



## Physikalische Grundlagen der zahnärztlichen Materialkunde 12. Biomechanik 1

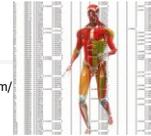


Die **Biomechanik** beschäftigt sich mit den Bewegungen des Körpers und der Körperteilen, mit den im Körper auftretenden Kräften und Drehmomenten und mit deren Deformationswirkungen.

1

## Kräfte und Drehmomente im Körper

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



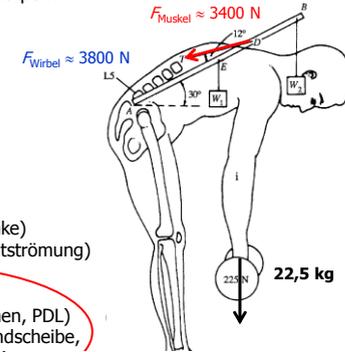
- Äußere Kräfte:
- Schwerkraft – Gewicht
  - Kontakt mit anderen Körpern

- 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)
  - ...

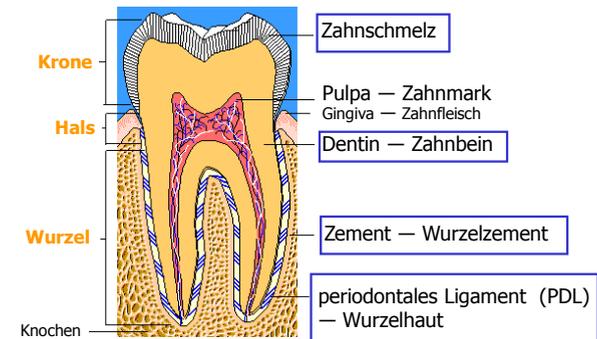


Mechanische (und andere Eigenschaften) der Zahngewebe. 2

## Mechanische Eigenschaften von Geweben

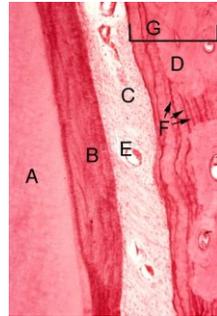
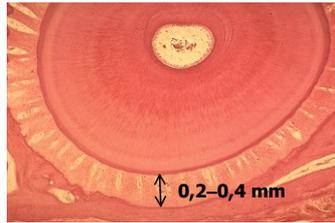


## Zahngewebe und Gewebe um den Zahn



4

## Periodontales Ligament (Wurzelhaut)



≈ Kollagen

Polymer

5

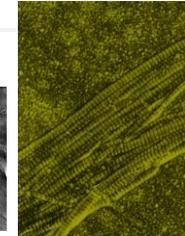
## Kollagen

- Strukturprotein
- Wichtigstes Protein des Bindegewebes
- Etwa 1/4 der Proteinmenge

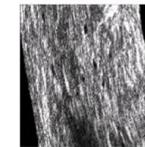
Wichtige Rolle in den Geweben/Organen:

- Sehnen, Bänder,
- Haut,
- Knorpel,
- Knochen,
- Zahn,
- Aderhaut
- Glaskörper,
- Cornea,
- ...

