

Zur Interpretation und Veränderbarkeit von Kraft-Zeit-Kurven bei explosiv-ballistischen Krafteinsätzen

Teil 1: Physiologische Grundlagen

(Force-time-curves of ballistic muscle contractions: interpretation and changeability. Part 1: Physiological background)

Aus: Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 44 (1993), 3, S.92-103.

Einführung

Es gilt heute als allgemein akzeptiert, daß eine effektive Trainingssteuerung einer möglichst präzisen und individuellen Leistungsdiagnostik bedarf. Die jeweils zu überprüfenden Diagnosesegmente ergeben sich, wenn man zuvor eine Analyse des Anforderungsprofils der Zielsportart bzw. -disziplin erstellt. Die dabei identifizierten Leistungsdeterminanten gilt es dann bezüglich ihres relativen Ausprägungsgrads zu messen. Die im Rahmen der Leistungsdiagnostik erhobenen Befunde bilden einerseits die Basis für die weitere Trainingsplanung, andererseits erlauben sie jedoch auch entscheidende Rückschlüsse auf Wirkungsgröße und Wirkungsrichtung ausgewählter Trainingsmethoden. Möglicherweise liefern sie zusätzlich wertvolle Informationen in bezug auf die Talentselektion.

Das hier Gesagte trifft uneingeschränkt auch auf den Beanspruchungssektor 'Kraft' zu. In vielen Sportarten hängen Erfolg und Mißerfolg in hohem Maße von der Fähigkeit ab, explosive Krafteinsätze unter einem Zeitlimit zu realisieren. Folgt man der Terminologie *Werchoshadskijs* (74), so ist der dabei auftretende Charakter der Muskelspannung 'explosiv-ballistisch' (z.B. bei Wurf- und Schlagbewegungen in den Endgliedern der jeweiligen kinematischen Kette) oder aber 'explosiv-reaktiv-ballistisch' (etwa bei Sprüngen in die Höhe oder Weite nach Anlauf oder vorhergehendem Niedersprung). In jedem Fall impliziert der Begriff 'ballistisch', daß der betreffende Kinetor bei explosiven Krafteinsätzen unter folgenden drei Bedingungen aktiviert wird:

1. kurze Startzeit
2. maximales Tempo
3. keine Korrekturmöglichkeit während der Ausführung.

Mit anderen Worten handelt es sich bei ballistischen Kontraktionen um die dem Menschen schnellstmöglichen Aktionen. Sie laufen - gemäß Kriterium 3 - vorprogrammiert ab (19, 43). Folglich kann eine mit vollem Krafteinsatz 'abgeschossene' Gerade beim Boxen nicht mehr 'zurückgeholt werden', wenn sie ihr Ziel aufgrund einer blitzschnellen (ballistischen) Abduckbewegung des Gegners zu verfehlen droht. 'Dafür' belegt ein kurzzeitig auftretender Schmerz im Ellbogengelenk, daß die antagonistische Muskulatur - im Rahmen derselben Vorprogrammierung, die ja einen 'Treffer' antizipierte - keinen (rechtzeitig einsetzenden) Abbremsbefehl erhielt.

Die konditions-motorische Fähigkeit zu explosiv-ballistischem Krafteinsatz ist in der Sportpraxis meist in einen technomotorischen Ablauf eingebunden - so wie auch der Boxhieb (bei optimaler Ausführung) keine isolierte Armaktion darstellt. Im Gegensatz dazu bemüht man sich im Rahmen der allgemeinen Kraftdiagnostik, durch Einsatz entsprechender Testapparaturen den Einfluß der intermuskulären Koordination zu minimieren. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, können verschiedene Kraftdimensionen innerhalb ein- und desselben Testvorgangs relativ isoliert erfaßt werden. Das liegt daran, daß der bei entsprechenden Labortests aktualisierte Kraftstoß in Form von 'Kraft-Zeitkurven' recht genau und zuverlässig gespeichert und graphisch dargestellt werden kann. Daher sind solche rechnergestützten Kurvenregistrierungen im Rahmen von kraftbezogenen Längs- und Querschnittuntersuchungen inzwischen das 'Mittel der Wahl'.

Erfolgt simultan dazu eine Dokumentation der EMG-Aktivität der eingesetzten Muskeln, so sind gute Voraussetzungen dafür gegeben, durch ein bestimmtes Krafttraining intendierte bzw. induzierte neuromuskuläre Adaptationen zu identifizieren.

Wie der Begriff 'neuromuskulär' bereits impliziert, sind es zwei eng miteinander verknüpfte Haupteinflußgrößen, die den Ausprägungsgrad von explosiv-ballistischen Kontraktionen und damit korrespondierenden Kraft-Zeit-Kurven bestimmen: Aus morphologisch-funktioneller Sicht gilt es vor allem, die Fasertyp-Verteilung und den Querschnitt eines Muskels zu berücksichtigen. Aus neuronaler Perspektive determinieren letztlich die Mechanismen der Kraftregulation 'Rekrutierung' und 'Frequenzierung' das Explosivkraftniveau. Um eine Basis für die Interpretation von Kraft-Zeit-Kurven wie auch für trainings-relevante Handlungstechnologien zu erarbeiten, erscheint es daher sinnvoll, beide Adaptationsbereiche näher zu betrachten.

Fasertyp-Verteilung und Muskelquerschnitt

Die mittlerweile schon 'klassisch' zu nennenden histologischen Untersuchungen von Johnson et al. (41) belegen eindrucksvoll, daß die meisten Skelettmuskeln des Menschen aus einer relativ ausgewogenen Komposition von motorischen Einheiten ('ME') des schnell kontrahierenden und ermüdenden Typs 11 wie auch des langsameren, ermüdungsresistenten Typs 1 bestehen. Die Hauptbegründung dafür ist in deren nur selten ausschließlic phasischer oder postural-tonischer Alltagsbeanspruchung zu sehen (51). Insofern überrascht es kaum, daß bei den von Johnson et al. untersuchten sechs Leichen - über die körperlichen Aktivitäten bzw. sportliche Vergangenheit der Verstorbenen sind keine Informationen verfügbar - nur sehr wenige Muskeln eindeutig einer der beiden Kategorien ‚schnell‘ oder ‚langsam‘ zugewiesen werden konnten (Tab. 1).

