

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

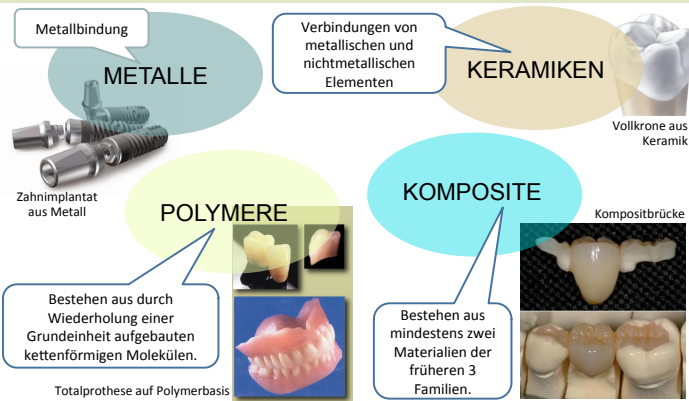


Brücke
aus Zirkon

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

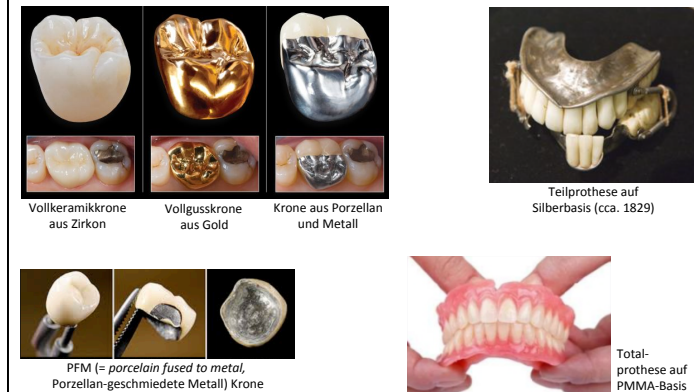
Zahnärztliche Materialklassen



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Einige zahnmedizinische Anwendungen



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Metalle



Gediegen Gold



Gediegen Silber

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 Platin

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Metalle



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



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

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:

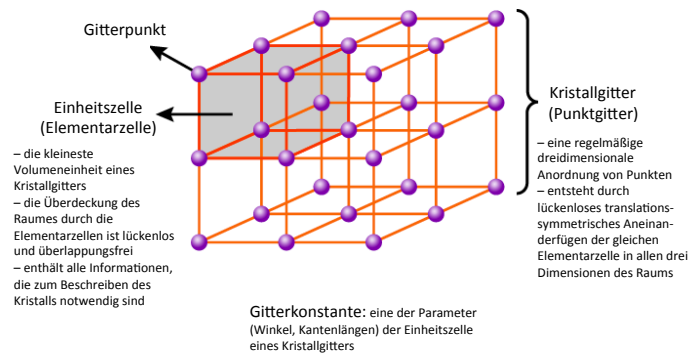
- Kronen, Brücken
- Implantate
- Plombe
- kieferorthopädische Geräte

Herstellung: Schmelzen,
Gießen

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

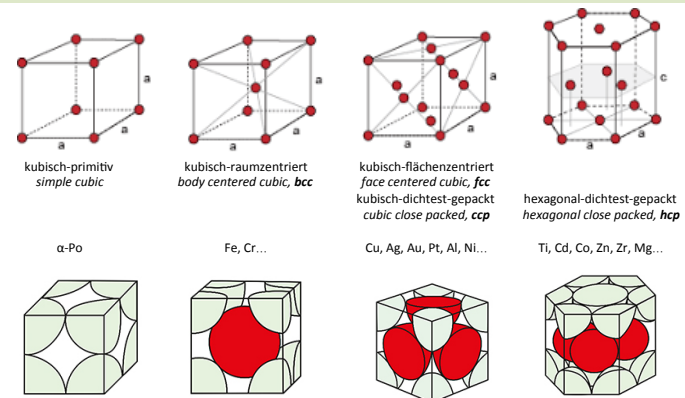
Kristallgitter und Einheitszelle



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

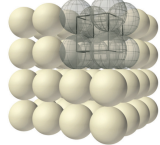
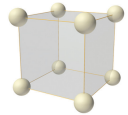
Kristallgitter der Metalle