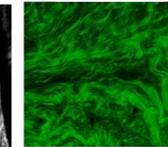
Auge



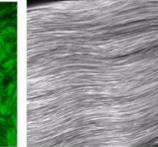
Knochen



Haut

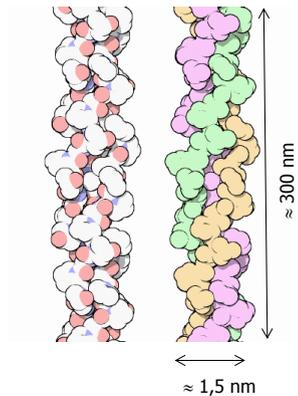


Sehne



6

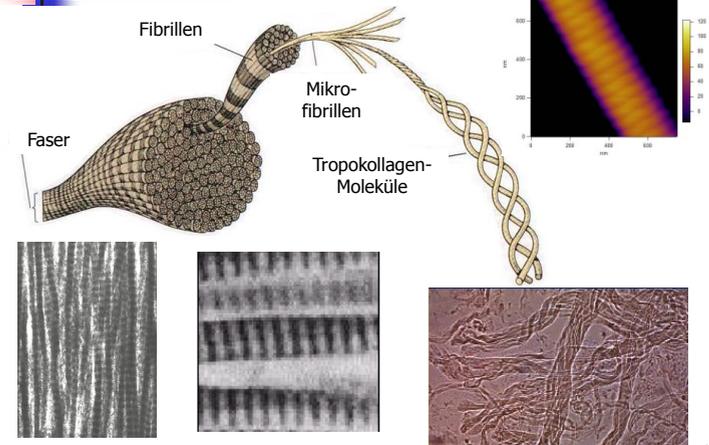
## Das Kollagen-Molekül



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

7

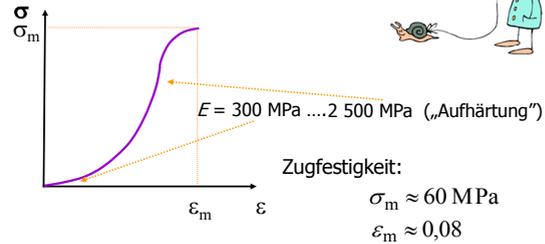
## Anordnung der Kollagen-Moleküle



8

## Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Kollagen

Material	E (GPa)
Zahnschmelz	≈ 100
Dentin	≈ 15
Amalgam	50-60
Gold	79
Goldlegierungen	75-110
Pb-Ag-Legierungen	100-120
Keramiken	60-130
Porzellan	60-110
PMMA	2,4-3,8
Silikon	≈ 0,0003



Mittelmäßig steif, relativ stark und zäh, aber weich!

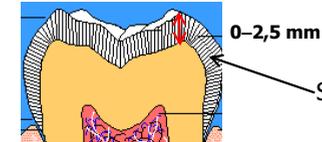
➡ Sehnen, Bänder, Haut

9

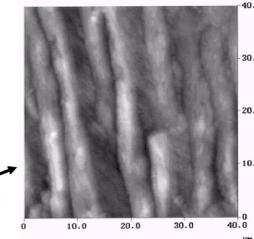
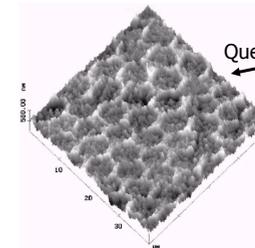
## Zahnschmelz

≈ 92% Hydroxiapatit (HAP)

Keramik



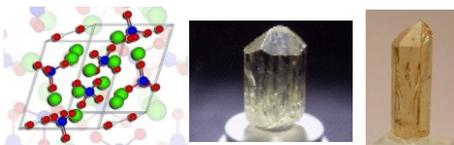
Schmelzprismen



10

## Hydroxyapatit

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



Im Dentin, im Knochen:

20-60 nm  
6 nm

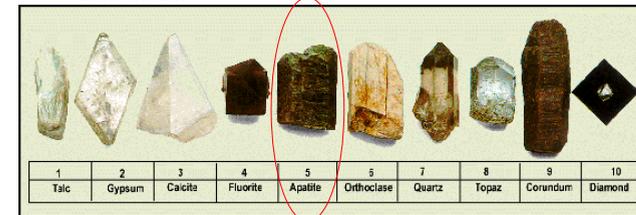
Im Zahnschmelz:

500-1000 nm  
30 nm

11

## Eigenschaften von Hydroxyapatit

Moh-Skala:



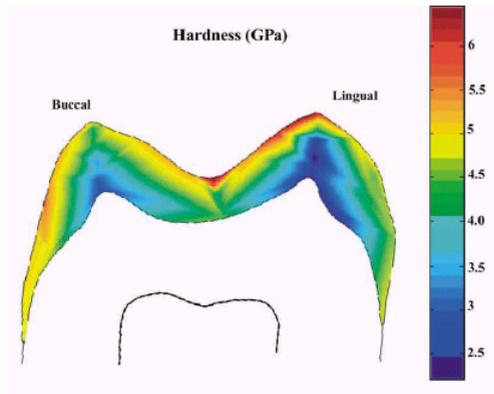
**HAP:**  $HV \approx 6 \text{ GPa}$   $E \approx 140 \text{ GPa}$   $\sigma_m \approx 60 \text{ MPa}$  (Zug)  
 $\approx 500 \text{ MPa}$  (Druck)

