



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/>

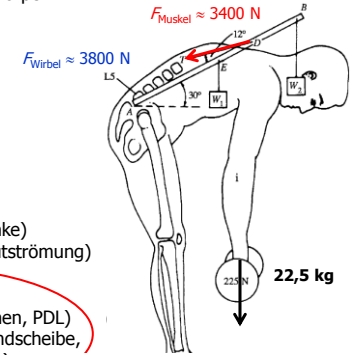
- Äußere Kräfte:
- Schwerkraft – Gewicht
 - Kontakt mit anderen Körpern

- 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)
 - ...



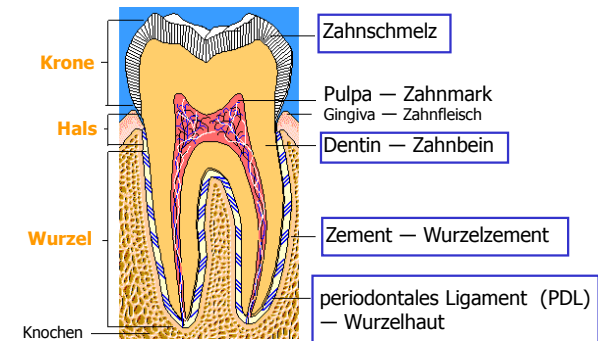
Mechanische (und andere
Eigenschaften) der Zahngewebe.

2

Mechanische Eigenschaften von Geweben

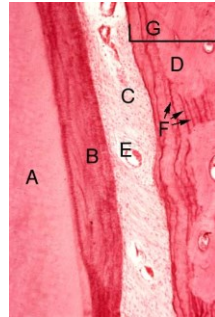
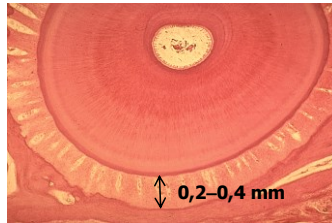


Zahngewebe und Gewebe um den Zahn



4

Periodontales Ligament (Wurzelhaut)



≈ Kollagen

Polymer

5

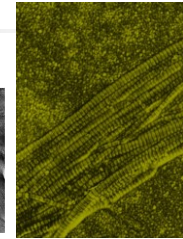
Kollagen

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

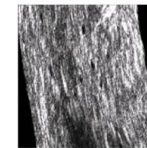
Wichtige Rolle in den Geweben/Organen:

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

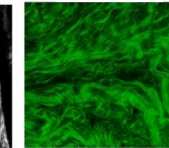
Auge



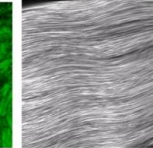
Knochen



Haut

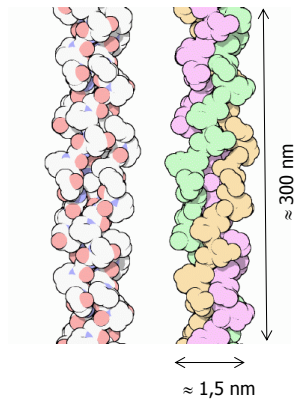


Sehne



6

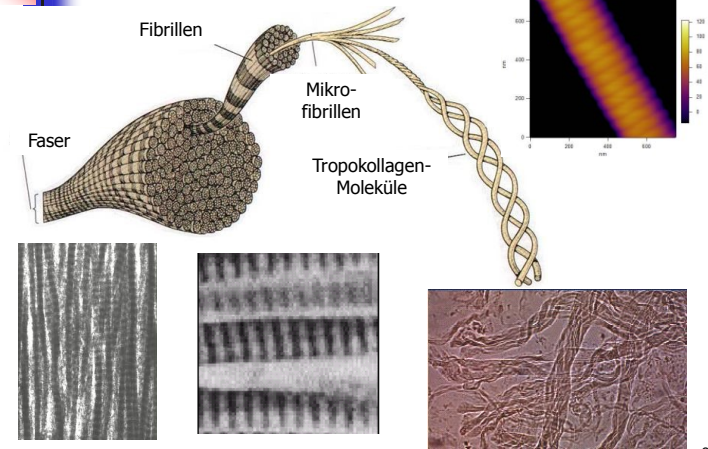
Das Kollagen-Molekül



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

7

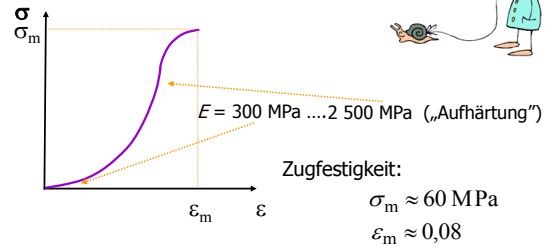
Anordnung der Kollagen-Moleküle



8

Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Kollagen

Material	E (GPa)
Zahnschmelz	≈ 100
Dentin	≈ 15
Amalgam	50-60
Gold	79
Goldlegierungen	75-110
Pd-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!