Primär Typ II-Fasern		Primär Typ I-Fasern	
M. orbicularis oculi:	80%	M. soleus	87%
M. rectus femoris	70%	M. adductor pollicis	80%
M. triceps brachii	70%	M. tibialis anterior	73
M. sternocleidomastoideus	65%	M. biceps femoris	67%

Tabelle 1: Skelettmuskeln mit überwiegend Typ II Faseranteilen (kinks) bzw. dominierend Typ I-Anteilen. Untersucht wurden insgesamt 36 verschiedene Muskeln. (Nach 41)

An aktiven Leistungssportlern verschiedenster Disziplinen erhobene muskelbiopsische Befunde haben allerdings den Beweis erbracht, daß die 'Erfolgsaussichten' gerade in bezug auf die Beanspruchungsdimensionen 'Schnelligkeit' bzw. 'Ausdauer' in hohem Maße von einer typdominanten Faserverteilung abhängen (3, 4, 24). Es darf inzwischen als gesichert angesehen werden, daß dabei die genetische Determination von entscheidender Bedeutung ist. Zumindest beim erwachsenen Menschen scheint eine trainingsinduzierte Fasertypumwandlung auf den im Faserspektrum unmittelbar benachbarten Subtypus begrenzt zu sein (37, 39). Hauptursache dafür dürfte das jeweils charakteristische Impulsmuster des 'zuständigen' (x-Motoneurons sein, mit dem die Fasern der betr. ME aktiviert werden. Zusätzlich muß offenbar aber auch die Beanspruchungshäufigkeit bzw. die Beanspruchungsdauer der ME selbst als Einflußgröße angesehen werden. Das fasertypprägende Aktivierungsmuster läßt sich durch Training jedenfalls nur in begrenztem Maße qualitativ verändern.

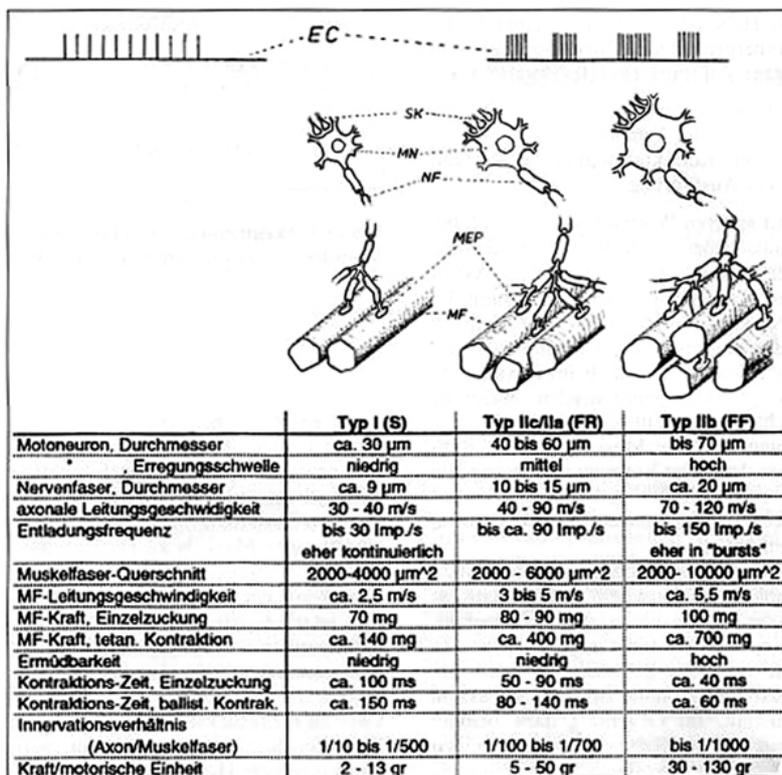


Abbildung 1: Schematische Darstellung unterschiedlicher motorischer Einheiten sowie tabellarische Zusammenfassung relevanter morphologischer und funktioneller Parameter (angenäherte Durchschnittswerte).

EC Entladungscharakteristik. MEP motorische Endplatte. MF Muskelfaser. MN Motoneuronen. NF Nervenfaser (Axon). SK Synaptische Kontakte

Die angesprochene genetische Determination bezieht sich folglich primär auf ein nur geringfügig vorhandenes, über die funktionelle Reserve hinausgehendes neuronales Umwandlungs-Vermögen. Im Gegensatz dazu steht die bemerkenswerte Adaptationsfähigkeit der Muskelfasern, wie man aus Kreuzinnervations- und Elektrostimulationsexperimenten (an Tieren) weiß (eine Detailübersicht hierzu findet sich bei 24). Übernimmt man die mit der Fasertyp-Klassifizierung (zumindest indirekt) verbundene 'Kontraktilitäts-Hierarchie', so entspricht diese zugleich auch einer 'Ermüdbarkeits-' und einer 'Entspannungsfähigkeits-Rangfolge'. Danach lassen sich alle Fasern bzw. ME in zumindest vier Subkategorien mit ansteigender Kontraktions- und Entspannungsschnelligkeit bzw. abnehmendem Ausdauervermögen einteilen: Typ 1, IIc, IIa, IIb (Abb. 1).

Folglich darf eine trainingsinduzierte Umwandlung zum Nachbartypus mit höherer bzw. niedrigerer ATPase-Aktivität bez. des damit einhergehenden Effekts nicht unterschätzt werden. Diese Feststellung gewinnt an Gewicht, wenn man berücksichtigt, daß es auch innerhalb ein- und derselben Faser kontraktilitätsverändernde Anpassungsreserven gibt. So weiß man aus Tierversuchen, daß bereits ein mehrwöchiges unterschiedliches Trainingsprogramm in schnellen (Lauf-)Muskeln signifikante quantitative Veränderungen der Verteilungsproportion des Myosinkopf-Besatzes mit schnellen leichten Ketten bewirkt (54). Die hier nachgewiesene, beanspruchungsinduzierte prozentuale Umverteilung unterschiedlich schneller MyosinUntereinheiten (innerhalb desselben Muskelfasertyps) impliziert eine 'subtilere' Differenzierungsreserve als sie die Fasertransformation selbst darstellt. (Eine solche liegt bekanntlich erst dann vor, wenn die schweren Ketten des Schaft- und Halsabschnitts des Myosinmoleküls sich verändern, da die jeweilige Qualität dieser Bausteine das histochemische Zuordnungskriterium schwere Ketten vom 'Typ a' oder vom 'Typ b' - bilden. Im Gegensatz dazu verfügen die deswegen so bezeichneten Typ IIa- wie auch die Typ IIb-Fasern gleichermaßen über drei schnelle leichte Ketten (LC1, LC2, LC3), die doppelpaarig angeordnet am Myosinkopf für die unmittelbare Interaktion mit Aktin ‚zuständig‘ sind; s. Abb. 2.)

