

Physikalische Grundlagen der zahnärztlichen Materialwissenschaft

– 12 –

Biomechanik 1.

erarbeitet von: Gergely AGÓCS, Ferenc TÖLGYESI
26. November 2020.

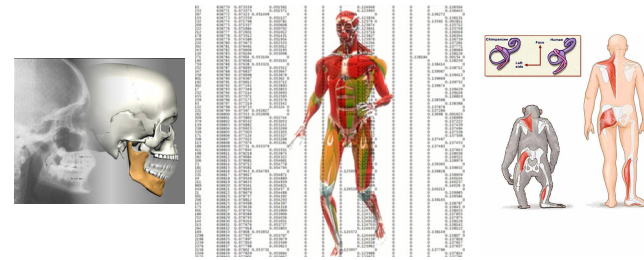
FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

1

Biomechanik

Die **Biomechanik** beschäftigt sich mit den Bewegungen des Körpers und der Körperteile, mit den im Körper auftretenden Kräften, Drehmomenten und mit deren Deformationswirkungen.



FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

2

Kräfte und Drehmomente im Körper

Siehe z.B. <http://www.motekmedical.com/products/hbm/>

Äußere Kräfte:

- Schwerkraft – Gewicht
- Kontakt mit anderen Körpern

Innere Kräfte:

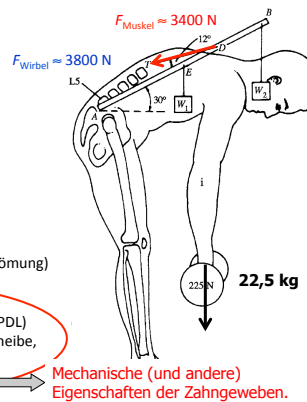
- Muskelkontraktion
- Flüssigkeitsströmung
- Osmotischer Druck

$F \approx 0 - 6000 \text{ N}$

Folge der Kräfte:

- Bewegung
 - Rotation (z. B. Gelenke)
 - Translation (z. B. Blutströmung)

- Deformation
 - Dehnung (z. B. Sehnen, PDL)
 - Stauchung (z. B. Bandscheibe, Zahnschmelz, Dentin)
 - ...



Mechanische (und andere)
Eigenschaften der Zahngewebe.

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

3

Mechanische Eigenschaften von Geweben

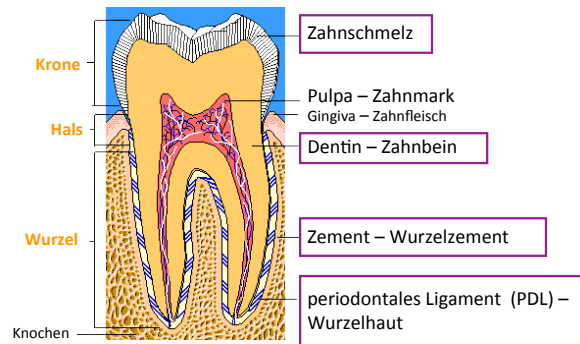


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

4

Zahngewebe und Gewebe um den Zahn

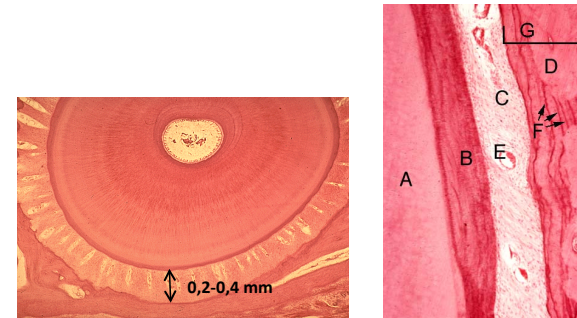


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

5

Periodontales Ligament (Wurzelhaut)



≈ Kollagen

Polymer

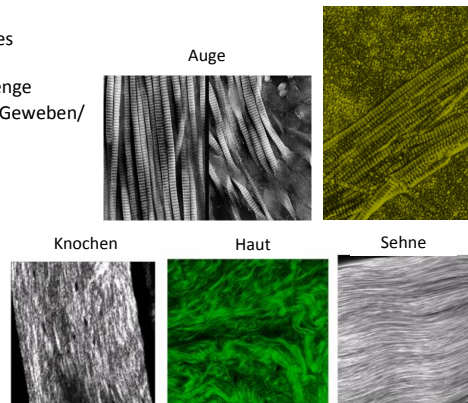
FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

