

Die Natur als Ingenieur: Formbildung von Knochen und Bäumen

Wolfram Liebermeister

Institut für Biochemie
Charité – Universitätsmedizin Berlin

Die Natur als Ingenieur: Formbildung von Knochen und Bäumen

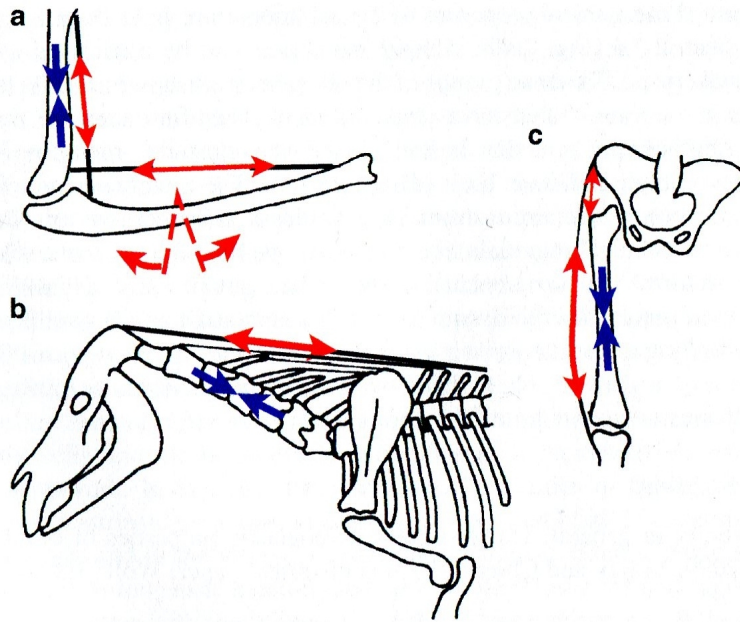


Bild: Glaser, Biophysics



Bild: www.freephoto.com

Die Natur als Ingenieur: Formbildung von Knochen und Bäumen

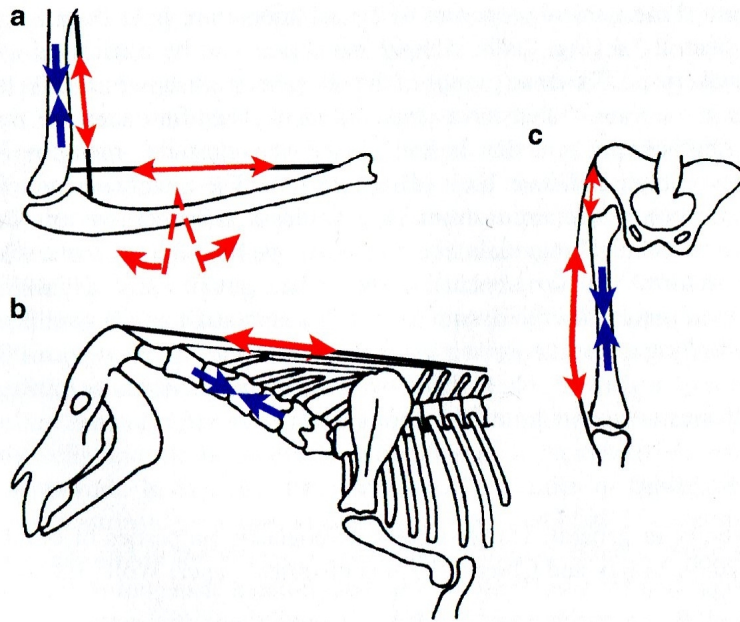


Bild: Glaser, Biophysics

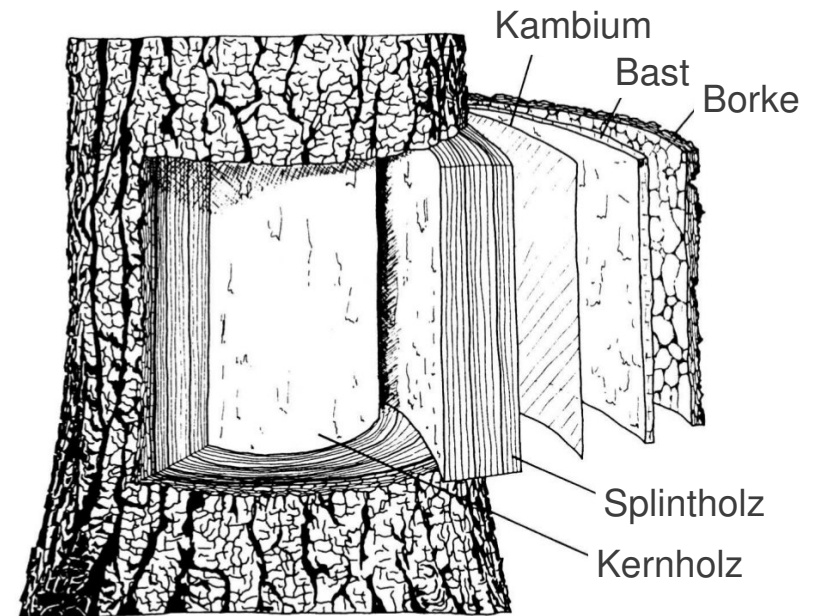
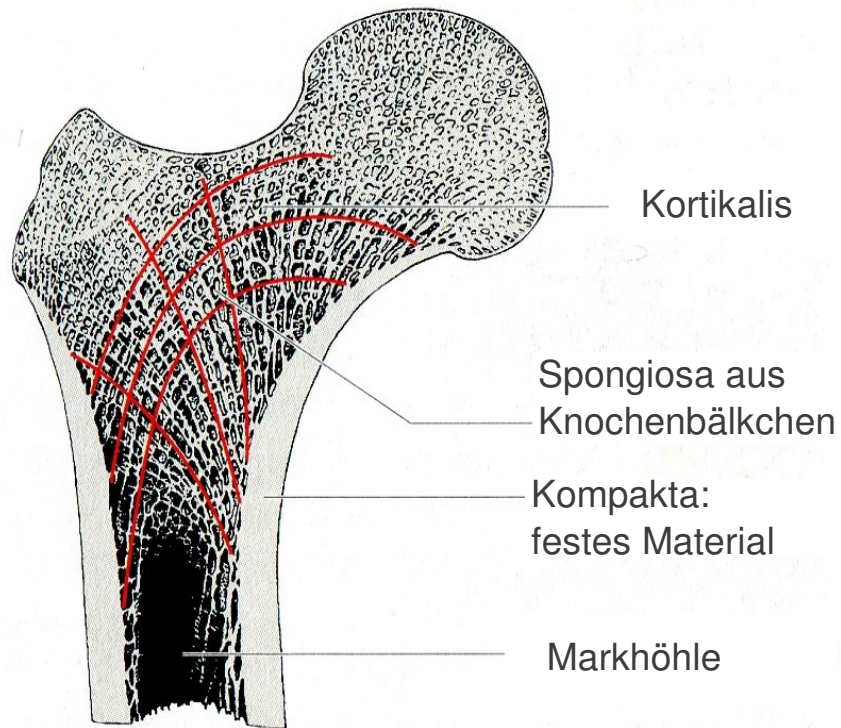


Bild: www.freepoto.com

1. Wie sind Knochen und Holz aufgebaut und wie wachsen sie?
2. Wie lassen sich mechanische Belastungen beschreiben?
3. Wie passen sich Knochen und Bäume an äußere Belastungen an?
4. Wie lässt sich adaptives Wachstum modellieren?
5. Wie passen sich Knochenbälkchen an Belastungen an?

Wie sind Knochen und Holz aufgebaut
und wie wachsen sie?

