

- Werkstoffe werden optimiert
↳ von Ingenieur/Materialw.:

- Porosität
 - Oberflächeneigenschaften
 - Degradationsrate
 - Festigkeit, E-Modul
 - Medizinischer Indikatoren
- Medizin/Biologie
- Drug delivery
 - Bioaktivität
 - Zellwachstum
 - Fremdkörperreaktionen

- Arten von Innovation - Def. von Medizinischer Fortschritt

- engerer Sinn: **Anwenderbezogene Weiterentwicklung**
 - Medizinisch-techn. Fortschritt: **Weiterentwicklung; auf verbesserte & neuartige Medizintechnologie basierend = Produktinnovation**
 - Mischformen möglich
- Nickel: gut für Alle

Nickel: gut korrosionsbeständig, aber Allergie

- Geschichte d. Implantate

- Zahnersatz aus Elfenbein
- 1890 Gluck: Endoprothetik
- Erfindung von CoCrMo Legierung
 - ↳ Cr: gegen Korrosion
 - ↳ Poliden: Zähigkeit
 } mechan. fest
korrosionsstabil
- ~~1965~~ Bränemark Zahnimplantate aus Reintitan (Zahnwurzel)
 - ↳ kaum Spontanreaktion
 - ↳ Oxidschicht (bereits bei der Herstellung) ⇒ gut gewebeverträglich
- ~~1965~~ Komplettoprothese von Chamley

Problem bei Endoprothesen:

 - unterschiedl. E-Module von Metallstiel & Knochen
 - ⇒ mangelhafte Kraftübertragung
 - ⇒ ungünstige Umbauvorgänge im Knochen
 - ⇒ Lockerung d. Implantat
- neu: Keramik-Zahnersatz-Implantate aus Zirkonoxid

Vorteil Keramik

Vorteil Keramik

- kein Schmierstoff
 - kein Kühlmittel
- } v.a. im Bereich Maschinenbau

Nachteil Metalle

- ↳ Abwehrzellen beeinträchtigt: Toren lagern sich in Lymphknoten, Lungengewebe, Milz

Vorteil Zinkoxid

- ↳ sehr biokompatible
- ↳ hohe Biege- & Bruchfestigkeit
- ↳ weiße Farbe

- weitere Entwicklung:
 - THA/TKA Gelenkbau steigt
 - THA/TKA Wiederaufbau steigt
 - individuelle Knochentransplantate aus Metallpulver backt
 - beschriebenes Implantat $\Rightarrow$ fördert Regeneration (statt Lücken mit Titan füllen); verschwindet mit Wachstum des Knochens

- Biomaterialien - Knochenrekonstruktion

- **biotoxisch** ⇒ Nekrose, Lockerung des Prothesen, Entzündung mit Abstoßungsreaktion, Schmerzen
 - durch: **Schwermetalle** (z.B. Gadolinium, Kupfer)
 - **biotolerant** ⇒ **vorteilhafte Einfluss** auf Bindegewebe- und Knochenbildung (**distanz Osteogenese**)
 - durch: **Co Cr** (**Cobalt-Chrom-Legierung**) mit viel Chrom ⇒ bessere Festigkeit, Zähigkeit ⇒ **keine Versprödung**
PMMA (Polymethyl-
PEEK (Polyethyl-etherketon) ⇒ mech. anspruchsvoller, leistungsfähiger, teurer
316 L (Legierung) ⇒ mittels **Basislegierung Chrom**
 - **biomert** ⇒ **Kontaktosteogenese**: Begünstigte Osteogenese an **Kontaktstelle** ⇒ Wachstum nur an Oberfläche
 (keine (kaum) chem. u. biolog. Wechselwirkung zw. Gewebe u. Implantat; langfristig)
 - ⇒ **Formschlüssig** ⇒ „nicht schädigend beeinflussend“, beeinflusst **Heilung** positiv, z.B. durch **Titanlegierung**
 - durch: **Ti** ~~FA~~ (mech. Titan)
TiAl6V4 (verbessertes Metall)
α-Al₂O₃ (Keramik)
 - **bioaktiv** = **aktiv an Heilung beteiligt** durch **Umwandlungs** Teilnahme am Umwandlungsprozess
 (bonding Osteogenese) ⇒ **diffusionsfähige Knochenbildung** ⇒ **bessere Verbindung mit Implantate**;
 z.B. durch Beschichtung ⇒ **Transformations in bone tissue**
 mit Pharmakoen ⇒ **biokatalytische Funktion**
- Verbundosteogenese**

→ durch: TiO_2
 $\text{HAP} = \text{Hydroxyapatit}$ (Knochenersatzstoff)
 $\text{TCP} = \text{Tricalciumphosphat}$

BioGloss

Auch Anbringen von Pharmaka möglich → für Grenzflächen

► Anwendungsbeispiele von Werkstoffen in Medtech

Gelenkersatz/Osteosynthese:

- Metalle
- rostfreier Stahl
 - Ti, Titan-L.
 - CoCr-L

Keramik

- Al_2O_3 (Aluminiumoxid)
- ZrO_2 (Zirkonoxid)
- Calciumphosphate

Polymere

- nur ergänzend z.B.
- Gelenkpfanne
- Füllung

Dentalchirurgie:

- Ti, Ti-L
- CoCr-L

- Amalgam: Hg-Ag-Sn

- Gold-L

Keramik

- Al_2O_3
- ZrO_2
- Calciumph. Porzellan

Zahnkopf

Gefäßchirurgie:

- CoCr-L (temp. Imp.)
- Ni-Ti-L (Steinb. - Form bei best. °C veränderbar)

- Polymere: meistens

Bsp.

keine Keramiken; wenn nur um schnelles Wachstum v. Kollagen verhindern

Chirurg. Instrumente:

- rostfreie Stähle
- Ti-L

Ophthalmologie:

- nur Polymere → Kontaktl., Retinaersatz aus Si

► Metall als Implantatwerkstoffe

2 Hauptanwendungen

↳ Totalprothese

⇒ Gelenkersatz

↳ Fixationselement

⇒ Frakturstabilisierung

► Keramik als Implantatwerkstoff

↳ Al_2O_3 : Dental, Gesicht, Mittelohr, Hüftgelenkskugel

↳ ZrO_2 : Hüftgelenksk.

↳ Hydroxyapatit: Knochen, Dental, Ohr, Wirbel, Orthopädie

↳ bioaktive Gläser: Gesicht, Dental, Knochen, Wirbel, Orthopädie

Glas-Keramik

Hüftgelenkendoprothesen

Beschichtung d. Prothesenschäften

→ nur temporär

→ Umwandlung in Knochensubstanz

► Polymere in Medtech

2 Hauptanwendungsgebiete

↳ Therapie

Langzeit- & Kurzzeitimplantate

→ Blutgefäß, Herzklappen

Katheter

Wachstmaterial

therapeut. Systeme (drug delivery)

GewebeKulturen (tissue engineering)

↳ Diagnostik

→ klin. Labortext

WERKSTOFFGRUPPEN

Metall. Werkstoffe

- umfasst - Eisenwerkstoffe
- Nicht-Eisenmetalle (→ Bronze
- Pulver- & Sinterw.
- Merkmal - kristall. Aufbau
- metall. Glanz
- Festigkeit, formbar, Verfestigbar
- elektr. + Wärmeleitend
- in Säure ~~ist~~ zersetzend + Salzbildung
- in wässr. Metallsatzlg ⇒ Kationen

Organ. Werkstoffe

- umfasst - natürl. organ. W. → Holz, Baumwolle, Hauf, Seide, Naturkautschuk
- synth. organ. W. → Kunststoffe
- Def.: - makromolekulare organi. Stoffe
- aus synth. Erzeugung
- aus Umwandl. von Naturstoffen
- plast. formbar bei best. Beding.
- Einteilung - nach Herstellung
• Poly ^{merisate} _{kondensate} _{addukte}
• Derivate natürl. Hochpolymere
- nach Umformverhalten
• Thermo plast
• Duro " _(Duromer & Elastomere)
• Elaste " _(Elastomere & Elastomere)
(Fluido ")

Anorganisch - nichtmetallische W.