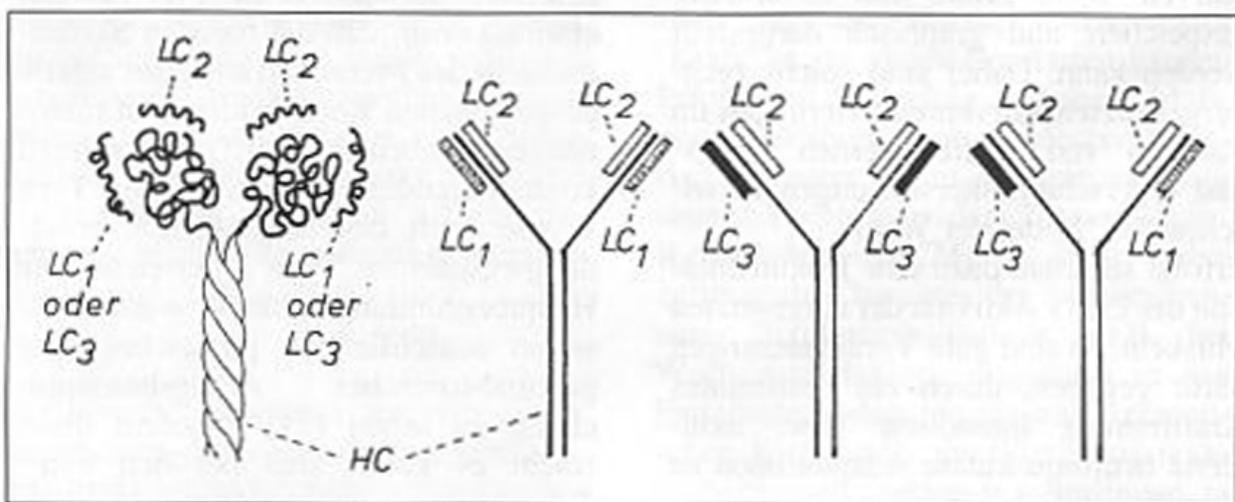


Abbildung 2: Modell der Struktur eines Myosin-Moleküls (oben; verändert nach 44) und die drei Kombinationsmöglichkeiten von schnellen leichten Ketten (LC1/LC2/LC3 vom Typ 'F') am Kopfteil eines schnellen Typ IIb-Moleküls (unten; verändert nach 54). HC schwere Ketten

Was die aufgezeigte beanspruchungsabhängige Veränderung der Verteilungsproportion an den Myosinköpfen betrifft - danach bilden entweder mehr leichte Ketten des Typs LC 1 oder aber des Typs LC3 gemeinsam mit LC2 die Myosinkopf-Paare (s. Abb. 2) -, so spricht vieles dafür, daß diese Verschiebungen sich auf die Kontraktionsschnelligkeit auswirken (54). Das würde Veränderungen der vom Gesamtmuskel realisierbaren Kraft-Zeit-Kurve unter explosivballistischen Bedingungen nach sich ziehen.

Daß Krafttraining ggf. eine noch tiefergreifende, komplette Fasertyp-Umwandlung bewirken kann, wurde inzwischen durch verfeinerte stereologische Analysemethoden - hier vor allem in bezug auf das M-BaDd (49) - bzw. histochemische Färbetechniken der entnommenen Gewebeproben auch beim Menschen nachgewiesen. Bemerkenswert erscheint dabei ein Befund, demzufolge Querschnittstraining offenbar die relative Zahl der (schnellstzuckenden) Typ IIb-Fasern zugunsten einer Zunahme der Typ IIa-Fasern vermindert, während eine

mehrwöchige Trainingspause eine inverse Reaktion hervorrief (67). Nach Wiederaufnahme des Krafttrainings reduzierte sich wiederum der prozentuale Anteil an Typ IIb-Fasern, ein zusätzliches 7wöchiges Programm führte schließlich dazu, daß in den entnommenen Biopsien derselben Vpri keine IIb-Fasern mehr identifiziert werden konnten.

Möglicherweise läßt sich durch die hier nachgewiesene Trainingspauseninduzierte Umwandlung von Typ IIa- in Typ IIb-Fasern ein Befund erklären, den *Ishida et al.* (40) vorlegten. Danach stieg die Maximalkraft nach einem 8wöchigen Krafttraining um 3,1% an (MVC der Wadenmuskulatur; untrainierte Vpn), jedoch veränderte sich die Kontraktilität nur unwesentlich. Ein zweiter, nach 8wöchiger Trainingspause vorgenommener Test hingegen zeigte eine signifikante Zunahme der Kraftanstiegsrate (um 22,5%). Die genannten Autoren diskutieren in diesem Zusammenhang eine 'Nachtrainings-Adaptation'. Da keine Biopsien entnommen wurden, kann über den konkreten Adaptations-Bereich nur spekuliert werden. Ggf. liegt dieser in der von *Staron et al.* (67) nachgewiesenen 'Rückumwandlung' von Typ IIa- in Typ IIb-Fasern.

Innerhalb eines isokinetischen Krafttrainingsexperiments wiesen *Ewing et al.* (25) nach, daß sich Typ 1- wie auch Typ IIa-Fasern signifikant im Querschnitt vergrößerten, während Typ IIb-Fasern keine Hypertrophie aufwiesen. Diese Feststellung galt auch für die Teilgruppe, die mit der höchsten einstellbaren Winkelgeschwindigkeit trainierte (3007s). Berücksichtigt man allerdings, daß dabei bestenfalls 20% der im Kniegelenk bei ballistischen Bewegungen maximal möglichen Winkelgeschwindigkeit realisiert werden, so fragt es sich, inwieweit die schnellsten ME bei derartiger isokinetischer Beanspruchungscharakteristik überhaupt 'überschwellig' einbezogen wurden.

Diese Anmerkung erfolgt auf der Basis von Untersuchungsergebnissen, die *Nardone u. Schieppatti* (52) vorlegten. Danach scheint es sinnvoll, innerhalb eines Muskels nicht nur nach verschiedenen Fasertypen bzw. ME zu differenzieren, sondern darüber hinaus auch noch funktionsbezogene 'Spezialisierungen' zu berücksichtigen: Während viele ME sowohl bei phasischer als auch bei tonischer Beanspruchung aktiviert werden, treten andere - höherrangige offenbar nur bei ballistischen Kontraktionen oder aber nur nach vorhergehender Dehnung in Aktion. (So besteht der M. gastrocnemius nach *Nardone & Schieppatti* zu ca. 50% aus ME, die exzentrisch 'eingestellt' sind.)

