

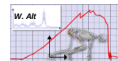
Inhalt

Biomechanik von *Material* und *Struktur****Material und Struktur unter Belastung***

- *Spannung und Dehnung*
 - *Druck-, Zug- und Scherspannung*
 - *Verformungen (elastisch, plastisch und viskoelastisch)*
 - *Härte - Viskoelastizität*
 - *Ermüdung und Versagen*
 - *Biomaterial vs. technisches Material*
-



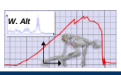
2_1_2 Problem: Wie viel ist zu viel?

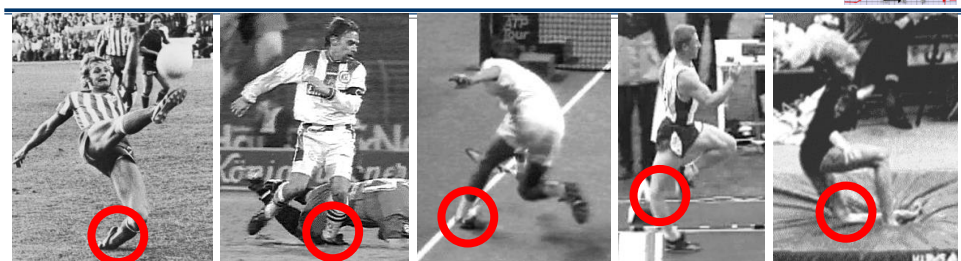
**Material**

- Material – Werkstoff
- Physikalische Eigenschaften
 - Chemische Eigenschaften
 - Knochen, Knorpel, Sehnen
Bänder
 - Nicht im technischen Sinn,
Material für Implantate



2.1.3 Problem: Wie viel ist zu viel?





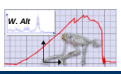
hohe Geschwindigkeit der Bewegung

Schnelles Erreichen unphysiologischer Gelenkpositionen

Schneller Anstieg traumatisierender Kräfte

Überbeanspruchung von Strukturen

2.1.4 Paradigma: Schutz vor Überlastungen



Beanspruchung = $\frac{\text{Belastung}}{\text{Belastbarkeit}}$

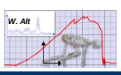


Bei Überbeanspruchung entsteht ein Defizit der strukturstabilisierenden Kräfte



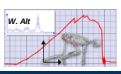
1. Welche Eigenschaften haben die Materialien?
2. Wie reagiert Biologisches Material?
3. Welche Eigenschaften haben die Strukturen?

2.1.5 Materialeigenschaften 1



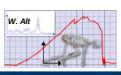
Material Homogen - heterogen: „Eine über einen betrachteten Bereich gleichmäßig und einheitlich chemische bzw. physikalische Eigenschaften aufweisende Substanz wird als homogen bezeichnet. Homogen bedeutet nicht, dass nur eine einzige Komponente vorhanden ist	homogen	heterogen
---	--------------------	----------------------

2.1.6 Materialeigenschaften 2



innere Struktur Isotrope Materialien weisen nach allen Richtungen hin gleiche physikalische und chemische Eigenschaften auf oder: in der Probe gibt es keine Vorzugsrichtung, die Strukturen sehen in allen Richtungen gleich aus. anisotrop: durch die innere Struktur des Materials gibt es bevorzugte Richtungen und Beanspruchungen	isotrop	anisotrop
--	--------------------	----------------------

2.1.7 Materialeigenschaften 4



Belastungsarten

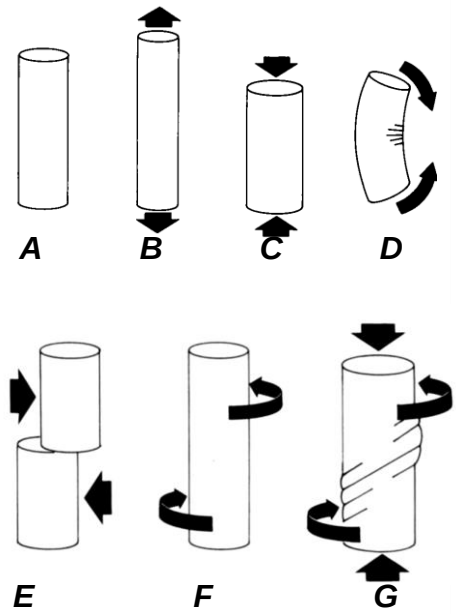
Strukturen werden unterschiedlich beansprucht:

reine Spannung

- A) Keine Kraft
- B) Zug
- C) Druck

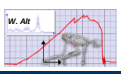
Kombinationen

- D) Biegung
- E) Scherung
- F) Torsion
- G) mehrfach



Modifiziert nach Nordin & Frankel, 2001

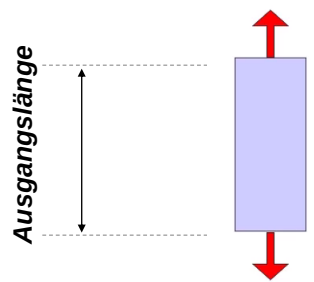
2.1.8 Materialeigenschaften 3



Spannung

sind Kräfte bezogen auf Querschnittsfläche
Spannungen können in festen Körpern in Form von Zugspannung, Druckspannung, Schubspannung, Torsionsspannung, Biegespannung auftreten.

Die Spannung wird in den Einheiten Pa, MPa oder GPa angegeben.

