

Biologische und biomechanische Grundlagen von Muskelleistungen

Zum morphologischen Bereich

(Bau und Organisation des Muskel-Sehnen-Apparates)

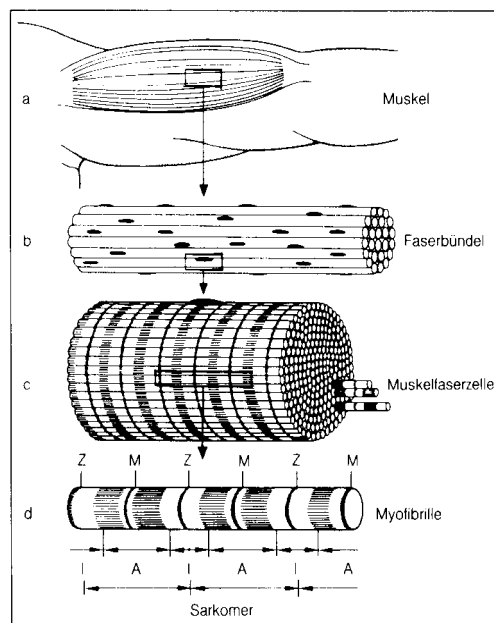
Zur Muskelstruktur

Der menschliche Skelettmuskel besteht aus vielen Faserbündeln, diese aus Fasern, diese wiederum aus sog. Myofibrillen und diese schließlich aus sog. Sarkomeren (vgl. Abb. 12). Letztere sind ca. ein 2000stel mm lang. Beispielsweise baut sich der menschliche Bizepsmuskel aus etwa 10 Milliarden Sarkomeren auf. Die makromolekularen Einheiten des Sarkomers bilden die dicken und dünnen Filamente; sie bestehen aus Eiweißen.

Die Muskelkontraktion selbst kommt durch eine Brückenbildung zwischen Eiweißmolekülen (Myosin und Aktin) aufgrund der Freisetzung von Calcium-Ionen und der Spaltung des in der Muskelfaser vorhandenen Energiedepots ATP (Adenosintriphosphat) zustande. Das ATP ist auch dafür verantwortlich, dass die Brückenbildung wieder aufgehoben wird und der Muskel sich wieder entspannt. Wenn also in einem Muskel die ATP-Konzentration nach Drosselung der Energiezufuhr absinkt (z. B. im stark ermüdeten Zustand), so kann sich der Muskel nicht entspannen, er bleibt »hart« (z. B. im Extremfall beim Muskelkrampf oder nach dem Tode). Das ATP hat folglich zum einen die Aufgabe der Energielieferung und zum anderen die eines »Weichmachers«.

Der Vorgang der Muskelkontraktion geht von einer zentralnervösen Erregung im Gehirn aus und führt über die Alpha-Motoneurone des Rückenmarks zu den motorischen Endplatten der Muskelfasern.

Abb. 12
Histologischer Aufbau eines quergestreiften Muskels. Der M. biceps des Oberarmes (a) enthält eine große Anzahl von Faserbündeln (b), welche sich wiederum aus vielen Muskelfasern (c) zusammensetzen. Jede Muskelfaser ist angefüllt mit Myofibrillen (d), die vom Sarkoplasma umspült werden. Die kleinste Organisationseinheit ist das Sarkomer. M = M-Linie; Z = Z-Linie; A = anisotrope Bande; I = isotrope Bande (nach AFTING 1981; aus: GROSSER et al. 1990, 16).



Die Kontraktion kommt nun dadurch zustande, dass die Myosinköpfe sich unter den gegebenen Bedingungen an den Aktinfilamenten "entlang hangeln", d. h., sie ziehen das Aktinfilament in Richtung des Schwanzendes der Myosinmoleküle. Die spezielle Anordnung der Myosinmoleküle im dicken Filament hat damit zur Folge, dass die Aktinfilamente von beiden Enden des Myosinfilamentes aufeinander zugezogen werden (vgl. Ab. 9, Längsschnittdarstellung).

Im Längsschnitt zeigt sich, dass den Filamenten genügend Spielraum gegeben ist, um sich gegeneinander zu verschieben. Eine Verkürzung um 50% ist möglich, für die Begrenzung ist ein Aneinanderstoßen der Aktinfilamente denkbar oder das Anstoßen der Myosinfilamente gegen die Z-Linie.