Bevor im nächsten Abschnitt auf die hier - zumindest indirekt - angesprochene neuromuskuläre Organisation des Faserspektrums in ME bzgl. Kraftregulierung und zeitlichem Verlauf der Kraftentwicklung näher eingegangen wird, soll noch auf ein Untersuchungsergebnis hingewiesen werden, das die bislang gültige Lehrmeinung einer homogenen Ausprägung der zu einer ME gehörenden Faserpopulation in Frage stellt. So konnte (bei Tieren) nachgewiesen werden, daß sich nicht nur die zu verschiedenen ME, sondern auch die zu ein- und derselben ME gehörenden Fasern in Abhängigkeit von ihrer topographischen Position im Muskel (z.B. an der Oberfläche oder im Muskelkern) signifikant bzgl. Enzymsatz, Querschnitt und Form unterscheiden (7, 48). Ohne die Ursache für diese 'Nicht-Uniformität' exakt angeben zu können, weist *Larson* (48) darauf hin, daß es offenbar neben der neuronalen Versorgung ~och andere Faktoren geben muß, die die Faserqualität(en) innerhalb einund derselben ME beeinflussen. So etwa die mechanische Beanspruchung, die für Oberflächenfasern in Muskelbauchnähe insofern anders ist, als diese - mit zunehmender Hypertrophie und Kontraktion - hier nicht (mehr) parallel zur Knochen-Sehnen-Achse verlaufen. Zu ähnlichen Untersuchungsergebnissen bzw. Schlußfolgerungen gelangen *Sale et al.* (56), die Muskelbiopsien und computertomographische Befunde des M. biceps brachii von Bodybuildern sowie männlichen und weiblichen (kraft)untrainierten Normalpersonen auswerteten. Diese Befunde werden nachvollziehbar, wenn man berücksichtigt, daß die mosaikförmige Verteilung der Fasern einer einzelnen ME sich auf bis zu 28% der Gesamtquerschnittsfläche eines Muskels erstrecken kann (7).

Vergleicht man schließlich zwei Muskelfasern gleichen Querschnitts, aber verschiedenen Typs miteinander, so unterscheiden diese sich nicht nur bez. ihrer Kontraktilität, sondern ggf. auch noch hinsichtlich ihrer Kontraktionskraft. Während die 'Zuckungsschnelligkeit' sowohl durch die bereits angesprochene 'Myosinkopf-Bestückung' als auch durch die Volumendichte des sarkoplasmatischen Retikulums (SR) determiniert wird, ist eine Divergenz in der Kontraktionskraft primär auf eine ggf. stark variierende myofibrilläre 'Packungsdichte' zurückzuführen. Die Volumendichte des SR wie auch des Aktomyosins kann bei Typ 11-Fasern im Extremfall um bis zu 50% höher ausfallen (1, 42). Damit lassen sich die in der Literatur angegebenen beträchtlichen Kontraktionskraft-Unterschiede von 16 bis 30 N pro cm² Faserfläche (24) zumindest partiell erklären.

Über Qualität, Quantität und Adaptationsverhalten der intrafusalen Muskulatur sind in bezug auf den Menschen bislang keine Befunde verfügbar. Aus Tieruntersuchungen weiß man jedoch, daß beispielsweise die Anzahl der Spindeln von Muskel zu Muskel stark variiert (14). Inwieweit die 'Reaktivität' eines Kinetors nicht nur von seinem Faserspektrum, sondern auch von seiner (damit ggf. kovariierenden) 'SpindelAusstattung' beeinflusst wird, bleibt vorerst Spekulation.

Kraftregulationsmechanismen

Rekrutierung

Die Erkenntnis, daß der Zugriff bzw. Einsatz der ME nach dem sog. 'Größenprinzip der Rekrutierung' erfolgt, geht ursprünglich auf Untersuchungsergebnisse von Hennemann zurück. In den an Katzen durchgeführten Versuchen konnte nachgewiesen werden, daß zur graduellen Erhöhung der Kraft eines Muskels additiv immer größere Motoneurone mit einem anwachsenden 'Innervations-Verhältnis' (Abb. 1) aktiviert werden (34, 35). In den vergangenen 25 Jahren ist die grundsätzliche Gültigkeit des 'size principle' von vielen Forschungsgruppen an Mensch und Tier bestätigt worden (15, 45). Danach werden bei geringstem Kraftbedarf nur wenige ME kleinzelliger Motoneurone aktiviert. Der Befehl dazu kommt aus den motorischen Zentren und führt über synaptische Verbindungen letztlich zur Aktivierung der 'zuständigen' Alpha-Motoneurone. Nun hängt es offenbar direkt vom Ausprägungsgrad der zentralen Erregung ab, wie viele ME eines Muskels einbezogen werden. In jedem Fall ist die Aktivierung prinzipiell hierarchisch organisiert. Folglich werden die kleinsten ME - wie bereits erwähnt - zuerst rekrutiert, da sie die relativ niedrigsten Empfindlichkeits-Schwellen besitzen. So genügen bereits sehr wenige supraspinale Impulse, um eine (leichte) Kontraktion auszulösen (33).

Soll die resultierende Spannung mit derselben geringen Intensität aufrechterhalten werden - etwa bei tonischer Funktion -, so zeigt das betreffende (Alpha-Motoneuron wiederholte Entladungen derselben (niedrigen) Frequenz. Viele Typ 1-ME, die im Rahmen der Stützmotorik eingesetzt werden, weisen aufgrund der dominierend statischen Beanspruchung eine solche Entladungscharakteristik auf. Vermutlich hat dieses kennzeichnende Merkmal der Typ 1-Motoneurone *Howald* (38) dazu veranlaßt, von einer 'typischen Dauerstimulation' der zugeordneten Fasern zu sprechen. Das ist insofern mißverständlich, als auch tonische ME quasi 'Ruhephasen' einlegen, also nicht ununterbrochen aktiviert sind. Allerdings verläuft ihr Stoffwechsel überwiegend aerob. So sind solche Typ 1-ME bei dynamischer Beanspruchung im Bedarfsfall 'unermüdetlich', sofern keine Abkopplung vom ver- bzw. entsorgenden Blutstrom erfolgt.

