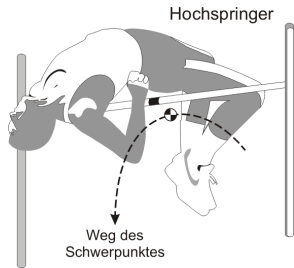
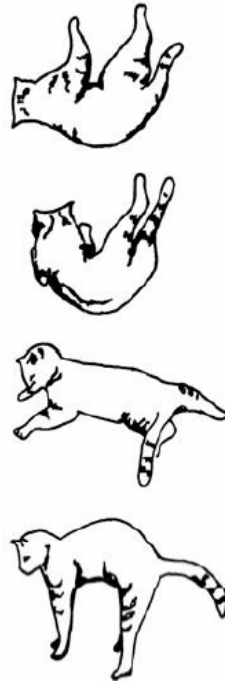


BIOPHYSIK

15. Vorlesung

**Biomechanik,
Mechanische Eigenschaften
biologischen Stoffen**

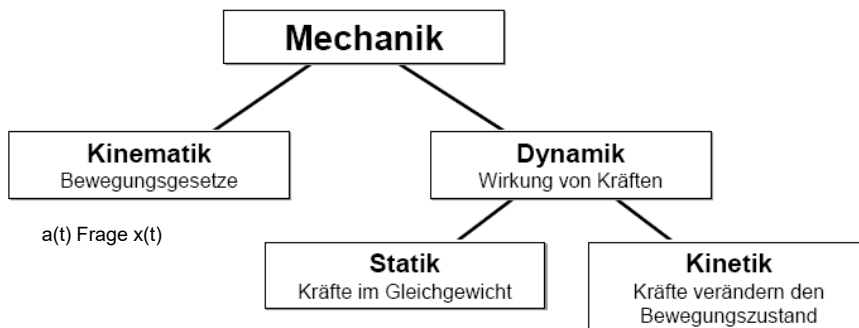


Einleitung

- Mechanische Grundbegriffe
- Newtonsche Axiome
- Formstabilität
- Schwerpunkt
- Ein- und zweiarmiger Hebel
- Belastungen

2

Mechanik: mathematisch/ physikalische Grundlage der Biomechanik ●



Äußere Kräfte: Kräfte, die von Außen auf den Körper einwirken

Innere Kräfte: Kräfte, die im Inneren des Körpers auftreten

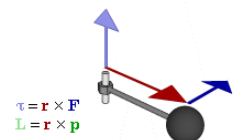
3

Biomechanische Kenngrößen/ - Kennlinien: ●

Hilfsmittel zur Bewegungsbeschreibung

	Kinematik - kinematische Kenngrößen	Dynamik - dynamische Kenngrößen
Translation 	Zeit Weg Geschwindigkeit Beschleunigung	Kraft, Masse Impuls Arbeit/Energie Leistung
Rotation 	Zeit Winkel Winkelgeschwindigkeit Winkelbeschleunigung Bahngeschwindigkeit	Drehmoment, Trägheitsmoment Drehimpuls Rotationsarbeit/-energie Radialkraft/ Fliehkraft

Kennlinien sind VerlaufsDarstellungen der Kenngrößen
(meistens zeitabhängig)



Wichtige mechanische Grössen

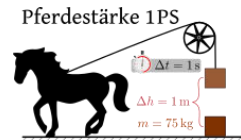
Grösse:	Symbol:	Dimension:	Einheit:
Masse:	m	Kilogramm	Kilogramm
Zeit:	t	Sekunde	Sekunde
Abstand:	s	Meter	Meter
Geschwindigkeit:	$v = s/t$	m/s	-
Beschleunigung:	$a = s/t^2$	m/s ²	-
Impuls:	$p = m \cdot v$	kg·m/s	-
Kraft:	$F = m \cdot a$	kg·m/s ²	Newton
Kinetische Energie:	$E = 1/2 \cdot m \cdot v^2$	kg·m ² /s ²	Joule
Mechanische Leistung	$P = E/t$	kg·m ² /s ³	Watt

Bemerkungen:

1 PS = 736 W oder = 0.735 kW

1 kW = 1.36 PS

1 km/Stunde = 3.6 m/s



5

Newtonsche Axiome ●

- **Das erste Gesetz ist das Trägheitsprinzip.** Es gilt nur in Inertialsystemen „Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Translation, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.“
- **Das zweite newtonsche Gesetz ist das Grundgesetz der Dynamik** „Die Änderung der Bewegung einer Masse ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht nach der Richtung derjenigen geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt.“ ein Spezialfall $\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m\ddot{\mathbf{x}}$
- ,
- **Das dritte Prinzip ist das Wechselwirkungsprinzip** „Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleichgrosse, aber entgegen gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A“ $\mathbf{F}_{A \rightarrow B} = -\mathbf{F}_{B \rightarrow A}$
- **Prinzip der ungestörten Überlagerung oder Superpositionsprinzip der Mechanik** „Wirken auf einen Punkt (oder einen starren Körper) mehrere Kräfte , so addieren sich diese vektoriell zu einer resultierenden Kraft auf.“

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n$$

6

Die **Biomechanik** befasst sich mit Funktionen und Strukturen von Bewegungsapparat und Bewegungen von biologischen Systemen.

Themen

- Formstabilität
- Stehen, Standfestigkeit
- Bewegungen
- Mechanische Beanspruchungen
- Mechanische Eigenschaften von einigen biologischen Stoffen

(1)

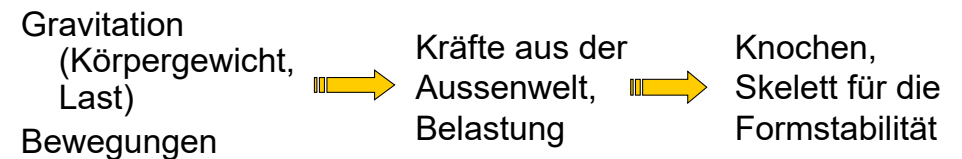
(2)

Wiederholung: (Skalargrössen) Leistung, Energie, Arbeit
(Vektorgrössen) Kraft, Drehmoment (=Kraft mal Kraftarm)

starrer Körper: ein System von Massenpunkten deren Abstände voneinander zeitlich unverändert bleiben (keine Deformation)

7

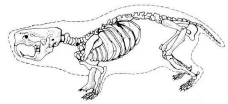
Formstabilität



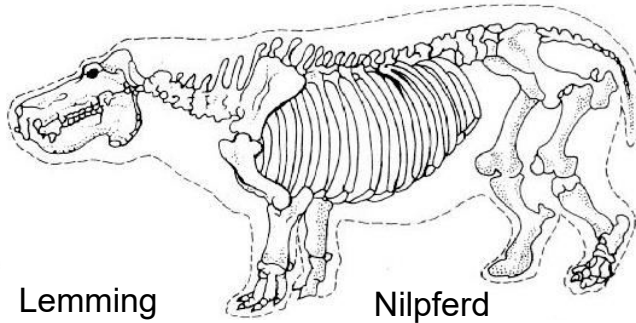
- Knochenanteil im Körper ✶
- ~~Aufbau des Skeletts~~
- Knochenstruktur

8

Vergleich des Skeletts von einigen Tieren

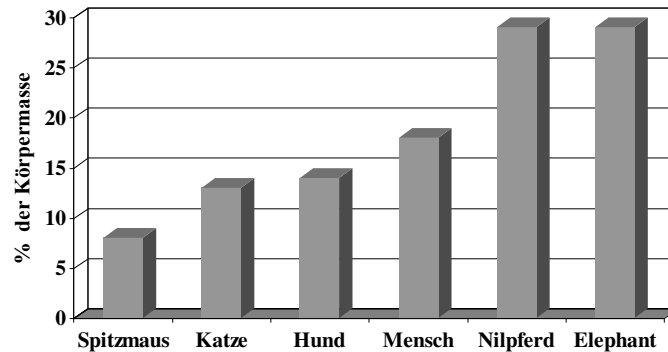


Lemming



Nilpferd

Knochenanteil bei verschiedenen Tieren



Erklärung des wachsenden Knochenanteils

Änderungen der linearen, quadratischen und kubischen Größen bei einem einfachen Körper, z.B. Kugel:

				entsprechende biol. Grösse z.B.
r	1	2	Zunahme: ≈ 2 fach	Körperhöhe
$A = 4\pi r^2$	≈ 12	≈ 50	≈ 4 fach	Querschnitt des Knochens
$V = \frac{4}{3}\pi r^3$	≈ 4	≈ 34	≈ 8 fach	Körpermasse

10

Stehen — mechanisches Gleichgewicht

Im mechanischen Gleichgewicht addieren sich alle Kräfte und Drehmomente zu Null:

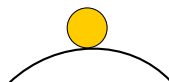
$$\sum F = 0 \text{ und } \sum M = 0$$

Kräftegleichgewicht und Drehmoment-Gleichgewicht

Gleichgewichtstypen:



stabil



labil



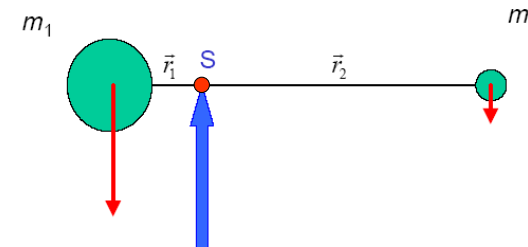
indifferent

11

Schwerpunkt

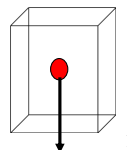
Schwerpunkt ist der Punkt, in dem der Körper unterstützt werden muss, damit er in jeder Position im Gleichgewicht bleibt.

