

Modell zur Bestimmung der Fasertyp-Kraftrelation der ischiokruralen Muskeln

Copyright: Klaus Wiemann 1993

(Zusammengefasster Auszug aus einem Antrag auf Gewährung von Forschungsmitteln an das Bundesinstitut für Sportwissenschaft, Köln, vom 20. 8. 1992 von WIEMANN, K., TIDOW, G., und KLEE, A.)

1 Vorbemerkung

Während eines im Jahre 1991 durchgeführten Forschungsvorhabens zum Dehnungsverhalten der ischiokruralen Muskeln wurde von den Vpn u.a. verlangt, an der eigens dazu gebauten Muskelmessstation (s. Abb. 1) in einem mittleren Dehnungszustand explosiv-isometrische Kräfteinsätze der ischiokruralen Muskeln zu produzieren (s. WIEMANN 1991).

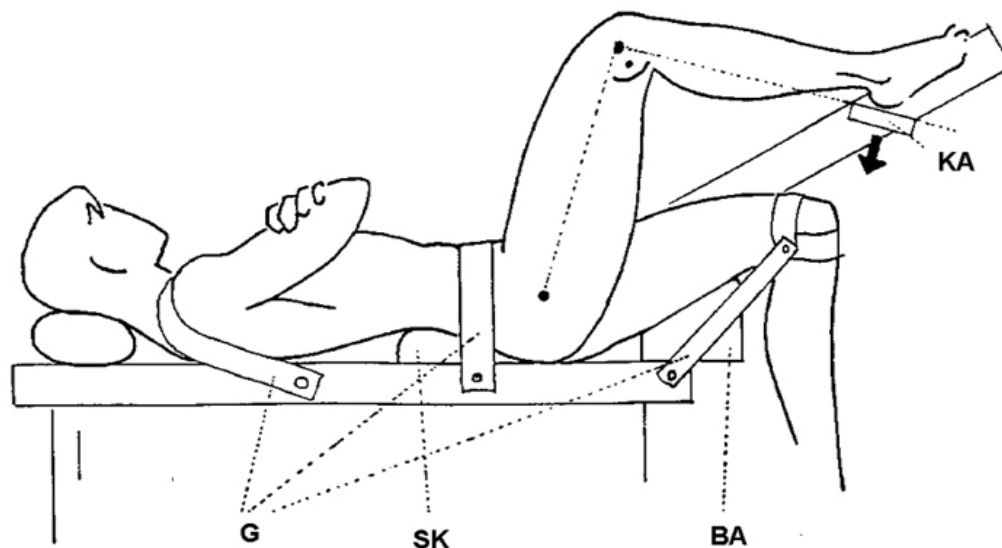


Abb. 1: Versuchsstand zur Quantifizierung explosiv-isometrischer Kräfteinsätze der ischiokruralen Muskeln. BA: Oberschenkelauflage für das Gegenbein. G: Gurtung zur Fixierung der Vp. KA: Kraftaufnehmer für das Versuchsbein. SK: Keil zur Unterfütterung des Kreuzbeines

Bei einer visuellen Begutachtung der Explosivkraftkurven fiel auf, dass ein Großteil dieser Kurven einen ähnlichen Verlauf nahm: Nach einem anfänglichen steilen, nahezu geradlinigen Anstieg zeigten die Kurven einen "Knick", dem ein weiterer geradliniger, aber weniger steiler Anstieg folgte, um nach einem weiteren "Knick" und einem noch flacheren Anstieg dem Maximum zuzustreben (Abb. 2). Dieser Kurvenverlauf lässt sich auch in der Literatur dort finden, wo bei explosiver, isometrischer Kräfteerzeugung Kraftkurven unter Beteiligung offensichtlich mehrerer Fasertypen erzeugt wurden. Der Kurvenverlauf wird im Folgenden auf die speziellen Bedingungen der Rekrutierung der verschiedenen Fasertypen zur Freisetzung explosiv-ansteigender Kräfte zurückgeführt, unter dem Aspekt des HENNEMANSchen Rekrutierungsprinzip diskutiert und zur Entwicklung eines Modells zur Bestimmung der Fasertyp-Kraftrelation bei explosiv-isometrischen Kräfteinsätzen genutzt.