Wird mehr Kraft benötigt, kommt aufgrund des zentral erteilten 'stärkeren' Befehls eine zunehmende Anzahl weiterer ME mit zunehmend größeren Alpha-Motoneuronen zum Einsatz. Die zusätzlich aktivierten ME entladen mit einer vergleichsweise höheren Frequenz als die bereits auf niedrigeren Kraftstufen rekrutierten (17, 28). Das Verstärken der (zentralen) 'Erregung' zieht innerhalb desselben, für einen Muskel insgesamt verfügbaren Motoneuronen-Pools somit quasi 'zwangsläufig' das Aktivieren von ME mit höheren Schwellenwerten nach sich. Offenbar besitzt jede ME eine eigene 'Frequenz-Kennung'.

Bis zu welchem relativen Ausprägungsgrad - im Vergleich zur Kraft des Gesamtmuskels bei maximaler willentlicher Kontraktion ('MVC') - dieses Prinzip des Einbeziehens immer größerer ME mit mehr Fasern höherer Kontraktilität im Sinne der Rekrutierung weiter fortgesetzt wird, hängt offenbar primär von der dominierenden Faserverteilung des betreffenden Muskels ab. Ferner spielen auch seine Größe und seine Funktion eine wesentliche Rolle. Besteht er - wie etwa der *M. add. pollicis* - zu überwiegenden Anteilen aus ME vom Typ I, so sind bei etwa 50% MVC bereits alle willentlich aktivierbaren ME einbezogen. Weitere Kraftsteigerungen sind dann nur noch über die sog. 'Frequenzierung' möglich (5, 24). Andere Muskeln - wie etwa der *M. deltoideus* - sind dagegen so organisiert, daß bis in den Bereich von 80-90% MVC weiterhin neue ME mit höherer Kontraktilität und größerem Innervationsverhältnis zusätzlich rekrutiert werden. Erst danach erreicht der betreffende Muskel durch nochmaligen Frequenzanstieg den 'fusionierten Tetanus' (5, 15). Als einziger Autor weist *Sale* (57) darauf hin, daß in einigen Muskeln sogar bis einschließlich 100% MVC noch zusätzliche ME einbezogen würden. Vermutlich ist dieser Befund primär auf ein - speziell bei (Kraft-)Untrainierten - interindividuell deutlich divergierendes Aktivierungsvermögen zurückzuführen. Unabhängig davon könnte aber auch die bereits angesprochene 'funktionelle Spezialisierung' bestimmter 'reaktiver' ME z.B. im *M. gastrocnemius* - es verhindern, daß unter konzentrischen Testbedingungen überhaupt eine vollständige Integration aller ME dieses Kinetors gelingt.

Frequenzierung

Unter dem Begriff 'Frequenzierung' sollen nachfolgend zwei Möglichkeiten der Kraftregulation zusammengefaßt werden: Zum einen eine längere Entladungsdauer bei identischer Frequenz. Dies führt bzgl. des Kurvenverlaufs zu einer höheren 'Kraftspitze' der bereits rekrutierten ME ohne Veränderung des Kraftgradienten. Zum anderen können im Sinne der 'Frequenzmodulation' (21) - höhere Entladungsfrequenzen freigesetzt werden. So sorgen höher, Impulsraten, die aufgrund eines größeren Anstrengungsgrades gebildet werden, dafür, daß die betr. ME mit der Kontraktion zeitlich früher beginnt oder aber eine bereits begonnene in kürzerer Zeit beendet. Dadurch wird ein schnellerer Kraftanstieg (73) realisiert. Schließlich erfolgt bei maximaler 'neuronaler Aktivierung', die die höchsten Impulsfrequenzen jedes Motoneurons freisetzt, die schnellstmögliche Aktualisierung des Kraftmaximums.

Wie hoch dieses Maximum intrapersonell letztendlich ausfällt, hängt offenbar von der jeweils angewendeten 'Bewältigungsstrategie' bzw. von der Aufgabenstellung ab. Versucht man, sein Kraftmaximum so schnell wie möglich zu erreichen, ergibt sich eine (frequenzinduzierte) höhere Kraftanstiegsrate, als wenn man die Kraft quasi stetig bis zum Maximum - im Sinne eines rampenförmigen Anstiegs - anwachsen läßt. Der höchste

Gradient läßt sich dann realisieren, wenn man sich ausschließlich auf den schnellen Kraftanstieg konzentriert. Dafür fällt die Kraftspitze dann deutlich geringer aus (6). Inwieweit dieser an Untrainierten beiderlei Geschlechts (mittels Handdynamometer) erhobene Befund auch auf krafttrainierte Athleten/innen (und andere Muskelgruppen) übertragbar ist, wird von den genannten Autoren nicht weiter diskutiert.

Daß die Maximalkraft eines Muskels in jedem Fall nur sehr kurzzeitig aufrechterhalten werden kann, liegt primär daran, daß im Gegensatz zu den Typ 1-ME, deren Motoneurone lange und kontinuierlich mit niedrigen bis mittleren Frequenzen (zwischen 5 und 25 1/s) entladen (33), die Typ 11-ME nur sehr kurz und diskontinuierlich mit hohen und höchsten Frequenzen - im Extremfall mit bis zu 150 1/s - 'feuern' (21, 27). Entsprechend geht die Maximalkraft geradezu 'dramatisch' zurück. Nach *Arendt-Nilsen & Mills* (2) beträgt die Kraftverluste bei maximaler Kontraktion 50 bis 70% pro Minute. Diese rapide Kraftreduktion ist zusätzlich auch darauf zurückzuführen, daß wegen des kontraktionsbedingten erhöhten Muskelinnendrucks ein kompletter Durchblutungsstopp vorliegt.

Faßt man das bisher Gesagte zusammen, so ergibt sich zum Erzielen einer maximalen Effizienz explosiv-ballistischer Krafteinsätze die Notwendigkeit, möglichst alle ME zu rekrutieren und diese durch höchste Impulsfrequenzen zu schnellstmöglichem Kraftanstieg zu aktivieren. Hierzu kommt es aufgrund des zentral erteilten maximalen Innervationsbefehls. Bedenkt man, daß - wie bereits ausgeführt - in fast allen Skelettmuskeln spätestens bei 90% MVC die Rekrutierung quasi ausgeschöpft ist, kann das Größenprinzip bei maximaler Aktivierung demzufolge keine wesentliche Rolle mehr spielen. Dies vor allem dann nicht, wenn (unter dieser Bedingung) alle zu integrierenden ME bereits feuern, bevor eine muskemechanische Reaktion nachweisbar ist (26, 19).

