



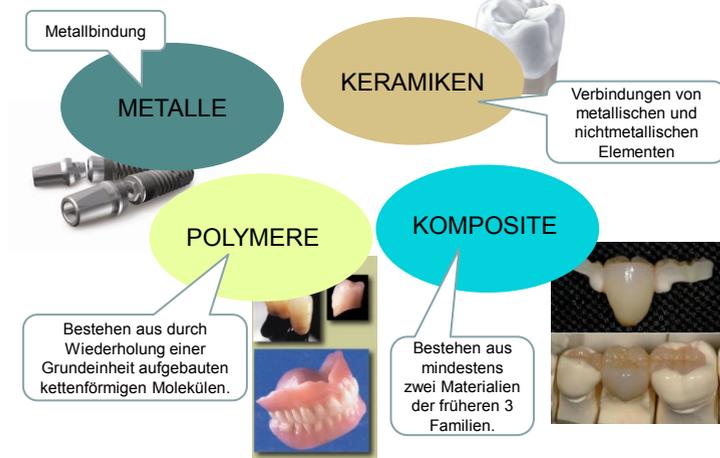
## Physikalische Grundlagen der zahnärztlichen Materialkunde

### 5. Materialklassen Metalle und Keramiken

**Kapitel des Lehrbuches:**  
9-13

**Hausaufgaben:**  
3. Kapitel.:  
3-5, 8, 10, 12, 14, 18

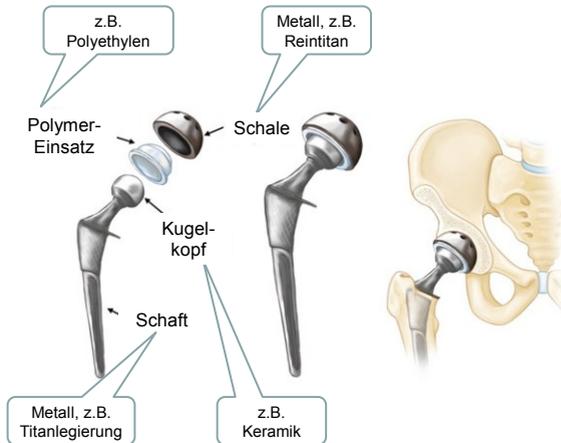
## Zahnärztliche Materialklassen



2

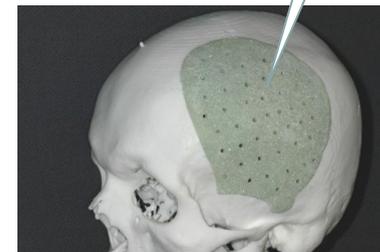
Einige humanmedizinische Anwendungen:

Hüftgelenkprothese



3

Verbundwerkstoff



4

## Metalle



### Eigenschaften:

- viele Elemente mit diversen Eigenschaften
- i. A. hohe Dichte
- fest bei Raumtemperatur (bis auf Ga und Hg)
- i. A. hohe Festigkeit und Zähigkeit
- i. A. plastisch
- Neigung zur Korrosion
- Eigenschaften können relativ leicht geändert werden durch Legierung
- hohe elektrische und Wärmeleitfähigkeit
- Metallische Farbe
- oft nicht biokompatibel



### Struktur:

- Metallbindung
- gleich große Atome (in den reinen Metallen)
- kristallin (am meisten hexagonal, oder kubisch)\*
- polikristallin\*\*

amorphes  
Metallglas!

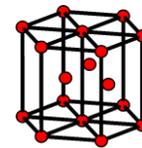
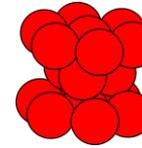
### Anwendungsbeispiele:

- > Kronen, Brücken
- > Implantate
- > Plombe
- > kieferorthopädische Geräte

Herstellung: Schmelzen,  
Gießen

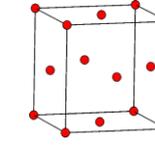
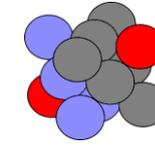
5

## \*Warum ist das hexagonale und das kubische Gitter so häufig bei Metallen? Dichte Packung von gleich großen Kugeln



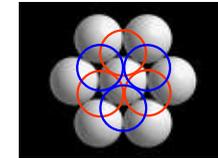
hexagonal-dichtest-  
gepackt (hcp)

Z.B. Ti, Cd, Co, Zn, ...



kubisch-flächenzentriert  
(fcc)

Z.B. Ag, Au, Pt, Al, Cu, Ni, ...



weniger dicht:  
kubisch-  
raumzentriert  
(bcc)

Z.B. Fe, Cr, ...

