

Allgemeine Anatomie III

Gelenke, Muskel

David P. Wolfer

Institut für Bewegungswissenschaften und Sport, D-HEST, ETH Zürich
Anatomisches Institut, Medizinische Fakultät, Universität Zürich

376-0905-00 Funktionelle Anatomie, Di 05.03.2024 16:15

Funktionelle Anatomie

des menschlichen Bewegungsapparates

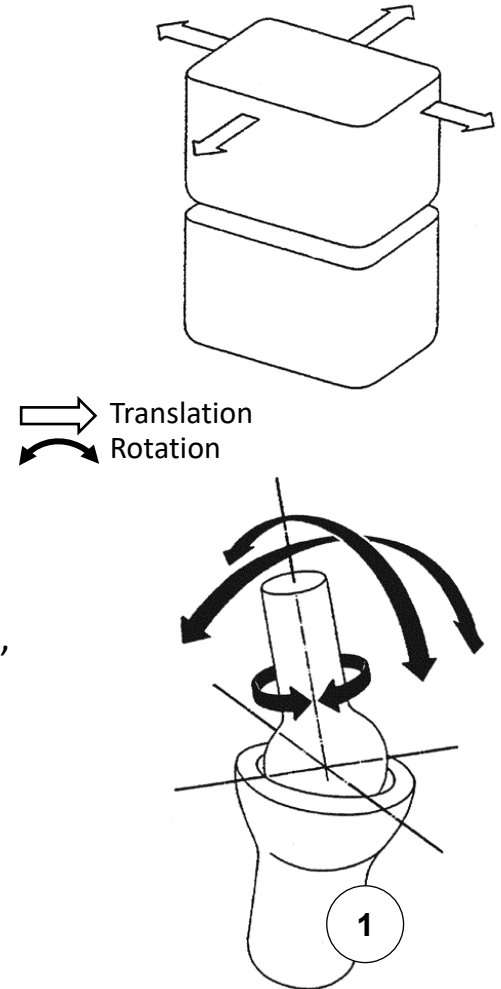
Vorlesung 376-0905-00
Frühjahrssemester 2024

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)

Systematik der Diarthrosen, Kugelgelenk

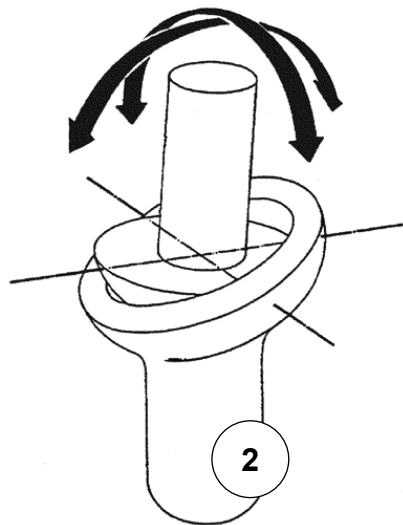
- Gelenk: \pm bewegliche Verbindung zwischen Skelettteilen.
- 2 Gelenkskörper \rightarrow einfaches Gelenk, >2 \rightarrow zusammengesetztes Gelenk, mehrfacher Kontakt zwischen Gelenksköpern \rightarrow verbundene Gelenke (gemeinsame oder getrennte Gelenkshöhlen)
- Theoretisch maximal 3+3 Freiheitsgrade (FG) freier Bewegung
 - 3 Rotationsfreiheitsgrade (3 zueinander senkrechte Achsen):
konvex-konkave Gelenkflächen, Rotation bei meisten Gelenken für Bewegungsumfang bestimmend, je nach Gelenktyp 1-3 FG biomechanisch effektiv realisiert
 - 3 Translationsfreiheitsgrade (3 zueinander senkrechte Richtungen):
in Translationsrichtung plane Gelenkflächen, 0-2 FG biomechanisch effektiv realisiert
- 7 Gelenktypen: Modell versus Biologie
 - Einschränkung der Bewegung durch artikuläre Faktoren (knöcherne und Bandführung, zusammengesetzte oder verbundene Gelenke) \rightarrow 7 Gelenktypen als Modell
 - Freiheitsgrade des Modells, zT. weiter reduziert, auch durch extraartikuläre Faktoren (Weichteile, fehlende Muskelkraft). Eventuell dank deformierbaren Gelenksköpern (Gelenkknorpel, zusammengesetzte Gelenkskörper) oder lockere Bandführung Freiheitsgrade auch erweitert.
- 3 Rotations-Freiheitsgrade
 - Kugelgelenk: max. 3 FG Rotation aber keine Translation
 - Kopf: kugelförmig, konvex; Pfanne: kugelförmig, konkav
 - Effektiv 3 FG: Schultergelenk, Hüftgelenk. Effektiv 2 FG: Humeroradial-, Finger- und Zehengrundgelenke. Effektiv 1 FG: vordere Abteilung unteres Sprunggelenk