6

Kollagen

- Strukturprotein
- Wichtigstes Protein des Bindegewebes
- Etwa ¼ der Proteinmenge
- Wichtige Rolle in den Geweben/ Organen:
 - Sehnen, Bänder,
 - Haut,
 - Knorpel,
 - Knochen,
 - Zahn,
 - Aderhaut
 - Glaskörper,
 - Cornea,
 - ...

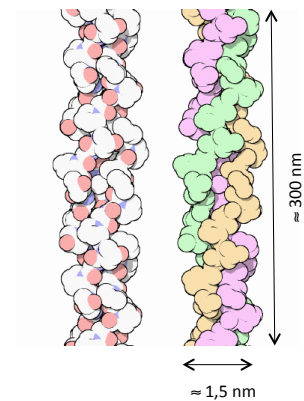


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

7

Das Kollagenmolekül



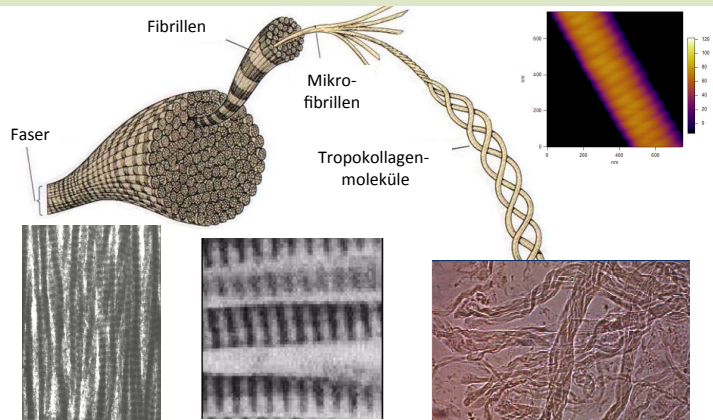
- ≈1400 Aminosäuren/Kette
- Glycin (kb. 1/3), Prolin (kb. 1/10), Hydroxyprolin, ...
- 3 Ketten → Tripelhelix