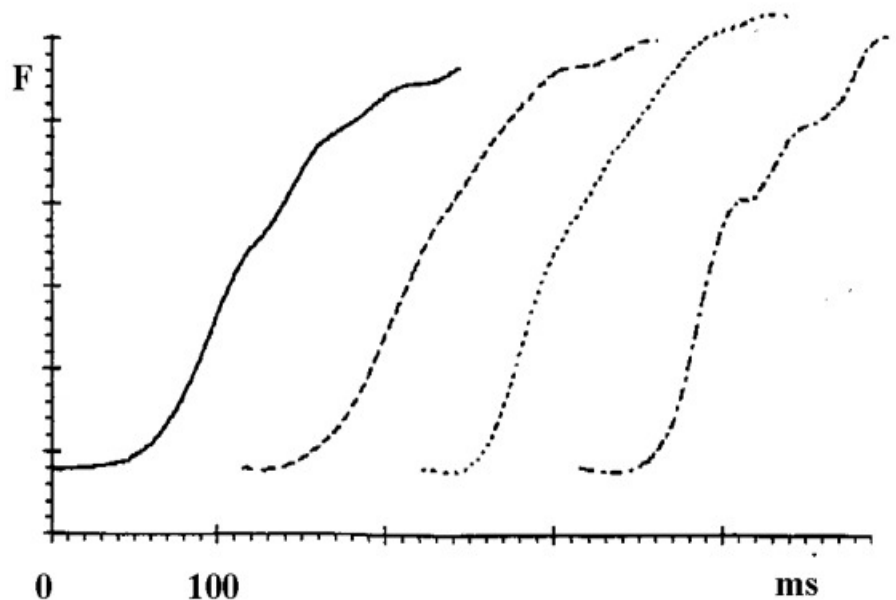


Abb. 2: Kraft-Zeit-Kurven explosiv-isometrischer Kraffteinsätze der ischiokruralen Muskeln von 4 Vpn.

2 Fasertypen und Fasertyp-Kraftrelation

Die Skelettmuskeln der Säugetiere einschließlich des Menschen sind aus Muskelfasern unterschiedlicher morphologischer und funktioneller Eigenschaften zusammengesetzt (s. zusammenfassende Darstellungen z.B. von BUCHTHAL & SCHMALBRUCH 1970, SALTIN et al 1977, PEACHEY (Ed.) 1983, RICE et al 1988). Man unterscheidet motorische Einheiten bestehend aus den „langsamen“ Typ-I-Fasern (slow-twitch-Fasern, ST-Fasern), die außer zu Beginn der Kontraktion ihre Energie ausschließlich durch Oxidation von Kohlenhydraten und freien Fettsäuren gewinnen und aus diesem Grunde ermüdungsresistent sind, sowie motorische Einheiten mit „schnellen“ Typ-II-Fasern (fast-twitch-Fasern, FT-Fasern), deren Energiequelle die Glykogenolyse darstellt und die zwar zur schnellen Krafftfreisetzung in der Lage sind, aber schnell ermüden. Die letztere Gruppe wird unterteilt in die Subtypen Typ-IIb-Fasern (FG-Fasern, fast-glycolytic; FF-Fasern, fast-fatiguable) und Typ-IIa-Fasern (FOG-Fasern, fast-oxidative-glycolytic; FR-Fasern, fast-fatigue-resistant), sowie in weitere Subtypen wie IIc und IIab.

Im Folgenden werden nur die Subtypen I, IIa und IIb betrachtet und ausschließlich hinsichtlich Ihrer Unterschiede bezüglich Verteilungsrelation und der Kontraktionszeit besprochen.

Im Hinblick auf die Verteilung der Fasertypen wird in Anlehnung an JOHNSON et al. (1973) für die ischiokruralen Muskeln ein Verteilungsverhältnis von – abgerundet - 60/40 (Typ-I/Typ-II) zugrundegelegt, wobei die Typ II-Fasergruppe im Folgenden noch einmal zu gleichen Anteilen in zwei Subtypen zerlegt werden soll, von denen die eine "intermediär" die andere "schnell" genannt wird. Der Begriff "intermediär" soll dazu lediglich andeuten, dass dieser Subtyp im Geschwindigkeitsverhalten zwischen den langsamen und schnellen Fasern einzuordnen ist.

Die in der Literatur zu findenden Angaben über das Verhältnis der Kontraktionskraft einzelner langsamer bzw. schneller Fasern schwanken zwischen rund 1/3 (DESMEDT 1981) und 1/1 (LUCAS u.a. 1987), je nach untersuchter Spezies und Art des untersuchten Muskels. Da vor allem LUCAS et al. (1987) die Fasern ein und desselben Muskels vergleichen, soll auch hier von einer Kraftrelation von 1/1 ausgegangen werden. Das ergibt für die ischiokruralen Muskeln des vorliegenden Modells eine Fasertyp-Kraftrelation von 60/20/20 bzw. 3/1/1 (langsame/intermediäre/schnelle Fasern).

