die Personen der Kontrollgruppe vor allem bei mittlerer relativer U-A-Länge stärkere IM besitzen als die untersuchten Turner (Tab. I). Das ist verständlich, da die Kontrollpersonen im Mittel größer und schwerer waren als die Turner. Bezieht man die Kraft auf das Körpergewicht, verschwinden die Differenzen weitgehend (Tab. I). Wichtiger für die vorliegende Fragestellung ist jedoch die Beobachtung, daß die Turner in

der gleichen relative U-A-Länge das Kraftmaximum erreichen wie die Kontrollgruppe (Abb. 5 und 6), was nichts anderes bedeutet, daß Turner und Kontrollpersonen im Durchschnitt in ein und derselben relative U-A-Länge einen identischen Sarkomerdehnungsgrad besitzen.

**Tabelle I:** Ergebnis maximaler isometrischer Willkürkontraktionen (MVC) in 11 unterschiedlichen Testpositionen bei 22 Kunstturnern (Tu) und 25 Sportstudenten (Stu). #: signifikanter Unterschied zwischen Tu und Stu. ##: hochsignifikanter Unterschied zwischen Tu und Stu.

Testposition		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U-A-Länge [% KG]		23,2	25,3	27,5	27,9	28,3	28,7	29,1	29,5	29,8	30,4	30,9
reales MVC-Moment [Nm]	Tu	60,7	96,2	120,7	125,6	130,3	131,4	133,2	129,9	128,6	125,6	118,7
	Stu	66,7	104,8	140,6	148,0	151,4	153,3	152,2	152,4	150,2	139,2	134,6
				#	##	##	#	#	#	#		
MVC-Moment, bezogen auf das Körpergewicht	Tu	86,1	136,7	171,4	178,6	185,5	186,6	189,5	184,9	183,1	177,6	168,9
	Stu	89,2	139,2	187,0	196,4	201,9	204,2	202,5	203,3	200,5	185,3	172,6
					#							
normiertes MVC-Moment [% MVC <sub>max</sub> ]	Tu	45,6	72,2	90,6	94,3	97,9	98,6	100,0	97,5	96,5	94,1	89,1
	Stu	43,5	68,2	91,6	96,4	98,8	100,0	99,2	99,4	97,9	90,7	86,5
							#		#			
Häufigkeit von MVC <sub>max</sub>	Tu	0	0	0	3	3	4	4	1	3	2	2
	Stu	0	0	0	4	5	5	4	3	3	1	0

Es können also keine Anzeichen dafür gefunden werden, daß die Turner „längere“ IM haben als die Kontrollpersonen. Das gleiche Ergebnis erhält man, wenn man auszählt, in welchen der 11 Testlängen die einzelnen Turner bzw. Kontrollpersonen das Kraftmaximum erreichen (Tab. I). Auch hier ergibt sich (nach CHI-Quadrat-Test) kein signifikanter Unterschied.

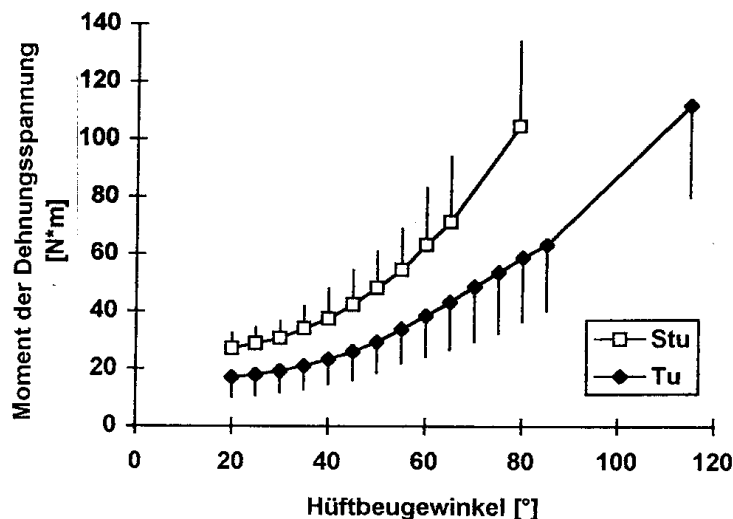


**Abb. 5** (links): Relative MVC-Momente der ischiokruralen Muskeln in 11 unterschiedlichen U-A-Längen von Turnern (Tu, n = 22) und Kontrollpersonen (Stu, n = 25). *Senkrechte Linien:* Standardabweichung

**Abb. 6** (rechts): Normierte MVC-Kraft der ischiokruralen Muskeln in 11 unterschiedlichen U-A-Längen von Turnern (Tu, n = 22) und Kontrollpersonen (Stu, n = 25).