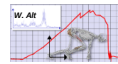


$$\sigma = \pm \frac{F}{A}$$

F = Kraft in N;
A = Fläche m²
σ = Spannung N/m²(Pa) oder (N/mm²)

$1\mu = 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \hat{=} 0,0001\%$

2_1_9 Materialeigenschaften 4

**Dehnung**

Längenänderungen als
Folge deformierender
Kraftwirkung

Längenänderung

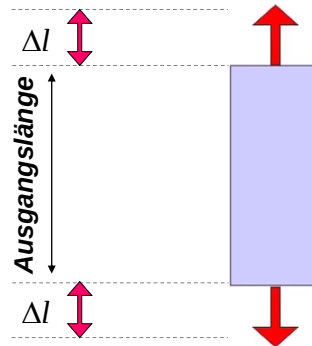
$$\varepsilon = \Delta l / l$$

Die Dehnung als
dimensionslose Größe wird in
i.d.R. in Microstrain (μ oder
 $\mu\varepsilon$) gemessen.

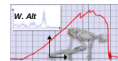
$$1\mu = 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \triangleq 0,0001\%$$

Das Spannungs-
Dehnungsverhältnis hängt vom
Material und der Struktur der
Probe, nicht aber von ihrer Form
ab. Dieses Verhältnis wird als
Elastizitätsmodul E bezeichnet:

Das HOOKESCHE Gesetz: $\sigma = E \cdot \varepsilon$
 E - **Elastizitätsmodul** = Materialkonstante



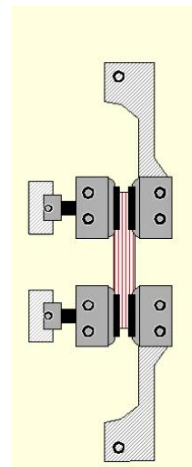
2_1_10 Materialeigenschaften 5

**Elastizität**

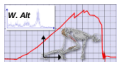
Wird ein elastischer Körper gedehnt bzw. gestaucht, kommt es zu Lageänderungen der Moleküle bzw. zur Konfigurationsänderung von langkettigen Molekülen bis den äußeren Kräften das Gleichgewicht gehalten wird.

Fällt die äußere Kraft weg, kehrt der Körper wieder in seine ursprüngliche Form zurück. Die beim Dehnen aufgewandte Arbeit ($W=F \cdot s$) wird im elastischen Körper gespeichert und bei der Rückstellung wieder komplett abgegeben.

Elastizität beschreibt nicht die Härte eines Materials sondern dessen vollständig reversible Formänderung.

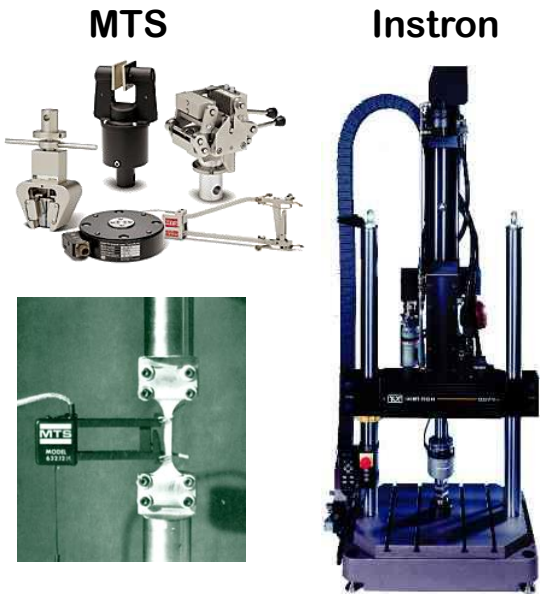


2_1_11 Materialprüfungen 1

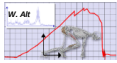


Experiment

Die exakte Messung der mechanischen Eigenschaften biologischer Materialien ist kompliziert und stellt hohe technische Anforderung. Hersteller von Prüfmaschinen sind z. B. Zwick, MTS® und Instron®



2_1_12 Materialprüfungen 2

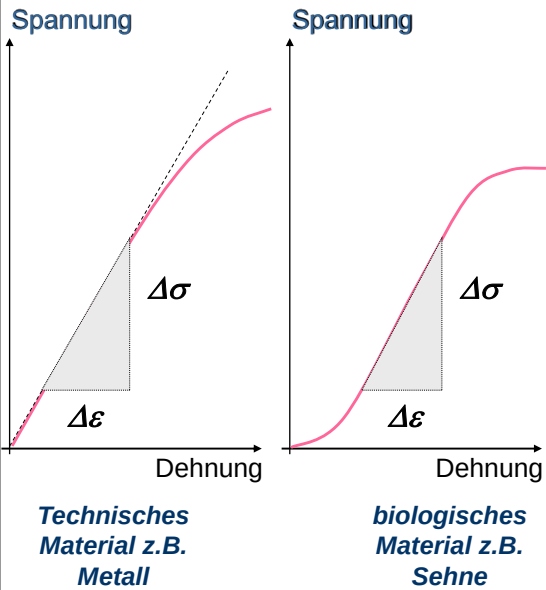


Spannung-Dehnung

Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Der Anstieg im linearen Teil wird als Elastizitätsmodul bezeichnet.

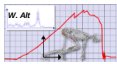
Bei höheren Spannungswerten weicht der Verlauf von einer Geraden ab.

Biologische Materialien sind nur in einem bestimmten Spannungsbereich nahezu linear, darunter und darüber zeigen sie nichtlineares Verhalten



Modifiziert nach Brinckmann et al., 2000, Orthop. Biomech., S. 45ff.

