

## Physikalische Grundlagen der zahnärztlichen Materialkunde

– 5 –

# Materialklassen. Metalle und Keramiken

erarbeitet von: Gergely AGÓCS, Ferenc TÖLGYESI  
7. Oktober 2020.

Kapitel des  
Lehrbuches:  
9, 10, 11

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

## Schwerpunkte

- ❖ Materialklassen (-familien)
- ❖ Struktur der Metalle:  
Kristalle, Quasikristalle, Metallgläser
- ❖ Legierungen:  
feste Lösungen, Eutektika
- ❖ Struktur der Keramiken
- ❖ Silikate, Oxidkeramiken

Inlays und Onlays aus Goldlegierung





Brücke aus Zirkon

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

## Zahnärztliche Materialklassen

Metallbindung

**METALLE**



Zahnimplantat aus Metall

Verbindungen von metallischen und nichtmetallischen Elementen

**KERAMIKEN**



Vollkrone aus Keramik

**POLYMERE**



Totalprothese auf Polymerbasis

Bestehen aus durch Wiederholung einer Grundeinheit aufgebauten kettenförmigen Molekülen.

**KOMPOSITE**



Kompositbrücke

Bestehen aus mindestens zwei Materialien der früheren 3 Familien.

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

## Einige zahnmedizinische Anwendungen



Vollkeramikkrone aus Zirkon



Vollgusskrone aus Gold



Krone aus Porzellan und Metall



Teilprothese auf Silberbasis (cca. 1829)



PFM (= *porcelain fused to metal*, Porzellan-geschmiedete Metall) Krone



Totalprothese auf PMMA-Basis

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

## Metalle



Gediegen Gold

**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



Gediegen Kupfer



Gediegen Silber



Gediegen Platin

FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken

## Metalle



Richard Kiel als *Beißer*  
 („Der Spion der mich liebte“, 1977)

**Struktur:**

- Metallbindung
- gleich große Atome (in den reinen Metallen)
- **kristallin** (am meisten hexagonal oder kubisch) – es gibt aber auch aperiodischen **Quasikristall** und amorphes **Metallglas!**
- polikristallin

**Anwendungsbeispiele:**

- Kronen, Brücken
- Implantate
- Plombe
- kieferorthopädische Geräte

**Herstellung:** Schmelzen, Gießen



Ferenc Kállai als *József Pelikán*  
 („Der Zeuge“, 1969)

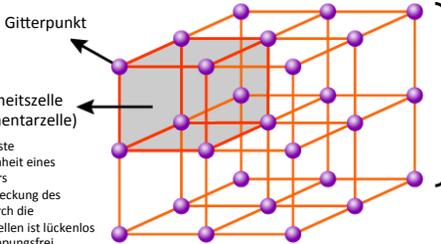
FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken

## Kristallgitter und Einheitszelle

**Gitterpunkt**

**Einheitszelle (Elementarzelle)**

- die kleinste Volumeneinheit eines Kristallgitters
- die Überdeckung des Raumes durch die Elementarzellen ist lückenlos und überlappungsfrei
- enthält alle Informationen, die zum Beschreiben des Kristalls notwendig sind



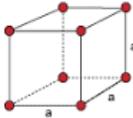
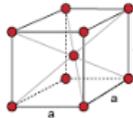
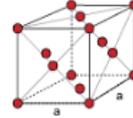
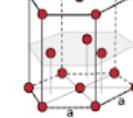
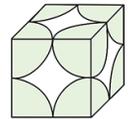
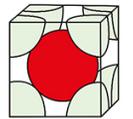
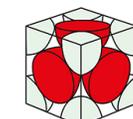
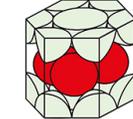
**Kristallgitter (Punktgitter)**

- eine regelmäßige dreidimensionale Anordnung von Punkten
- entsteht durch lückenloses translations-symmetrisches Aneinanderfügen der gleichen Elementarzelle in allen drei Dimensionen des Raums

