

Biologische und biomechanische Grundlagen von Muskelleistungen

Zum nervalen Bereich

Basis für die Muskelkraft ist zwar die kontraktile Substanz des Muskels, für die Kraftentfaltung selbst ist jedoch die Mitwirkung von zentralem und peripherem Nervensystem ausschlaggebend. Die wichtigsten Mechanismen werden kurz angesprochen.

Frequenzierung und Rekrutierung

Bei einer willkürlichen Kraftbewegung (= bewußte Zielmotorik) hat die finale Erregung der Muskelzelle ihren Ausgang im Motorcortex (= motorischer Bezirk der Großhirnrinde). Von dort werden mit dem zentralen Bewegungsprogramm bestimmte Innervationsmuster über die absteigenden Bahnen des Rückenmarks zu den motorischen Vorderhornzellen (α -Motoneurone) der zugehörigen Muskeln ausgesandt. Diese supraspinalen (von oberhalb des Rückenmarks kommend) Impulsmuster werden größtenteils im Interneuronenapparat (= Schaltzellen des Rückenmarks) erregend oder hemmend mit Impulsen aus der Körperperipherie und Impulsmustern des Eigenapparats des Rückenmarks (= Spinalmotorik) verschaltet, bevor sie die α -Motoneurone erreichen. Je nach Erregungsfrequenz (= Impulse/s) des so entstandenen Erregungsmusters sprechen weniger oder mehr α -Motoneurone (motorische Einheiten) an und senden ihrerseits ein Erregungsmuster an alle zugehörigen Muskelfasern. Die Abstufung (Regelung) der Impulsfrequenz wird als **Frequenzierung** bezeichnet, das Erfassen einer bestimmten Zahl von motorischen Einheiten als **Rekrutierung**. Beides zusammen macht die **intramuskuläre Koordination** aus.

Nach dem **Rekrutierungsprinzip** von HENNEMANN et al. (1965) ist für die Aktivierung der Motoneurone deren Rekrutierungsschwelle (= Erregungsschwelle) maßgebend. Abb. 19 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang von Rekrutierungsschwelle, Fasertypus und Rekrutierungsbeitrag. Die **Rekrutierungsreihenfolge** ist

- **immer** (bei statischer, dynamischer, explosiver Kraftentfaltung) dieselbe: Zuerst werden die langsamen motorischen Einheiten (ST-Fasern) mit kleinen Motoneuronen und niedriger Erregungsschwelle, dann bei steigenden Kräftefordernissen die schwächeren FT-Fasern und schließlich die starken FT-Fasern mit großen Motoneuronen und hoher Erregungsschwelle erfaßt.