Die Grobstruktur von Knochen und Holz

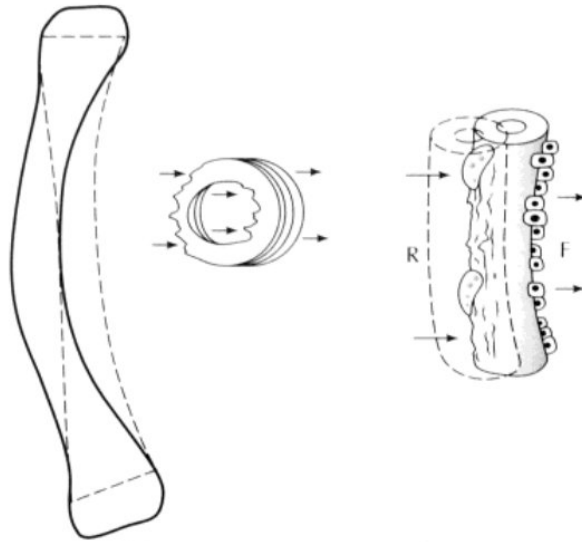


Knochen werden aufgebaut, remodelliert und umgeformt

Aufbau



Remodellierung

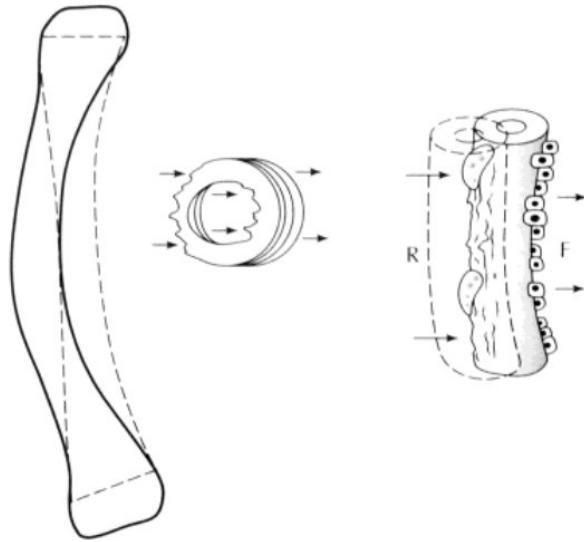


Knochen werden aufgebaut, remodelliert und umgeformt

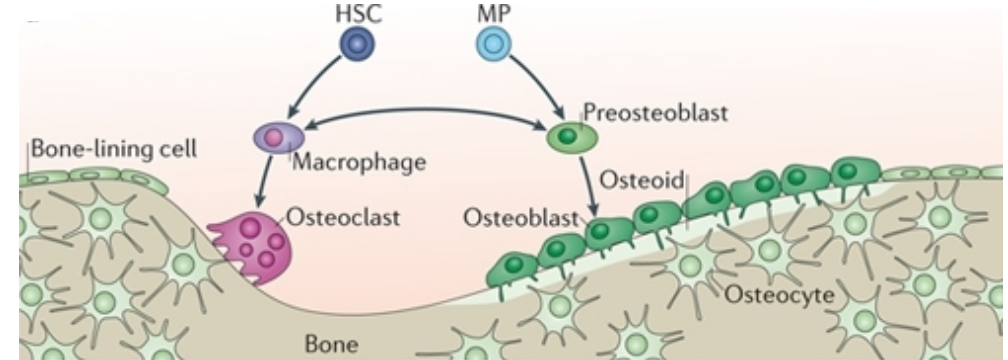
Aufbau



Remodellierung



Basic multicellular unit (Frost 1963)
aus Osteoklasten und Osteoblasten

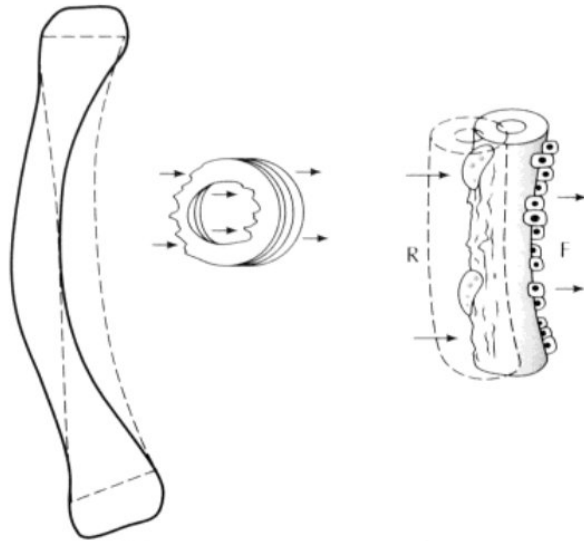


Knochen werden aufgebaut, remodelliert und umgeformt

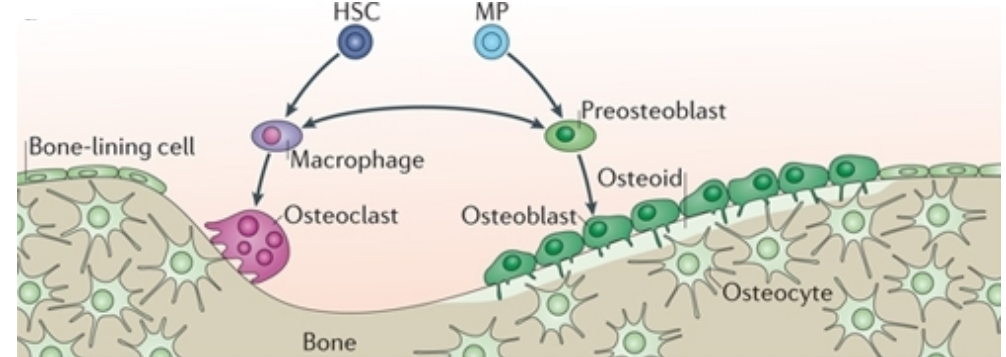
Aufbau



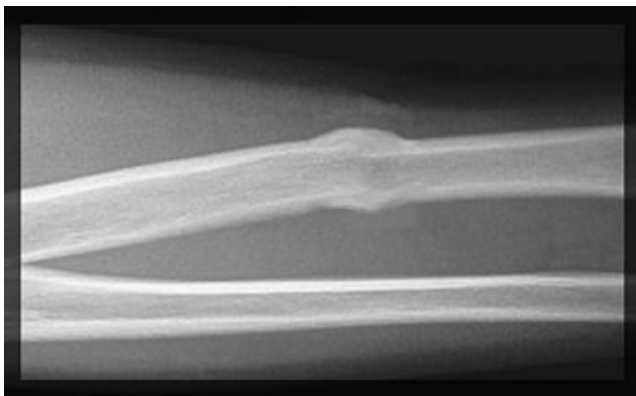
Remodellierung



Basic multicellular unit (Frost 1963)
aus Osteoklasten und Osteoblasten



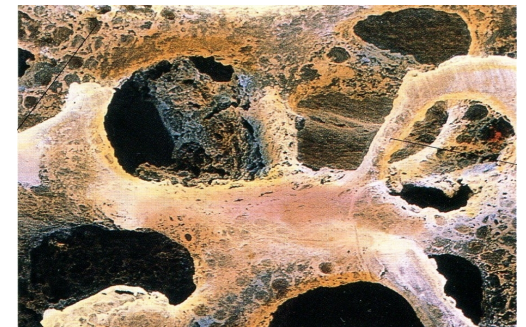
Kallus nach Knochenbruch



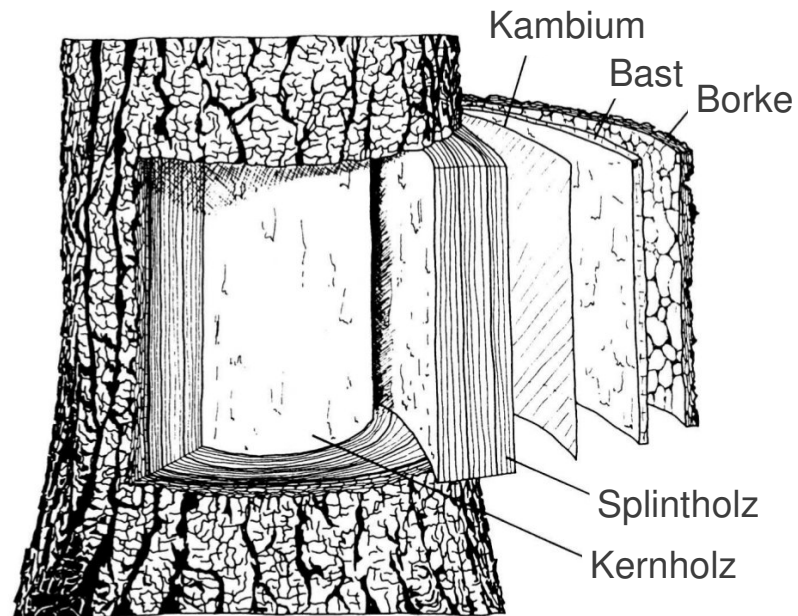
Knochenbälkchen



Schädigung bei Osteoporose



Baumstämme entstehen durch Wachstum und Verholzung

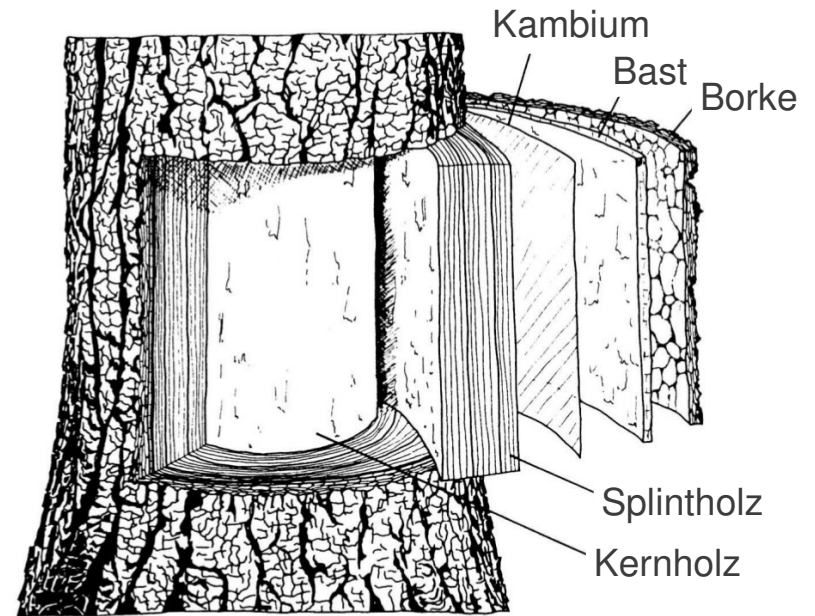
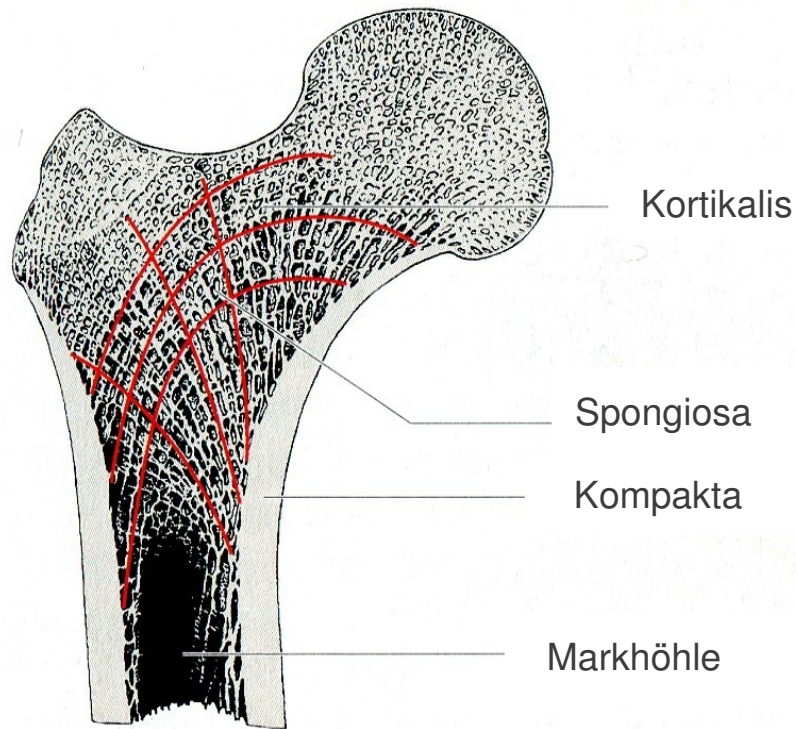


Baumkrebs



Bild: Böhlmann (2009)

Die Materialien Knochen und Holz im Vergleich



Knochen

Von Osteoblasten aufgebaute Matrix
(Kollagen und Apatitkristalle)

Struktur: Kompakt oder Netzwerk

Resorption durch lebende Zellen

Remodellierung der Form

206 Knochen beim Erwachsenen

Holz

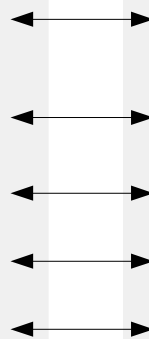
Zellwandgerüste toter Zellen:
(Zellulose und Lignin)

Strukturiert durch Gefäße und Holzstrahlen

Umwandlung in Kernholz, kein Abbau

Formänderung durch Wachstum

Verzweigungen je nach Größe



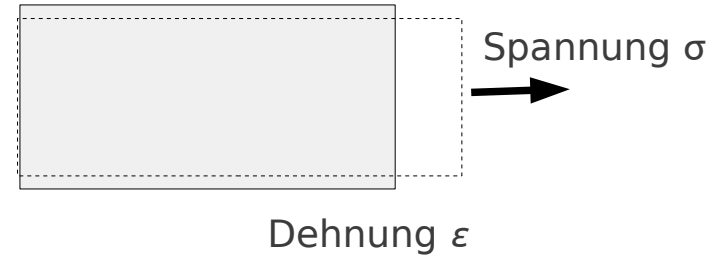
Wie lassen sich mechanische
Belastungen beschreiben?

Äußere Kräfte führen zu Spannung und Dehnung

Energieminimierung → Kräftegleichgewicht

Spannung σ : Kraft pro Fläche

Dehnung: relative Längenänderung $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$



Hookesches Federgesetz für kleine Dehnungen

$$\sigma = E \varepsilon$$

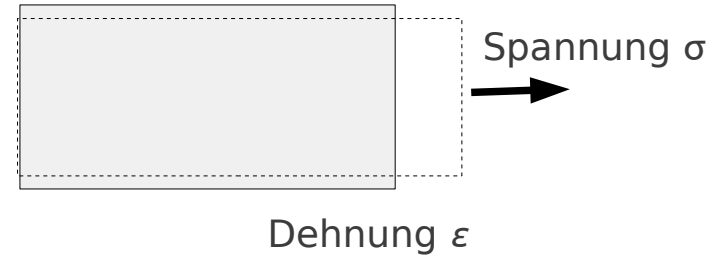
Spannung Elastizitätsmodul Dehnung

Äußere Kräfte führen zu Spannung und Dehnung

Energieminimierung → Kräftegleichgewicht

Spannung σ : Kraft pro Fläche

Dehnung: relative Längenänderung $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$



