

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 12.03.2024 16:15

Funktionelle Anatomie

des menschlichen Bewegungsapparates

Vorlesung 376-0905-00
Frühjahrssemester 2024

Hörsaal Y15-G60, Universität Zürich-Irchel, Winterthurerstrasse 190
Zeit Dienstag 16:15-18:00
Dozierende I. Amrein (Am), D.P. Wolfer (Wo)

Datum/Woche	Dozent	Thema
20.02.24	1 Wo	Allgemeine Anatomie I
27.02.24	2 Wo	Allgemeine Anatomie II
05.03.24	3 Wo	Allgemeine Anatomie III
→ 12.03.24	4 Wo	Allgemeine Anatomie IV
19.03.24	5 Wo	Untere Extremität I
26.03.24	6 Wo	Untere Extremität II
02.04.24		keine Vorlesung (Osterferien)
09.04.24	7 Wo	Untere Extremität III
16.04.24	8 Wo	Untere Extremität IV
23.04.24	9 Wo	Rumpf I
30.04.24	10 Wo	Rumpf II
07.05.24	11 Am	Obere Extremität I
14.05.24	12 Am	Obere Extremität II
21.05.24	13 Am	Obere Extremität III
28.05.24	14	keine Vorlesung (Reservetermin)

Muskelfasertypen

- Komplementäre Eigenschaften der Muskelfasertypen

- Dilemma Geschwindigkeit + Kraft \leftrightarrow Ausdauer. Isoform der schweren Myosinkette \rightarrow 3 Fasertypen (MHC1, MHC2A, MHC2X) (MHC2B Ratte, Gepard, nicht human)
- Typ I \rightarrow Ermüdungsresistenz auf Kosten langsamerer Kontraktion + geringerer Kraft: oxidativer Stoffwechsel, viel Myoglobin (rote Farbe), Mitochondrien, Fetttropfen
- Typ IIX \rightarrow rasche Kontraktion (in vivo ca. 2x Typ I, in vitro 10x) + grosse Kraft auf Kosten schneller Ermüdung: glykolytischer Stoffwechsel, viel Glykogen-Reserven, sarkoplasmatisches Retikulum, Parvalbumin = Ca^{++} -Puffer
- Typ IIA \rightarrow Kompromiss: «schnell + oxidativ», ca. 15% Hybridfasern IIA+X oder I+IIA

- Fasertypenverteilung

- Muskeln alle gemischt: I 40-70%, IIA 25-50%, IIX 2-20%. Anteil Typ-I \emptyset 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 (\rightarrow oxidativ), Inaktivität IIA \rightarrow IIX (\rightarrow glykolytisch), Anteil I ändert kaum. Befunde bezüglich Änderungen 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