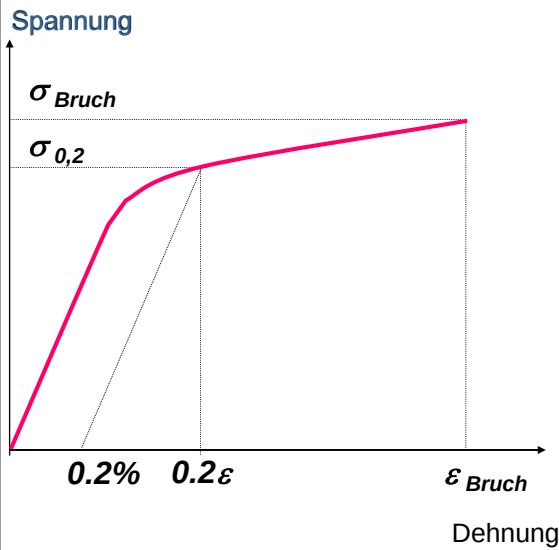
2_1_13 Materialprüfungen 4



Spannung-Dehnung

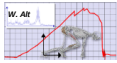
Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Materialversagen wird durch die Bruchdehnung und Bruchspannung quantifiziert.

Zusätzlich gibt man die Spannung und Dehnung an, bei der das Diagramm merklich von einer Geraden abweicht. Dies ist die 0,2% Grenze



Modifiziert nach Brinckmann et al., 2000, Orthop. Biomech., S. 50.

2_1_14 Materialprüfungen 5

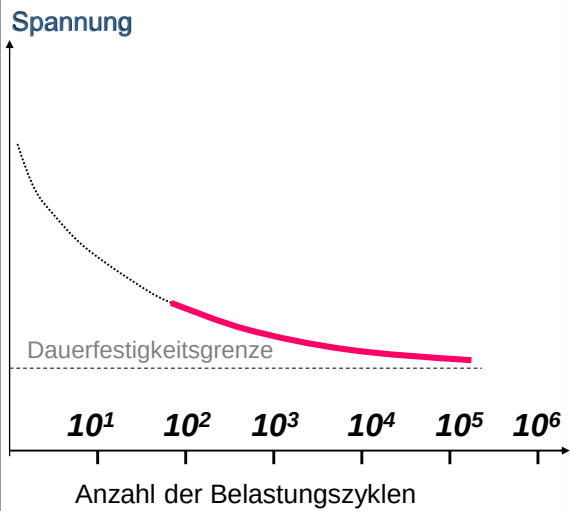


Spannung-Dehnung

Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

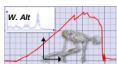
Mit zunehmender Zahl an Belastungszyklen sinkt die Spannung, bei der es zum Bruch einer Materialprobe kommt (Materialermüdung).

Tritt unterhalb eines Grenzwertes auch bei sehr hohen Wiederholungszahlen kein Bruch auf, dann kennzeichnet dieser Wert die Dauerfestigkeitsgrenze



Modifiziert nach Brinckmann et al., 2000, Orthop. Biomech., S. 50.

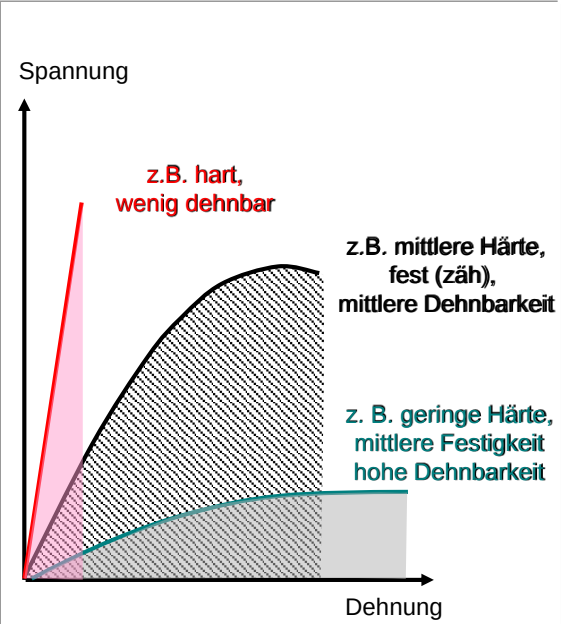
2_1_15 Materialeigenschaften 7



Experiment

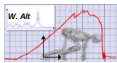
Das Verhalten eines Körpers unter axialer Belastung (i.d.R. Zug) wird in sog. Spannungs-Dehnungs-Experimenten („stress-strain“) untersucht.

Aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven werden dann die elastischen /plastischen/ viskoelastischen Eigenschaften der Probe abgeleitet.



Modifiziert nach Brinckmann et al., 2000, Orthop. Biomech., S. 49.

