

Allgemeine Anatomie II

Knochen, Knorpel, Gelenke

David P. Wolfer

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

376-0905-00 Funktionelle Anatomie, Di 28.02.2023 16:15

Funktionelle Anatomie

des menschlichen Bewegungsapparates

Vorlesung 376-0905-00
Frühjahrssemester 2023

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

Datum/Woche	Dozent	Thema
21.02.23	1 Wo	Allgemeine Anatomie I
28.02.23	2 Wo	Allgemeine Anatomie II
07.03.23	3 Wo	Allgemeine Anatomie III
14.03.23	4 Wo	Allgemeine Anatomie IV
21.03.23	5 Wo	Untere Extremität I
28.03.23	6 Wo	Untere Extremität II
04.04.23	7 Wo	Untere Extremität III
11.04.23		keine Vorlesung (Osterferien)
18.04.23	8 Wo	Untere Extremität IV
25.04.23	9 Wo	Rumpf I
02.05.23	10 Wo	Rumpf II
09.05.23	11 Am	Obere Extremität I
16.05.23	12 Am	Obere Extremität II
23.05.23	13 Am	Obere Extremität III
30.05.23	14	keine Vorlesung (Reservetermin)

Mikroanatomie des Knochengewebes

- Bestandteile

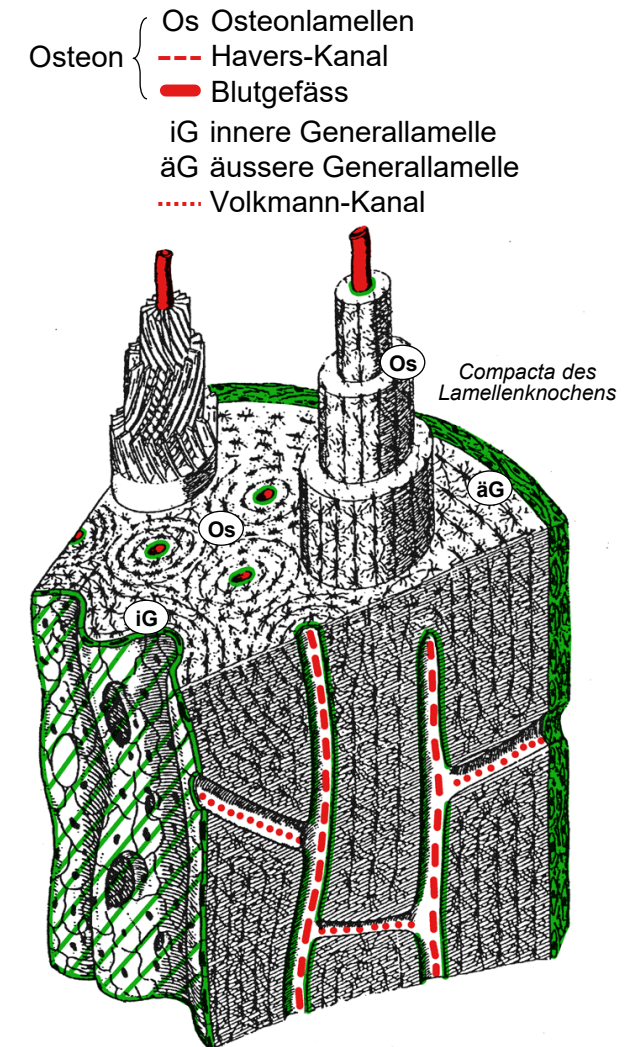
- >99% extrazelluläre Matrix: 10% Wasser, 70% anorganische Matrix (va. Hydroxyapatit), 19% organische Matrix: kollagene Fibrillen (va Typ I), Proteoglykane, Adhäsionsproteine
- längliche hexagonale Hydroxyapatitkristalle ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) parallel zu und in Fibrillen, Fibrillen → Zugfestigkeit, Kristalle → Druckfestigkeit, Verbund → gewisse Biegefestigkeit
- <1% Zellen. Osteozyten eingemauert in Lakunen, Fortsätze in Kanälchen, Gap Junctions → Netzwerk. Übrige Zellen = Minderheit, an Oberfläche bzw im Periost und Endost.