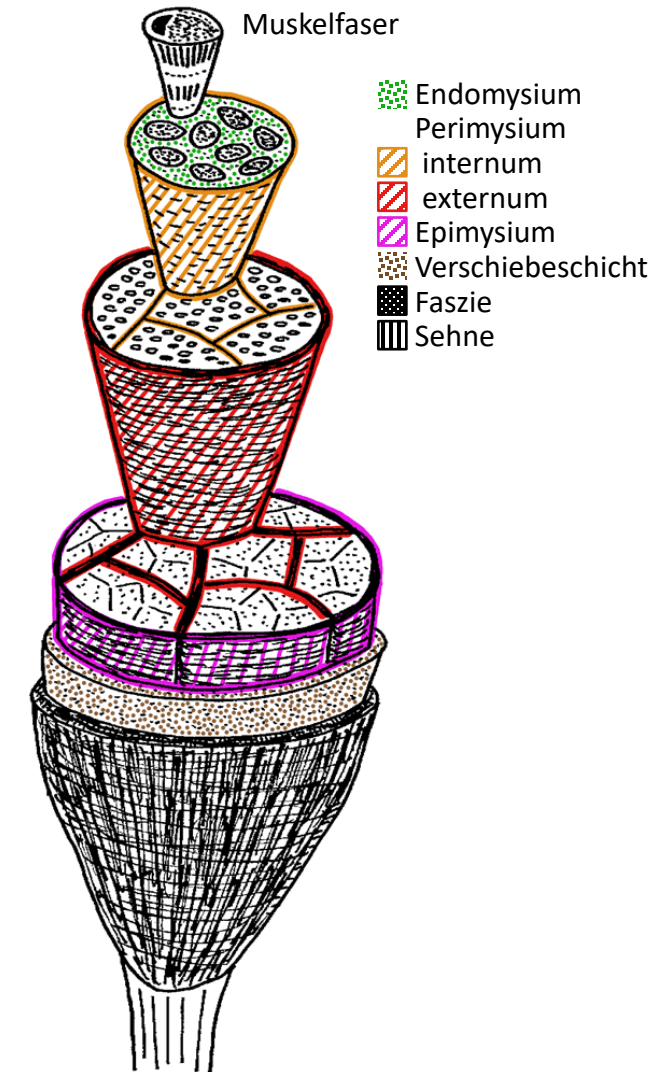
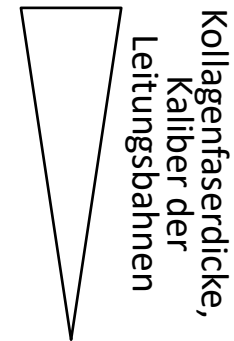
Faser-Typ	I	\rightleftharpoons IIA	\rightleftharpoons IIX
Tempo + Kraft	-	+	++
Ausdauer	++	+	-
Oxidation	++	+	(+)
Glykolyse	(+)	+	++
ATPase pH10*	-	++	++
ATPase pH4*	++	-	-
*Präinkubation			
Myoglobin	++	++	(+)
Mitochondrien	++	++	(+)
Fetttropfen	++	+	(+)
Glykogen	(+)	+	++
SR	(+)	+	++
Parvalbumin	-	(+)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



Muskelfasertypen am Querschnitt

Organ Muskel

- Parenchym
 - Muskelfasern, Länge max 4-10 cm, typischerweise kürzer als Faszikel und Muskel
 - meistens mehrere Muskelfasern durch myomyonale Verbindungen in Serie geschaltet
- Stroma: Bindegewebe mit Leitungsbahnen
 - Faszie (straffes Bindegewebe) → Muskelloge, zT. Muskelursprung
 - Epimysium bedeckt Oberfläche, als Muskelursprung mit Faszie verwachsen oder durch lockere Verschiebeschicht getrennt
 - Perimysium externum um/zwischen Sekundärbündeln (makroskopisch erkennbare Fleischfaser)
 - Perimysium internum um/zwischen Primärbündeln = Faszikel (Querschnitt ca. 1 mm², 150-250 Muskelfasern)
 - Endomysium (lockeres Bindegewebe) um einzelne Muskelfasern: Blutkapillaren & Nervenfasern. Kapillar-Kontakte / Faser je nach Fasertyp: 4.2 (I) – 4.0 (IIA) – 3.2 (IIX)
- Anpassung von Parenchym und Stroma an Training
 - Krafttraining → Zunahme Faserquerschnitt (Hypertrophie), wenig oder keine Faserneubildung (Hyperplasie): experimentell schwer zu unterscheiden
 - Ausdauertraining → mehr Glykogen, Fetttropfen, Myoglobin, Mitochondrien und oxidativer Stoffwechsel in Fasern; Gefäßneubildung im Stroma → mehr Kapillaren
 - Inaktivität oder Denervation → Faseratrophie, Gefäßrückbildung



Biomechanische Kenngrößen und Muskeltypen

- Anatomische Kenngrößen

— anatomischer Querschnitt (dickste Stelle)

— Muskellänge (Ursprung → Ansatz)