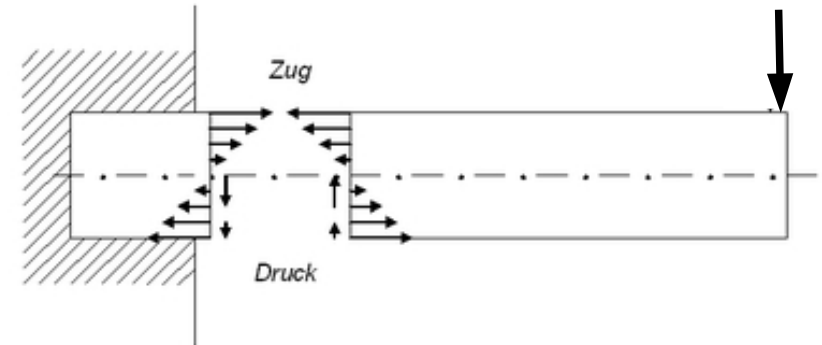
Hookesches Federgesetz für kleine Dehnungen

$$\sigma = E \varepsilon$$

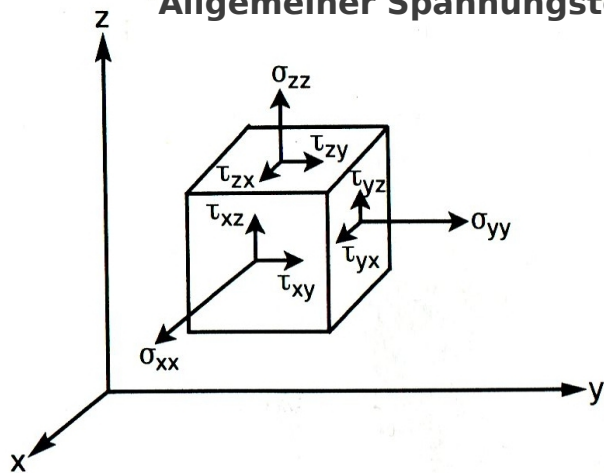
Spannung

Elastizitätsmodul

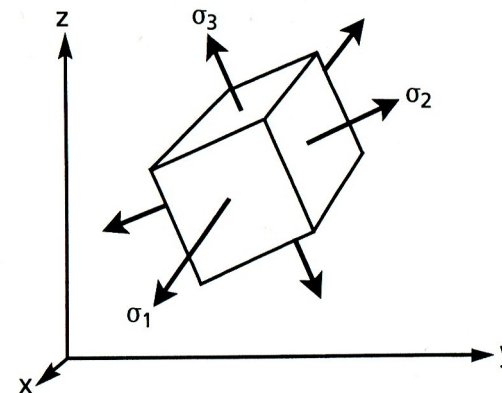
Dehnung



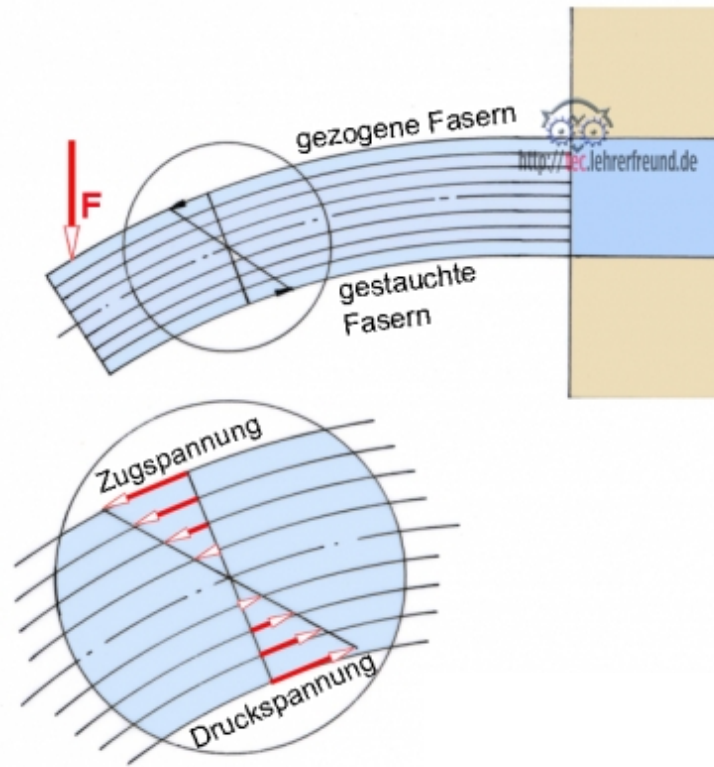
Allgemeiner Spannungstensor



Hauptspannungen



Im Leichtbau werden wenig belastete Teile weggelassen



Oberschenkelknochen (Schwan)

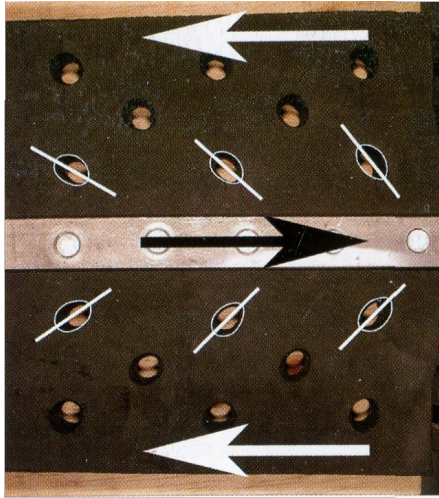


Strategie für Leichtbau:

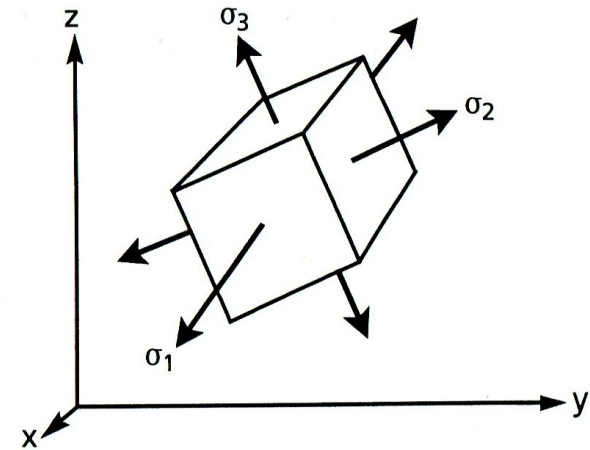
Setze Material ein, wo im "Designvorschlag" hohe Spannungen auftreten würden

Innere Spannungen lassen sich durch Trajektorien beschreiben

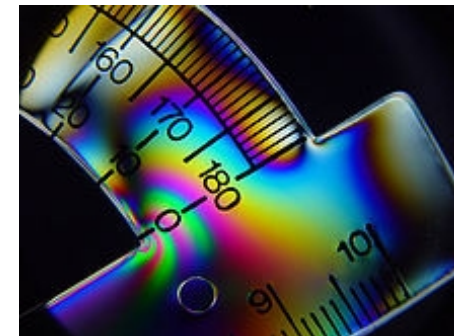
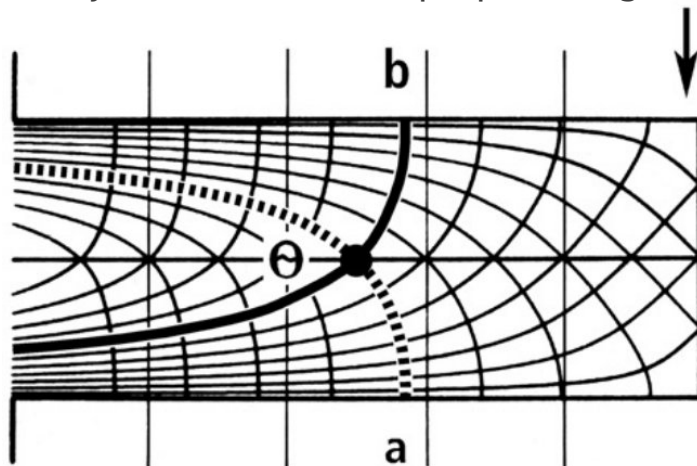
“Didaktische Löcher” in Gummi