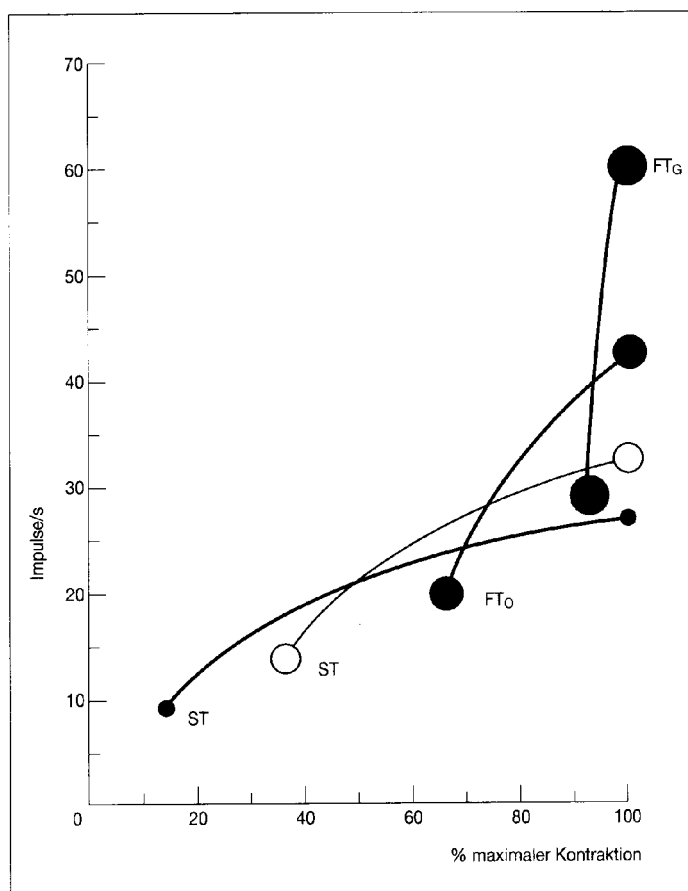


Abb. 19 Schematische Darstellung des Rekrutierungsprinzips anhand von 4 motorischen Einheiten eines Muskels mit unterschiedlicher Rekrutierungsschwelle. ST = Slow-Twitch-Fasern von motorischen Einheiten mit kleinen Motoneuronen und niedrigen Rekrutierungsschwellen; FT_O = oxidativ ausgestattete Fast-Twitch-Faser, FT_G = glykolytisch ausgestattete Fast-Twitch-Faser. Beide FT-Einheiten haben größere Motoneuronen und höhere Rekrutierungsschwellen.

- Bei **explosiven Krafteinsätzen** kommt es zu einer zeitlichen Verdichtung der Rekrutierung (auf ca. 10 ms), so dass nahezu von gleichzeitiger Erfassung (Synchronisation) aller motorischer Einheiten von Beginn an ausgegangen werden kann. Wird dabei gegen geringe Widerstände (kleine Lasten) gearbeitet, so ist der Beitrag der ST-Fasern in der Kontraktion für die Beschleunigung gering, da die FT-Fasern infolge ihrer größeren Verkürzungsgeschwindigkeit (Kontraktionsdauer FT-Fasern 40-90 ms, ST-Fasern 90-140 ms) den Hauptarbeitsbeitrag leisten können. Gegen hohe und höchste Lasten mit langsamerer Bewegung können und müssen die ST-Fasern ihren vollen Arbeitsbeitrag beisteuern.

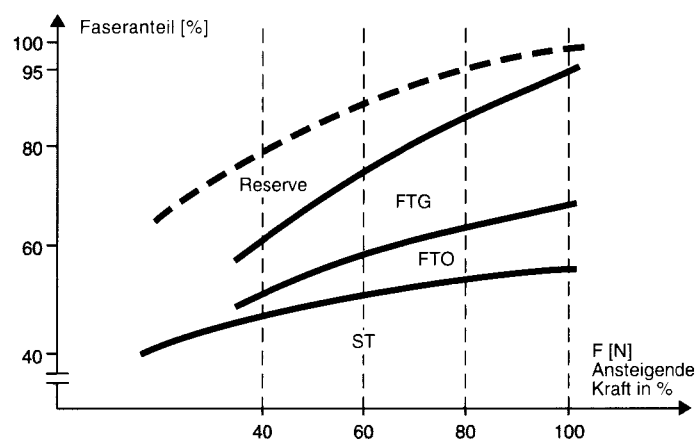
Eine Umkehr in der Rekrutierungsreihenfolge der motorischen Einheiten gibt es nicht. Es kann jedoch sein, dass bei fast gleichzeitiger Rekrutierung eines ganzen Motoneuronenpools durch die verschiedenen Leitungsgeschwindigkeiten der peripheren Nervenfasern (von den Motoneuronen zur Muskelzelle hin) das Erregungsmuster eines großen Motoneurons (FT-Einheit) schneller ihre Muskelfasern erreicht als das einer kleinen Vorderhornzelle (ST-Einheit). Meist ist jedoch selbst bei ballistischen Kontraktionen die übliche Rekrutierungsordnung gültig.