**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!

12

## Härteverteilung innerhalb des Zahnschmelzes



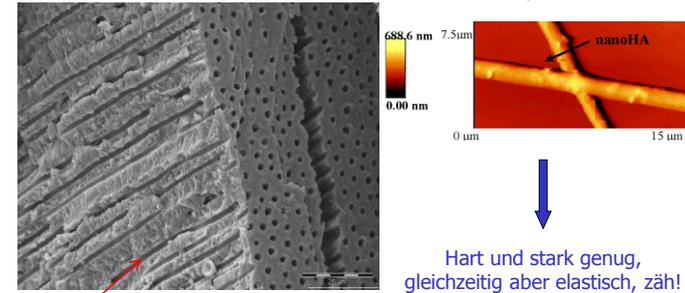
13

## Dentin

Verbundwerkstoff

≈ 35% organisch (Kollagen)+Wasser  
≈ 65% HAP

Kollagenfaser → Matrix  
+  
Apatitkörner

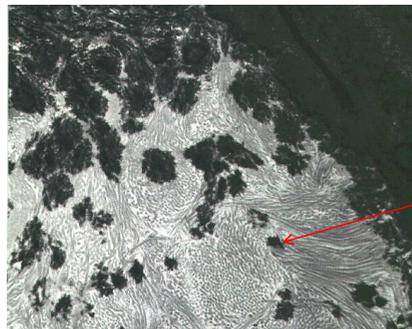


Dentinkanälchen

14

## Zement

Verbundwerkstoff



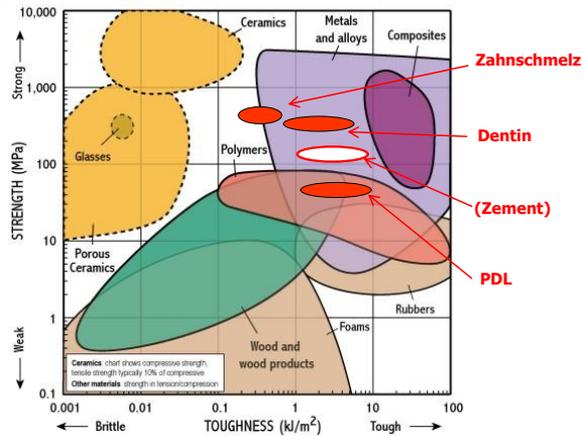
15

## Zusammenfassung

	PDL (≈ Kollagen)	Dentin (≈ 1/3 Kollagen, 2/3 HAP)	Zahnschmelz (≈ HAP)
Steifigkeit ( $E$ ) (GPa)	0,3–2,5	10–20	90–100
Festigkeit ( $\sigma_m$ ) (MPa)	60	110 (Zug) 300 (Druck)	50 (Zug) 400 (Druck)
Zähigkeit (kJ/m <sup>2</sup> )	1–10	0,5–5	0,1–1
Härte HV (GPa)		0,5–1	3–6

16

## Vergleich mit den unbelebten Materialien:



17

## Thermische und elektrische Eigenschaften

Einige Wärmeleitzahlen:

Stoff	$\lambda$ (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	$D$ ( $10^{-6}$ m²/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

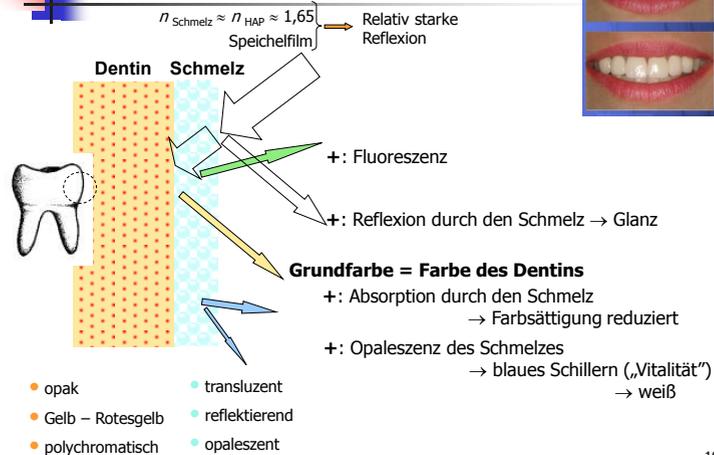
Elektrische Leitfähigkeit ( $\sigma$ ):

Stoff	$\sigma$ (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.