68 %

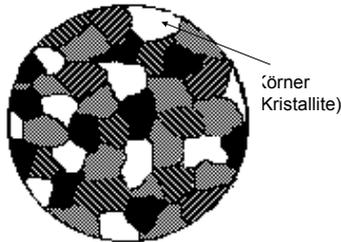
Raumerausfüllung: 74 %

74 %

6

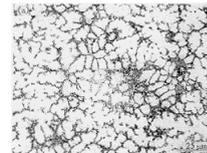
## \*\*Polykristalline Struktur

Mikroskopisches Niveau: Gefüge

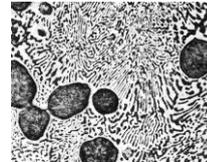


(Körner  
Kristallite)

homogenes Gefüge



heterogenes Gefüge



### Untersuchung:

- Schleifen/Polieren
- Ätzen
- Mikroskopieren

7

## Legierungen

Ziel: Verbesserung bestimmter Eigenschaften,  
z.B.

- Korrosionsbeständigkeit z.B. Fe, Ni, Co, ...+Cr
- Härte, Rigidität z.B. Au+Cu
- Adhäsion zw. Metall und Keramik z.B. Edelmetall+Fe, Sn, In

### Einteilung nach:

- Metall+Metall, Z.B. Fe+Cr
- Metall+Nichtmetall, Z.B. Fe+C
- dem Gebrauch (z.B. Inlay, Krone, ...)
- dem Grundmaterial (Gold, Palladium, ...)
- der Zahl der Komponente (binär, ternär, kvaternär,...)
- den 3 wichtigsten Komponenten (z.B. Au-Pd-Ag, Ni-Cr-Be, ...)
- dem Phasendiagramm
  - Mischkristall
  - eutektische Legierung
  - peritektische Legierung
  - intermetallische Verbindung



8

**Konzentration:**

• Massenprozent ( $c_m$ ):  $c_{m,1} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} (\cdot 100\%)$

• Molprozent ( $c_v$ ):  $c_{v,1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} (\cdot 100\%) \rightarrow$  Eigenschaften!

(z.B. Ni-Cr-Mo-Be-Legierung:  
Be 1,8 %m/m  $\leftrightarrow$  11 %v/v)

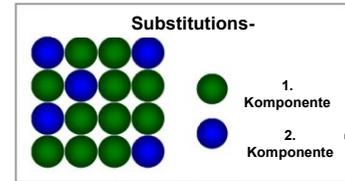
Zur Umrechnung:  

$$c_{v,1} = \frac{c_{m,1} \cdot M_2}{c_{m,1} \cdot M_2 + c_{m,2} \cdot M_1} (\cdot 100\%) \quad c_{m,1} = \frac{c_{v,1} \cdot M_1}{c_{v,1} \cdot M_1 + c_{v,2} \cdot M_2} (\cdot 100\%)$$
 Mittlere Dichte: 
$$\bar{\rho} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{c_{m,1} \cdot \rho_2 + c_{m,2} \cdot \rho_1}$$

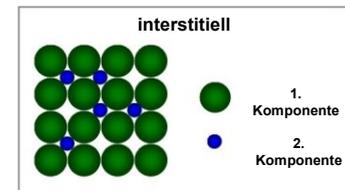
9

**Feste Lösung oder Mischkristall**

Lösbarkeit sowohl in der Schmelze als auch in der festen Phase  $\rightarrow$  homogenes Gefüge



Z.B. Cu-Ni, Pd-Ag, Au-Cu, ...



Z.B. Fe-C, CP Ti (O, C, N, H), ...