- Geflechtknochen

- Kollagenfibrillen in unregelmässiger Orientierung verflochten, geringerer Mineralgehalt, Osteozyten zufällig verteilt, geringere Festigkeit
- Schnelle Bildung: unreifes Erstprodukt von Osteogenese und Frakturheilung (Kallus), nur Pars petrosa des Os temporale (Felsenbein) bleibt teilweise Geflechtknochen

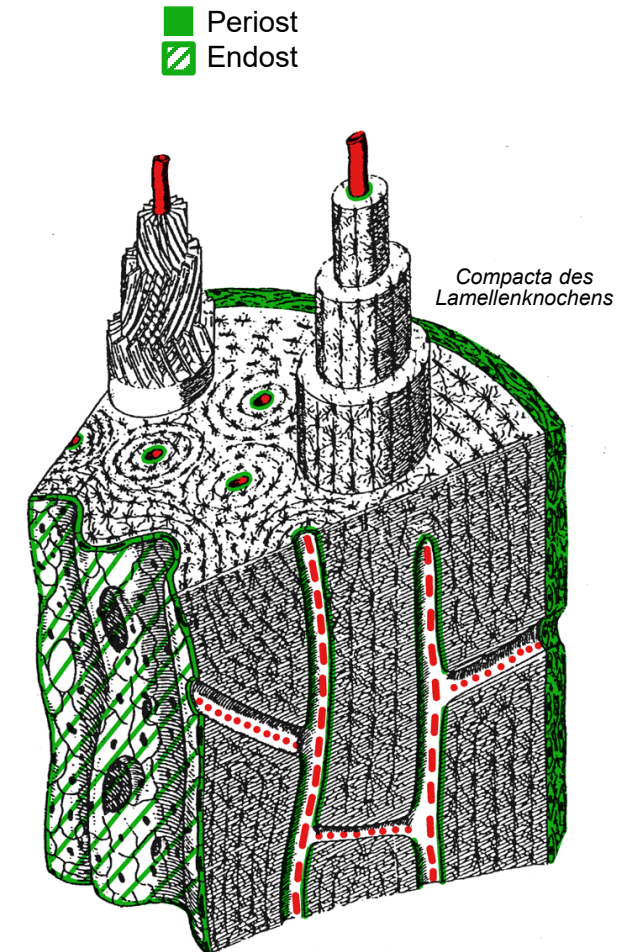
- Lamellenknochen

- Umbau («bone remodeling») Geflechtknochen → Lamellenknochen. Lamellen 3-8µm dick, Osteozyten in Grenzflächen, senden Fortsätze in Lamellen; Kollagenfibrillen parallel, Richtung wechselt von Lamelle zu Lamelle
- Spongiosa: flache Lamellen parallel zu Bälkchen-Oberfläche, keine Kanäle
- Compacta: zylindrische Osteone mit 5-20 Osteonlamellen konzentrisch um Havers-Kanal mit Blutgefässen. Oberflächlich Innere und äussere Generallamellen. Volkmann-Kanäle quer zu Lamellen: führen Blutgefässe zu Havers-Kanal



Innere und äussere Oberfläche des Knochengewebes

- Periost = Knochenhaut
 - äussere Knochenoberfläche, ausser apophysäre Sehnen/Bandansätze und wo Gelenkknorpel Knochen bedeckt
 - Faserschicht (Stratum fibrosum) aussen: kollagenes Bindegewebe, Blutgefässe, reichlich Nervenfasern (Schmerzempfindlichkeit)
 - osteogenetische Schicht innen (Kambium, Stratum osteogenicum = germinativum): kontinuierliche Zell-Lage aus vorwiegend ruhenden skelettalen Stammzellen, Osteoprogenitorzellen, Osteoblasten, sowie Osteoklasten
- Endost
 - innere Grenzschicht zwischen nicht im Umbau befindlichen Knochengewebe und Knochenmark (Spongiosabälkchen, innere Generallamelle), Auskleidung der Havers-Kanäle
 - dünne Schicht nicht mineralisierter Kollagenfibrillen
 - Zellschicht mit gleicher Zusammensetzung wie osteogenetische Schicht des Periosts, heissen hier Endost-Zellen = «bone lining cells»
- Umbauzonen
 - Kein Endost
 - Endost-Zellen differenzieren sich zu Osteoklasten (Abbauzonen) oder Osteoblasten (Aufbauzonen)



