

---

# 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 des menschlichen Bewegungsapparates

Di 26.02.2019

# Mikroanatomie des Knochengewebes

- Bestandteile

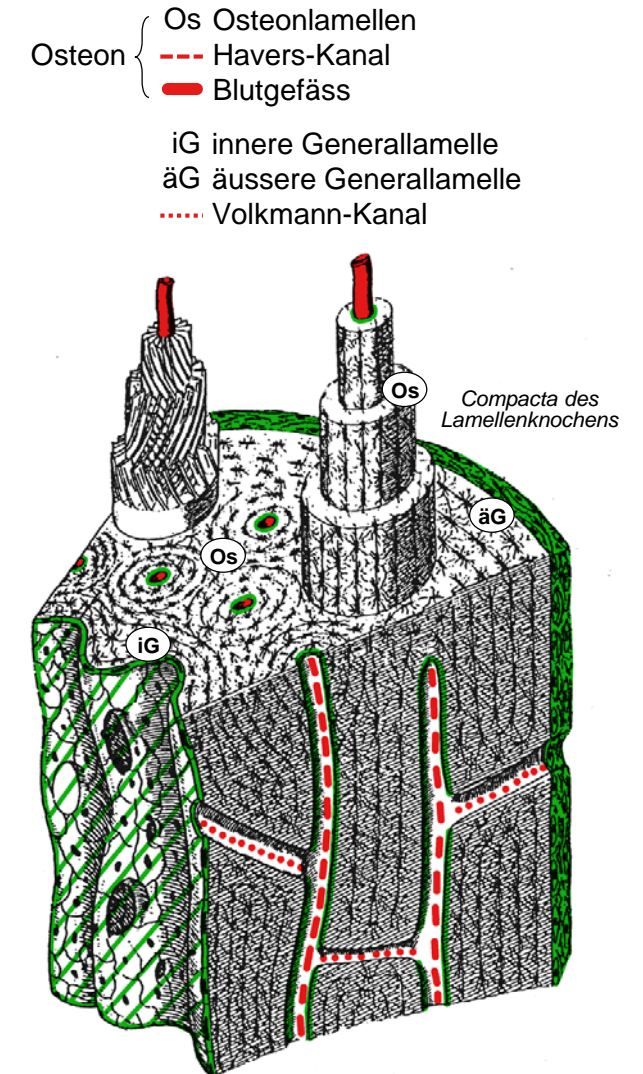
- 99% extrazelluläre Matrix: 10% Wasser, 70% anorganische Matrix (va. Hydroxyapatit), 19% organische Matrix: kollagene Fibrillen (va Typ I), Proteoglykane, Adhäsionsproteine
- 1% Zellen. Osteozyten eingemauert in Lakunen, Fortsätze in Kanälchen, Gap Junctions → Netzwerk. Übrige Zellen = Minderheit, an Oberfläche bzw im Periost und Endost.

- Geflechtknochen

- Kollagenfibrillen in unregelmässiger Orientierung verflochten, geringer Mineralgehalt, Osteozyten zufällig verteilt, geringe Festigkeit
- Schnelle Bildung: primäres Produkt von Osteogenese und Frakturheilung (Kallus), nur Pars petrosa des Os temporale bleibt teilweise als Geflechtknochen bestehen