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

8

Anordnung der Kollagen-Moleküle

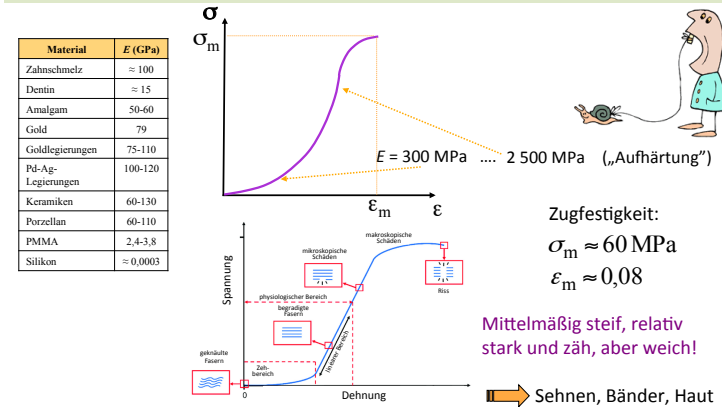


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

9

Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Kollagen

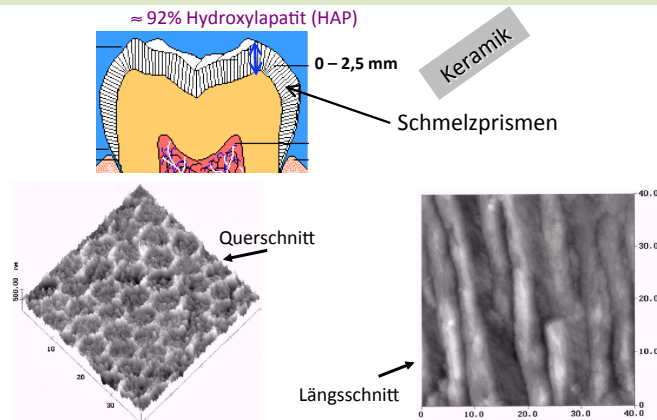


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

10

Zahnschmelz



FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

11

Hydroxylapatit



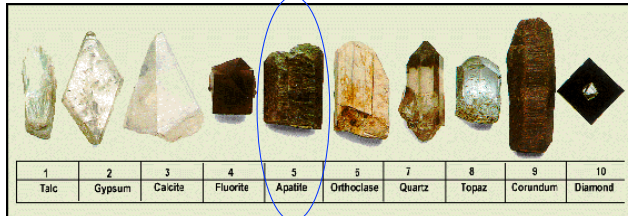
FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

12

Eigenschaften von Hydroxylapatit

Mohs-Skala:



HAP: $HV \approx 6 \text{ GPa}$ $E \approx 140 \text{ GPa}$ $\sigma_m \approx 60 \text{ MPa}$ (Zug)
 $\approx 500 \text{ MPa}$ (Druck)

Zahn-schmelz: $HV \approx 3-6 \text{ GPa}$ $E \approx 90-100 \text{ GPa}$ $\sigma_m \approx 50 \text{ MPa}$ (Zug)
 $\approx 400 \text{ MPa}$ (Druck)

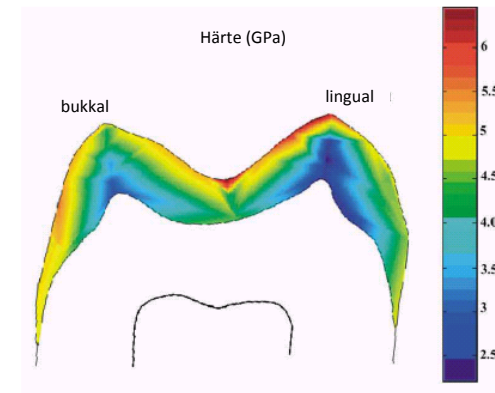
Sehr steif, hart, stark, aber brüchig!

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

13

Härteverteilung innerhalb des Zahnschmelzes



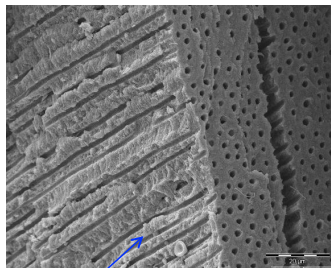
FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

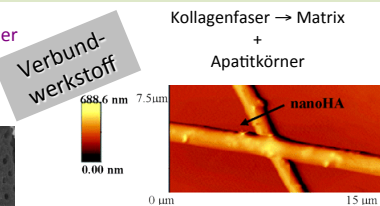
14

Dentin

$\approx 35\%$ organisch (Kollagen) + Wasser
 $\approx 65\%$ HAP



Dentinkanälchen



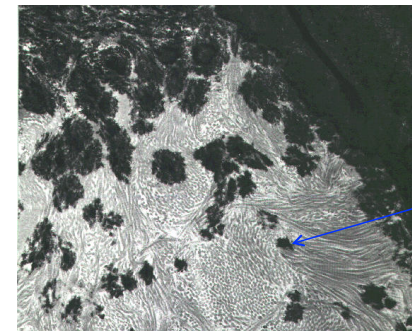
Hart und stark genug,
 gleichzeitig aber elastisch, zäh!