Spannungstensor

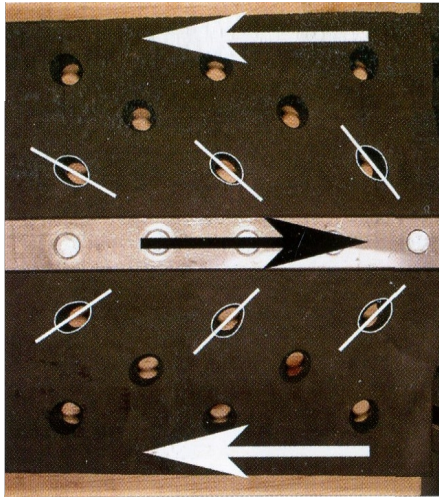


Trajektorien der Hauptspannungen



Innere Spannungen lassen sich durch Trajektorien beschreiben

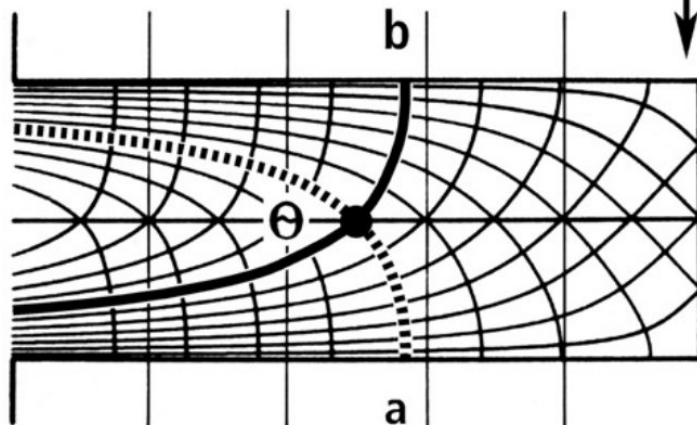
“Didaktische Löcher” in Gummi



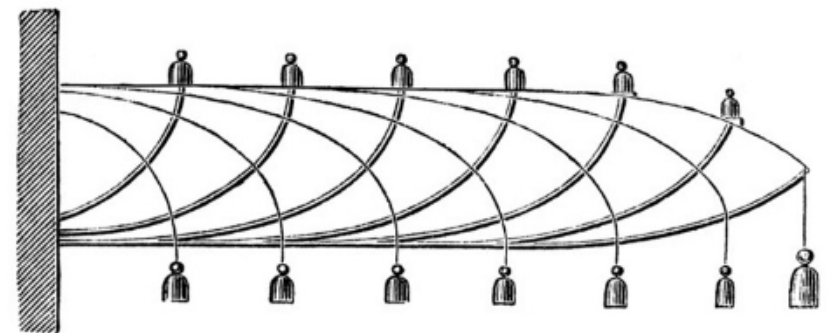
Hauptspannungen im 45-Grad-Winkel



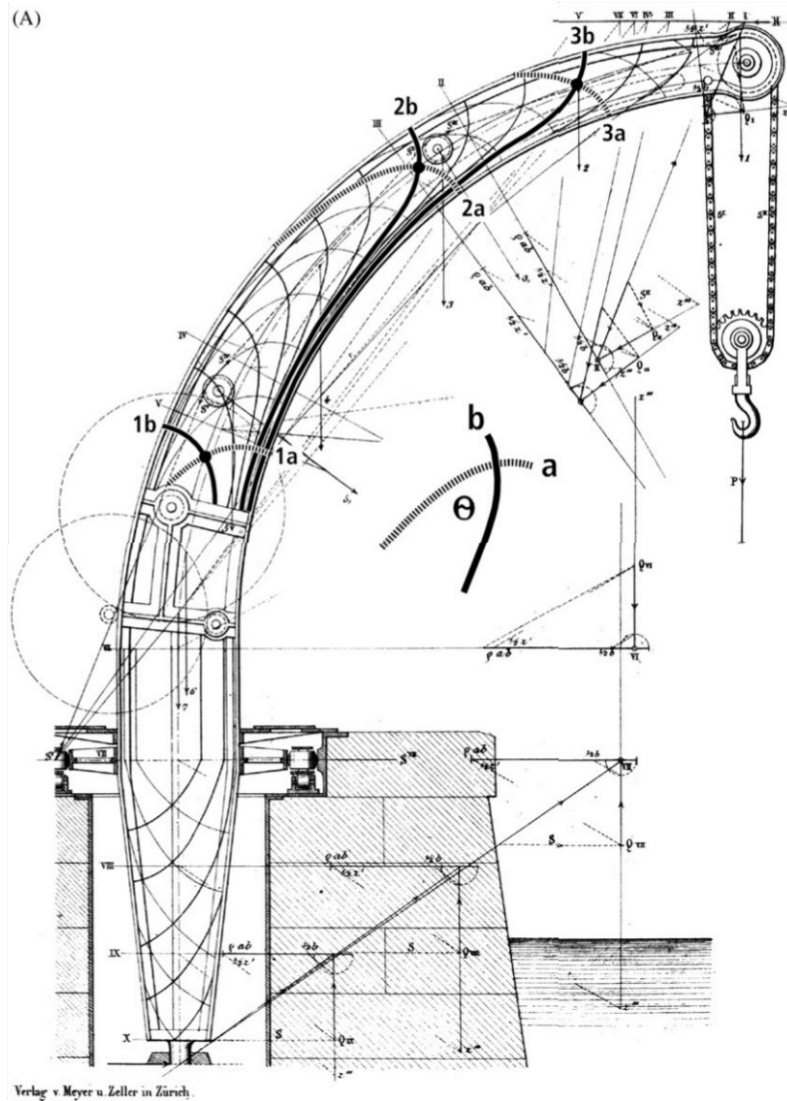
Trajektorien der Hauptspannungen



Ersatzkonstruktion

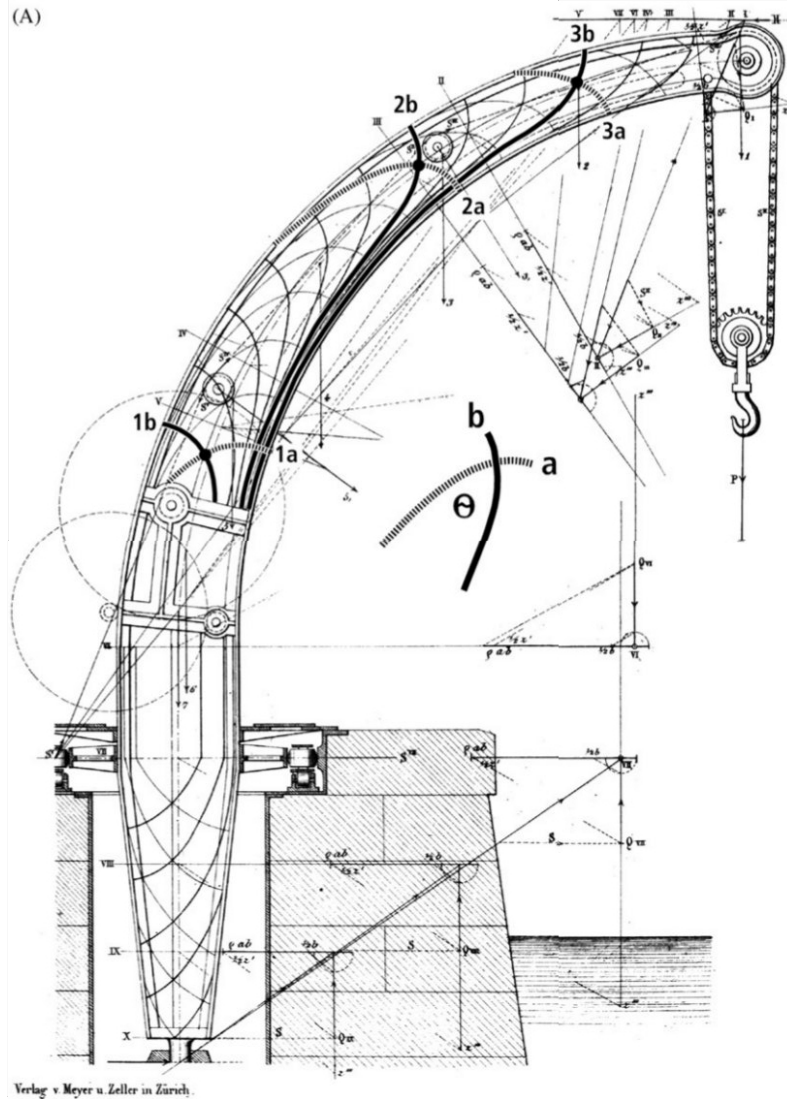


Trajektorienhypothese von Culman und v. Meyer: Knochenbälkchen verlaufen ähnlich wie Spannungstrajektorien

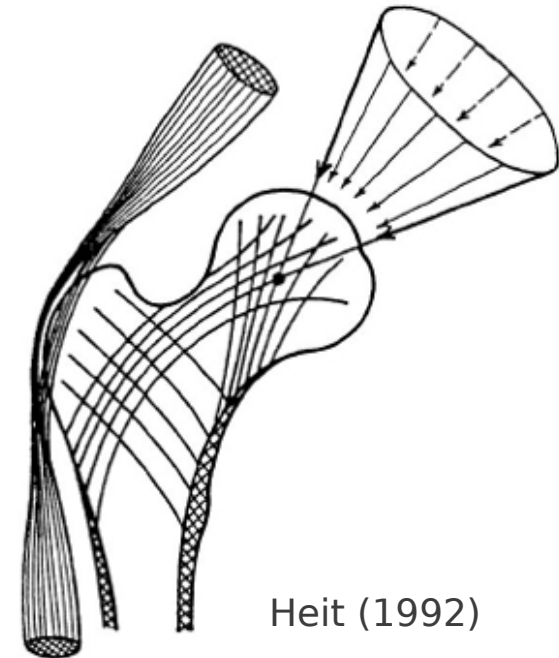


Culman (1866)

Trajektorienhypothese von Culman und v. Meyer: Knochenbälkchen verlaufen ähnlich wie Spannungstrajektorien



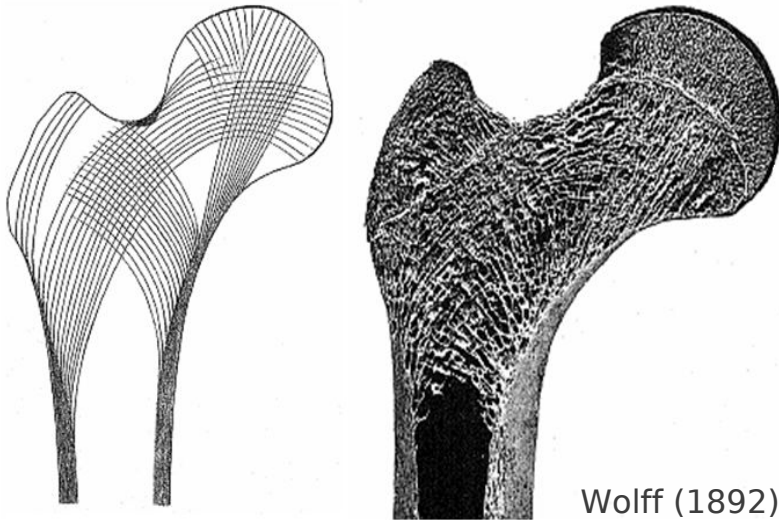
Culman (1866)



Heit (1992)

Wie passen sich Knochen und Bäume
an äußere Belastungen an?

Das Wolffsche “Transformationsgesetz”



Wolff (1892)



Julius Wolff (1836–1902)



Wilhelm Roux (1850–1924)

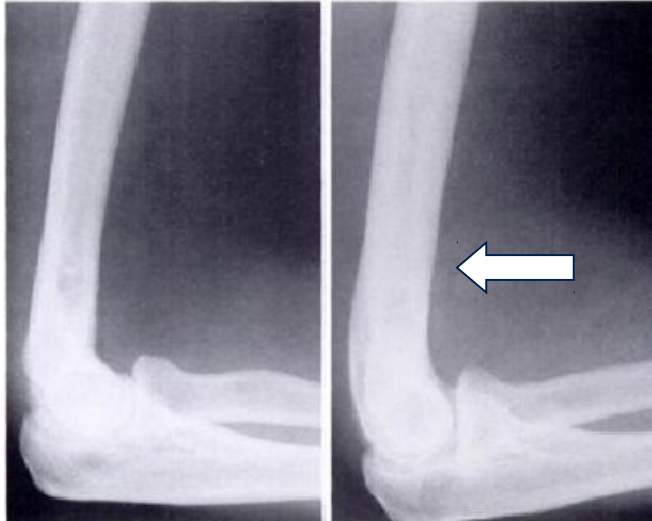
Das Gesetz der Transformation der Knochen (1892)

“Änderungen sowohl der Form als auch der Beanspruchung eines Knochens als auch der Beanspruchung allein bewirken mathematischen Regeln folgende Umwandlungen seiner Binnenstruktur sowie sekundär seiner äußeren Gestalt.”

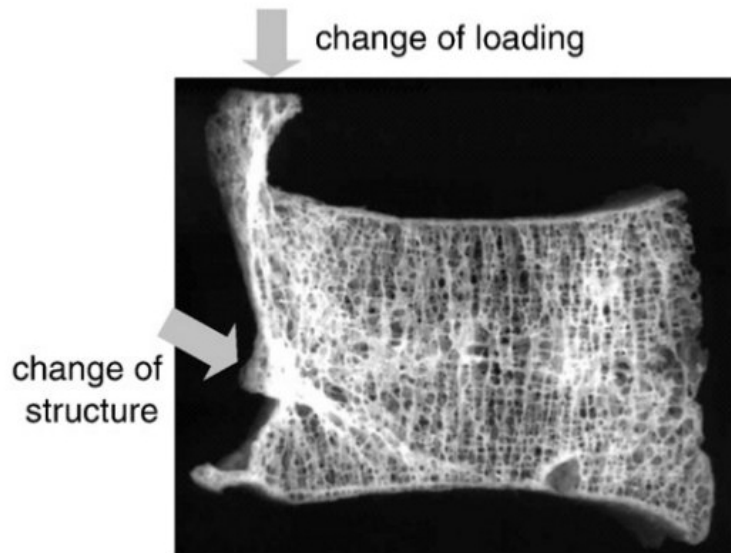
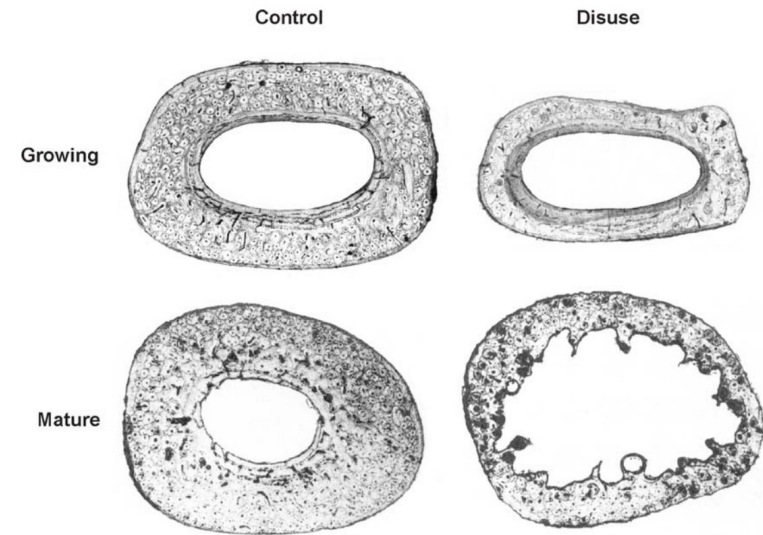
- Beanspruchung führt zu lokalem Knochenaufbau
- Gegensatz zur existierenden “Drucktheorie”
- Die Knochenumformung ist vorhersagbar und damit steuerbar
- Wilhelm Roux' Gedanke: “Der züchtende Kampf der Teile”