(CP: commercial purity)

10

**Löslichkeitsvoraussetzungen bei Substitutionsmischkristallen:**

- etwa gleiche Atomgröße (< 15%)
- gleiches Raumgitter
- ähnliche Elektronegativität
- gleiche Wertigkeit

Metall	Durchmesser (nm)	Raumgitter	E.N.
Au	0,2882	fcc	2,4
Pt	0,2775	fcc	2,2
Pd	0,2750	fcc	2,2
Ag	0,2888	fcc	1,9
Cu	0,2556	fcc	1,9
Ni	0,25	fcc	1,8
Sn	0,3016	tetragonal	1,8

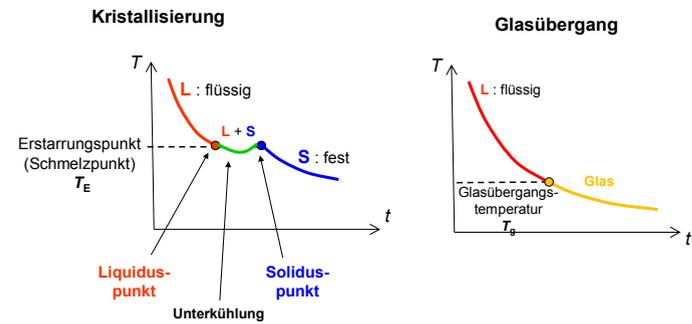
**Löslichkeitsvoraussetzungen bei interstitiellen Mischkristallen:**

- „gelöste“ Atome wesentlich kleiner
- Menge der „gelösten“ Atome klein (< 10%)

Die Eigenschaften der Mischkristalle sind oft besser, als die eines jeden Komponenten.

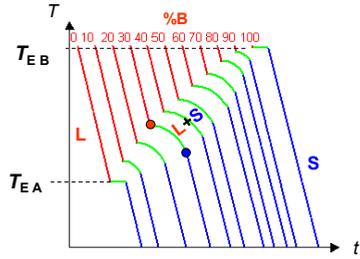
11

**Abkühlkurve eines reinen Metalles**

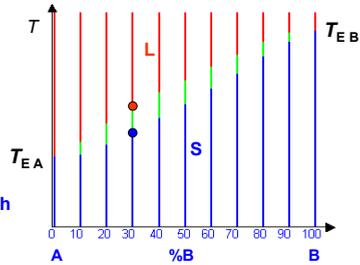


12

Abkühlkurve eines Mischkristalls:



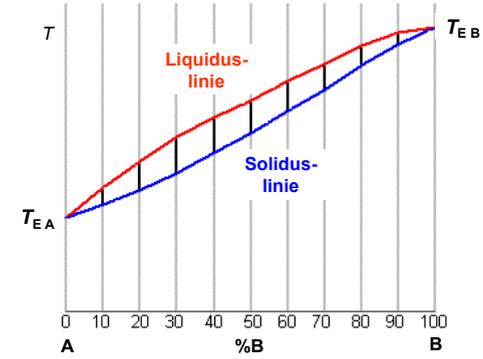
Phasendiagramm:



Im Gleichgewicht! = unendlich langsames Abkühlen

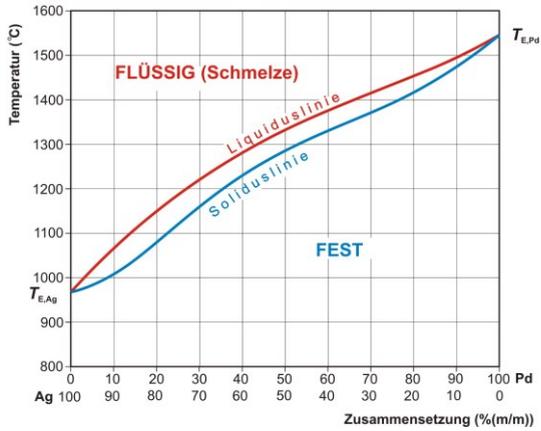
13

Gleichgewicht!