Diarthrosen mit 2 Rotationsfreiheitsgraden

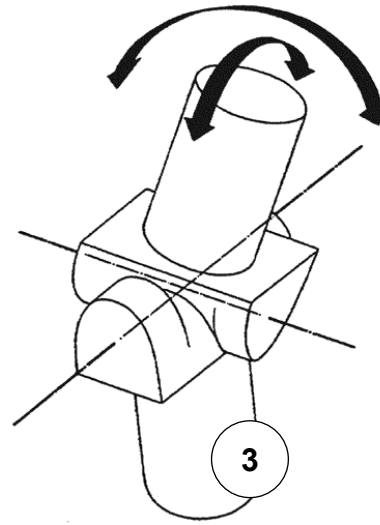
- **Eigelenk**

- keine Translation, keine Rotation um Längsachse
- Kopf und Pfanne eiförmig (Ellipsoid), deformierbar
- Radiokarpalgelenk, Atlantookzipitalgelenk



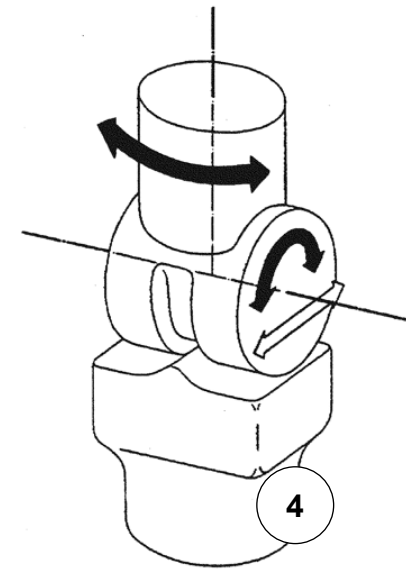
- **Sattelgelenk**

- keine Translation
- Kopf und Pfanne über Kreuz konvex-konkav
- Daumensattelgelenk (zusätzliche leichte Rotation für Opposition des Daumens nur dank lockerer Bandführung möglich)



- **bikondyläres Gelenk**

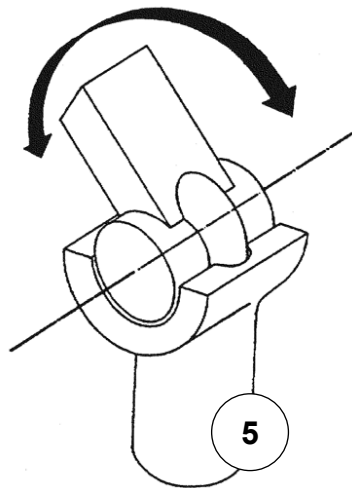
- max. 1 FG Translation
- 2 Kondylen = Gelenkrollen, 2 napfförmige flache Pfannen, typisch mit Gelenkscheiben
- 2 Gelenkhöhlen: Kiefergelenk, 1 Gelenkhöhle: Kniegelenk (Translation an Rotation gekoppelt)