**Gitterkonstante:** eine der Parameter (Winkel, Kantenlängen) der Einheitszelle eines Kristallgitters

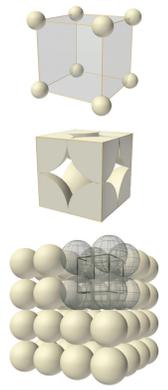
FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken

## Kristallgitter der Metalle

			
kubisch-primitiv <i>simple cubic</i>	kubisch-raumzentriert <i>body centered cubic, bcc</i>	kubisch-flächenzentriert <i>face centered cubic, fcc</i> kubisch-dichtest-gepackt <i>cubic close packed, ccp</i>	hexagonal-dichtest-gepackt <i>hexagonal close packed, hcp</i>
α-Po	Fe, Cr...	Cu, Ag, Au, Pt, Al, Ni...	Ti, Cd, Co, Zn, Zr, Mg...
			

FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken

### Kubisch primitives Gitter



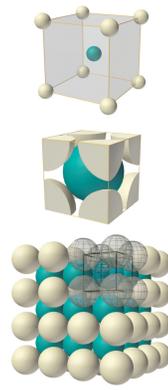
Zahl der Kugeln in einer Elementarzelle: 1

Kantenlänge der Elementarzelle:  $a = 2r$

Teilchen-Packungsdichte:  $\frac{V_{Kugel}}{V_{Elementarzelle}} = \frac{\pi}{6} \approx 0,5236 \approx 52\%$

FAFA\_DE | 5 | Metalle und Keramiken

### Kubisch raumzentriertes Gitter



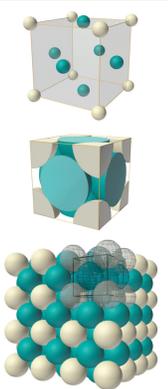
Zahl der Kugeln in einer Elementarzelle: 2

Kantenlänge der Elementarzelle:  $a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$

Teilchen-Packungsdichte:  $\frac{V_{Kugel}}{V_{Elementarzelle}} = \frac{\pi\sqrt{3}}{8} \approx 0,6802 \approx 68\%$

FAFA\_DE | 5 | Metalle und Keramiken

### Kubisch flächenzentriertes Gitter (Kubisch dichtest gepacktes Gitter)



Zahl der Kugeln in einer Elementarzelle: 4

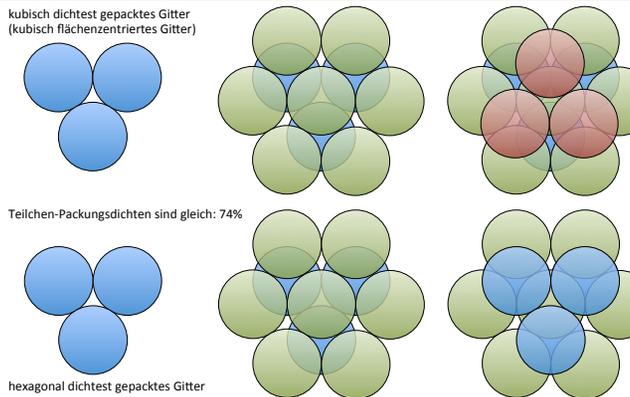
Kantenlänge der Elementarzelle:  $a = \sqrt{8}r$

Teilchen-Packungsdichte:  $\frac{V_{Kugel}}{V_{Elementarzelle}} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,7405 \approx 74\%$

FAFA\_DE | 5 | Metalle und Keramiken

### Dichteste Kugelpackung

kubisch dichtest gepacktes Gitter (kubisch flächenzentriertes Gitter)



Teilchen-Packungsdichten sind gleich: 74%

hexagonal dichtest gepacktes Gitter

FAFA\_DE | 5 | Metalle und Keramiken



## Quasikristalle

Parkettierung mit regelmäßigen Dreiecken

Parkettierung mit regelmäßigen Rechtecken

Parkettierung mit regelmäßigen Sechsecken

Parkettierung mit regelmäßigen Fünfecken? Es geht nicht. Aber eine regelmäßige fünffache Symmetrie ist erreichbar.