14

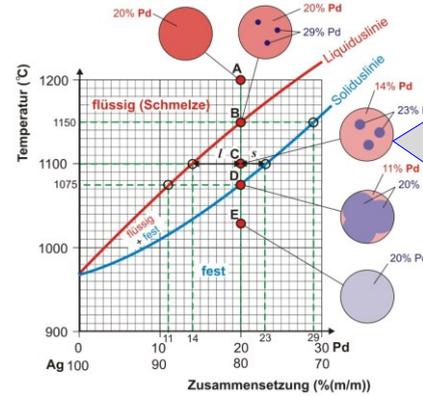
Beispiel: Silber (Ag) + Palladium (Pd)



15

Konzentrationen und Mengenanteile

Beispiel: 80%(m/m) Ag + 20%(m/m) Pd

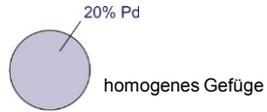


Zum Beispiel im Punkt C:

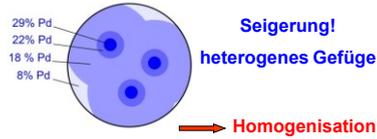
- Konzentrationen in der flüssigen Phase:  
14% Pd + 86% Ag
- Konzentrationen in der festen Phase:  
23% Pd + 77% Ag
- Mengenanteil der flüss. Phase:  
 $\frac{s}{l+s} = \frac{23-20}{23-14} = \frac{3}{9} = 33,3\%$
- Mengenanteil der festen Phase:  
 $\frac{l}{l+s} = \frac{20-14}{23-14} = \frac{6}{9} = 66,6\%$

16

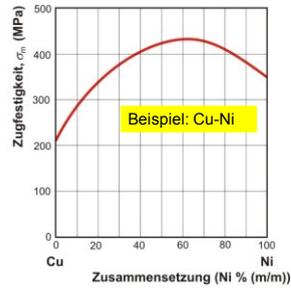
Im Gleichgewicht = unendlich langsam abgekühlt



Kein Gleichgewicht = praktisches Abkühlen



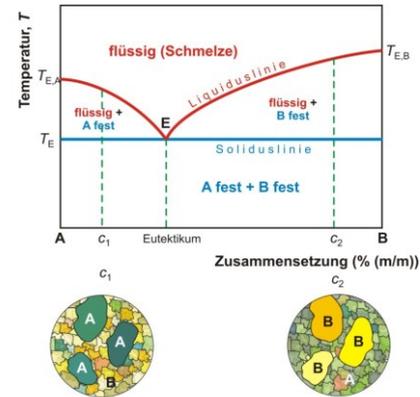
Einfluss der Legierung auf die Eigenschaften



17

## Eutektische Legierungen

Vollständige Unlöslichkeit im festen Zustand →



Seigerung → heterogenes Gefüge

Beispiel:



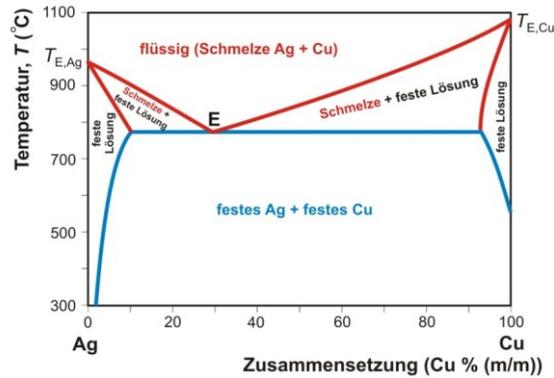
$77\%H_2O+23\%NaCl$ :  
 $T_E = -21^\circ C$

Wood-Metall (Bi-Pb-Cd-Sn):  
 $T_E = 68^\circ C$



18

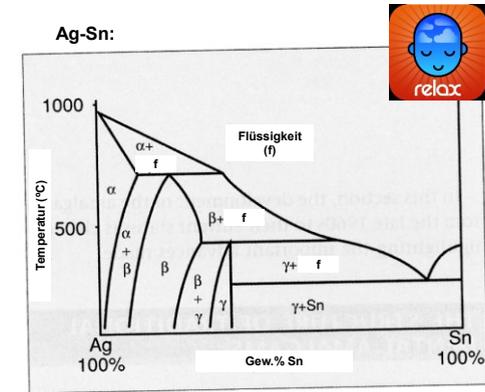
Z.B. Ag-Cu



19

## Amalgam

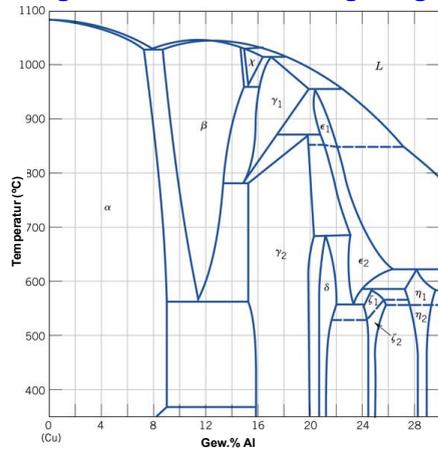
typische Zusammensetzung	
Metall	Gew. %
Hg	50
Ag	34
Sn	13
Cu	2
Zn	1