Diarthrosen mit 1 Rotationsfreiheitsgrad

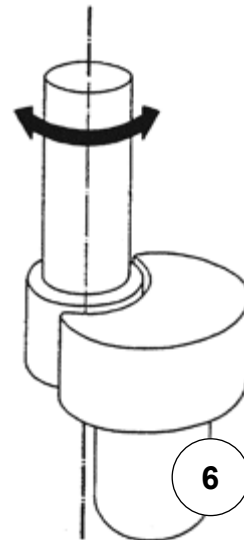
- Scharniergelenk

- Translation verhindert durch Gelenkform und Bandapparat
- Kopf (Trochlea) annähernd walzenförmig, Pfanne bildet Rinne
- Humeroulnargelenk, Interphalangealgelenke, oberes Sprunggelenk, hintere Abteilung unteres Sprunggelenk



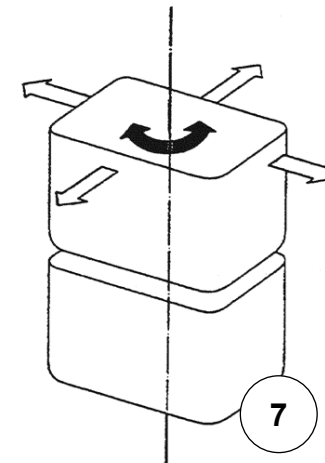
- Rad- = Zapfengelenk

- Translation verhindert durch Bandapparat
- Kopf rad- oder zapfenförmig, Rotation um Längsachse
- proximales und distales Radioulnargelenk, Atlantoaxialgelenk



- Planes Gelenk

- max. 2 FG Translation, max. 1 FG Rotation
- \pm plane Gelenkfläche
- Facettengelenke der Wirbelsäule, Femoropatellargelenk (Rotation blockiert, aktiv nur 1 FG Translation); Amphiarthrosen: Fuss/Handwurzel, Iliosakralgelenk



Skelettmuskelfaser (myofiber)

• Entwicklung

- Muskelstammzellen (Pax7) im Somiten-Myotom (Innervation durch Spinalnerven) und Schlundbogen-Mesenchym (Innervation durch Hirnnerven) → Myoblasten (Myf5 → MyoD): Proliferation, Migration
- Myoblasten → Myozyten (MyoD, Myogenin, Mrf4) → Fusion zu Myotuben (Synzytium) → Bildung von Myofibrillen im Zytoplasma (Querstreifung ab 13 SSW) → Skelettmuskelfaser = zelluläre Einheit des Skelettmuskels, definitive Zahl mit Geburt, bzw spätestens im 1. Lebensjahr erreicht
- Pax7: muskelstammzell-spezifischer Transkriptionsfaktor
- Myf5 → MyoD, Myogenin, Mrf4: muskel-spezifische Transkriptionsfaktoren