2_1_16 Materialprüfungen 6



Vergleichswerte

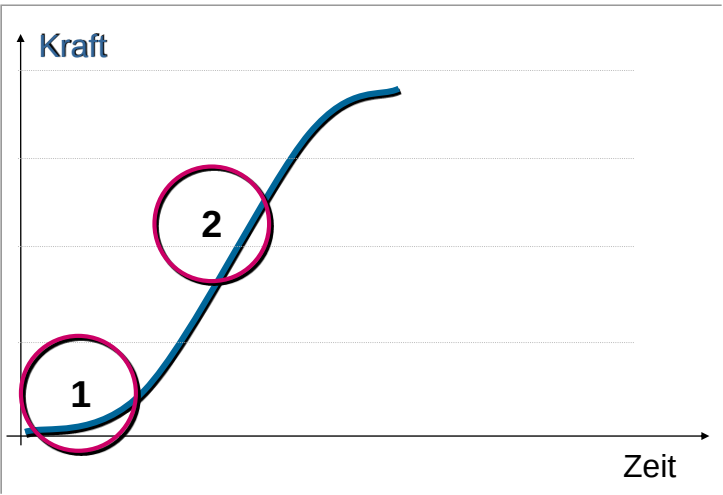
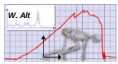
Material	Bruchspannung [N/mm ²]	Bruchdehnung (%)
Edelstahl	700	15
Titanlegierung	1200	6
Polyäthylen	20	400-800
Corticalis	150	1,5
Spongiosa	2	2,5

Die mechanischen Eigenschaften verschiedener technischer und biologischer Materialien unterscheiden sich zum Teil in mehreren Größenordnungen.

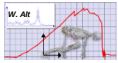
Die Angaben in der Literatur variieren vor allem bei biologischen Materialien sehr stark.

Modifiziert nach Brinckmann et al., 2000, Orthop. Biomech., S. 50.