In gleicher Weise gibt es keine Anzeichen für längere Muskelfasern bei den Turnern; denn die normierten Kraft-Längen-Kurven (Abb. 6) von Turnern und Kontrollpersonen sind nahezu identisch und lassen nicht die vorn vermuteten Differenzen in der Neigung der Kurvenschenkel rechts und links vom Maximum erkennen. Dieses Ergebnis ist erstaunlich, haben doch Dauerdehnversuche bei Tieren Faserverlängerungen um bis zu 50% ergeben (z.B. ALWAYS et al. 1989). Über die Ursachen zum vorliegenden Ergebnis, das im übrigen die Befunde eines früher durchgeführten Langzeit-Dehnungsexperimentes bestätigt (WIEMANN, K. 1991a), läßt sich nur spekulieren. Vermutlich verlangt die Erledigung der Alltagsmotorik wie Gehen und Treppensteigen sowie verschiedener Trainingsaktivitäten wie Laufen und Springen, an denen immer auch die als Hüftstrecker wirkenden IM beteiligt sind, eine bestimmte optimale Faserlänge und ein bestimmte „funktionelle“ Länge, so daß sich die Belastungsreize der Alltagsmotorik stets gegen mögliche konträre Reize des Dehnungstrainings durchsetzen. Ob dies auch für Muskeln gilt, die nicht in der Weise in der Alltagsmotorik beansprucht werden wie die Beinmuskeln, oder für Muskeln, die z.B. durch Gipsverbände über lange Zeit an der Erledigung der Alltagsmotorik gehindert werden, bleibt zu klären.

Die Beobachtung, daß die normierten Kraft-Längen-Kurven von Turnern und Kontrollpersonen nahezu deckungsgleich sind (Abb. 6), schließt zusätzlich eine herabgesetzte Stiffness der serienelastischen Elemente der IM der Turner aus. Diese Stiffness-Konstanz mag ebenfalls durch die Erfordernisse der Alltagsmotorik begründet sein.

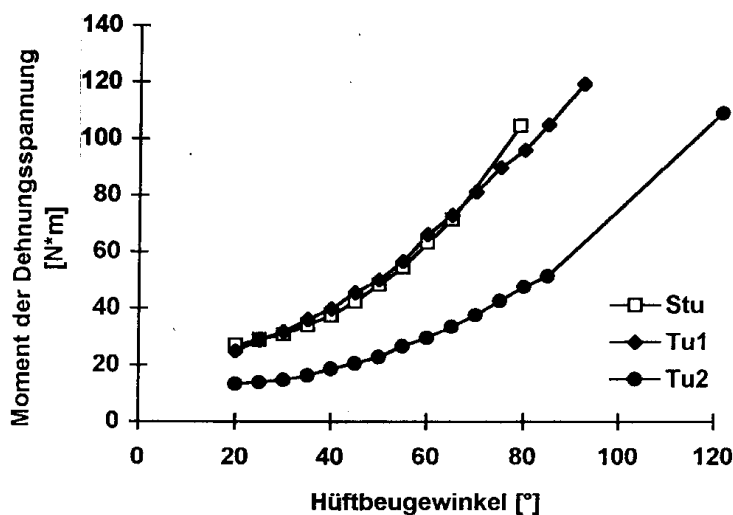


**Abb. 7:** Ruhespannungs-Dehnungskurven der ischiokruralen Muskeln von Turnern (Tu, n = 22) und Kontrollpersonen (Stu, n = 25). Senkrechte Linien: Standardabweichung.

## b) Dehnungsparameter

Ein völlig anderes Bild ergibt der Vergleich des Ruhespannungs-Dehnungs-Verhaltens bei Turnern und Kontrollpersonen (Abb. 7). Die Turner erreichen im Durchschnitt nicht nur wesentlich größere Hüftbeugewinkel (Hüftbeugewinkel =  $180^\circ$  - Hüftwinkel) als die Kontrollpersonen, sondern setzen der Dehnung in allen vergleichbaren Hüftbeugewinkeln

eine hochsignifikant niedrigere Dehnungsspannung entgegen: Die Ruhespannungs-Dehnungskurve ist gegenüber derjenigen der Kontrollgruppe weit nach rechts verschoben. Das ist um so überraschender, als das vorn erwähnte Langzeit-Dehnungsexperiment (WIEMANN, K. 1991a) keine Veränderung der Ruhespannung erkennen ließ, obwohl dort diejenigen Dehnübungen über 10 Wochen 2 x wöchentlich trainiert wurden, die auch bei Turnern in der Regel üblich sind; überraschend auch deshalb, weil die Längenparameter (s. vorn), vor allem die Stiffness der *serieneleastischen* Elemente, keinen Unterschied bei Turnern und Kontrollpersonen erkennen ließen (s.o.). Es muß gefolgert werden, daß die Reduktion der *passiven* Stiffness auf diejenigen elastischen Komponenten begrenzt ist, die im *kontrahierten* Zustand des Muskels „entlastet“ sind, nämlich auf die *parallelelastischen* Elemente. Da die Stiffness-Reduktion auch in kleineren U-A-Distanzen auftritt, in denen sich noch nicht die Spannung der Faserhüllen bemerkbar macht, kann nur gefolgert werden, daß bei Turnern vorwiegend die Stiffness der intrasarkoplasmatischen Connectin-(Titin-)filamente reduziert ist.



