

Die Muskulatur des Menschen

Motorische Einheit

Im Zentrum der Muskelkontraktion steht die motorische Einheit. Sie besteht aus einem Motoneuron und der von diesem Motoneuron innervierten¹ Gruppe von Muskelfasern. Motoneuron ist ein anderer Name für motorischer Nerv, der den Muskel versorgt.

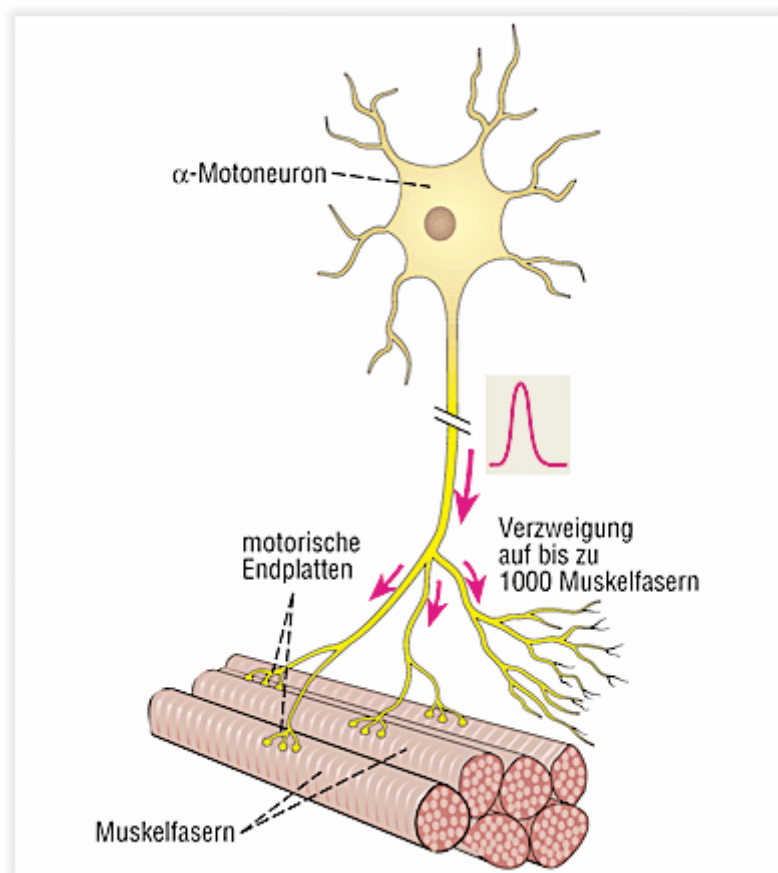


Abb. 1: Motorische Einheit²

Dabei ist zu beachten, dass alle Muskelfasern, die von einer einzelnen Nervenzelle innerviert werden, auch gemeinsam (gleichzeitig) in Aktion treten.

Gelangt ein Reiz über das Motoneuron einer motorischen Einheit an die dazugehörigen Muskelfasern, so kontrahiert sich diese Muskelfaser so stark sie kann. Die Stärke der Kontraktion ist nicht abhängig von der Stärke des Reizes. Es gibt entweder eine maximale Kontraktion, oder gar keine. Dieser Mechanismus wird als *All-oder-Nichts-Regel* bezeichnet.

¹ innervieren: anregen, reizen

² Quelle: http://www.tk-online.de/rochelexikon/pics/a25253.000-1_big.gif; 19.09.2010

Die motorische Endplatte

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, wird der Übergang von einer motorischen Nerven-faser zur Muskelfaser als motorische Endplatte bezeichnet. Die motorische Endplatte ist eine chemische Synapse mit dem Transmitter Azetylcholin.

Sie besteht aus einem großen mikroskopisch sichtbaren Synapsenendköpfchen. Es liegt an der Oberfläche der Muskelfaser an. Hier bewirken die von der Nervenzelle ankommenden Aktionspotentiale am präsynaptischen Teil der Synapse, die Ausschüttung von Azetylcholin in den synaptischen Spalt.