- ↳ natürl. Mineral. → Glas
↳ Beton
↳ Faser
↳ Keramik → Einkristall

Verbundwerkstoff → Komposit aus o.g. Gruppen

Werkstoffe/Festkörper - Eigenschaften

- Zusammenwirken elementare Eigenschaften:
- atomare Bausteine $\hat{=}$ chem. Zusammensetzung
 - Anordnung d. Feinstruktur
 - ↳ Kristallinität
 - ↳ Phasenzusammens.
 - ↳ Konstitution
 - Art + Anteil wirkender Bindungskräfte → Bindungscharakter
 - Störungen (gewollt & ungewollt) d. GGW Zustands
 - ↳ im Gitter
 - ↳ chem. - thermody.
 - ↳ Gefüge

Stoffklassen	Bindungsdemerk	Bindungsarten chem. Bindungen	Eigenschaften
Nichtmetallverbindungen → Polymere	Moleküle	e-Paar-Bindung	- verschieden - nicht leitend da (e) Paar unbeweglich
Salze u. Metalloxide → Keramike	Ionen	Ionenbindung	- spröde - elektr. leitende Lösung da Valenze (e) beweglich - Wärme leitfähig - symmetr. Atomrümpfe
Metalle, Legierungen	"Atome"	Metallbindung	- verformbar - elektr. leitend

► chemische Bindung

- Atombindung
 - ↳ Br_2 , Diamant (stärkste Atombindung da tetraedisch), Zinkblendes. kubisch, Wurtzit Struktur hex
 - ↳ B.
 - ↳ homöopolar B.
 - ↳ unipolar
 - ↳ $\text{kovalent B.} \Rightarrow$ Kovalenzbildung

Nichtmetallatome
• $\ominus$ oder neutral
• gemeinsam $\ominus$ -Paare bilden
• bindende Molekülorbitale besetzen

Moleküle

Molekülgitter: $\sim \text{Br}_2$

- flüchtig
- makromolekular = nicht flüchtig

Kristallgitter:

- Diamantartig

• Ionenbindung $\rightarrow \text{NaCl, Oxide}$

↳ $\oplus \leftrightarrow \ominus$: Ionenbeziehung
↳ heteropolar
↳ elektrovalent

↳ Bindungsanteil siehe Elektronegativität
 $\Rightarrow$ bei V. mit hohem ion. Anteil $\Rightarrow$ kristallisieren gerne in Strukturen mit hoher Koordinationszahl (= Anzahl benachbarter gegensinniger Ionen)

$\ominus$ Übergang

$\oplus$ Ionen o.
 $\ominus$ Ionen

Ionengitter:

↳ salzartig

↳ Kationenwirkung $\Rightarrow$ verschobenes Gitter
 $\rightarrow$ Abstoßungskraft $\rightarrow$ Kristall zerbricht

Metallatom + Nichtmetallatom

• $\oplus$ Kation
• $\ominus$ Anion

• Metallbindung $\rightarrow$ alle Metalle u. Legierungen

↳ metall. Zustand

Metallatom

• $\oplus$ positiv

Valenz(e^-)-Abgabe

$\oplus$ Ionen und
Elektronengas

Metallgitter

↳ metallisch

↳ bleibende Verformung nach
Krafteinwirkung = duktil

◊ Keramik: • verschiedene Bindungsarten, verschiedene Anteile

• hoher kovalenter Bindungsanteil $\Rightarrow$ höchste Schmelzt.
• je mehr Stoff verschiedene Atome $\Rightarrow$ Schmelzt. sinkt

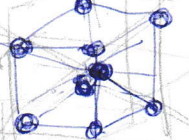
► METALLE UND DEREN LEGIERUNGEN

► Grundlagen Metalle

- fester Zusammenhalt
- Kristalline Struktur
- Raum-/Kristallgitter
- locker bewegte e^- Abgabe $\Rightarrow e^-$ Wolke
- Bewegung wenn elektr. U angelegt $\Rightarrow$ guter elektr. Leiter
- Bewegung wenn elektr. I angelegt $\Rightarrow$ elektr. I
- geringe Belastung $\Rightarrow$ elast. Verformung
- hohe Belastung $\Rightarrow$ plast.

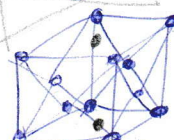
► Kristallgittertypen bei Metalle

• KRZ



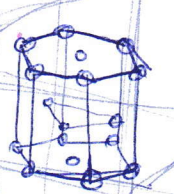
- 8 Nachbaratome
- 2 Atome in Elementarzelle = $1 + \frac{8}{8}$
- 68% Packungsdichte
- 6 Symmetrieebene
- 12 NA
- 4 A m EZ
- 74% P.P
- 8 Sym.

• Kfz



$3 + \frac{8}{8}$

• hex



- 12 NA
- 4 A m EZ
- 74% P.P
- 2 Sym.

Elementarzelle

Symmetrieebene:

$$8 = \text{kfz} > \text{krz} > \text{hex} = 2$$

► Baufehler im Kristall

- nicht fehlerfrei
 - mit **Lücken** = nicht besetzte Gitterplätze
 - mit **Versetzungen** = eingeübene Lage oder fehlende Lage
 - mit **Fremdatomen** = Atom anderes Element im Kristallgitter
- ↳ **Verzerrung** ⇒ **Festigkeits ↑**
- ↳ **Legierungen**

• **↑ Symmetrieebene** ⇔ **↑ duktile, formbar** ⇒ **duktiler Metalle u. Legierung haben hz Elementarteiler**
↳ **Au, Ag, Cu, Ni**

► Biokompatible Metalle

- mögliche Belastungen
 - mechanisch (Knochengewebe)
 - chemisch (Blutgefäße)
- Biokompatibilität abhängig von

- **Oberflächeneigenschaft**
- **chem. Eigenschaften**
- **mech. " "**
- **Geometrie**

• Historie

früher ↳ **Edelmetalle**: Gold, Silber, Platin

• chem. inert ⇒ keine Reaktion

• sehr weich ⇒ schlecht bei mech. Belastung

↳ **VA-Stahl** - mehr mech. Belastung

↳ **1936**: molybdänhaltige Gußlegierung, Co-Basis: inert

↳ **1940**: cp Titan (commercially pure)

• Einsatz

- ↳ Prothesen von Gelenken
- ↳ Fixationselemente
- ↳ Stents
- ↳ Schrauben
- ↳ Draht

• Wann geeignet zur **Implantation** abh. von

- ↳ **mech. Festigkeit** ⇒ dauerhafte Kraftübertragung zw. Implantat & Körpergewebe möglich + knochenähnlich. Steifigkeit
- ↳ **Korrosionsbeständigkeit** ⇒ elektrochemisch stabile Stoffe verwenden ⇒ vermeiden Korrosion ⇒ Schädigung
- ↳ **Biokompatibel** ⇒ Oberflächen- + Strukturkompatibilität ⇒ keine Schädigung d. Empfängerorgane durch Werkstoff o. Korrosionsprodukte u. Abriebpartikel

⇒ Bsp: - Rostfreie Stähle (VA-Stähle)

- Co-Basislegierung

- cp Titan

- Titanlegierung

► Verformungsverhalten



⇒ **plast. Verformen durch Versetzungsschleiten**
d.h. an **Defektstellen** ⇒ **Spannungsminderung**



Faktoren:

• **Kristallstruktur**

- ↳ **Größe d. Gitterbauelemente**
- ↳ **Fehlstellen**
- ↳ **Versetzungen**
- ↳ **Packungsdichte**
- ↳ **Gitterebenen**

- **Bindungscharakter**
 - ↳ ungerichtet
 - ↳ keine Ionen
- **Korngrenzen**
- **Fremdatome**

Leichtmetalle:

- sehr duktil
- plastisch

Spannungsminderung an Defektstellen durch **plast. Verformung**

KERAMISCHE WERKSTOFFE

Definition

Minimaldefinition

- anorganisch
- nichtmetallisch
- geformt aus einer Rohmasse bei RT
- typische Werkstoffeigenschaft durch Sintern bei hohen Temperaturen

nach DKG

- Zweig der chem. Technologie & Hüttenkunde
- umfasst die Herstellung, Weiterverarbeitung und keram. Erzeugnis
- anorganisch
- ~~metallisch~~ nichtmetallisch; metall. Bindungsanteile zulässig
- schwer wärmebeständig
- >30% kristallin
- aus Rohmasse bei RT geformt
- Temperaturbehandlung bei $\approx 300^\circ\text{C}$ $\Rightarrow$ Gebrauchseigenschaften
oder $>$ Schmelzfluss $\Rightarrow$ mit Kristallisation anschließend

nach Henricke
und

Temperaturbehandlung $> 800^\circ\text{C}$

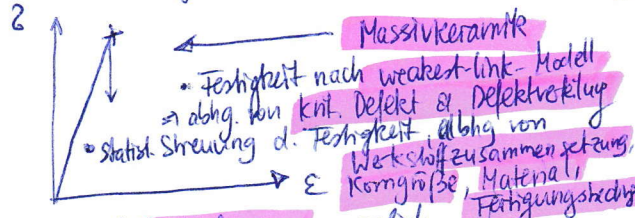
angelsächsischer Sprachgebrauch: "ceramics"

= auch Glas, Email, Glaskeramik, anorganische Bindemittel (Zement, Kalk, Gips)

- = Festkörperwerkstoffe aus
- anorganische
- nichtmetallische Stoffe

= Stoffe mit einkristalliner Form ($\Rightarrow$ Edel-/Halbedelstein $\Rightarrow$ Diamant, Rubin, Saphir...)
 $\rightarrow$ Halbleiter (Si, ...)