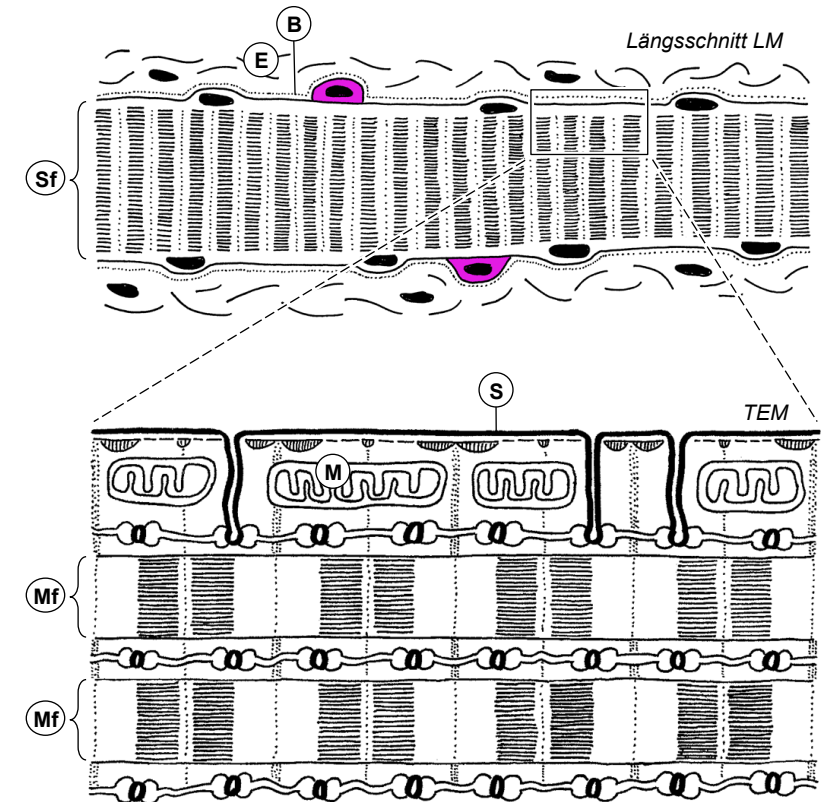
• Morphologie

- Faser \varnothing 10-100 μ m x Länge bis 10 cm, Basallamina
- Anteil der Myofibrillen am Zytoplasma = Sarkoplasma ca 85%
- 50/mm Faserlänge platte Zellkerne peripher unter Sarkolemm

• Satellitenzellen

- ruhende Muskelstammzellen (Pax7), zwischen Sarkolemm und Basallamina, 2-15% der Zellkerne, wesentlich weniger in schnellen Fasern und im Alter
- Aktivierung → asymmetrische Teilung → Populationserhalt und Produktion von Myoblasten & Myozyten → Fusion mit Muskelfasern für Hypertrophie und Reparatur, Fusion untereinander → Myotuben → Muskelfaserersatz: hohes Potential für Regeneration & Reparatur, nimmt mit Alter stark ab

Sf	Skelettmuskelfaser	E	Endomysium
Mf	Myofibrille	B	Basallamina
		S	Sarkolemm
		●	Zellkerne
		M	Mitochondrien



Myofibrille (myofibril)

- Myofibrille

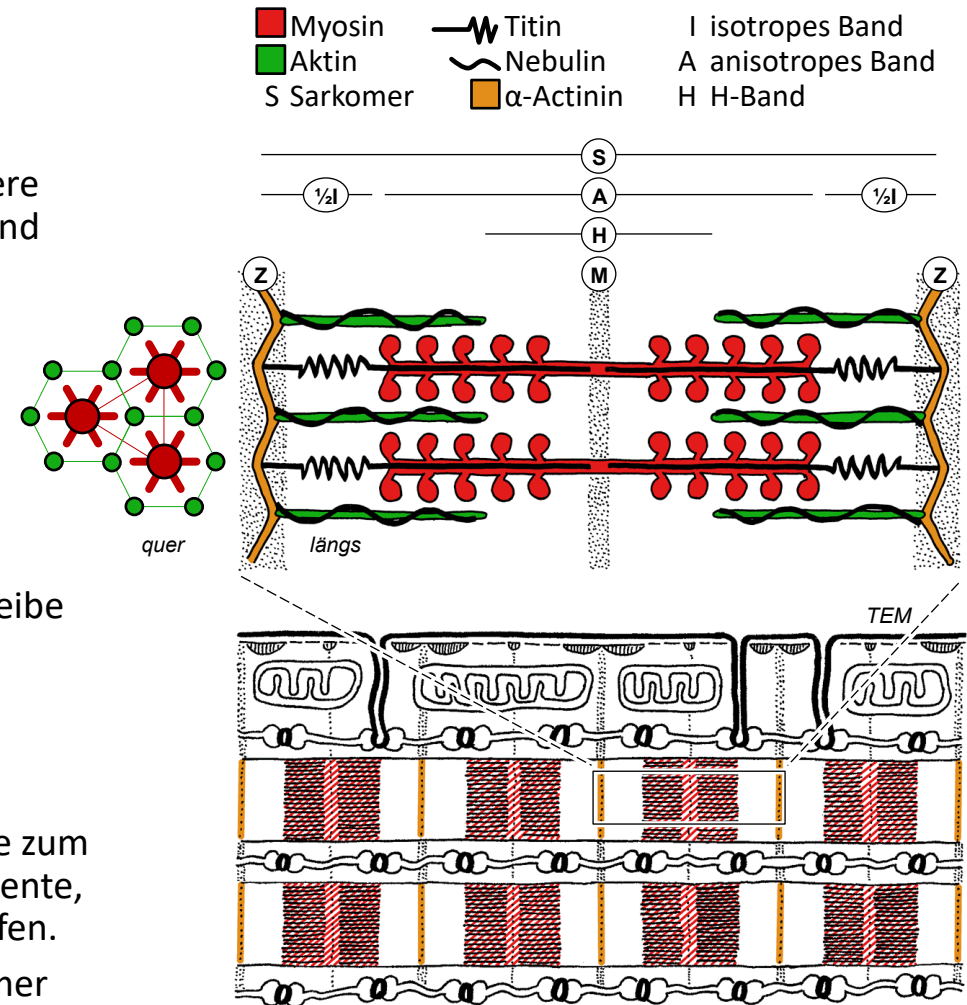
- Kraft erzeugende Organelle im Sarkoplasma der Skelettmuskelfaser
- Durchmesser 0.5-1µm, 2500-3500! pro Skelettmuskelfaser
- so lang wie Skelettmuskelfaser, bis ca. 35,000 Sarkomere in Serie
- regelmässige Anordnung der Filamente und Repetition der Sarkomere
→ Querstreifung von Myofibrillen und Skelettmuskelfaser: A/H/I Band