(Bei homogenen Körper: geometrischer Mittelpunkt.)



Der Schwerpunkt S muss so zwischen m_1 und m_2 liegen, dass $m_1 g r_1 = m_2 g r_2$ ist

Der Schwerpunkt ist der Angriffspunkt der Schwerkraft:



12

Gleichgewicht bei Verdrehung

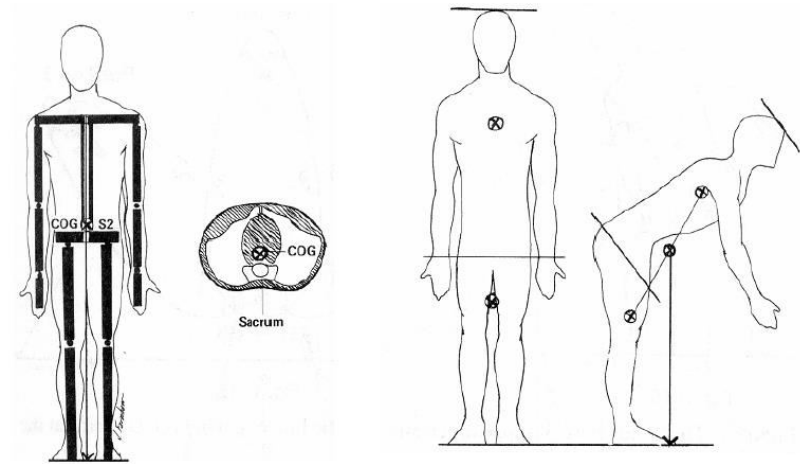
Gleichgewicht: Die Wirkungslinie der Schwerkraft geht durch die Unterstützungsfläche:



Der Schwerpunkt fällt, wenn er nicht über der Unterstützungsfläche liegt.

13

Schwerpunkt des Menschen



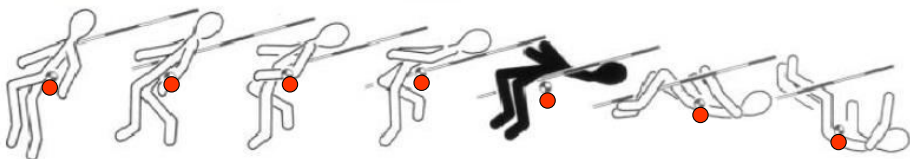
Der Mensch kann seinen Schwerpunkt ausserhalb des Körpers verlagern.

14

Schwerpunktsatz

Der Schwerpunkt eines Körpers bewegt sich so, als ob die Gesamtmasse im Schwerpunkt vereinigt wäre und die Summe aller äusseren Kräfte dort angreifen würde.

Beispiel: Hochsprung: Fosbury Flop
Schwerpunkt bewegt sich unter der Latte (geringere Hubarbeit)



15

Gleichgewicht bei Verdrehung. Standfestigkeit



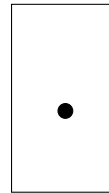
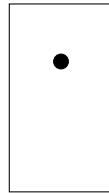
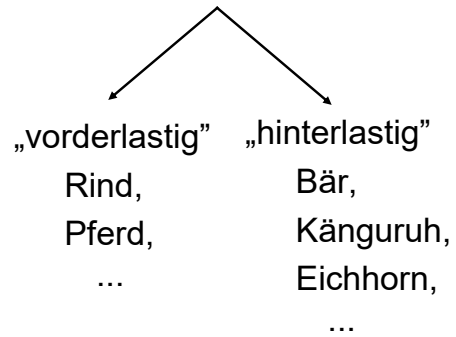
Je grösser die Unterstützungsfläche ist, desto stabiler ist das Gleichgewicht.

➡ 3 Füße +1

16



Einteilung der Vierfüßler



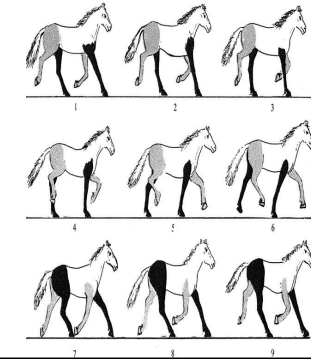
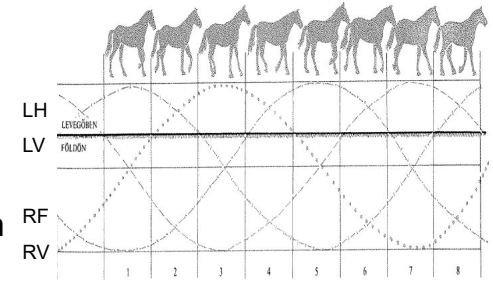
Im Durchschnitt die größte Unterstützungsfläche!

- LH-LV-RH-RV
- LH-LV-RV-RH
- LH-RH-LV-RV
- LH-RH-RV-LV
- LH-RV-LV-RH
- LH-RV-RH-LV



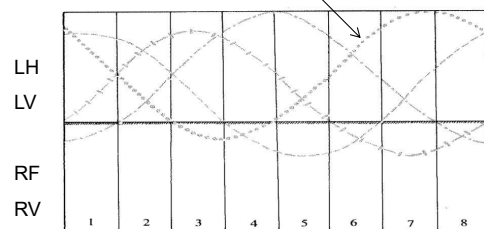
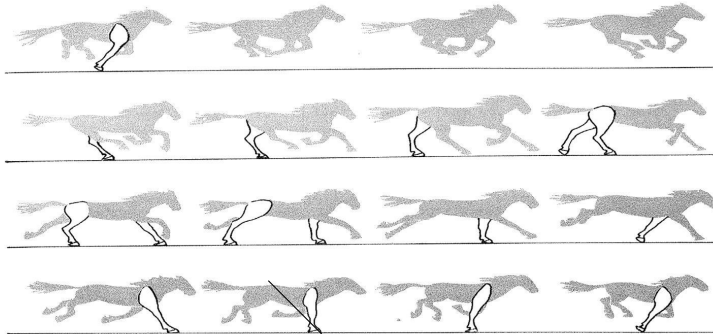
Bewegung vom Pferd

im Luft
beim Tritt
am Boden

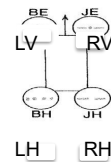


Traben:
zwei Hufen sind immer am Boden

beim Galopp

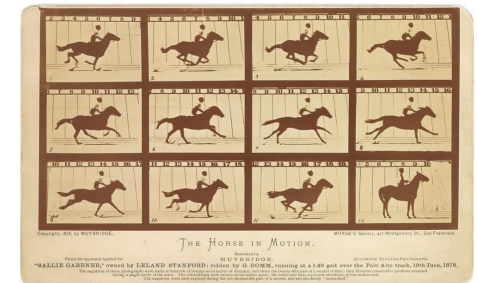


fliegt



Nur schnelle Fotografie zeigt die richtige Bewegung

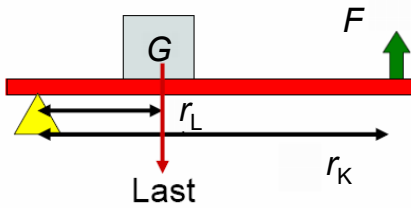
Muybridge 1878



Alle alte Gemälde sind falsch: (biologisch Nonsens oder instabil)

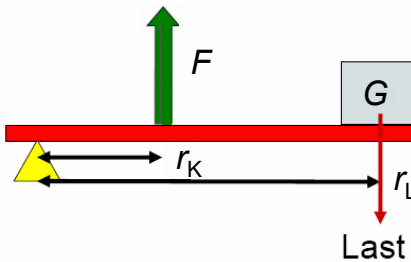


Hebelfunktion: einarmiger Hebel



Last und Kraft greifen auf der gleichen Seite des Drehpunkts an.