Verformungsverhalten



$\Rightarrow$ keine plast. Verformung möglich

Verhalten abh. von

$\rightarrow$ Kristallstruktur

$\rightarrow$ Größe d. Gitterbausteine unterschiedlich

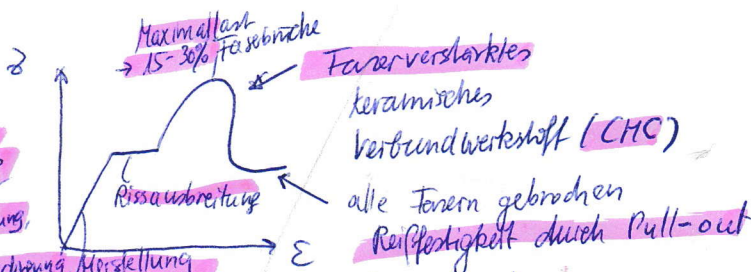
$\rightarrow$ Bindungscharakter

• kovalent

= gerichtet

• ionisch

$\Rightarrow$ unterschiedliche Ladung und Größe d. Gitterbausteine



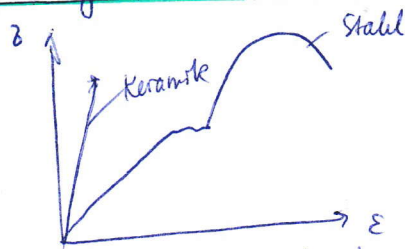
Duktilisieren machen

- Verstärkungskomponente einlagern $\Rightarrow$ vermeidet überkritisches Risswachstum durch Energieabsorption
- Verstärkungsphasen (Faser, Teilchen, Whisker, ...)

$\Rightarrow$ "Quasi-Duktilität"

$\Rightarrow$ Schadenstoleranz

Vgl. Keramik und Metalle



• Zugfestigkeit bei Metall mit Bruchzähigkeit bei Keramik vergleichbar
 $\rightarrow$ je geringer $\Leftrightarrow$ spröder

Was	Keramik	Metall
Härte	↑	↓
Festigkeit bei hoher T	↑	↓
Therm. Ausdehnung	↓	↑
Duktilität	↓	↑
Korrosionsbeständigk.	↑	↓
verschleißfestigk.	↑	↓
elektr. Leitfah.	↑↓	↑
Wärmeleitfah.	↑↓	↑

$\Rightarrow$ Dichte deutl. geringer bei Keramik

POLYMERE

Geschichte

- 19. Jh. - natürl. Polymere: Bernstein, Schildplatt, Horn } → Knechtgriffe, Handschuhe, Krüge
- 1862 - semi-synthet. Kunststoffe: Cellulose Nitrat } → Billardkugel, Film & Fotografie
- 20. Jh. - Celluloid aus Kollodium + Kampfer }
 - Fäden aus Nitrocellulose
 - Kupferseide
 - Zellstoff statt Cellulose ⇒ Viskose Produktion
 - Kunsthorn
 - Phenol- & Resorcinharz ⇒ Bakelit
 - Polystyrol
 - PVC (Polyvinylchlorid)
 - Plexiglas
 - Perlon, Nylon
 - Polyurethan
 - Hochdruck-Polyethylen

Polymerisation

- Definition:
 - chem. Reaktion
 - Monomere
 - ungesättigte organ. Verbindungen

+ Katalysator

→ Polymere = Polymerisat (Produkt einer Polymerisation)

Polymere: Molekül, lange Ketten = miteinander verbundene Monomere
- Klassifizierung
- Homopolymerisation
 - 1 Monomerart
- Co-Polymerisation
 - Auflösung d. Mehrfachbindung
 - mehrere Monomerarten
- Stufenwachstumsreaktion
 - vorhandene Kettensegmente zusammenwachsen zu einer größeren Kette durch
 - Polyaddition (Segmente nur addiert)
 - Polykondensation
 - Segmente ggf. nochmals getrennt, dann rekombiniert
- Kettenwachstumsreaktion
 - Moleküle lagern sich nach dem anderen an das reaktive Kettenende
 - durch
 - radikalische Polymerisation
 - ionische P.
 - Koordinations P.
 - d. Polymerisation
- Rohstoffe
 - Zellulose
 - Kohle
 - Erdöl
 - Erdgas
- Grundbausteine
 - C
 - H
 - ggf. O₂
 - ggf. N₂
 - ggf. S

- mit metall. Matrix (MMC) $\rightarrow$ Al, Ti, Mg
 - Partikel, Faser $\Rightarrow$ Festigkeit, E-Modul $\uparrow$ | v.a. bei Leichtbaumatrix & $\uparrow$ Temperatur Einsatztemp.: $\leq 800^\circ\text{C}$
- mit keramische Matrix (CMC) $\rightarrow$ (Si)SiC, Al_2O_3 , Si_3N_4
 - Partikel, Faser $\Rightarrow$ Schädeltoleranz $\uparrow \Rightarrow$ quasi-duktiles Bruchverhalten
 - Einsatztemp.: $\sim 1700^\circ\text{C}$
 - Faser: C-Faser, Al_2O_3 -Faser, SiC-Faser (auch bei MMC)
 - 6 μm
 - sehr weich
 - graphit. C-Struktur
 - parallel $\Rightarrow$ Kern Abgleiten
 - ~~200~~ 1200 Filamente / Faser

Funktion der Matrix (Epoxidharze, Polysulfon, Polyamid, PEEK)

- mech. Stütze d. Faser
- Kraftübertragung Faser $\rightarrow$ Faser
- Festigkeit ~~Wendefaserichtung~~ Beanspruchung $\perp$ Faserrichtung
- Schutz $\rightarrow$ aggressive Medien $\rightarrow$ d. Gewebe vor Faserpartikel
- Interphasen (Übergangsphase)
- Interface (Grenzfläche)

Beispiel Verbundwerkstoff Endolign

- angewendet bei Allergiker $\rightarrow$ günstig $\rightarrow$ Festigkeit gut
 - thermoplast. Verbundwerkstoff $\rightarrow$ leicht $\rightarrow$ biokompatibel
 - mit C-Faser verstärkt
 - metall. ~~mit~~ Eigenschaften + Vorteile der Polymere ähnl. Co-Cr Stähle, Ti-L, Edelstähle $\rightarrow$ für lasttragende Implantate mit dauerhaftem Knochen-, Blut-, Gewebekontakt Bsp. Fixationssystem
 - strahlungsfreie Abbildung bei Diagnose mit bildgebenden Verfahren
- Herstellung
- C-Faser mit Peek-Optima Polymer $\rightarrow$ vorimprägnierte Bänder $\rightarrow$ ggf. $\rightarrow$ Rundstrahl, andere Formen

Keramische Werkstoffe

TECHNISCHE KERAMIK Grundlagen

Begriffserklärung technische Keramiken

- Hochleistungskeramik =
 - hochentwickelter, hochleistungsfähiger keramischer Werkstoff
 - überwiegend nichtmetallisch
 - anorganisch
 - mit zweckmäßigen Eigenschaften
- Struktur-/Konstruktionskeramik:
 - nicht genormt
 - mechan. Belastungen standhalten → Industrie- & Ingenieurkeramik
- Funktionskeramik:
 - Hochleistungskeramik
 - Eigenschaft verwendet für eine aktive Funktion
 - elektr., magnet., dielektrisch, optisch
- Elektronikeramik:
 - Hochleistungskeramik
 - speziell. Eigenschaft ⇒ Einsatz in Elektrotechnik & Elektronik
 - Isolierfähig
 - mech. Festigkeit
 - ferro elektr. Verhalten
 - Halbleitung
 - nichtlin. Widerstand
 - Ionenleitung
 - Supraleitung
- Schneidkeramik:
 - Hochleistungskeramik
 - Verschleißbeständigkeit sehr gut
 - Hitzebeständigkeit sehr gut ⇒ Werkzeug zur spanenden Bearbeitung
- Biokeramik:
 - Hochleistungskeramik
 - mediz. Einsatz → Rekonstruktion, Reparieren & Ersetzen von Knochen, Zähne, hartes Gewebe

Klassifizierung

- nach Funktion
 - Gebrauchskeramik
 - natürl. Rohstoffe
 - nicht wichtig für MedTech
 - klass. Silikatkeramik
 - grob → fein
 - techn. Keramik
 - Ingenieur- / Hochleistungskeramik
 - synthet. Rohstoffe
 - Funktionskeramik
 - Strukturkeramik

nach Funktion (Einteilung d. techn. Keramiken)