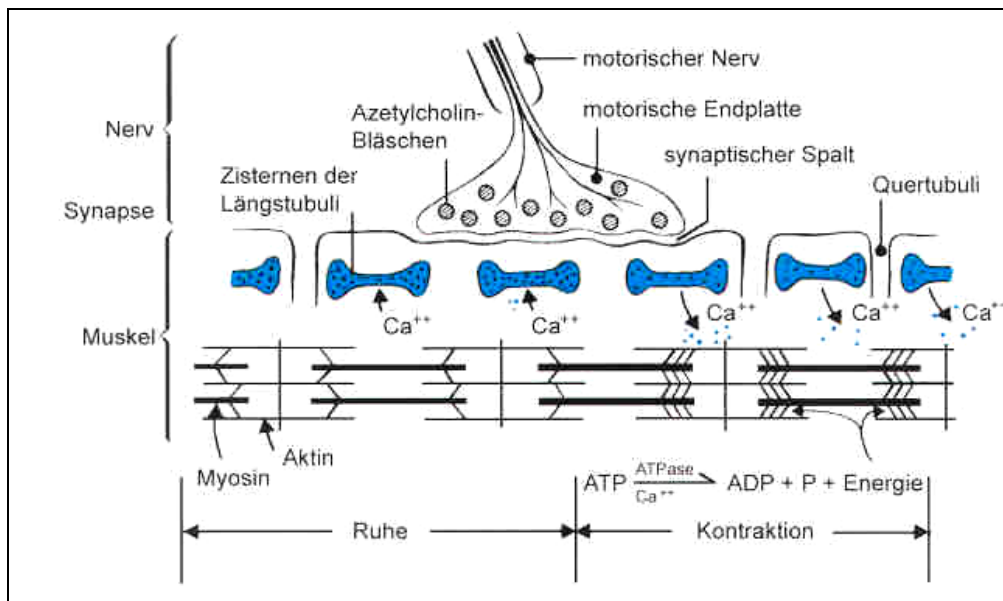


Abb. 2: Motorische Endplatte¹

Im präsynaptischen Teil verzweigen sich die marklos gewordenen Nervenendigungen in die sog. Sohlenplatte. Die Sohlenplatte senkt sich mit feinen Ausstülpungen in die durch Mikrofalten in ihrer Oberfläche stark vergrößerten Muskelfasermembranen. Es entsteht eine große Kontaktfläche, an der die Sohlenplatte von der Muskelfasermembran nur ca. 10-50 nm entfernt ist.

In der Sohlenplatte befinden sich Vesikel (Azetylcholin Bläschen), die den Überträgerstoff Azetylcholin enthalten. Azetylcholin ist für die chemische Erregungsübertragung vom Nerv zum Muskel verantwortlich. Ein Teil dieser Vesikel ist bereits direkt an der präsynaptischen Membran angedockt.

¹ Quelle: <http://www.natural-bb.de/team/kontraktion.jpg>; 19.09.2010

Steuerung der Muskelkontraktion

Die Muskelkontraktion wird durch einen elektrischen Impuls ausgelöst, der die Muskelfaser über den zugehörigen Nerv an der motorischen Endplatte erreicht.

Es kommt zur Freisetzung von Acetylcholin. Hierdurch wird an der Muskelfaser-membran ein elektrisches Potential aufgebaut, das sich über die ganze Muskelfaser-oberfläche ausbreitet und über ein spezielles querverlaufendes (transversales) Röhrensystem fast gleichzeitig alle Myofibrillen erreicht.

Im benachbarten sarkoplasmatischen Retikulum (längsverlaufendes Röhrensystem), das mit Ca^{2+} gefüllt ist, werden nun Kanäle geöffnet und das gespeicherte Ca^{2+} wird in die Myofibrillen freigesetzt.

Dieser Anstieg der Ca^{2+} -Konzentration löst die Muskelkontraktion aus.