Knochenumbau

- Zelluläre Grundlage und Steuerung

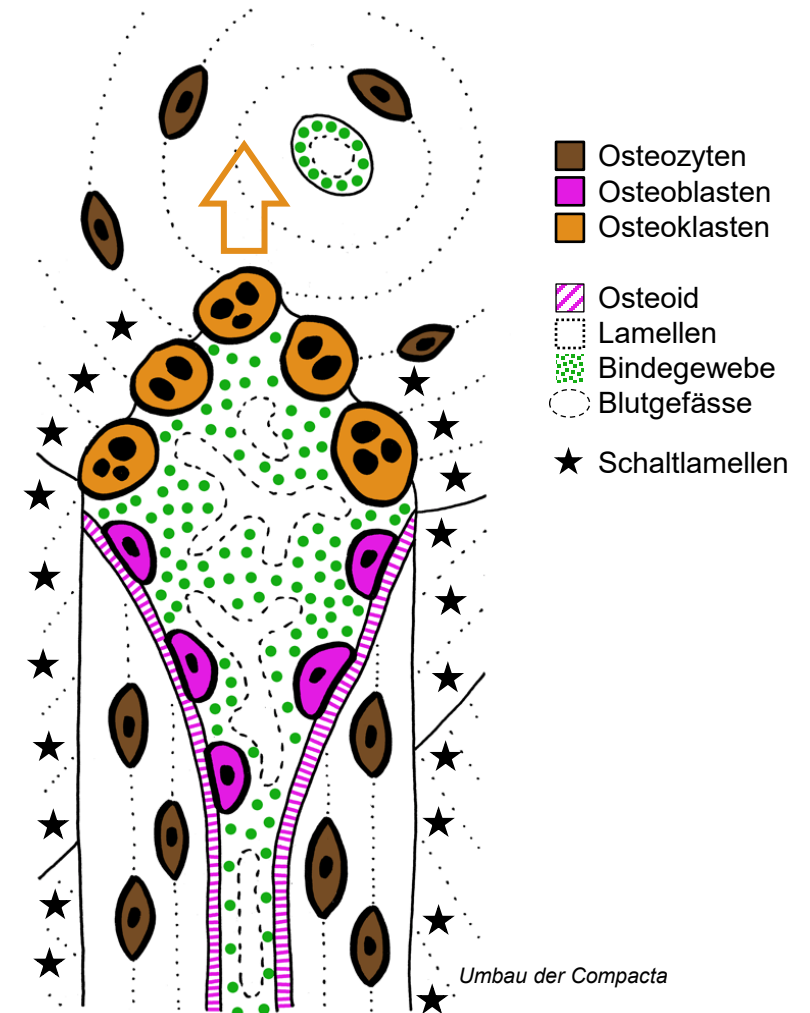
- Matrix-Abbau durch Osteoklasten mittels Na^+H^+ Exchanger NHA2
- Aufbau (Ossifikation): skelettale Stammzellen → Osteoprogenitorzellen → Osteoblasten → Osteozyten, bei Umbau direkt Lamellenknochen gebildet
- Osteozyten haben Mechanosensoren und Hormonrezeptoren: reduzieren Knochenmasse via Freisetzung von RANKL und Sclerostin, erhöhen Knochenmasse via Abgabe von Osteoprotegerin
- RANK von Osteoklasten freigesetzt, stimuliert Osteoblasten durch Bindung an deren membranständiges RANKL → Koppelung von Auf- und Abbau

- Ablauf in Spongiosa und Compacta

- Spongiosa: 28% Austausch pro Jahr, Osteoklasten → oberflächliche Lakunen, in die durch Osteoblasten neue Lamellen abgelagert werden
- Compacta: 4% Austausch pro Jahr, Osteoklasten-Trupp → Tunnel und übrig bleibende Schaltlamellen, Osteoblasten füllen Tunnel mit neuem Osteon