Die hier dargestellte Organisationsform (vgl. Abb. 9) stellt die kleinste kontraktile Einheit innerhalb einer Skelettmuskelfaser dar, das *Sarkomer*.

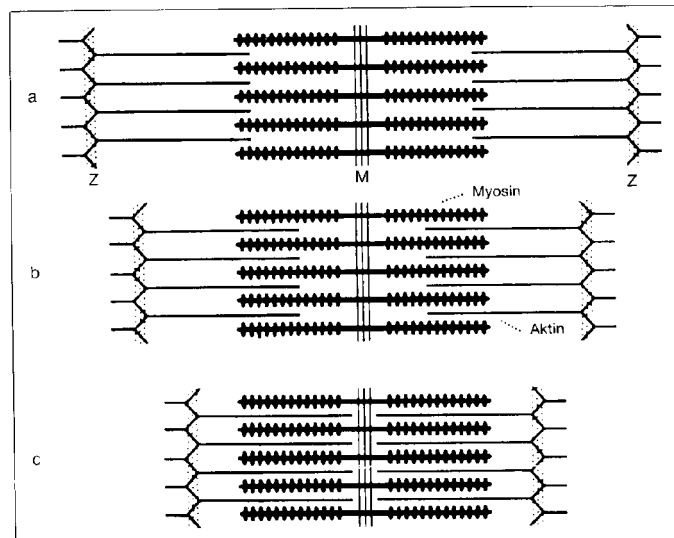
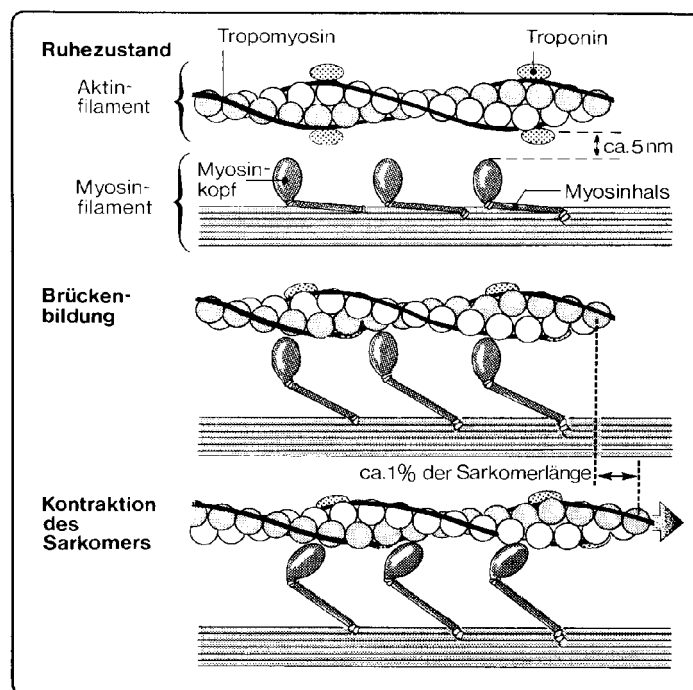


Abbildung 9 Längsschnitt durch eine Muskelfaser, hier durch ein Sarkomer. a = gedehnt, b = Ruhelage, c = kontrahiert. Z = Z Membran, M = M-Membran.

Abb. 1/7: Brückenbildung und Spannungsentwicklung zwischen Myosin- und Aktinfilament



Nerv und Muskel

Motorische Einheit

Man hat die Muskeln als "Sklaven der motorischen Vorderhornzellen" des Rückenmarks bezeichnet.

Die motorische Vorderhornzelle entscheidet darüber, ob ein Muskel Spannung entwickelt oder nicht. Eine motorische Vorderhornzelle kontrolliert niemals nur eine, sondern immer mehrere Muskelfasern. Mit allen von ihr befehligten Muskelfasern bildet die motorische Nervenzelle die so genannte **motorische Einheit** (siehe Abb. 1/10).

Jeder Muskel besteht aus vielen motorischen Einheiten.

In den Muskeln, die sehr feine und präzise abgestufte Bewegungen ausführen (Fingermuskulatur), werden nur etwa 5 bis 10 Muskelfasern von einer motorischen Nervenzelle kontrolliert, wodurch die besonders feine und genaue Abstufung der Bewegungen ermöglicht wird.