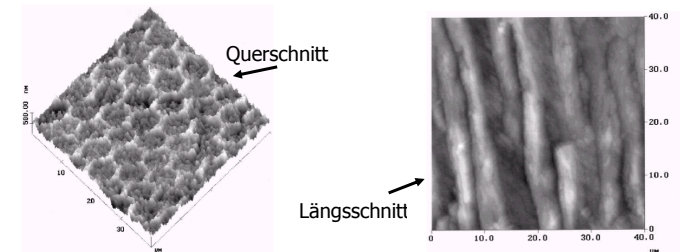
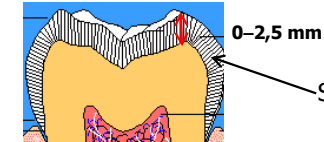
➡ Sehnen, Bänder, Haut

9

Zahnschmelz

≈ 92% Hydroxiapatit (HAP)

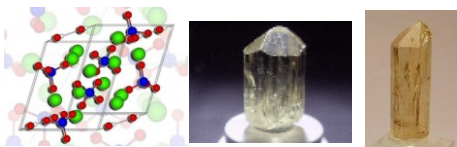
Keramik



10

Hydroxyapatit

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



Im Dentin, im Knochen:

20-60 nm
6 nm

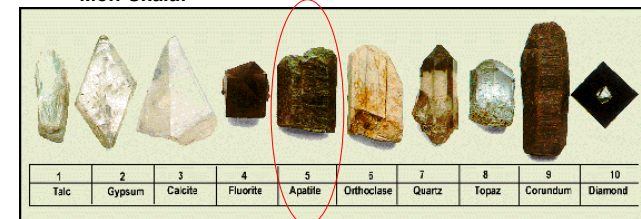
Im Zahnschmelz:

500-1000 nm
30 nm

11

Eigenschaften von Hydroxyapatit

Moh-Skala:



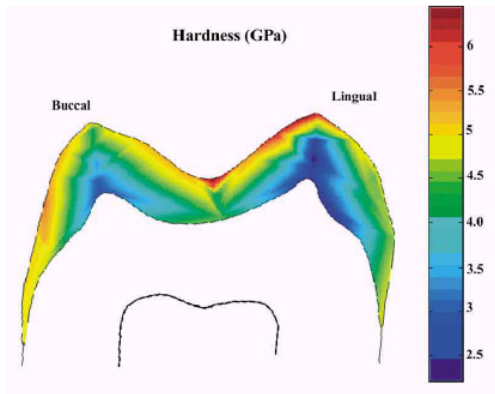
HAP: $HV \approx 6 \text{ GPa}$ $E \approx 140 \text{ GPa}$ $\sigma_m \approx 60 \text{ MPa}$ (Zug)
 $\approx 500 \text{ MPa}$ (Druck)

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

Sehr steif, hart, stark, aber brüchig!

