

Aggregatzustände: Flüssigkeiten, feste Körper (Fortsetzung):

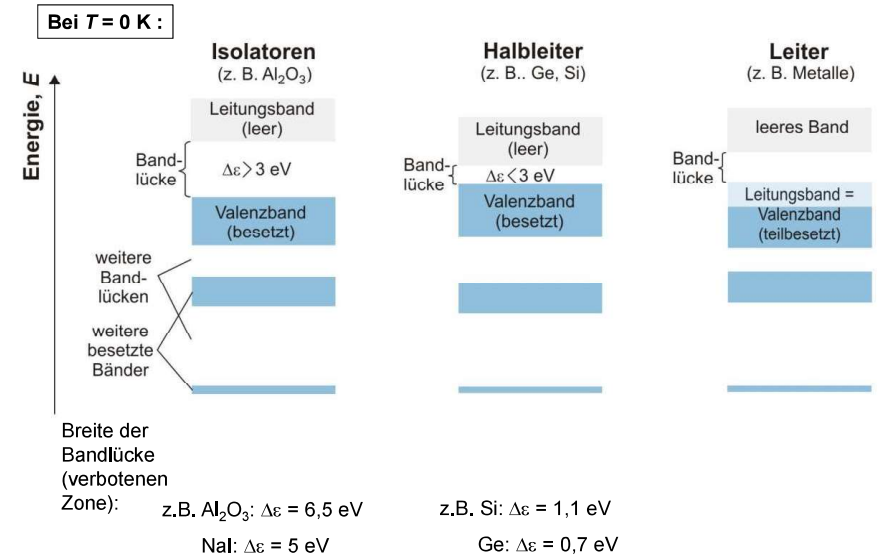
5. Fester Aggregatzustand - Kristalle
 - f) Elektronenstruktur (Bändermodell)
6. Fester Aggregatzustand - amorphe Stoffe
 - a) Makroskopische Beschreibung
 - b) Mikroskopische Beschreibung
7. Flüssigkristalle
 - a) Makroskopische Beschreibung:
 - b) Mikroskopische Beschreibung:
 - c) Anwendungen von Flüssigkristallen:
 - d) Lyotrope Flüssigkristalle:

III. Materialfamilien

1. Metalle
2. Keramiken
3. Polymere
4. Komposite

IV. Eigenschaften der Materialien

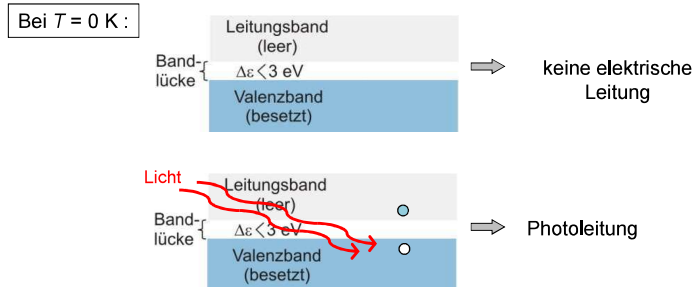
1. Einige mechanischen Eigenschaften
 - a) Deformationstypen, Belastungsdiagramm
 - b) Elastische Verformung – Elastizität und Steifigkeit
 - c) Plastische Verformung – Festigkeit und Zähigkeit
2. Elektrische Eigenschaften
3. Thermische Eigenschaften
 - a) Erwärmung/Abkühlung
 - b) Wärmeleitung
 - c) Wärmeausdehnung
4. Typische Eigenschaften der einzelnen Materialfamilien



→ siehe die optischen Eigenschaften später

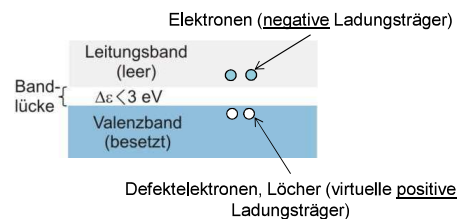
2

Eigenhalbleiter (intrinsic Halbleiter)



Bei $T = 273 \text{ K}$:

Annähernd Boltzmann-Verteilung!