$\gamma$  Phase:  $Ag_3Sn$

20

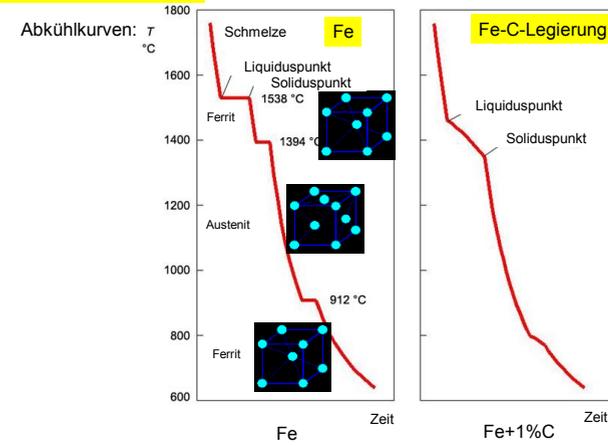
## Keine Sorge! Wird nicht zurückgefragt!



21

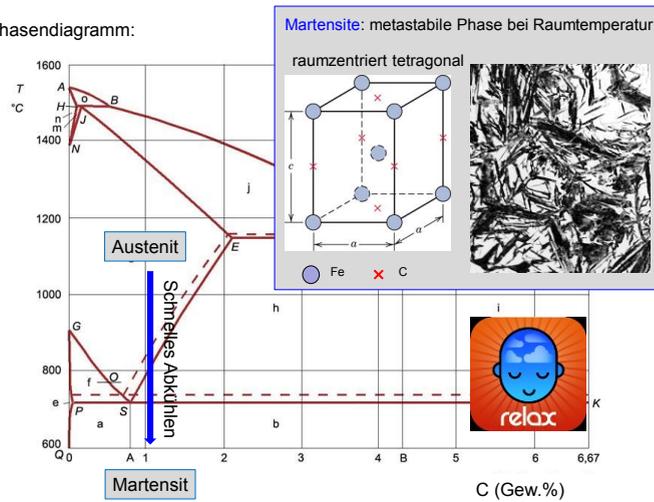
## Eine exotische Phase - Martensite

Beispiel: Fe-C-Legierung



22

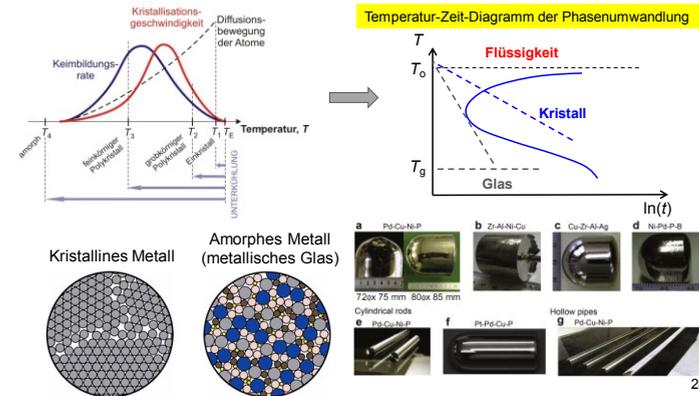
Phasendiagramm:



23

## Metallische Gläser (amorphe Metalle)

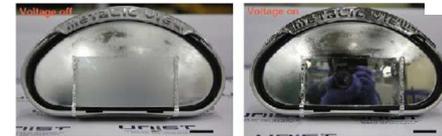
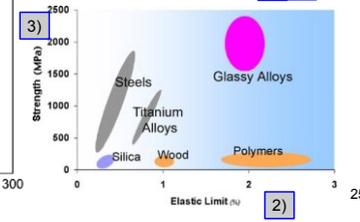
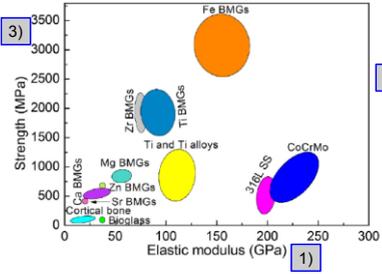
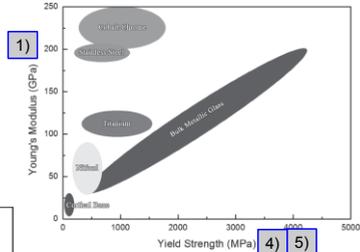
- Das erste Metallglas: 1960iger Jahre, Au-Si-Legierung,  $\approx 10^6$  K/s Abkühlgeschwindigkeit(!), Größe  $< 1$  mm.
- Das erste kommerzielle Metallglas: 1990iger Jahre, Zr-Ti-Cu-Ni-Be-Legierung,  $\approx 1$  K/s Abkühlgeschwindigkeit, Größe  $\approx 1$  cm.



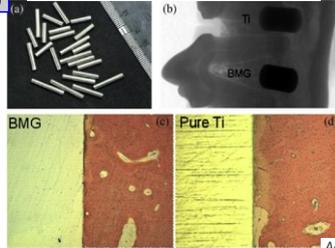
24

Besondere Eigenschaften der amorphen Metalle (BMG) vs. kristallinen Metalle:

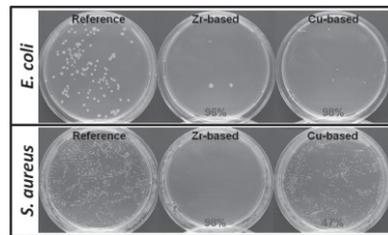
- 1) weniger steif
- 2) elastischer
- 3) stärker
- 4) härter
- 5) weniger abnutzung
- 6) weniger Korrosion
- 7) bessere Biokompatibilität



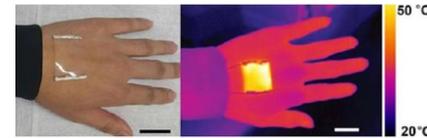
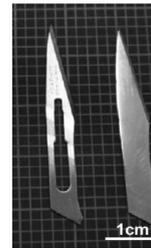
7) H.F. Li, Y.F. Zheng / Acta Biomaterialia 36 (2016) 1–20



Adv. Mater. 2016, 28, 5755–5762



ZrCuAlAgSi BMG



More information: Byeong Vlan An, et al. "Stretchable, Transparent Electrodes as Wearable Heaters Using Nanotrough Networks of Metallic Glasses with Superior Mechanical Properties and Thermal Stability." Nano Letters. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04134



# Keramiken

**Definition:** Verbindung metallischer und nichtmetallischer Elemente (Es gibt Ausnahmen!)



**Allgemeine Eigenschaften:**

- mittlere Dichte
- fest
- hohe Steifigkeit, Härte, aber Brüchigkeit, schlechte Bearbeitungsfähigkeit
- gute Hitze- und Korrosionsbeständigkeit
- schlechte Hitzeschockbeständigkeit
- schlechte elektrische und Wärmeleitung
- diverse optische Eigenschaften
- Biokompatibilität

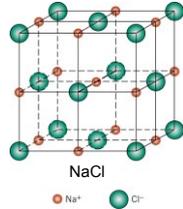


**Herstellung:**

- Schmelzen
- Ausbrennen, Sintern

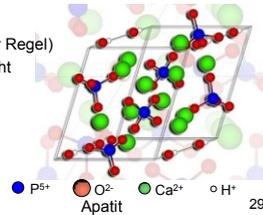
**Struktur:**

- Ionenbindung, kovalente Bindung
- unterschiedlich große Ionen (in der Regel)
- kristallin oder amorph oder gemischt