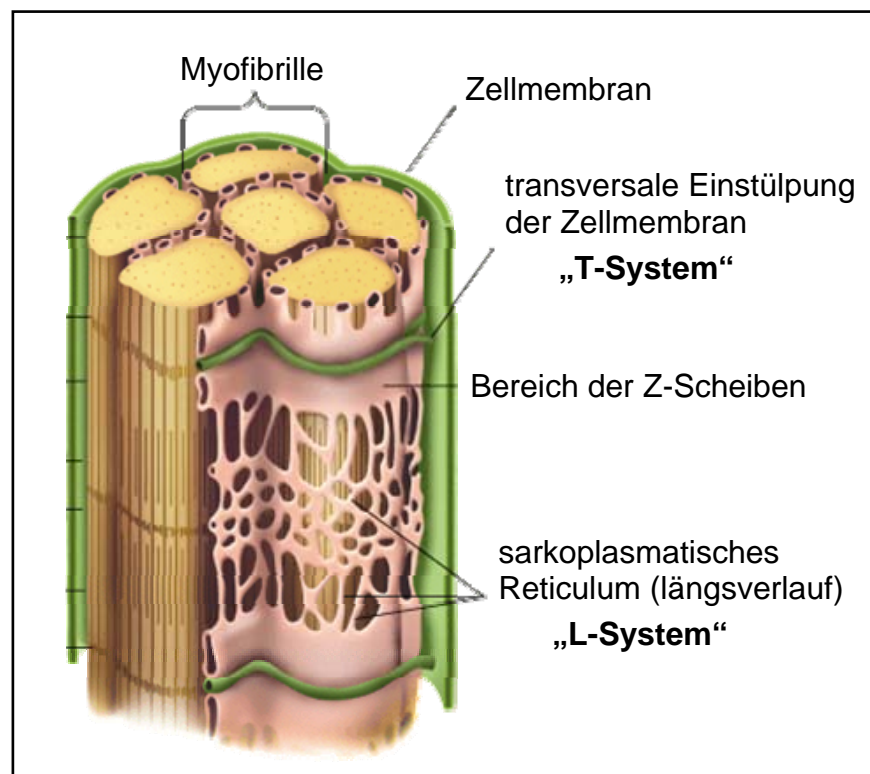


Abb. 3: Röhrensystem¹

¹ Quelle: http://www.zoology.ubc.ca/~auld/bio350/lectures/skeletal_muscle.html; 27.05.2006

Die Muskelkontraktion

Eine Kontraktion ist die Verkürzung eines Muskels. Der eigentliche Vorgang, der die Kontraktion ermöglicht, findet zwischen den Aktin- und Myosinfilamenten statt. Mit Hilfe der Gleitfilamenttheorie (die auch als Querbrückenzyklus bekannt ist) wird das Verschieben der Filamente näher beschrieben.

Gleitfilamenttheorie

Bei einer Kontraktion des Muskels gleiten die Myosin- und Aktinfilamente aneinander vorbei. Dabei ändert sich die Eigenlänge der Filamente nicht. Während einer Muskelkontraktion werden die Aktinfilamente in die Myosinzwischenräume gezogen. Dadurch verkürzt sich das Sarkomer.