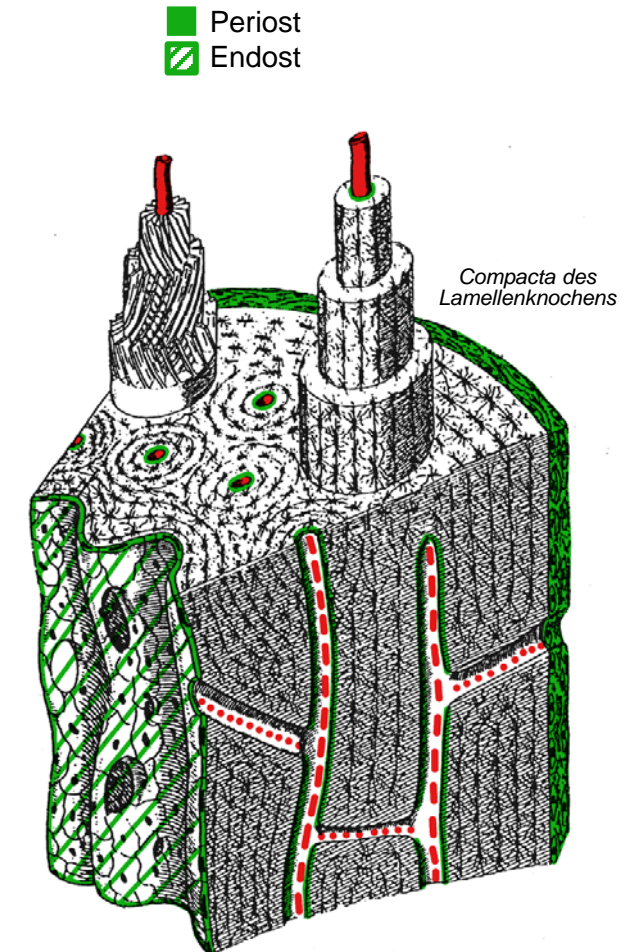
- Lamellenknochen

- Umbau («bone remodeling») Geflechtknochen → Lamellenknochen
- 3-8µm dicke Lamellen, Osteozyten in Grenzflächen, Fortsätze in Lamellen; Kollagenfibrillen parallel, Richtung wechselt von Lamelle zu Lamelle
- längliche hexagonale Hydroxyapatitkristalle parallel zu und in Fibrillen, Fibrillen → Zugfestigkeit, Kristalle → Druckfestigkeit, Verbund → Biegefestigkeit
- Compacta: zylindrische Osteone mit 5-20 Osteonlamellen konzentrisch um Havers-Kanal mit Blutgefässen, innere und äussere Generallamellen; Volkmann-Kanäle quer zu Lamellen: führen Blutgefässe zu Havers-Kanal
- Spongiosa: flache Lamellen parallel zu Bälkchen-Oberfläche, keine Kanäle



# Innere und äussere Oberfläche des Knochengewebes

- Periost = Knochenhaut
  - äussere Knochenoberfläche, ausser Sehnen/Bandansätze und wo Gelenkknorpel Knochen bedeckt
  - Faserschicht aussen: kollagenes Bindegewebe, Blutgefässe, reichlich Nervenfasern (Schmerzempfindlichkeit)
  - osteogenetische Schicht innen (Kambium): kontinuierliche Zell-Lage aus 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 mineralisierte Kollagenfibrillen, Zellschicht ähnlich osteogenetische Schicht des Periosts: Endost-Zellen = «bone lining cells»
- Umbauzonen
  - Kein Endost, Endost-Zellen differenzieren sich zu Osteoklasten (Abbauzonen) oder Osteoblasten (Aufbauzonen)