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

15

Zement



$\approx 50\%$ organisch (Kollagen)
 + Wasser
 $\approx 50\%$ HAP

HAP
 Kristallwachstum

Verbundwerkstoff

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

16

Zusammenfassung

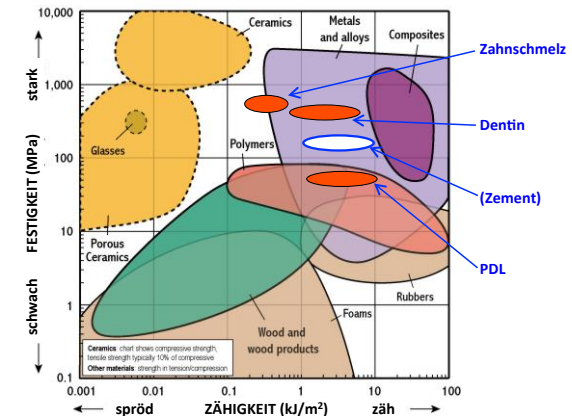
| | PDL (\approx Kollagen) | Dentin ($\approx 1/3$ Kollagen, $2/3$ HAP) | Zahnschmelz (\approx HAP) |
|------------------------------------|------------------------------|---|---------------------------------|
| Steifigkeit (E) (GPa) | 0,3-2,5 | 10-20 | 90-100 |
| Festigkeit (σ_m) (MPa) | 60 | 110 (Zug) 300 (Druck) | 50 (Zug) 400 (Druck) |
| Zähigkeit (kJ/m^2) | 1-10 | 0,5-5 | 0,1-1 |
| Härte HV (GPa) | | 0,5-1 | 3-6 |

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

17

Vergleich mit den unbelebten Materialien



FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

18

Thermische und elektrische Eigenschaften

Einige Wärmeleitzahlen:

| Stoff | λ (W/(m·K)) |
|-------------|------------------------|
| Zahnschmelz | 0,9 |
| Dentin | 0,6 |
| Amalgam | 23 |
| Gold | 300 |
| Porzellan | 1 |
| Glas | 0,6-1,4 |
| Akrylat | 0,2 |
| PMMA | 0,2-0,3 |

Einige Temperaturleitzahlen:

| Stoff | D ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) |
|-------------|---|
| Zahnschmelz | 0,5 |
| Dentin | 0,2 |
| Amalgam | 9,6 |
| Gold | 118 |
| Porzellan | 0,4 |
| Glas | 0,3-0,7 |
| Akrylat | 0,1 |
| PMMA | 0,12 |

Elektrische Leitfähigkeit (σ):

| Stoff | σ (S/m) |
|-------------|--------------------|
| Zahnschmelz | $2 \cdot 10^{-5}$ |
| Dentin | $3 \cdot 10^{-2}$ |
| Gold | $4,3 \cdot 10^7$ |
| Platin | $0,94 \cdot 10^7$ |
| Zirkon | $\approx 10^{-10}$ |
| Porzellan | $\approx 10^{-11}$ |
| Glas | $\approx 10^{-13}$ |
| PMMA | $\approx 10^{-12}$ |
| PE | $\approx 10^{-16}$ |

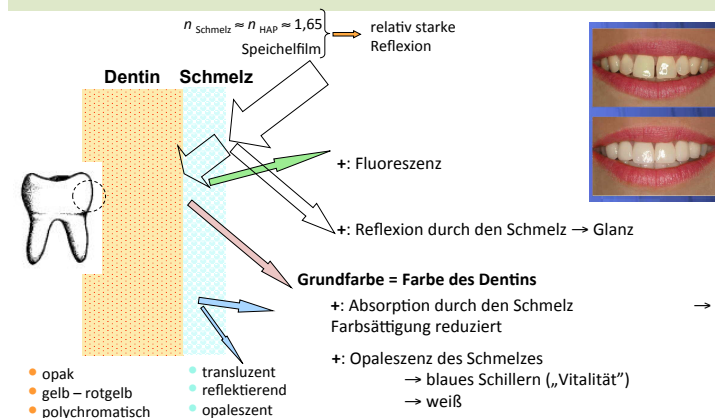
Sowohl elektrisch als auch thermisch sind Zahnschmelz und Dentin beide Isolatoren.