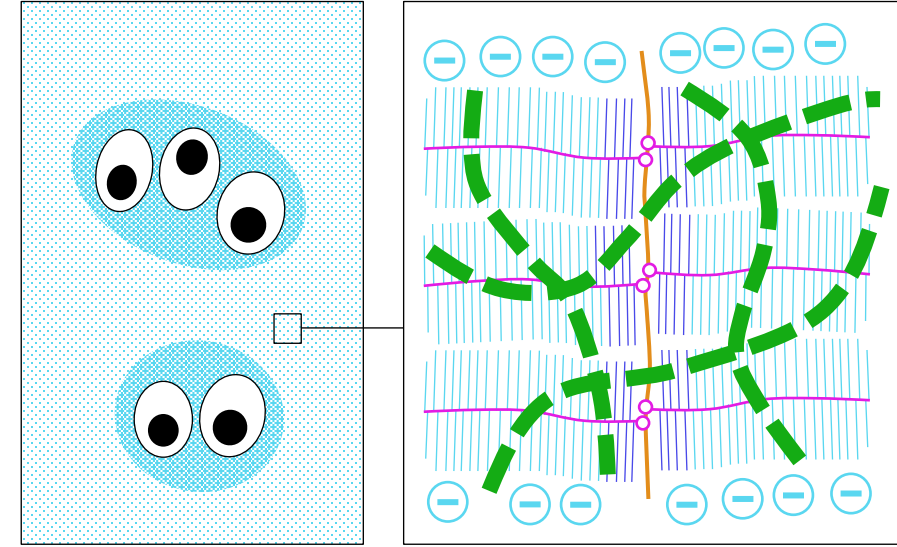
- Funktion und Störungen

- Anpassung von Masse & Struktur, Reparatur von Mikroschäden
- Abbau von Knochen = Kalziumspeicher → Ca^{2+} Mobilisation (Parathormon)
- Basis für Frakturheilung (Callus = Geflechtknochen → Lamellenknochen)
- Osteoporose = ungenügende Masse (Abbau > Aufbau)
- Osteomalazie = ungenügende Mineralisation, zB Vit. D-Mangel (Rachitis)



Knorpelgewebe

- Chondrozyten
 - oval, isoliert ohne lange Fortsätze, unterhalten Matrix
 - während Wachstum teilungsfähig, beim Erwachsenen nicht mehr
- Knorpelmatrix
 - Proteoglykane (PG): va. Aggrecan, bis 4 mm grosse Komplexe durch Bindung von Aggrecan-Monomeren an Hyaluronsäure
 - Kollagenfibrillen (Typ II + wenig IX & XI) bilden in territorialer Matrix (Knorpelhof) dichte Netze, interterritorial weniger dicht und senkrecht zu freier Oberfläche ausgerichtet
 - Kollagenfibrillen (15-20 nm dick) nicht gebündelt, eng mit PG verbunden: maskiert, im LM ohne polarisiertes Licht unsichtbar
 - Elektrostatische Abstossung der polyanionischen PG, osmotischer Druck durch gefangene Kationen → H₂O-Speicherung (80% Feuchtgewicht), Vorspannung der Fibrillen. H₂O bei Kompression reversibel ausgepresst → Druckelastizität
- Perichondrium = Knorpelhaut
 - Faserschicht: Bindegewebe
 - chondrogenetische Schicht (beim Erwachsenen ruhend!): Stammzellen, Chondroprogenitorzellen, Chondroblasten
 - fehlt beim Gelenkknorpel