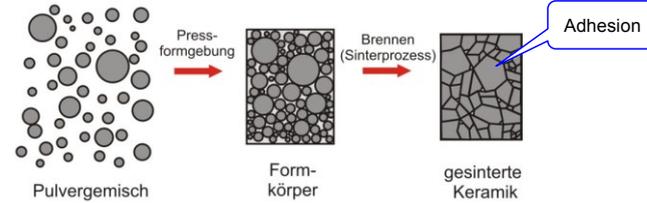


**Anwendungsbeispiele:**

- Kronen, Brücken
- Wurzelstift
- Zemente
- Polierstoffe



# Sintern



Ein praktisches Problem: die **Porosität!**



**Flüssigphasensintern:** Schmelzen + Sintern

# \*\*Struktur

amorph



kristallin

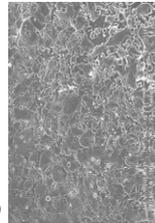
Einkristall



Polikristall

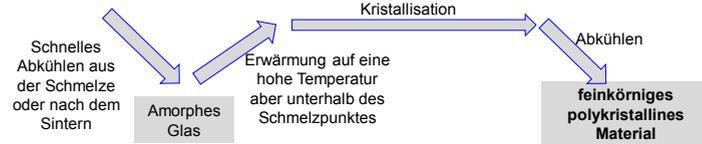


gemischt

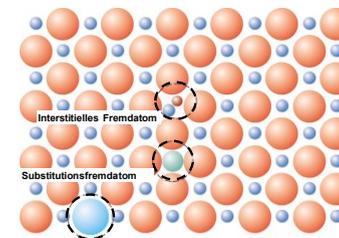
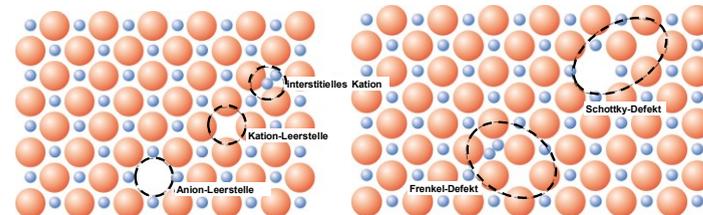


(Komplizierte Kristallgitterstruktur mit unterschiedlich großen Ionen.)

# Glaskeramik:



# Gitterdefekte:

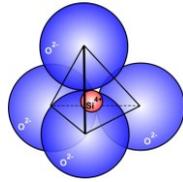


- Bedingungen:
- Elektroneutralität
  - gemeinsame Wanderung

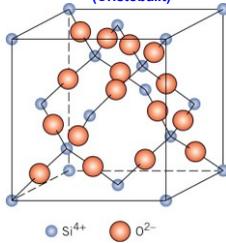
# Silikate

Mehrheitselemente: Si és O

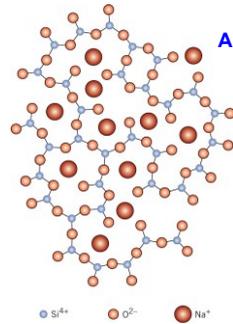
Baueinheit:  
SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>



## • Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>) Kristall (Cristobalit)

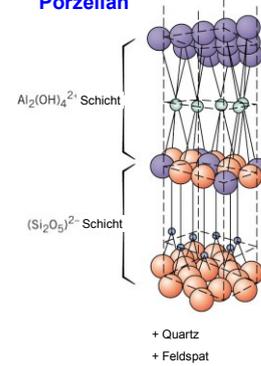


## Amorphes Glas

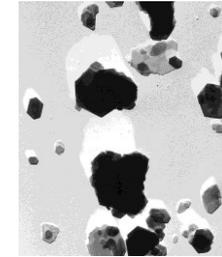


33

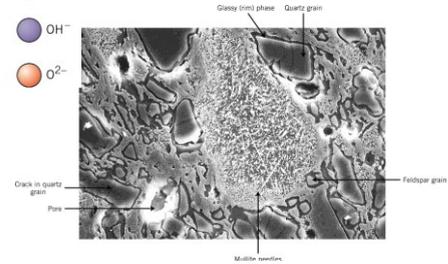
## Porzellan



Kaolin  
(Al<sub>2</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub>)