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

19

Optische Eigenschaften des Zahns

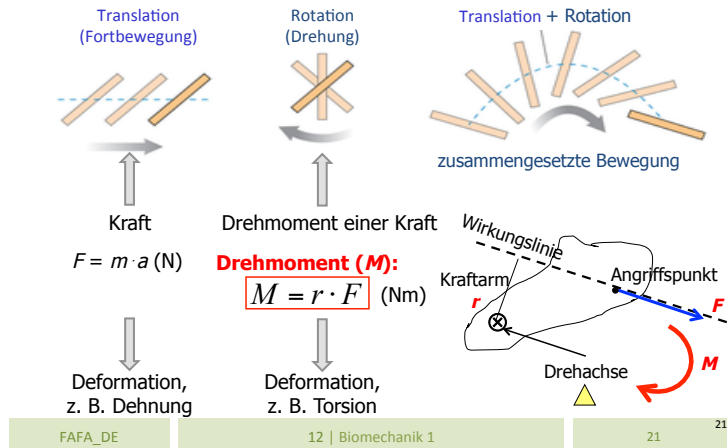


FAFA_DE

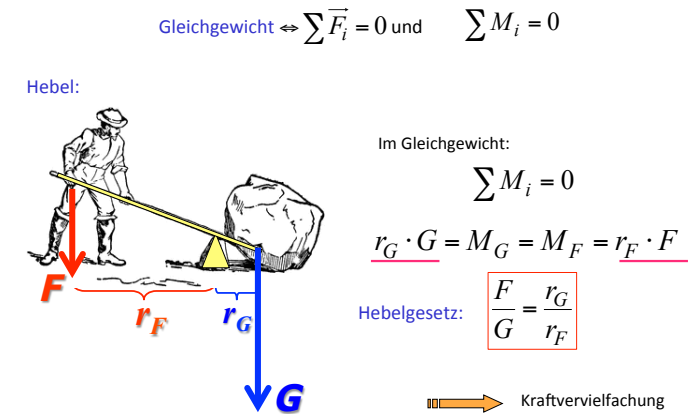
12 | Biomechanik 1

20

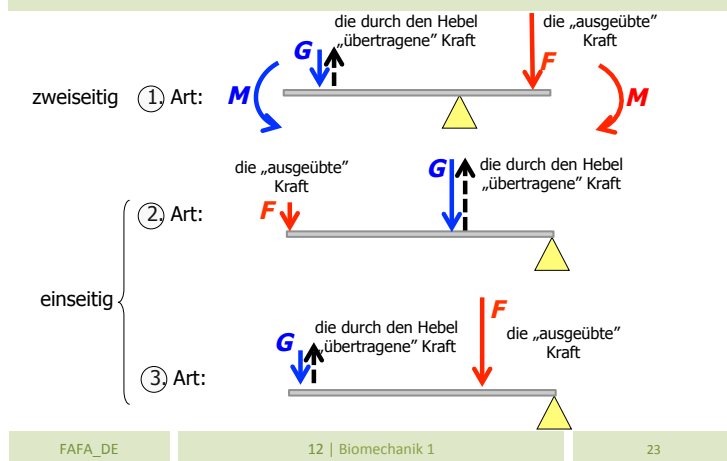
Bewegungsformen, Kraft und Drehmoment



Statik – Gleichgewicht. Hebel



Hebelarten



Beispiele



Hebel in der zahnärztlichen Praxis

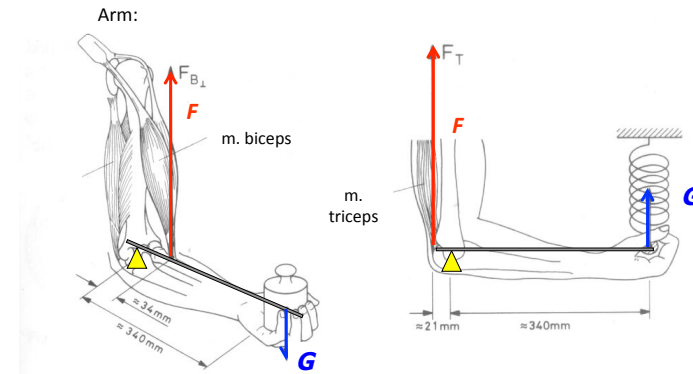


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

25

Hebel im Körper

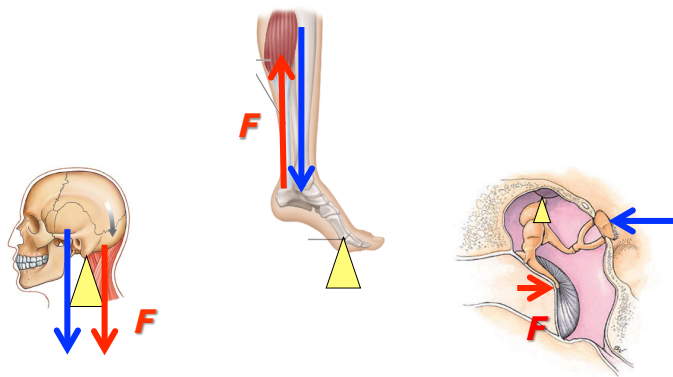


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

26

Hebel im Körper

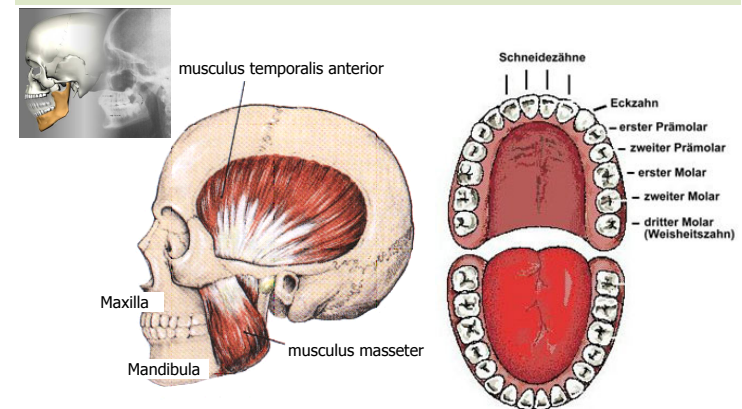


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

27

Kiefer und Zähne

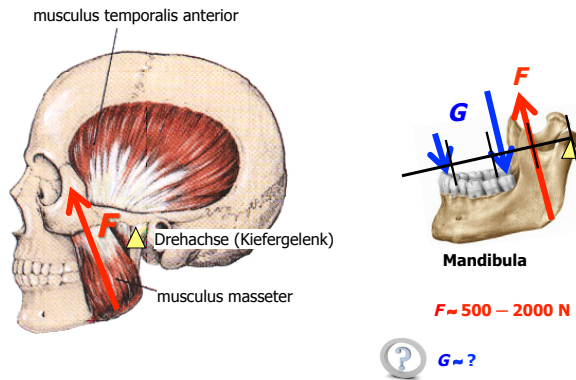


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

28

Die Mandibula als Hebel: Entstehung der Kaukräfte