Demgegenüber ist die Zahlenverteilung in den Muskeln mit größeren Aufgaben anders. In der Rückenstreckmuskulatur sind zum Beispiel einer motorischen Nervenzelle bis zu 2000 Muskelfasern untergeordnet, so dass ein Impuls einer Kraft: biologische und biomechanische Grundlagen v. Muskelleistungen: **morphologischer Bereich**

motorischen Vorderhornzelle beinahe gleichzeitig die 2000 Muskelfasern dieser motorischen Einheit erreicht und zur Kontraktion anregt. Dadurch ist die gleichzeitig mögliche Spannungsentwicklung im Muskel natürlich groß, aber die fein abgestufte Kontrolle des Nervensystems über die Muskelbewegung entsprechend geringer.

Die Muskelfasern einer motorischen Einheit liegen stets nur in einem Muskel; allerdings liegen die Fasern in diesem Muskel nicht immer nebeneinander, sondern sind über eine Region verteilt, deren Querdurchmesser circa 5 mm beträgt. Ein Querschnitt einer solchen Region zeigt ein schachbrettartiges Muster von Muskelfasern, die zu verschiedenen motorischen Einheiten gehören.

Alle Muskelfasern einer motorischen Einheit gehören immer zum gleichen Muskelfasertyp.

Die verschiedenen motorischen Einheiten eines Muskels arbeiten niemals alle gleichzeitig, sondern ben, wodurch es zur gleichmäßigen Kontraktion des gesamten Muskels kommt.

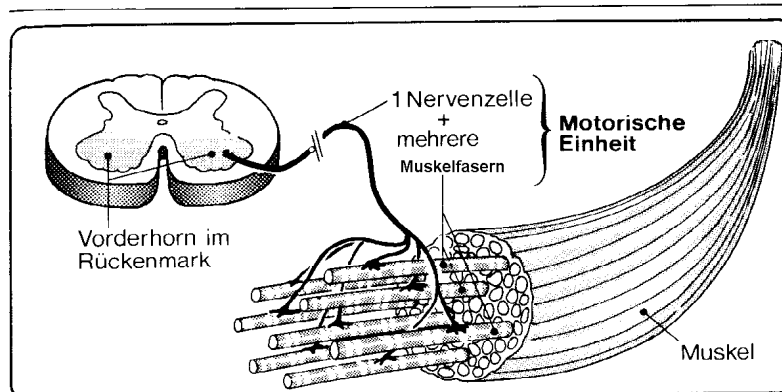


Abb. 1/10: Die motorische Einheit

Motorische Endplatte

Die Übertragung des Nervenimpulses von den Endverzweigungen der Nervenzellfortsätze auf die Muskelfasern einer motorischen Einheit geschieht wie die synaptische Übertragung des Impulses einer Nervenzelle auf die nächste Nervenzelle. Allerdings werden die allermeisten Muskelfasern nur von einer Nervenendverzweigung (*synaptischer Knopf*) erreicht.

Die Empfangsstation, die das Signal des motorischen Nervs auf die Muskelfaser überträgt, bezeichnet man als motorische *Endplatte* (siehe Abb. 1/11). Normalerweise besitzt jede Muskelfaser nur eine motorische Endplatte, die sich ungefähr in der Mitte des langen Muskelfaserschlauches befindet.

Wenn ein Nervenimpuls (*Aktionspotential*) aus dem Rückenmark an den Endverzweigungen der motorischen Nervenzelle angekommen ist, wird aus kleinen Speicherbläschen (*Vesikel*) in diesen synaptischen Endknöpfchen ein Überträgerstoff - *Azetylcholin* - freigesetzt (siehe Abb. 1/12). Dieses Azetylcholin gelangt sehr schnell durch die Zellmembran der synaptischen Knöpfe in den synaptischen Spalt zwischen Nervenzelle und Muskelfaser und durch den synaptischen Spalt an besondere Aufnahmestellen der Muskelzellmembran (*Rezeptoren*), die sich genau gegenüber dem synaptischen Endknopf der Nervenzelle befinden.