Kraftarm ist länger als Lastarm. $\rightarrow F < G$



Kraftarm ist kürzer als Lastarm. $\rightarrow F > G$

Hebelgesetz (beim Gleichgewicht):

$$\sum M = 0, \quad G r_L = F r_K$$

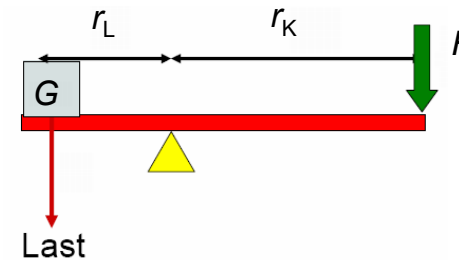
21

Zweiarmliger Hebel



Hebelgesetz (beim Gleichgewicht):

$$\sum M = 0, \quad G r_L = F r_K$$

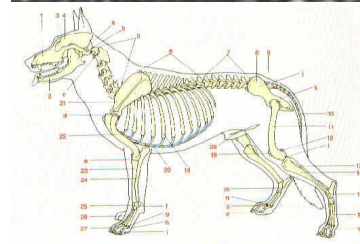
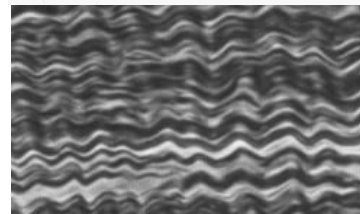
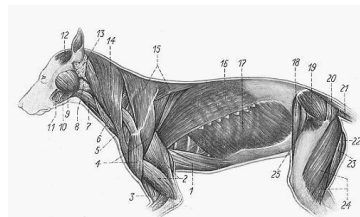


Last und Kraft liegen auf entgegengesetzten Seiten des Drehpunkts. Last und Kraft sind gleichgerichtet.

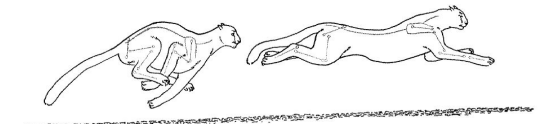
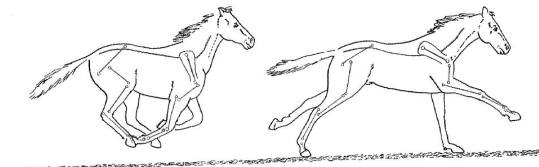
22

Fortbewegung

- Muskel — „aktive“ Feder, Kraftherzeugung
- Sehne — Feder, Übertragung der Kräfte auf Knochen
- Skelett — Bewirkung der Bewegung des Körper(teils)



elastische Wirbelsäule wirkt wie ein Feder - hilft beim Rennen



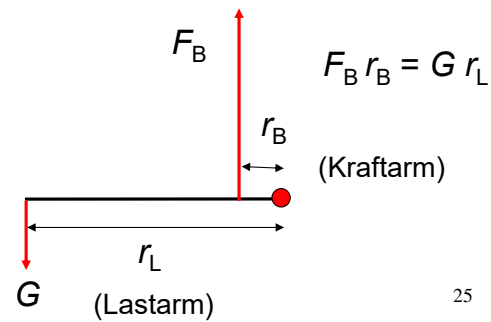
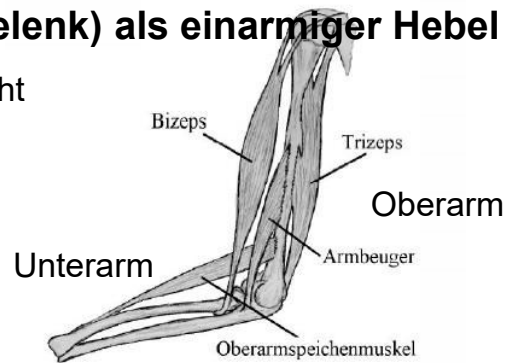
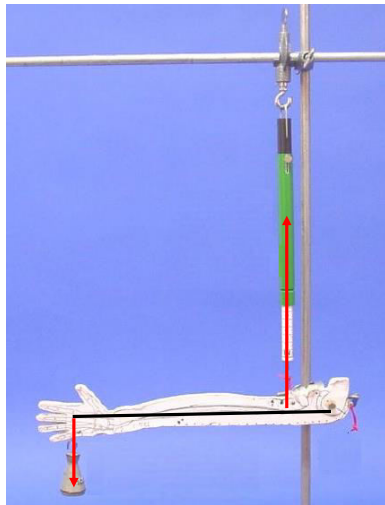
Gepard



24

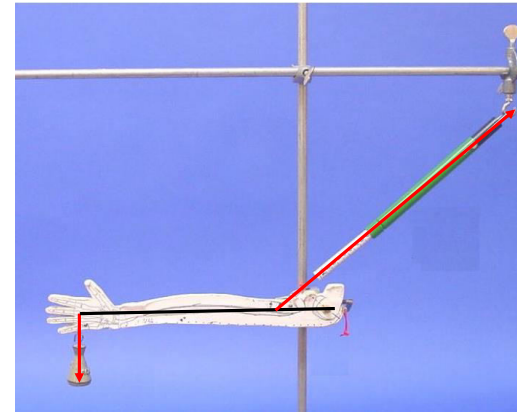
Der Arm (Ellenbogengelenk) als einarmiger Hebel

Modell Bizeps bei senkrecht angreifender Kraft



25

Modell Bizeps bei nicht senkrecht angreifender Kraft

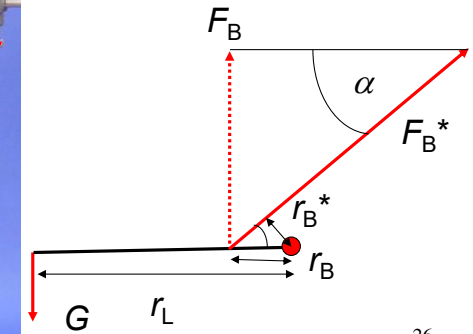


$$F_B r_B = G r_L$$

$$F_B^* r_B^* = G r_L$$

$$F_B < F_B^*$$

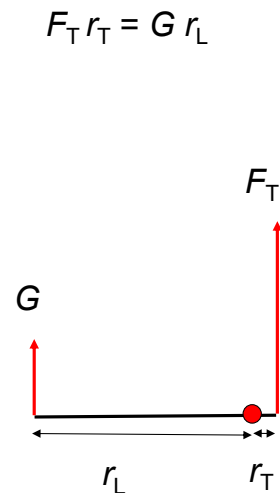
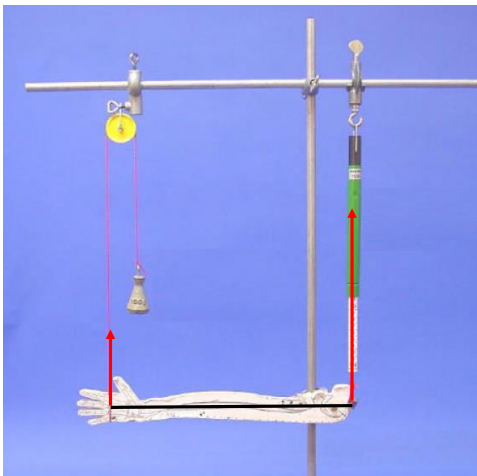
$$F_B = F_B^* \sin \alpha$$



26

Der Arm (Ellenbogengelenk) als zweiarmiger Hebel

Modell Trizeps bei senkrecht angreifender Kraft



27

Beispiele

(a) $F = 100 \text{ N}$

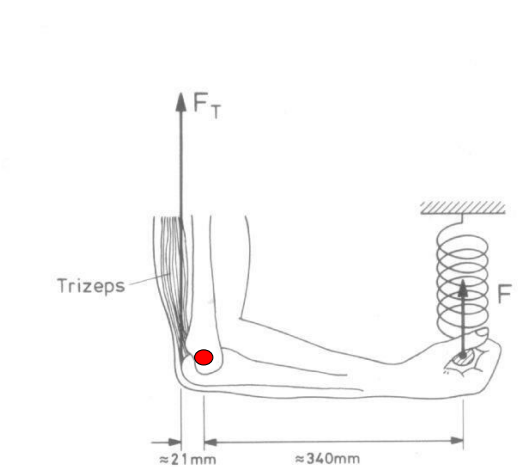
$$100 \text{ N} \cdot 340 \text{ mm} = F_B \cdot 34 \text{ mm}$$