Komi (46) konnte in diesem Zusammenhang nachweisen, daß die 'elektromechanische Verzögerung' bei Muskeln mit überwiegend schnellen Faseranteilen signifikant kürzer ist als bei solchen, die dominierend aus Typ 1-ME bestehen. Dieser Befund kann als Indiz dafür angesehen werden, daß die schnellen Fasern bei schnellstmöglicher maximaler Aktivierung nicht erst 'später' eingesetzt werden. (Allerdings wäre es auch möglich, das angesprochene Untersuchungsergebnis dadurch zu erklären, daß schnell kontrahierende Kinetoren auch über entsprechend schnellere Typ 1-ME verfügen.)

Der Hauptgrund für die hiermit angedeutete 'Summations-Strategie' bei maximaler Aktivierung liegt vermutlich darin, daß nunmehr keinerlei Abstufungsnotwendigkeiten mehr bestehen. Im Gegenteil kann das biologische System nur dann seine höchste Leistungsfähigkeit realisieren, wenn alle ME von Anfang an integriert sind (42). Somit kommt zur Entwicklung eines maximal schnellen Spannungsaufbaus unmittelbar zu Kontraktionsbeginn einer möglichst optimalen 'Aktivierungs-Synchronisation' der ME bei explosiv-ballistischen Bewegungen entscheidende Bedeutung zu.

Berücksichtigt man in diesem Zusammenhang, daß die größeren Typ II-ME nicht nur über eine größere axonale, sondern darüber hinaus auch über eine höhere (Muskel-) Faserleitungsgeschwindigkeit verfügen, richtet sich der mechanische Beitrag der einzelnen Einheiten zur Kraftentwicklung nach ihrer Kontraktibilität. Diese Aussage wird unter der Prämisse getroffen, daß die ballistischen Kontraktionsbefehle bei maximalem Krafteinsatz tatsächlich näherungsweise gleichzeitig (26) postsynaptisch an den Muskelfasermembranen eintreffen. Folglich entscheidet unter dynamischen Bedingungen die (äußere) Widerstandsgröße darüber, in welchem Maße auch die langsameren ME zur Kraftproduktion einen effektiven Beitrag leisten können. Insofern ergibt sich keine 'selektive Aktivierung' der Typ 11-ME - die auch diskutiert wird und in Sonderfällen nachgewiesen werden konnte (13, 28, 33, 52, 65, 70) -, sondern eine kontraktilitäts-determinierte Summation:

Je nach Faserspektrum des schnellstmöglich maximal aktivierten Muskels kommt es in direkter Abhängigkeit von der gegebenen Kontraktibilität nach frühestens 60 bis 80 ms (falls ausschließlich Typ IIb-Fasern mit den relativ schnellsten leichten Ketten verfügbar sind, s. Abb. 2) und spätestens 160 ms (nur Typ 1-Fasern, deren Myosinköpfe mit den relativ langsamsten leichten Ketten 'bestückt' sind) zur explosivballistischen Kraftspitze. Da es jedoch kaum Muskeln gibt, die ausschließlich aus Typ IIb-ME bestehen, werden in der Regel bei maximalem, explosiv-ballistischem Spannungsaufbau Kontraktionszeiten von 120 bis 160 ms gemessen (18). Das dürfte ausreichen, um auch die langsameren Typ 1-ME mechanisch vollständig zu integrieren. Bei noch kürzeren Aktualisierungszeiträumen allerdings - wenn etwa 60 bis 80 ms vorgegeben sind - könnten demzufolge nur Typ 11-ME ihre volle Kontraktionskraft einbringen.

Das gilt selbst dann, wenn - wie beim Sprintlauf mit 80 ms Bodenkontaktzeit Reflexmechanismen (in der Wadenmuskulatur) ausgenutzt werden: Bis zum Wirksamwerden des Muskeldehnungsreflexes vergehen etwa 30 - 40 ms (58). Dabei wird der bereits in der Vorderschwungphase voraktivierte *M. gastrocnemius* unmittelbar mit Erreichen des Vorderstützes exzentrisch so hoch beansprucht, daß es zur reflex-induzierten Kontraktion kommt. Da zwischen der max. elektrischen Aktivität und der nachfolgenden muskemechanischen Wirkung (je nach Faserspektrum) eine Zeitspanne von 26 bis 40 ms liegt (46), können aufgrund der dann noch (im Stütz) verfügbaren 'Restzeit' primär nur die schnellsten ME ihre Kraft einbringen. (Auf selektive Aktivierung von Typ 11-ME - ausgelöst durch schnellen Richtungswechsel und Bodenunebenheiten beim Laufen - wie

sie Grimby (28) nachweisen konnte und De Haan, Lodder & Sargeant (29) bei gleichzeitiger Deaktivierung der Typ 1-ME postulieren, soll hier nicht näher eingegangen werden.)

Aus dem Gesagten folgt auch, daß die ballistische Dimension 'Startkraft' definiert als Fähigkeit, bei maximalem Krafteinsatz innerhalb von 30 ms nach Kontraktionsbeginn einen möglichst großen Impuls zu realisieren - primär von Kontraktibilität und Querschnitt der schnellsten Typ 11-ME determiniert wird (und nicht der Typ 1-ME, wie nach dem Hennemanschen Prinzip zu erwarten).

Bührle (10,12) interpretiert die Befunde von Freund & Bädigen (26), vor allem aber diejenigen von Desmedt (20) allerdings anders und verweist unter Bezug auf die genannten Autoren darauf, daß auch bei ballistischen Bewegungen das Größenprinzip Geltung habe. Es käme jedoch zu einem starken zeitlichen Zusammenschieben der 'Rekrutierungsabfolge'. Die weitere Intensivierung dieser 'Verdichtung' könne als Hauptursache für einen durch entsprechendes Krafttraining erzielbaren steileren Anstieg der Kraft-Zeit-Kurve angesehen werden.

Für geringere intendierte Kraftspitzen trifft die Aussage Bührles, daß das Größenprinzip auch bei ballistischen Aktionen Gültigkeit besäße, offenbar zu. Jedoch belegen entsprechende, an Untrainierten gewonnene Untersuchungsergebnisse (16, 17, 18, 19), daß unter ballistischen Kontraktionsbedingungen bereits bei einer 'Zielgröße' von 50% MVC der neuronale Einstrom zu den einzelnen ME zeitlich nur noch äußerst schwer zu trennen ist (s. Abb. 3).

