

---

# Allgemeine Anatomie IV

## Muskel, Sehne und Hilfseinrichtungen

---

David P. Wolfer

Institut für Bewegungswissenschaften und Sport, D-HEST, ETH Zürich

Anatomisches Institut, Medizinische Fakultät, Universität Zürich

376-0905-00 Funktionelle Anatomie des menschlichen Bewegungsapparates

Di 19.03.2019

# Muskelfasertypen

- Komplementäre Eigenschaften der Muskelfasertypen

- Dilemma Geschwindigkeit + Kraft  $\leftrightarrow$  Ausdauer  $\rightarrow$  3 Fasertypen je nach Isoform der schweren Myosinkette (MHC1, MHC2A, MHC2X - MHC2B human nicht exprimiert)
- Typ I  $\rightarrow$  Ermüdungsresistenz auf Kosten langsamer Kontraktion + geringer Kraft: oxidativer Stoffwechsel, viel Mitochondrien, Fetttropfen, Myoglobin (rote Farbe)
- Typ IIX  $\rightarrow$  raschere Kontraktion (in vivo ca. 2x Typ I) + grosse Kraft auf Kosten schneller Ermüdung: glykolytischer Stoffwechsel, hohe ATPase-Aktivität, viel Glykogen-Reserven, sarkoplasmatisches Retikulum, Parvalbumin =  $Ca^{++}$ -Puffer
- Typ IIA  $\rightarrow$  Kompromiss: «schnell + oxidativ», ca. 15% Hybridfasern I-IIA oder IIA-X

- Fasertypenverteilung

- Muskeln alle gemischt: I 40-70%, IIA 25-50%, IIX 2-20%. Anteil Typ-I  $\varnothing$  55%, höher in Haltemuskeln (M. soleus, M. tibialis ant., M. erector spinae), auch mal <50% in phasisch aktivierten Muskeln (M. triceps brachii, M. extensor digitorum longus).
- interindividuelle weitgehend genetisch (va. Anteil Typ-I) bestimmte Unterschiede: Sprinter-Talente und Marathon-Talente. Viele Tiere schneller als Mensch.

- Fasertransformation

- Kraft- & Ausdauertraining: IIX $\rightarrow$ IIA (fast-to-slow), Inaktivität IIA $\rightarrow$ IIX (slow-to-fast), Anteil I ändert kaum. Befunde bezüglich Änderung mit Alter widersprüchlich.
- Lähmung, Denervation, Paraplegie: I  $\rightarrow$  IIA; IIA $\rightarrow$ I nur im Tierexperiment: Elektro-Stimulation 10 Hz, Nerven austausch M. Soleus  $\leftrightarrow$  M. extensor digitorum longus

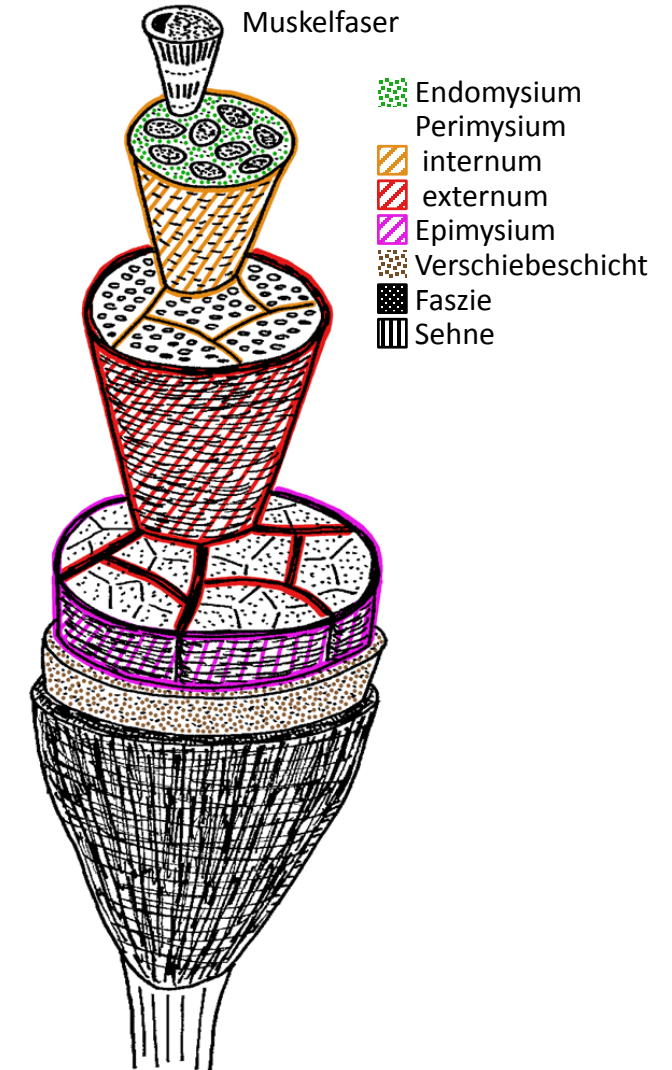
Faser-Typ	I	$\rightleftharpoons$ IIA	$\rightleftharpoons$ IIX
Tempo + Kraft	-	+	++
Ausdauer	++	+	-
Oxidation	++	+	(+)
Glykolyse	(+)	+	++
ATPase	(+)	+	++
Myoglobin	++	++	(+)
Mitochondrien	++	++	(+)
Fetttropfen	++	+	(+)
Glykogen	(+)	+	++
SR	(+)	+	++
Parvalbumin	-	(+)	++



