



## Physikalische Grundlagen der zahnärztlichen Materialkunde

### 10.

Thermische und optische Eigenschaften

Schwerpunkte:

- ❖ Wärmeleitung
- ❖ Thermischen Ausdehnung: Ursache und die praktischen Probleme
- ❖ Wie entsteht die Farbe?

Kapitel des Lehrbuches:  
19, 20

Hausaufgaben:  
5. Kapitel:  
1, 2, 5, 6, 8, 9, 10,  
16, 17, 19, 20, 27,  
31

1

## Thermische Eigenschaften



### 1. „Erwärmbarkeit“

Wärmekapazität (C):  $C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$

molare Wärmekapazität ( $c_v$ ):  $c_v = \frac{C}{\nu}$

spezifische Wärmekapazität (c):  $c = \frac{C}{m}$



+ Schmelzpunkt/Schmelzwärme

+ Siedepunkt/Verdampfungswärme

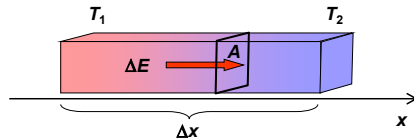
Einige spezifische Wärmekapazitätswerte:

Stoff	c (J/(kg·K))
Zahnschmelz	750
Dentin	1260
Wasser	4190
Amalgam	210
Gold	126
Porzellan	1100
Glas	800
PMMA	1460
Zinkphosphat	500

~ Bindungsenergie!

2

### 2. Wärmeleitung



Energiestromstärke ( $I_E$ ):  $I_E = \frac{\Delta E}{\Delta t}$  (J/s)

Fourier-Gesetz:

Energiestromstärke

$$I_E = \frac{\Delta E}{\Delta t} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Temperaturgradient

$\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitzahl)  
J/(s·m²·K/m) = W/(m·K)

3

Mechanismus der Wärmeleitung:

- durch Bewegungen und Stöße zwischen Atomen (in jedem Material möglich)
- durch die Wanderung der freien Elektronen (nur in Metallen möglich)

Die Wärmeleitfähigkeit hängt von:

- dem Aggregatzustand (in dem festen Zustand am größten, in der flüssigen Phase kleiner und in dem gasförmigen Zustand am kleinsten)
- der Dichte
- der Temperatur (nur geringfügig) ab

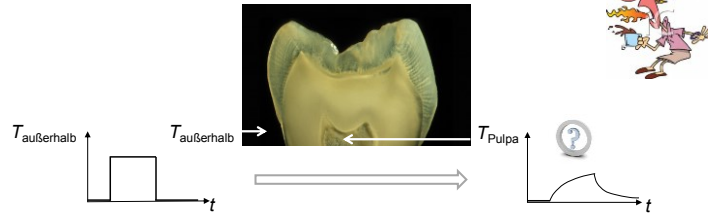
Einige Wärmeleitzahlen:

Stoff	$\lambda$ (W/(m·K))
Zahnschmelz	0,9
Dentin	0,6
Wasser	0,44
Amalgam	23
Gold	300
Porzellan	1
Glas	0,6-1,4
Akrylat	0,2
PMMA	0,2-0,3
Zinkphosphat	1,2

Kann nur bei stationären Prozessen einfach verwendet werden (s. die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers)!

4

### Bei nichtstationären Verhältnissen:



Ursache der Verzögerung (Dämpfung) des Temperatursprunges: die dazwischenliegenden Gewebe (Zahnschmelz, Dentin) benötigen Energie zur Erwärmung (d. h. sie absorbieren Energie), so wird weniger Energie in der Übergangsphase auf die Pulpa übertragen. (Die Energieabsorptionsfähigkeit eines Materials ist durch die Wärmekapazität der Volumeneinheit des Gewebes gegeben.)