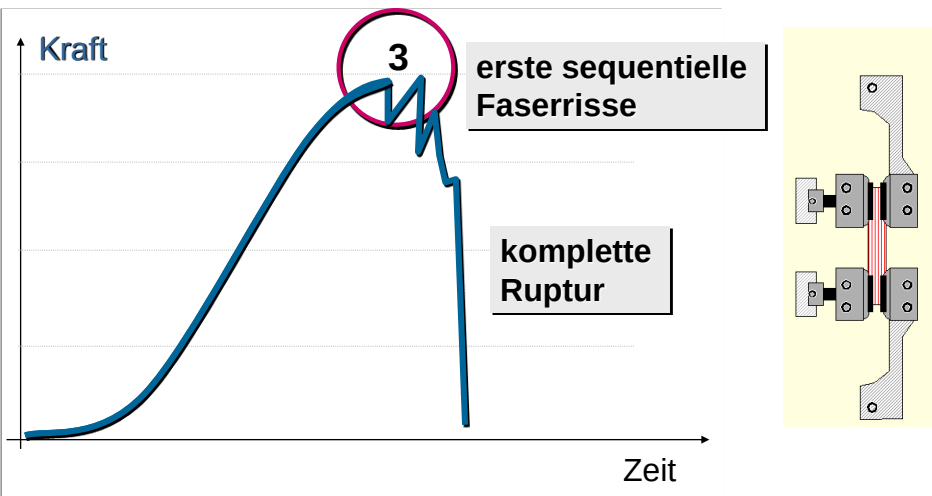
2_1_17 Biomaterial 1

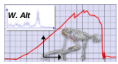


2_1_18 Biomaterial 2

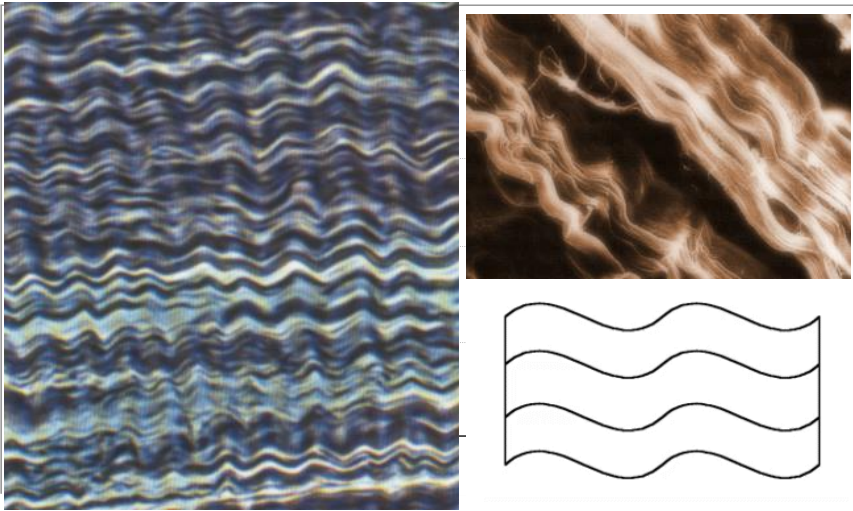


Messungen in vitro: ultimativer stress

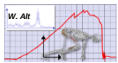




Messungen in vitro: „toe - region“



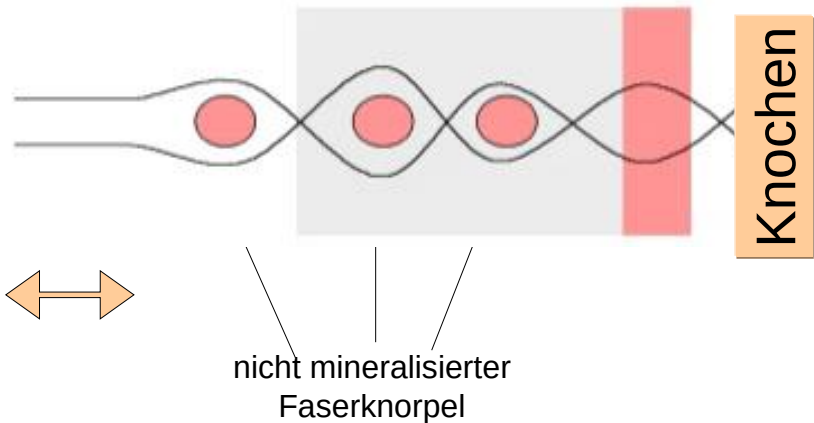
ca. 0.3mm Länge der Wellen



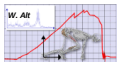
Funktion

Kollagene Fasern der Sehne

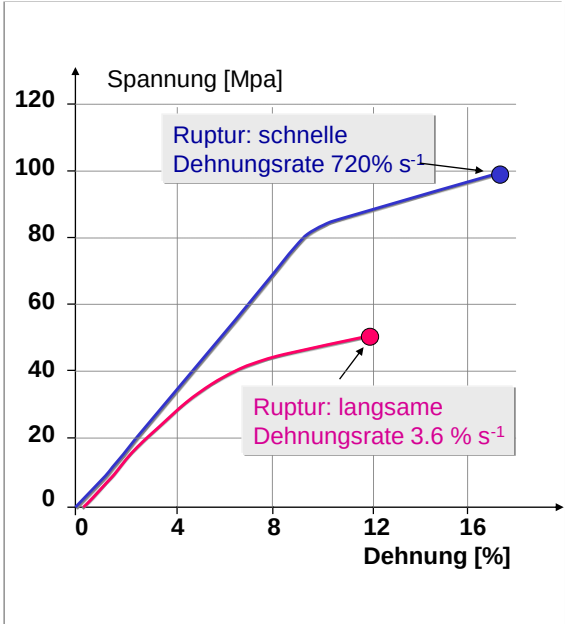
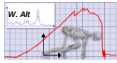
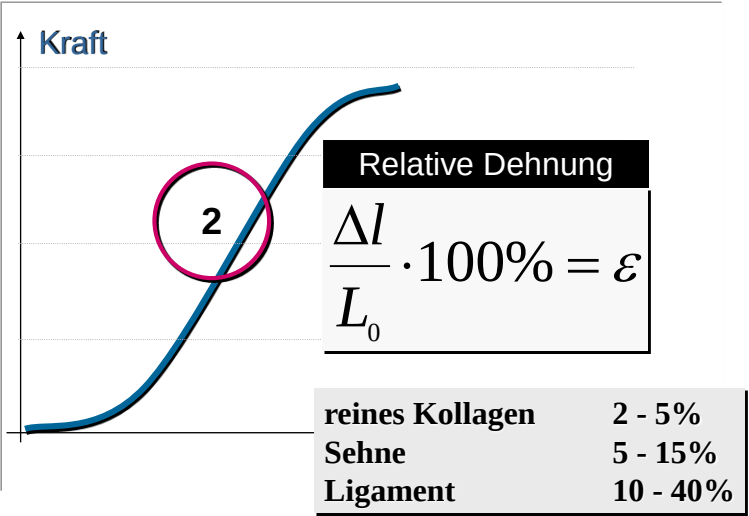
Kollagene Fasern des Knochens



Modifiziert nach Becker & Krahle, 1974

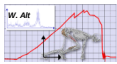


Messungen in vitro: lineare Region



Modifiziert nach Haut, 1983, In: Martin, 1998, Skeletal Tissue Mechanics

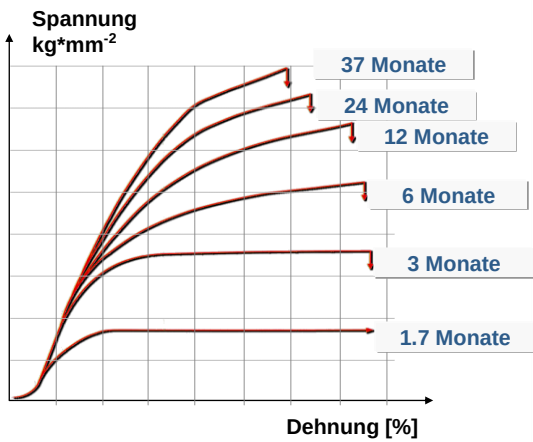
2_1_23 Sehnen



Alterungsprozess

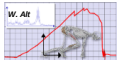
Einfluß des Alters auf die mechanischen Eigenschaften der Sehne aus dem Schwanz einer Ratte

- Zahl der Cross links steigt an!
- Stiffness nimmt zu!
- Zugfestigkeit nimmt zu!
- Dehnbarkeit nimmt ab!
- H₂O-Gehalt nimmt ab!



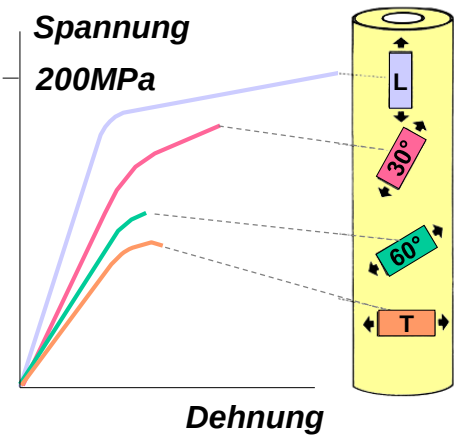
nach van den Berg, 1998

2_1_24 Knochen



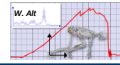
Anisotropie

Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Kortikalis-Präparates mit unterschiedlichen Belastungsrichtungen
Demnach ist die Zugbelastbarkeit in Längsrichtung am höchsten und nimmt bei 30, 60 und 90° (Transversal) entsprechend ab