- Strukturkeramik
 - mechan. Eigenschaften → Härte, Hochtemperaturbeständigkeit, Steifigkeit, Kriechbest. ...
 - chem. " → Beständigkeit bei Säure, Laugen, Heißkorrosion, biokompatible Eigenschaften ...
 - tribologische " → Härte-, Abriebfestigkeit, Oberflächeneigenschaft
 - dekorative
- Funktionskeramik
 - elektrophysikal. Eigenschaften → Dielektrika, Isolatoren, Supraleiter, Kondensator ...
 - thermophysikal. " → Wärmeleiter, -Isolator, -dehnung
 - optoelektronische " → Emissivität, LED, selektive Transparenz
 - Halbleiter

nach Stoff

- oxidkeramiken
 - reine Oxide: SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , hochschmelzende Oxide (ThO_2 → Kernkraftwerke)
 - oxidische Verbindungen: mit Perowskit-Struktur, mit Spinell-Struktur, Silikate (SiO_2 + andere Oxide)
- nichtoxidkeramiken
 - nicht reine Nichtmetalle ← Atom $\xrightarrow[\text{Bdg}]{\text{kovalent}}$ räuml. Gitter mit 4 Bdg $\xrightarrow[\text{zum}]{\text{ggl. 4 Kov. Bdg}}$ Kristallisation → Diamant ✓
 - nichtoxidische Verbindungen: Carbide (Härte ↑, therm. Beständigkeit ↑ als Oxide), Nitride (Temperaturwechselbeständigkeit ↑ Si_3N_4 , BN hohe Härte), Intermetall. Verbindungen

Einleitung nach Stoff

↳ Oxidkeramik

ionische Bindung mit $O_2 \Rightarrow$ stabil

$\rightarrow Al_2O_3, ZrO_2, TiO_2, Glaskeramik$

$\rightarrow$ je nach kristall. Anordnung $\Rightarrow$ unterschiedl. Wärmeleitfähig

↳ Silikatkeramik

- mehrphasig
- hoher Glasanteil

↳ Nichtoxidkeramik

- kovalente Bindung
- E-Modul höher
- extreme Härte
- Schmelzpunkt höchster

$\rightarrow$ techn. C-Faser, -Carbide, -Nitride

Charakterisierungsmethoden

Härtemessung in der Mineralogie

Mohs'sche Härteskala: Ritzhärte

$\rightarrow$ Widerstand, den ein Stoff bei mechanischer Abnutzung beim Ritzen mit einem scharfkantigen Material entgegenbringt

$\rightarrow$ Skala: 1-10

$\rightarrow$ 1: weichstes Material $\Rightarrow$ schabbar $\rightarrow$ Talk

$\rightarrow$ 10: härtestes Material $\rightarrow$ Diamant

$\rightarrow$ relat. Härteskala: da nächsthärter Material ritzt das vorhergehend weichere Material

$\rightarrow$ i.A. unterschiedliche Härte bei unterschiedlicher Richtung

abschleifhärte nach Rosinval (Interimant für die Bearbeitung von Hartstoffen)

$\rightarrow$ Widerstand gegen Abschleiff

• höchster: Diamant

Vickershärte: Mikrohärte u. Universalhärtemessung

Prüfbereiche:

Makro

$2N \leq F \leq 1000 N$

Mikro

$2N > F$
 $h > 0,0002 mm$

$\Rightarrow$ Universalhärte

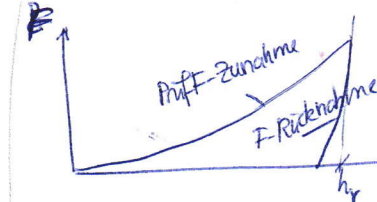
$$HU = \frac{F}{26,43 h^2} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Prüfbedingungsangabe:

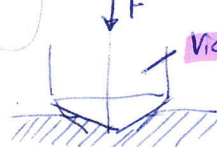
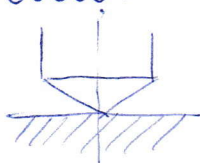
$$HU \ 10/30/2 = 2000 \frac{N}{mm^2}$$

F t Anzahl Stufen bis F_{max}

Diagramm



Versuchverlauf



Vickerspyramide

$\Rightarrow$ plastische Härte

$$HU_{plast} = \frac{F_{max}}{26,43 \cdot h_r^2}$$

$\Rightarrow$ Elast. Eindringmodul

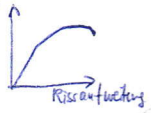
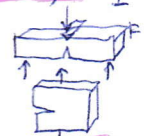
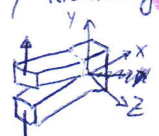
γ_{HU} aus Steigung der Tangente der Last-Rücknahme-Kurve

$\Rightarrow$ E-Modul

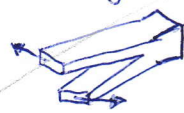
$$E_{HU} = \gamma_{HU} \cdot (1 - \nu^2)$$

3 Grundfälle/-moden d. Rissausbreitung

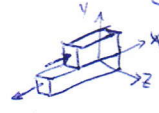
↳ in y-Richtung, Zugversuch, K_I



↳ in z-Richtung, Schubversuch, K_{III}



↳ in x-Richtung, Torsionsversuch, K_{II}



K_I, K_{II}, K_{III} : Spannungsintensitätsfaktor

$K_{IC}, R_{IIc}, K_{IIIc}$: instabil. Risswachstum tritt ein Grenzwert

Fall 1: Grundmode

$$K_I = \sigma_I \cdot Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

$$\left[\frac{N}{mm^{3/2}} = MPa \cdot \sqrt{m} \right]$$

Y: Geometriefaktor

σ_I : einachsige Normalspannung außerhalb d. Rissspitze

a: halbe Risslänge

- Bruchkriterium: $K_I = K_{IC}$ = krit. Spannungsintensitätsfaktor

1. Grundfall d. instabilen Rissausbreitung

= Bruchzähigkeit: Maß für Zähigkeit mit Keramiken

- Messung:

- 3-P-Biegeversuch
- Kompaktzugversuch

mit definiert gekerbte Proben

Definition: Widerstand, den ein Werkstoff dem instabilen Risswachstum entgegensetzt

Synonym: Risszähigkeit

Wichtiger Faktor für Beurteilung krit. Lastzustände

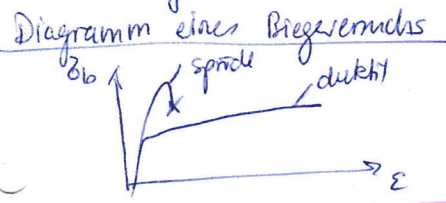
= Ablegung keram. Bauteile

Festigkeitsuntersuchungs-Verfahren

- Einachsiger Zugversuch
- Zugversuch mit hydrostat. Druck
- 3-Punkt Biegeversuch



→ einachsiger Druckversuch



→ THETA

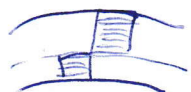
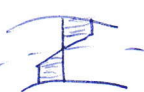
→ 3-punkt-

- 4-punkt- Biegeversuch

• besser



→ Druckversuch auf der Dickenachse



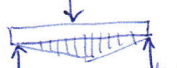
Warum 4-Punkt- Biegeversuch besser als 3-Punkt

→ höchstbelastetes Volumen wird minimiert

→ unterkrit. Bruch durch Spannungserhöhung an Defektstellen Wahrscheinlichkeit ↓

→ besseres Ergebnis nahe Stoffkennwert

Defektstellen an die Seite wenn möglich umlagern



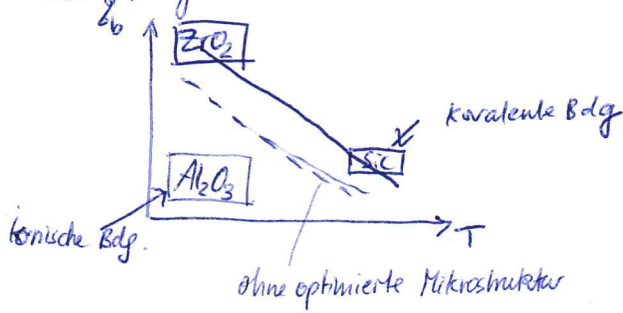
ähnlich Zugversuch



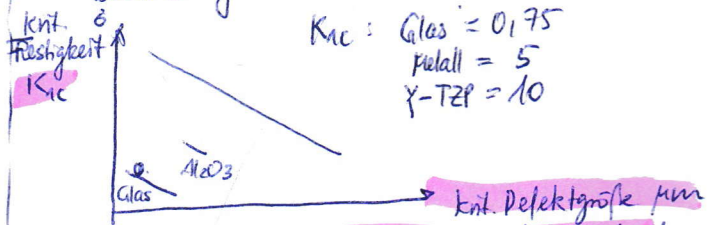
- nahezu gleichbelastet

Biegefestigkeit und Bruchzähigkeit

- Biegefestigkeit σ_b : $^{\circ}\text{C}$ -abhängig



Bruchzähigkeit



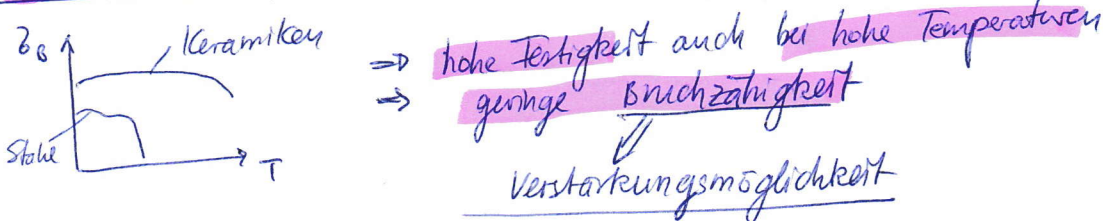
- Allgemein
- $\uparrow$ große Oberfläche $\Leftrightarrow \downarrow$ Festigkeit
 - $\uparrow K_{IC}$ -Wert $\Leftrightarrow \uparrow$ Schadenstoleranz