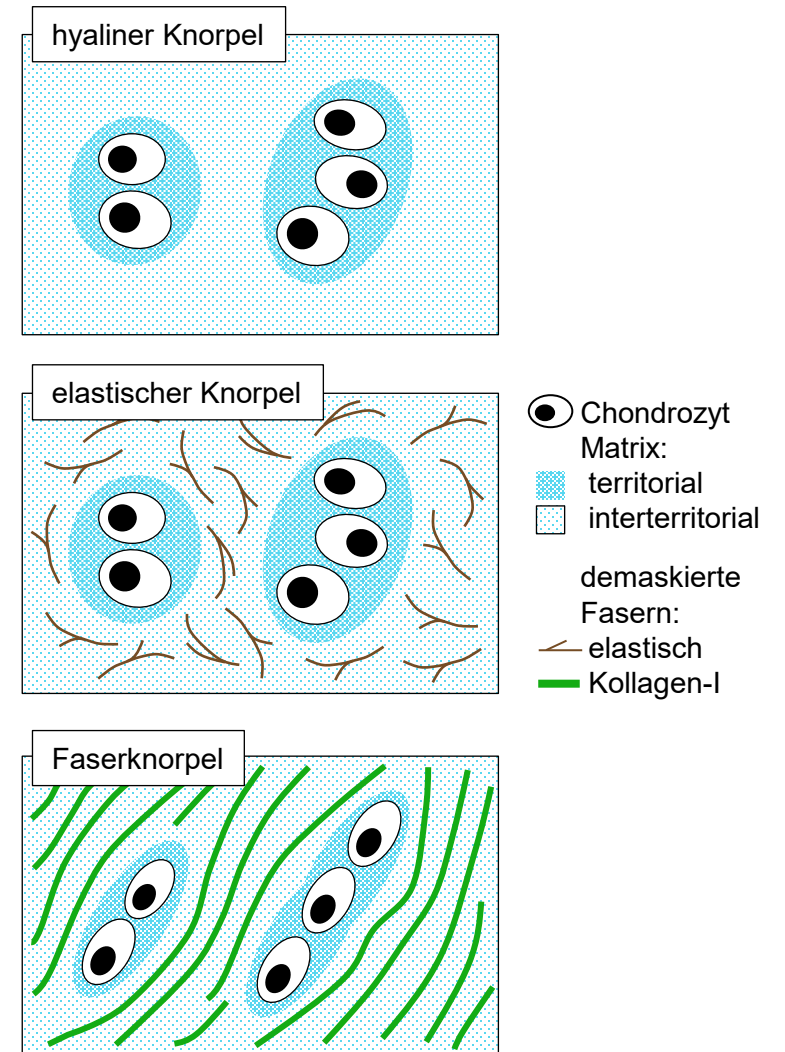
●	Chondrozyt	—	Hyaluronsäure
■	territoriale Matrix	○	Verbindungsprotein
● + ■	Territorium	—	Kernprotein
□	interterritoriale Matrix		Glykosaminoglykane, va:
		—	Chondroitin-Sulfat } Ca. 150
		—	Keratan-Sulfat } Disaccharide
		—	Kollagenfibrille

100x 30x

Aggrecan-Monomer,
bis zu 100 durch Hyaluronsäure
komplexiert

Knorpeltypen

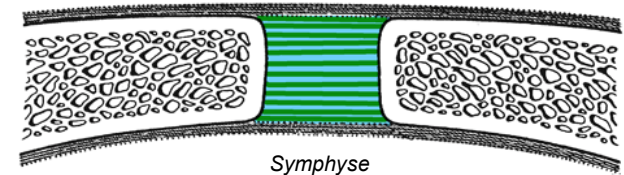
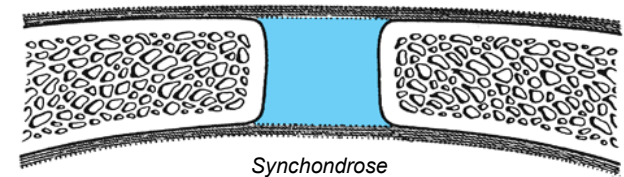
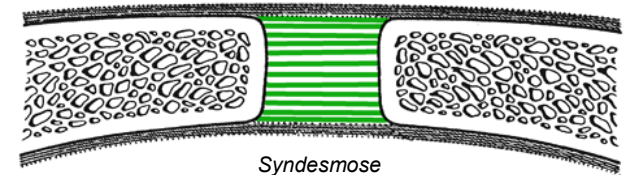
- **Hyaliner Knorpel**
 - chondrale Osteogenese, Gelenknorpel, Rippen, Nase - Kehlkopf - Trachea - grosse & mittlere Bronchien
 - druckelastisch, nicht zugfest, nicht biegeelastisch
- **Elastischer Knorpel**
 - Epiglottis, kleine Bronchien, äusseres Ohr, Ohrtrumpete
 - demaskierte elastische Fasernetze in interterritorialer Matrix
 - zusätzlich Biegeelastizität
- **Faserknorpel**
 - Discus intervertebralis = Zwischenwirbelscheibe, Menisken, Disci articulares = Gelenkscheiben (Sterno-Klavikular-Gelenk, Radio-Karpal-Gelenk, Kiefergelenk), Gelenklippen zur Vergrösserung knöcherner Gelenkpfanne (Hüft- und Schultergelenk)
 - viele dicke demaskierte Kollagenfasern in interterritorialer Matrix
 - Chondrozyten in Gänsemarschformation
 - zusätzlich Zugfestigkeit
- **Keine Blutgefässe im Knorpel**
 - Versorgung durch Diffusion über lange Strecken, langsamer Stoffwechsel
 - Ausnahme: Bildung von Blutgefässen in enchondraler Ossifikationszonen