Abb. 1/11: Die motorische Endplatte

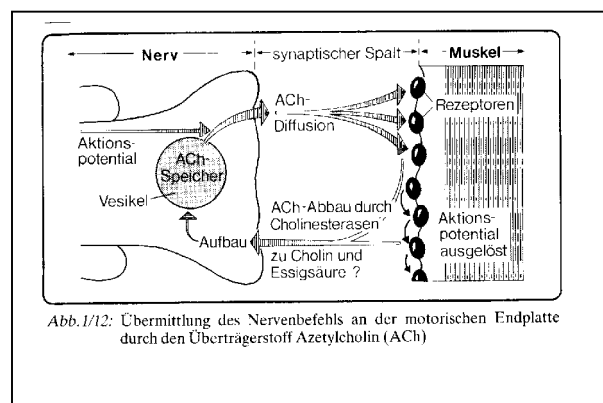
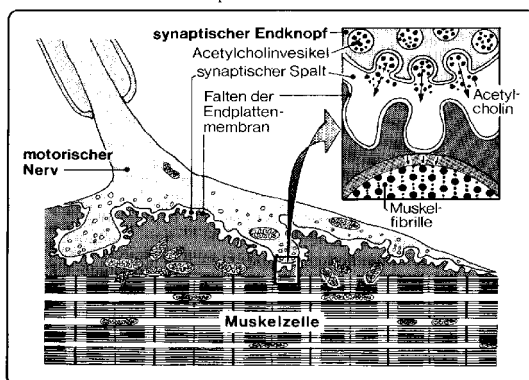
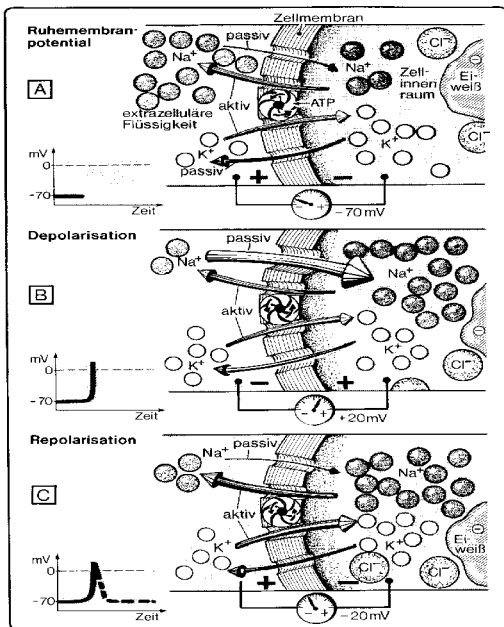


Abb. 1/12: Übermittlung des Nervenbefehls an der motorischen Endplatte durch den Überträgerstoff Azetylcholin (ACh)

Durch die chemische Verbindung des Azetylcholins mit den Rezeptoren der motorischen Endplatte ändert die Muskelfasermembran in dieser Gegend für einen kurzen Zeitraum ihre Durchlässigkeit für die elektrisch geladenen Natrium- und Kaliumionen, die sich deswegen durch die Zellmembran hindurch so umverteilen, dass sich die normalerweise bestehende elektrische Spannungsdifferenz zwischen dem Äußeren und dem Inneren der Muskelfaser ändert. Dieser Vorgang heißt **Depolarisation**.



Durch die Summe der chemischen Veränderungen an der motorischen Endplatte entsteht das so genannte *Endplattenpotential*. Wenn das Endplattenpotential einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet, entsteht das *Muskelaktionspotential*, das sich dann sehr schnell über die gesamte Zellmembran in alle Richtungen hinweg von der motorischen Endplatte ausbreitet.

Das Muskelaktionspotential wird über ein besonderes Leitungssystem bis in die Tiefe der Zelle, in die Mikroumgebung der Sarkomere, weitergeleitet und löst dort die mechanische Spannungsentwicklung der Muskelfaser aus.

Koppelung von Erregung und Kontraktion

Die Muskelfaser ist so konstruiert, dass ein Nervenimpuls alle Myofibrillen und damit auch alle Sarkomere der Muskelfaser beinahe gleichzeitig (in Abhängigkeit von ihrer Entfernung zur motorischen Endplatte) erreicht. Zur schnellen Weiterleitung des Nervenimpulses von der motorischen Endplatte und von der Zellmembran unmittelbar an die kontraktile Eiweiße der Sarkomere besitzt die Muskelfaser ein besonderes Leitungssystem, das System der Transversalen *Tubuli*, das *T-System* (siehe Abb. 1/13).