**Abb. 8:** Ruhespannungs-Dehnungskurven der IM von Kontrollpersonen (Stu, n = 25), von Turnern mit unverändertem Dehnungsverhalten (Tu1, n = 6) und von Turnern mit extremer Dehnfähigkeit (Tu2, n = 16)

Auffällig ist, daß sich innerhalb der Turner hinsichtlich des Dehnungsverhaltens zwei Gruppen erkennen lassen. Die eine Gruppe (Abb. 8, Tu1) gleicht im Verlauf der Ruhespannungs-Dehnungskurve den Kontrollpersonen, die andere Gruppe (Abb. 8, Tu2) zeichnet sich durch stark reduzierte Dehnungsspannungen und wesentlich größere Gelenkreichweiten aus als Gruppe Tu1. Die Quellen dieser Differenzen lassen sich weder aus dem Alter, noch aus der Länge und Intensität des Turn- und Dehnungstrainings ableiten. Das führt zu der Vermutung, daß eine genetische Disposition darüber entscheiden könnte, ob und in welchem Maße sich die Stiffness der parallelelastischen Elemente unter der Einwirkung eines Dehnungstrainings vermindert, ein Aspekt, dem - sollte er sich in weiteren Untersuchungen bestätigen - eine Bedeutung für die Talentauswahl zukommen könnte.



## Sportmedizinischer Ausblick

Da den IM eine haltungsbeeinflussende Wirkung zugeschrieben wird, besteht die Frage, ob das dramatische Absenken der Ruhespannung der IM bei Turnern orthostatische Konsequenzen haben könnte. Dies wäre zumindest dann zu befürchten, wenn die Gegenspieler der IM, die Hüftbeugemuskulatur, nicht in gleichem Maße ihre Ruhespannung absenken und auf diese Weise Quellen zu einer Dysbalance der Ruhespannungen mit entsprechenden Konsequenzen für die Beckenstellung liefern. Tatsächlich konnte gezeigt werden, daß zumindest bei Turnerinnen, die sich gegenüber Kontrollpersonen durch eine extrem gesteigerte Hüftbeugefähigkeit, aber durch eine reduzierte Hüftstreckfähigkeit, also durch eine Dehnungsdysbalance (WIEMANN, M. 1993), auszeichnen, stärker vorgekippte Becken auftraten als bei den Kontrollpersonen. Ähnliches könnte man bei Turnern schon deshalb erwarten, weil an diese noch höhere Anforderungen an die Hüftbeugekraft mit der damit verbundenen Hypertonisierung der Muskulatur gestellt werden. Auf einschlägige Gefahrenmomente für den lumbosakralen Übergang wird bei M. WIEMANN (1993) hingewiesen.

## Literatur

- ALWAY, S.E., WINCHESTER, P.K., DAVIS, M.E., et al (1989) Regionalized adaptations and muscle fiber proliferation in stretch-induced enlargement. *Journal of Applied Physiology*, 66, 2: 771-781
- HIGUCHI, H., SUZUKI, T., KIMURA, S., YOSHIOKA, T., MARUYAMA, K., UMAZUME, Y. (1992): Localization and elasticity of connectin (titin) filaments in skinned frog muscle fibres subjected to partial depolymerization of thick filaments. *Journal of Muscle Research and Cell Motility* 13: 285 - 294
- MAGID, A. , LAW, D.J. (1985): Myofibrils bear most of the resting tension in frog skeletal muscles. *Science* 230: 1280-1282
- WALKER, S.M., SCHRODT, G.R. (1973): I-segment lengths and thin filament periods in skeletal muscle fibres of the rhesus monkey and the human. *Anatomical Record*, 178: 63-82
- WIEMANN, K. (1990): Zur Biomechanik des Schwingens. In: KRAINHÖFNER, G.G. und THIELECKE, K. (Hrsg.): *Kongressbericht/BTV Kongress: Gerätturnen in Schule und Verein*, 15. - 17. Oktober 1987 in Regensburg. Regensburg: 168 - 175
- WIEMANN, K.: (1991a) Beeinflussung muskulärer Parameter durch ein zehnwöchiges Dehnungstraining. *Sportwissenschaft*, 3: 295-306
- WIEMANN, K. (1991b): Präzisierung des LOMBARD'schen Paradoxons in der Funktion der ischiocruralen Muskeln beim Sprint. *Sportwissenschaft* 4: 413-428
- WIEMANN, M. (1993): Der Einfluß von Leistungssport auf muskuläre Balancen und Orthostatik - untersucht am Beispiel von Turnerinnen und Gymnastinnen. *Dissertation*. J. W. Goethe-Universität Frankfurt a.M.