Zahl der freien Ladungsträger

$$\sigma \sim N \sim e^{-\frac{\Delta\epsilon}{2kT}}$$

elektrische Leitfähigkeit

3

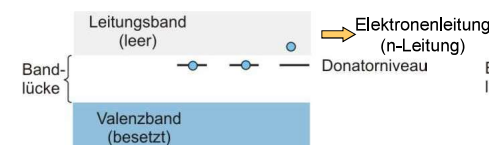
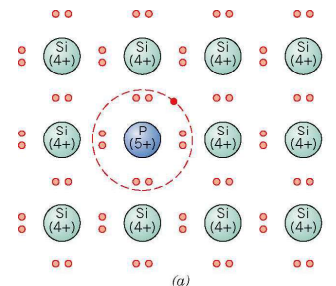
Dotierte Halbleiter

Grundkristall z.B. Si

n-Halbleiter

z. B. + P

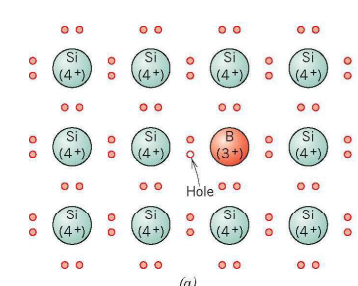
$_{15}\text{P}: 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$



p-Halbleiter

z. B. + B

$_5\text{B}: 1s^2 2s^2 2p^1$



4

6. Fester Aggregatzustand - amorphe Stoffe

Z.B. Glas, Harz, Wachs, Bitumen, ...

a) Makroskopische Beschreibung:

- Eigenvolumen aber keine Eigenform
- Isotrop
- sehr hohe Viskosität

b) Mikroskopische Beschreibung:

- Nahordnung
- Schwache Bewegungen

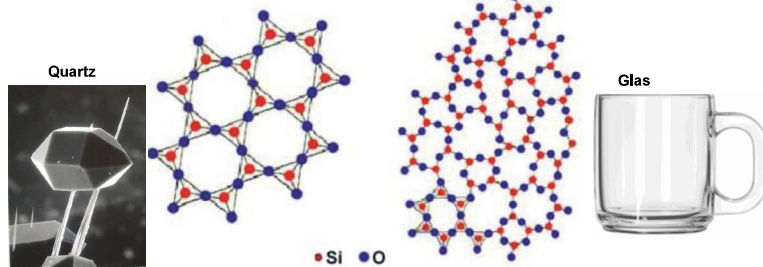


Siehe: Pechtropfenexperiment

= gefrorene unterkühlte Flüssigkeiten, Gläser !

kristallines SiO_2

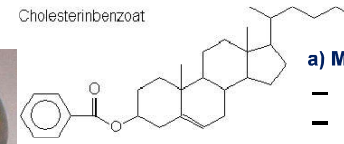
amorphes SiO_2



5

7. Flüssigkristalle - Mesophase zw. dem festen und flüssigen Zustand

1883 Reinitzer Cholesterinbenzoat



a) Makroskopische Beschreibung:

- Eigenvolumen aber keine Eigenform
- Optische Anisotropie
- Eigenschaften sind empfindlich gegen schwache äußere Einwirkungen

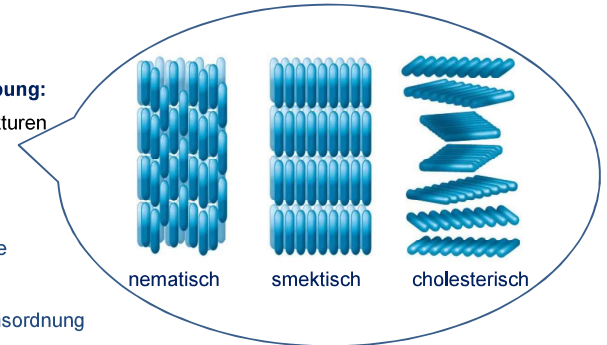
b) Mikroskopische Beschreibung:

- Teilweise geordnete Strukturen (Orientierung, Schichten)

- Faden-, stäbchen- oder scheibenförmige Moleküle



Translations-, und Orientationsordnung

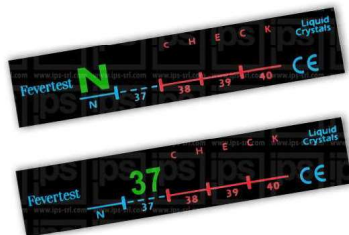


6

c) Anwendungen von Flüssigkristallen:

Kontaktthermographie/Plattenthermographie

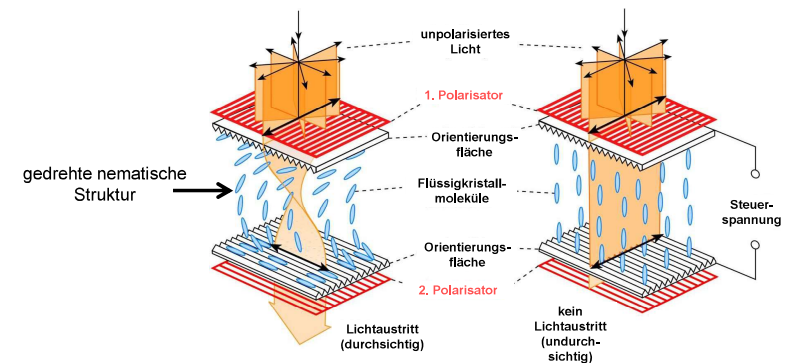
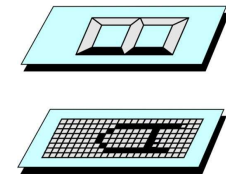
Grundlage: thermo-optisches Phänomen (bei Temperaturänderungen ändern sich die optischen Eigenschaften)