Ballistische Kontraktionen sind solche, die aufgrund einer Stoßinnervation (= Impulsreihe mit folgender Innervationsstille) mit abrupter Anfangsrekutierung eingeleitet werden und in »freier« Kontraktion enden, da die beschleunigte Last in freien Flug übergeht. Zur Beschleunigung größerer Lasten (ohne freien Flug) ist für die Kontraktion eine kontinuierliche Impulsfolge erforderlich. Bei **Krafteinsätzen unter ca. 80% der Maximalkraft** erfolgt die Entladung der eingesetzten motorischen Einheiten asynchron und es findet ein rotatorischer Wechsel mit den freien motorischen Einheiten statt. Bei **langsamer Kraftentwicklung** sind bei den meisten Muskeln mit Erreichen von 85-90% der Maximalkraft bereits alle motorischen Einheiten rekrutiert (ausgenommen die autonom geschützten Reserven). Die weitere Kraftsteigerung erfolgt dann nur noch über Frequenzierung und synchrone Entladung (Synchronisation) der motorischen Einheiten. Bei **explosiver Kraftentwicklung** liegt volle Rekrutierung bereits beim Erreichen von ca. 25% der statischen Maximalkraft vor. Dies hängt damit zusammen, dass der Kraftbeitrag der einzelnen Muskelfasern erst mit einer gewissen Verzögerung gegenüber dem Rekrutierungszeitpunkt eintritt. Ursache für das langsamere Anwachsen der mechanischen Spannung ist das visko-elastische Verhalten (Anfangsreibung). Die Rekrutierung der motorischen Einheit erfolgt jedoch so rechtzeitig, dass die Muskelfasern ihren Kraftbeitrag für den erforderlichen Gesamtkraftwert rechtzeitig liefern. Das bedeutet ein Herabsetzen der Rekrutierungsschwelle, wenn man diese auf die Maximalkraft bezieht. (Beispiel: Rekrutierungsschwelle liegt für eine motorische Einheit im Falle langsamer Kraftentwicklung bei ca. 40 kp Muskelkraft, im Falle explosiver wird diese Einheit bereits rekrutiert, wenn der Muskel ca. 10 kp Kraft entwickelt hat.)

Resultierend kann über den Beitrag von Frequenzierung und Rekrutierung zur Kraftentwicklung festgehalten werden:

- Beide Geschehen laufen miteinander ab.
- Etwa ein Drittel der Gesamtkraft wird durch die Rekrutierung, zwei Drittel davon werden durch Frequenzierung erreicht.
- Im unteren Kraftbereich ist mehr die Rekrutierung und asynchrone Entladung von Bedeutung, im oberen Kraftbereich ist mehr die Frequenzierung der bestimmende Faktor, im Grenzbereich die Synchronisation der motorischen Einheiten.
- Die Rekrutierung der Fasertypen zum prozentualen Maximalkraftbeitrag geschieht im allgemeinen so, wie das Schema in Abb. 20 zeigt.

Abb. 20 Möglicher Fasereinsatz bei langsamen Bewegungen und ansteigender Kraftrealisierung.



Zentralprogrammierte und reflektorische Bewegungssteuerung

(Intermuskuläre Koordination)

Kraftbewegungen unterliegen wie alle Bewegungen einer zentralen und reflektorischen Steuerung.

Unter **zentraler Steuerung** wird die von den motorischen Zentren der Großhirnrinde (= Steuerzentrale) ausgehende und von weiteren supraspinalen Zentren (v. a. Basalganglien bei langsamen, Kleinhirn bei schnellen Bewegungen) beeinflusste Innervation der an einer Bewegung beteiligten Muskeln verstanden. Sie stützt sich auf gespeicherte Programme und neuronale Verschaltungen im Rückenmark (absteigende Bahnen), so dass z. B. die Beugemuskeln eine Erregung und die zugehörigen Strecker eine Hemmung (Streckerstimulation, Beugerhemmung) oder umgekehrt erfahren.