Muskelfasertypen am Querschnitt

# Organ Muskel

- Parenchym
  - Muskelfasern, Länge max 4-10 cm, meist kürzer als Faszikel und Muskel
  - mehrere Muskelfasern durch myomyonale Verbindungen in Serie geschaltet
- Stroma: Bindegewebe mit Leitungsbahnen
  - Faszie (straff) → Muskelloge, dient auch als Muskelursprung
  - Epimysium (locker) bedeckt Oberfläche, mit Faszie verwachsen (Muskelursprung) oder durch Verschiebeschicht getrennt
  - Perimysium externum um/zwischen Sekundärbündeln (makroskopisch erkennbare Fleischfaser)
  - Perimysium internum um/zwischen Primärbündeln = Faszikel (Querschnitt ca. 1 mm<sup>2</sup>, 150-250 Muskelfasern)
  - Endomysium um einzelne Muskelfasern, enthält Blutkapillaren & Nervenfasern. Anzahl Kapillaren pro Faser hängt vom Fasertyp ab: 4.2 (I) – 4.0 (IIA) – 3.2 (IIX)
- Anpassung von Parenchym und Stroma an Aktivität
  - Krafttraining → Faserhypertrophie, Aktivierung Satellitenzellen, wenig oder keine Faserneubildung (Hyperplasie): schwierig nachzuweisen
  - Ausdauertraining → mehr Mitochondrien, Myoglobin, Fetttropfen, Glykogen und oxidativer Stoffwechsel in Fasern; Gefäßneubildung im Stroma → mehr Kapillaren
  - Inaktivität, Denervation → Faseratrophie, Gefäßrückbildung



# Biomechanische Kenngrößen und Muskeltypen

- Anatomische Kenngrößen

— anatomischer Querschnitt (dickste Stelle)

— Muskellänge

- bestimmen Form aber nicht Funktion

- Physiologische Kenngrößen

— physiologischer Querschnitt  
bestimmt Kraft (Zahl parallel geschalteter MF)