$$F_B = 1000 \text{ N}$$

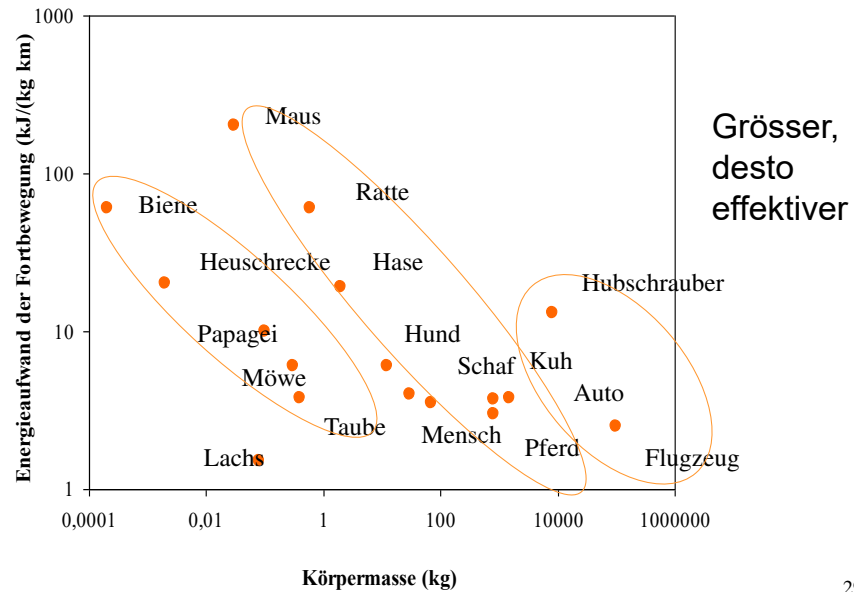
(b) $F = 100 \text{ N}$

$$100 \text{ N} \cdot 340 \text{ mm} = F_T \cdot 21 \text{ mm}$$

$$F_T = 1619 \text{ N}$$



Wirkungsgrad der Bewegungen von Tieren

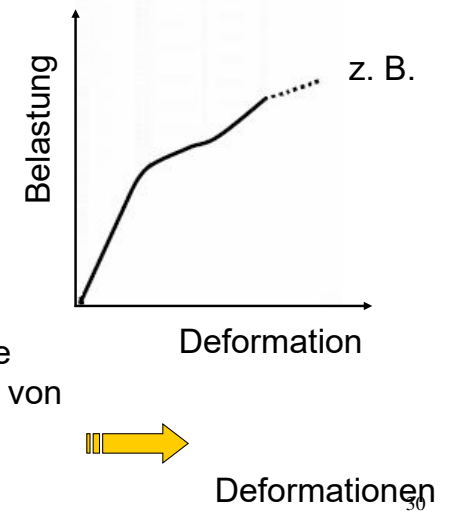


29

Andere Bewegungen im Körper:

- Bewegungen bei Atmung
- Herztätigkeit
- Blutströmung
- ...

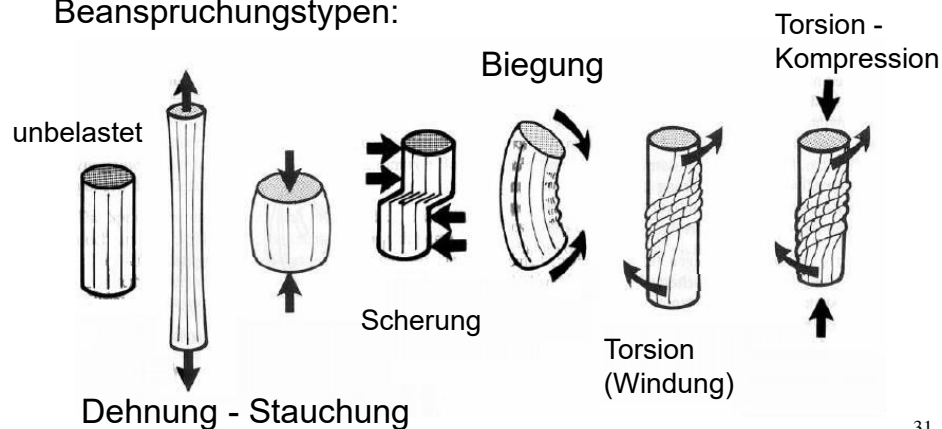
Belastungsdiagramm:



Mechanische Belastungen auf den Bewegungsapparat

Krafteinwirkung → Bewegung, Deformation

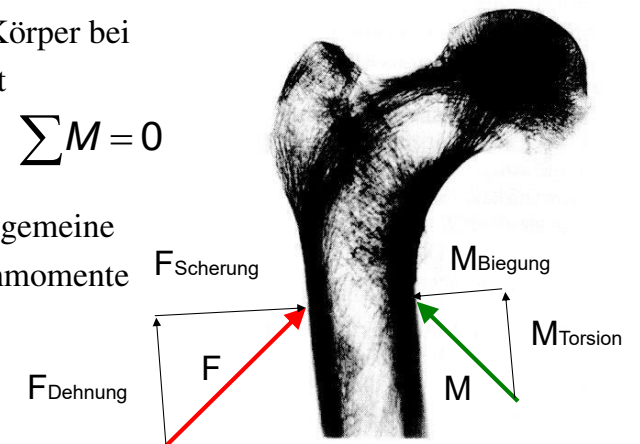
Beanspruchungstypen:



31

Deformationen (einfacher zu lernen) ●

- Es gäbe ein Körper bei gleichgewicht
- $$\sum F = 0 \text{ und } \sum M = 0$$
- aber wirken allgemeine Kräfte und Drehmomente



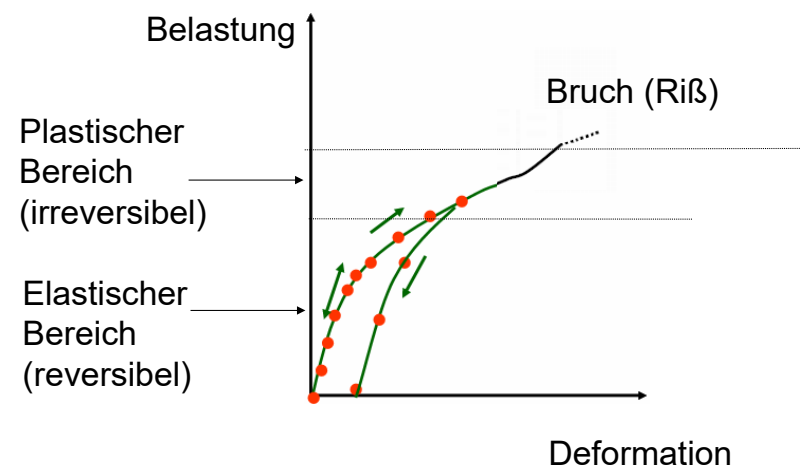
32

Belastungen und Wirkungen

Teilsysteme	Spezifische Mechanische Beanspruchung	Pathogenetische Wirkung
Knochen	Biege-, Scherbeanspruchung	Fraktur, Ermüdungsbruch
Gelenkknorpel	Scher-, Druckbeanspruchung	Verschleiß, Degeneration, Arthrose
Bänder	Zugbeanspruchung	Überdehnung, Schlottergelenk
Muskulatur	Zugbeanspruchung	Spannungen, Krämpfe, Schmerzen, Myogelosen, Kontrakturen
Sehenansätze	Zugbeanspruchung	Tendoperiostitis

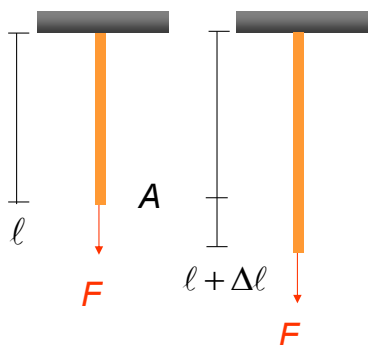
33

Bereiche des Belastungsdiagrammes



34

Dehnung — Stauchung



Dehnung (Stauchung):

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell}, \quad [\varepsilon] = 0$$

Zugspannung
(Druckspannung):

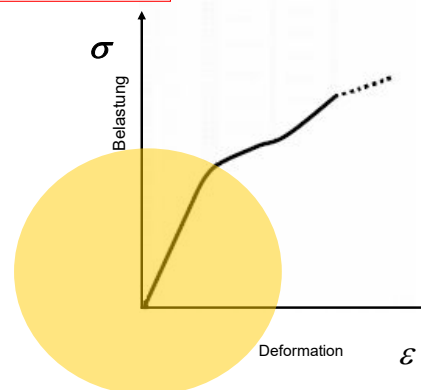
$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad [\sigma] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$$

35

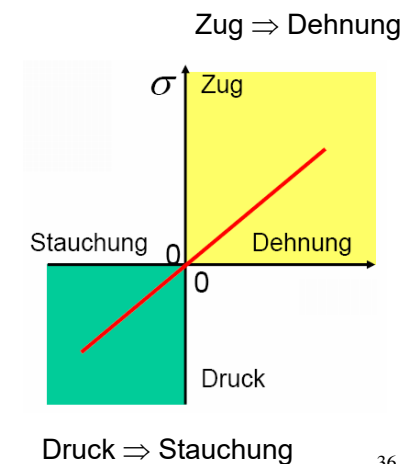
Dehnung — Stauchung: Hookesches Gesetz

$$\sigma = E\varepsilon \Leftrightarrow \frac{F}{A} = E \frac{\Delta\ell}{\ell}$$

E : Elastizitätsmodul
(Youngsches Modul), $[E] = \text{Pa}$

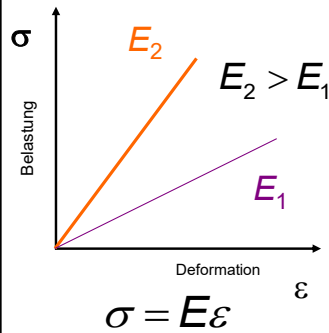


Gültigkeitsbereich für das Hookesche Gesetz (innerhalb des elastischen Bereiches)



36

Dehnung — Stauchung: Elastizitätsmodul



E — „Widerstand“ gegen Dehnung oder Stauchung

Stoff	E (MPa)
Stahl	200 000
Gold	78 000
Glas	50 000
Gummi	1

Stoff	E (MPa)
Knochen	10 000
Kollagen	1 500
Bandscheibe	5
Elastin	0,5

„Elastisch“ in der Umgangssprache bedeutet:

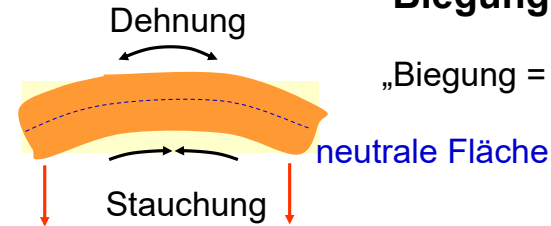
- breiteren elastischen Bereich,
- kleineres E

vgl: Kompressibilitätsmodul = $1/\text{Kompressibilität}$
Widerstand = $1/\text{Leitfähigkeit}$

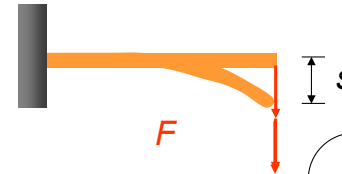
37

Biegung

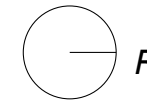
„Biegung = Dehnung + Stauchung“



Θ — Formfaktor



$$s = \frac{1}{3E} \cdot \frac{I^3}{\Theta} \cdot F$$

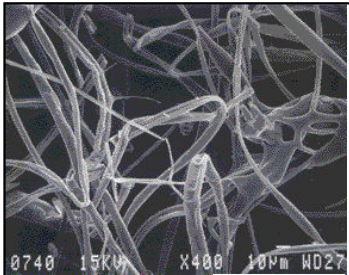


$$\Theta = \frac{\pi}{4} \cdot R^4 \quad \text{für volle Stange}$$



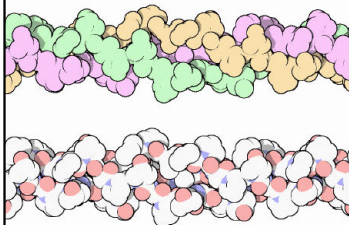
$$\Theta = \frac{\pi}{4} \cdot (R_2^4 - R_1^4) \quad \text{für Röhre}$$

38

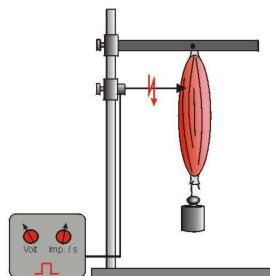
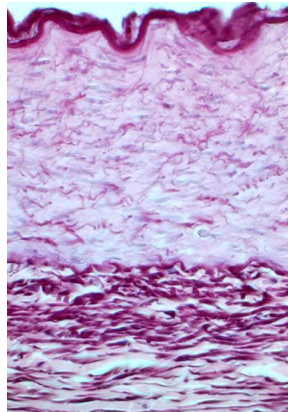


Elastin

Kollagen



Mechanische Eigenschaften von biologischen Stoffen



Einleitung ●

- Struktur von Kollagen
- Struktur von Elastin
- Elastizität von Adern
- Elastizität von Knochen

40

Kollagen

Kollagen ist in allen Tieren von Schwämmen bis zu Wirbeltieren zu finden. In Wirbeltieren macht es etwa die Hälfte (im Gewicht) der Proteine im Körper aus.

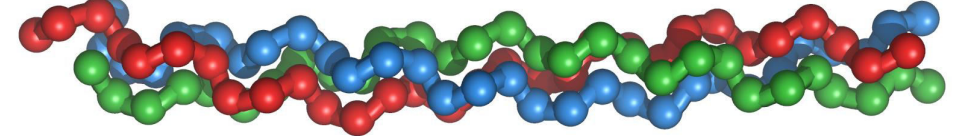
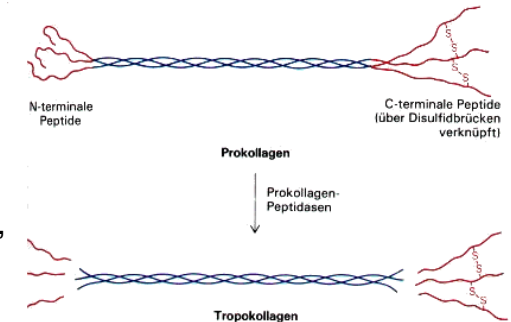
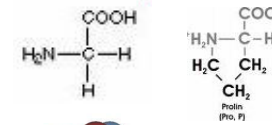
Es spielt wichtige Rolle in

- Sehnen,
- der Haut,
- Knochen,
- dem Glaskörper,
- den Blutgefäßwänden,
-

41

Struktur von Kollagen

- 1400 Aminosäure/Kette
- 300 nm lang
- 3 Ketten → Tripelhelix
- Glycin, Prolin, Hydroxiprolin,



Anordnung der Kollagenmoleküle

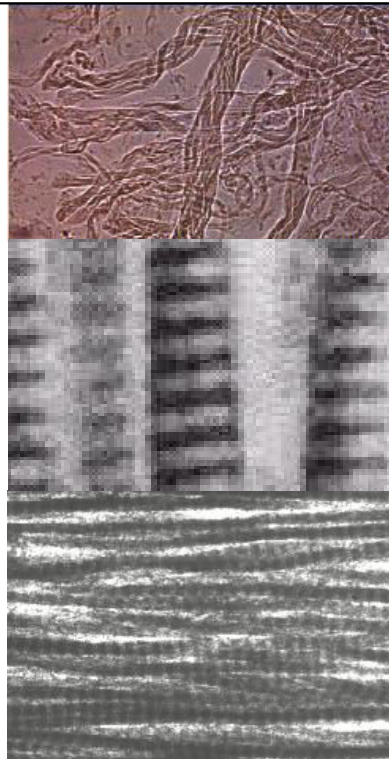
Faser



Fibrillen



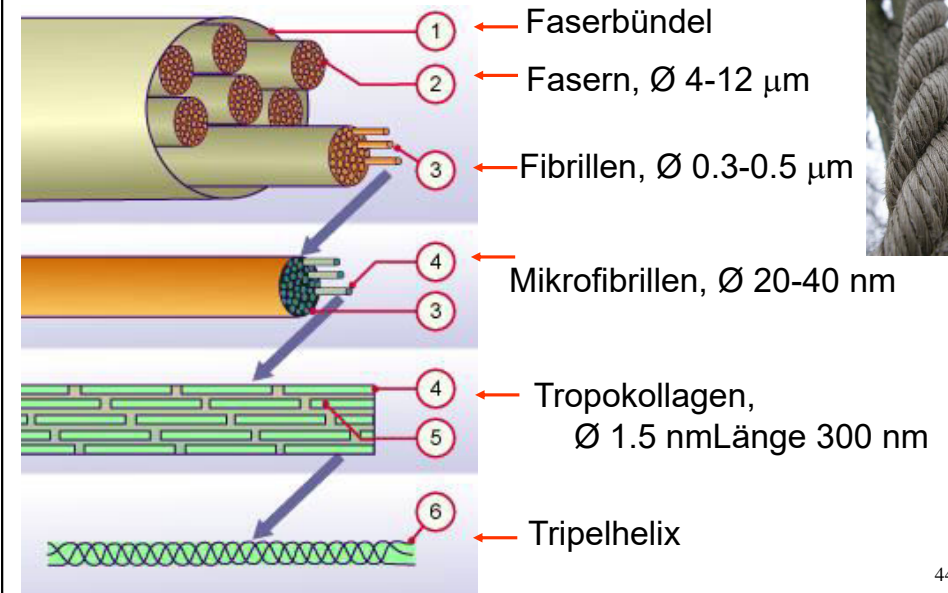
Kollagenmoleküle



43

Kollagene Fasern

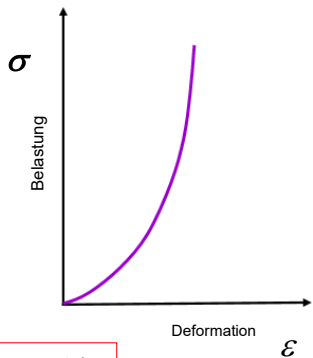
wie Seil



44

Dehnung von Kollagenfasern

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad [\sigma] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$$



$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}, \quad [\varepsilon] = 0$$

(Luftdruck: 0,1 MPa)

Verhärtung:

$$E = 300 \text{ MPa} \dots 2\,500 \text{ MPa}$$

Max. Belastung:

$$\sigma_R \approx 60 \text{ MPa} \quad \varepsilon_R \approx 0,08$$



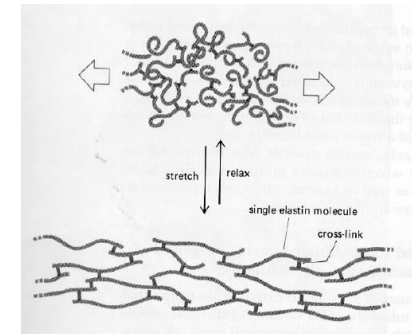
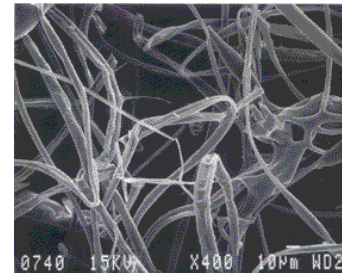
Sehnen, Bänder

45

Elastin

Nicht wasserlöslich, einzelne Moleküle bilden durch Kreuzbindungen ein Netz.