# Knochenumbau

- Zelluläre Grundlage und Steuerung

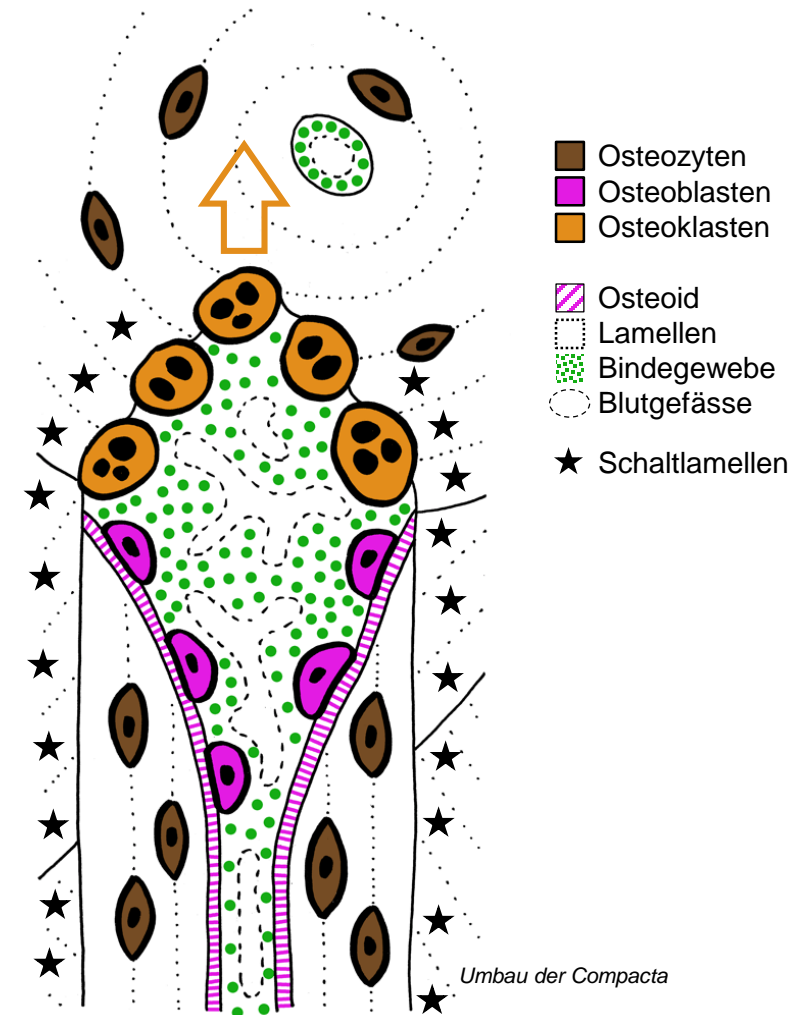
- Abbau durch Osteoklasten mittels  $\text{Na}^+\text{H}^+$  Exchanger NHA2
- Aufbau (Ossifikation): skelettale Stammzellen → Osteoprogenitorzellen → Osteoblasten → Osteozyten, bei Umbau direkt Lamellenknochen gebildet
- Osteozyten haben Mechanosensoren und Hormonrezeptoren: reduzieren Knochenmasse via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