TZP: tiefe $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ monokline Phase
hohe $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ tetraedische Phase
mittlere $^{\circ}\text{C}$ $\rightarrow$ kubische Phase
gehört zu den Zirkonoxiden

Konkret: Festigkeit keramischer Werkstoffe

- SiC - & Si_3N_4 -Keramiken

SiC : Silikonkarbid, SiN : Silikonnitrid



Schadenstoleranz durch CMC-Werkstoffe

- Allg. Verstärkung durch bei Keramik durch:
 - Faser $\Rightarrow$ Bruchfeste Faser z.B. bei Langfaserverstärkung
 - Nagelförmige Kristalle
 - umwandlungsfähige u. duktile Teile $\Rightarrow$ Rissenergieaufnahme
 - ausgeprägte Mikrokomposit $\Rightarrow$ Riss wird gestreut $\Rightarrow$ "Scattering"-Verlauf

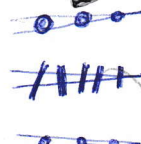
CMC-Werkstoff

- $\Rightarrow$ quasi-plast. Verhalten
- $\Rightarrow$ Schadenstoleranz durch Rissüberbrückung
- $\Rightarrow$ energie dissipierende Mechanismen an Phasen-Grenzfläche
- $\Rightarrow$ Restfestigkeit durch Faser Pull-Out

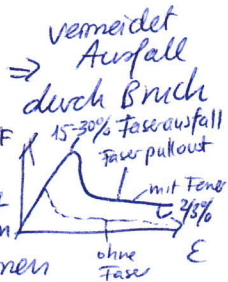
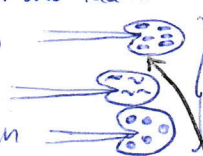
Allg. Verlauf eines Riss

- Riss trifft auf Mikrofilament $\Rightarrow$ Matrix versagt $\Rightarrow$ Kraft auf Faser $\Rightarrow$ Möglichkeit ① Energie dissipation d. Rissenergie (Metallteilchen hält wie Klammer Riss zusammen)

- spröde Teilchen
- Fasern/Whisker
- duktiler Teilchen



- Phasentransformation
- Mikrorisse
- duktiler Teilchen



- $\Rightarrow$ Riss auf Teilchen $\Rightarrow$ Kraft einwirkung $\Rightarrow$ Kristallstruktur klappt um $\Rightarrow$ Spannungsenergie aufgenommen in Kristallenergie

► KERAMIKHERSTELLUNG

- ① Rohstoffgewinnung/-synthese
 - ② Rohstoffaufbereitung (Mahlen, Feinmahlen) → Pulver
 - ③ Masseaufbereitung („compounding“) / Feedstock mischen
 - ④ Formgebung → grüner Zustand mit Grünkörper, Scheben
 - ⑤ Grünkörperbearbeitung
 - ⑥ Trocknung / Entfeuchtung (Ausbrennen) → brauner Zustand
 - ⑦ Vorsintern (Verglühen, d.h. mit O_2) / Weißbearbeitung → weißer Zustand
 - ⑧ Sintern (Brand) → Rohteil
 - ⑨ Endbearbeitung (Hartbearbeitung, Finish) → Fertigteil
- Gliederung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (im Maschinenbau)

pulver zerkleinern
gießen, pressen, Strangpressen, Bearbeitung

↳ Form schaffen

↳ Zusammenhalt schaffen ⇒ Hauptgruppe 1 Umformen

- 1.1 aus flüssigem Zustand ⇒ Spritzgießen, ⇒ Strangpressen = Extrudieren
- 1.2 plastischem
- 1.3 biebigem ⇒ Porzellan, Keramik gießen
- 1.4 körnigem o. pulverförmigem ⇒ mit Hochdruck Spritzen
- 1.5 span- o. faserförmig
- 1.8 gas o. dampfförmig
- 1.9 ionisierten

↳ Form ändern
nicht zur Anwendung bei Keramik

- 1.6 Schweißen
- 1.7 Löten

- ↳ z. beibehalten ⇒ HG 2 Umformen
- ↳ z. vermindern ⇒ HG 3 trennen
- ↳ z. vermehren ⇒ HG 4 fügen
- ↳ Stoffeigenschaft ändern ⇒ HG 5 beschichten → enthält 1.6, 1.7
- ↳ z. ⇒ HG 6 Stoffeigenschaft ändern

► Fertigungstechnik keramischer Bauteile

↳ Rohstoff- & Masseaufbereitungstechnik

- Pulvercharakterisierung
- Zerkleinerungstechnik, Feinmahlen
- Charakterisierung von Vorprodukten & Feststoffsuspension
- Sprüh- & Aufbaugranulation
- mischen, Emulgieren, Dispergieren
- Chem. Technologie d. Bindemittel & Additive
- plast. Massen aufbereiten

↳ Sinter- & Wärmetechnik

- Sintern: Grundlagen d. Diffusionsvorgänge
- Drucklossintern, Heißpressen
- Heißisostat. Pressen u. Gasdrucksintern

- Industrieföfen- & Wärmetechnik
- Materialfluss & Handlingsysteme i.d. Fertigung
- Prozen- & Anlagentechnik im Kera. Betrieb

↳ Formgebungsverfahren

- Schlickergießen, Druckschlickergießen
- Spritzgießen, Extrudieren, Foliegießen
- Grünzerspannung
- zerspanende & abtragende Verfahren (Hartbearbeitung)

- Warmfließpressen
- kaltisostat. Pressen, Trocknen- & Nassmatrizenpressen

↳ Fertigungsmesstechnik

- Längenmesstechnik + Oberflächencharakterisierung
- mechan. Eigenschaften bestimmen
- thermophysikal. Eigenschaften bestimmen

- Mikroskopie + Gefügeanalyse
- Qualitätsicherung (TQM-Methoden)

- Verwendung als Platten $\Rightarrow$ Stabilisierung von Keramiken

Herstellung von Al_2O_3

- ① Pressen von $\alpha-Al_2O_3$
- ② Sintern bei $1600-1800^\circ C$

- primärer Rohstoff: Bauxit mit Phasen
Gibbsit, Böhmit, Diaspor

- Implantate = feinkörnige, polykristalline, bei $1800^\circ C$ gesinterte Al_2O_3

Molekulare Eigenschaften

- $\hookrightarrow$ hdp: $\frac{2}{3}$ der Oktaederlücken mit O besetzt
- $\hookrightarrow$ hohe $\rho = 3,9 - 4 \frac{g}{cm^3}$
- $\hookrightarrow$ hohe Korrosionsbeständigkeit
- $\hookrightarrow$ hohe Verschleißbeständigkeit $\Rightarrow$ extreme Härte
- $\hookrightarrow$ Verunreinigungen $\rightarrow$ schlecht für Festigkeit u. Korrosionsbeständigkeit
 - $\hookrightarrow H_2O, CaO, Fe_2O_3, Na_2O, SiO_2$
 - $\hookrightarrow ISO 6474: Na_2O, SiO_2 < 0,1 \text{ Gewichts\%}$

Einsatz:

- keram. Prothesen
- Hüftgelenke
- Zahnspl. Brackets

ZTA - Nanocomposites

- $\hookrightarrow 5-15 \text{ vol\% } ZrO_2 + 85-95\% Al_2O_3$
- $\hookrightarrow$ Festigkeit: $500-1300 \text{ MPa}$
 - $K_{IC}: 4,5-7$
 - hochverschleißfest
 - biologisch inert

Anwendung: - Dentalimplantate
- Hüftgelenksimplantate

Keramischer Spritzguss - Near-net-shape manufacturing

- $\hookrightarrow$ Anwendung: transluzente Brackets
- selbstlegierend
- Al_2O_3

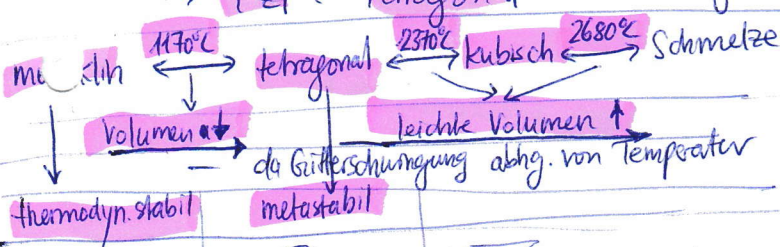
Zirkonoxid

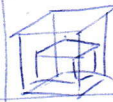
- Rohstoff verwendet als Schwermetallseifen