Struktur ist wenig bekannt.



46

Elastin vs. Kollagen

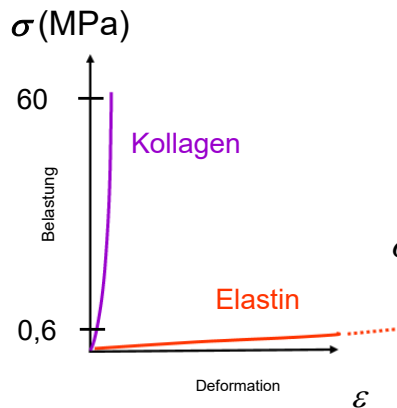
Verhärtung:

$$E = 0,1 \text{ MPa} \dots 0,4 \text{ MPa} \quad E = 300 \text{ MPa} \dots 2\,500 \text{ MPa}$$

Max. Belastung:

$$\sigma_R \approx 0,6 \text{ MPa} < \sigma_R \approx 60 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta \ell}{\ell} \approx 3 > \varepsilon_R \approx 0,08$$



47

Vergleich von Elastin und Kollagen

- Beide verhärten sich bei wachsender Belastung, jedoch Kollagen stärker;  **Kollagen** schützt besser vor Überdehnung.
- E von Elastin ist cca. 4000x kleiner;  **Elastin** ist wesentlich dehnbarer.
- σ_R von Kollagen ist cca. 100x größer;  **Kollagen** besitzt wesentlich höhere Reißfestigkeit.

48

Physiologische Funktionen von Kollagen und Elastin

Kollagen gibt dem Gewebe Festigkeit und Widerstand gegen Deformationen, schützt vor Überdehnung und Reiß.

Elastin gibt dem Gewebe Dehnbarkeit und Elastizität.

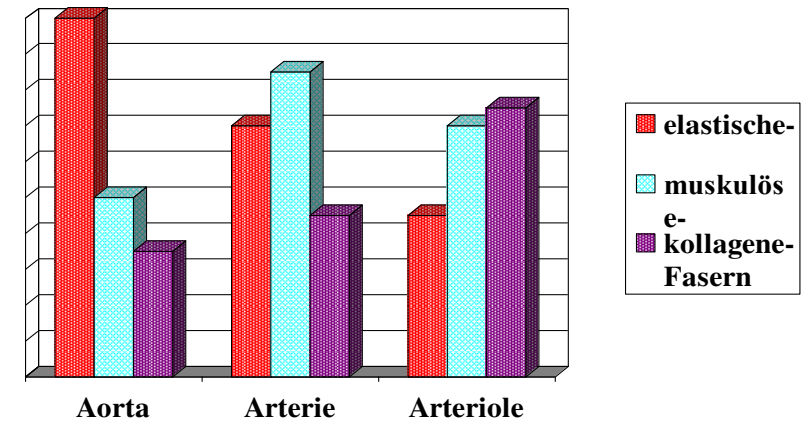
z. B. Blutgefäßwände:

Bei physiologischen Druckschwankungen müssen sie leicht dehnbar und elastisch sein um die Druckwellen dämpfen zu können; $\longleftrightarrow$ Sie dürfen nicht übergedehnt werden und reißen.

Kollagen und Elastin in anderen Geweben: Haut, Bandscheibe, Knorpel

49

Zusammensetzung der Aderwände bei verschiedenen Adern



50

Mechanische Funktion der Aderwände

Blut aufzunehmen, zu speichern, überzuleiten, Druckwellen zu dämpfen.

Druckänderungen (Δp) bedeuten starke mechanische Belastung für Blutgefäße und für Organe.



Volumenänderungen (ΔV)
→ Durchmesseränderungen

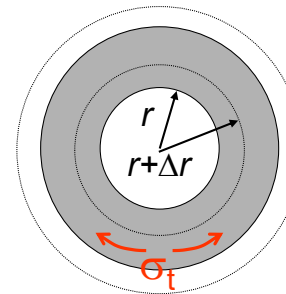
Frage: Was ist der Zusammenhang zw. Δp und ΔV ?

51

Volumenänderung von Blutgefäßen

1. Schritt:

Umfang des Kreises: $U = 2\pi r$

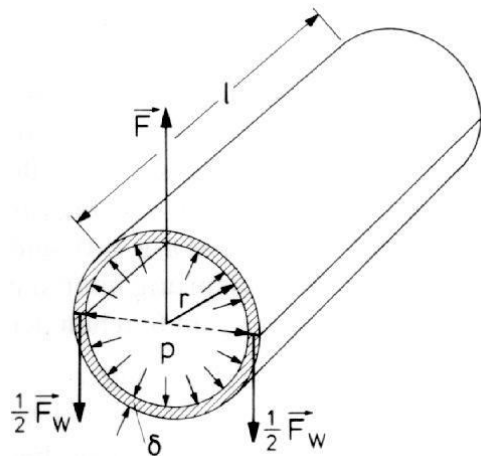


$$\varepsilon_t = \frac{\Delta U}{U} = \frac{2\pi(r + \Delta r) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{\Delta r}{r} \quad [\text{Gl.1}]$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} \sigma_t \quad [\text{Gl.2}]$$

52

2. Schritt:



im Gleichgewicht für die obere Hälfte des Zylinders:

$$F_w = F$$

$$2 \cdot \sigma_t \cdot \delta \cdot l = p \cdot 2 \cdot r \cdot l$$

$$\sigma_t = \frac{r}{\delta} p \quad [\text{Gl.3}]$$

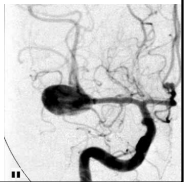
Laplace-Frank Gleichung

53

Konsequenzen der Laplace-Frank Gleichung

Aorta	Arterie	Arteriole
$r = 1,2 \text{ cm}$	$0,2 \text{ cm}$	$15 \mu\text{m}$
$\delta = 2 \text{ mm}$	1 mm	$20 \mu\text{m}$
relative Zugspannung: 8	2,7	1

→ Aneurysma



3. Schritt:

Volumenänderung: $V = r^2 \cdot \pi \cdot l \rightarrow V = (r + \Delta r)^2 \cdot \pi \cdot l = (r^2 + 2 \cdot r \cdot \Delta r + \Delta r^2) \cdot \pi \cdot l$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{2 \cdot r \cdot \Delta r + \cancel{\Delta r^2}}{r^2} = 2 \frac{\Delta r}{r} \uparrow = 2 \varepsilon_t \uparrow = 2 \frac{1}{E} \sigma_t \uparrow = \frac{2}{E} \frac{r}{\delta} p$$

Gl.1 Gl.2 Gl.3

$$\frac{\Delta V}{V} = D \cdot p$$

$$D = \frac{2}{E} \frac{r}{\delta}$$

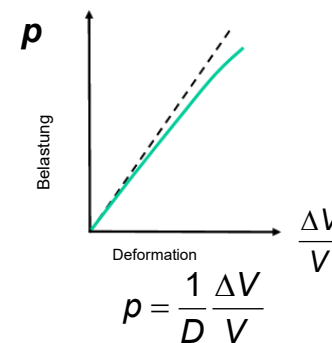
Distensibilität
(Dehnbarkeit)

genauer: $D = \frac{3}{2E} \frac{r}{\delta}$

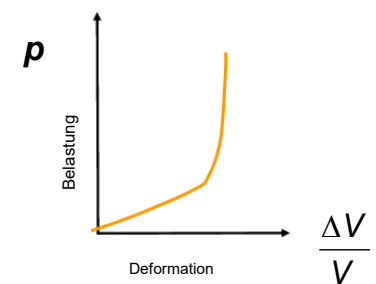
55

Volumenänderung der Aorta

Erwartung:



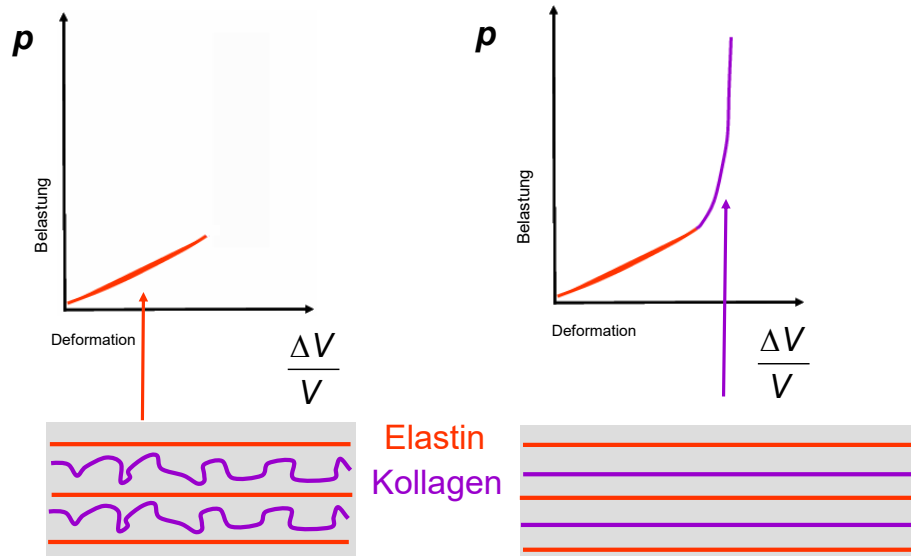
Messungen:



$$D = \frac{2}{E} \frac{r}{\delta}, \quad \frac{1}{D} = \frac{E}{2} \frac{\delta}{r}$$

