
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, Di 10.03.2020 15:00-16:45 Y15-G40

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: hohe ATPase-Aktivität (pH 10), glykolytischer Stoffwechsel, 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

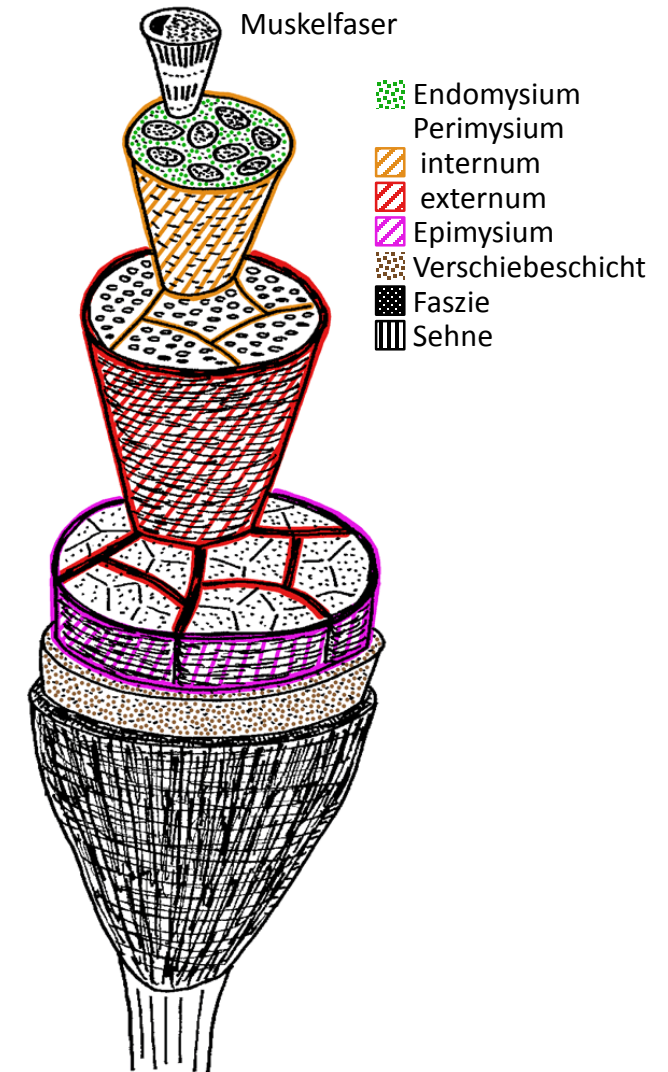
Faser-Typ	I	\rightleftharpoons IIA	\rightleftharpoons IIX
Tempo + Kraft	-	+	++
Ausdauer	++	+	-
Oxidation	++	+	(+)
Glykolyse	(+)	+	++
ATPase pH10	(+)	++	++
ATPase pH4	++	(+)	(+)
Myoglobin	++	++	(+)
Mitochondrien	++	++	(+)
Fetttropfen	++	+	(+)
Glykogen	(+)	+	++
SR	(+)	+	++
Parvalbumin	-	(+)	++



Muskelfasertypen am Querschnitt

Organ Muskel

- Parenchym
 - Muskelfasern, Länge max 4-10 cm, meistens kürzer als Faszikel und Muskel
 - meistens mehrere Muskelfasern durch myomyonale Verbindungen in Serie geschaltet
- Stroma: Bindegewebe mit Leitungsbahnen
 - Faszie (straff, dicke Fasern) → Muskelloge, dient auch als Muskelursprung
 - Epimysium (mittlere Faserdicke) bedeckt Oberfläche, mit Faszie verwachsen (Muskelursprung) oder durch besonders lockere Verschiebeschicht getrennt
 - Perimysium externum (mittlere Faserdicke) um/zwischen Sekundärbündeln (makroskopisch erkennbare Fleischfaser)
 - Perimysium internum (etwas dünnere Fasern) um/zwischen Primärbündeln = Faszikel (Querschnitt ca. 1 mm², 150-250 Muskelfasern)
 - sehr feinfaseriges Endomysium um einzelne Muskelfasern: Blutkapillaren & Nervenfasern. Anzahl Kapillaren / Faser je nach Fasertyp: 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)