Nordin & Frankel, 2001, S. 36

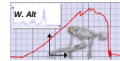
2_1_25 Zusammenfassung 1



Biomaterial

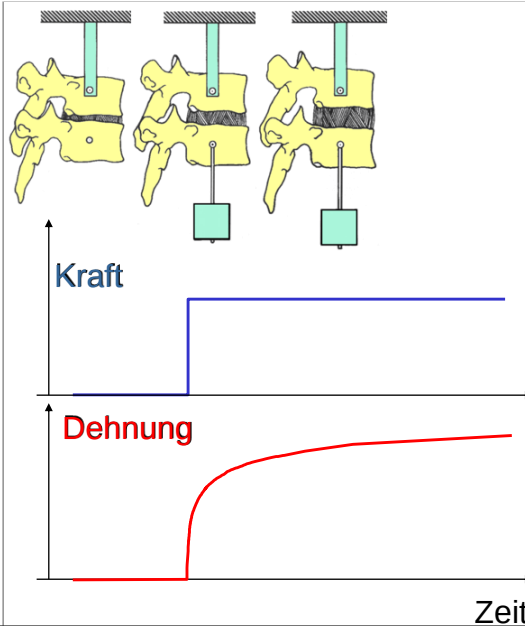
1. Reagiert anders als technisches Material (Nicht linear)
2. Zeigt Abhängigkeit von der Belastungsrate
3. Zeigt Abhängigkeit vom biologischen Alter
4. Ist immer anisotrop

2_1_26 Viskoelastizität 1



Kriechen

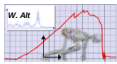
Bei konstanter Spannung nimmt die Dehnung eines viskoelastischen Materials mit der Zeit zu. Dieser Vorgang wird als „Kriechen“ bezeichnet.



„Creep“ Phänomen

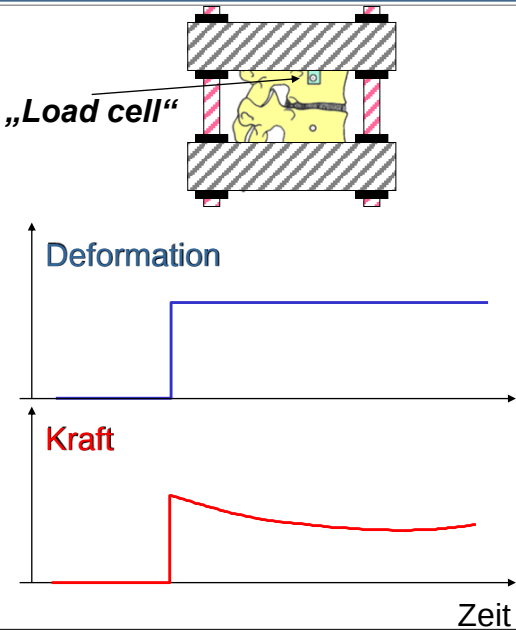
Modifiziert nach Panjabi & White, 2001, S. 91

2_1_27 Viskoelastizität 2



Spannungsrelaxation

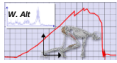
Bei konstanter Dehnung nimmt die Spannung eines viskoelastischen Materials mit der Zeit ab. Dieser Vorgang wird als „Spannungsrelaxation“ bezeichnet.



„stress-relaxation“ Phänomen

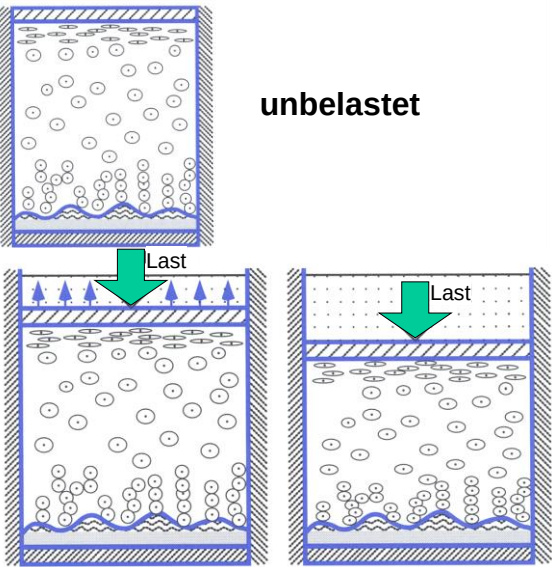
Modifiziert nach Panjabi & White, 2001, S. 92

2_1_28 Knorpel



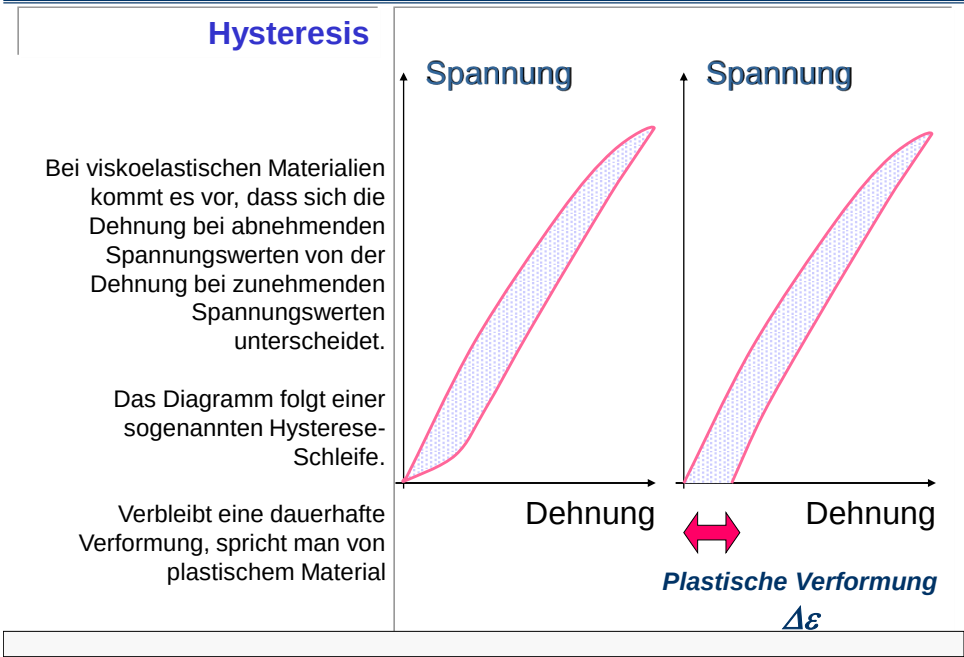
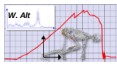
Viskoelastizität