Belastung führt zum Knochenaufbau, Unterbelastung zum Abbau

Oberarmknochen eines Tennisspielers

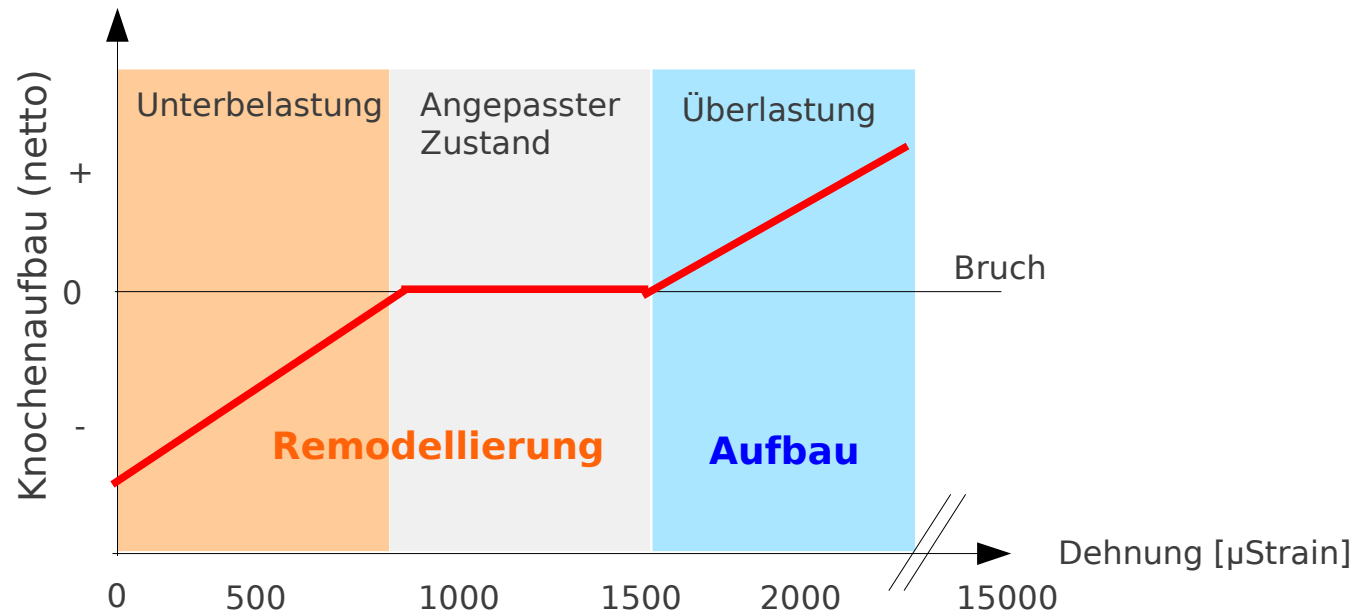


Hundeknochen im Querschnitt



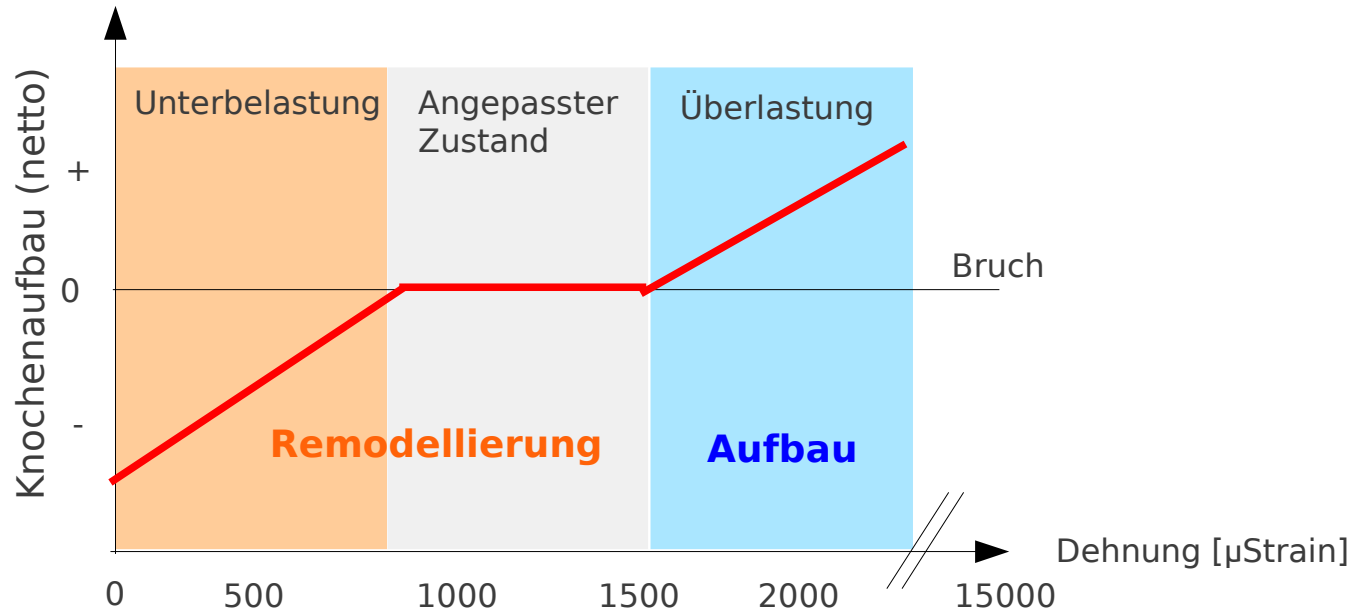
Wirbelkörper mit ungewöhnlicher Belastung

Der Umbau von Knochen unterliegt einem Regelkreis

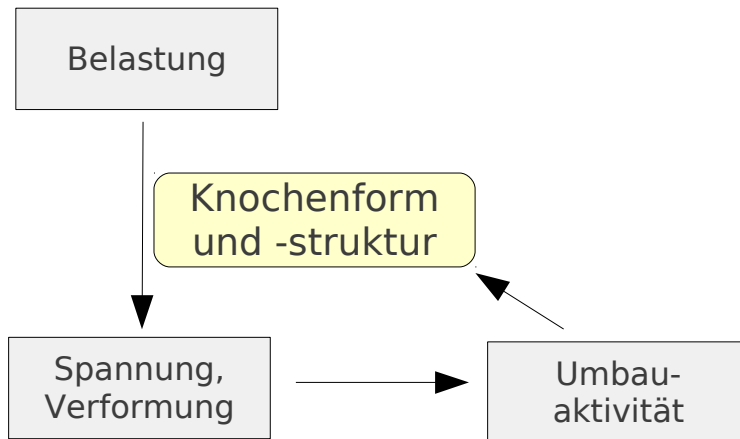


Harold M. Frost (1921-2004)

Der Umbau von Knochen unterliegt einem Regelkreis



Harold M. Frost (1921-2004)



Mechanostatmodell:

Knochen passen sich durch Auf- und Abbau an tatsächliche Spitzenkräfte an.

Mechanischer Sensor: Osteozyten

- Flüssigkeitsströmung in Knochenkanälen
- Hypoxie bei Unterbelastung
- Apoptose nahe Mikrorissen

Bäume wachsen, aber schrumpfen nicht



Wachstumsregel für Holz: rein additiv!

- Massive Baumstämme
- Keine nachträgliche Änderung der Faserrichtungen

Anforderungen beim Baumwachstum

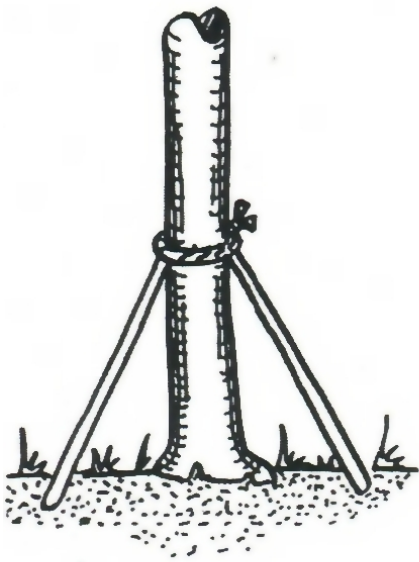
- Verzweigungen bilden und verstärken
- Änderungen der Baumgröße
- Äste werden stabilisiert gegen Schwerkraft

Reaktionsholz kann die Wuchsrichtung korrigieren

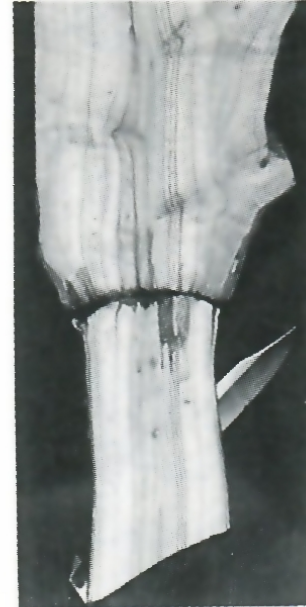
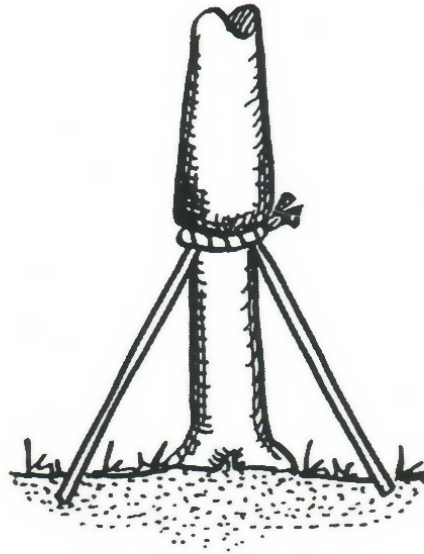


Reaktionsholz verstärkt überbelastete Stellen

Druck: "Aufstützen" auf Stammstütze



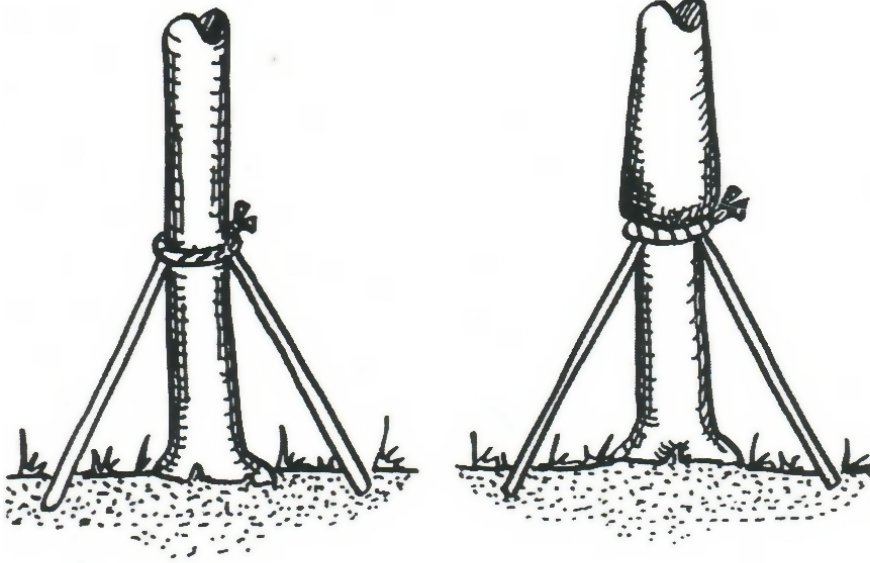
Mattheck (1992)



Sägeschnitt
(Leyland-Zypresse)

Reaktionsholz verstärkt überbelastete Stellen

Druck: "Aufstützen" auf Stammstütze



Mattheck (1992)



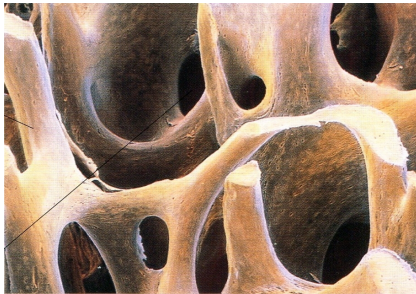
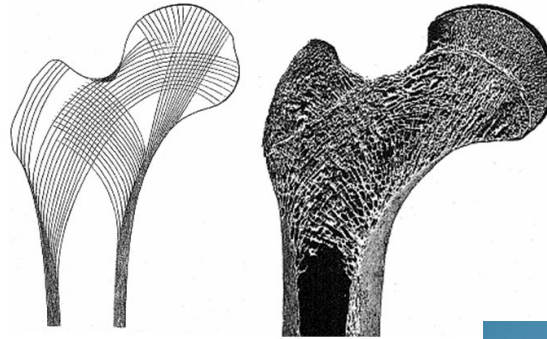
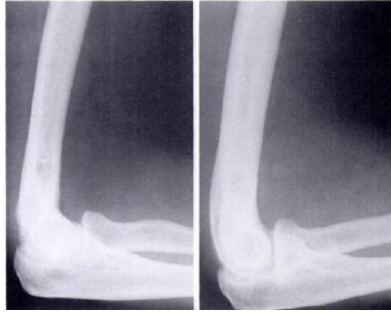
Sägeschnitt
(Leyland-Zypresse)

Zug: Brettwurzel



Wie lässt sich adaptives Wachstum modellieren?