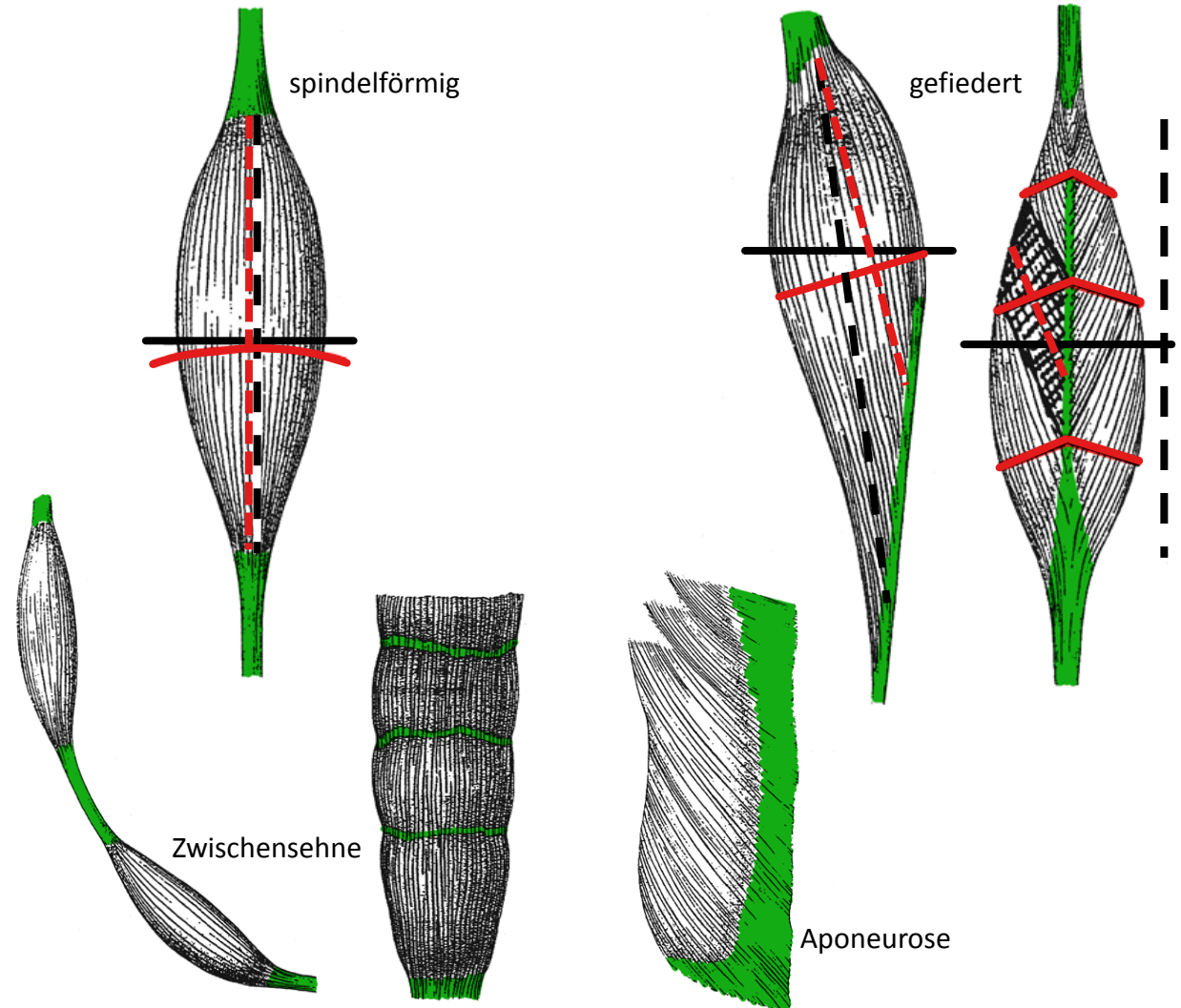
— Faszikellänge
bestimmt Hubhöhe (Anzahl Sarkomere in Serie)