3 Kontraktionszeit (KZ)

Derjenige Parameter, der vordergründig die Unterscheidung von Fasertypen bestimmt, ist die Zeitspanne, in der eine Muskelfaser - beginnend vom Zeitpunkt der Reizung - die

maximale isometrische Kontraktionsspannung aufbauen kann. In der Regel werden die Kontraktionszeiten von Einzelzuckungen der Fasertypen verglichen (z.B. bei BUCHTHAL & SCHMALBRUCH 1970, YOUNG & MAYER 1981, GRIMBY & HANNERZ 1981 und SMITH & SPECTOR 1981, um nur einige zu nennen). Nur bei DESMEDT (1981) waren auch die Kontraktionszeiten isometrischer ballistischer Kontraktionen von Muskeln unterschiedlicher Faserzusammensetzung zu finden. Nach diesen Angaben und unter Berücksichtigung des Muskeltyps sollen hier folgende Kontraktionszeiten für isometrisch ballistische Kontraktionen der ischiokruralen Muskeln berücksichtigt werden:

1. langsame Fasern (Typ I): 140 ms,
2. intermediäre Fasern (Typ IIa): 100 ms,
3. schnelle Fasern (Typ IIb): 60 ms

Neben der Kontraktionszeit ist die Verkürzungsgeschwindigkeit ein wesentliches funktionelles Unterscheidungsmerkmal der einzelnen Fasertypen. Da aber im folgenden isometrische Kräfteinsätze modelliert werden sollen, kann die Verkürzungsgeschwindigkeit unberücksichtigt bleiben.

4 Rekrutierung motorischer Einheiten

Gemäß den Ergebnissen der Untersuchungen von HENNEMAN (1981) erfolgt der Einsatz der motorischen Einheiten im Laufe einer maximalen Kontraktion nach dem „Größenprinzip der Rekrutierung“. Das bedeutet, dass zu Beginn eines jeden Kräfteinsatzes vom ZNS stets diejenigen motorischen Einheiten mit den kleinsten Motoneuronen (aufgrund ihrer niedrigsten Erregungsschwelle), also die motorischen Einheiten mit Typ-I-Fasern, zuerst aktiviert werden. Je nach Erfordernis sollen dann diejenigen motorischen Einheiten mit zunehmend größeren Motoneuronen (mit zunehmend höherer Erregungsschwelle), also die motorischen Einheiten mit Typ-IIa- bzw. Typ-IIb-Fasern, zugeschaltet werden. Dies macht bei Kontraktionen ohne Zeitnot aus biologisch-ökonomischen Gesichtspunkten durchaus einen Sinn.

Zu fragen ist jedoch, ob bei explosiven Kräfteinsätzen, also dann, wenn es gilt, in kürzester Zeit einen möglichst großen Kraftstoß zu realisieren, der Organismus sich die Einhaltung dieser Rekrutierungsreihenfolge erlauben kann. Hypothetisch scheint es dagegen sinnvoller, (unter Berücksichtigung der verschiedenen Nerven- und Faser-Leitungsgeschwindigkeiten) die Rekrutierung der verschiedenen Fasertypen derart zu gestalten, dass die schnellen Typ-IIb-Fasern ohne Verzögerung gegenüber den langsamen Typ-I-Fasern ihre Kraft direkt zu Beginn der Aktion mit einbringen können. Diese Überlegung wird durch die Form der Kraft-Zeit-Kurven explosiv-isometrischer Kräfteinsätze der ischiokruralen Muskeln (s. Abb. 2) sowie durch das im Folgenden zu entwickelnde Modell untermauert.

5 Modell zur Rekrutierung bei explosiven Kräfteinsätzen der ischiokruralen Muskeln

Um ein Modell zur Rekrutierung verschiedener Fasertypen bei explosiv-isometrischen (explosiv-ballistisch-isometrischen) Kräfteinsätzen der ischiokruralen Muskeln (iM) erstellen zu können, werden die oben abgegrenzten Bedingungen bzgl. Faserverteilung der ischiokruralen Muskeln (Kap. 2) sowie der Kontraktionszeiten der verschiedenen Fasertypen (Kap. 3) zugrunde gelegt (s. Tab. I).

Nimmt man nun in einem hypothetischen Modellversuch einer maximalen isometrischen Willkürkontraktion (MIVC) an, alle langsamen Fasern - und eben nur diese bei völliger Inaktivität sämtlicher übrigen Fasern - würden zum gleichen Zeitpunkt bei maximaler Innervation mit einer Kontraktion beginnen, müsste die im Diagramm Abb. 3a dargestellte Kraft-Zeit-Kurve zu registrieren sein, im Gegensatz zum Diagramm Abb. 3b, in dem angenommen wird, dass allein die intermediären Fasern eine maximale Kontraktion ausführen. Die isolierte Kontraktion der schnellen Fasern hypothetisiert entsprechend Abb.

3c.

Tabelle I: Angenommene Fasertypverteilung, Fasertyp-Kraftrelation und Kontraktionszeit der ischiokruralen Muskeln zur Modellierung von explosiv-isometrischen Kraft-Zeit-Kurven.