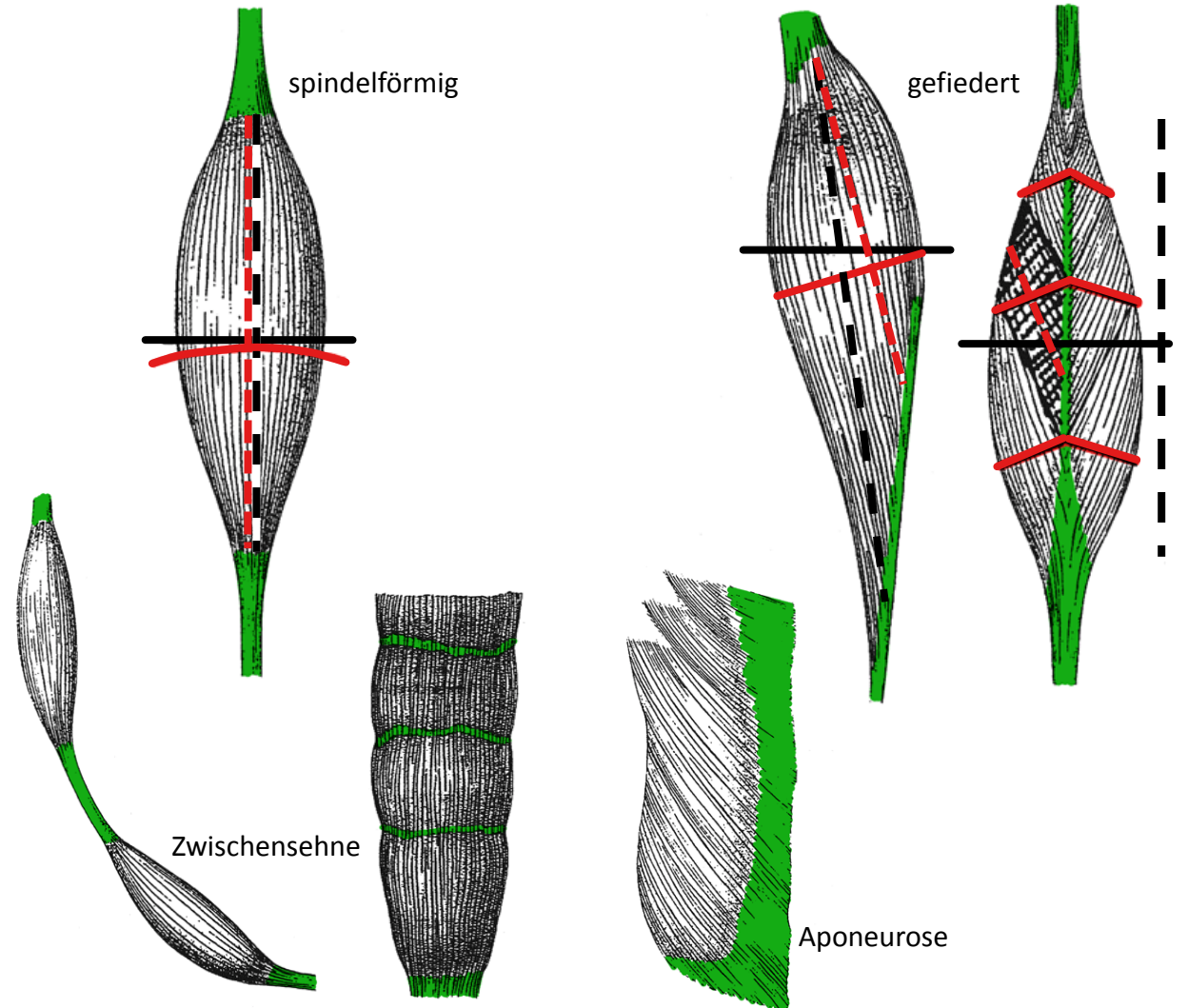
— Faszikellänge  
bestimmt Hubhöhe (Anzahl Sarkomere in Serie)

- Anordnung der Faszikel

- spindelförmiger Muskel:  
maximal mögliche Faszikellänge und Hubhöhe
- einfache, doppelte Fiederung:  
durch Summation mehr physiologischer  
Querschnitt - auf Kosten der Faszikellänge

- Varianten

- platte Muskeln, Aponeurose = platte Sehne
- Zwischensehne(n)