56

Erklärung der gemessenen Belastungsdiagrammes



57

Mechanische Funktionen der Knochen

- Stützfunktion
- Schützfunktion
- Bewegungen
- Speicherung von Mineralien (Ca, P)

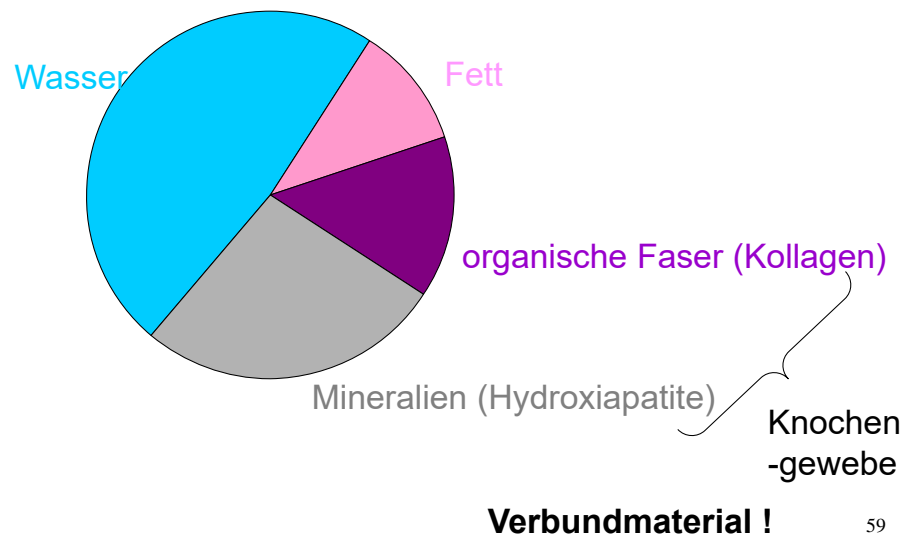
fest, hart,
gleichzeitig
leicht, elastisch,
adaptionsfähig



**Zusammensetzung,
Struktur des Knochens**

58

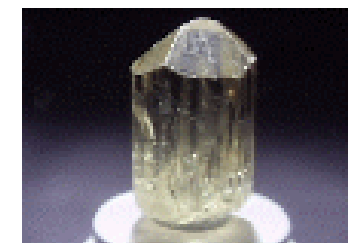
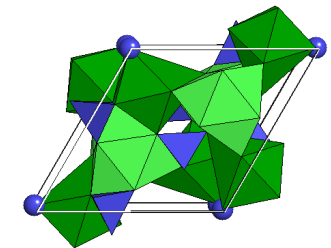
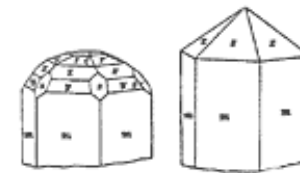
Zusammensetzung von Knochen



59

Hydroxiapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$

hexagonale Kristalle



Im Knochen: 20-60 nm lange, 6 nm dicke Kristallchen.
(Ihre Gesamtfläche bei Menschen beträgt 60-70 Ha!)

60

Verteilung der Apatitekristalle im Knochen

Kollagenfasern → Matrix

+

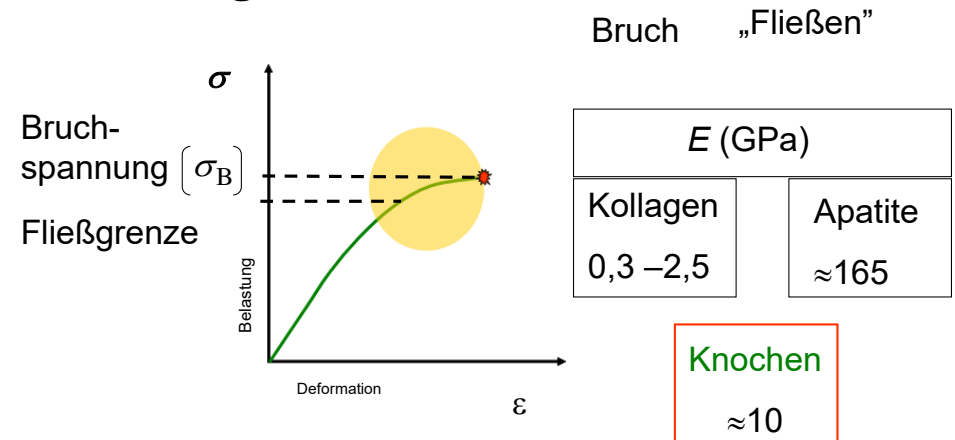
Apatitekristalle, verteilt
zw. Kollagenfasern

Mehr Kristalle, wo die
Belastung größer ist.



61

Belastungsdiagramm bei Dehnung (Stauchung)



62

Elastizität und Festigkeit von Knochen bei Dehnung

z.B.:

	E (GPa)	σ_B (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)
Pferd	25,5	121	0,75
Rind	25	113	0,88

	E (GPa)	σ_B (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)
Beton	16,5	2,1	0,01
Granit	52	4,8	0,001



**Knochen
sind
fester
als
Beton
oder
Granit!**

63

Elastizität und Festigkeit von Knochen bei Stauchung

z.B.:

	E (GPa)	σ_B (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)
Pferd	9,4	145	2,4
Rind	8,7	147	1,7

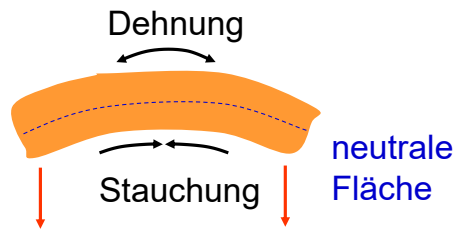
	σ_B (MPa)
Beton	21
Granit	145

**Knochen
sind
fester
als
Beton
oder
Granit!**

64

Optimale Struktur für Biegung

„Biegung = Dehnung + Stauchung“

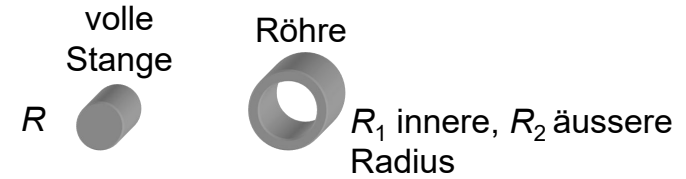


(„Optimale“:
höchste Festigkeit
bei niedrigsten
Stoffaufwand.)

➡ Röhrenstruktur!

65

Vorteil der Röhrenstruktur



m und ρ und l
sind gleich ➡ V gleich ➡ A gleich

$$R^2 \cdot \pi = (R_2^2 - R_1^2) \cdot \pi$$

66

$$R^2 \cdot \pi = (R_2^2 - R_1^2) \cdot \pi \quad []^2$$

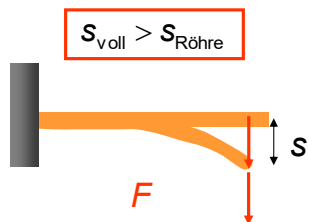
$$R^4 = R_2^4 - 2 \cdot R_2^2 \cdot R_1^2 + R_1^4$$

$$R^4 < R_2^4 - R_1^4$$

$$\Theta_{\text{voll}} < \Theta_{\text{Röhre}}$$

$$\left(\begin{array}{l} R_2 > R_1 \\ R_2^2 \cdot R_1^2 > R_1^2 \cdot R_1^2 = R_1^4 \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Biegungs} = \frac{1}{3E} \cdot \frac{l^3}{\Theta} \cdot F \\ \bullet \quad \Theta = \frac{\pi}{4} \cdot R^4 \\ \circ \quad \Theta = \frac{\pi}{4} \cdot (R_2^4 - R_1^4) \end{array} \right)$$



Bei dergleichen Stoffaufwand
ist die Röhre fester!