- 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

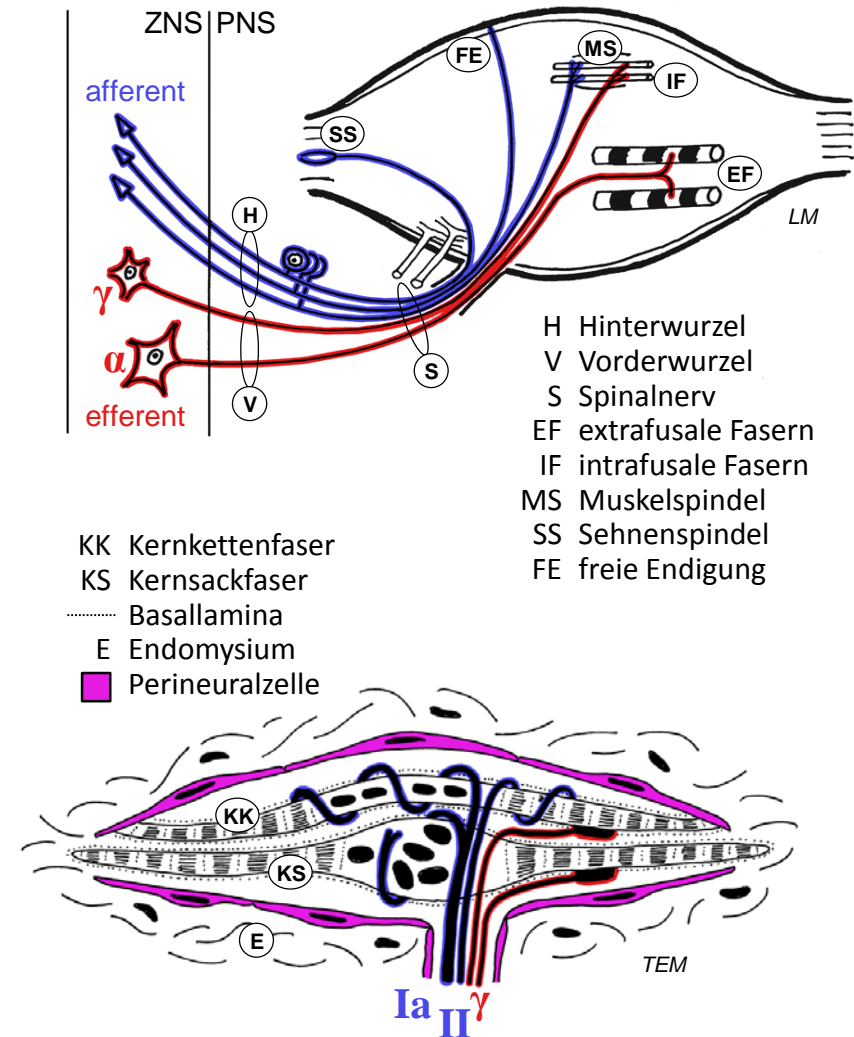
- Motoneuron (lower motor neuron): Zellkörper in Rückenmark oder Hirnstamm, Faser → Spinalnerv oder Hirnnerv
- α -Motoneuron → extrafusale Fasern (Arbeitsfasern)
- γ -Motoneuron → intrafusale Fasern (Muskelspindel)

- Afferente Innervation

- primärafferentes Neuron: Zellkörper in sensorischem Ganglion des PNS
- Rezeptoren:
 - Muskelspindel: Dehnungsrezeptor
 - Sehnenspindel: 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)
- γ -Motoneurone → Anpassung der Spindellänge an Muskellänge



