

Physiologie und Anatomie I

3.7. Zellen - Muskelzellen

Prof. Dr. Werner Nahm



Nach dem Studium dieses Kapitels...

...sollten Sie in der Lage sein...

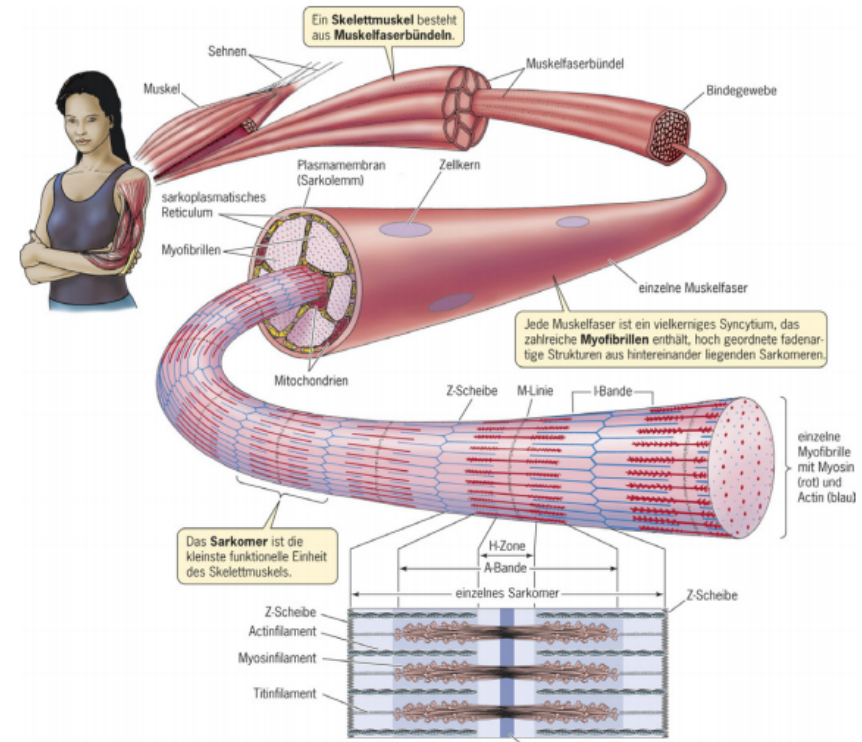
- Den Aufbau von Skelettmuskeln und das Prinzip der Muskelkontraktion zu erklären.
- Die Abläufe bei der neuronalen Muskelsteuerung zu beschreiben
- Die Abläufe bei der Muskelkontraktion zu beschreiben und zu erklären.

.

Muskelzelle - Aufbau eines Skelettmuskels

Funktionelle Organisationsebenen der Skelettmuskulatur (Quergestreifte Muskulatur)

- Skelettmuskel
- Muskelfaserbündel
- Muskelfaser (= mehrkernige Muskelzelle, Syncytium)
- Myofibrille
- Sarkomer (kleinste funktionelle Einheit, ca. $2\mu\text{m}$)



Bildquelle: <https://bewegungsapparatseverinstaehele.wordpress.com/6-6-das-muskelgewebe/>

Muskelzelle - Neuromuskuläre Einheit

Motorische Einheit - Neuromuskuläre Einheit - Motorische Endplatte

Motorische Endplatte:

Terminale Synapsen eines motorischen Neurons

Neuromuskuläre Einheit / motorische Einheit:

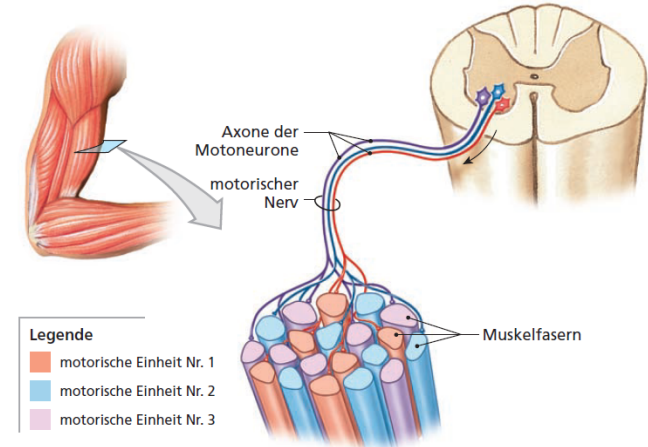
Ein motorisches Neuron mit allen verbundenen Muskelfasern

kleine motorische Einheit: ca 100-300 Muskelfasern

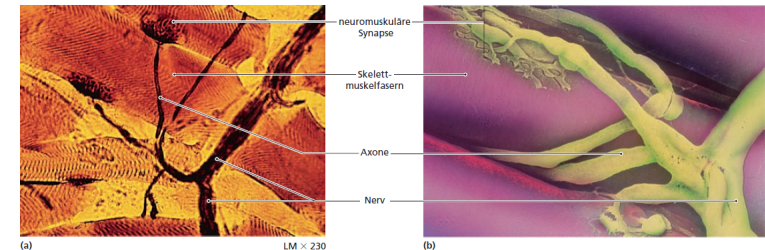
große motorische Einheit: bis 2000 Muskelfasern

Zunehmende Muskelkontraktion:

1. Aktivierung kleiner MEs
2. Zuschalten großer MEs
3. Steigerung der neuronalen Impulsfrequenz



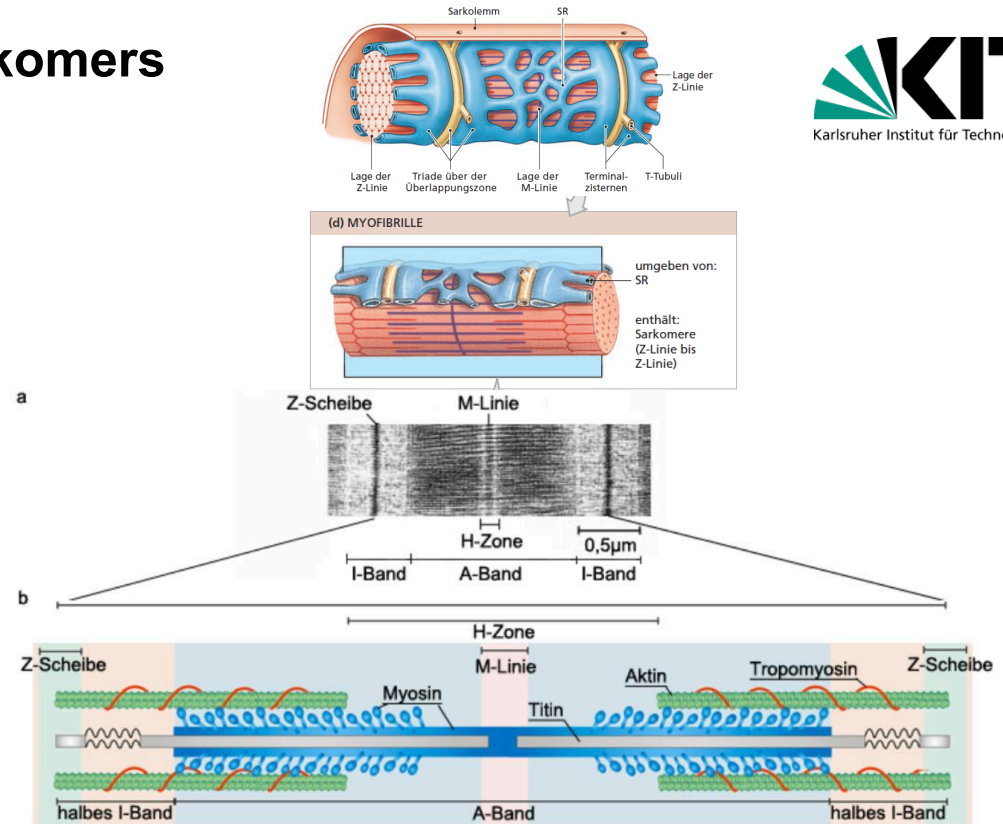
Bildquelle: Martini, 2012



Muskelzelle - Aufbau des Sarkomers

Aufbau eines Sarkomers

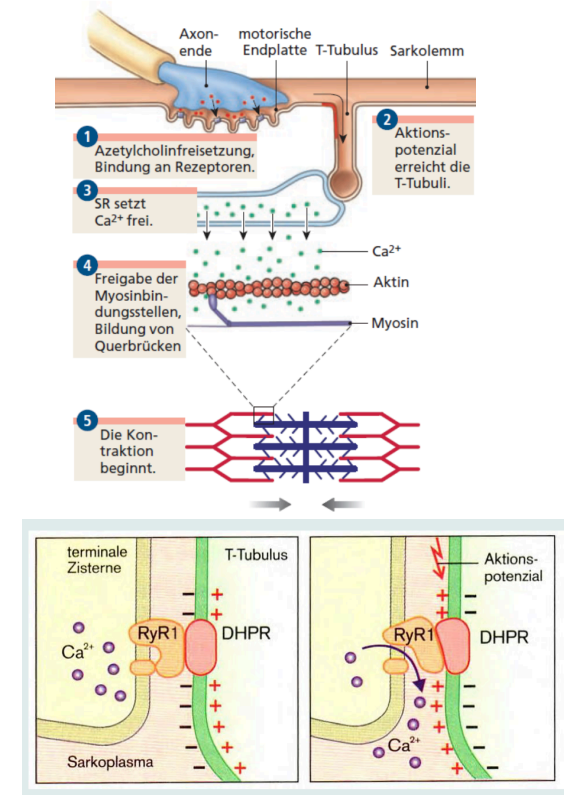
- Mikroskopisch sichtbare Bänderstruktur (Z-Scheiben)
- Sarkolemm: Zellmembran der Muskelzelle
 - Röhrenförmige Einfaltungen der Zellmembran (T-Tubuli)
 - Sarkoplasmatisches Retikulum (SR, L-Tubuli)
- Kontraktile Proteine (Filamente)
 - Aktin / Tropomyosin
 - Myosin
 - Titin



Muskelzelle - Signalleitung

Neuromuskuläre Signalleitung:

- Bei Ankunft eines neuronalen Aktionspotentials erfolgt die präsynaptische Freisetzung von Acetylcholin.
- Acetylcholin moduliert die postsynaptische Depolarisation des Sarkolemm (Cholinerge Na^+ -Kanäle).
- Bei überschwelliger Depolarisation bildet sich ein muskuläres Aktionspotential.
- Das muskuläre Aktionspotential breitet sich aus und erreicht die T-Tubuli.
- Die T-Tubuli stehen in Kontakt zum Sarkoplasmatischen Retikulum (SR) -> Ca^{2+} - Speicher!
- Bei Ankunft des muskulären AP öffnen sich spannungsgesteuerte Ca^{2+} -Kanäle und Kalzium wird in das Sarkoplasma freigesetzt.
- Das Kalzium aktiviert die Filamente Aktin und Myosin.
- Die Kontraktion erfolgt.
- Kalzium wird durch Ca^{2+} -Ionenpumpen ständig aktiv in das SR zurückgepumpt.
- Die Muskelzelle entspannt sich.