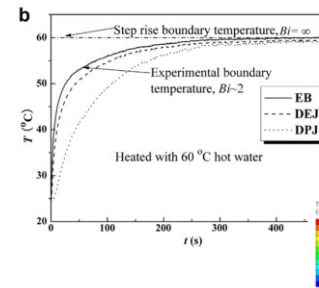
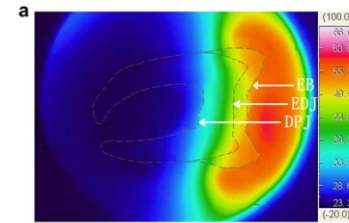
**Temperaturleitfähigkeit** (Temperaturleitzahl, Wärmediffusivität),  $D$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ):

$$D = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

Spez. Wärmekapazität      Dichte

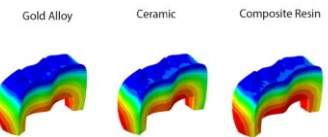
Wenn die dazwischenliegenden Gewebe schon erwärmt worden sind, wird ein thermisches Gleichgewicht erreicht und der Prozess läuft weiterhin schon stationär ab.

5



### Einige Temperaturleitzahlen:

Stoff	$D$ ( $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )
Zahnschmelz	0,5
Dentin	0,2
Wasser	0,14
Amalgam	9,6
Gold	118
Porzellan	0,4
Glas	0,3-0,7
Akrylat	0,1
PMMA	0,12
Zinkphosphat	0,3



6

### 3. Wärmeausdehnung

Länge:

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T$$

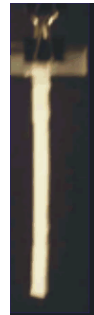
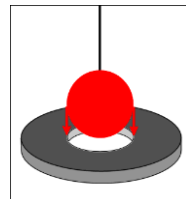
$\alpha$  — linearer Wärmeausdehnungs-koeffizient  
(Längenausdehnungskoeffizient) ( $1/\text{K}$ )

Volumen:

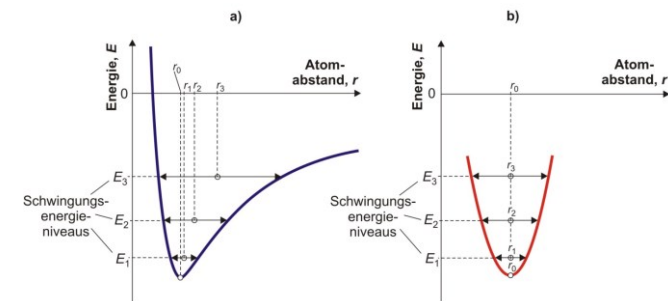
$$\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta T$$

$\beta$  — räumlicher Wärmeausdehnungs-koeffizient  
(Volumenausdehnungskoeffizient) ( $1/\text{K}$ )

$$\beta \approx 3\alpha$$

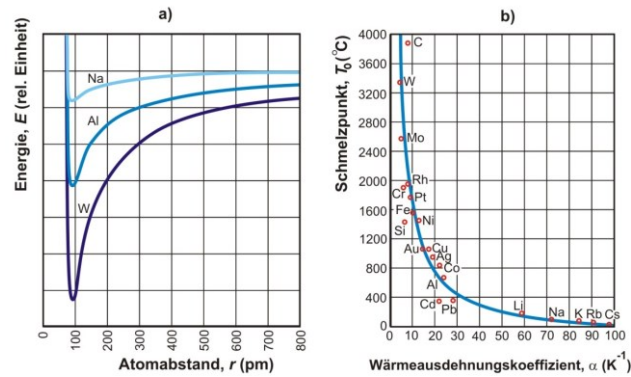


### Hintergrund der Wärmeausdehnung:



7

8



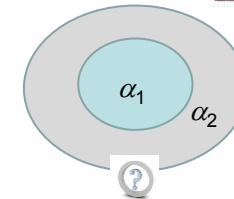
9

Einige Längenausdehnungskoeffizienten:

Stoff	$\alpha$ ( $10^{-6} \text{ 1/K}$ )
Zahnschmelz	11,4
Dentin	8,3
Gold	14,2
Goldlegierungen	11-16
Amalgam	$\approx 25$
Porzellan	4-16
Akrylat	90
Glas	8
PMMA	90-160
Silikon	100-200
Gips	15-20
Wachs	300-500