Fasertyp	Faserverteilung	Fasertyp-Kraftrelation	Kontraktionszeit
Typ-I-Fasern (langsamer Typ)	60%	3	140 ms
Typ-IIa-Fasern (intermediärer Typ)	20%	1	100 ms
Typ-IIb-Fasern (schneller Typ)	20 %	1	60 ms

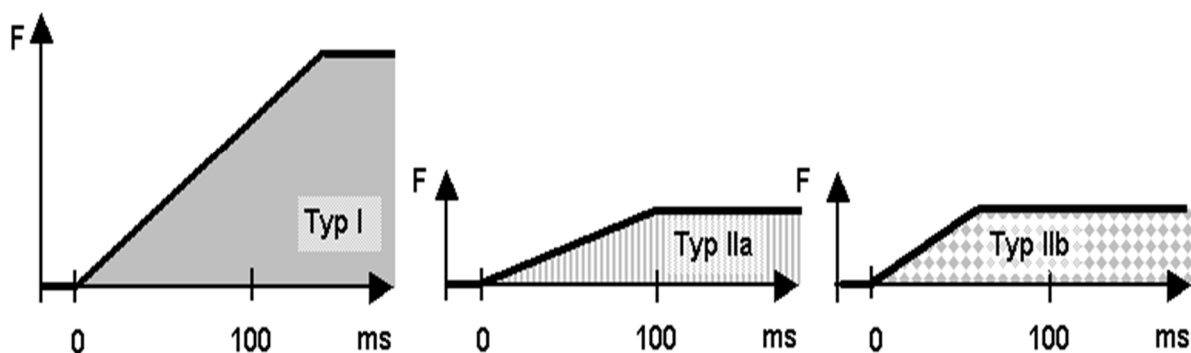


Abb. 3: Hypothetische Kraft-Zeit-Kurven explosiv-isometrischer Krafteinsätze bei isolierter Kontraktion der Typ-I-Fasern (a), der Typ-IIa-Fasern (b) bzw. der Typ-IIb-Fasern (c)

Will man nun ein Modell entwerfen, das die Beteiligung aller Fasertypen an der Erzeugung der Kontraktionskraft berücksichtigt, muss man vor allem zwei Grenzfälle betrachten: Im ersten Fall soll die Rekrutierung aller Fasertypen - bei jeweils maximaler Frequenzierung - so abgestimmt sein, dass die drei Gruppen von Fasertypen zum gleichen Zeitpunkt ihr jeweiliges Kraftmaximum erreichen (ein solches "Timing" diskutiert MATON 1980). Dazu müssen die langsamen Fasern mit der Kontraktion beginnen (Abb. 4a). Nach 40 ms, zu einem Zeitpunkt also, zu dem die Kontraktionskraft der langsamen Fasern schon bis auf rund 28,6 % ihres Kraftmaximums angestiegen ist, müssen die intermediären Fasern ihrerseits mit der Kontraktion einsetzen, wobei sich ihre Kraft zu derjenigen der langsamen Fasern addiert (Abb. 4a, unten). Weitere 40 ms später – 80 ms nach Kontraktionsbeginn der langsamen Fasern - setzt dann die Kontraktion der schnellen Fasern ein. Ihre ansteigende Kraft addiert sich zur (immer noch ansteigenden) Kraft der langsamen und intermediären Fasern, bis 140 ms nach Kontraktionsbeginn der langsamen Fasern das Gesamtkraftmaximum erreicht ist. Die aufsummierte Kraft-Zeit-Kurve erhält in diesem Modellfall den im Diagramm Abb. 4a (unten) wiedergegebenen Verlauf. Auch wenn diese Art der Rekrutierung unter bestimmten Aufgabenstellungen biologisch sinnvoll sein könnte, zur explosiven Krafterzeugung - d.h. zur Freisetzung möglichst hoher Kräfte in möglichst kurzer Zeit - lässt sich ein besseres Modell finden:

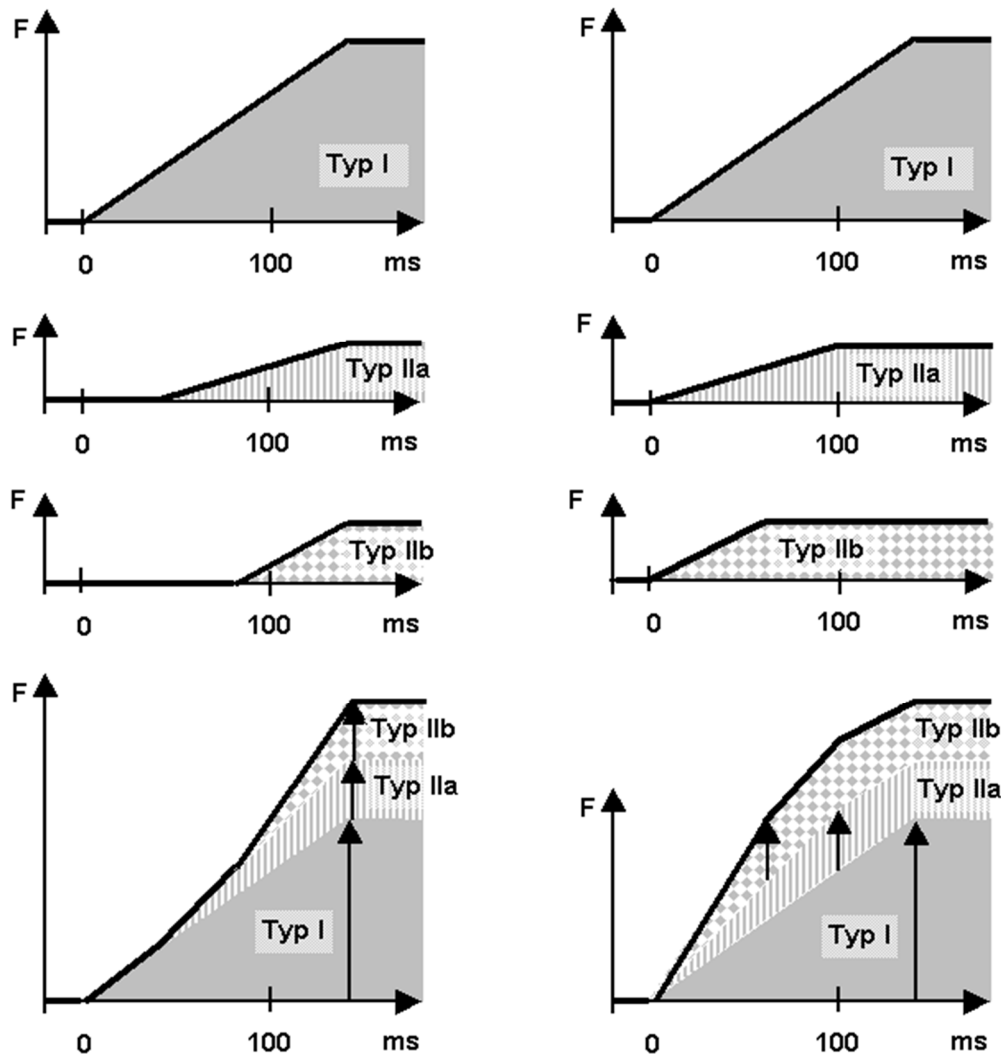


Abb. 4: Modelle explosiv-isometrischer Krafteinsätze (Erläuterungen im Text)

Für diesen zweiten Grenzfall soll angenommen werden, dass alle Fasertypen zum gleichen Zeitpunkt mit der Kontraktion in maximaler Frequenzierung beginnen (Diagramm Abb. 4b). In diesem Fall haben die schnellen Fasern schon nach 60 ms ihr Kraftmaximum erreicht also zu einem Zeitpunkt, zu dem die Kontraktionskraft der intermediären und langsamen Fasern noch wächst. Nimmt man weiterhin an, dass die schnellen und intermediären Fasern die Maximalkraft zumindest so lange aufrechterhalten, bis auch die langsamen Fasern ihr Kraftmaximum erreicht haben, müsste der im Diagramm Abb. 4b (unten) dargestellte Kraft-Zeit-Verlauf erwartet werden. Durch die wesentlich größere Fläche unter dieser Kraft-Zeit-Kurve als im Modellfall Abb. 4a müssten hier entsprechend günstigere Schnellkraftindices zu erwarten sein.

Die hypothetische Explosivkraft-Kurve der Abb. 4b (unten) zeigt eine erstaunliche Ähnlichkeit mit den im Experiment gewonnenen Kurven (Abb. 2). Die Aufeinanderfolge von steileren und flacheren Anstiegen haben die gewonnenen Kurven mit der hypothetischen Kurve des Diagramms Abb. 4b gemeinsam. Im Gegensatz zum Modell sind die Übergänge naturgemäß fließender. Das gilt besonders auch für den Anstieg während der ersten 20-40 ms. Hier müssen zu Beginn der Kontraktion erst die serienelastischen Elemente gespannt werden, bevor sich zwischen dem äußeren Widerstand und den Sarkomeren die gesamte Kontraktionsspannung aufbauen kann.