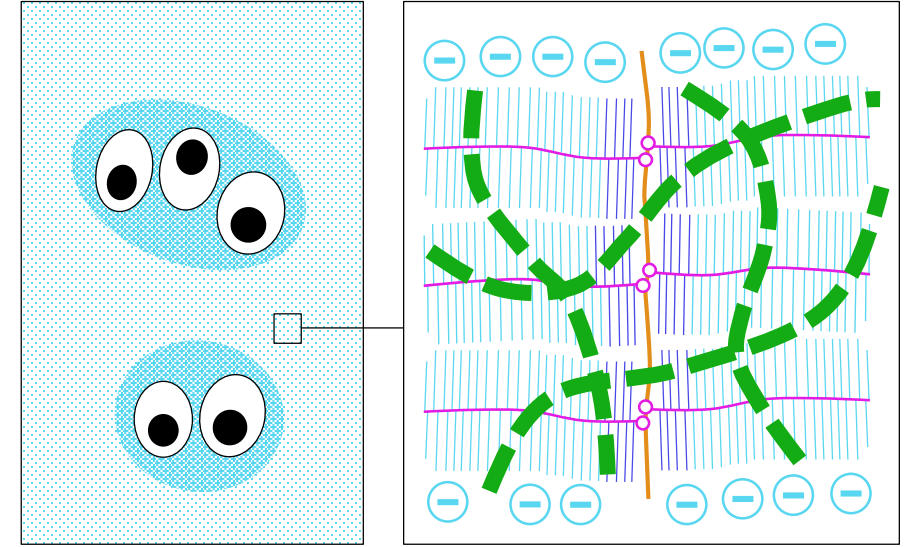
- Funktion und Störungen

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

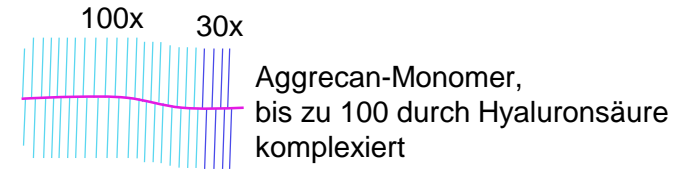


# Knorpelgewebe

- Chondrozyten
  - oval, isoliert ohne lange Fortsätze, unterhalten Matrix
  - nur im 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) maskiert durch PG
  - Fibrillen → territorial dichte Netze, interterritorial lockerer und senkrecht zu freier Oberfläche
  - Elektrostatische Abstossung der polyanionischen PG, osmotischer Druck durch gefangene Kationen → H<sub>2</sub>O-Speicherung (80 Volumen%), Anspannung der Fibrillen. H<sub>2</sub>O entweicht bei Kompression → Druckelastizität
- Perichondrium = Knorpelhaut
  - Faserschicht: Bindegewebe
  - chondrogenetische Schicht (beim Erwachsenen ruhend): Stammzellen, Chondroprogenitorzellen, Chondroblasten
  - fehlt beim Gelenkknorpel



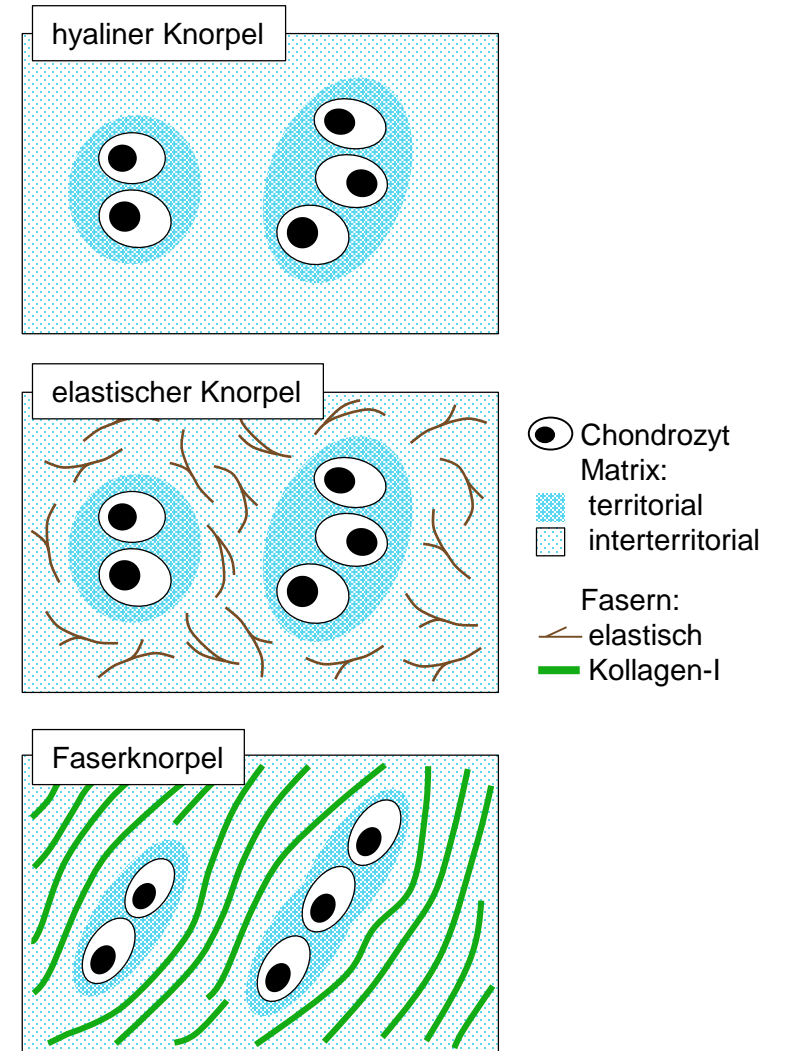
- Chondrozyt
- territoriale Matrix
- interterritoriale Matrix
- Hyaluronsäure
- Verbindungsprotein
- Kernprotein
- Chondroitin-Sulfat } Ca. 150
- Keratan-Sulfat } Disaccharide
- Kollagenfibrille (15-100 nm dick)