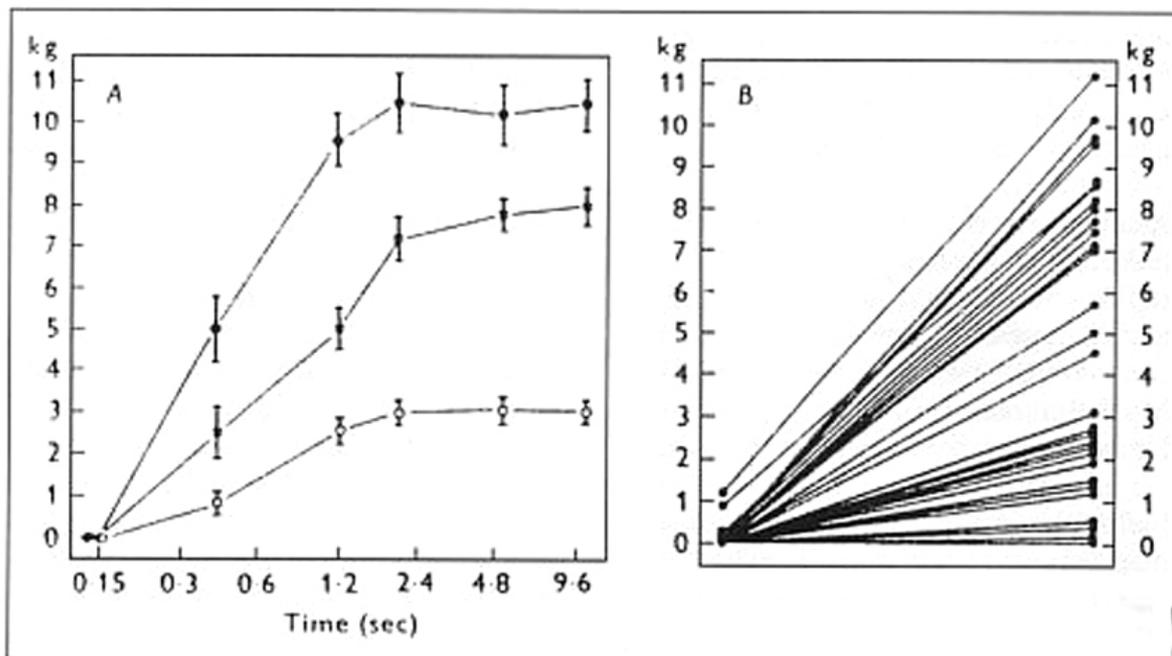


Abbildung 3: (A) 'Kraftschwelle' zur Aktivierung von drei ME verschiedenen Typs zum Erreichen von 50% MVC (in 10 Versuchen). Es zeigt sich, daß die Schwellenreduktion direkt von der Zeitdauer des Kraftabbaus abhängig ist. Wenn 50% MVC in weniger als 2 s (Abszisse) realisiert werden, beginnen die ME (spannungsbezogen; s. Ordinate) immer früher zu 'feuern', bis schließlich unter ballistischen Bedingungen (50% MVC in 150 ms) keine Schwellen mehr nachweisbar sind. (B) 'Kraftschwellen' zur Aktivierung von 29 verschiedenen ME, die das gesamte Faserspektrum vom Typ 1 bis Typ IIb abdecken. Bei rampenförmigem Kraftanstieg (12 kg = 50% MVC Spannungsspitze in 5 s) zeigt sich ein sukzessives Rekrutieren gemäß dem Größenprinzip (rechte Ordinate). Bei ballistischer Kontraktion hingegen (erreichte Spannungsspitze: ebenfalls 12 kg! jedoch innerhalb von 120 ms) sind alle ME - bis auf zwei, die aber auch schon bei ca. 1 kg hinzukommen - bereits von Anfang an integriert (linke Ordinate).

Deswegen wurden auch keine Tests mit höherer, ballistisch zu realisierender Kontraktion als mit 50% MVC durchgeführt. Dagegen konnte bei ballistischen Anspannungen, bei denen von den Vpn - unter Bildschirmkontrolle des Kraftanstiegs - Spannungsspitzen zwischen 200 g und 50% MVC (= 12 kg) realisiert worden waren, ein eindeutiger Nachweis der Gültigkeit des Größenprinzips erbracht werden (17, 18). Dies gelang, indem man die (spannungsbezogene) Aktivierungsschwelle derselben ME bei langsamem, rampenförmigem Kraftanstieg mit derjenigen verglich, die bei ballistischer Anspannung festgestellt werden konnte. Der Hauptunterschied zwischen rampenförmiger und ballistischer Aufgabenbewältigung bestand in einer progressiven Reduktion der Schwellenwerte. Sie betrug bei 50% MVC ca. 80% bis 90%. D.h., daß eine ME, die bei stetigem Kraftanstieg - also ohne jeglichen 'Zeitdruck' - eine kritische Schwelle von 10 kg aufweist, bei ballistischer Kontraktion bereits bei Erreichen einer Spannung von 1 bis 2 kg aktiviert wird (s. Abb. 3).

Offenbar sorgt die erregungsabhängige, erheblich höhere Frequenz bei ballistischer Aktion für ein früheres Öffnen der 'Frequenzschleuse'.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, daß die genannten Autoren (17) bei ihren Untersuchungen - z.B. am M. tibialis anterior, in den eine hoch differenzierende Elektrode eingestochen wurde - die Hypothese überprüften, ob es unter ballistischen Bedingungen zu einer Umkehrung des Größenprinzips bzw. zur selektiven Aktivierung der Typ 11-ME kommt. Dies bestätigte sich nicht. Hingegen wird die effektivere mechanische Summation der Kontraktionskräfte der ME bereits bei 50% MVC von *Desmedt u. Godaux* (17) ausdrücklich betont - und als Erklärung für die sehr zweckmäßige Reduktion der Empfindlichkeitsschwellen angeführt. Dadurch wird das von *Bührle* (12) postulierte krafttrainingsinduzierte zeitliche Zusammenschieben der Rekrutierungsabfolge nicht ausgeschlossen. Da jedoch selbst Untrainierte diesbezüglich nur über sehr geringe Adaptationsreserven verfügen, erscheint es weniger wahrscheinlich, daß dieser Interpretationsansatz als primäre Begründung für ein Ansteigen des Kraftgradienten zutrifft.