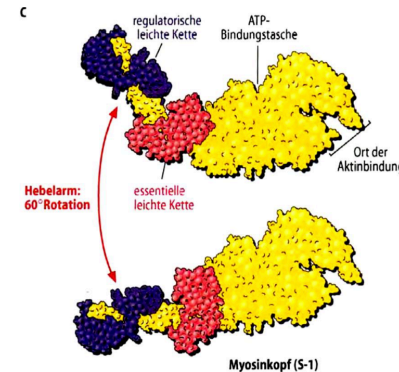
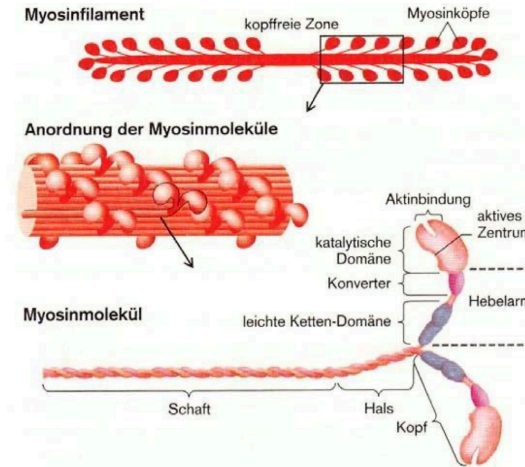
Spannungsgesteuerte Öffnung der Ca^{2+} -Kanäle des SR
RyR1: Ryanodin-Rezeptor; DHPR: Dihydropyridin-Rezeptor

Muskelzelle - Filamente

- **Myosin** ist ein langkettiges Molekül (Motorprotein)
 - Schaft (Anlagerung an weitere Myosinmolekülen)
 - Hals (mit Hebelarm)
 - Kopf (mit Bindungsstellen zu Aktin und für ATP)

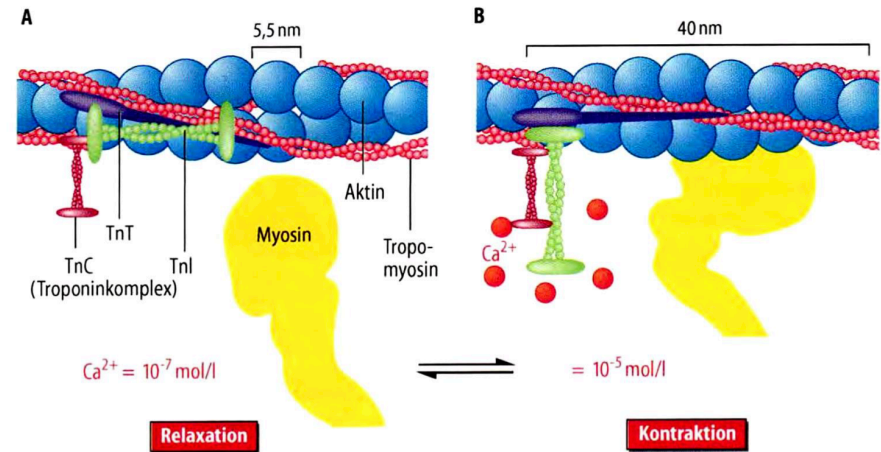
Wenn ATP gebunden ist, ist der Hebelarm in einer gestreckten Position.

Der Myosinkopf ist in dieser Stellung mechanisch vorgespannt.
Aber: Der Muskel ist in dieser Stellung entspannt!