6 Rückschluss auf die Fasertyp-Kraftrelation

Wenn es, wie beim Erstellen des Diagramms Abb. 4, möglich ist, mit Hilfe bekannter

Daten wie Fasertyp-Verteilung, Kontraktionsbeginn, Kontraktionskraft und Kontraktionszeit pro Fasertyp eine Explosivkraft-Zeit-Kurve vorauszusagen, sollte es auch möglich sein, mit Hilfe von Explosivkraft-Zeit-Kurven im umgekehrten Rechenverfahren die fasertyprelevanten Daten abzuschätzen. Dies soll am Beispiel einer Kraft-Zeit-Kurve von Abb. 2 (dritte Kurve von links) versucht werden (Abb. 5):

Nimmt man an, dass die am Zustandekommen der Kraft-Zeit-Kurve von Abb. 5 beteiligten Fasertypen zum gleichen Zeitpunkt mit der Kontraktion beginnen und an dem jeweiligen "Knick" der Kurve ihre Maximalkraft erreicht haben, lässt sich ein Maximalkraftverhältnis der beteiligten Fasertypen (langsame Fasern/intermediäre Fasern/schnelle Fasern) von 26/51/23 ablesen. Daraus kann gefolgert werden, dass unter der vorliegenden Aufgabe zur Produktion explosiver MIVCs die ausgewertete V_p langsame, intermediäre und schnelle Fasern in einer Kraftrelation von 26/51/23 zu rekrutieren vermag. Dabei benötigen die Fasertypen vom ersten Kraftanstieg bis zum Erreichen des jeweiligen Kraftmaximums Kontraktionszeiten von rund 60 ms (schnellste Fasern) bzw. 130 ms (intermediäre Fasern) bzw. 180 ms (langsame Fasern).

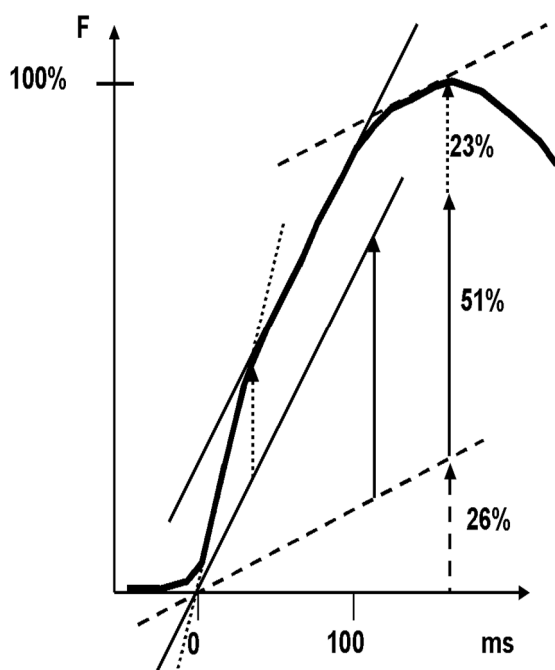


Abb. 5: Beispiel zur Quantifizierung der Fasertyp-Kraftrelation aus Kraft-Zeit-Kurven explosiv-isometrischer Kontraktionen der ischiokruralen Muskeln

Aussagen über die zahlenmäßige Verteilung der Fasern der verschiedenen Typen lassen sich natürlich nicht treffen, solange nicht feststeht,

- wie sich die Kontraktionskräfte der verschiedenen Fasertypen der ischiokruralen Muskeln bei explosive-isometrischen Kontraktionen in Wirklichkeit zueinander verhalten,
- ob bei den ischiokruralen Muskeln die Fasern ein und desselben Typs alle den gleichen Querschnitt bzw. die gleiche Volumendichte besitzen und damit die gleiche Kontraktionskraft freisetzen können,
- ob die Testperson in der Lage ist, im Laufe einer explosiv isometrischen Willkürkontraktion alle motorischen Einheiten eines Fasertyps aktivieren zu können

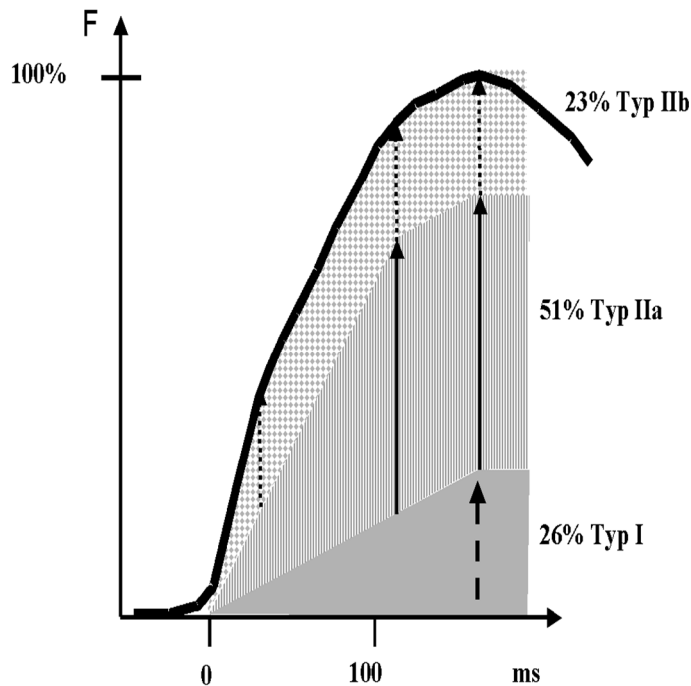


Abb. 6: Geschätzter Anteil der verschiedenen Fasertypen am Kraftstoß einer explosiv-isometrischen Kontraktion der ischiokruralen Muskeln (s. Abb. 5)