12

Härteverteilung innerhalb des Zahnschmelzes



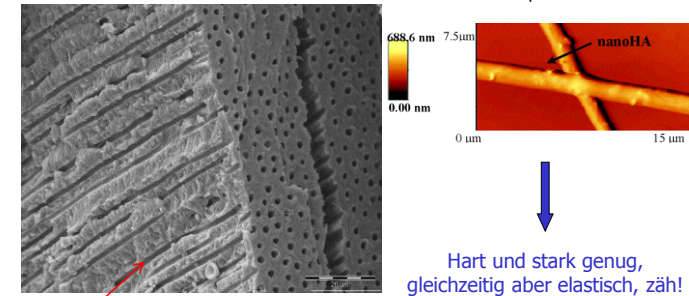
13

Dentin

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

Verbundwerkstoff

Kollagenfaser → Matrix
+
Apatitkörner

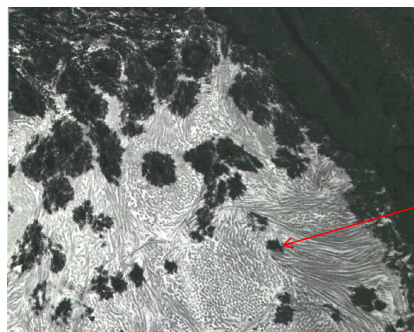


Dentinkanälchen

14

Zement

Verbundwerkstoff



≈ 50% organisch (Kollagen)
+Wasser

≈ 50% HAP

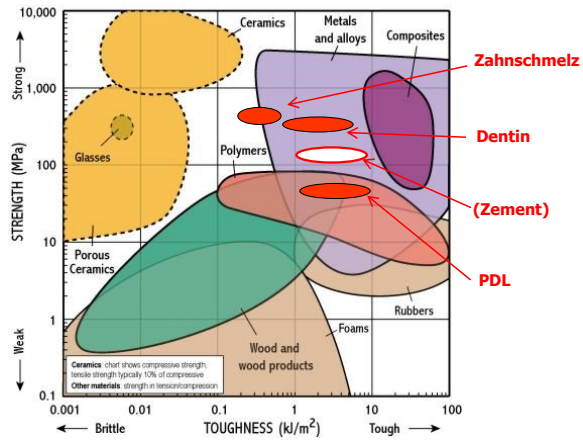
15

Zusammenfassung

	PDL (≈ Kollagen)	Dentin (≈ 1/3 Kollagen, 2/3 HAP)	Zahnschmelz (≈ HAP)
Steifigkeit (E) (GPa)	0,3–2,5	10–20	90–100
Festigkeit (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

16

Vergleich mit den unbelebten Materialien:



17

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} 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

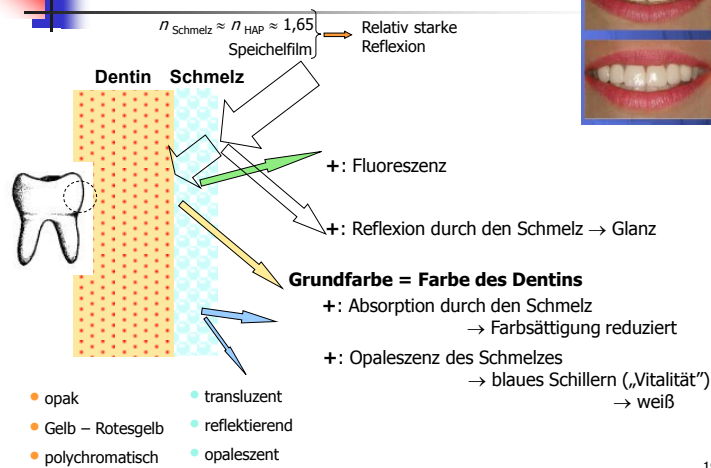
Elektrische Leitfähigkeit (σ):

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.

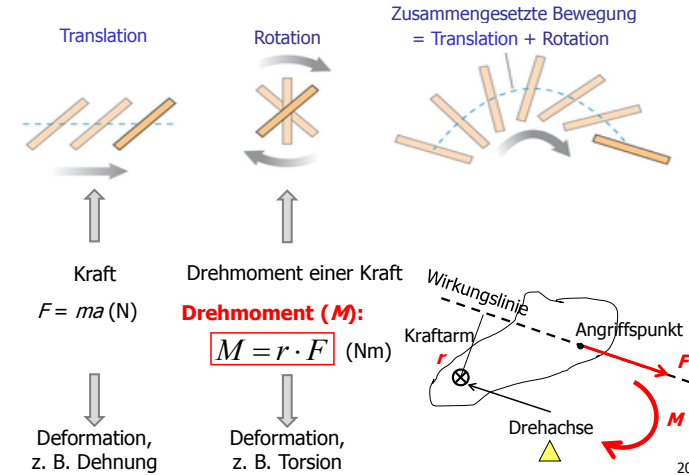
18

Optische Eigenschaften des Zahns



19

Bewegungsformen, Kraft und Drehmoment

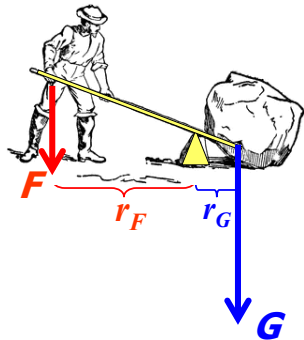


20

Statik – Gleichgewicht. Hebel

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

Hebel:



Im Gleichgewicht:

$$\sum M_i = 0$$

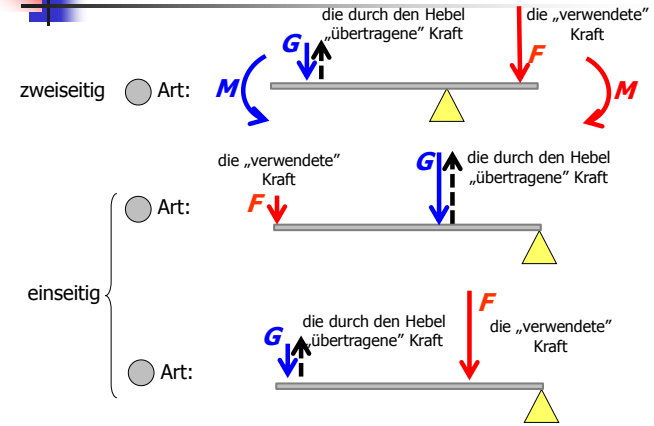
$$r_G \cdot G = M_G = M_F = r_F \cdot F$$

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

➡ Kraftvervielfachung

21

Hebelarten



22

Beispiele



23

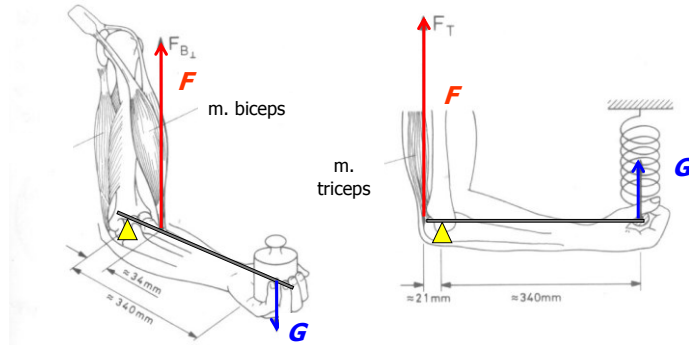
Hebel in der zahnärztlichen Praxis



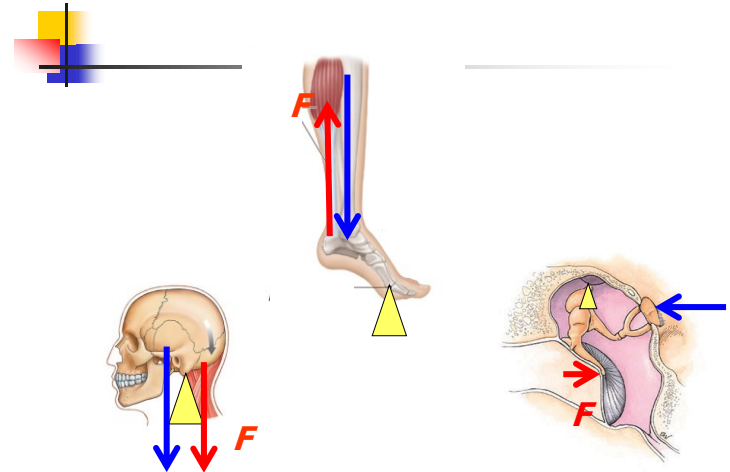
24

Hebel im Körper

Arm:

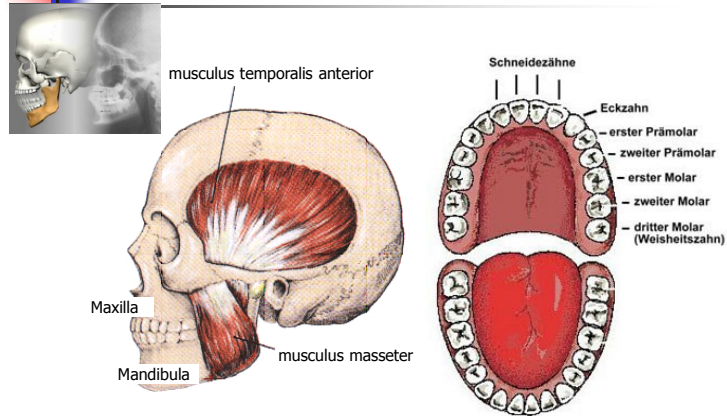


25



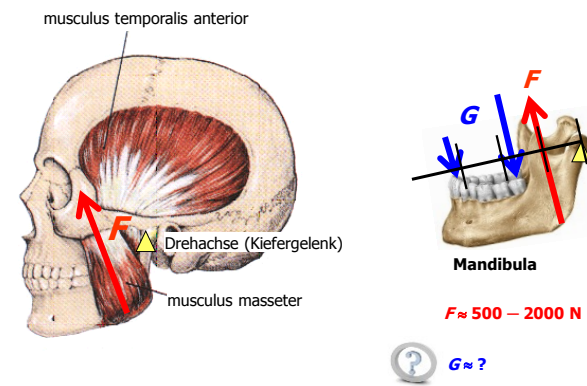
26

Kiefer und Zähne



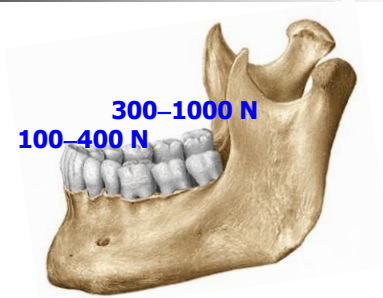
27

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)

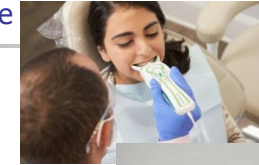


29

Messung der Kaukräfte

Kraft → elektrisches Signal:

1. Deformationstransduzer
2. piezoelektrischer Transduzer
3. Drucktransduzer

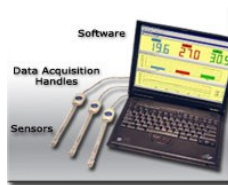
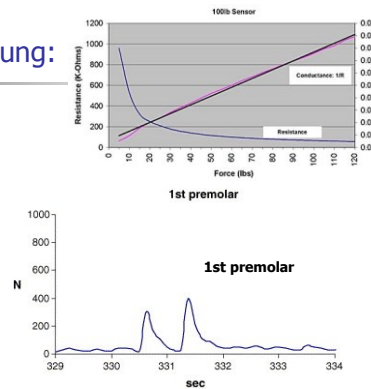
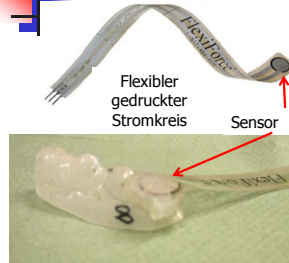


Weitere (subjektive) Techniken:



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)

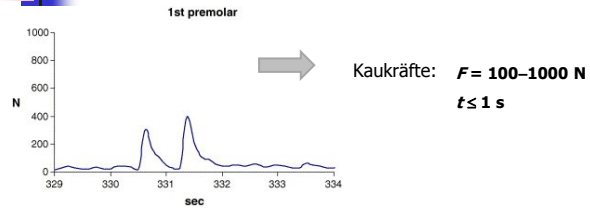
Ein extremes Beispiel :



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

32

Auswirkung der Kaukräfte auf den Knochen

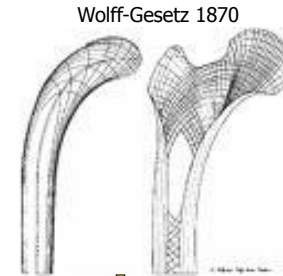


Wenn die Kaukräfte dauerhaft wirken würden:

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

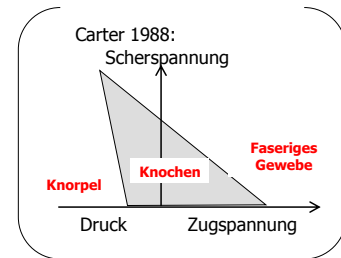
33

Knochenumbau (remodeling)



Rolle der mechanischen Belastung

Druck \Rightarrow Abbau
 Zugspannung \Rightarrow Aufbau

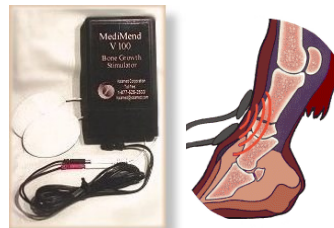


34

Mechanismus des Knochenbaus

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

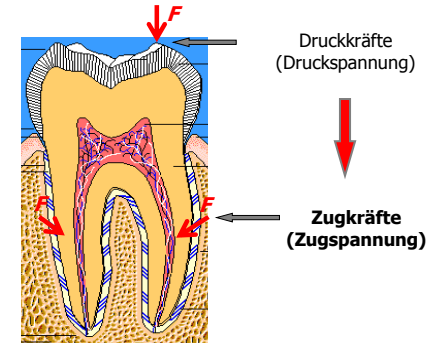
Anwendung von elektrischen Feldern für beschleunigung der Knochenheilung: Elektrotherapie