Ständige Be- oder dauerhafte Entlastung wirkt sich negativ auf die Physiologie des Gelenkknorpels aus, weil dadurch der Transport negativ beeinflusst wird.

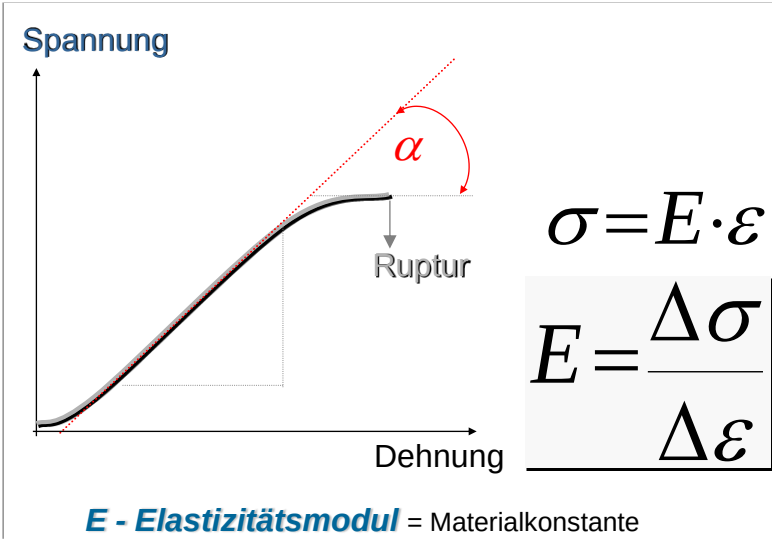
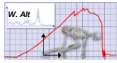


Modifiziert nach Frankel&Nordin, 2001, S. 72

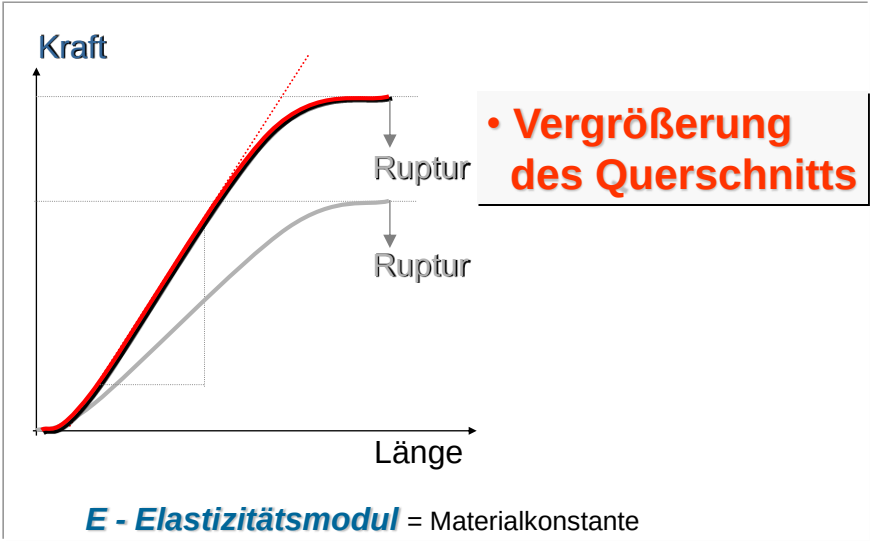
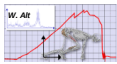
2_1_29 Viskoelastizität 2



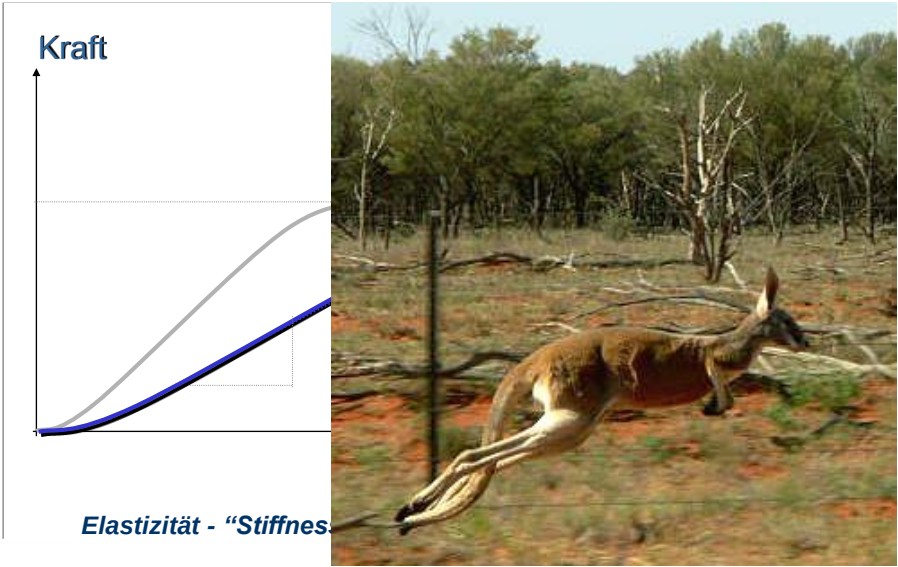
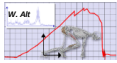
2_1_30 Biomaterial 5