Motorische Einheit

- Definition

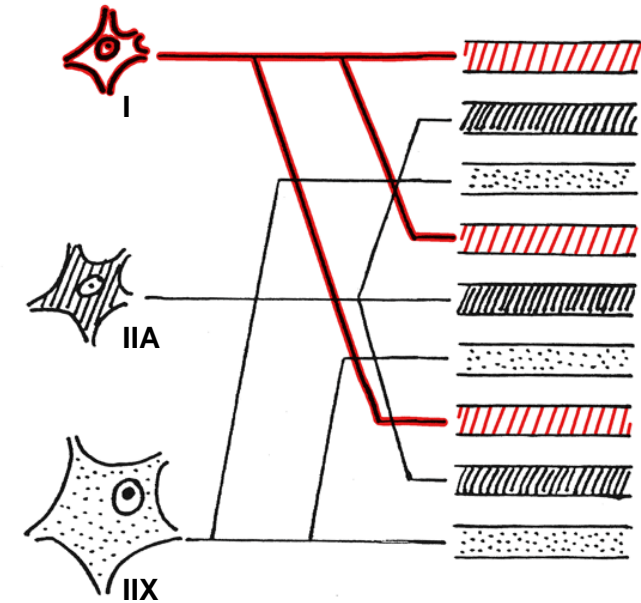
- α -Motoneuron plus alle über seine Axonkollateralen und neuromuskuläre Synapsen versorgte Muskelfasern. Viele Muskelfasern = grosse Einheit.
- jede Muskelfaser durch höchstens 1 α -Motoneuron innerviert
- neuromuskuläre Synapse: bei langen Fasern mehrere pro Muskelfaser durch Kollateralen des selben 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 α -Motoneurone \rightarrow pathologisches «fiber type grouping»