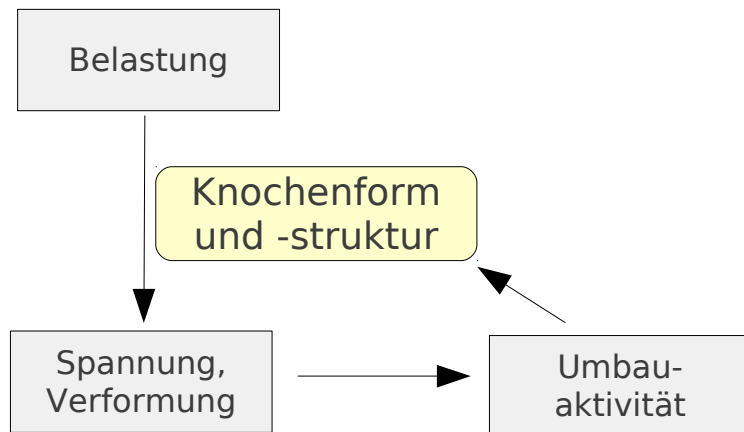
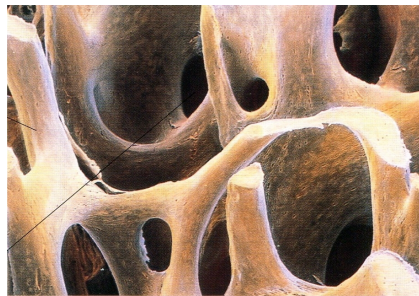
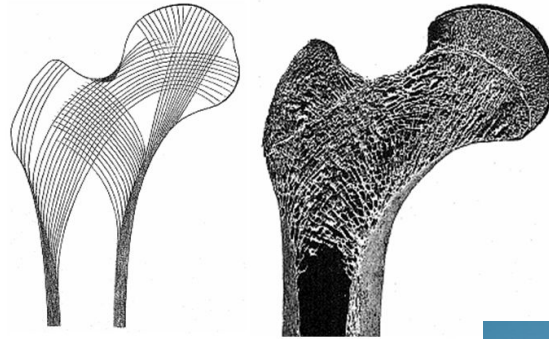
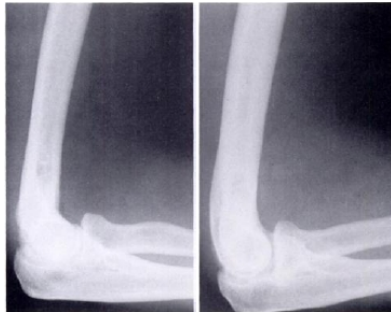
Führt adaptives Wachstum im Modell zu natürlichen Formen?



Adaptives Wachstum

- Anlagerungsrate hängt ab von äußeren Bedingungen
- Wahrnehmung eines lokalen mechanischen Reizes

Führt adaptives Wachstum im Modell zu natürlichen Formen?



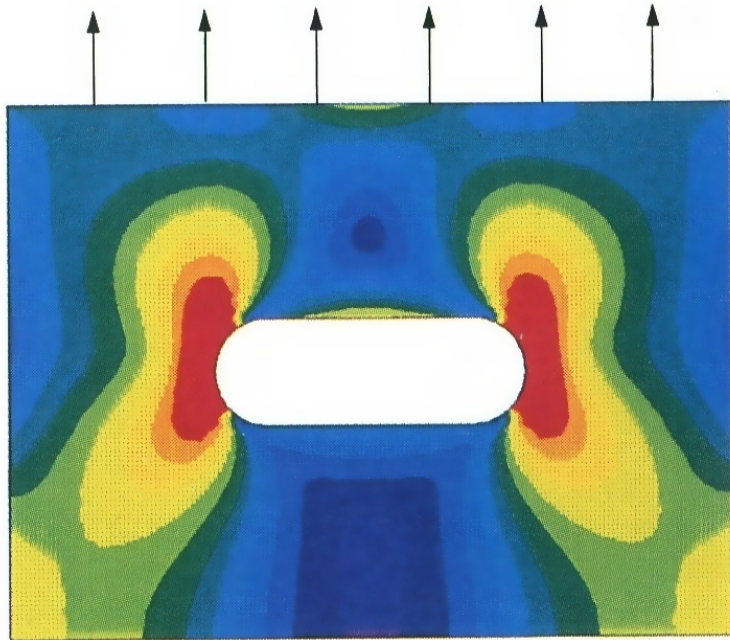
Adaptives Wachstum

- Anlagerungsrate hängt ab von äußeren Bedingungen
- Wahrnehmung eines lokalen mechanischen Reizes

Regelkreismodelle

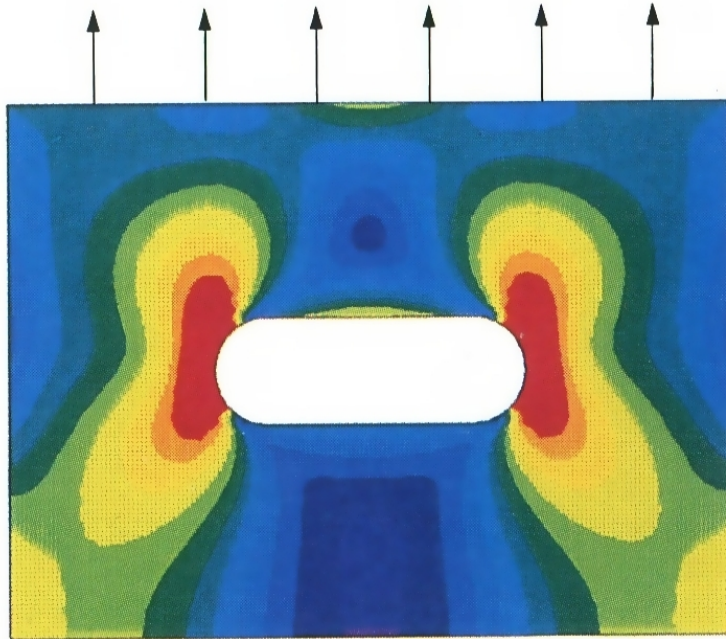
- Welche Spannung / Verformung wird gemessen?
- Welche Wachstumsregel wird verwendet?
- Welche Belastungen werden betrachtet?

Umlenkung der Kräfte an Kerben führt zu Spannungsspitzen

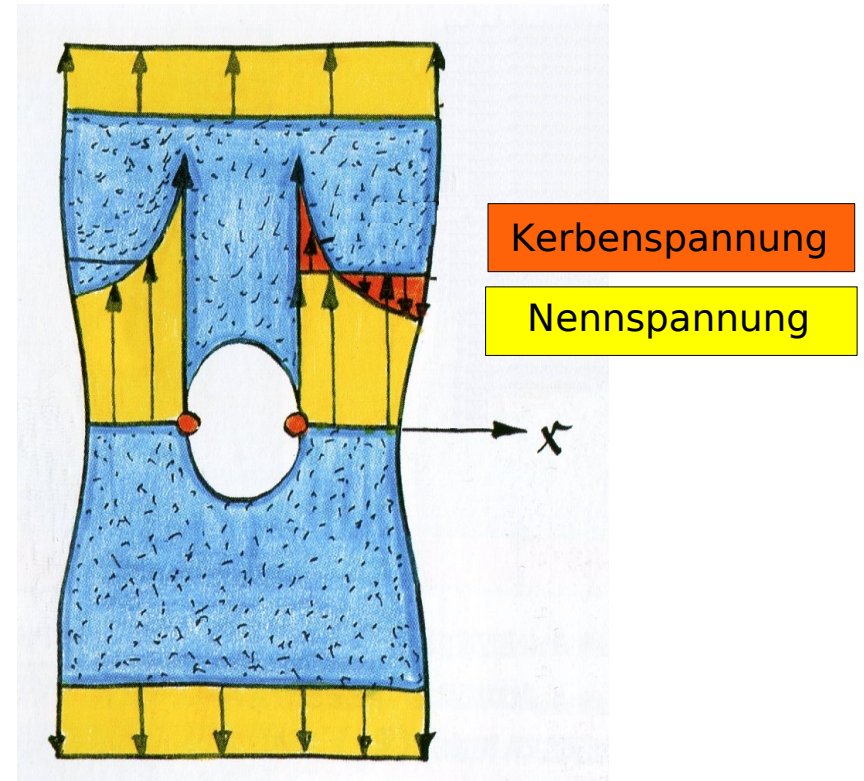


von-Mises-Vergleichsspannung

Umlenkung der Kräfte an Kerben führt zu Spannungsspitzen



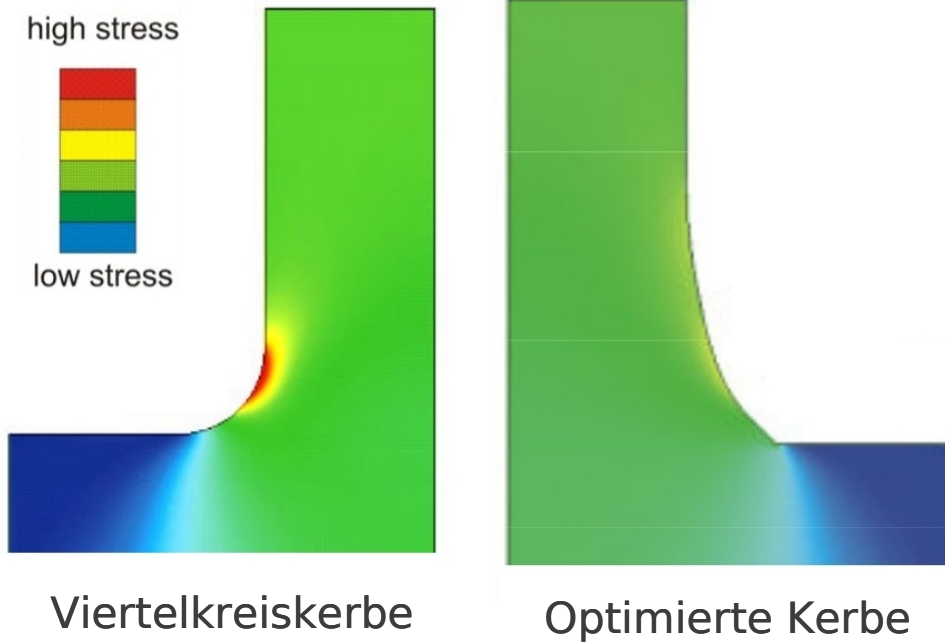
von-Mises-Vergleichsspannung



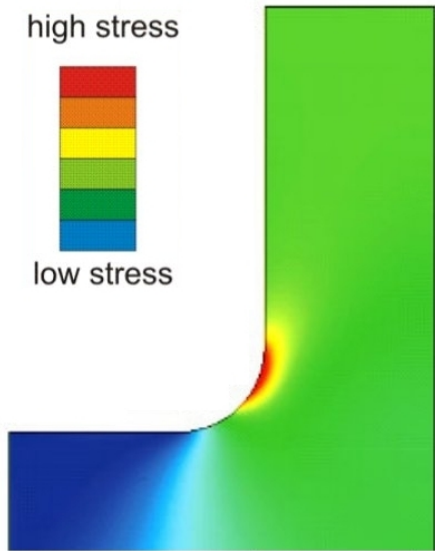
Axiom konstanter Spannung:

Formen sind bruchstabil, wenn die Oberflächenspannungen homogen verteilt sind

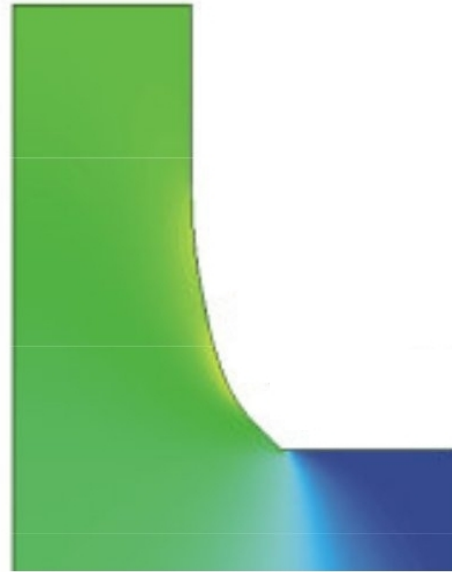
Stabile Formen lassen sich einfach geometrisch annähern



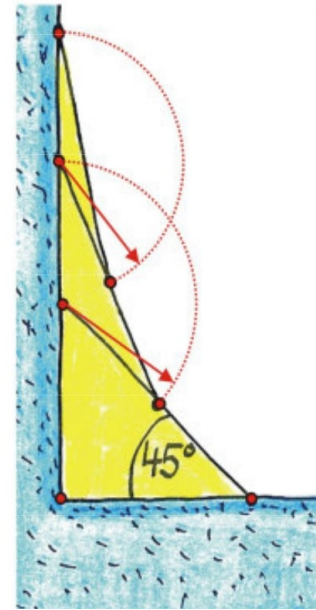
Stabile Formen lassen sich einfach geometrisch annähern