7 Validierung der Interpretation von Explosivkraftkurven

Eine erste Validierung des hier vorgestellten Verfahrens, anhand von Explosivkraft-Kurven die Fasertyp-Kraftrelation zu bestimmen, lässt sich mit Hilfe von Kraft-Zeit-Kurven, die SECHER (1987) veröffentlichte, durchführen. SECHER gelang es, mit Hilfe von Pharmaka selektiv die motorischen neuronal Einheiten eines Fasertyps (entweder Typ I oder Typ II) zu inaktivieren.

Bei Ausschaltung der schnellen motorischen Einheiten erzeugte die Testperson die in Abb. 7 (unten) wiedergegebene Kraft-Zeit-Kurve. Zerlegt man nun die Kraft-Zeit-Kurve einer unbehandelten Testperson (Abb. 7 oben) nach der hier vorgestellten Methode, resultiert für die langsamen Fasertypen ein Kurvenverlauf (Abb. 7 mitte), der dem Verlauf der Kraft-Kurve bei experimenteller Ausschaltung der schnellen Fasern bei SECHER nahezu gleichkommt (Abb. 7 unten).

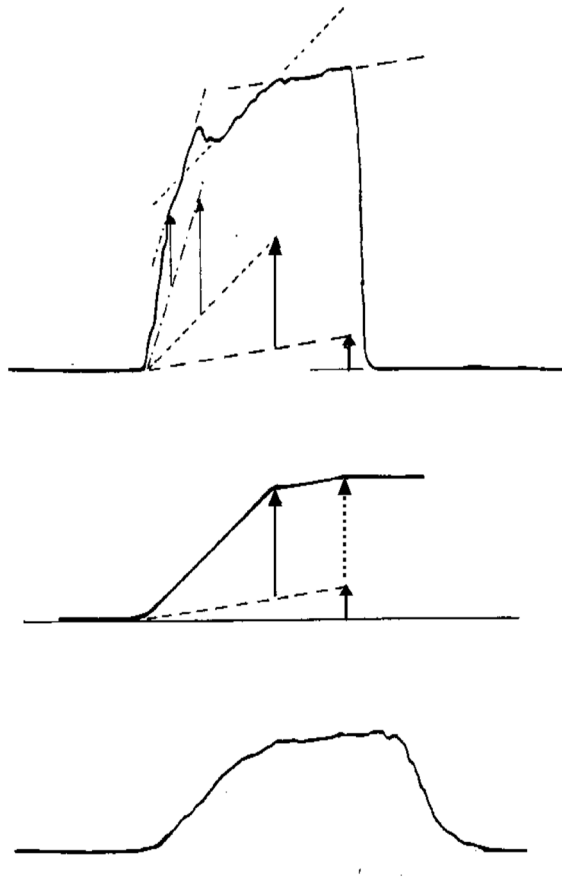


Abb. 7: Explosiver Kräfteinsatz der Kniestrecker (Quelle: SECHER 1987), zerlegt in Kraftanteile schneller und langsamer Fasertypen. Weitere Erläuterungen im Text

8 Bedeutung für den Leistungssport

Jeder Skelettmuskel – zumindest - der Säugetiere und somit auch des Menschen besteht aus einer typischen Komposition von Typ I- und Typ II-Fasern - einschließlich entsprechender Subtypen. Die individuelle Typ I-/Typ II-Relation gilt als angeboren. Trainingsbedingte Faserumwandlungen sind nur in begrenztem Maße in Richtung der benachbarten Subtypen möglich. Für den Athleten, vor allem für Athleten der Kraft- und Schnellkraftsportarten, ist es nun von besonderem Interesse, das Fasertypverhältnis seiner Muskeln zu kennen und zu wissen, in welcher Zeitspanne diese Fasertypen zur maximalen Kontraktion gebracht werden können. Denn dies entscheidet letztlich darüber, ob und in welchem Maße der Athlet aufgrund seiner Fasercharakteristik für die gewählte Disziplin geeignet ist und ob ein Athlet - unabhängig von der Eignung - sich in einem optimalen Trainingszustand befindet.