Gelenke

- Diarthrose
 - echtes Gelenk mit: 1. Gelenkhöhle, 2. Gelenksknorpel, 3. Synovialmembran
 - kann an Arthrose (Gelenksknorpel) und Arthritis (Synovialmembran) erkranken
- Synarthrose (Haft)
 - falsches Gelenk mit Gewebebrücke statt Elemente 1-3
 - Articulatio fibrosa = Bandhaft = Syndesmose
 - Gewebebrücke aus straffem Bindegewebe (Zugfestigkeit):
Malleolengabel, Schädelnähte bei Kindern, Zahnwurzel
 - Articulatio cartilaginea = Knorpelhaft
 - Synchondrose → Gewebebrücke aus hyalinem Knorpel (Druckfestigkeit):
Rippenknorpel, Brustbein, Schädelbasis; Symphyse → Gewebebrücke aus Faserknorpel (druck- & zugfest):
Symphysis pubica, Discus intervertebralis
 - Synostose → knöcherne Verbindung ehemals separater Knochen:
Schädelnähte des Erwachsenen, Beckenknochen, Kreuzbein
- Pathologie
 - pathologische Gelenke: Hemiarthrose (Halbgelenk) durch sekundäre Spaltbildung in degenerierender Symphyse (zB Halswirbelsäule, Symphysis pubica), Pseudoarthrose nach Fraktur (Dislokation, ungenügende Ruhigstellung)
 - Gelenkversteifung: Ankylose nach destruierender Arthritis, Arthrodesse = therapeutische Gelenkversteifung durch Operation

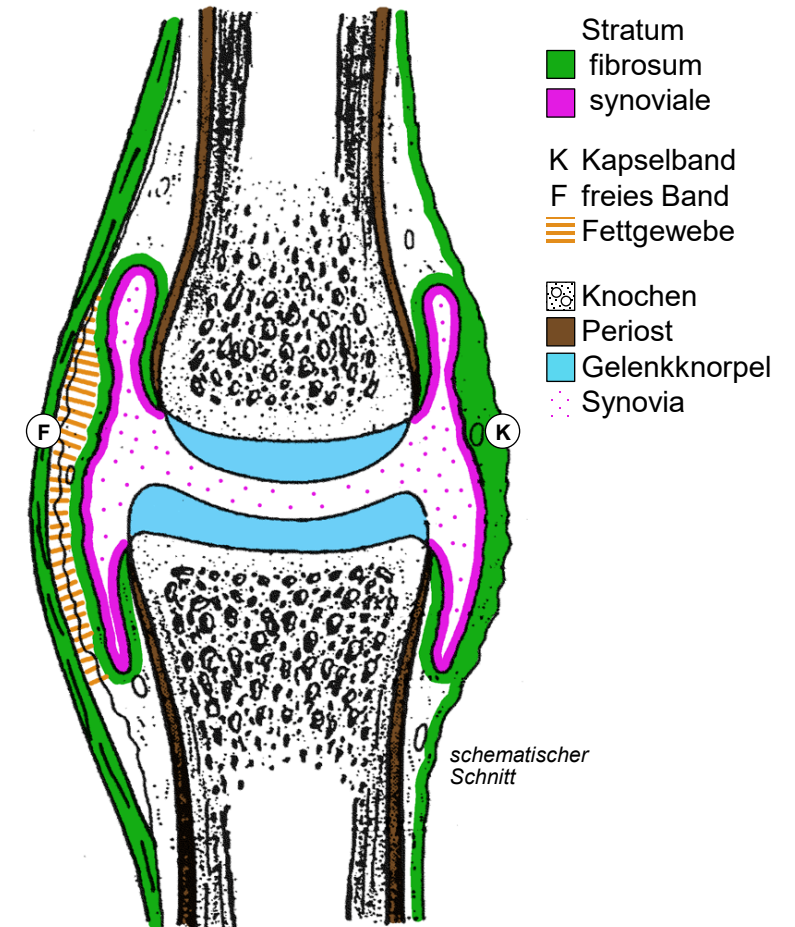
- straffes kollagenes Bindegewebe
- hyaliner Knorpel
- Faserknorpel