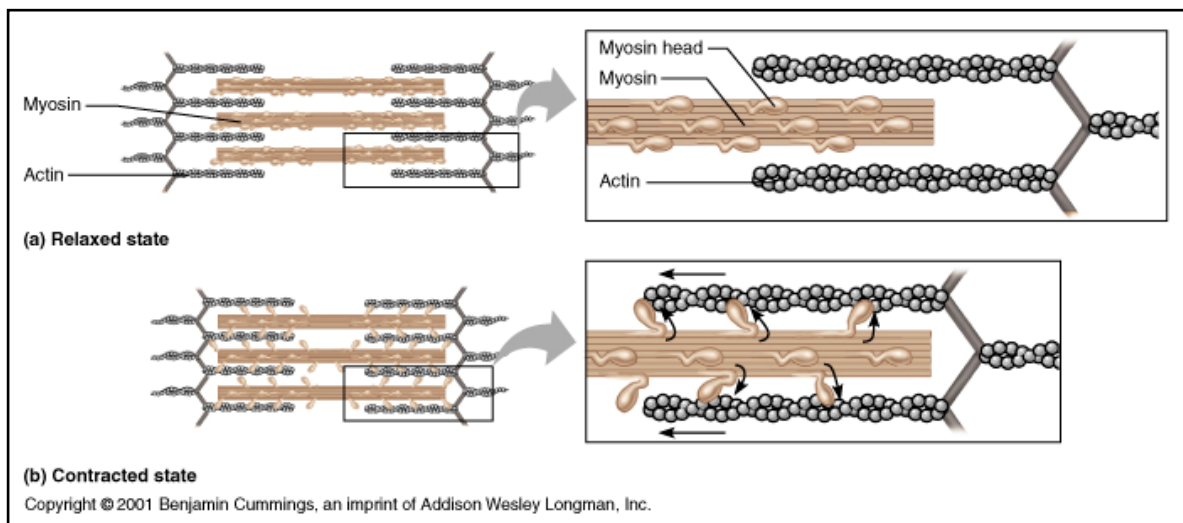


Abb. 4: Muskelkontraktion

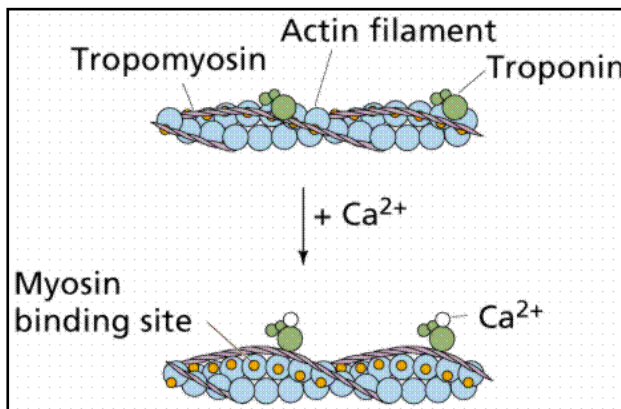
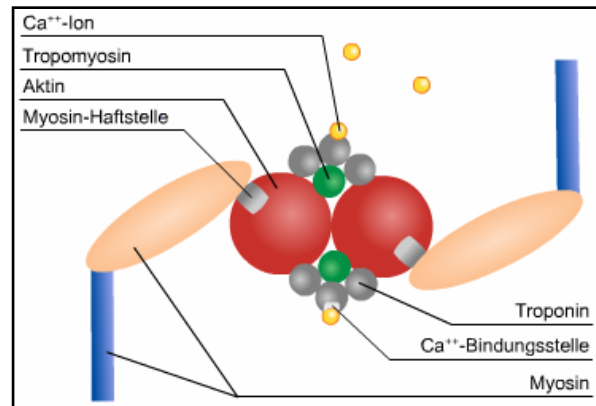
Dieses ineinander gleiten der Filamente kann modellhaft mit dem Querbrückenzyklus erklärt werden.

Querbrückenzyklus

Der Querbrückenzyklus kann in fünf verschiedene Phasen eingeteilt werden (vgl. Abb. 7).

1. Nachdem ein über das Axon ankommendes Aktionspotential das sarkoplasmatischen Retikulum durchlässig machte, steigt die Ca^{2+} -Konzentration im Sarkoplasma an und Ca^{2+} bindet sich an das Troponin.

Durch diese Ca^{2+} -Bindung kommt es infolge chemischer Kräfte zu einer Verlagerung von Troponin und Tropomyosin zur Mittelachse des Aktinfilaments, wodurch die Haftstellen für den Myosinkopf frei werden (vgl. Abb. 5 und 6).