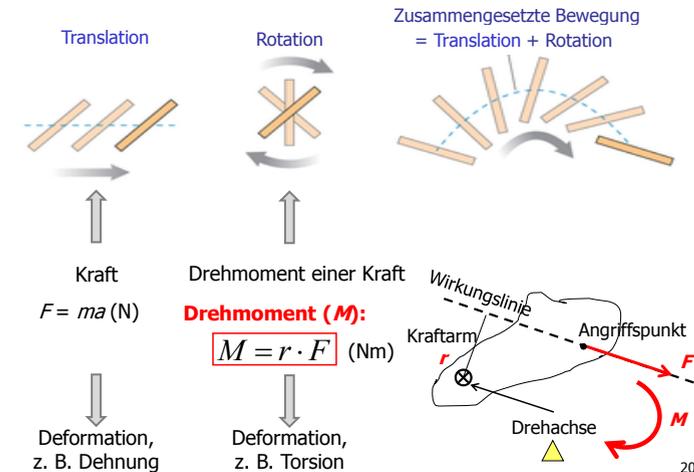
18

## Optische Eigenschaften des Zahns



19

## Bewegungsformen, Kraft und Drehmoment

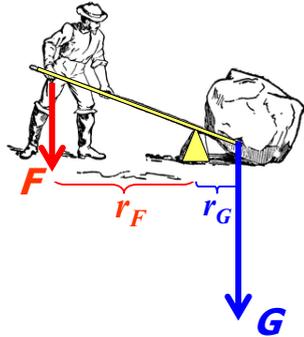


20

## Statik – Gleichgewicht. Hebel

Gleichgewicht  $\Leftrightarrow \sum \vec{F}_i = 0$  und  $\sum M_i = 0$

Hebel:



Im Gleichgewicht:

$$\sum M_i = 0$$

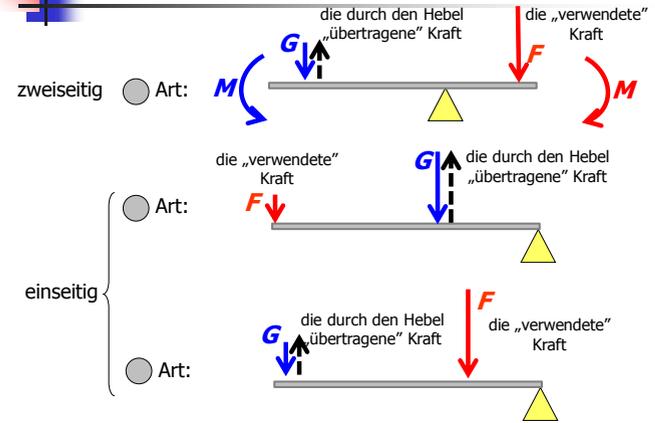
$$r_G \cdot G = M_G = M_F = r_F \cdot F$$