Diarthrosen

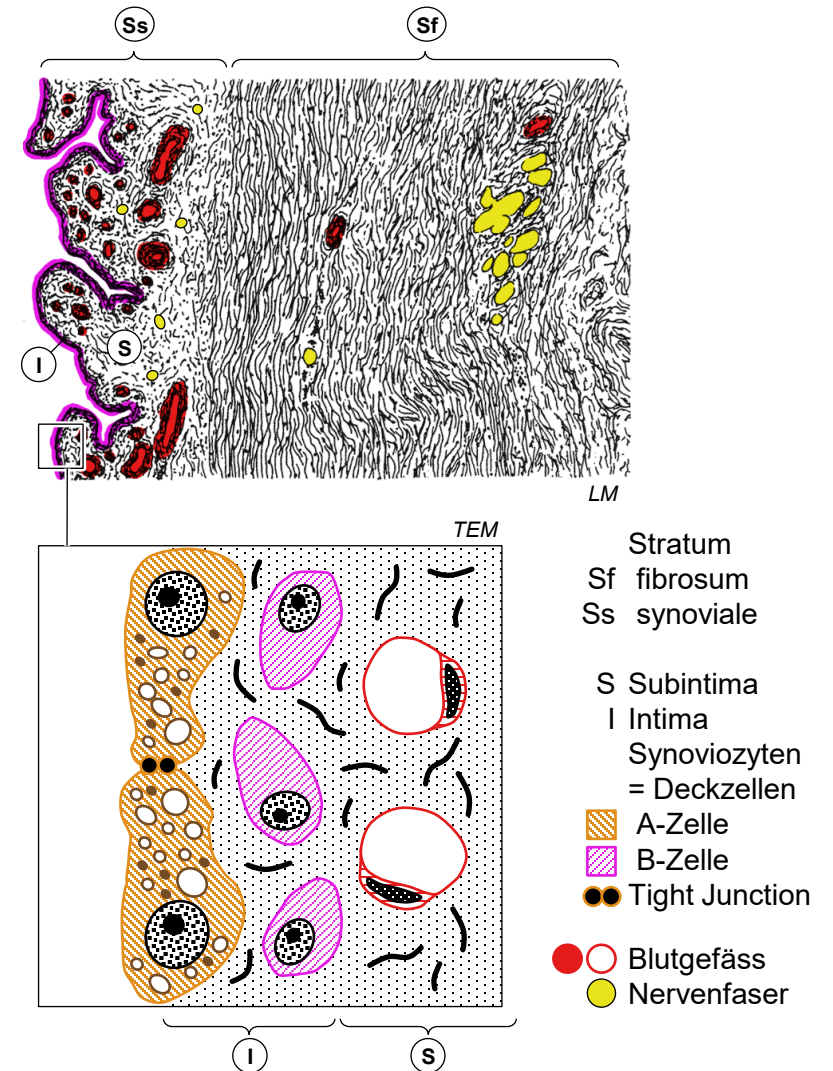
- Gelenkkapsel
 - Stratum fibrosum* (bindegewebige Aussenhaut) stabilisiert mechanisch, Stratum synoviale (Synovialmembran, synoviale Innenhaut) begrenzt mit Gelenkknorpel Gelenkshöhle
- Gelenksicherung und -führung
 - passiv: knöcherner Führung durch Form der Gelenkskörper, Bandführung (freies Band / Kapselband = Verstärkung des Stratum fibrosum)
 - aktiv: Muskelführung (durch Training kompensatorisch verstärkbar)
 - Amphiarthrose: echtes Gelenk, durch maximale passive Führung (va. durch Bänder) kaum beweglich (Bsp: Iliosakralgelenk, Fusswurzel)
- Pathologie
 - Arthrose: Degeneration des Gelenkknorpels, entzündliche Schübe, sekundär Knochendestruktion, kompensatorisch Bildung von Osteophyten
 - Arthritis: Gelenkentzündung ausgehend von Synovialmembran: rheumatisch (autoimmun), infektiös (eitrig, Borreliose nach Zeckenbiss) → Gelenkserguss, ev. Gelenksdestruktion bis zu Ankylose
 - Luxation = Auskugelung: traumatisch (va Schulter), spontan bei angeboren oder posttraumatisch schwacher Gelenksicherung
 - Distorsion = Verstauchung, Überdehnung oder Ruptur von Kapsel und Bandapparat, Ruptur der Kapsel → Blutung in Gelenk.