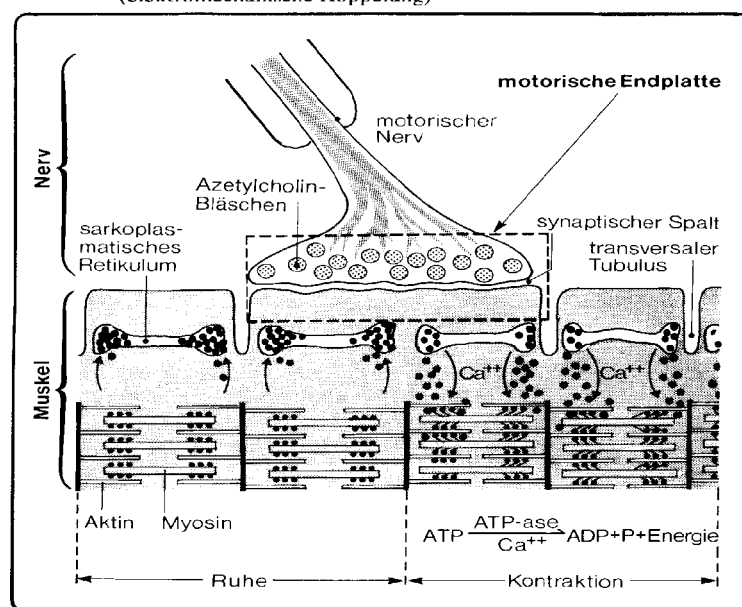
Die transversalen Tubuli sind senkrechte Einstülpungen der Muskelzellmembran, die bis an die kalziumhaltigen Bläschen des sarkoplasmatischen Retikulums und damit unmittelbar bis in die Nähe der Sarkomere reichen. Mit einer Geschwindigkeit von circa 5 m pro Sekunde wird das Muskelaktionspotential auf elektrochemischem Wege über dieses T-System rasch in die Tiefe der Muskelfaser fortgeleitet und führt in der Mikroumgebung der dicken und dünnen Filamente zur *Kalziumfreisetzung* aus den Endbläschen des sarkoplasmatischen Retikulums. Das aber bedeutet den Start der mechanischen Spannungsentwicklung des Sarkomers.

Die Koppelung zwischen elektrochemischer Weiterleitung des Muskelaktionspotentials und der mechanischen Spannungsentwicklung in den Sarkomeren bezeichnet man als *elektromechanische Koppelung* (siehe Abb. 1/13).

Der Weg, den die Kalziumionen aus den Bläschen des sarkoplasmatischen Retikulums zu den dicken und den dünnen Filamenten zurücklegen müssen, ist außerordentlich kurz, so dass die Kalziumionen für die Überwindung dieser Distanz nur eine bis einige Millisekunden benötigen. Damit wird die Zeit zwischen der Erregung der Muskelfaser durch den Nervenimpuls und dem Beginn der mechanischen Spannungsentwicklung (*Latenzzeit*) sehr kurz.

Unter anderem ist diese Latenzzeit von der Temperatur abhängig. Die Latenzzeit ist um so kürzer, je höher die Temperatur des Muskels ist. Neben vielen anderen Vorteilen bewirkt die Aufwärmarbeit vor dem Start, dass der wärmere Muskel schneller reagiert.

Abb. 1/13: Koppelung zwischen elektrochemischer Erregung und Kontraktion (elektromechanische Koppelung)



Kontraktion: *Zusammenziehen eines Muskels infolge Reizwirkung. Der Vorgang der Kontraktion verläuft unter physiko-chemischen Gesichtspunkten folgendermaßen:*

1. Eintreffen der Erregung über das motorische Neuron an die motorische Nervenendplatte,
2. Freisetzung von Azetylcholin mit nachfolgender Membranpolarisation,
3. Freisetzung von Kalziumionen,
4. Aktivierung der Myosin-ATP-ase (Enzym),
5. ATP-Spaltung
6. Myosin-Aktin-Kopplung
7. Kontraktion

Alles-oder-Nichts-Gesetz

Das Aktionspotential der Muskelfaser wird nur dann ausgelöst, wenn der Nervenimpuls in der Lage ist, die Durchlässigkeit der motorischen Endplatte so weit zu verändern, dass das Endplattenpotential einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet.