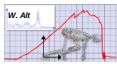


2_1_31 Biomaterial 6



2_1_32 Biomaterial 7





Biologisches M

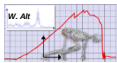
1. Ist viskoelastisch

2. Zeigt Kriechen

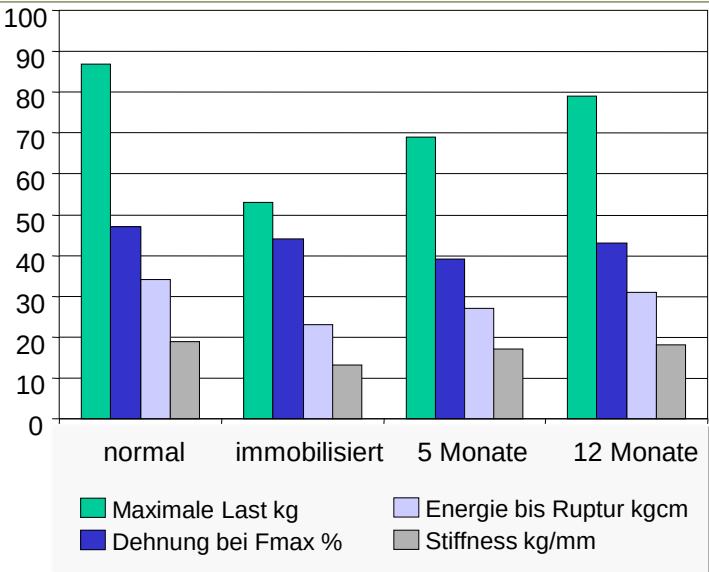
3. Zeigt Spannungserholung

4. Zeigt Hysterese

5. Adaptiert an die Belastung (biopositiv und bionegativ)

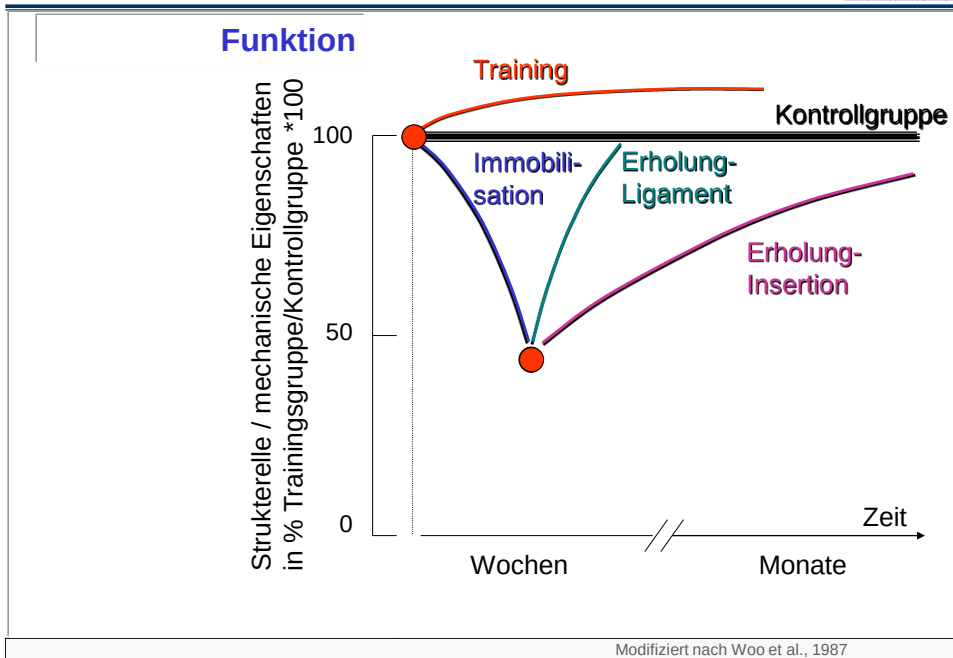
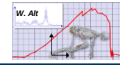


Mechanischen Eigenschaften von Ligamenten (Rhesusaffen)

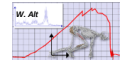


Modifiziert, nach Noyes, 1974 In: Martin et al, 1998

2_1_39 Zusammenfassung - Anpassungsmodell



2_1_40 Zusammenfassung 3



Material und Struktur des Bewegungsapparates

1. Adaptiert sehr unterschiedlich an Belastung: Knorpel, Sehnen und Bänder weniger als Knochen und Muskel.
2. Bionegative Anpassungen (z.B. durch Immobilisation) führen sehr viel schneller zu deutlich geringerer Belastbarkeit als biopositive Anpassungen die Belastbarkeit verbessern.
3. Die Regenerationszeiten nach Überlastung oder Immobilisation betragen mindestens 6 Monate (Band und Sehne) meistens aber 12 Monate und mehr (vor allem Insertionen, Aponeurosen etc.)