* teilweise auch bei Synarthrosen vorhanden



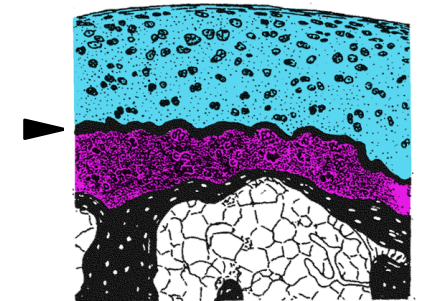
Gelenkkapsel

- **Stratum fibrosum**
 - gefässarmes straffes kollagenes Bindegewebe
- **Stratum synoviale = Synovialmembran**
 - Subintima: gefässreiches feinfibrilläres Bindegewebe, Falten und Zotten → Oberflächenvergrößerung, kann Polster aus Fettgewebe enthalten → Füllmaterial, Formanpassung
 - Intima: 2 Lagen bindegewebiger Deckzellen = Synoviozyten = Synovialzellen, ohne Basallamina in extrazelluläre Matrix eingebettet:
 - ▨ A-Zellen = synoviale residente Makrophagen → Reinigung der Synovia, → Barriere mit Tight Junctions!, Adhärenskontakten, Desmosomen
 - ▨ B-Zellen = synoviale Fibroblasten mit viel rER, bilden Hyaluronsäure
- **Innervation**
 - Mechanorezeptoren: Dehnung, Vibration
 - Nozizeptoren: hohe Schmerzempfindlichkeit
- **Synovia**
 - = Gelenkschmiere: 1-3 ml, klar, bernsteinfarben, viskös
 - Plasmadialysat + Hyaluronsäure aus B-Zellen
 - Ernährung Gelenknorpel und mechanische Funktion: hocheffizientes Schmiermittel, Stossdämpfer

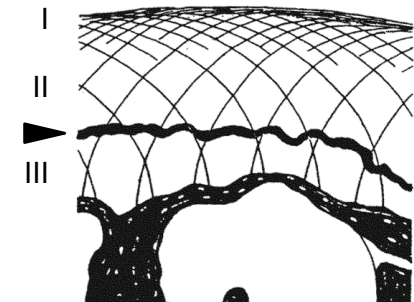


Gelenksknorpel und Hilfseinrichtungen

- Schichtung des Gelenksknorpels
 - hyaliner Knorpel ohne Perichondrium
 - basophile Grenzlinie («tidemark»)
 - mineralisierte Knorpelschicht: abgestufte Änderung der Materialeigenschaften
 - gesamte Dicke 1-4 mm, Patella (Kniescheibe) 8 mm
 - keine Blutgefäße: Ernährung durch Synovia (Gelenk muss bewegt werden!)
- Mechanik
 - druckelastisch verformbarer Stossdämpfer, Druckverteilung, extrem glatte Oberfläche
 - bogenförmiger Verlauf der bis 50-100 nm dicken (statt 15-20 nm) Fibrillen, tangentielle Fibrillen bevorzugt trajektorieell entlang Zugkraftlinien ausgerichtet → Knorpelspaltlinien
 - Verankerung: Knorpel mit Knochen verzahnt, periphere tangentielle Fibrillen strahlen in Synovialmembran ein, radiäre in den Knochen (Kortikalis der Epiphyse)
- Hilfseinrichtungen
 - Gelenkklippe (Labrum) → Stabilisierung durch Vergrößerung der Pfanne bei Kugelgelenken: Hüftgelenk, Schultergelenk (+25% Pfannenfläche)
 - Gelenkscheiben (Disci articulares) → Unterteilung der Gelenkhöhle, Ausgleich von Inkongruenzen, grössere Beweglichkeit: Sternoklavikulargelenk, Kiefergelenk, Radiokarpalgelenk, Kniegelenk: Meniskus (unvollständige Scheibe)
 - aus Faserknorpel, aussen mit Stratum fibrosum verwachsen, begrenzen innen als Fortsetzung des Gelenkknorpels statt Synovialmembran Gelenkhöhle



- hyaliner Knorpel
- ▶ Grenzlinie
- mineralisierter Knorpel
- Knochen



- I Tangentialzone
- II Übergangszone
- III Radiärzone