# 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, Menisken, Disci articulares (Sterno-Klavikular-Gelenk, Radio-Karpal-Gelenk, Kiefergelenk)
  - viele demaskierte Kollagenfasern in interterritorialer Matrix
  - Chondrozyten in Gänsemarschformation
  - zusätzlich Zugfestigkeit
- **Keine Blutgefässe im Knorpel**
  - Versorgung durch Diffusion über lange Strecken
  - langsamer Stoffwechsel (bradytrophes Gewebe)



# Gelenke

- Diarthrose

- echtes Gelenk mit:
  1. Gelenkspalt, 2. Gelenksknorpel, 3. Synovialmembran
- kann an Arthrose und Arthritis erkranken

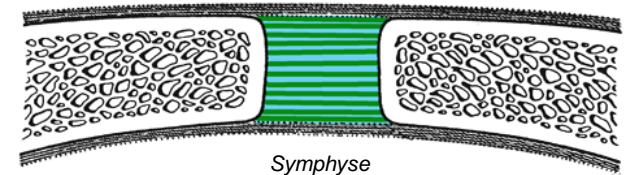
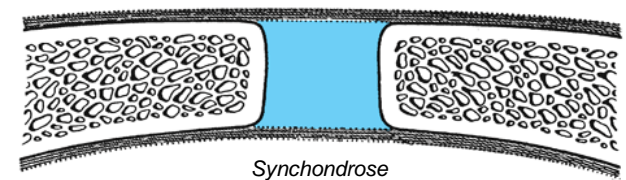
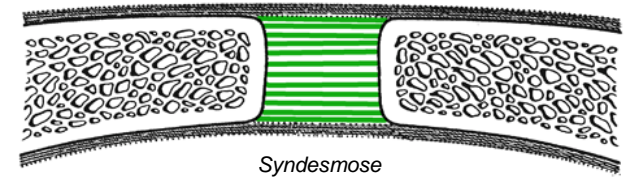
- Synarthrose (Haft)

- falsches Gelenk mit Gewebebrücke statt Elemente 1-3
- Art. fibrosa = Bandhaft = Syndesmose  
→ Gewebebrücke aus straffem Bindegewebe (Zug):  
Malleolengabel, Schädelnähte bei Jugendlichen, Zahnwurzel
- Art. cartilaginea = Knorpelhaft  
Synchondrose → Gewebebrücke aus hyalinem Knorpel (Druck):  
Rippen, Sternum, Schädelbasis, Wachstumsfugen; Symphyse → Gewebebrücke aus Faserknorpel (Druck & Zug): Symphysis pubica, Discus intervertebralis
- Synostose → knöcherner Verbindung ehemals separater Knochen:  
Schädelnähte des Erwachsenen, Beckenknochen, Kreuzbein