Die Muskelbiopsie, das derzeit einzige Verfahren, über die Fasertyp-Relation und die Faserquerschnitte eines Muskels etwas zu erfahren, ist ein von den Athleten aus verständlichen Gründen nicht sonderlich beliebtes Diagnoseverfahren - dazu noch aufwendig und langwierig. Außerdem ist es für den Athleten in der Regel unbedeutend zu wissen, welches anteilige Zahlenverhältnis der einzelnen Fasertypen in einem relativ kleinen Teilabschnitt des Muskels auftritt und welches Querschnittsverhältnis gebildet wird. Statt dessen ist es wichtig, welchen prozentualen Anteil am Kraftstoß des Gesamtmuskels die einzelnen Fasertypen beisteuern und wie sich dieser Kraftstoß-Anteil durch geeignete Trainingsmaßnahmen im Hinblick auf das Trainingsziel steuern lässt. Genau darüber trifft die hier vorgeschlagene Methode, die Fasertyp-Kraftrelation eines Muskels anhand der Kraft-Zeit-Kurven explosiv-isometrischer Kräfteinsätze zu bestimmen, eine Entscheidung. Sollte sich diese Methode, als hinreichend reliabel erweisen, könnte mit Hilfe eines elektronischen Kräfteaufnehmers und eines PCs, der heute ohnehin zum Inventarium eines

jeden Leistungszentrums gehört, sowie mit der zugehörigen Software in kürzester Zeit eine Information über die Kraft-Leistungsparameter zumindest der relevanten großen Muskeln des Körpers gewonnen werden. Somit stände ein Diagnoseinstrumentarium für eine schnelle und problemlose Eignungs- und Leistungsdiagnostik zur Verfügung.

9 Literatur

BUCHTHAL, F. / SCHMALBRUCH, H. (1970): Contraction times and fiber types in intact human muscle. *Acta Physiologica Scandinavica* 79, S. 435-452.

DESMEDT, J.E. (1981): Motor unit types, recruitment and plasticity in health and disease. keine Zeitschrift Basel: Karger.

GRIMBY, L. / HANNERZ, J. (1981): Flexibility of recruitment order continuously and intermittently discharging motor units in voluntary contraction. DESMEDT, J.E.: Motor unit types, recruitment and plasticity in health and disease. *Progress in Clinical Neurophysiology* 9, S. 201-211.

HENNEMAN, E. (1981): Recruitment of Motoneurons: the size principle. DESMEDT, J.E.: Motor unit types, recruitment and plasticity in health and disease. *Progress in Clinical Neurophysiology*, 9, S. 26-60.

JONHSON, M.a., POLGAR, J. et al. (1973): Data on the distribution of fiber types in thirtysix human muscles. *Journal of Neurological Science*, 18, S. 111-129.

LUCAS, S.M. / RUFF, R.L. / BINDER, M.D. (1987): Specific tension measurements in single soleus and medial gastrocnemius muscle fibers in cat. *Experimental Neurology* 95, 1, S. 142 ff.

MATON, B. (1980): Fast and slow motor units: their recruitment for tonic and phasic contraction in normal man. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 43, S. 45-55.

REACHY, L.D., ADRIAN, R.H., GEIGER, R. (Eds.) (1983): Skeletal Muscle. *Handbook of Physiology*. Sektion 10. American Physiological Society, Bethesda. S. 555-631.

RICE, C.L. / PETTIGREW, F.P. / NOBLE, E.G. / TAYLOR, W. (1988): The fiber composition of skeletal muscle. *Medicine and Sport Science* 27, S.22-39.

SALTIN, B. / HENRIKSSON, J. / NYGAARD, E. / u.a. (1977): Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Annual of the New York Academic Science* 301, S. 3-29.

SECHER, N.H. (1987): Motor unit recruitment. A pharmacological approach. keine Zeitschrift MARCONET, P./KOMI, P.V.: Muscular function in exercise and training. Basel: Karger. S. 152-162.

SMITH, J.L. / SPECTOR, S.A. (1981): Unique contributions of slow and fast extensor muscles to the control of limb movements. DESMEDT, J.E.: Motor unit types, recruitment and plasticity in health and disease. *Progress in Clinical Neurophysiology*, 9, S. 161-175.

WIEMANN, K. (1991): Beeinflussung muskulärer Parameter durch ein zehnwöchiges Dehnungstraining. *Sportwissenschaft* 3, S. 295-306.

YOUNG, J.L., MAYER, R.F. (1981): Physiological properties and classification of single motor units activated by intramuscular microstimulation in the first dorsal interosseous muscle in man. DESMEDT, J.E.: Motor unit types, recruitment and plasticity in health and disease. *Progress in Clinical Neurophysiology*, 9, S. 17-25