Hebelgesetz:  $\frac{F}{G} = \frac{r_G}{r_F}$

Kraftvervielfachung

21

## Hebelarten



22

## Beispiele



23

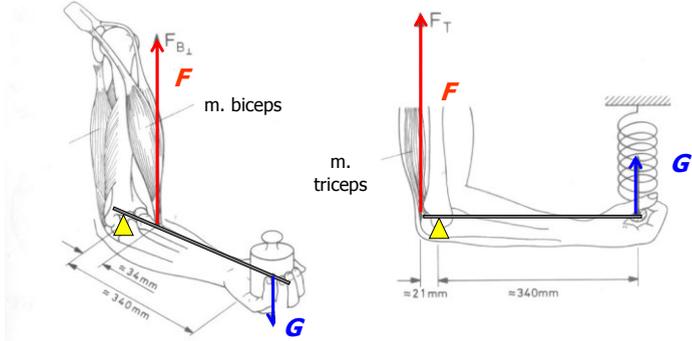
## Hebel in der zahnärztlichen Praxis



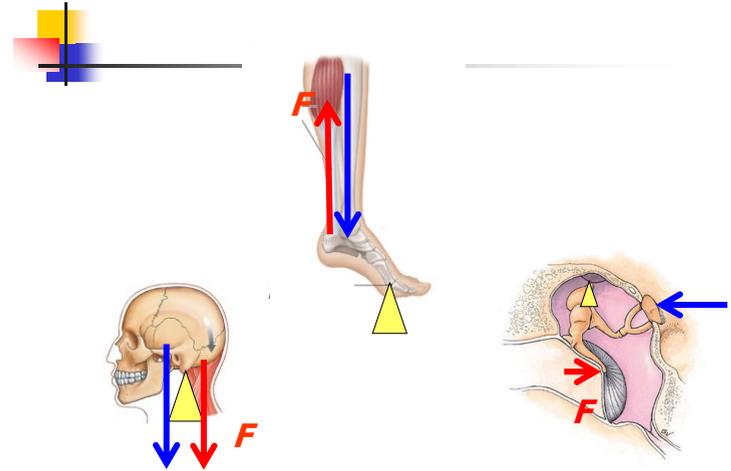
24

## Hebel im Körper

Arm:

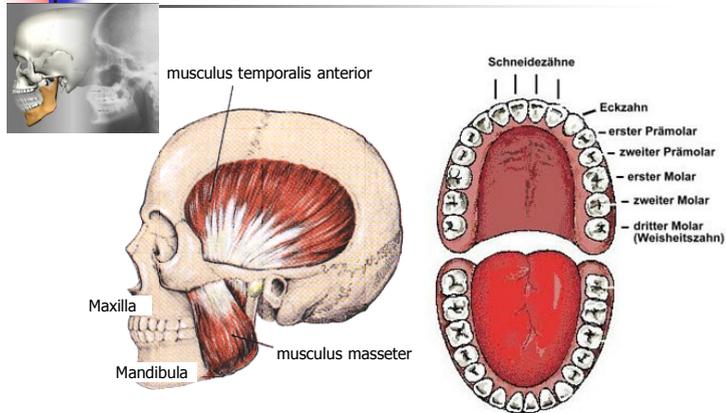


25



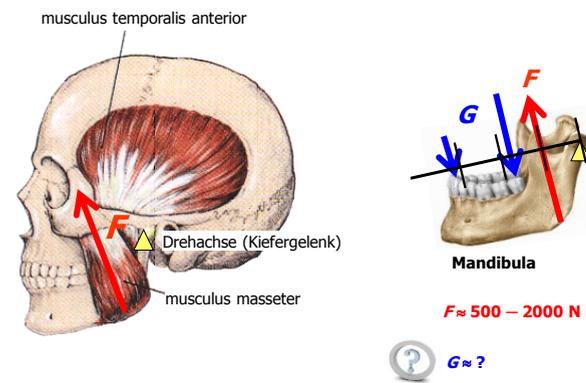
26

## Kiefer und Zähne



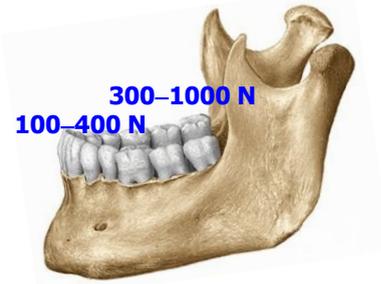
27

## Die Mandibula als Hebel – Entstehung der Kaukräfte



28

## Die Größe der Kaukräfte



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

(Guinness: Mensch - 4000 N)



29

## Messung der Kaukräfte

Kraft → elektrisches Signal:

1. Deformationstranzduzer
2. piezoelektrischer Transduzer
3. Drucktransduzer

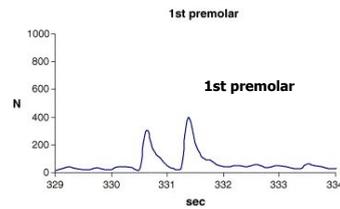
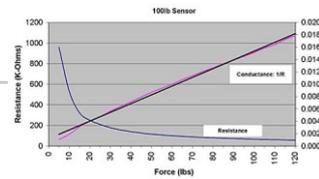
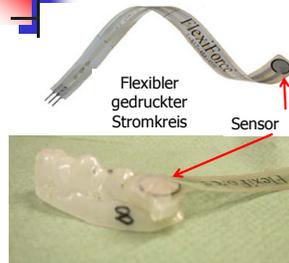