- Pathologie

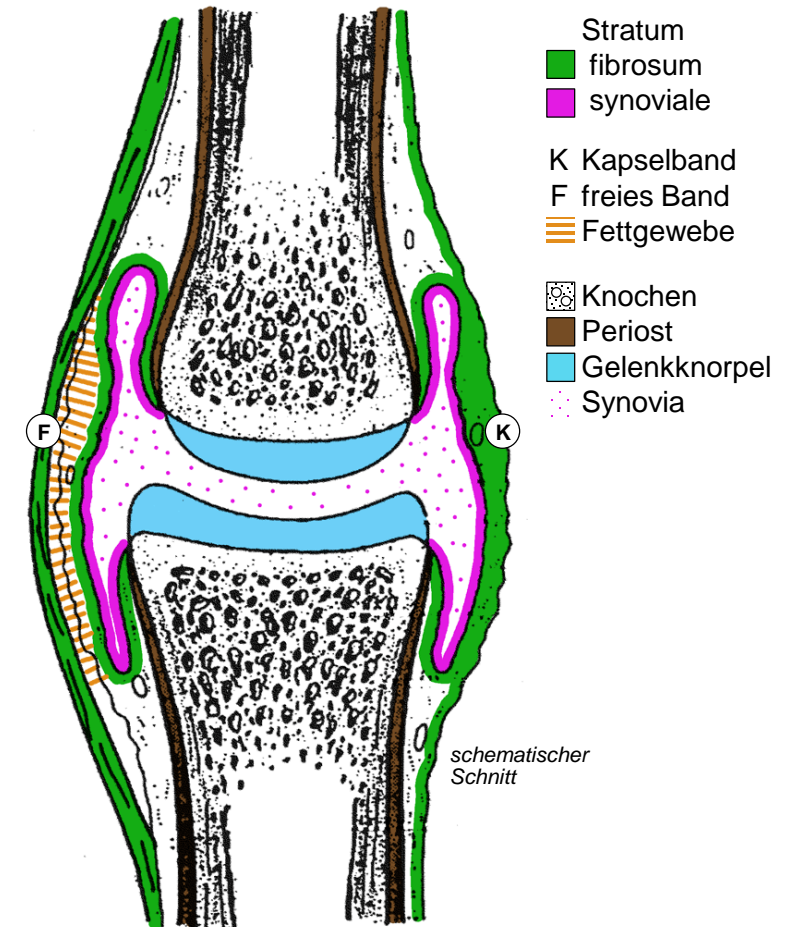
- pathologische Gelenke: Hemiarthrose durch sekundäre Spaltbildung in Symphyse (zB Halswirbelsäule), Pseudoarthrose nach Fraktur
- Gelenkversteifung: Ankylose nach destruierender Arthritis, therapeutische Gelenkversteifung durch Chirurg: Arthrodesese

- straffes kollagenes Bindegewebe
- hyaliner Knorpel
- Faserknorpel



# Diarthrosen

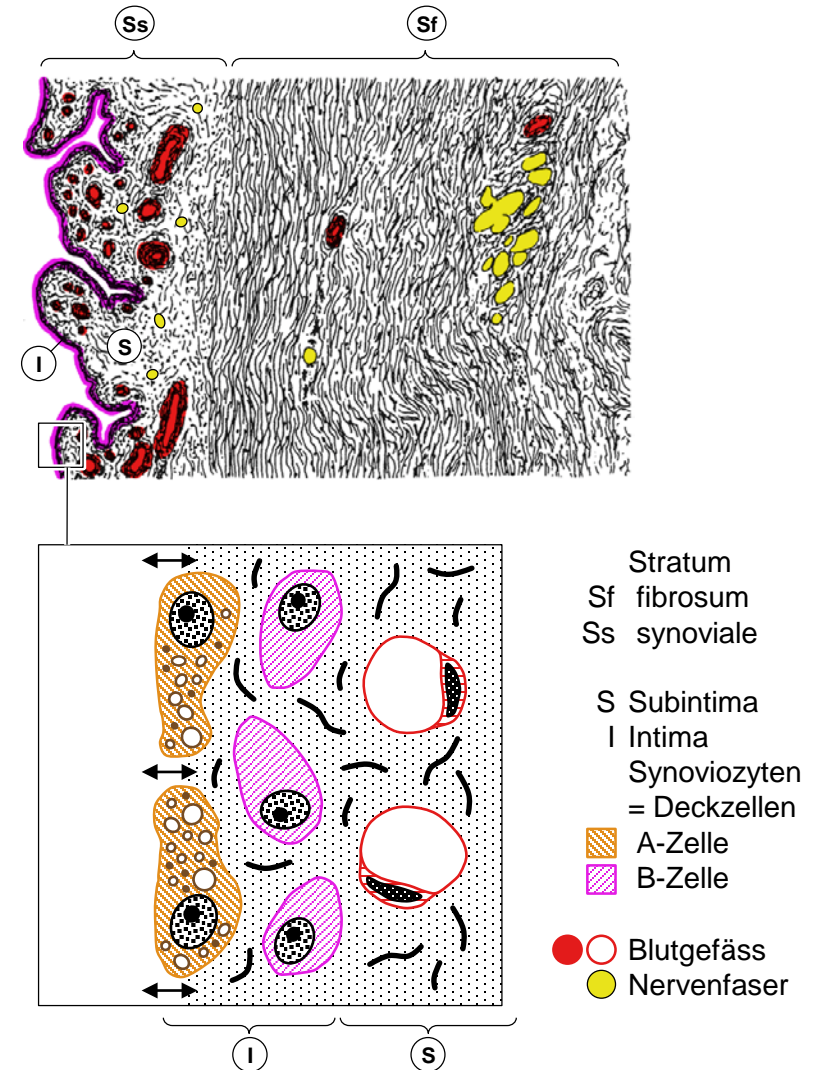
- Gelenkkapsel
  - Stratum fibrosum aussen stabilisiert mechanisch, Stratum synoviale innen begrenzt mit Gelenksknorpel Gelenkshöhle
- Gelenksicherung / -Führung
  - passiv: knöcherner Führung, Bandführung (freies Band, Kapselband = Verstärkung des Stratum fibrosum)
  - aktiv: Muskelführung (durch Training kompensatorisch verstärkbar)
  - Amphiarthrose: echtes Gelenk, durch maximale passive Führung kaum beweglich (Bsp: Iliosakralgelenk, Fusswurzel)
- Pathologie
  - Arthrose: Degeneration des Gelenkknorpels, entzündliche Schübe, sekundär auch Knochendestruktion, 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