Unterschiedliche Wärmeausdehnung

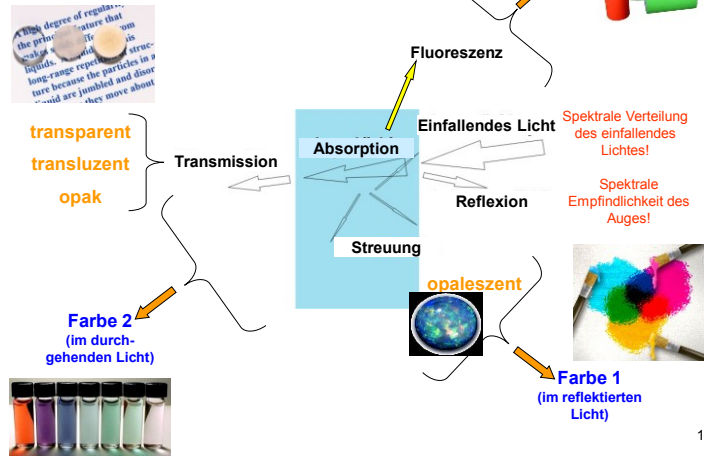
innere Spannungen!



10

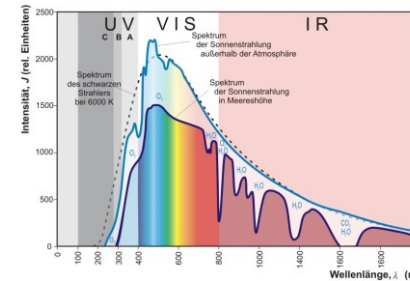
## Optische Eigenschaften:

Reflexionsvermögen, Durchsichtigkeit, Farbe



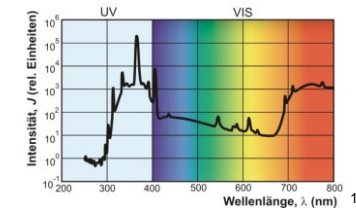
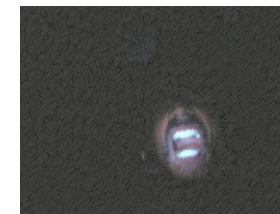
11

## Spektrale Zusammensetzung des einfallenden Lichtes – Emissionsspektrum



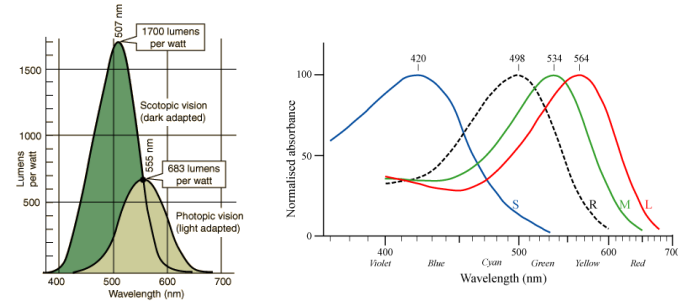
Natürliche Beleuchtung –  
Sonnenspektrum

Künstliche Beleuchtung –  
Spektrum einer Discolampe



12

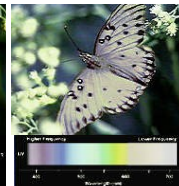
## Empfindlichkeitskurve des Auges – Absorptionsspektrum



Mensch



Katze

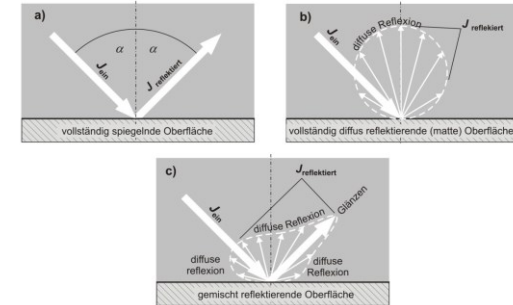


13

## Wechselwirkungen mit der Materie

⇒ optische Eigenschaften

### 1. Reflexion



Reflexionskoeffizient (Reflektanz, Reflexionsgrad),  $\rho$  (auch  $R$ ):  $\rho = \frac{J_{\text{reflektiert}}}{J_{\text{einfallend}}}$

- $\rho$  hängt von:
  - dem Einfallswinkel
  - von den zwei Materialien (von den Brechzahlen)