7

LCD (liquid crystal display)

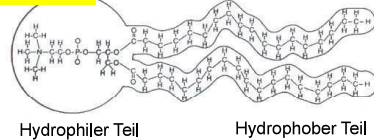
Grundlage: elektro-optisches Phänomen (durch elektrisches Feld ändern sich die optischen Eigenschaften)



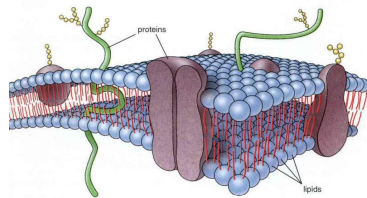
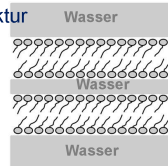
➔ Erklärung siehe später bei den Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie! 8

d) Lyotrope Flüssigkristalle:

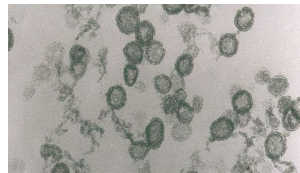
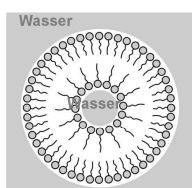
Beispiel Phospholipidmolekül



Lamellare Struktur



Liposom

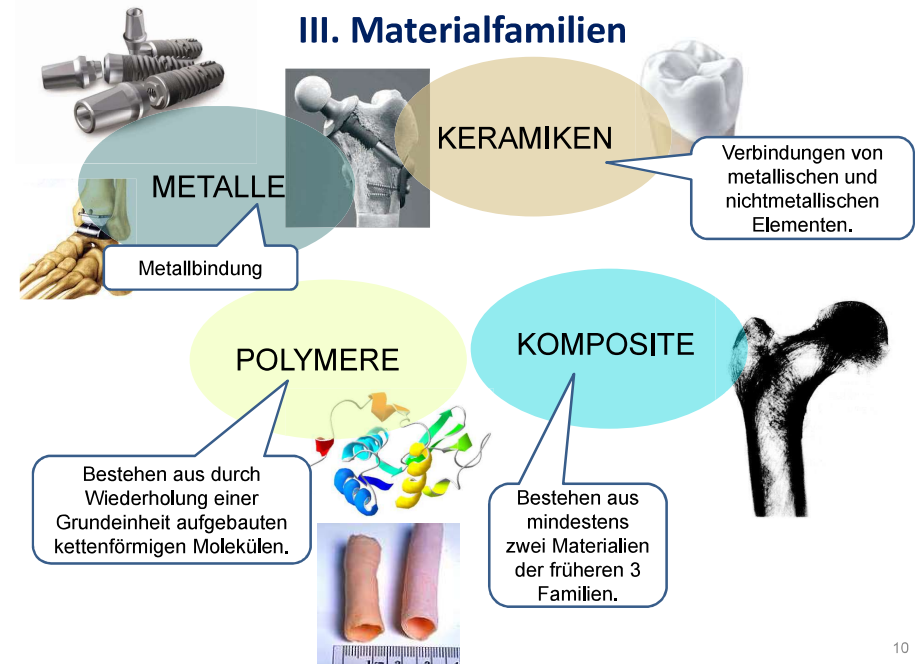


Ein Beispiel für die Verwendung
(Hüftgelenkprothese):



9

III. Materialfamilien



10

1. Metalle

- Definition: Metallbindung
- Bindungstyp: Metallbindung
- Aggregatzustand bei üblichen Bedingungen: fest (kristallin) mit einigen Ausnahmen (z.B. Hg)
- Herstellung: aus Schmelze
- Struktur: Polykristalle, aber Einkristalle und amorphe Metalle (Metallgläser) auch möglich
- Reinmetalle oder Legierungen

metallisches Glas



2. Keramiken

- Definition: Verbindungen von metallischen und nichtmetallischen Elementen
- Bindungstyp: Ionenbindung, weniger auch kovalente Bindung
- Aggregatzustand bei üblichen Bedingungen: fest (kristallin/amorph)
- Herstellung: Sintern oder aus Schmelze
- Struktur: Polykristalle/Einkristalle/amorphe Struktur (Gläser)