- bestimmen Geometrie aber nicht Funktion

- Physiologische Kenngrößen

— physiologischer Querschnitt bestimmt Kraft (Summe der Querschnitte parallel geschalteter MF)

— Faszikellänge bestimmt Hubhöhe (Anzahl Sarkomere in Serie)

- Anordnung der Faszikel

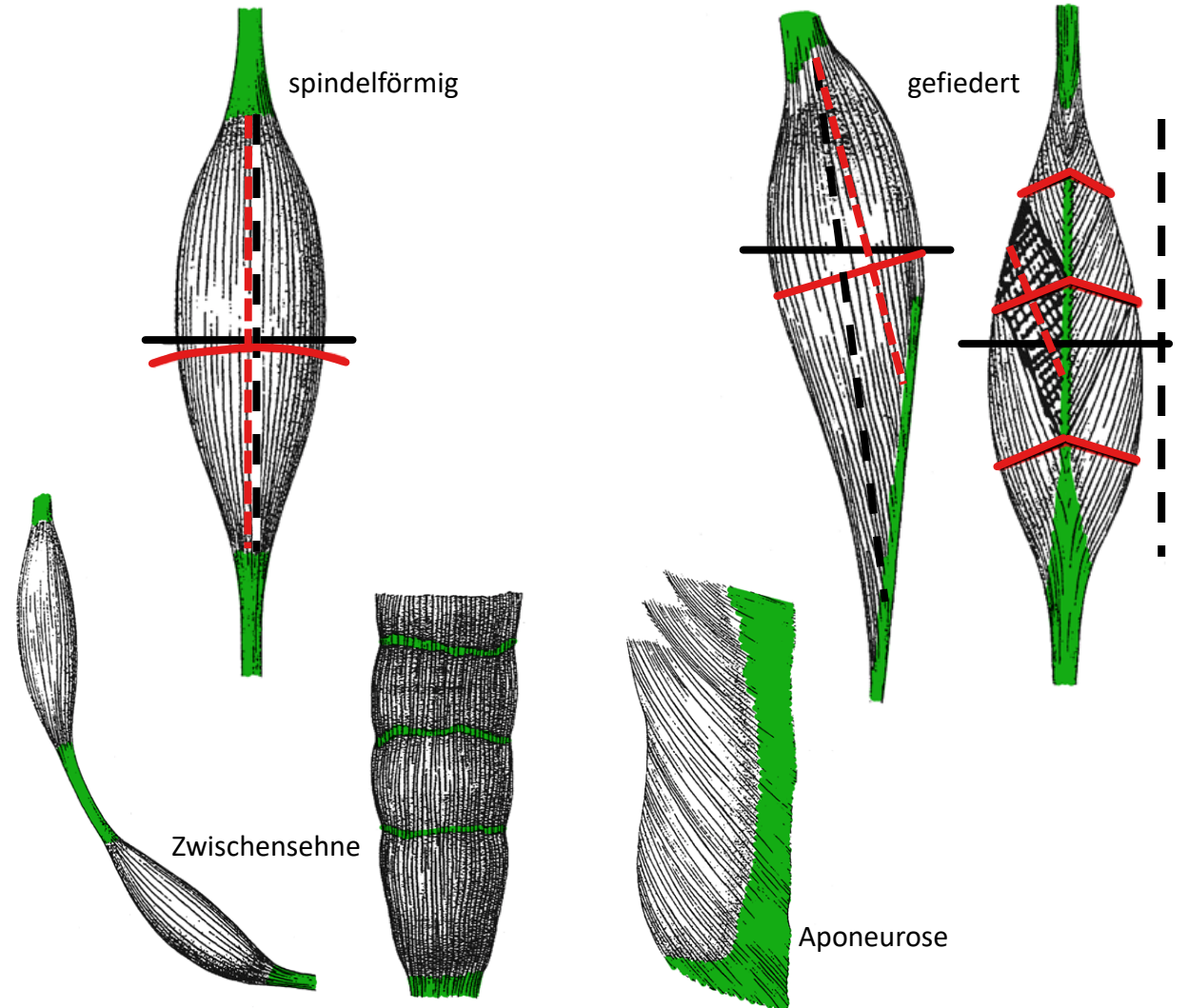
- spindelförmiger Muskel: maximal mögliche Faszikellänge und Hubhöhe