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Kubisch primitives Gitter



Zahl der Kugeln in einer Elementarzelle: 1

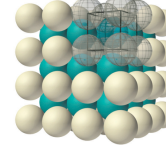
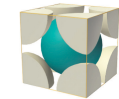
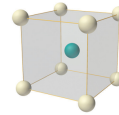
Kantenlänge der Elementarzelle: $a = 2r$

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

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Kubisch raumzentriertes Gitter



Zahl der Kugeln in einer Elementarzelle: 2

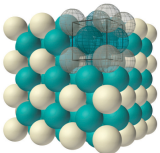
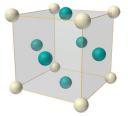
Kantenlänge der Elementarzelle: $a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$

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

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Kubisch flächenzentriertes Gitter (Kubisch dichtest gepacktes Gitter)



Zahl der Kugeln in einer Elementarzelle: 4

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

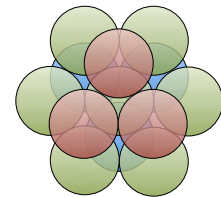
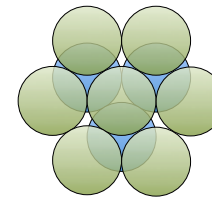
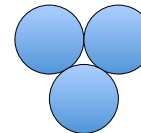
$$\text{Teilchen-Packungsdichte: } \frac{V_{\text{Kugel}}}{V_{\text{Elementarzelle}}} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \approx 0,7405 \approx 74\%$$

FAFA_DE

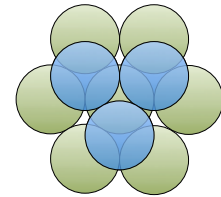
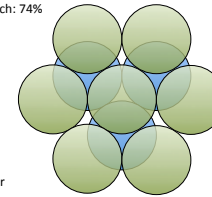
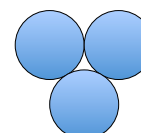
5 | Metalle und Keramiken

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 fünfache Symmetrie ist erreichbar.

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

Penrose-Parkettierung

Gd-Cd-Quasikristall

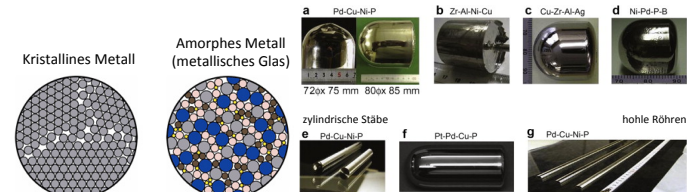
Al-Cu-Fe-Quasikristall

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, ≈ 1 K/s Abkühlgeschw., Größe ≈ 1 cm.



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

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

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, Inoxstahl:** 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%)

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

molare Masse:

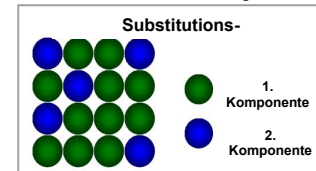
$$M = \frac{m}{v}$$

FAFA_DE

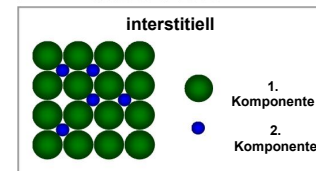
5 | Metalle und Keramiken

Feste Lösung (Mischkristall)

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



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



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:

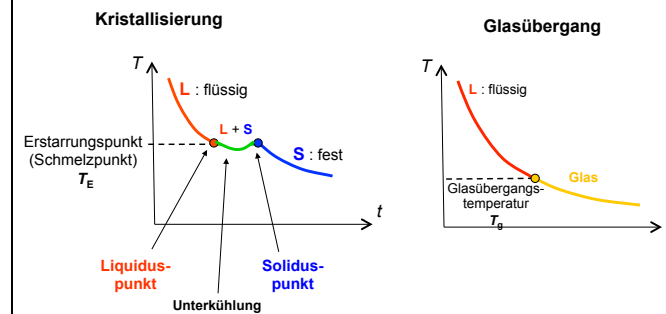
- „gelöste“ Atome wesentlich kleiner
- Menge der „gelösten“ Atome klein (< 10%)

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

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

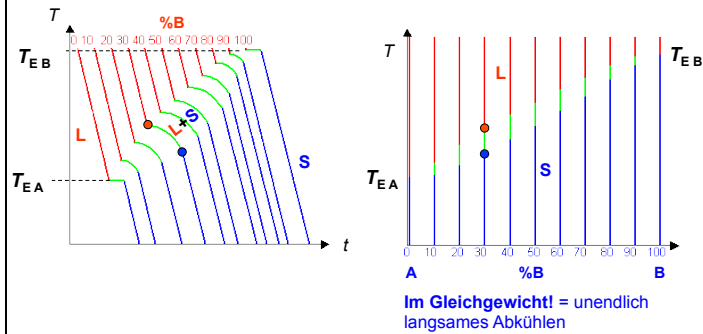
Abkühlkurve eines reinen Metalles



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

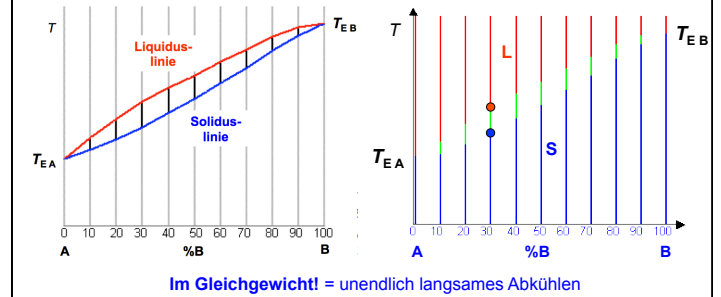
Abkühlkurve und Phasendiagramm eines Mischkristalls



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

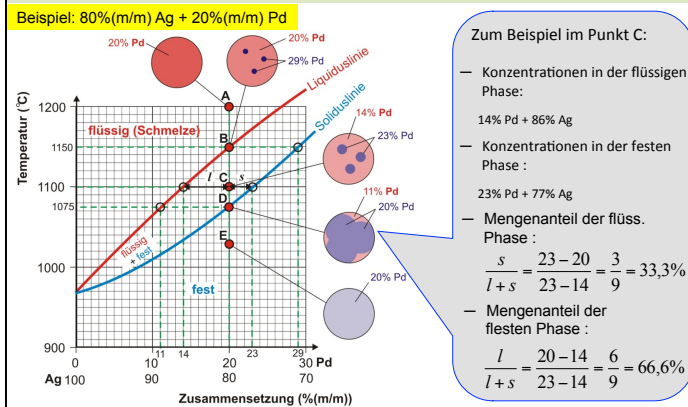
Phasendiagramm eines Mischkristalls



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Phasendiagramm eines Mischkristalls: Konzentrationen und Mengenteile

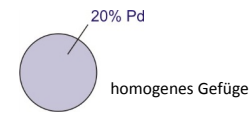


FAFA_DE

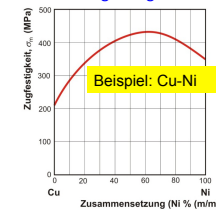
5 | Metalle und Keramiken

Theoretisches und praktisches Abkühlen

Im Gleichgewicht = unendlich langsam abgekühlt



Einfluss der Legierung auf die Eigenschaften



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Kein Gleichgewicht = praktisches Abkühlen