Penrose-Parkettierung

In Quasikristallen herrscht eine "aperiodische Ordnung" und sie haben eine fünffache Symmetrie und die Form eines Dodekaeders

Gd-Cd-Quasikristall

Al-Cu-Fe-Quasikristall

Ho-Mg-Zn-Quasikristall

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

## 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 Abkühlgeschw., Größe  $\approx 1$  cm.

Kristallines Metall

Amorphes Metall (metallisches Glas)

72ox 75 mm 80ox 85 mm

zylindrische Stäbe

hohle Röhren

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

- weniger steif
- weniger Abnutzung
- elastischer
- weniger Korrosion
- stärker
- bessere Biokompatibilität
- härter

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

## 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, quaternär, ...)
- den 3 wichtigsten Komponenten (z.B. Au-Pd-Ag, Ni-Cr-Be, ...)
- dem Phasendiagramm
  - Mischkristall
  - eutektische Legierung
  - peritektische Legierung
  - intermetallische Verbindung

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

## Legierungen: Beispiele

**aus dem Alltag:**

*Kupferbasis*

- **Bronze:** Cu + Sn
- Aluminiumbronze: Cu + Al
- **Messing:** Cu + Zn
- nordisches Gold: Cu + Al + Zn + Sn
- **Neusilber, Alpacca:** Cu + Ni + Zn
- Konstantan: Cu + Ni + Mn

*Eisenbasis*

- **Stahl:** Fe + C (<2,06%)
- **rostfreier Stahl, Innoxstahl:** Stahl + Cr
- ChroVa Stahl: Stahl + Cr + V

*Aluminiumbasis*

- Dural: Al + Cu (+ Mg + ...)

**aus der zahnärztlichen Praxis:**

*Edelmetallbasis*

- Bioporta G: Au + Pt + Zn + In
- Degulor M: Au + Ag + Pt + Pd + Cu + Zn
- Bio Herador N: Au + Pt + Zn + Mn

*Nichtedelmetallbasis*

- Ti6Al4V: Ti + Al + V
- **Amalgam:** Hg + Ag + Sn + Cu + Zn
- Cobalt-Chrom-Molybän-Legierung
- rostfreier Stahl
- Nickel-Titan Legierung
- Beta-Titan-Legierung: Ti + Mo

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

### Verhältnis der Komponenten in einer Legierung

- Massen%  $c_{m,1} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot 100\%$
- Mol%  $c_{v,1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot 100\%$  → Eigenschaften!  
(z.B. Ni-Cr-Mo-Be-Legierung: Be 1,8 Massen% ↔ 11 Mol%)

molare Masse:  
 $M = \frac{m}{v}$

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:  $\bar{\rho} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{c_{m,1} \cdot \rho_2 + c_{m,2} \cdot \rho_1}$

FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken

### Feste Lösung (Mischkristall)

Lösbarkeit sowohl in der Schmelze als auch in der festen Phase → homogenes Gefüge

**Substitutions-**

1. Komponente  
2. Komponente

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

**interstitiell**

1. Komponente  
2. Komponente

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

(CP: commercial purity)

FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken

### Feste Lösung (Mischkristall)

**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.

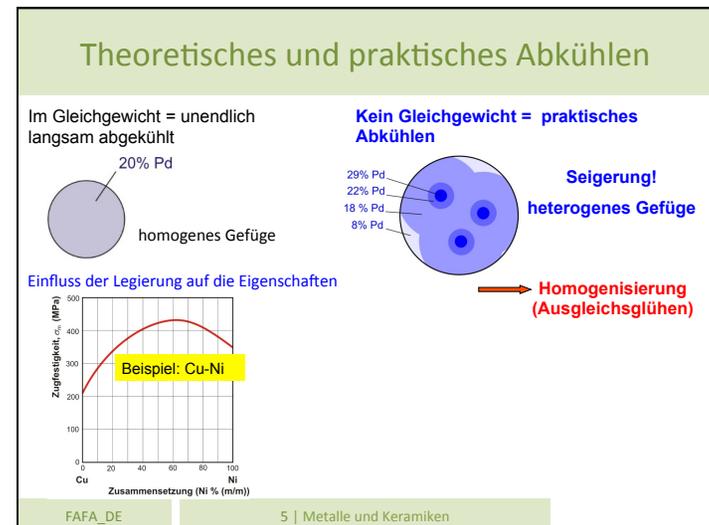
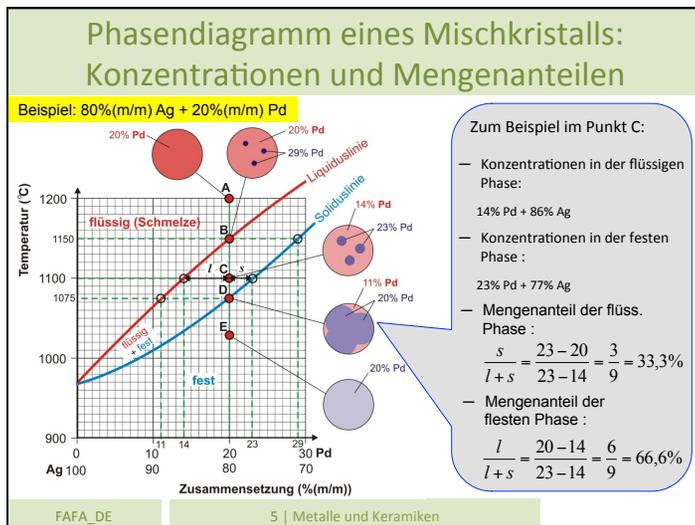
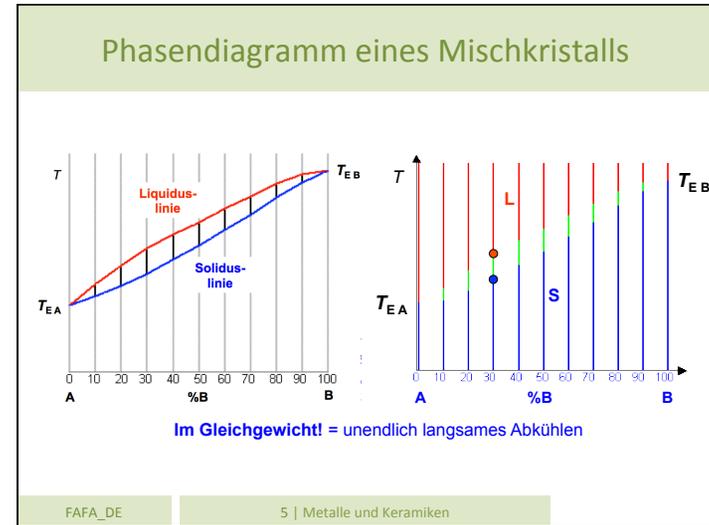
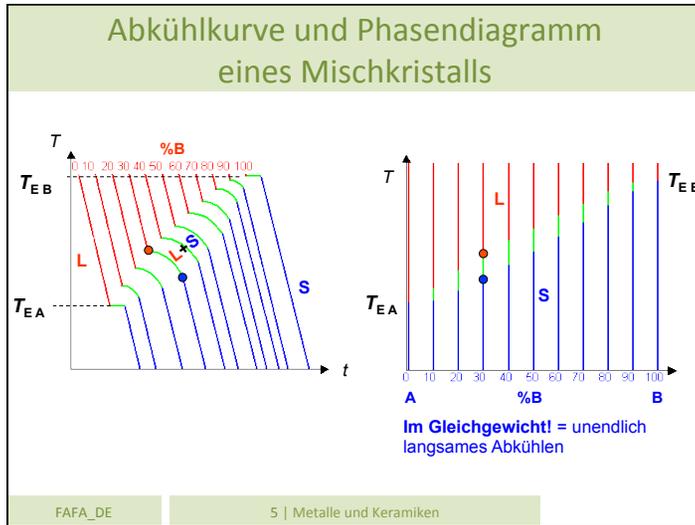
FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken

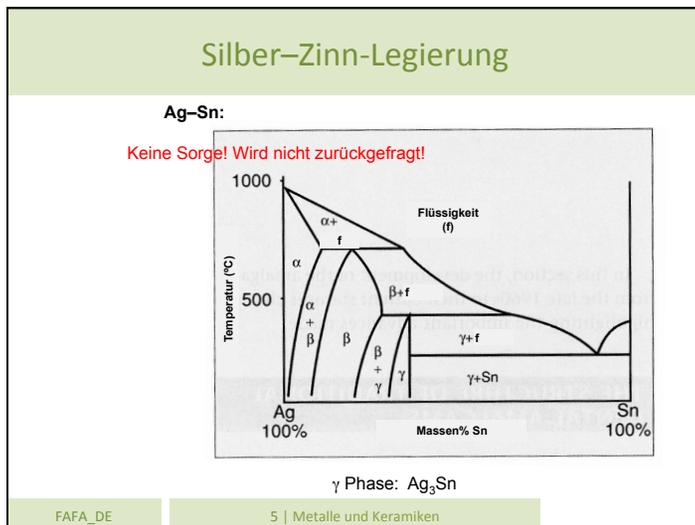
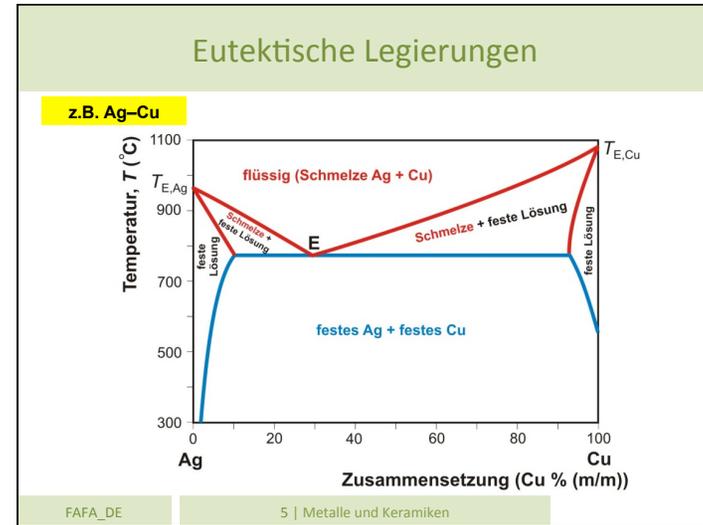
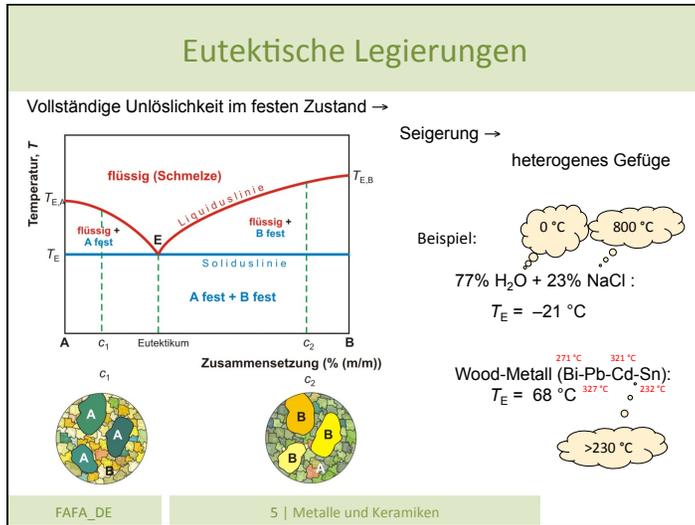
### Abkühlkurve eines reinen Metalles