67

Optimale Wanddicke

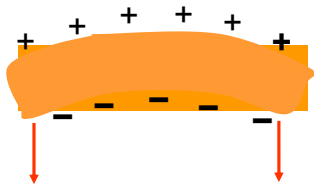
Aus ausführlichen Rechnungen: $R_2/R_1 \cong 1,4$



Gleiche Masse:	Festigkeit	100 %	310 %
Gleiche Festigkeit:	Masse	100 %	57 %

68

Piezoelektrizität von Knochen



elektr.
Feldstärke $\approx 0,5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$

Selbstregulation:

bei lang
andauernden
Deformation



Elektrotherapie?
69

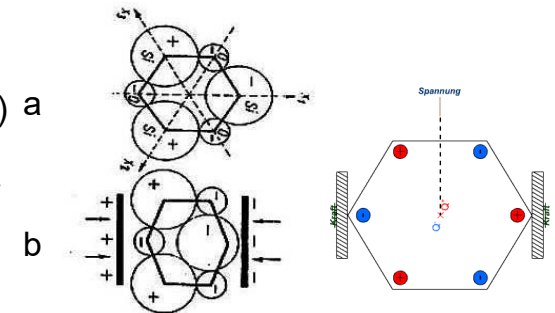
Piezoelektrischer Effekt

Wiederholung Ultraschal Fol. 27

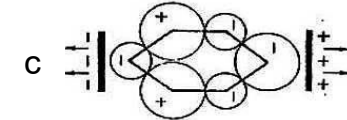
elektrische Signalquelle
(Sinusoszillator)+
Wandler
(Piezoelektrischer Kristall) a

Erzeugung von US: reziproker ~
Detektierung von US: direkter ~

(a) Die Schwerpunkte der
negativen und positiven
Ladungen
zusammenfallen.



(b) und (c) Wegen des
Druckes die
Schwerpunkte wird
getrennt, entsteht eine
Spannung.



zu Hause:
Gasanzünder

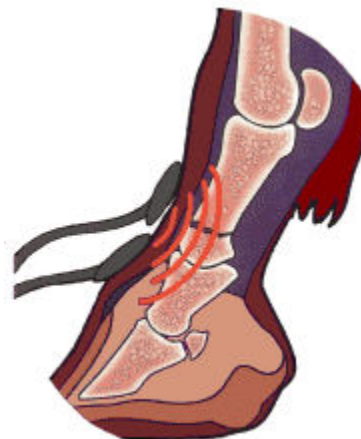
Hochtöner



Elektrotherapie

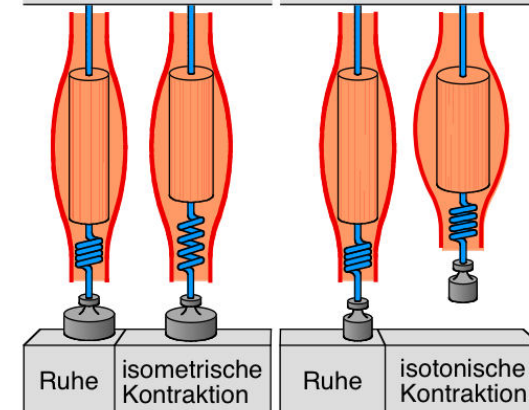


V100[®]



Muskel: Aktive Elastizität

die Länge
bleibt

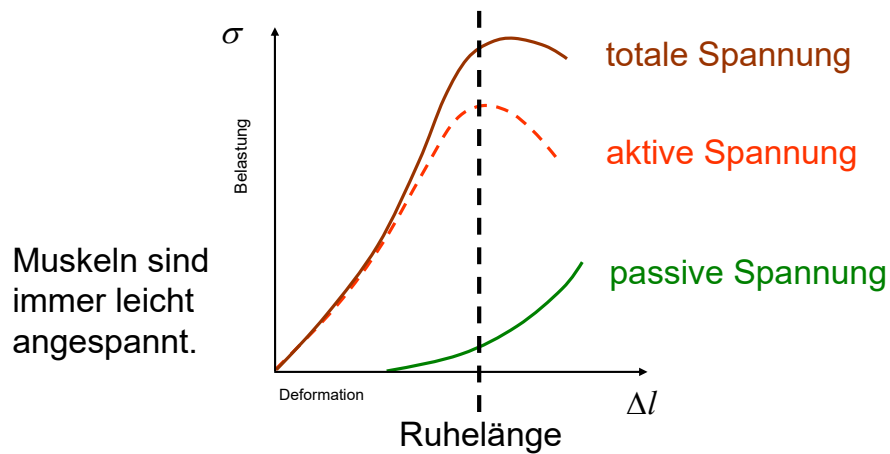


die
mechanische
Spannung
bleibt

isometrisch
(„gleichen Maßes“)
Die Kraft erhöht sich bei
gleicher Länge des Muskels.

isotonisch
(„gleichgespannt“)
Der Muskel verkürzt sich
ohne Kraftänderung.

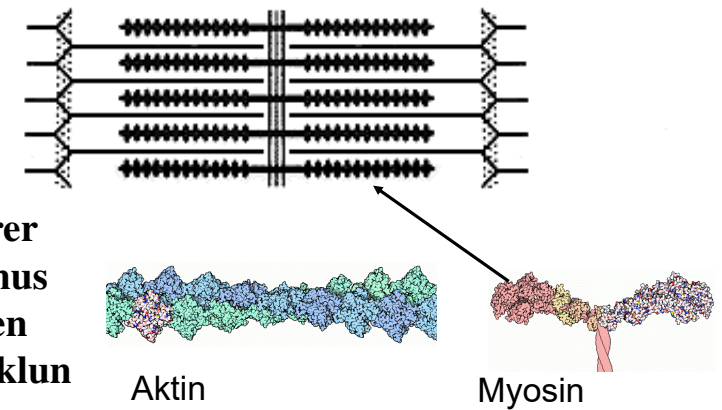
Kraftentwicklung (Belastungsdiagramm)



73

„Gleitende“ Filamente

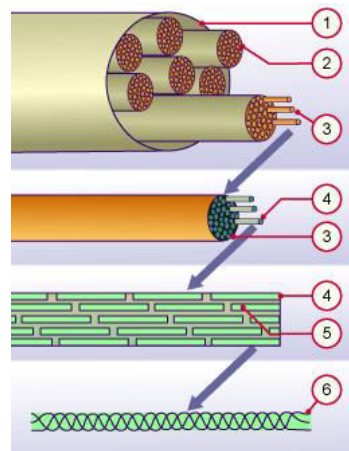
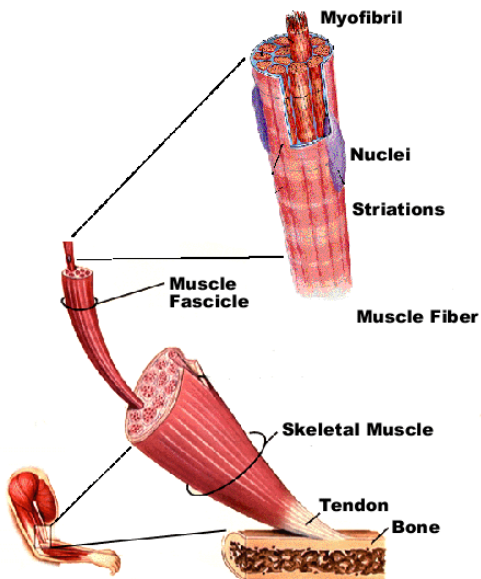
Molekularer Mechanismus der aktiven Kraftentwicklung



74

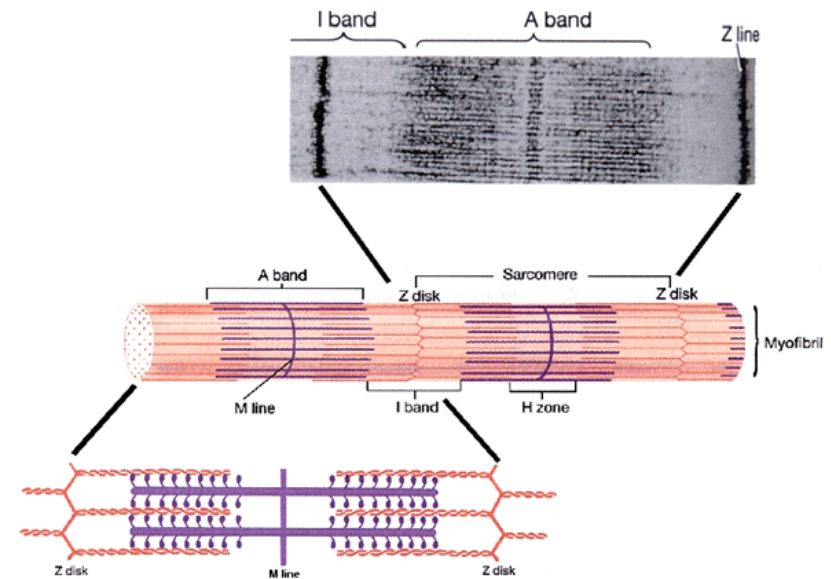
Aufbau von Muskeln

(Ähnlich wie beim Kollagene Fasern „wie Seil“)



75

Sarkomer



76

Zusammenfassung

Mechanik:

Im Allgemein, Stabilität,

Mechanische Eigenschaften von biologischen

Stoffen: Kollagen und Elastin, Knochen

77

Fragen, Bemerkungen, Kommentare?

Vielen Dank für ihre



Aufmerksamkeit!

78

Fragen, Bemerkungen, Kommentare?