35

Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

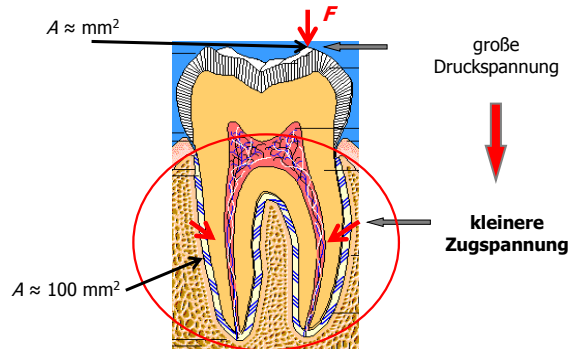
1. Der Zahn hängt auf den Kollagenfasern (PDL)!



36

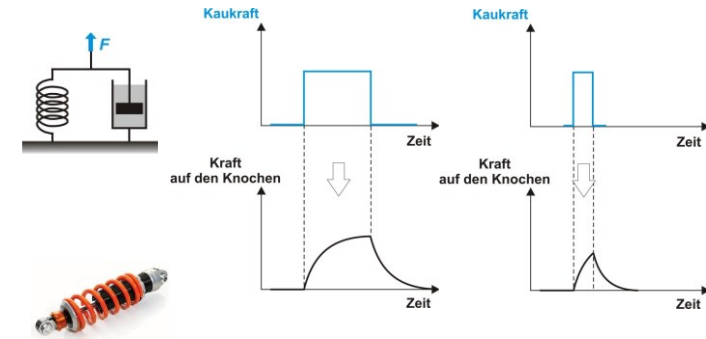
Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

2. Große Fläche des Fasersystems (Wurzel)!



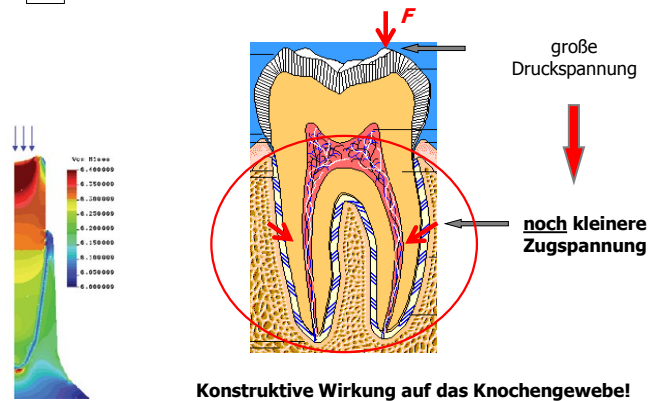
37

Dämpfung durch ein viskoelastisches Material



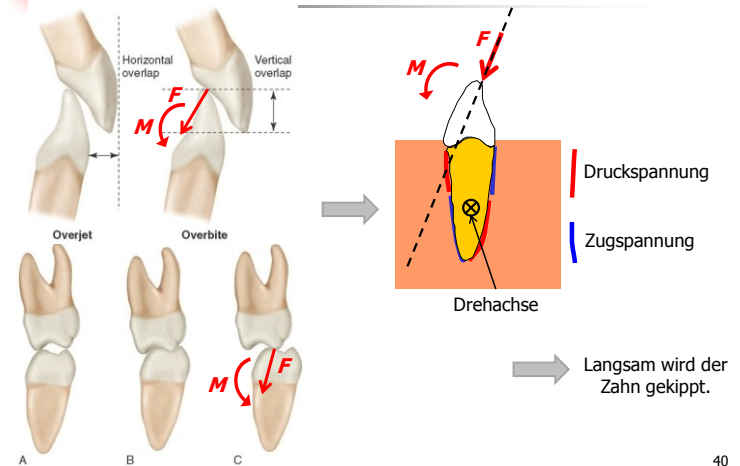
Übertragung der Kaukräfte und des Kaudruckes auf den Knochen

3. Das PDL ist viskoelastisch!



39

Drehmoment einer Kaukraft



40