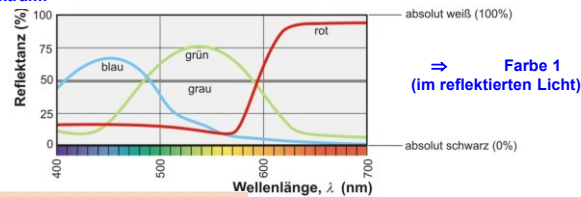
Beim senkrechten Einfall gilt:  $\rho = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$



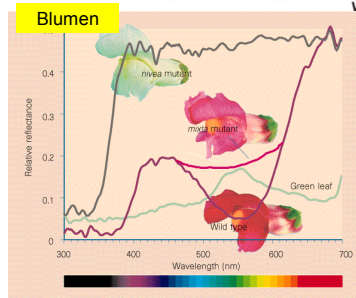
14

- von der Wellenlänge ab

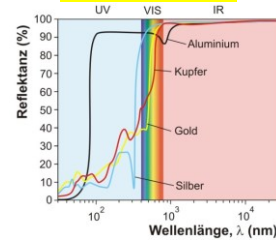
Reflexionsspektrum:



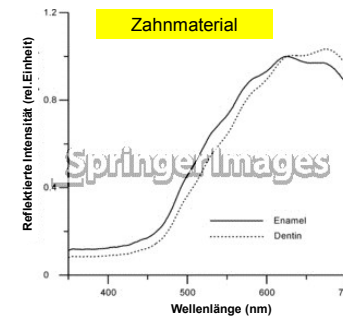
Blumen



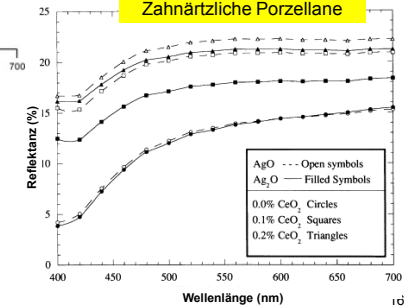
Metalle



15



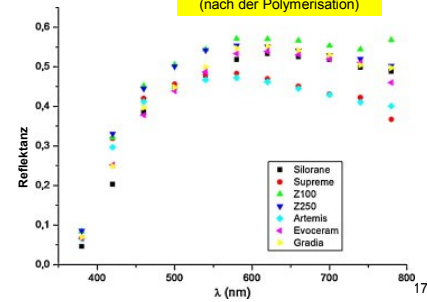
Zahnärztliche Porzellane



16

Dental resin composite	Manufacturer	Organic matrix	Filler particle type	Filler particle size (µm)
Filtek Silorane		Silorane	Quartz filler, yttrium fluoride	0.1–2
Filtek Supreme XT		Bis-GMA, UDMA, TEGDMA and Bis-EMA	Zirconium-Silica agglomerate, highly dispersed silica	0.6–1.4
Filtek Z250		Bis-GMA, UDMA and Bis-EMA	Zirconium, Silica	0.01–3.5
Z100		Bis-GMA and TEGDMA	Zirconium, Silica	0.01–3.5
Gradia Direct		UDMA, dimethacrylate comonomers	Silica and pre-polymerized fillers	0.007–1.7

**Verbundwerkstoffe**  
(nach der Polymerisation)



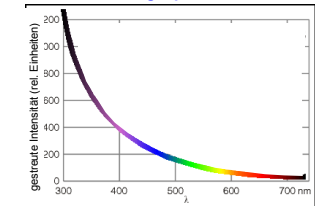
## 2. Streuung:

**Rayleigh-Streuung**  
Größe der Streuteilchen  $\ll \lambda$



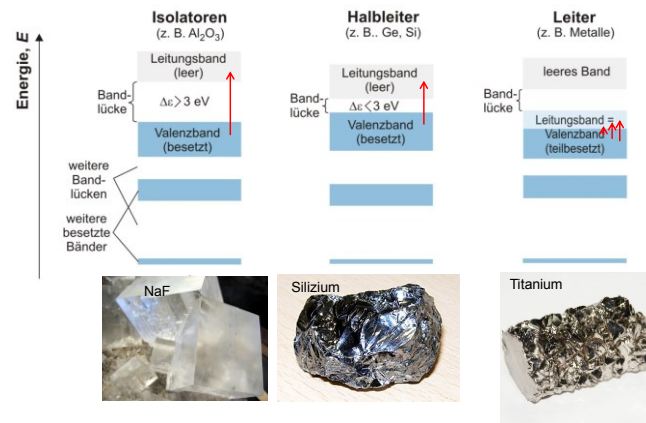
$$\sigma \sim \frac{d^6}{\lambda^4}$$

**Streuungsspektrum:**



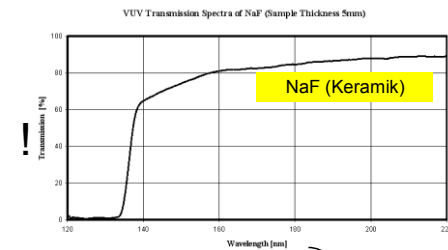
18

## 3. Absorption:

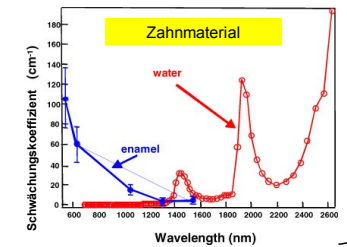


19

## Absorptionsspektrum:



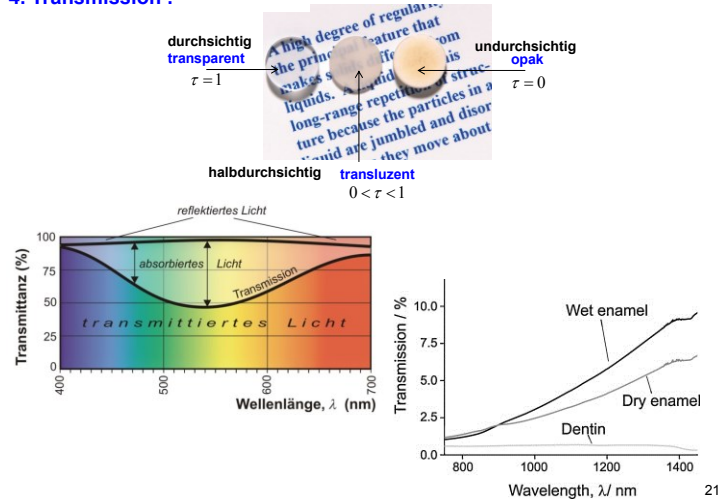
**Schwächung = Streuung + Absorption:**



20

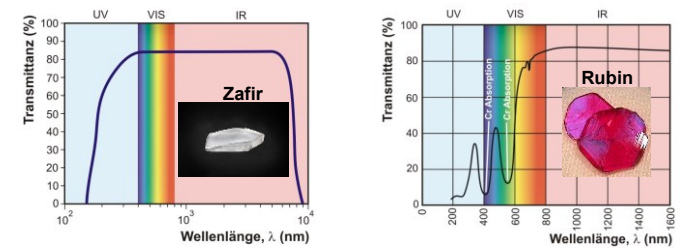


#### 4. Transmission :



21

#### Transmissionsspektrum:

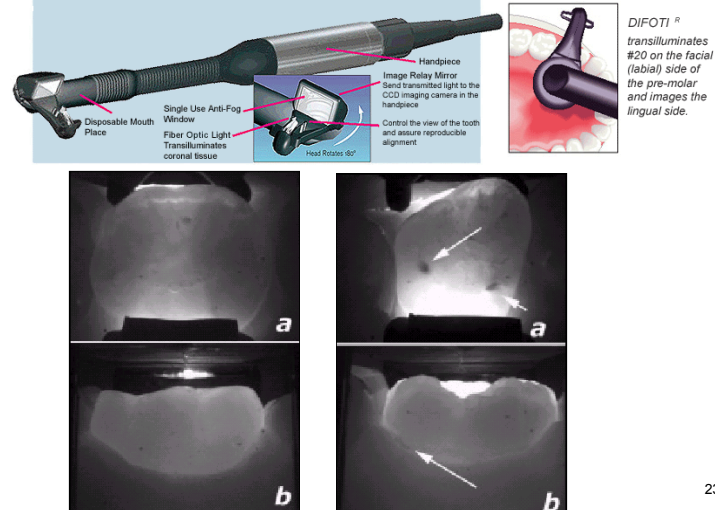


Farbe 2  
 (im durchtretenden Licht)