- einfache, doppelte Fiederung: mehr Fasern, Summation → mehr physiologischer Querschnitt auf Kosten geringerer Hubhöhe

- Varianten

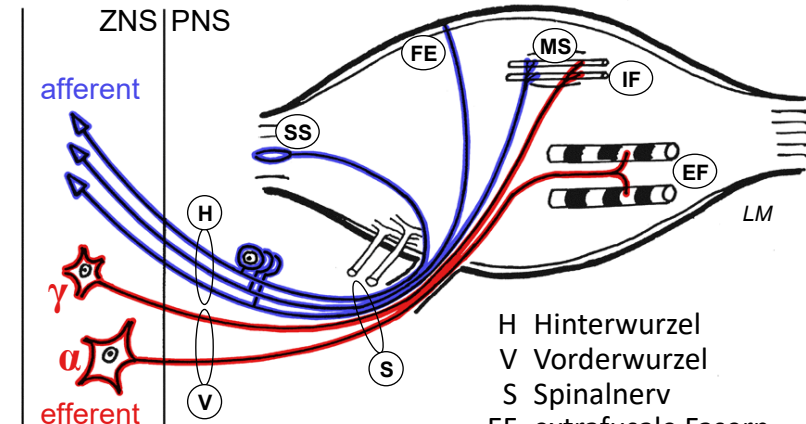
- platte Muskeln, Aponeurose = platte Sehne

- Zwischensehne(n)

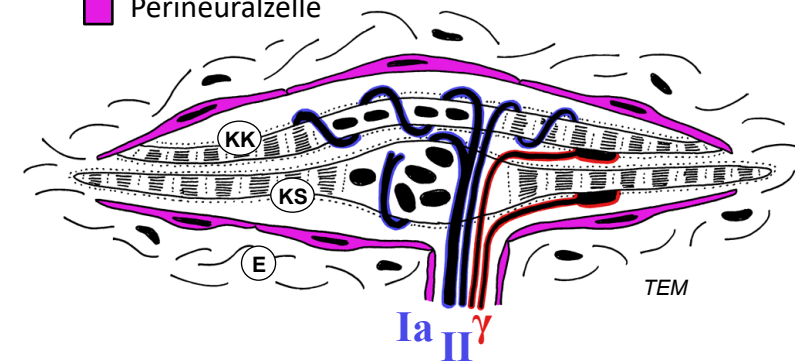


Muskelninnervation

- Efferente Innervation (ZNS → Muskel)
 - Motoneuron (lower motor neuron): Zellkörper in Rückenmark oder Hirnstamm, Faser → Vorderwurzel/Spinalnerv oder Hirnnerv
 - α -Motoneuron → extrafusale Skelettmuskelfasern (Arbeitsfasern)
 - γ -Motoneuron → intrafusale Muskelfasern (Muskelspindel)
- Afferente Innervation (Muskel → ZNS)
 - primärafferentes Neuron: Zellkörper in sensiblem 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 → regulieren Empfindlichkeit der Muskelspindeln



- H Hinterwurzel
- V Vorderwurzel
- S Spinalnerv
- EF extrafusale Fasern
- IF intrafusale Fasern
- MS Muskelspindel
- SS Sehnen­spindel
- FE freie Endigung
- KK Kernkettenfaser
- KS Kernsackfaser
- Basallamina
- E Endomysium
- Perineuralzelle