**Kristallisierung**

**Glasübergang**

FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken





### Amalgam

eine Legierung des Quecksilbers

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

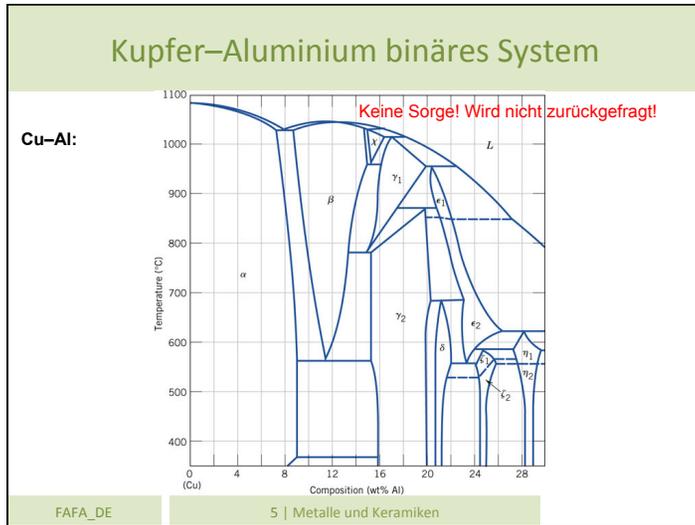
EU: ab 1.1.2019 nur in verkapselter Form

**Amalgamfüllung („Plombe“):**

- Jeder Dritte in Deutschland hat eine (stand 2020)
- **haltbar** und kostengünstig (die einzige Füllung, die von Krankenkassen komplett bezahlt wird)
- Indikation: Allergie gegenüber anderen Füllungsmaterialien