# Muskelninnervation

- Efferente Innervation

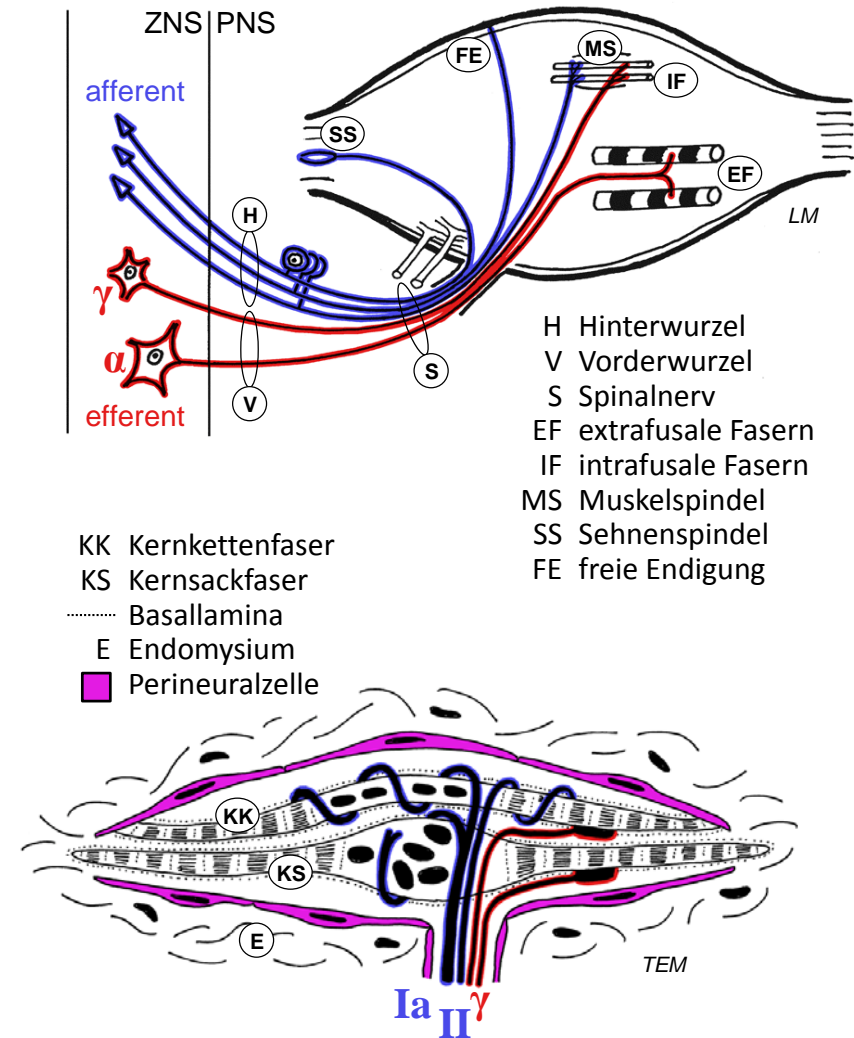
- Motoneuron (lower motor neuron): Zellkörper in Rückenmark oder Hirnstamm, Faser → Spinalnerv oder Hirnnerv
- $\alpha$ -Motoneuron → extrafusale Fasern (Arbeitsfasern)
- $\gamma$ -Motoneuron → intrafusale Fasern (Muskelspindel)

- Afferente Innervation

- primärafferentes Neuron: Zellkörper in sensorischem Ganglion des PNS
- Rezeptoren:
  - Muskelspindel: Dehnungsrezeptor
  - Sehenspindel: Spannungsrezeptor
  - freie Endigungen: Dehnungsrezeptor, Nozizeption

- Muskelspindel

- im Endomysium eingebettet, Hülle aus Perineuralzellen
- intrafusale Muskelfasern mit Kernen im Äquatorbereich: 2-5 Kernkettenfasern, 1-3 Kernsackfasern
- Ia Afferenz → Kontraktionsgeschwindigkeit (rasch adaptierend)
- II Afferenz → Kontraktionsamplitude (langsam/nicht adaptierend)
- $\gamma$ -Motoneurone → Anpassung der Spindellänge an Muskellänge