Viertelkreiskerbe



Optimierte Kerbe



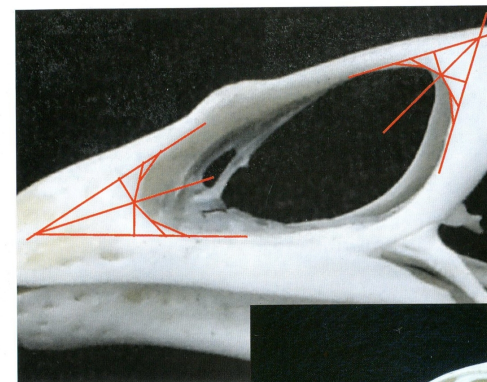
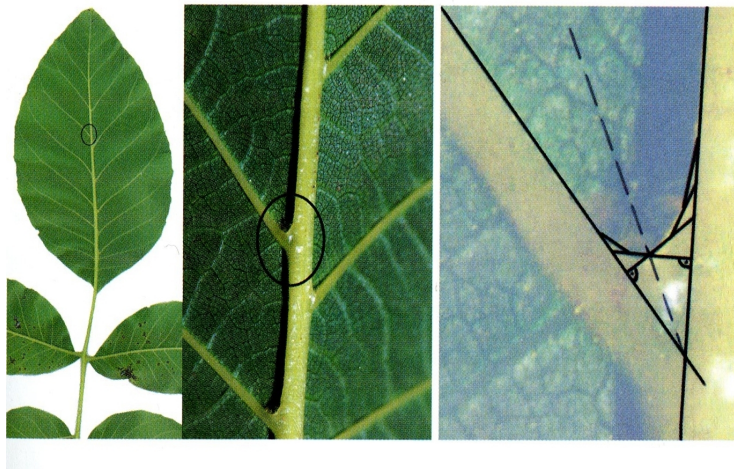
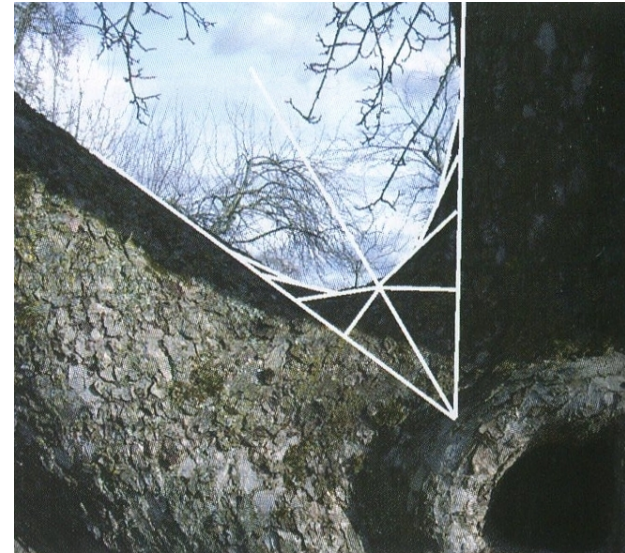
Zugdreiecke

Mattheck *et al.* (2003)



Brettwurzel

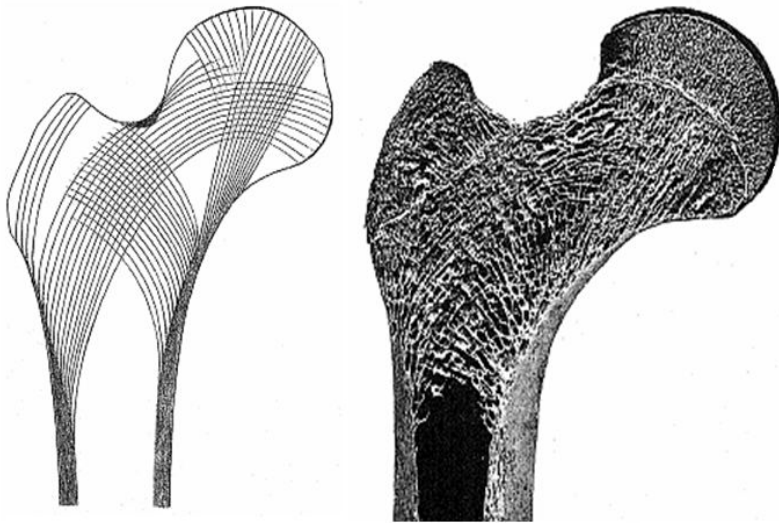
Kerben an Bäumen und Knochen scheinen dem Axiom konstanter Spannung zu gehorchen



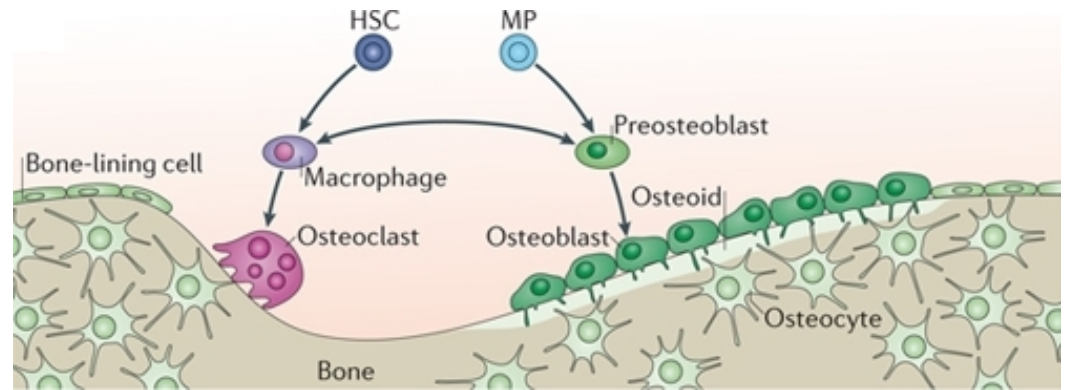
Ein Modell für die
Ausrichtung der Knochenbälkchen

Wie kommt die Ausrichtung der Knochenbälkchen zustande?

“Mathematische Regeln”

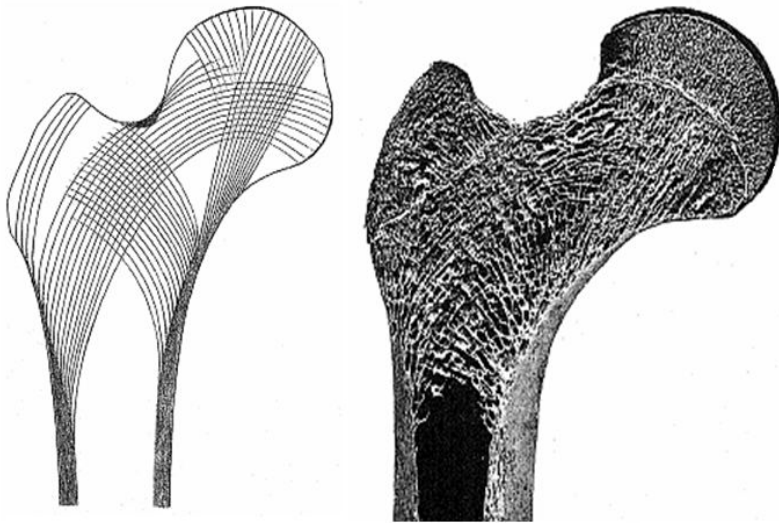


Biologischer Mechanismus

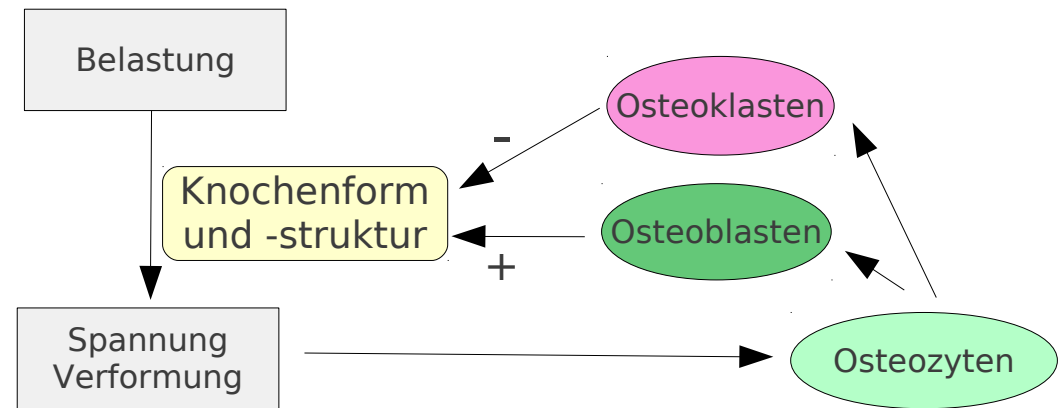
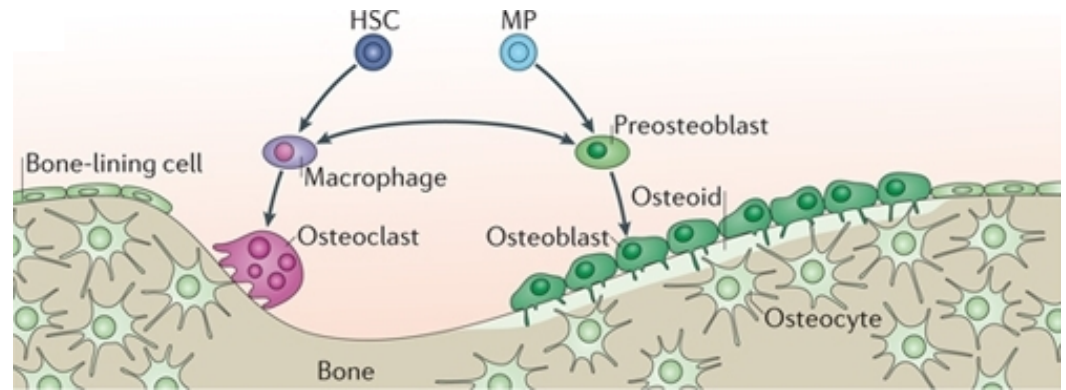


Wie kommt die Ausrichtung der Knochenbälkchen zustande?

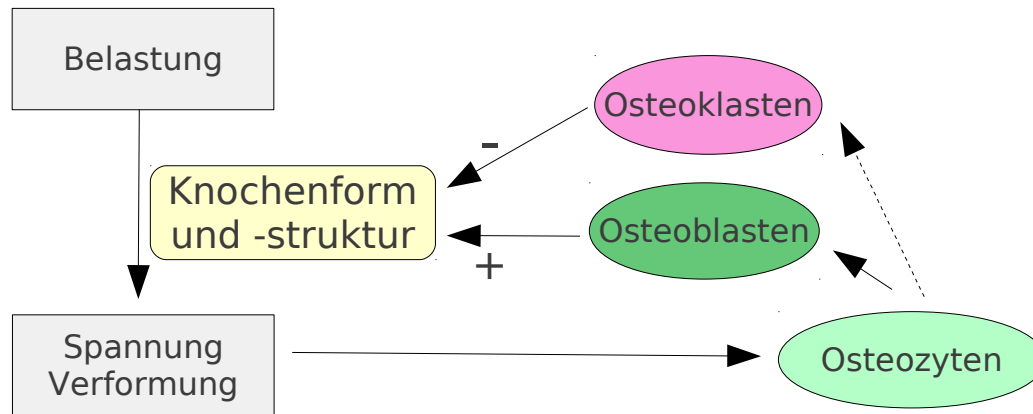
“Mathematische Regeln”