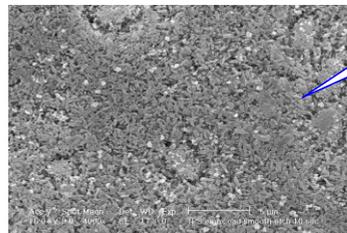


➔ Trocknung, Schrühbrand



## • Zahnärztliche Silikatkeramiken

- Amorphes Glas (Natronfeldspat oder Albit - NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, Orthoklas - KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ...)
- Amorphes Glas mit kristallinen Bereichen
  - amorphes Feldspatglas + wenig Leucitkristalle (KAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)
  - amorphes Feldspatglas + 50% Leucitkristalle (KAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>)
  - Lithiumsilikatglas + 70% Lithiumdisilikatkristalle (Li<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)



Glaskeramik

35

## Oxidkeramiken

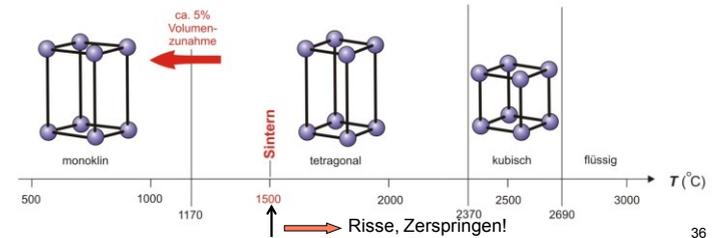
### • Zirkoniumdioxid (ZrO<sub>2</sub>, Zirkon)

Eigenschaften (im dichtgesinterten Zustand):

- weiß
- Dichte etwa 6 g/cm<sup>3</sup>
- Hohe Festigkeit und Zähigkeit, steif, hart (s. später)

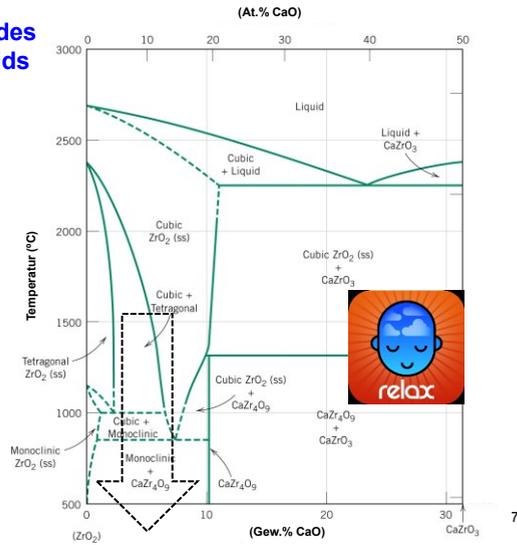
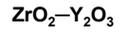
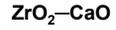
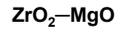
Herstellung:

- Aus Zirkonsand (ZrSiO<sub>4</sub>)
- Teure Reinigung, Hafniumoxid bleibt etwa 1% (Radioaktivität <1 Bq/g!)
- Heißes oder kaltes Pressen, Sinterprozess

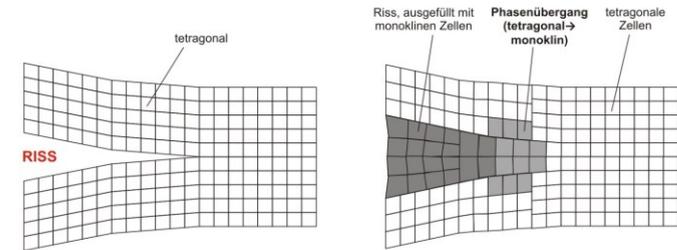


36

## Stabilisierung des Zirkoniumdioxids



„Selbstreparatur“ von Zirkon:



➔ Durch Zugabe von Zirkon können andere Keramiken auch verstärkt werden.

➔ s. Umwandlungsverstärkte Keramiken

38

## Aluminiumoxid ( $Al_2O_3$ )

Eigenschaften:

- durchsichtig, weiß
- Schmelzpunkt  $2700^\circ C$
- Dichte cca.  $4 g/cm^3$
- Sehr hart (s. später)



Kristalline Strukturen:

- Korund
- $Al_2O_3 + CrO_2 \rightarrow$  Rubin
- $Al_2O_3 + CoO_2 \rightarrow$  Zafir



## Oxidkeramik Kristall + Glas

Nächste Vorlesung:  
Kapitel 12-13

39