fertige Amalgamplombe

FAFA\_DE      5 | Metalle und Keramiken



### 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

FAFA\_DE 5 | Metalle und Keramiken

### Keramiken

**Struktur:**

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

**Anwendungsbeispiele:**

- Kronen, Brücken
- Wurzelstift
- Zemente
- Polierstoffe

**Herstellung:**

- Schmelzen
- **Ausbrennen, Sintern**

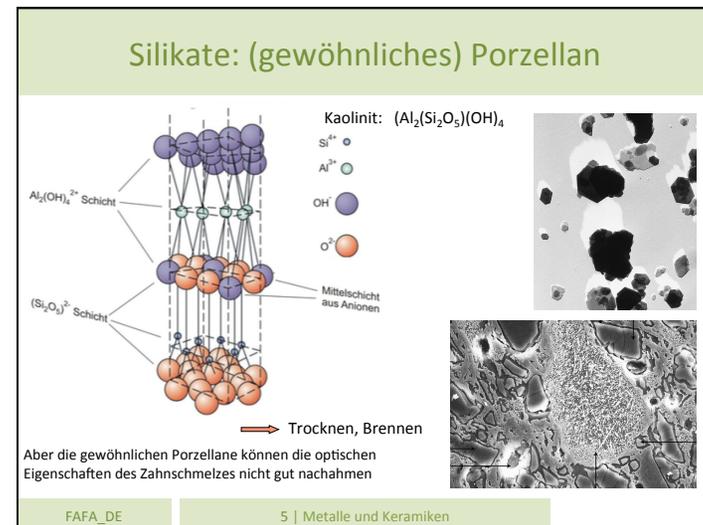
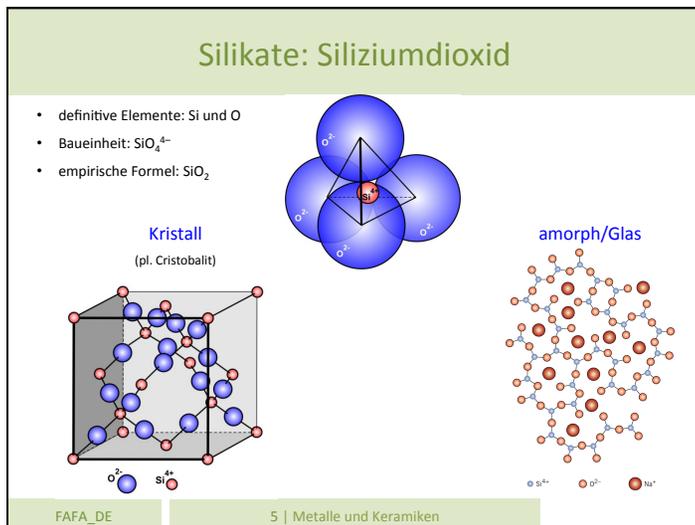
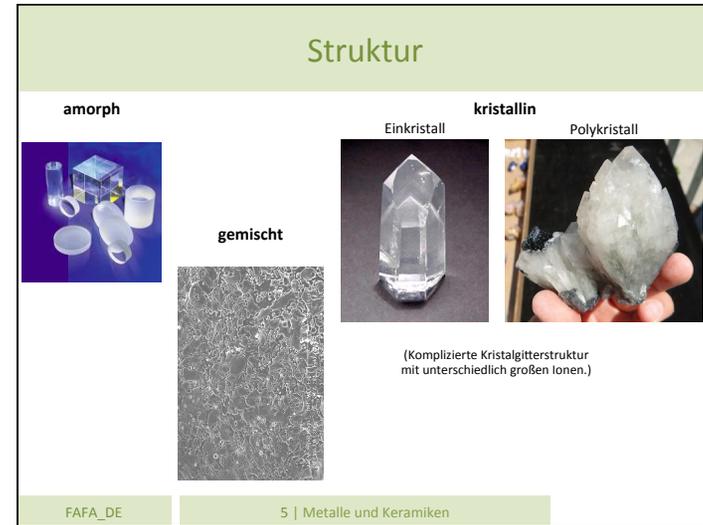
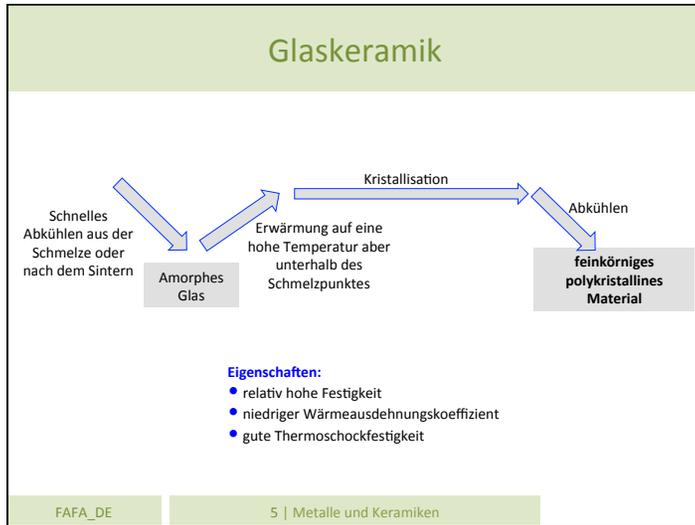
FAFA\_DE 5 | Metalle und Keramiken

### Sintern (pulvermetallurgisches Verfahren)

Ein praktisches Problem: die **Porosität!**

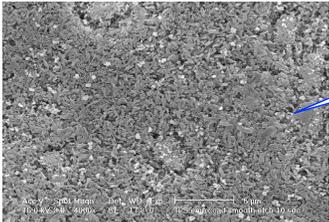
**Flüssigphasensintern:** Schmelzen + Sintern  
(Braucht eine Nebenkomponente)