- Sarkomer

- repetierte Grundeinheit der Myofibrille, zwischen 2 Z-Scheiben
- Aktinfilamente (7nm x 1µm) ↔ Myosinfilamente (15nm x 1.5µm, 300 Schwänze → Filament, Köpfe → Kontakt mit Aktin), Verhältnis am Querschnitt 6 Aktin : 3 Myosin
- Aktin verankert in Z-Scheibe (α-Actinin, Cap Z), stabilisiert durch Nebulin-Filamente, Myosin verankert und querverbunden in M-Scheibe
- Titin: 10% Muskelprotein, superdünne Filamente >30,000 AS, Rückstellfeder und Überdehnungsbremse für Sarkomer

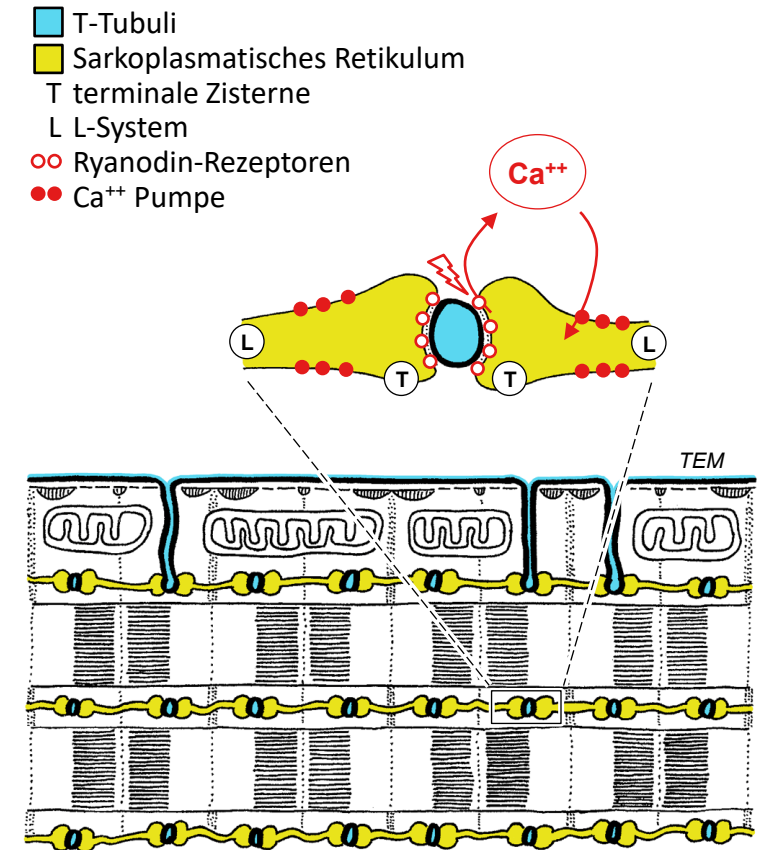
- Kontraktion

- Aktin durch Bewegung der Myosinköpfe zwischen Myosin-Filamente zum M-Streifen hin gezogen: A-Band behält Breite = Länge Myosin-Filamente, I-Band und H-Band werden schmaler, Myosin rückt näher an Z-Streifen.
- max Verkürzung um 40%, 3.3 → 2.0µm: Hubhöhe 1.3µm pro Sarkomer