Abb. 5¹Abb. 6²

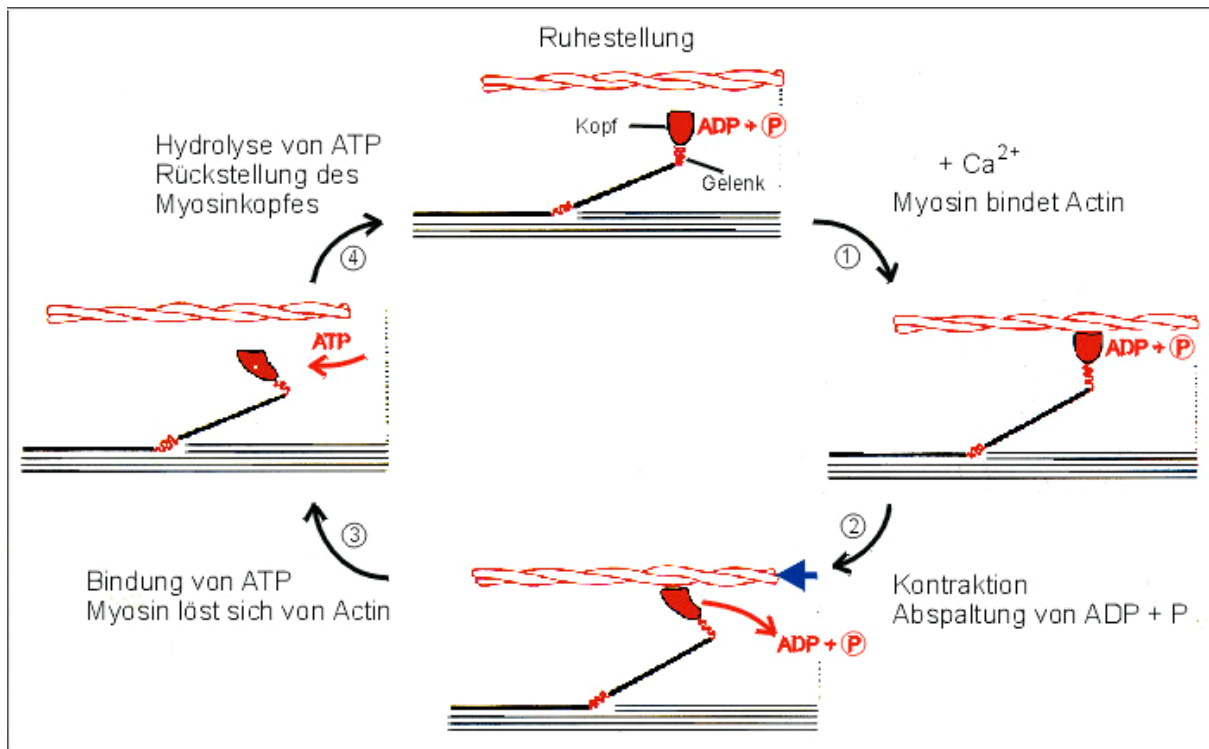
2. Der Myosinkopf lagert sich am Aktin an.
3. Das Abkippen des Myosinkopfes (von 90° auf ca. 45°) wird unter Abgabe eines Phosphoratoms eingeleitet. Dadurch wird das Aktin in die Myosinzwischenräume gezogen. Hier findet die eigentliche Kraftentfaltung statt.
4. Bindet der Myosinkopf ATP, so kann er sich vom Aktin lösen („Weichmacherwirkung“).
5. Der Myosinkopf kann durch das Enzym ATPase das ATP in ADP + P aufspalten. ADP + P bleibt am Myosinkopf gebunden. Die Spaltung des ATPs liefert die notwendige Energie und es kommt zu einem Wiederaufrichten der Köpfe in die 90°-Position (Ruhestellung).

Je nach Ca^{2+} -Konzentration, welche von der Frequenz der Aktionspotentiale abhängt, wird der Zyklus mit Phase 1 fortgesetzt, oder unterbrochen.

Hört der Nervenimpuls auf, verschwindet auch das Membranpotential und die Ca^{2+} -Konzentration nimmt ab, die Ca^{2+} -Ionen werden aktiv in das L-System zurückgepumpt und die Myosinhaftstellen werden wieder blockiert.

¹ Quelle: [http://www.emc.maricopa.edu/Muscular and Skeletal Systems.htm](http://www.emc.maricopa.edu/Muscular%20and%20Skeletal%20Systems.htm)

² Quelle: <http://vmr0100.vm.ruhr-uni-bochum.de/spomedial/>

Abb. 7: Querbrückenzyklus¹

Der Einfluss von ATP bei der Muskelkontraktion

Wenn im Muskel genügend ATP vorliegt und dieses durch die ATPase-Aktivität gespalten wird, kontrahiert der Muskel. Jede Querbrücke, die während des Kontraktionszyklus gebildet wird, benötigt ein Molekül ATP. Demzufolge benötigt der Muskel umso mehr ATP, je mehr Querbrücken gleichzeitig während eines Zyklus gebildet werden und je schneller dieser Zyklus abläuft.

Verarmt oder fehlt ATP in der 4. Phase der Muskelkontraktion, so verbleibt der Myosinkopf in einer gekippten Stellung. Der Muskel erstarrt, was z.B. bei der Totenstarre eintritt, aber auch nach starken Belastungen fühlen sich die Muskeln hart und schwer an.

Wenn genügend ATP in ungespaltener Form vorliegt, dann erschlafft der Muskel, da das ATP eine "Weichmacherwirkung" besitzt, die Muskeln sind locker.

¹ Quelle: <http://www.sinnesphysiologie.de/muskel/musk05bl.jpg>; 19.09.2010