Einteilung

- $\hookrightarrow$ FSZ: voll stabilisiert
- $\hookrightarrow$ TSZ: Teilstabilisiert
- $\hookrightarrow$ TZP: tetragonal

unterschiedl. Kristallmodifikation je nach Dotierung



thermodyn. stabil	metastabil	
		
gekippt	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 90^\circ$ $a=b=c \Rightarrow$ Würfel
$\rho = 5,6 \frac{g}{cm^3}$	$\rho = 6,1 \frac{g}{cm^3}$	$\rho = 6,0 \frac{g}{cm^3}$
Radius größer	Radius kleiner und Zn sehr kleiner	
	wenig Y_2O_3	viel Y_2O_3 $\Rightarrow$ kubisch bleibt erhalten

physikal. Eigenschaften

- höchste Bruchzähigkeit bei Keramiken
- " Zugfestigkeit "
- hohe Bruchzähigkeit
- " Verschleißfestigkeit
- " Korrosionsbeständigkeit
- niedrige Wärmeleitfähigkeit (gut als Wärme dämmschicht) - gut altersbeständig
- O_2 -Leitfähigkeit
- E-Modul ähnlich Stahl
- geringe Benetzung durch Metallschmelze
- gut biokompatibel
- geringe Abdekoration

Stabilisatoren: Y_2O_3, CoO_2, CaO, H_2O , Oxide der selteneren Erden

Wenn auf stabilisierter Werkstoff hohe Belastung:

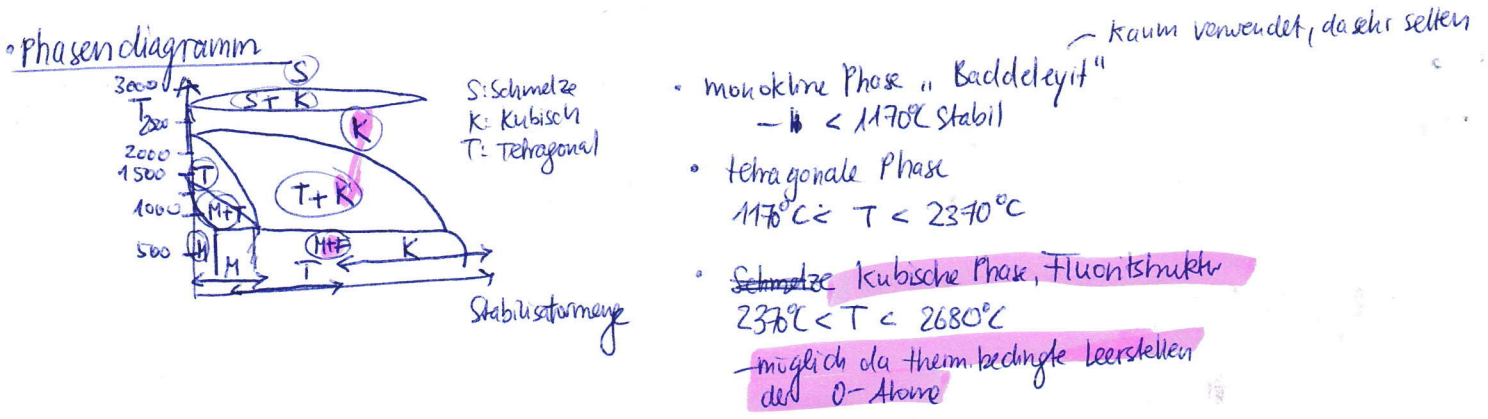
- $\Rightarrow$ Mikronisse $\Rightarrow$ Spannung an Rissspitzen
- $\Rightarrow$ Umwandlung: tetragonal $\rightarrow$ monoklin
- $\Rightarrow$ Volumen $\uparrow$ $\Rightarrow$ Druck an Rissspitzen
- $\Rightarrow$ wirkt weiterem Risswachstum entgegen

$\hookrightarrow$ bei TZP: tetragonalem polykristallinem Zirkoniumdioxid keramik
" Umwandlungsverstärkung "

$\Rightarrow$ verbesserte mechan. Werkstoffeigenschaften:

- $\Rightarrow$ Zähigkeit $\uparrow$
- Stabilisatoren besetzen die Zr-Plätze $\Rightarrow$ Ladungsausgleich in den O_2 -Leerstellen $\Rightarrow$ geringere Streckung der Elementarzelle $\Rightarrow$ verzögerte Phasenumwandlung bei Kristallumwandlung

$\Rightarrow$ 2 metastabile Hochtemperaturmodifikation



Verwendung von ZrO_2

pro	contra
- gut bioverträglich - hohe Bruchfestigkeit - geringe Abriebrate - Risse selbstschließen	- krit. Oberflächenerstellung (kann nicht geätzt werden - daher huckler, dichte, Titium)

verwendet auf 2 Arten:

- TZP (mit Y_2O_3 stabilisiert/dotiert): tetragonal zirconia polycrystal
- PSZ (mit MgO dotiert): partially stabilised zirconia
 - sehr zäh
 - porös
 - schlechte Festigkeit
 - kubisch
 - grobkörnig

→ kann in Flüssigkeiten gelangen

Hydrothermale Alterung des Y-TZP

Eigenschaft d. TZP:

- doppelte Festigkeit / Bruchzähigkeit
- geringere Alterungsbeständigkeit
 - $\uparrow$ °C + Druck + feuchte Umgebung (wie im Körper)
 - metastabile Y-TZP tetragonale Phase $\rightarrow$ stabile monokline Phase
 - beginnt an Implantatoberfläche
 - Volumenzunahme
 - Rauheit an Oberfläche $\uparrow$
 - Mikrorisse
 - Veragen d. Implantats
 - Abtragen von Kleinteile
 - Entzündung $\Rightarrow$ Knochenabbau $\Rightarrow$ Lockerung d. Implantats

Herstellung

wenn zu lang geätzt $\Rightarrow$ zäh, wenig umwandelbar

Anwendung

- Dental-Prothesen - Zement für > 3 Glieder (< 3 Glieder: Glaskeramiken)
- Zirkonoxid-Keramiken-Implantat (aber Titan verdrängbar)

Titanoxid TiO_2

- schlechte mechan. Eigenschaft
- Vorteil: gut verträglich mit Blut

alle Oxidkeramiken

Calciumphosphatkeramik

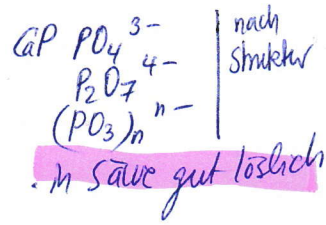
Calciumphosphatkeramik

• ähnlich menschliches
→ sehr biokompatibel

Hartgewebe (mineralische Phase) Knochen aus

- 50-60% Calciumorthophosphat
- 30-40% Kollagen
- 10% H₂O

• Einteilung
↳ Orthophosphat
↳ Pyro-
↳ Poly



• in H₂O schwer löslich

oder nach Phasen

- ⇒ unterschiedl. Löslichkeit:
- Hydroxylapatit
- Fluorapatit (sehr spröde - no good)
- Tricalciumph.

abg. von

- ↓ pH ⇌ ↑ Löslichkeit
- ↑ Oberfläche ⇌ ↑ L.
- Gitterdefekte (Verunreinigung) oder Leerstellen ⇒ ↑ L.
- OH mit F substituieren ⇒ ↓ L.

Hydroxylapatit (HAp) Ca₅(PO₄)₃OH

- aus unterschiedlichen Anteile von Ca und Phosphor
- noch Frembestandteile im Vgl. zum natürlichen
- nicht stöchiometrisch

Verwendung

- Dental, Orthopädie, maxillofacial
- ↳ Hüftgelenkersatz: HAp als Beschichtung d. Oxidkeramiken
- Knochenersatzstoff (Pulver) o. Beschichtung o. andere biokompatible Stoffe mit höherer mech. Festigkeit

Zukunft:

- nanokristalline HAp ⇒ ähnliche dem menschlichen Knochen (Kollagen + anorganische Phasen)
- da Zeit-Werkstoffverbund möglich
- geringe Festigkeit ⇒ nicht für lasttragende Anwendung geeignet
- als Beschichtung da:
 - kein Bildung v. fibrillen Gewebe
 - rasches Anwachsen vom Knochengewebe
 - Verbindung zw. Implantat u. Gewebe mit hoher Festigkeit ausgebildet
 - verkürzt Heilungsphase
 - ↓ Freisetzung Metall-Ionen

Beschichtungsmethoden

- thermisches Spritzverfahren
 - ↳ atmosphärisches Plasmaspritzverfahren
 - ↳ Vakuum plasmaspritzverfahren
- Sintern
- elektrophoretische Abscheidung
- Abscheidung aus übersättigter Lösung

Herstellung

- Fällungsmethode aus wässriger Lösung aus Ammoniumphosphat
- Sol-Gel-Synthese (bessere Resorptions-eigenschaft)
- emulsion synthesis (Nanokristallite)
- freeze drying (geschichtetes HAp)