Weitere (subjektive) Techniken:



30

## Eine konkrete Messung:



Wichtig ist es: **Die Kaukräfte sind relativ groß, wirken aber nur kurzzeitig!!!**

31

## Kraft → Druck: Druckwerte beim Beißen und Kauen

Der Druck hängt ausserhalb der Kräfte auch noch von der Fläche ab:

$$p = \frac{F}{A}$$



2 Beispiele:

Beim Beißen:



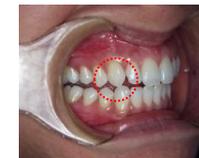
$$= \frac{400 \text{ N}}{10 \text{ mm}^2} = \frac{400 \text{ N}}{10^{-5} \text{ m}^2} = 40 \text{ MPa}$$

Beim Kauen:

$$= \frac{1000 \text{ N}}{1 \text{ cm}^2} = \frac{1000 \text{ N}}{10^{-4} \text{ m}^2} = 10 \text{ MPa}$$

< 400 MPa !  
(= Druckfestigkeit des Zahnschmelzes)

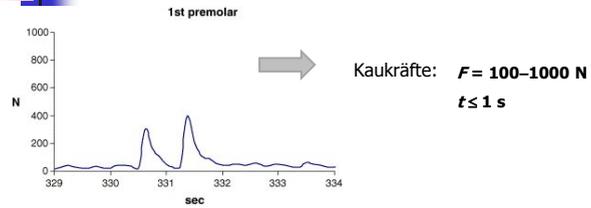
Ein extremes Beispiel :



$$= \frac{400 \text{ N}}{1 \text{ mm}^2} = \frac{400 \text{ N}}{10^{-6} \text{ m}^2} = 400 \text{ MPa} !!$$

32

## Auswirkung der Kaukräfte auf den Knochen

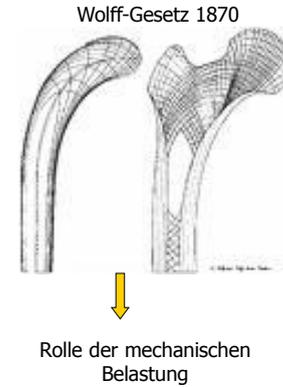


Wenn die Kaukräfte dauerhaft wirken würden:

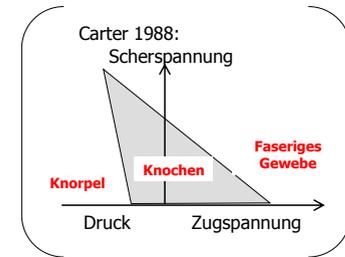
- 3-5 Sekunden  $\Rightarrow$  Schmerz
- $\approx$  Stunde  $\Rightarrow$  Gewebsschädigung !
- 7-14 Tage  $\Rightarrow$  Lockerung des Zahnes

33

## Knochenumbau (remodeling)

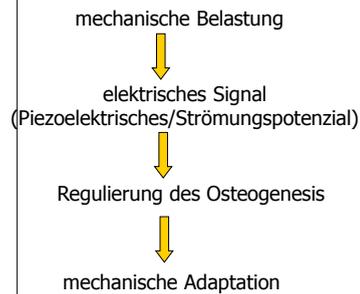


Druck  $\Rightarrow$  Abbau  
Zugspannung  $\Rightarrow$  Aufbau

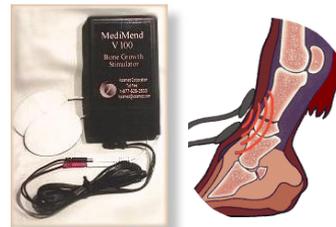


34

## Mechanismus des Knochenbaus



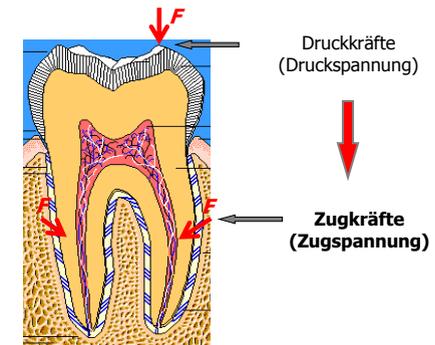
Anwendung von elektrischen Feldern für beschleunigung der Knochenheilung: Elektrotherapie