Motorische Einheit

- Definition

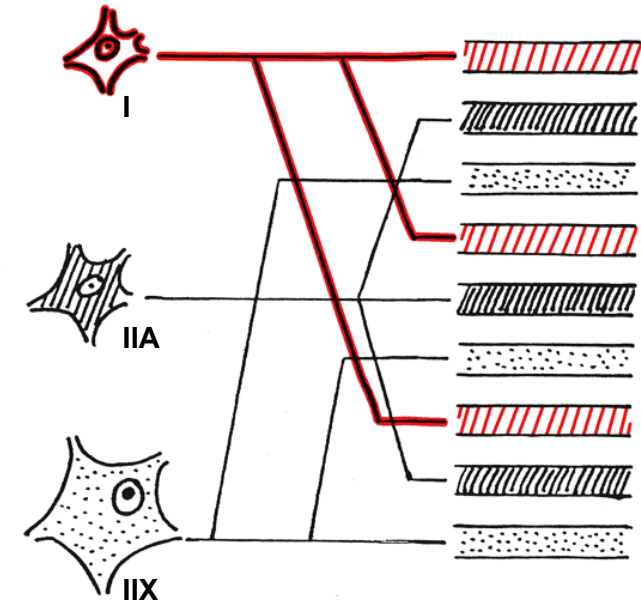
- α -Motoneuron plus alle über seine Axonkollateralen und neuromuskuläre Synapsen versorgte Muskelfasern. Viele Muskelfasern = grosse Einheit.
- jede Muskelfaser durch genau 1 α -Motoneuron innerviert, bei langen Fasern mehrere neuromuskuläre Synapsen pro Muskelfaser durch Axon-Kollateralen
- Motoneuron bestimmt Fasertyp: gleicher Typ innerhalb Einheit, vorübergehende Typen-Koexistenz und mehr Hybridfasern während Fasertypen-Transformation: typisch IIX+IIA, selten IIA+I, nicht I+IIX (keine direkte Transformation I \leftrightarrow 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 (Neuropathie, Verlust von Motoneuronen) \rightarrow Faseratrophie, eventuell Reinnervation durch Übernahme verwaister Muskelfasern durch Kollateralen benachbarter α -Motoneurone \rightarrow pathologisches «fiber type grouping»