Produkte d. thermisch gespritzten Schichten

- Polylactidoberfläche für biomediz. Implantate in Kieferchirurgie
 - ↳ nach einiger Zeit abgebaut
 - ↳ Platten aus PLLA mit TCP-Schicht
 - ↳ + Schrauben ⇒ Fixierung von Frakturen

thermodynamisches Beschichten

= thermisches Spritzen = Therm. Energie + kinet. Energie
= thermischer Spritzen + Wärmequelle
① Werkstoff (Pulver, Draht, Stab) → Schmelzfluss Phase
② Schmelzfluss Partikel beschleunigen im Heißgasstrahl
③ Aufheften auf Werkstückoberfläche als Kugeln
⇒ schnelle Verformung auf Oberfläche / Impulsübertragung
⇒ fließen → Fest (Anheftung) → latente Wärme frei
⇒ Abkühlung → c-Ausgleich über Werkstückoberfläche
⇒ weitere Abkühlung auf Umgebungstemperatur
⇒ Schmelzung d. erstarrten Schichtmat.
⇒ weitere Abkühlung auf Umgebungstemperatur

Merkmale d. thermokinet. Spritzprozessen:

- Wärmelebens in das Bauteil durch:
 - Förderrate Partikel massenstrom auf die Oberfläche
 - (latente Wärme)
 - Heißgasströmung: konvekt. Austausch
 - ! Prallströmung
 - Strahlung
- kontrollierte Wärme führung durch:
 - kinematik: Relativbewegung Strahlfokus
 - ↳ Werkstückoberfläche
 - Begleitkühlung: Druckluft, CO₂, H₂O
 - ! Prallströmung

➤ Glaswerkstoffe

➤ GLASWERKSTOFFE

Def: anorganisches Schmelzprodukt. Kristallisiert beim Abkühlen nicht, da kleine Keimbildungsgeschwindigkeit, kleine Kristallisationsgeschwindigkeit

- amorph
- eingefrorene / unterkühlte Schmelze

Unterteilung

Gilikatgläser: $MgO, Al_2O_3, SiO_2, Na_2O, K_2O, CaO$

- oxidische Em- u. Mehrkomponentengläser
- Nichtoxidische u. nichtsilikatische Gläser

Eigenschaften (abh. von Zusammensetzung)

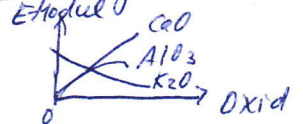
- optisch:
 - Lichtdurchlässig
 - spektrale Absorption
 - Lichtbrechung & Dispersion
 - Reflexion

Festigkeit abh. von

- Gefügefekte
- sprödelast. Verhalten
- Krit. Größe
- geringe Bruchzähigkeit
- E-Modul $\Rightarrow$ Oxidgehalt

Wärmeausdehnung: $0,01 \cdot 10^{-6} - 10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

$\Rightarrow$ Temperaturwechselbeständigkeit sehr gut $\rightarrow$ sehr schlecht



➤ Biogläser / bioaktive Gläser

- keine Keramik, da geringe Kristallinität
- aber Keramik im angelsächsischen Sprachgebrauch
- aus Komponenten: $SiO_2, Na_2O, CaO, P_2O_5$
- in vivo: wirken wie HAP mit verstärkt resorbierende Eigenschaften
- als Trägermaterial: als anisotrope Faserverbundwerkstoffe
- Herstellung

- konventionelle Glasherstellung mit Glaschmelze bei $1300 < T < 1450^\circ C$
- Formgebung
 - Gießen
 - Spritzguss
- Tempern bei $450^\circ C - 550^\circ C$

Def. bioaktives Glas: - Glas, das biolog. Prozesse beeinflussen kann. ~~Biol~~
 - biokompatibel
 - bildet im wässrigen Medium eine Hydroxylapatitschicht auf ihre Oberfläche
 "Biomineralisation"

Anwendung:

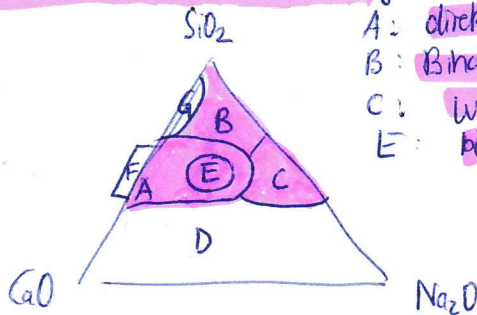
- Beschichtung auf Endoprothesen
- Knochenimplantate
- Mittelohrimplantat
- kosmet. Werkstoff
- Zahnpflege

Eigenschaft

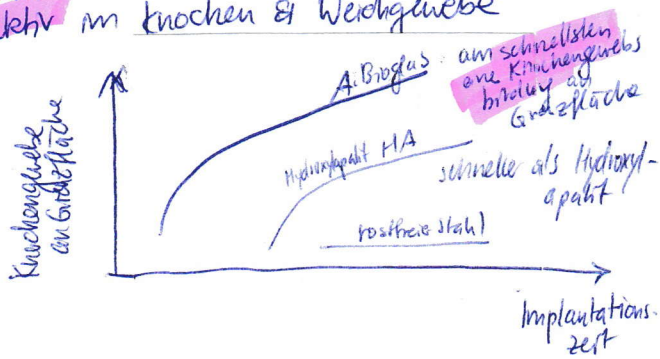
- geringe mechan. Eigenschaften $\Rightarrow$ für nicht lasttragende Implantate
- Beschichtungsmaterial $\Rightarrow$ Funktionalisierung einer Implantatoberfläche
- Zugfestigkeit: $40-600 MPa$

Biokompatibilität der bioaktiven Gläser

abhängig von Phasenzusammensetzung / chemische Z.



- A: direkte Knochenbindung
- B: Bindegewebsbildung; nahezu biointert
- C: werden resorbiert
- E: bioaktiv in Knochen & Weichgewebe



a. Schritte: Anbindung d. bioaktiven Glase an den Knochen

① Reaktionskinetik an Bioglasoberfläche

- Phase ①: schneller Austausch von Na^+ o. K^+ mit aus Lösung H^+ oder H_3O^+
- P②: Aufkünd. lösl. Silica durch Hydrolyse als $Si-OH$ (Silanol) an Grenzfläche Glas-Lösung
- P③: Kondensation + Repolymerisierung einer SiO_2 -reichen Schicht an Oberfläche
- P④: Diffusion von Ca^{2+} u. PO_4^{3-} -Ionen in die Oberfläche
- P⑤: Bildung einer amorphen $CaO-P_2O_5$ -reichen Schicht auf die SiO_2 -reichen Schicht
- P⑥: Kristallisation d. amorphen " : durch OH^- , CO_3^{2-} , o. F^- Anionen Aufnahme aus der Lösung + gemischte hydroxyl-, carbonat-, fluoridhaltige Apatitschichtbildung

② Reaktion bei Anbindung d. Gewebes

- P6: biolog. Substanzen Adsorbieren
- P7: Makrophagenfähigkeit beginnt
- P8: Stammzellen haften an
- P9: " differenzieren
- P10: Matrixbildung
- P11: Kristallisation d. Matrix

Vorteil d. Biogläser	Nachteil
- rasche + direkte Anbindung an Knochen	- geringe mechan. Eigenschaften - geringe Bruchzähigkeit
	} $\Rightarrow$ nicht geeignet für lasttragende Implantate

➤ Glaskeramiken

3-Komponentensystem: LiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2
 $\Rightarrow$ getempert $\Rightarrow$ Rekristallisation

Anwendung:

- 2 Phasen - Silikat-Phosphat
 - ↳ aus Fluor- & Hydroxylapatit + Wollastonitphase + glasige Matrix
- $\Rightarrow$ Ersatz für Beckenknochen, Wirbelsäule

- $\Rightarrow$ keine Porosität
- $\Rightarrow$ sehr kl. Korngröße
- $\Rightarrow$ sehr Stoßresistent
- $\Rightarrow$ geringe bioaktivität
 - ↳ noch geringe durch ~~Al~~ Oxide (z.B. Al_2O_3 , TiO_2)

↪ Wechselwirkung Werkstoff - Gewebe:

• mechanische Eigenschaften

- gefordert: strukturskompatible Bauteilauslegung; beeinflusst durch Geometrie d. Implantats
- bei Metall bestimmt durch das Gefüge; beeinflusst durch
 - ↳ chem. Zusammensetzung
 - ↳ Zulegierung
 - ↳ Herstellungsverfahren + Wärmebehandlung

• Bsp. Hüftgelenkendoprothetik

- ↳ Al_2O_3 ⇒ hohes E-Modul
- hohe Druckfestigkeit ⇒ hoher Widerstand gegen Verformung
- tribolog. Eigenschaften ⇒ Biofunktionalität gut

• sichere Bauteilauslenkung:

- ↳ hohe Dauerfestigkeit $\approx \frac{1}{3}$ Zugfestigkeit Bsp.: CoCrMo-L., kaltverformt
- ↳ ↑ Amplitude $\Leftrightarrow$ schneller eine Ermüdung
- ↳ Steigbar durch bestimmte Formgebungsverfahren