Dem Rückenmark laufen aus den Propriozeptoren (= sensible Organe in Muskeln, Sehnen, Gelenken) auch Erregungen zu (= sensorische Afferenzen). Diese Afferenzen erfahren auf spinaler Ebene eine direkte oder indirekte (über Interneurone) Verschaltung zu den motorischen Vorderhornzellen. Diese nervalen Verschaltungen sind die propriozeptiven Reflexe. Die wesentlichen sind die Eigenkontraktion (= Dehnungsreflex) und die reziproke

Antagonistenhemmung (beide von der Muskelspindel ausgehend). Unter Verarbeitung zusätzlicher Afferenzen aus Schmerz- und Drucksensoren entsteht der bekreuzte Beuge-Streck-Reflex: Mit der Beugererregung der einen Extremität kommt es gleichzeitig zu einer Zunahme des Streckertonus in der anderen Extremität.

Darüber hinaus hat noch die sogenannte γ -Innervation Einfluss auf die Kraftsteuerung. Über die γ -Motoneurone und γ -Fasern verfügt die Muskelspindel über eine eigene motorische Innervation. Sie untersteht höheren Zentren und geschieht bei Willkürbewegungen zusammen mit der Aktivierung der α -Motoneurone. Die Muskelspindel reagiert darauf (wie bei Dehnung) mit Entladungsfrequenzen, die im Rahmen der sensorischen Afferenzen verarbeitet werden. Die γ -Innervation ist von Bedeutung für eine hohe Kontraktionsgeschwindigkeit bei Schnelligkeits- und Schnellkraftübungen sowie bei willkürlichen Maximalkrafteinsätzen. Die willkürliche Anstrengung kann also einen hohen Beitrag zur reflektorischen Spannungsentwicklung leisten.

Alle diese Reflexe bewirken die reflektorische Regulation der Kontraktionskraft bei Bewegungen und spielen eine nicht unbedeutende Rolle bei sehr schnellen Kraftbewegungen.

Die zentralen und reflektorischen Steuermechanismen zusammen bilden die Grundlage der **intermuskulären Koordination**, unter der man allgemein das Zusammenwirken von synergistisch und antagonistisch wirkenden Muskeln innerhalb eines gezielten Bewegungsablaufs versteht.

Vorinnervation

Darunter wird die Aktivierung eines Muskels vor (ca. 70-150 ms) der eigentlichen Kraftbeanspruchung verstanden. Sie dient einem zeitlich vorausgenommenen Spannungsaufbau in den kontraktile Fasern und der Feineinstellung der Muskelspindel (über die γ -Innervation). Diese Vorinnervation scheint Teil eines zentralen Bewegungsprogramms zu sein. Dauer und Stärke sind von der bevorstehenden Belastungsgröße und vom Übungsgrad (Trainingszustand) abhängig. Sie sind nicht bei allen Bewegungen gleich groß. Eine visuelle Kontrolle des bevorstehenden Belastungszeitpunkts spielt dabei keine Rolle. Es ist zu vermuten, dass die Entstehung auch mit vom Gleichgewichtssinn (Beschleunigung) beeinflusst wird.

Reflexinnervation

Reflexinnervation ist die Aktivierung eines Muskels durch den Dehnungsreflex, der bei Dehnung eines Muskels durch die Muskelspindel ausgelöst wird. Die Aktivitätsspitze tritt ca. 25-40 ms nach Dehnungsbeginn (je nach Muskel) auf, was mit der Laufzeit im Reflexbogen von 20-40 ms zu erklären ist. Die Innervationsstärke wird wesentlich von der Dehnungsgeschwindigkeit beeinflusst. Die damit erzeugte Muskelspannung (Muskelhärte) kann selbst in kurzen Belastungsphasen, wie sie etwa beim Sprintschrift oder Weit-Absprung (ca. 100-200 ms), also im sogenannten Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus vorliegen, zur Speicherung elastischer Energie genutzt werden.