Motorische Einheiten am Faserquerschnitt

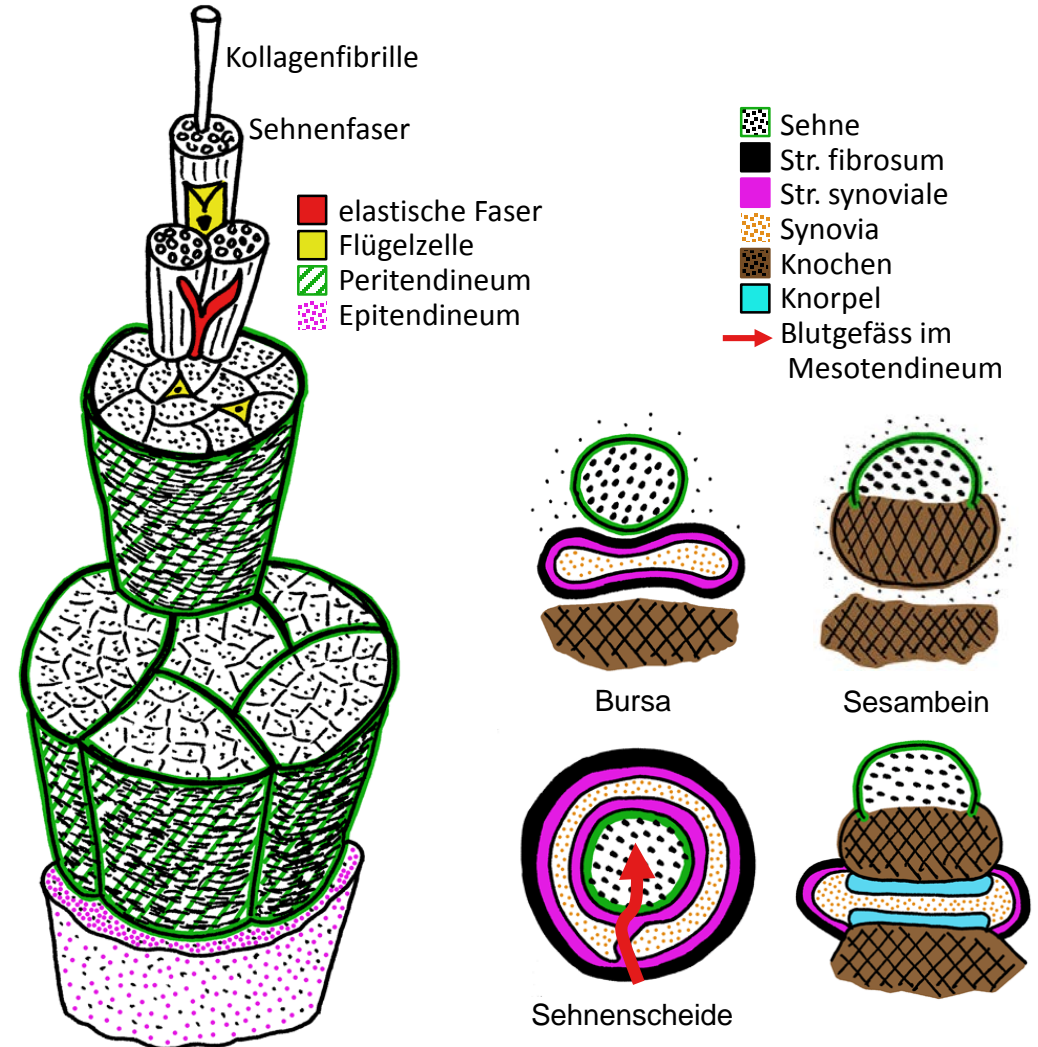
Sehne & Hilfseinrichtungen

- 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 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ → gerissene Sehnen meist vorgeschädigt (z.B. Entzündung, Steroidbehandlung)

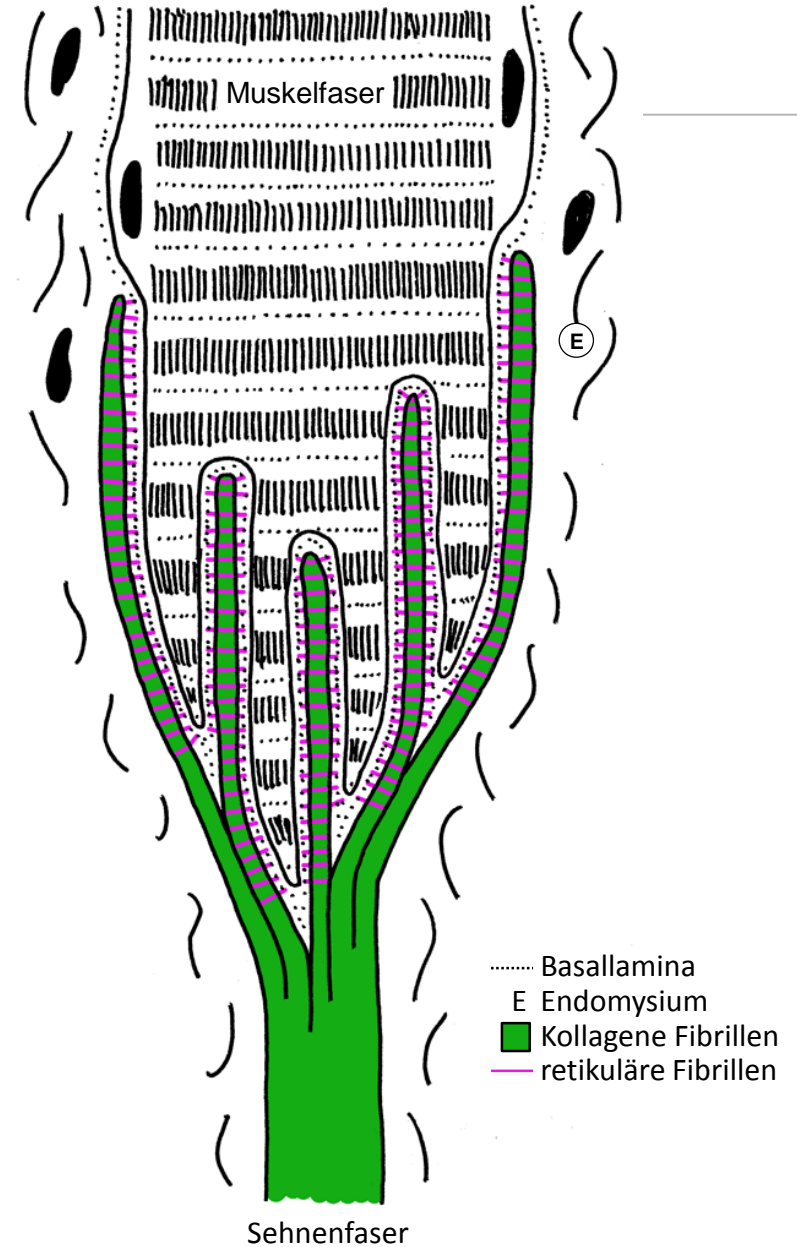
- Hilfseinrichtungen

- 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**
 - Sehnenansatzendinose: 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