Motorische Einheiten am Faserquerschnitt

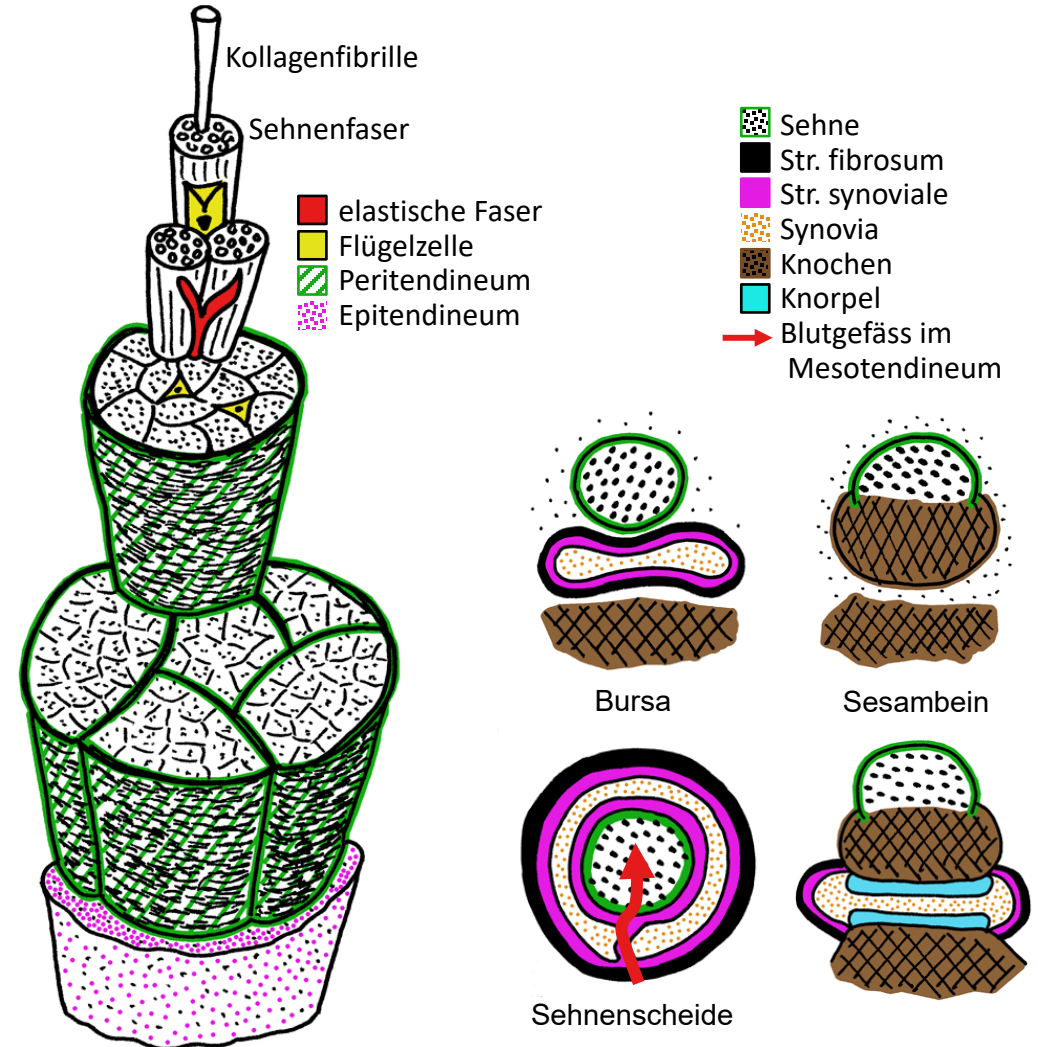
Sehne & Hilfseinrichtungen

- Sehne

- Übertragung der Muskelkraft → eindimensionale Zugbelastung
- Parenchym: straffes parallelfasriges kollagenes Bindegewebe: Sehnenfasern (Kollagen I), wenige elastische Fasern → 4% Dehnungsreserve, Flügelzellen = Fibroblasten in Spalten zwischen Sehnenfasern, Proteoglykane → 60% Wasseranteil
- Stroma: ernährendes lockeres feinfaseriges kollagenes Bindegewebe mit Leitungsbahnen: Peritendineum um Sehnenfaserbündel, Epitendineum bedeckt ganze Sehne
- Reissfestigkeit bis 120 MPa (ca. 1200 kg/cm²), Elastizitätsmodul ca. 1 GPa: kaum Dehnung unter Zug