# Gelenkkapsel

- **Stratum fibrosum**
  - gefässarmes straffes kollagenes Bindegewebe
- **Stratum synoviale = Synovialmembran**
  - Subintima: gefässreiches feinfibrilläres Bindegewebe, Falten und Zotten → Oberflächenvergrößerung
  - ev. Polster aus Fettgewebe → Anpassung an Form der Gelenkskörper
  - Intima: 1-3 lockere Lagen nicht-epitheliale Deckzellen = Synoviozyten = Synovialzellen, keine Basallamina:
    - A-Zellen = Makrophagen → Reinigung der Synovia
    - B-Zellen = Fibroblasten mit viel rER → Hyaluronsäure
- **Innervation**
  - Mechano- (Dehnung, Vibration) und Nozizeptoren
- **Synovia**
  - Gelenkschmiere: 1-3 ml, klar, bernsteinfarben, viskös
  - Fortsetzung interstitieller Flüssigkeit plus Hyaluronsäure produziert durch B-Zellen
  - mechanische (hocheffizientes Schmiermittel, Stossdämpfer) Funktion und Ernährung Gelenkknorpel



# Gelenkknorpel und Hilfseinrichtungen

- Schichtung

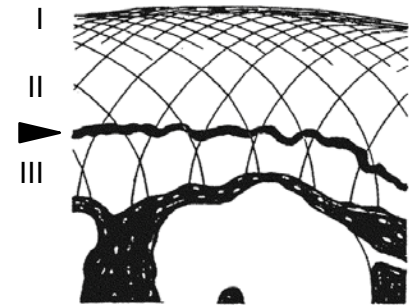
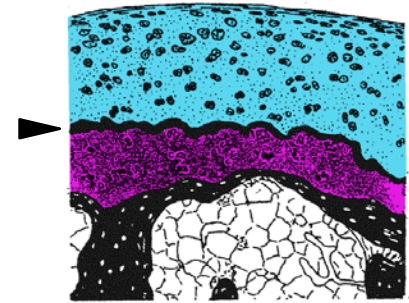
- hyaliner Knorpel ohne Perichondrium
- basophile Grenzlinie («tidemark»)
- mineralisierte Knorpelschicht: abgestufte Änderung der Materialeigenschaften
- gesamte Dicke 1-4 mm, Patella (Kniescheibe) 8 mm
- keine Blutgefäße: Ernährung durch Synovia (und über Knochen)

- Mechanik

- 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, mit Stratum fibrosum verwachsen, begrenzen innen als Fortsetzung des Gelenkknorpels statt Synovialmembran Gelenkhöhle



- I Tangentialzone
- II Übergangszone
- III Radiärzone
- hyaliner Knorpel
- ▲ Grenzlinie
- mineralisierter Knorpel
- Knochen