Auf unterschwellige (zu schwache) Reize reagiert die Muskelfaser gar nicht. Wenn aber das Endplattenpotential unter den Schwellenwert abfällt und ein Aktionspotential ausgelöst wird, reagiert die Muskelfaser immer in der gleichen Weise, nämlich mit einer beinahe gleichzeitigen Spannungsentwicklung all ihrer Sarkomere.

Diesen Zusammenhang bezeichnet man als **Alles-oder-Nichts-Gesetz**.

Nicht nur die einzelne Muskelfaser gehorcht diesem Gesetz, sondern alle Muskelfasern einer motorischen Einheit. Wenn der Impuls einer einzigen motorischen Nervenzelle den geforderten Schwellenwert übersteigt, reagieren alle Fasern der motorischen Einheit annähernd gleichzeitig mit einer Kontraktion.

Für die Übertragung eines Nervenimpulses auf die Muskelfaser besitzt der menschliche Organismus nur eine Überträgersubstanz, das *Azetylcholin*. Dieses kann die Muskelfaser nur erregen, aber nicht hemmen.

Die Entspannung der Muskelfaser (Relaxation) wird nicht durch einen anderen Überträgerstoff des Nervensystems bewirkt, sondern nur dadurch, dass die motorische Vorderhornzelle die Azetylcholinfreisetzung drastisch verringert.

Auch wenn die motorische Nervenzelle nicht erregt ist, gelangen durchschnittlich einmal pro Sekunde geringe Mengen von Azetylcholin aus den Bläschen der synaptischen Endknöpfe in den synaptischen Spalt. Diese geringen Mengen führen an der motorischen Endplatte der Muskelfaser zu einem <Miniatur-Endplattenpotential>, das allerdings wirkungslos verpufft, weil die Anzahl der freigesetzten Azetylcholinmoleküle zu gering ist, um den kritischen Schwellenwert zu unterschreiten und damit ein Aktionspotential bzw. eine Muskelzuckung auszulösen. Kommt dann ein Impuls im synaptischen Endknopf des motorischen Nerven an, wächst die Anzahl der pro Sekunde freigesetzten Azetylcholinquanten auf das Hundert- bis Tausendfache an. Diese Menge Azetylcholin ist normalerweise in der Lage, das Endplattenpotential unter den kritischen Schwellenwert zu verändern und ein Aktionspotential bzw. eine Zuckung der Muskelfaser auszulösen.

- Ein motorischer Nerv kann die ihm zugeordneten Muskelfasern seiner motorischen Einheit also nur erregen, aber nicht hemmen.

In diesem Punkt unterscheidet sich die Befehlsübertragung auf die Muskelfaser von der Befehlsübertragung zwischen zwei Nervenzellen, wo die algebraische Summe der erregenden und hemmenden Einflüsse verschiedener Überträgersubstanzen darüber entscheidet, ob die nächste Nervenzelle erregt wird oder nicht.

- Die einzelne Muskelfaser und alle Zellen einer motorischen Einheit müssen dem Alles-oder-Nichts-Gesetz gehorchen. Da der Gesamtmuskel aber aus vielen verschiedenen motorischen Einheiten zusammengesetzt ist, die niemals alle gleichzeitig erregt sind, muss er diesem Gesetz nicht gehorchen - im Gegenteil, er kann seine Spannung sehr fein und wohl dosiert abtufen (siehe Kap. 1.5.).

Muskelarbeitsweisen

Die motorisch-konditionelle Fähigkeit Kraft wird infolge verschieden auftretender bzw. einwirkender Widerstände und Bewegungsaufgaben von der Muskulatur durch zwei physikalisch-physiologisch unterschiedliche *Arbeitsweisen* realisiert, denen jeweils spezifische *Muskelkontraktionsformen* zugrunde liegen (s. Tab. 10 und Abb. 13).

Tabelle 10 Arbeitsweisen und Kontraktionsformen der Muskulatur.