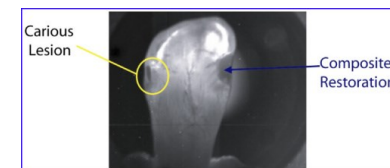
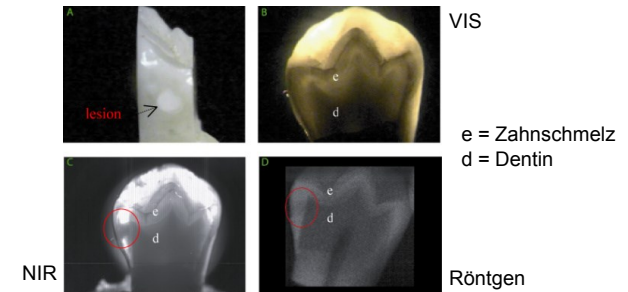
22

#### DIFOTI® (Digital Imaging Fiber-Optic Trans-Illumination)



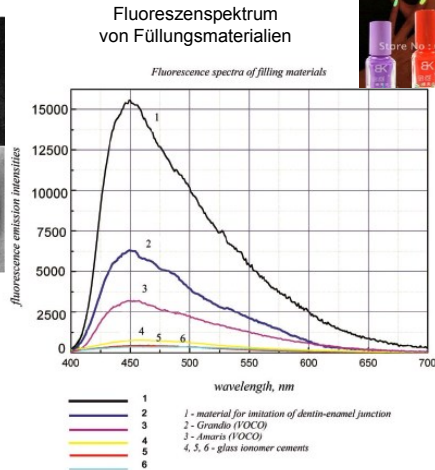
23

#### Durchleuchtung im nahen Infrarot (NIR)



24

## 5. Fluoreszenz Farbe 3

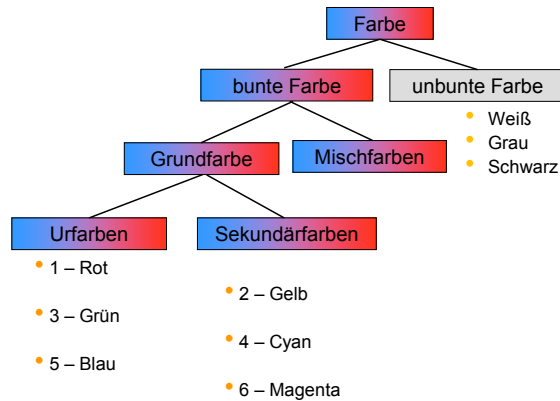


25



26

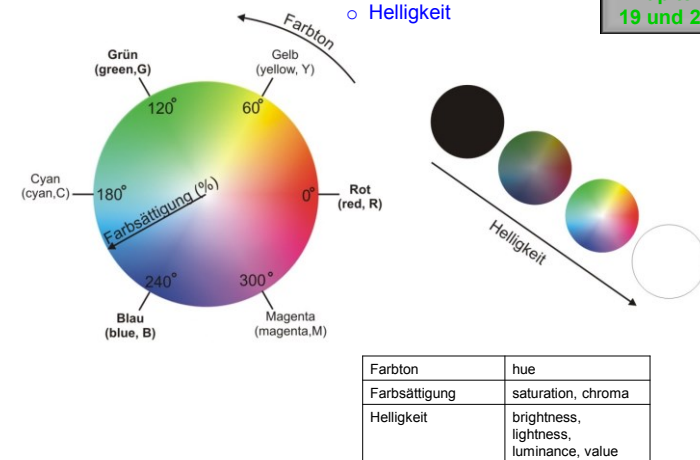
## Farbe



27

„Farbraum“: 3 Koordinaten

- Farbton
- Farbsättigung
- Helligkeit



Nächste Vorlesung:  
Kapitel 19 und 21

28