• Metalle + Keramik:

- höher mech. Kennwerte als Knochen Substanz
- ↳ E-Modul ⇒ Stress-shielding

Stress-shielding

- = mechanische Abschirmung d. Knochens durch das Implantat
- ⇒ GGW-Störung im Knochengewebe beim spannungsinduzierten Auf- und Abbau

- zu geringe σ ⇒ Abbau
- ⇒ spürt unnützes Gewicht

- zu viel σ ⇒ Aufbau
- ⇒ Frakturgefahr verringern

Bsp.: sehr steife Hüftendoprothese

- ↳ starke Entlastung des umgebenen Knochens im medial-proximalen Bereich + Resorption ⇒ Abbau
- ↳ Gelenkdruck abh. von F (Kontaktkraft) und tragende Gelenkfläche
- ⇒ ggf. Arthrose, Hüftkopfnekrose

Beispiel Hüftkopfendoprothese

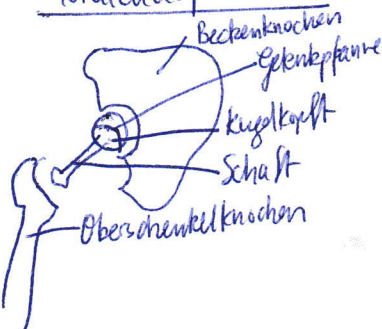
Gelenkpfanne

- ↳ selbstschneidende Außenschale
 - Metalllegierung + Inlay
 - aus Polyethylen
- ↳ zementierte
 - aus Polyethylen
- ↳ Form abh. von Anatomie d. Patientens
- ↳ Oberflächengestaltung abh. von Fixierungstechnik

Kugelhkopf

- ↳ Keramik o. Metall
- ↳ Materialwahl abh. von Hüftpfanne u. tribolog. Anforderung
- ↳ Montage
 - ↳ aufgeschraubt oder
 - ↳ verschweißt

• Totalendoprothese



Variationen d. Schaft

- Geradschaftprothesen
- Bogenschaftp.
- abh. von Körperbau
- zementiert
 - ⇒ sofort belastbar
 - ⇒ Wärme → Erenabbloten
 - ⇒ kein rasches Einwachsen möglich
- zementfrei
 - ⇒ Einwachsen ⇒ Torsion stabilisieren durch viele Querschnitte

Schaft

- oberfläche:
 - rau ⇒ Einwachsen
 - glatt
 - Beschichtung
- Einsatzdauer:
 - 15-20 Jahre, dann Lockerung
 - ⇒ 130-190mm Schaftlänge (bei Revisionop: tieferes Auskühlen d. Knochens)

► Beispiel in der Dentalmedizin

► Amalgam

- = Legierung des Hg (chemisch. Definition)
- = Allg.: nicht umkehrbare Vermischungen anderer Stoffe, meist Legierung mehrerer Metalle
 - ↳ viele Metalle in Hg löslich
 - ↳ nicht zu viel Hg, sonst flüssig bei RT
- Anwendung in Zahnmedizin: Hg Legieren mit Ag, Cu, In, Zn, Sn (Zinn) als Zahnfüllmaterial

plast. Füllungsmaterialien

- Anforderungen:
 - ausreichend Härte u. Festigkeit gegen mechan. Belastung
 - Widerstandsfähigkeit gegen chem. + elektrochem. B.
 - schlechte Wärmeleitfähigkeit $\Rightarrow$ therm. Widerstandsfähigkeit
 - form u. Volumen beständigste
 - gute dauerhafter Randschluss
- keine Verfärbung
- natürl. Farbe
- bioverträglich
- antisept. Wirkung
- einfache Verarbeitung
- gut Klebend

► Gold als

- ↳ Gußfüllung: Inlay, genau angepasst (Gebissabdruck) und zementiert (hält besser)
- ↳ Hämmer-Technik: 24-karätige hauchdünne Goldfolien als Kugeln schichtweise auf den Zahn geklopft $\Rightarrow$ Kalt verschweißen $\Rightarrow$ kompakte Füllung

► Keramik

- ↳ Inlay aus Keramikpulver, mit Zahn verklebt

► Galvanokrone

- ↳ galvanisches Verfahren:
 - ↳ Gipsmodell d. Zahnstumpfes mit Silber leitend gemacht
 - im galvanischen Bad mit leitender Goldlösung mit Strom
 - $\Rightarrow$ Gold scheidet sich auf das Silberlack ab
 - $\Rightarrow$ Kappe aus Feingold
 - mit Keram. Masse verblendet
- Vorteil:
 - ↳ sehr genau
 - geringe Metallstärke

► Komposit-/Kunststofffüllung

- aus verschiedene Kunststoffe, Glas, bzw. Keramiken
- kompliziertere Verarbeitung
 - ↳ Klebstoff auf das Loch
 - ↳ schichtweises Auftragen d. Komposit; jede Schicht aushärten mit speziellem Licht
 - ↳ Zahnraum muss trocken bleiben

► Glasionomerzementfüllung

- aus Carbonsäure u. destilliertem Wasser
- härten an durch Säure-Basen-Reaktion
- gute Verarbeitungsmöglichkeit
- haftet sehr gut an Zahnschmelz u. Dentin $\Rightarrow$ geringere Abriebfestigkeit als Kompositfüll $\Rightarrow$ nicht für Kauflächen geeignet
- kostengünstig
- gut gewebedeträglich

► Kompomerfüllung

- aus Komposit und Glasionomer-Zement
- Kombi aus gut haftend und Kompositvorteil
- Kompomerer enthält: Monomere, Photoinitiatoren, Stabilisatoren, Farbpigmente, Füllkörper, Dimethacrylatmonomere, Füllkörper aus Ba-Al-Fluorosilikatgläser
- bessere Materialeigenschaften als Glasionomer-Zemente, schlechter als Kompositmaterialien
- $\Rightarrow$ eher spalten zw. Kompomerfüllung u. Zahn
- $\Rightarrow$ mikromechan. Verbund erforderlich

Wchselwirkung zwischen Gewebe & Werkstoffe

► Anatom. Begriffe

autogen: Empfänger = Spende

Syngon: genetisch identische Individuen

allogen: genetisch differente " , gehören derselben Species an

xenogen: verschiedene Species

► Definitionen

- **Biokompatibilität**: Verträglichkeit zwischen technischem & biologischen System.
~~Gegensatz~~ aus **Strukturkompatibilität** (Anpassen d. Implantatstruktur an mechan. Verhalten des Empfängerorgans: **Formgebung u. innere Struktur** ⇒ **Struktur-mimikry**)
und **Oberflächenkompatibilität** (Anpassen der chemischen, physikal., biologischen u. morphologischen **Oberflächeneigenschaften** ⇒ **klinisch erwünschte Wechselwirkung**)

• **dynam. Biokompatibilität**

Biokompatibilität mit Berücksichtigung Kontaktzeit Implantat u. Empfängerorgane

- **Inkompatibel** ⇒ toxische Substanzen, Antigen, Immunreaktion, Allergien, Entzündung, Nekrose, Abstoßungsreaktion

= toxische Wirkung ⇒ Gewebe stirbt

- Biokompatibel** ⇒ nicht-toxische Substanzen ⇒ **Encapsulation** in Bindegewebe, schwache Fremdkörperreaktion
⇒ **Distanzosteo genese** ⇒ **Kontaktosteo genese**

- Biointert** ⇒ keine toxische Substanzen
⇒ **nicht-adhärentes Bindegewebskapsel** ums Implantat

- Bioaktiv** ⇒ posit. Interaktion ⇒ **Gewebendifferenzierung** ⇒ **Bindung, Adhäsion Knochen**
am Implantat an der Grenzfläche ⇒ **Verbundosteo genese**

- ⇒ **bindet** Bindung mit Implantat

- Induktiv** - induziert heterotop Knochenbildung bzw. **Differenzierung d. knochenbildenden Zellen**

- Kunduktiv** - Werkstoff als Gerüst für Knochenablagerung in osteogener Umgebung

- Biofunktionalität** = **Substitution** einer Funktion ^{biolog.} im biologischen System durch ein techn. System ohne Nebeneffekte

- degradable** = **Gewebe ersetzt Implantat**

- Distanzosteo genese** = Implantat mit **andergewebsschicht umkapselt**

- Kontaktosteo genese** - **keine Bindegewebsbildung**
- **Knochengewebe entsteht in der unmittelbaren Umgebung d. Implantats;**
Knochenwachstum Richtung Implantatoberfläche

- Verbundosteo genese** - **Knochenbildung an der Implantatoberfläche; Wachstum zum Empfängerorgane**

- Osteokonduktiv** - Leitstruktur für die Osteogenese.
- ermöglicht Einwachsen von Knochen, **Osteoprogenitorzellen reifen u. Differenzieren**
Vaskularisierung, Kalzifizierung, vollst. Remodellierung

⇒ **Substitution Matrix durch Knochen**