(Um nicht mißverstanden zu werden sei in diesem Kontext darauf hingewiesen, daß ein durch Maximalkrafttraining realisiertes Einbeziehen zusätzlicher, zuvor - bei geringerem Trainiertheitsgrad nicht aktivierbarer ME in erheblichem Maße zu einer Veränderung von KraftZeit-Kurven bei explosiv-ballistischen Kontraktionen beitragen dürfte.)

Ein weiterer Hinweis darauf, daß das Rekrutierungsprinzip bei schnellstem und maximalem Krafteinsatz nur relativ geringe Relevanz besitzt, läßt sich aus den pharmakologischen Befunden von *Secher* (62) ableiten. Dieser Autor setzte zwei Medikamente ein, die selektiv Typ 1 bzw. Typ II-ME hemmen bzw. sogar neuronal inaktivieren. Die resultierenden Kraft-Zeit-Kurven der entsprechend medikamentös 'präparierten' Probanden zeigen - in Ergänzung zum simultan aufgezeichneten EMG - eine jeweils typische Antwortreaktion (Abb. 4).

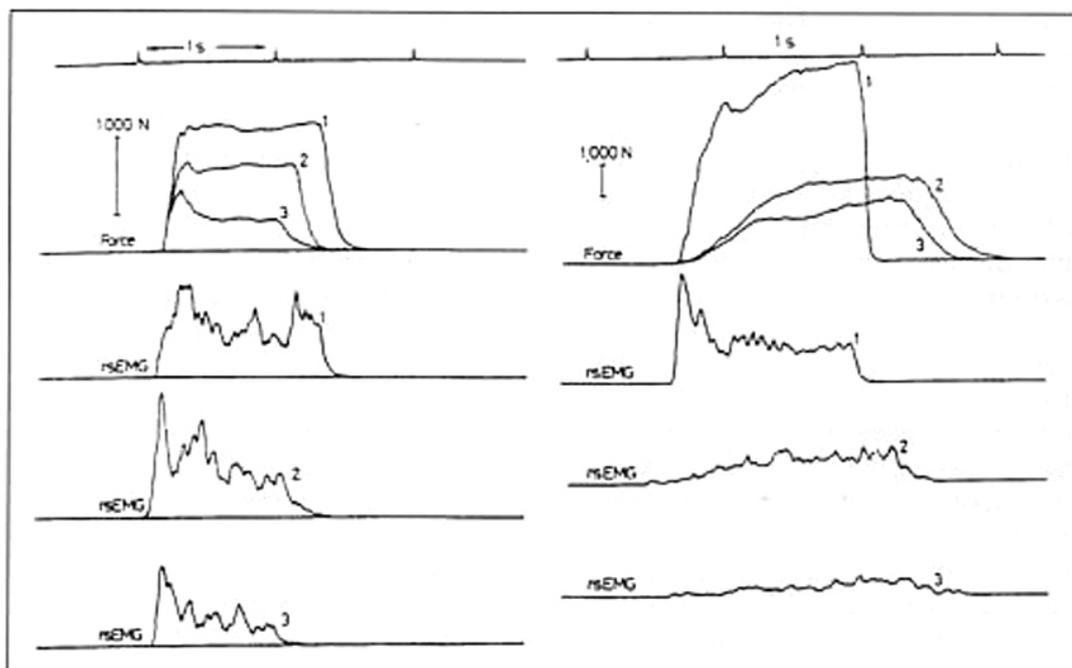


Abbildung 4: Überinandergelagerte Kraftzeitkurven bei maximal schnellem Krafteinsatz der e.-o Kniestrecke und korrespondierende EMG-Registrierung nach selektiver und progressiver neuronaler Typ I- (Kurven 2 u. 3 links) bzw. Typ II-Hemmung (Kurven 2 u. 3 rechts) durch entsprechende Pharmaka (nach 62)

Auf der linken Seite der Abbildung 4 weisen die nach Applikation eines Medikaments (in unterschiedlich starker Dosierung) realisierten Kurven 2 und 3 einen im Anfangsteil identischen Kraftanstieg, jedoch ein deutlich reduziertes Kraftmaximum gegenüber der Referenzkurve 1 auf, die zuvor bei gleicher Aufgabenstellung (maximal schnelle Kniestreckung) ohne ein die Typ I-ME hemmendes bzw. blockierendes Pharmakon aufgezeichnet worden war. (Die Zusatzaufgabe der VII bestand hier offenbar darin, die Maximalkraft zumindest kurzzeitig zu halten). Besonders Kurve 3 belegt, daß das nach Erreichen der (reduzierten) Kraftspitze ohne Typ I-ME nicht mehr gelingt. Die darunter abgebildeten, jeweils korrespondierenden EMG-Kurven lassen die schnelle Aktivitätsminderung klar erkennen. Hierdurch wird noch einmal die bereits erwähnte Eigenschaft der Typ II-Motoneurone hervorgehoben, nur sehr kurzzeitig mit höchsten Entladungsraten feuern zu können.

Die rechte Seite der Abb. 4 verdeutlicht die Wirkung von Typ II- Hemmern bzw. Blockierern. Die

Kraftanstiegsraten sind geradezu 'drastisch' reduziert, die schließlich aktualisierte Kraftspitze kann erst nach ca. 1,5 s erreicht werden. Im EMG zeigt sich entsprechend erst spät eine insgesamt geringe Aktivität.

Die Zusammenschau der hiermit vorgelegten Befunde veranlaßt zu folgendem vorläufigem Schluß: Das Größenprinzip der Rekrutierung als relativ grobes Kraftregulativ, demzufolge die langsameren Typ 1-ME immer zuerst einbezogen werden, was bei den schnellsten Kontraktionen (gegen geringe Widerstände) ein Eingreifen der höherrangigen und schnelleren Typ 11-ME verhindern würde, verliert dann seine muskelmechanische Gültigkeit, wenn eine maximal schnelle Aktivierung des kontraktiven Potentials ohne submaximale Dosierungsvorgabe gefordert ist.

Diese Hypothese soll nachfolgend exemplarisch anhand theoretischer Modell-Berechnungen und empirischer Untersuchungen überprüft werden.

Literaturangaben: [interpret II](http://www.biowiss-sport.de/wp-content/uploads/2015/02/interpret_II.pdf) (http://www.biowiss-sport.de/wp-content/uploads/2015/02/interpret_II.pdf)