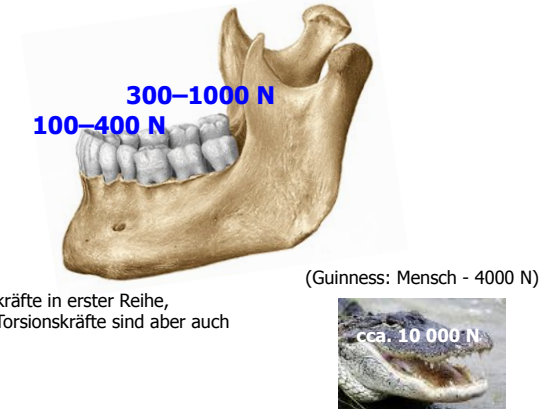


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

29

Die Größe der Kaukräfte



Diese sind Druckkräfte in erster Reihe, Scherkräfte und Torsionskräfte sind aber auch möglich.

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

30

Messung der Kaukräfte

Kraft → elektrisches Signal:

1. Deformationswandler
2. piezoelektrischer Wandler
3. Druckumwandler

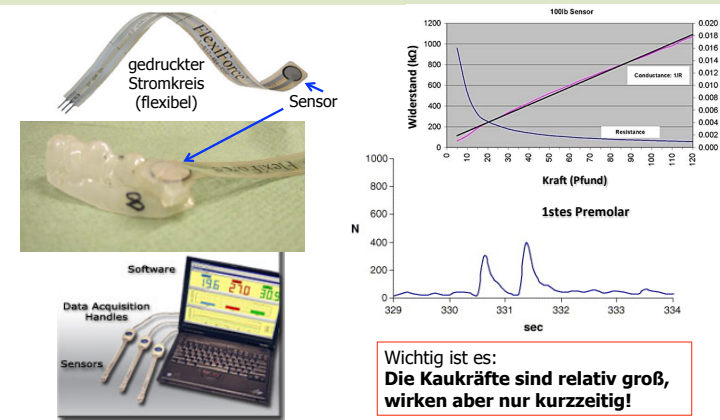


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

31

Eine konkrete Messung



FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

32

Kraft → Druck: Druckwerte beim Beißen und Kauen

Der Druck hängt außerhalb der Kräfte auch noch von der Fläche ab: $p = F/A$

2 Beispiele:
beim Beißen:



$$p = 400 \text{ N} / (10 \text{ mm}^2) = 400 \text{ N} / (10^{-5} \text{ m}^2) = 40 \text{ MPa}$$