# Motorische Einheit

- Definition

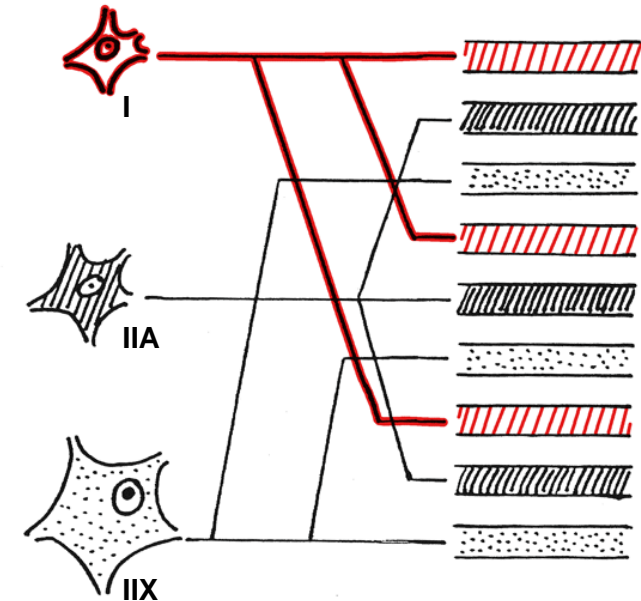
- $\alpha$ -Motoneuron plus alle über seine Axonkollateralen und neuromuskuläre Synapsen versorgte Muskelfasern. Viele Muskelfasern = grosse Einheit.
- jede Muskelfaser durch höchstens 1  $\alpha$ -Motoneuron innerviert
- neuromuskuläre Synapse: bei langen Fasern mehrere pro Muskelfaser durch Kollateralen des selben Motoneurons
- Motoneuron bestimmt Fasertypen: gleicher Typ in Einheit, vorübergehende Typen-Koexistenz und mehr Hybridfasern während Transformation: nie I+IIX!

- Grösse variiert von Muskel zu Muskel und innerhalb Muskel

- klein = hohe Präzision  $\leftrightarrow$  gross = viel Kraft (Muskelfasern/Einheit: äussere Augenmuskeln 5-10, Fingermuskeln 200-300, M. quadriceps femoris ca. 2000)
- Grösse der Einheiten innerhalb Muskel: Typ I < IIA < IIX
- gestaffelte Rekrutierung im Muskel: kleine  $\rightarrow$  mittlere  $\rightarrow$  grosse Einheiten

- Muskelquerschnitt

- Fasern einer Einheit und damit Muskelfasertypen über Querschnitt und mehrere Faszikel verstreut  $\rightarrow$  gleichmässige Kraftverteilung bei gestaffelter Rekrutierung
- Denervation  $\rightarrow$  Faseratrophie; Bei chronischem Denervationsprozess Übernahme verwaister Muskelfasern durch Kollateralen anderer  $\alpha$ -Motoneurone  $\rightarrow$  pathologisches «fiber type grouping»