Biologischer Mechanismus

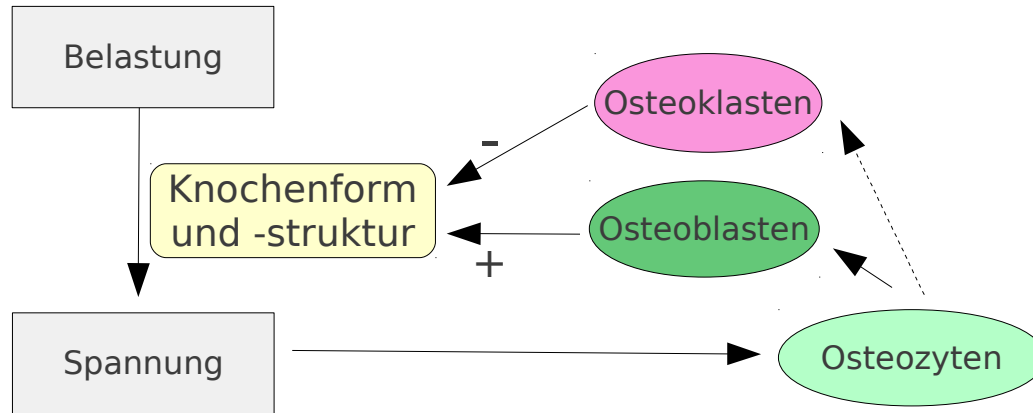


Modelle beschreiben die Ausrichtung der Knochenbälkchen



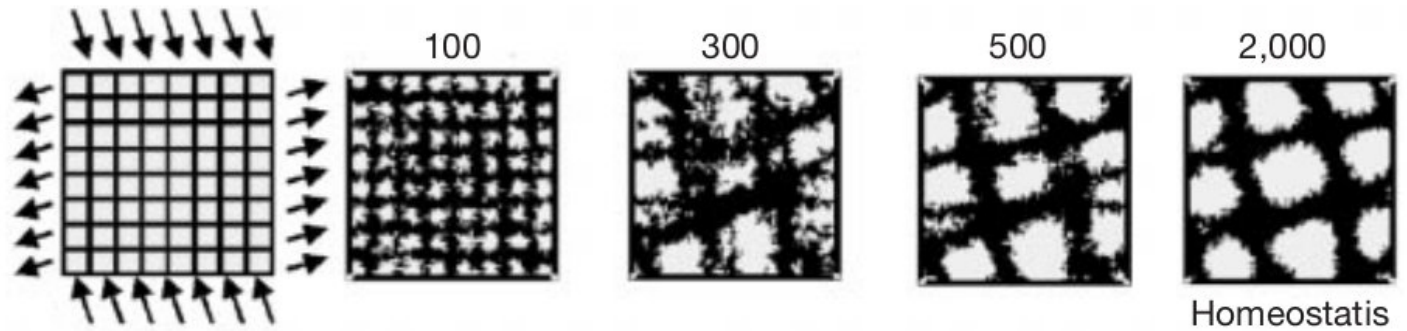
Rik Huiskes

Modelle beschreiben die Ausrichtung der Knochenbälkchen

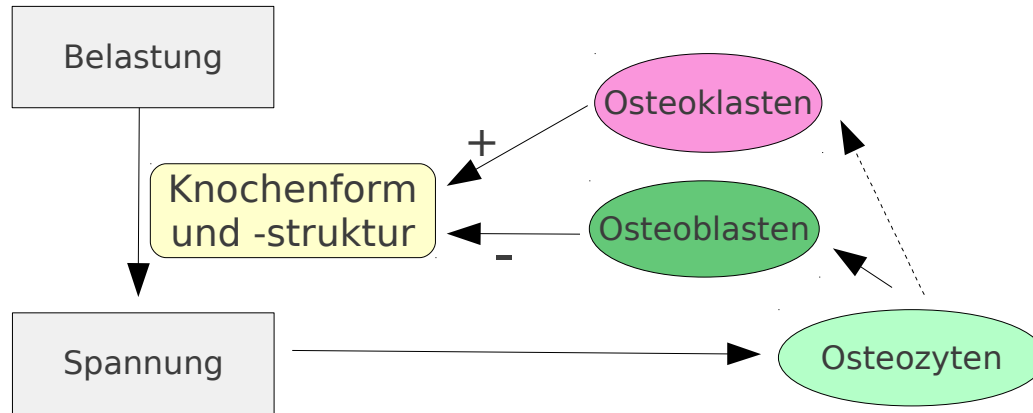


Rik Huiskes

2 MPa äußere Spannung,
1 Kraftzyklus/Sekunde

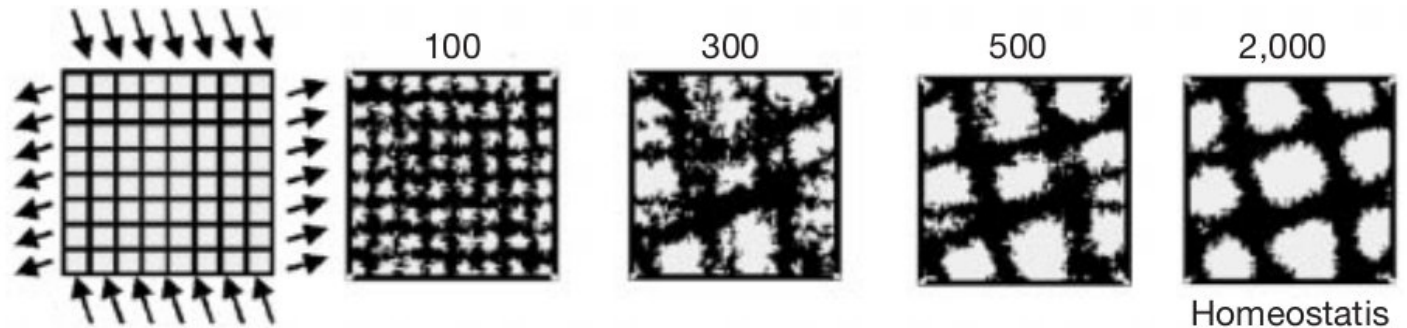


Modelle beschreiben die Ausrichtung der Knochenbälkchen



Rik Huiskes

2 MPa äußere Spannung,
1 Kraftzyklus/Sekunde



Veränderte
Kraftrichtung

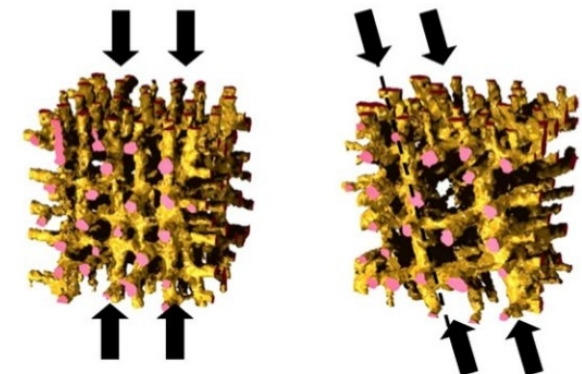
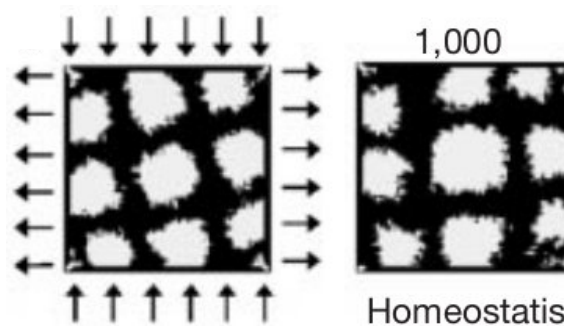
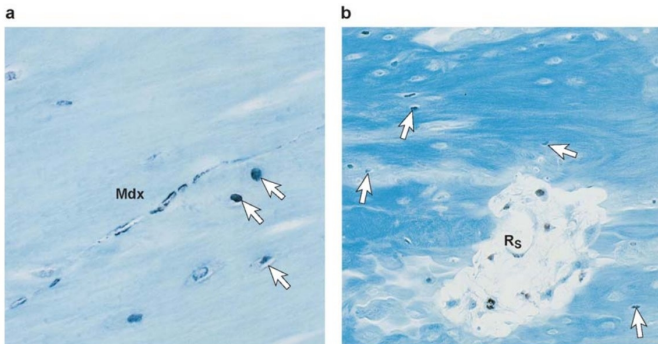


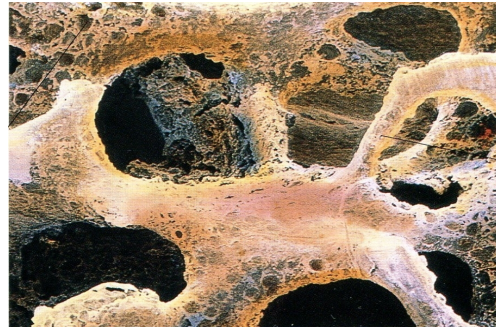
Bild: Ruimerman *et al* (2005)

Aktuelle Forschung zu Knochenwachstum und -remodellierung

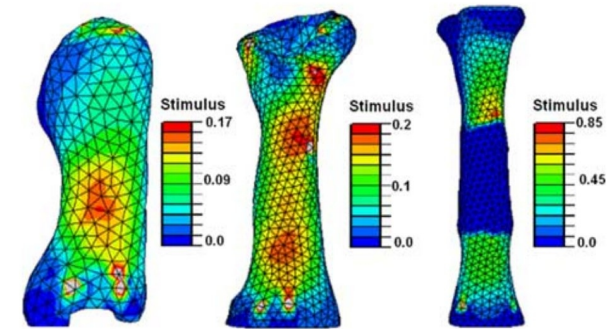
Zelluläre Mechanismen der Remodellierung



Einfluss von Alter, Training, Medikamenten



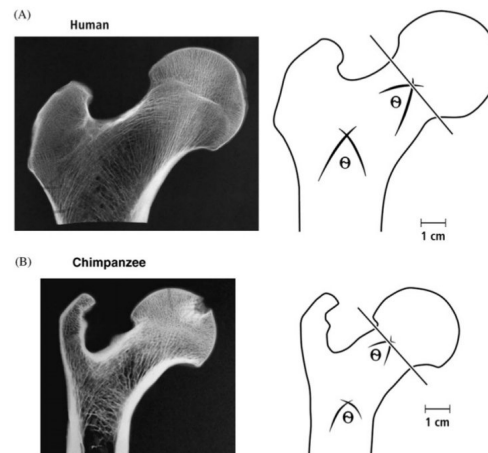
Einfluss von Bewegung auf die Skelettentwicklung



Anpassung an kontrollierte Belastungen



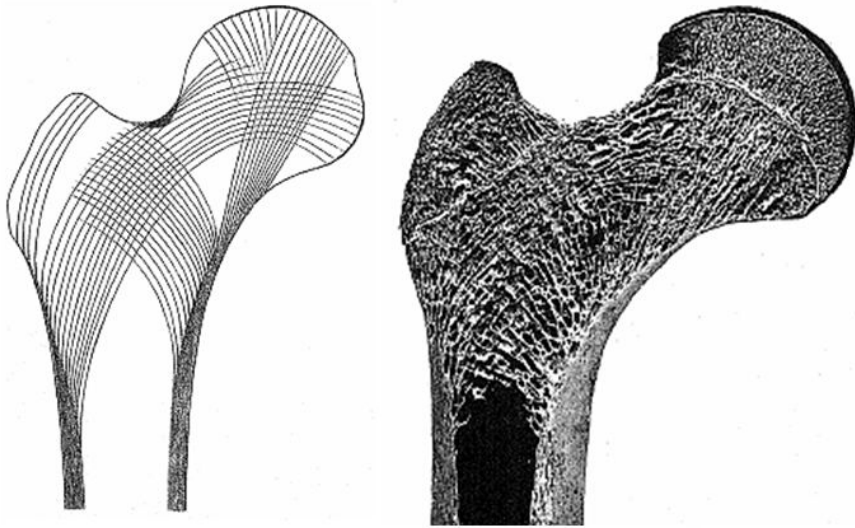
Rückschluss von Morphologie auf Belastung



Tatsächliche Kräfte im Körper



Die Natur als Ingenieur: Formbildung von Knochen und Bäumen



1. Knochen und Holz sind strukturierte adaptive Materialien
2. Kontinuumsmechanik beschreibt Spannungen in homogenem Material
3. Adaptives Wachstum führt zu Formen von Knochen und Bäumen
4. Simulation nach dem Axiom konstanter Spannung führt zu stabilen Formen
5. Simulationen beschreiben die Anpassung der Knochenbälkchen an Belastungen

Literatur

Mechanical adaptation of biological materials - The examples of bone and wood

R. Weinkamer and P. Fratzl, Materials Science and Engineering C 31 (2011) 1164-1173

Das Gesetz der Transformation der Knochen

J. Wolff, Hirschwald Berlin, 1892

From Wolff's law to the Utah paradigm: insights about bone physiology and its clinical applications

H.M. Frost (2001), The Anatomical Record 262, 398-419

Biomechanical and molecular regulation of bone remodeling

A.G. Robling, A.B. Castillo and C.H. Turner, Annu. Rev. Biomed. Eng. 2006. 8:455-498

Plant Biomechanics. An Engineering Approach to Plant Form and Function

K.J. Niklas (1992), Chicago Press

Design in der Natur

C. Mattheck. Rombach 1992

Verborgene Gestaltungsgesetze der Natur

C. Mattheck. Forschungszentrum Karlsruhe, 2006

Effects of mechanical forces on maintenance and adaptation of form in trabecular bone

R. Huiskes et al (2000), Nature 405, 704-706