beim Kauen: $p = 1000 \text{ N} / (1 \text{ cm}^2) = 1000 \text{ N} / (10^{-4} \text{ m}^2) = 10 \text{ MPa} \ll 400 \text{ MPa!}$
(= Druckfestigkeit des Zahnschmelzes)

ein extremes Beispiel:



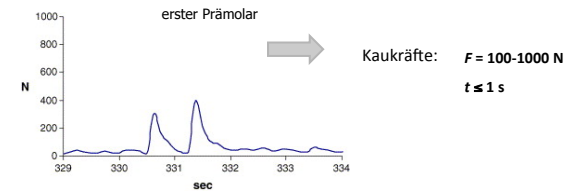
$$p = 400 \text{ N} / (1 \text{ mm}^2) = 1000 \text{ N} / (10^{-6} \text{ m}^2) = 400 \text{ MPa!}$$

FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

33

Auswirkung der Kaukräfte auf den Knochen



Wenn die Kaukräfte dauerhaft wirken würden:

| | | |
|--------------|---|----------------------|
| 3–5 Sekunden | ⇒ | Schmerz |
| ≈ Stunde | ⇒ | Gewebeschädigung ! |
| 7–14 Tage | ⇒ | Lockerung des Zahnes |

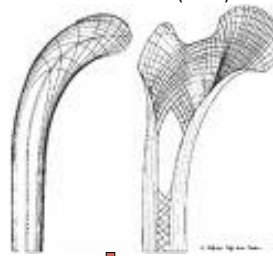
FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

34

Knochenumbau (remodeling)

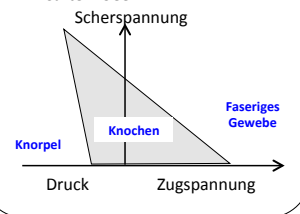
Wolff-Gesetz (1870)



Rolle der mechanischen Belastung

Druck ⇒ Abbau
Zugspannung ⇒ Aufbau

Carter 1988:



FAFA_DE

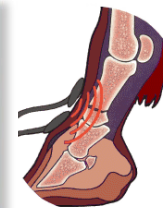
12 | Biomechanik 1

35

Mechanismus des Knochenumbaus

mechanische Belastung
↓
elektrisches Signal
(Piezoelektrisches/Strömungspotenzial)
↓
Regulierung des Osteogenesis
↓
mechanische Adaptation

Anwendung von elektrischen Feldern
für beschleunigung der
Knochenheilung: Elektrotherapie

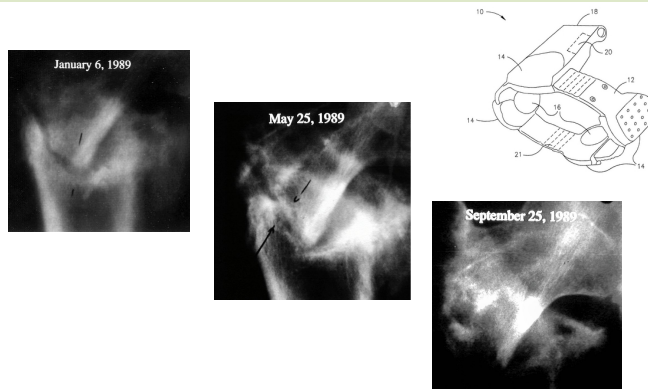


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

36

Mechanismus des Knochenumbaus



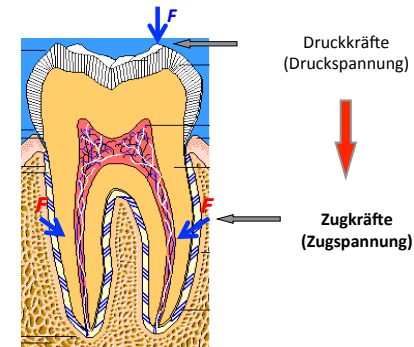
FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