Muskelarbeitsweisen*	Kontraktionsformen
Dynamisch – positiv = konzentrisch = überwindend	auxotonisch
Dynamisch – negativ = exzentrisch = nachgebend	
Statisch** = haltend	isometrisch

* In Reinform selten; meist Mischformen bei sportlichen Bewegungen.

** Statische Bedingungen liegen vereinbarungsgemäß auch vor, wenn die Belastungen in einer Größenordnung liegen, die eine nur sehr langsame Kontraktion ermöglichen bzw. eine nur sehr langsame Dehnung im Sinne eines Nachgebens des Muskels erzwingen.

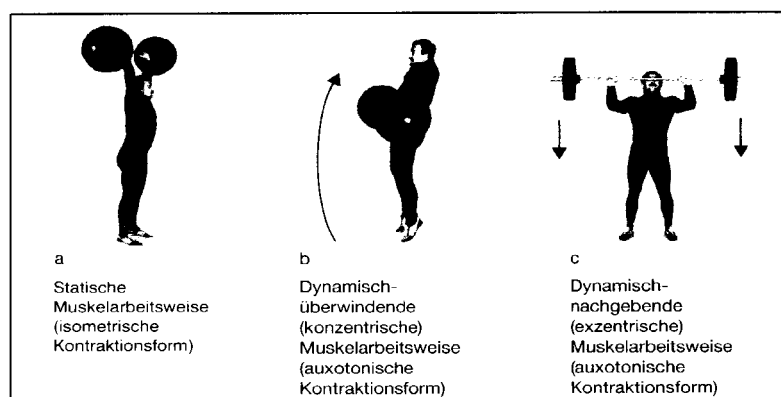


Abb. 13 Bewegungen mit dynamischer und statischer Arbeitsweise der Muskulatur.

Die **konzentrische Kontraktion** (Abb. 41) bewirkt die dynamisch-positive (überwindende) Arbeit. Dabei verändert der Muskel gleichzeitig seine Spannung und seine Länge. Es ist die wichtigste Kontraktionsform im Krafttraining.

Die **isometrische Kontraktion** (Abb. 42) bewirkt eine Haltearbeit (statische Arbeit). Es ergibt sich keine Längenveränderung, obwohl sich das kontraktile Element des Muskels verkürzt, um eine hohe Muskelspannung zu erzeugen.

Die **exzentrische Kontraktion** (Abb. 43) bewirkt eine dynamisch-negative (nachgebende) Arbeit. Ursprung und Ansatz des Muskels entfernen sich voneinander. Dadurch wird der Muskel länger und entwickelt eine hohe Spannung. Die exzentrische Kontraktion ist für viele Abbremsbewegungen wichtig.

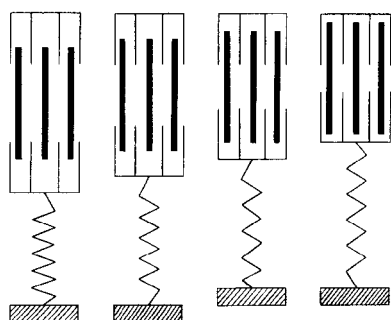


Abb. 41

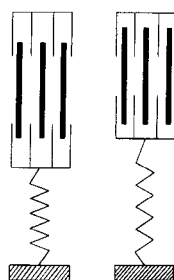


Abb. 42

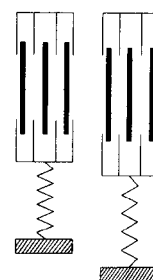


Abb. 43

In der Praxis wird die Muskulatur in den seltensten Fällen in einer Reinform kontrahiert (z. B. nur *isotonisch*, das bedeutet eine Längenveränderung der Muskelfasern, oder nur *isometrisch*, das bedeutet eine Spannungs- ohne eine Längenveränderung des Muskels). die meisten sportlichen Bewegungen erfordern Mischformen (mit vorwiegend *auxotonischer* Kontraktion, d. h., sowohl Längen- als auch Spannungsveränderung des Muskels), die eben schwerpunktmäßig dynamisch (= bewegend) oder statisch (= haltend) sind.

Zur Krafthöhe der eingesetzten Arbeitsweisen

Die Höhe der entwickelten Kraft liegt bei konzentrischer Arbeitsweise niedriger als bei statischer, bei dieser wiederum niedriger als bei exzentrischer Arbeitsweise.