35

## Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

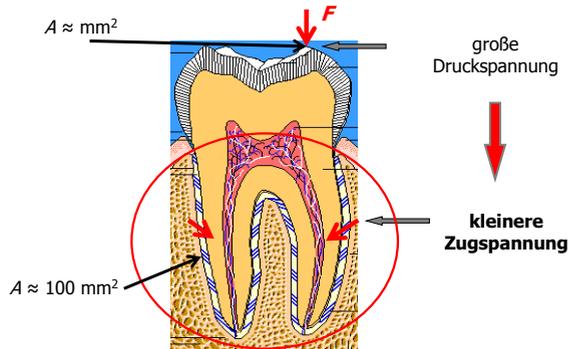
1. Der Zahn hängt auf den Kollagenfasern (PDL)!



36

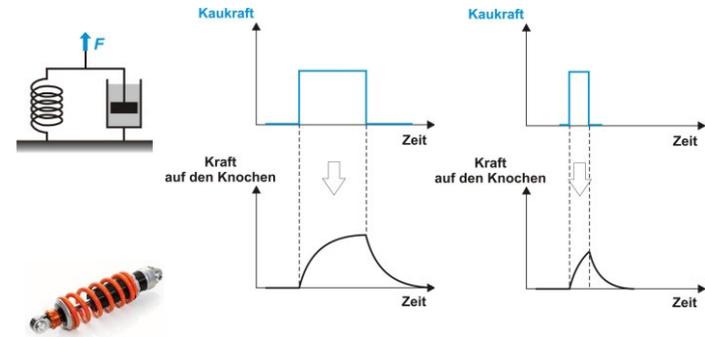
## Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

### 2. Große Fläche des Fasersystems (Wurzel)!



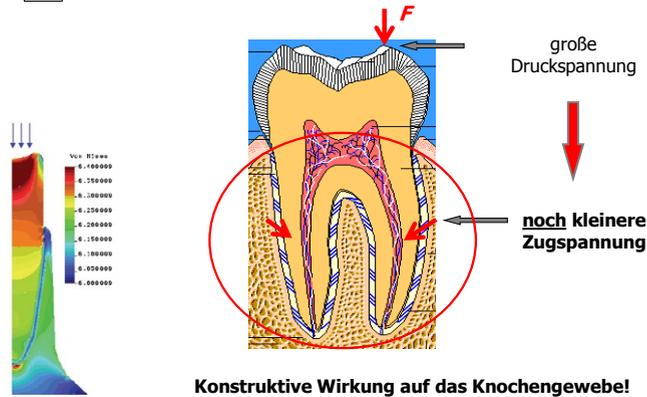
37

## Dämpfung durch ein viskoelastisches Material



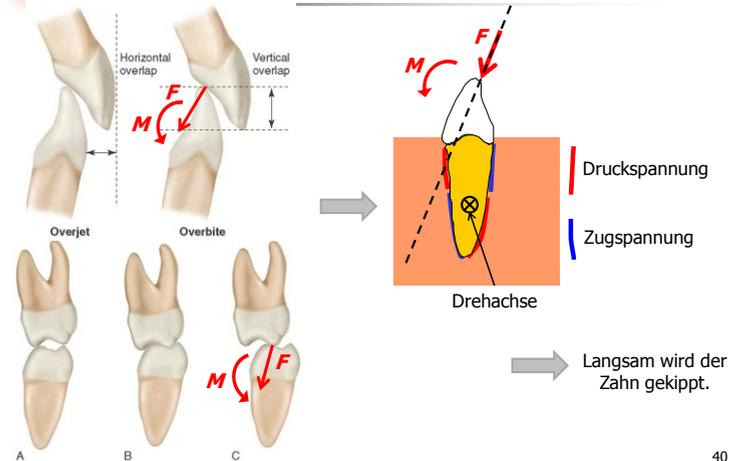
## Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

### 3. Das PDL ist viskoelastisch!



39

## Drehmoment einer Kaukraft



40