FAFA\_DE 5 | Metalle und Keramiken



### Silikate: zahnärztliche Silikatkeramiken

- Gläser (Natrium-Feldspat (Albit):  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , Kaliumfeldspat (Orthoklas):  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ,  $\text{SiO}_2$ , ...)
- **Glaskeramiken** (amorphes Glas mit kristallinen Bereichen):
  - amorphes Feldspatglas + etwas Leucitkristall ( $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ )
  - amorphes Feldspatglas + 50% Leucitkristall ( $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$ )
  - Li-Silikatglas + 70% Li-Disilikatkristall ( $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ )



Glaskeramik (Vitremeram)

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

### Oxidkeramiken: Zirkoniumdioxid ( $\text{ZrO}_2$ )

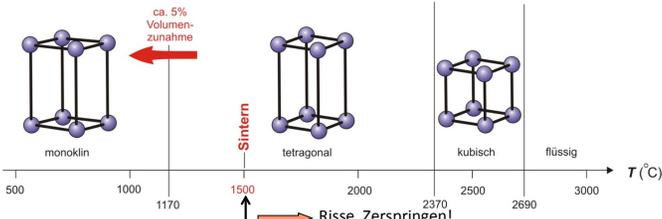
Eigenschaften (im dichtgesinterten Zustand):

- weiß
- Dichte etwa  $6 \text{ g/cm}^3$
- hohe Festigkeit und Zähigkeit, steif, hart (s. später)

Herstellung:

- aus Zirkonsand ( $\text{ZrSiO}_4$ )
- teure Reinigung, Hafniumoxid bleibt etwa 1% (Radioaktivität  $<1 \text{ Bq/g!}$ )
- heißes oder kaltes Pressen, Sinterprozess





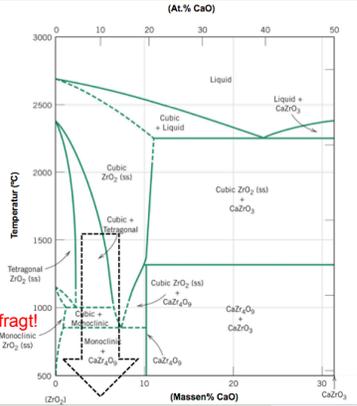
FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

### Zirkoniumdioxid: Stabilisierung

$\text{ZrO}_2\text{-MgO}$

$\text{ZrO}_2\text{-CaO}$

$\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$

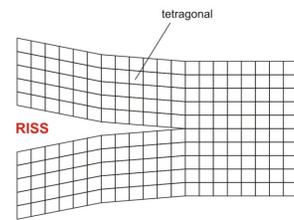


Keine Sorge! Wird nicht zurückgefragt!

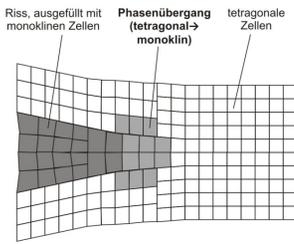
FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

### Zirkoniumdioxid: „Selbstreparatur“

„Selbstreparatur“ von Zirkon:



**RISS**



Riss, ausgefüllt mit monoklinen Zellen

**Phasenübergang (tetragonal → monoklin)**

tetragonale Zellen

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

→ s. Umwandlungsverstärkte Keramiken

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken

## Aluminiumoxid

- **Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

Eigenschaften:

  - durchsichtig, weiß
  - Schmelzpunkt 2700°C
  - Dichte cca. 4 g/cm<sup>3</sup>
  - Sehr hart (s. später)

Kristalline Strukturen:

Korund  
 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CrO}_2 \rightarrow \text{Rubin}$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CoO}_2 \rightarrow \text{Zafir}$













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

Nächste  
Vorlesung:  
Kapitel 12, 13
- **Oxidkeramik Kristall + Glas**

FAFA\_DE
5 | Metalle und Keramiken