Muskelzelle - Filamente

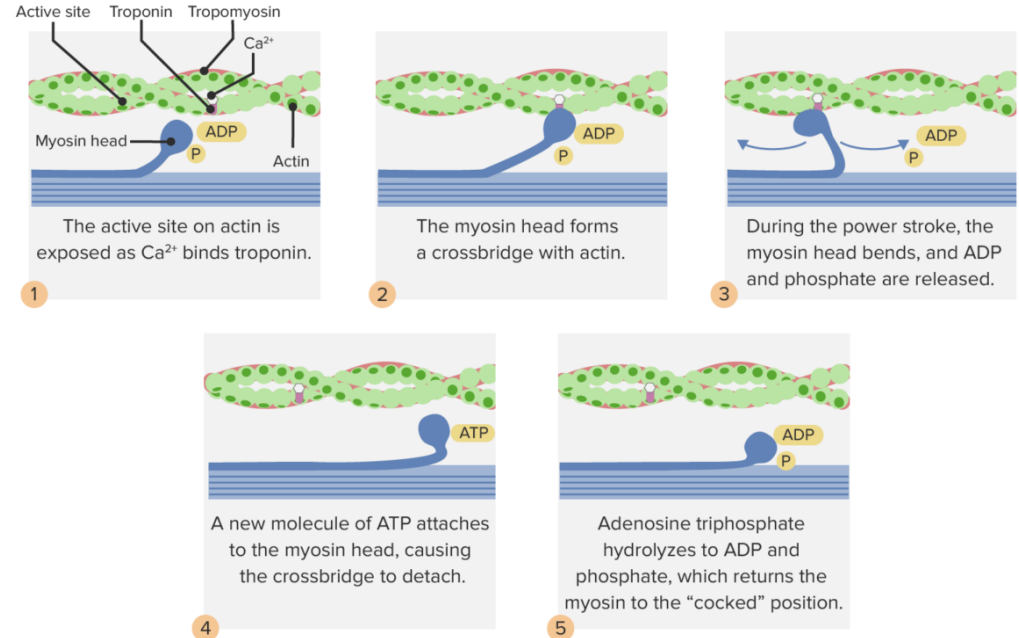
- **Aktin** ist ein langkettiges Molekül, welches spezifische Bindungsstellen für Myosin besitzt.
- Im Ruhezustand sind diese Bindungsstellen durch die Tropomyosin-Proteinkette sterisch blockiert (A)
- Bei erhöhten Ca^{2+} -Konzentrationen lagert sich der Troponinkomplex räumlich um und das Tropomyosin gibt die Bindungsstellen für den Myosinkopf frei (B)



Muskelzelle - Kontraktion

Kontraktion (Querbrückenzyklus, „Greif-Loslass-Zyklus“)

1. Einströmendes Kalzium führt am, Aktin zu einer Freigabe der Myosin-Bindungsstelle
 2. Das durch ATP vorgespannte Myosinkopf bindet hochaffin an die Aktin-Bindungsstelle.
 3. Aufgrund der Myosin-Aktin-Bindung wird $\text{ADP} + \text{P}$ abgespalten und das Myosin will in seine Ruhelage zurückkehren. Dabei wird das Aktin-Filament relativ zum Myosin-Filament verschoben.
 4. An der freien ATP-Bindungsstelle wird neues ATP gebunden, was zur Auflösung der Myosin-Aktin-Bindung führt.
 5. Die Hydrolyse vom am Myosin gebundenen ATP zu $\text{ADP} + \text{P}$ liefert die Energie zur Streckung des Myosinkopfes in die Ruhelage
- Ein Querbrückenzyklus dauert 10-100ms und verschiebt die Filamente um 10-20nm (1%)
 - Ist genügend Kalzium vorhanden, wird der Zyklus mehrfach durchlaufen. Durch ca. 50 Zyklen kann sich das Sarkomer in deutlich unter 1s um 50% verkürzen.
 - Ohne die Verfügbarkeit von ATP bleibt die Myosin-Aktin-Bindung bestehen! (rigor mortis)
 - Fällt die Kalziumkonzentration unter 10^{-7} mol/l , blockiert Tropomyosin die Bindungsstellen und der Muskel erschlafft (Relaxation)



Bildquellen

Bücher

Martini F.H., et al., Anatomie, Pearson Studium, 6. Auflage, 2012

Schmidt R., et al., Physiologie des Menschen, Springer, 31. Auflage, 2010

Silbernagl S., Despopulos A., Taschenatlas Physiologie, Thieme, 7. Auflage, 2007

Silverthorn D.U., Physiologie, Pearson Studium, 4. Auflage, 2009

Internetseiten

Angaben jeweils an der entsprechenden Abbildung

Alle verwendeten Abbildungen unterliegen dem Copyright des jeweiligen Autoren/Verlages.