Motorische Einheiten am Faserquerschnitt

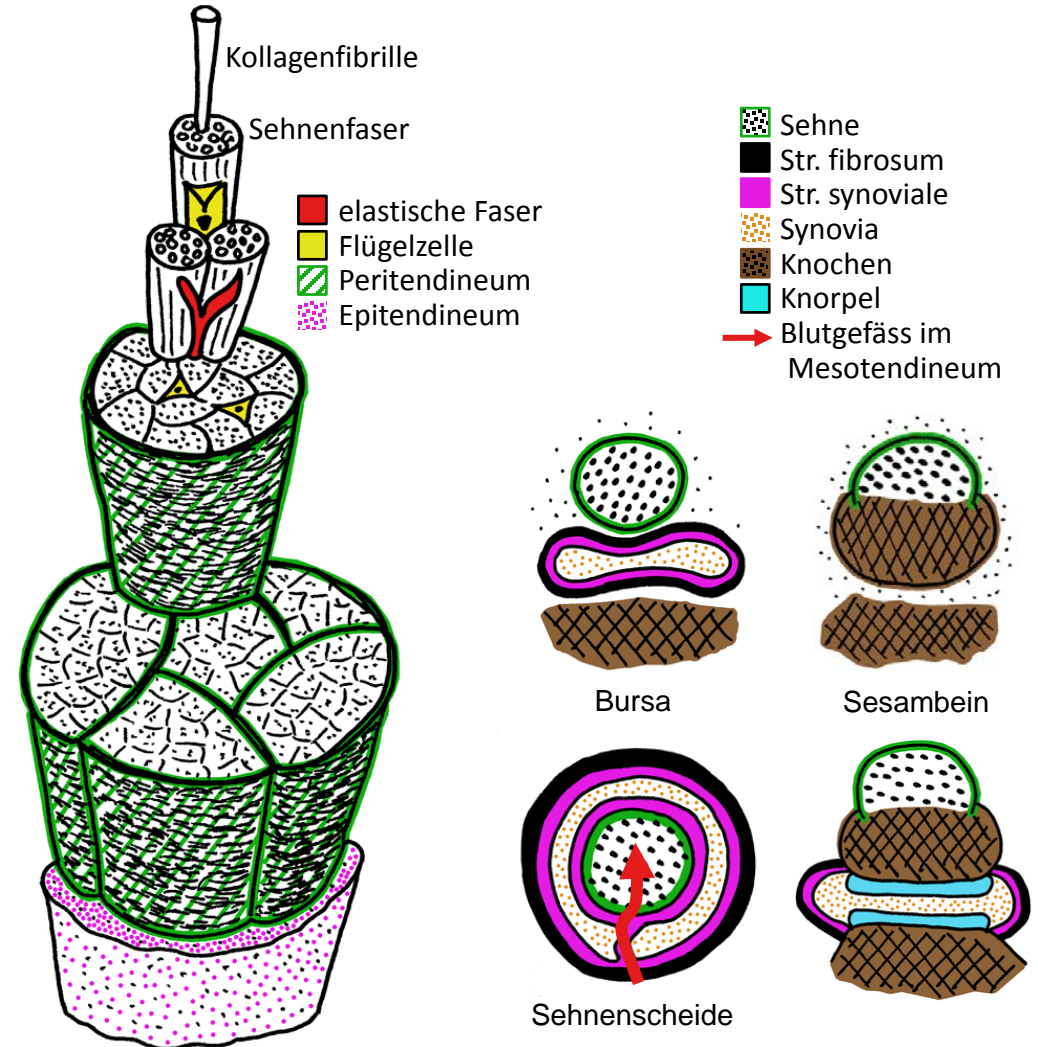
# Sehne & Hilfseinrichtungen

- Sehne

- Kraftübertragung → eindimensionale Zugbelastung
- Parenchym: straffes parallelfasriges kollagenes Bindegewebe: Sehnenfasern (Kollagen I), dazwischen wenige elastische Fasern → 4% Dehnungsreserve, Flügelzellen = Fibroblasten, eingezwängt in Spalten zwischen Sehnenfasern
- Stroma: ernährendes lockeres feinfaseriges kollagenes Bindegewebe mit Leitungsbahnen: Peritendineum um Sehnenfaserbündel, Epitendineum um ganze Sehne
- Zugfestigkeit 1000kg/cm<sup>2</sup> → gerissene Sehnen meist vorgeschädigt (z.B. Entzündung, Steroidbehandlung)