37

Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

1. Der Zahn hängt auf den Kollagenfasern (PDL)!



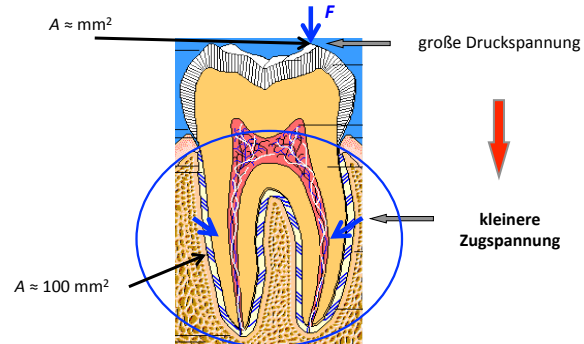
FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

38

Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

2. Große Fläche des Fasersystems (Wurzel)!

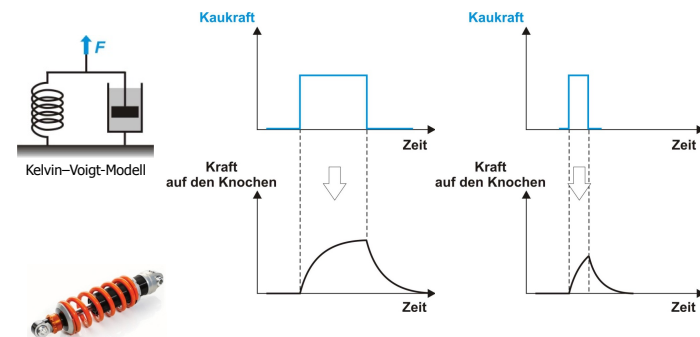


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

39

Dämpfung durch ein viskoelastisches Material



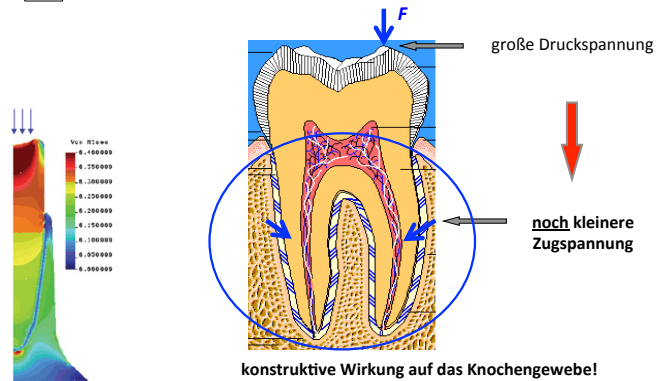
FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

40

Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

3. das PDL ist viskoelastisch!

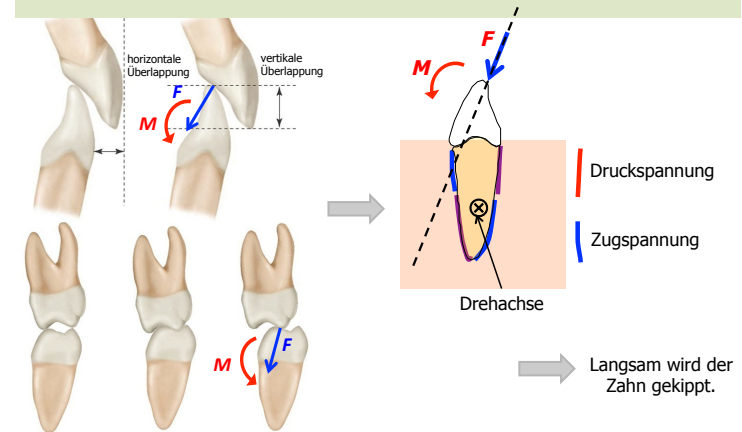


FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

41

Drehmoment einer Kaukraft



FAFA_DE

12 | Biomechanik 1

42