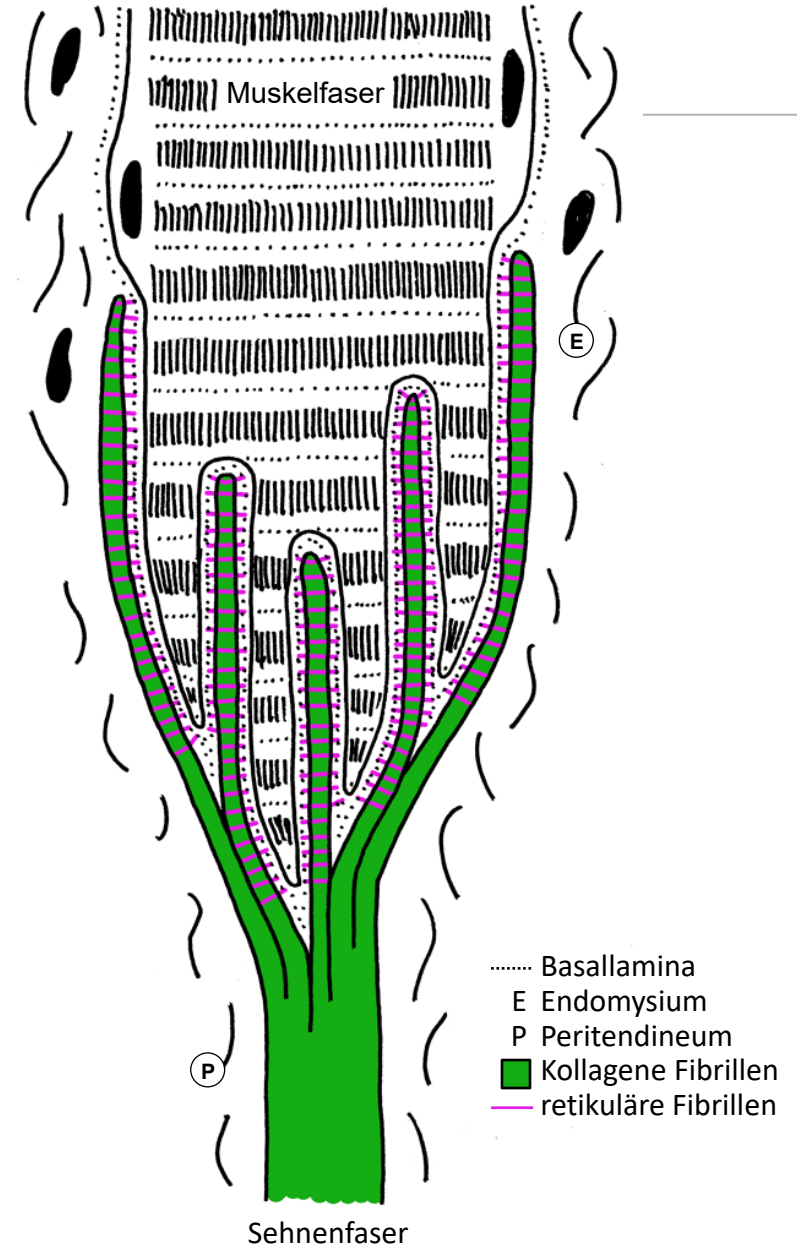
- Hilfseinrichtungen

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



Muskelsehnenübergang

- Prinzip
 - 1 Muskelfaser verbunden mit 1 Sehnenfaser
 - stets Basallamina dazwischen
 - Vergrößerung Kontaktfläche durch fingerartige Fortsätze und Einstülpungen der Muskelfaser plus Auffächerung der Sehnenfaser in Kollagenfibrillen: sowohl Seit-zu-Seit-Kontakt als auch End-zu-End-Kontakt
- Kontakte
 - Fokalkontakte mit Beteiligung endständigen sarkomerischen Aktins (statt Z-scheibe, via Integrin): Enden → Basallamina
 - erweiterte Fokalkontakte mit Beteiligung des subsarkolemmalen Zytoskeletts: nicht sarkomerisches Aktin (via Integrin), Dystrophin (via Dystroglycan): Seite der Fortsätze → Basallamina
 - retikuläre Fibrillen binden an Basallamina und sind mit Sehnenfasern verwoben
 - Perimysium und Peritendineum gehen ineinander über



Sehnenansatz

- Chondral-apophysäre Ansatzzone
 - Sehnenfasern strahlen in Knochengewebe ein, Periost fehlt in der Ansatzzone
 - Faserknorpel im Ansatzbereich, gewellter Verlauf der Sehnenfasern um Chondrone in Ruhe: bei Zug druckelastisch komprimiert → elastische Dämpfung
 - Faserknorpel in Knochennähe mineralisiert → abgestufter Übergang der Materialeigenschaften
- Periostal-diaphysäre Ansatzzone
 - durchgehendes Periost, Sehnenfasern strahlen durch Periost in Knochengewebe und in Periost ein
 - statt Knorpel 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 oft Ausriss mitsamt Knochen (Avulsionsfraktur) statt Durch/Abriss