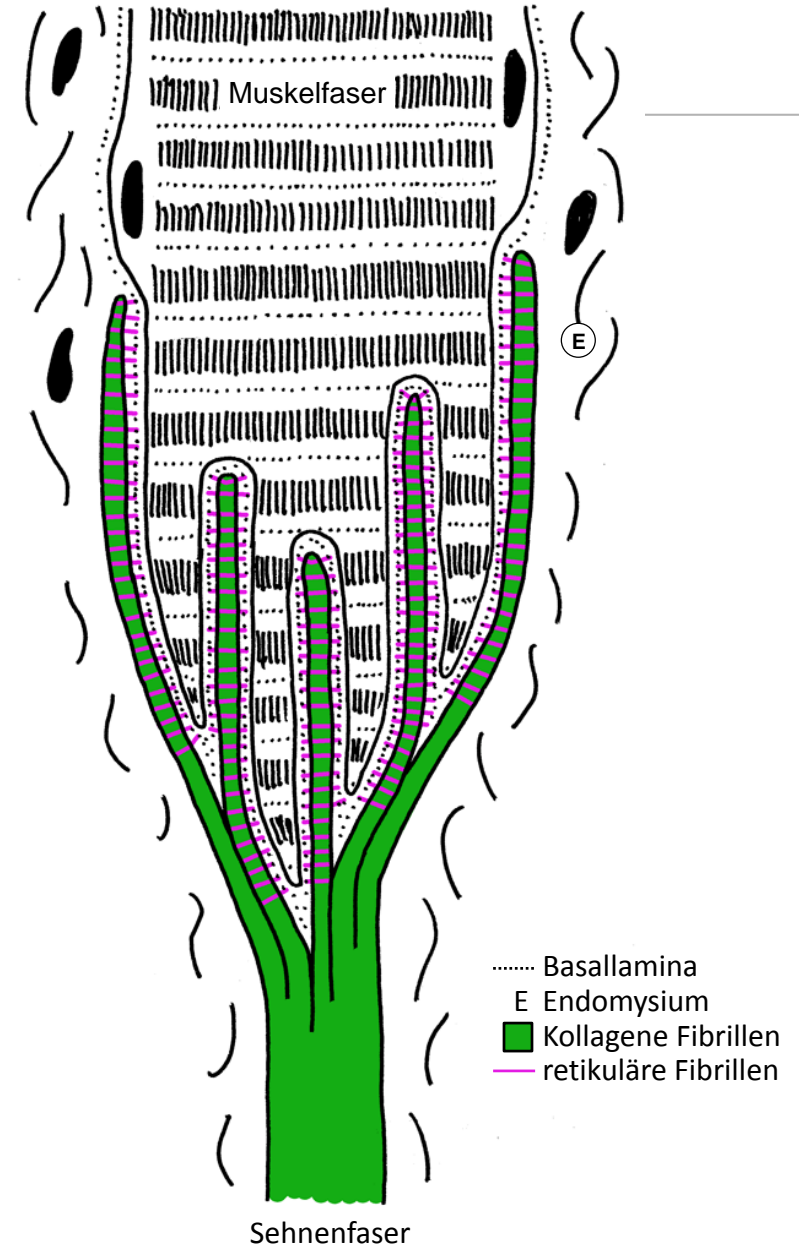
- Hilfseinrichtungen

- Schleimbeutel (Bursa, Bursitis = Schleimbeutelentzündung): Synovia, Wandaufbau wie Gelenkkapsel, verhindert Schaden durch Reibung, ev. mit Gelenkhöhle verbunden
- Sehnenscheide (Vagina tendinis, Tendovaginitis = Sehnenscheidenentzündung): Führung über lange Strecke, Versorgung der Sehne via Mesotendineum
- Sesambein: Verknöcherung gegen Schaden durch Druck (z.B. Umlenk- und Hebelpunkte). Kombination Druck + Reibung → planes Gelenk (z.B. Femoropatellargelenk)



# Muskelsehnenübergang

- Prinzip
  - 1 Muskelfaser verbunden mit 1 Sehnenfaser
  - stets Basallamina dazwischen
  - Vergrößerung Kontaktfläche durch fingerartige Fortsätze und Einstülpungen der Muskelfaser: Seit-zu-Seit-Kontakt statt End-zu-End-Kontakt
- Kontakte
  - Fokalkontakte mit Beteiligung endständigen sarkomerischen Aktins (via Integrin) → Basallamina
  - erweiterte Fokalkontakte mit Beteiligung des subsarkolemmalen Zytoskeletts: nicht sarkomerisches Aktin (via Integrin), Dystrophin (via Dystroglycan) → Basallamina
  - retikuläre Fibrillen binden an Basallamina und sind mit Sehnenfasern verwoben





# Sehnenansatz

- **Chondral-apophysäre Ansatzzone**
  - Sehnenfasern strahlen in Knochengewebe ein
  - Faserknorpel im Ansatzbereich, gewellter Verlauf der Sehnenfasern um Chondrone in Ruhe: bei Zug druck-elastisch komprimiert → elastische Dämpfung
  - kein Periost in der Ansatzzone, Faserknorpel in Knochennähe mineralisiert → abgestufter Übergang der Materialeigenschaften (ähnlich Gelenkknorpel)
- **Periostal-diaphysäre Ansatzzone**
  - Sehnenfasern strahlen in Knochengewebe und in durchgehendes Periost ein: kein Knorpel
  - vermehrt elastische Fasern, mit Sehnenfasern und Periost verflochten → gewellter Verlauf der Sehnenfasern in Ruhe, elastische Dämpfung
- **Pathologie**
  - Sehnenansatzentendinose: schmerzhafte Entzündung und Schmerz bei (uniformer) Überbeanspruchung (zB Tennisarm), va. chondral- apophysär
  - Trauma: bei vorgängig gesunder Sehne kaum Abriss der Verbindung, eher Ausriss mitsamt Knochen