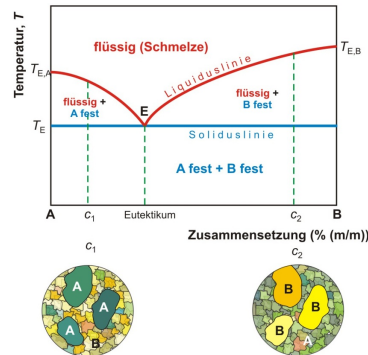
Seigerung! heterogenes Gefüge



Homogenisierung (Ausgleichsglühen)

Eutektische Legierungen

Vollständige Unlöslichkeit im festen Zustand →



Seigerung →

heterogenes Gefüge

Beispiel:

77% H₂O + 23% NaCl:

$T_E = -21\text{ °C}$

Wood-Metall (Bi-Pb-Cd-Sn):

$T_E = 68\text{ °C}$

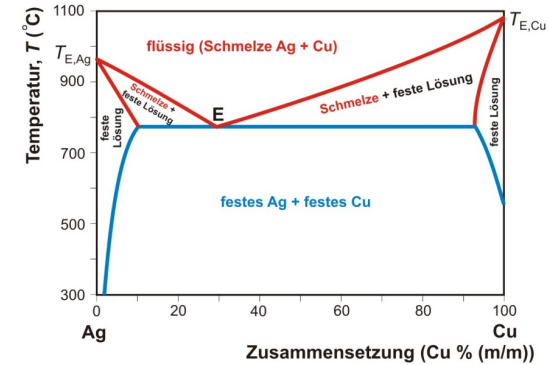
>230 °C

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Eutektische Legierungen

z.B. Ag–Cu



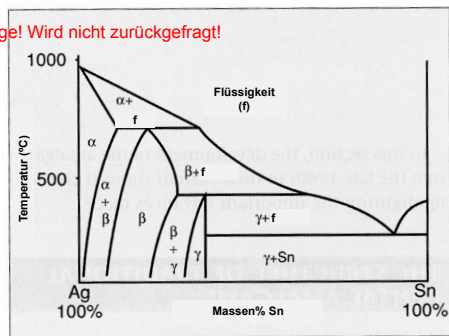
FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Silber–Zinn-Legierung

Ag–Sn:

Keine Sorge! Wird nicht zurückgefragt!



γ Phase: Ag₃Sn

FAFA_DE

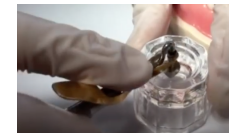
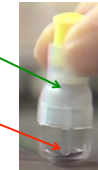
5 | Metalle und Keramiken

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

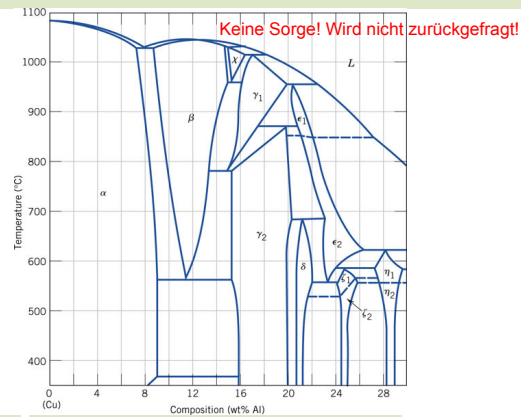
fertige Amalgamplombe

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Kupfer–Aluminium binäres System

Cu–Al:



FAFA_DE

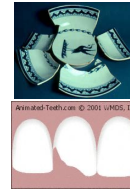
5 | Metalle und Keramiken

Keramiken

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

Allgemeine Eigenschaften:

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



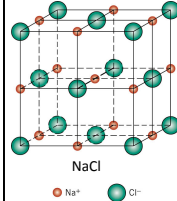
FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Keramiken

Struktur:

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

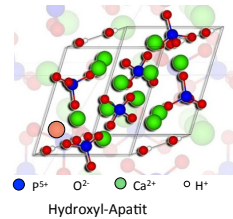


Anwendungsbeispiele:

- Kronen, Brücken
- Wurzelstift
- Zemente
- Polierstoffe

Herstellung:

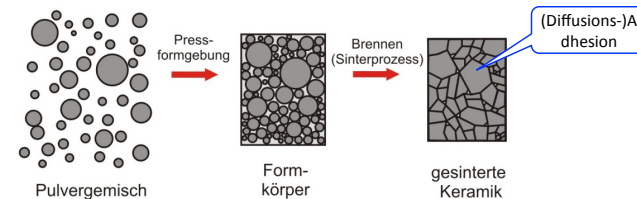
- Schmelzen
- **Ausbrennen, Sintern**



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Sintern (pulvermetallurgisches Verfahren)



Ein praktisches Problem: die **Porosität!**

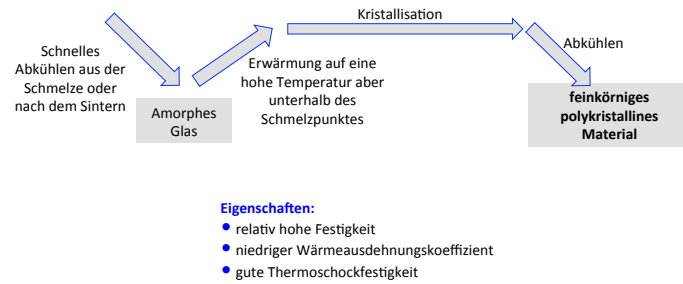


Flüssigphasensintern: Schmelzen + Sintern
(Braucht eine Nebenkomponente)

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

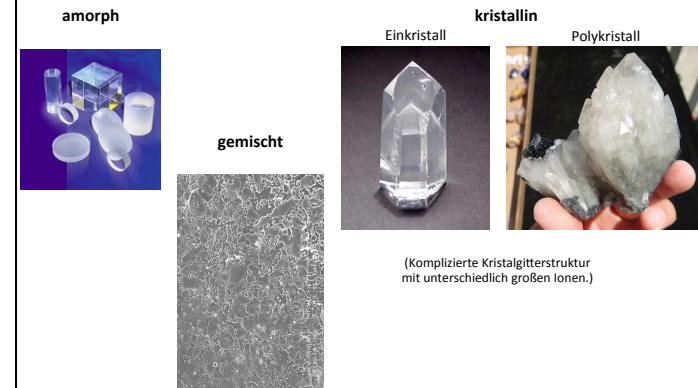
Glaskeramik



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Struktur

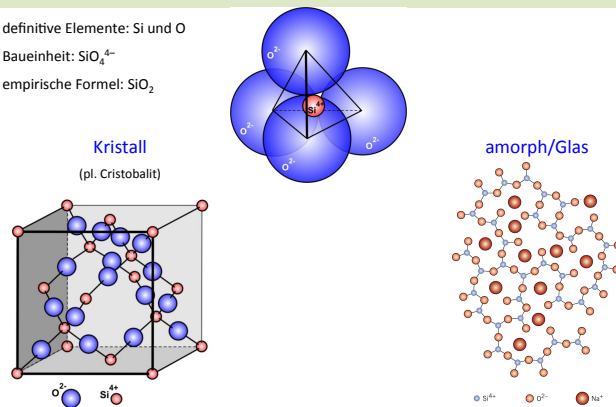


FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Silikate: Siliziumdioxid

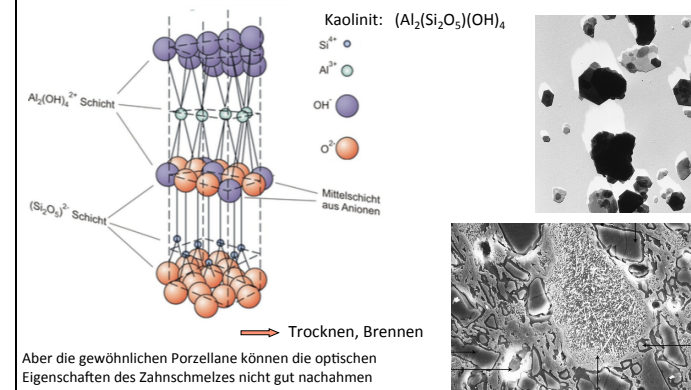
- definitive Elemente: Si und O
- Baueinheit: SiO_4^{4-}
- empirische Formel: SiO_2



FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Silikate: (gewöhnliches) Porzellan

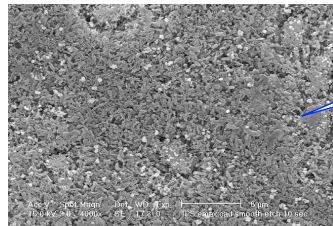


FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Silikate: zahnärztliche Silikatkeramiken

- Gläser (Natrium-Feldspat (Albit): $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, Kaliumfeldspat (Orthoklas): KAlSi_3O_8 , SiO_2 , ...)
- **Glaskeramiken** (amorphes Glas mit kristallinen Bereichen):
 - amorphes Feldspatglas + etwas Leucitkristall (KAlSi_2O_6)
 - amorphes Feldspatglas + 50% Leucitkristall (KAlSi_2O_6)
 - Li-Silikatglas + 70% Li-Disilikatkristall ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$)



Glaskeramik
(Vitrokeram)

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

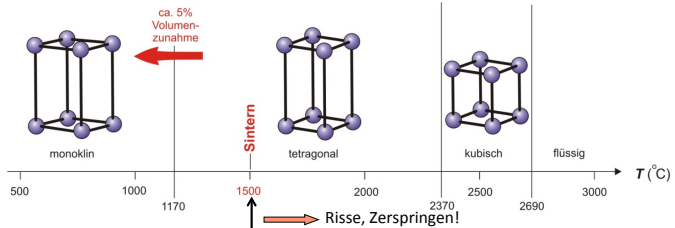
Oxidkeramiken: Zirkoniumdioxid (ZrO_2)

Eigenschaften (im dichtgesinterten Zustand):

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

Herstellung:

- aus Zirkonsand (ZrSiO_4)
- teure Reinigung, Hafniumoxid bleibt etwa 1% (Radioaktivität $<1 \text{ Bq/g!}$)
- heißes oder kaltes Pressen, Sinterprozess



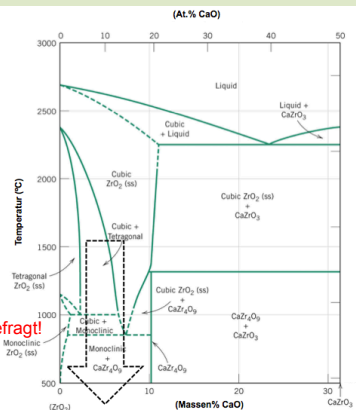
FAFA_DE

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!

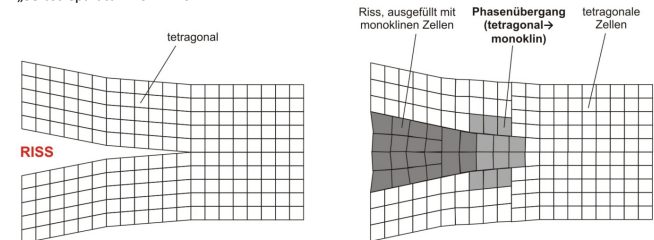


FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Zirkoniumdioxid: „Selbstreparatur“

„Selbstreparatur“ von Zirkon:



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

→ s. Umwandlungsverstärkte Keramiken

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken

Aluminiumoxid

- **Aluminiumoxid (Al_2O_3)**

Eigenschaften:

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

Kristalline Strukturen:

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









- **Oxidkeramik Kristall + Glas**

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

Nächste Vorlesung:
Kapitel 12, 13

FAFA_DE

5 | Metalle und Keramiken