Elektromechanische Koppelung

- Elektromechanische Koppelung
 - Erregung (Aktionspotential am Sarkolemm) → Kontraktion (1 Zuckung pro Aktionspotential, tetanische Kontraktion bei hoher Frequenz)
 - 2 Organellen wichtig: T-Tubuli und sarkoplasmatisches Retikulum
- T-Tubuli
 - tubuläre Einsenkungen des Sarkolemm
 - umgeben Myofibrille am A-I Übergang
 - leiten und verbreiten Aktionspotential vom Sarkolemm in Faser hinein
- Sarkoplasmatisches Retikulum
 - vom endoplasmatischen Retikulum abgeleiteter intrazellulärer Ca^{++} Speicher
 - 2 Terminale Zisternen begleiten T-Tubuli am A-I Übergang zirkulär um Myofibrille, bilden zusammen eine Triade
 - L-System longitudinal, verbindet terminale Zisternen
 - Ryanodin Rezeptoren: spannungsgesteuerter Ca^{++} Kanal in terminaler Zisterne, aktiviert durch Depolarisation des T-Tubulus
 - Tropomyosin blockiert in Ruhe Bindung von Myosin an Aktin, Freigabe durch Ca^{++} Bindung an Troponin C → Kontraktion
 - Ca^{++} Pumpen im L-System: sofortige Wiederaufnahme des Ca^{++}



3 Zytoskelettsysteme der Skelettmuskelfaser

- **subsarkolemmal = kortikal**
 - speziell ausgebautes Membranskelett aus 3 Filamentsystemen
 - reifenartige Verstärkung va des Aktin-Netzwerks: starker Doppelreifen um Z-Scheibe (Costamere), feinere Reifen um M-Scheibe
 - geordnetes Plissieren des Sarkolemmms bei Kontraktion, laterale Kraftübertragung auf Basallamina und extrazelluläre Matrix
- **perisarkomerisch**
 - Schlingen um Myofibrillen, Brückenbildung zwischen Myofibrillen, Verbindung zwischen Myofibrillen und subsarkolemmalem Zytoskelett
 - Ausrichtung der Myofibrillen, intrazelluläre Kraftübertragung
- **sarkomerisch (Myofibrille)**
 - Zytoskelettproteine, die Myofibrillen aufbauen
 - molekularer Motor: Krafterzeugung für Kontraktion
 - endständiges sarkomerisches Aktin: Kraftübertragung von Fibrillenende auf Basallamina und extrazelluläre Matrix via Fokalkontakte
- **Duchenne-Muskeldystrophie**
 - Mutation im Gen für Dystrophin (X-Chromosom, Knaben betroffen)
 - insuffizientes kortikales Zytoskelett, ev. auch Dysfunktion der Satellitenzellen → Faserdegeneration, Muskelschwund

subsarkolemmal
 - **Aktin*** ↔ Talin/Vinculin¹ ↔ Integrin² ↔ BL/EZM
 - **Dystrophin** ↔ Dystroglycan/Sarcoglycan² ↔ BL/EZM
 - **Spektrin** ↔ Ankyrin¹ ↔ Aktin/Dystrophin
 *nicht sarkomerisch



peri-sarkomerisch
 - **Desmin** (va. Z-Scheibe), **Keratin** (va. M-Scheibe)



sarkomerisch
 - **Aktin***, Nebulin, α-Actinin¹, Titin, **Myosin**
 - Fokalkontakte: Aktin* ↔ α-Actinin¹ ↔ Integrin² ↔ BL/EZM
 *sarkomerisch

¹Adaptorproteine, ²Transmembranproteine