NaCl



Apatit



SiO₂



Quarz



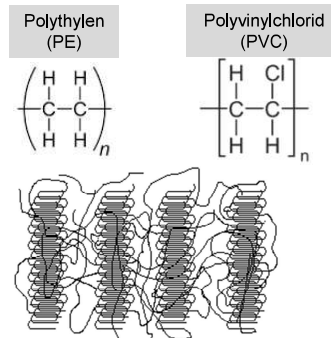
Glas

11

12

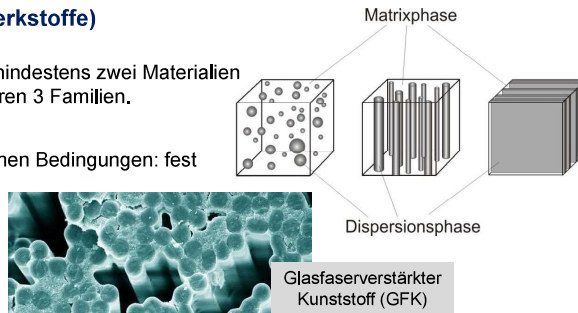
3. Polymere

- Definition: Bestehen aus durch Wiederholung einer Grundeinheit aufgebauten kettenförmigen Molekülen.
- Bindungstyp: kovalente Bindung+sekundäre Bindungen
- Aggregatzustand bei üblichen Bedingungen: flüssig/fest (kristallin/amorph)
- Herstellung: durch Polymerisation aus Monomeren
- Struktur: amorph/teilweise kristallin
- Polymerisationsgrad



4. Komposite (Verbundwerkstoffe)

- Definition: Bestehen aus mindestens zwei Materialien der früheren 3 Familien.
- Bindungstyp: -
- Aggregatzustand bei üblichen Bedingungen: fest (kristallin/amorph)
- Struktur: -

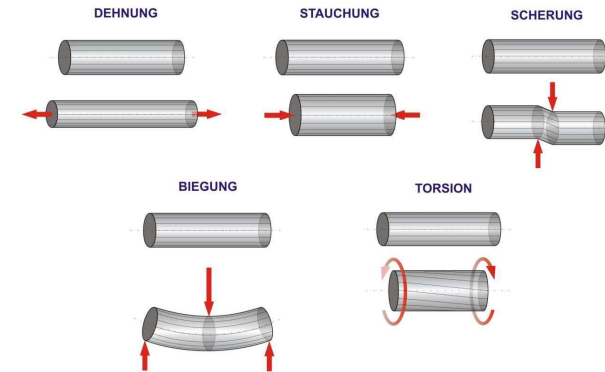


13

III. Eigenschaften der Materialien

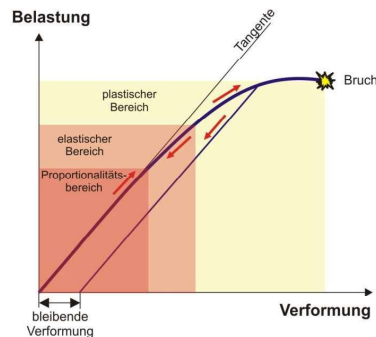
1. Einige mechanischen Eigenschaften (von festen Stoffen)

a) Deformationstypen und das Belastungsdiagramm:



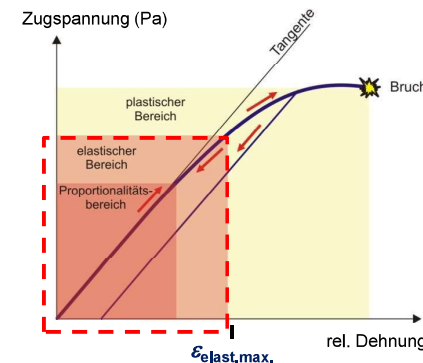
14

Belastungsdiagramm/Belastung-Verformungs-Diagramm/Spannung-Dehnungs-Diagramm:

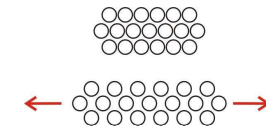


Als Beispiel wird die **Dehnung (Zug)** im Weiteren diskutiert.

b) Elastische Verformung – Elastizität, Steifigkeit und das Hooksche Gesetz:



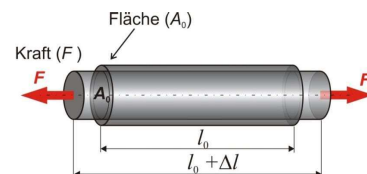
In dem **elastischen Bereich** werden die Atome ohne Aufspaltung der Bindungen reversibel voneinander entfernt:



Bei der Dehnung (Zug) wird die Belastung mit Hilfe der Zugspannung (σ) und die Verformung mit Hilfe der Dehnung (ϵ) quantitativ charakterisiert:

▪ **Zugspannung (σ):** $\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \right)$

▪ **Dehnung (ϵ):** $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$



Stoff	$\epsilon_{\text{elast.max.}} (\%)$
Knochen	0,5
Kollagen	10
Elastin	130
Aluminiumoxid	0,1
Titan	2
PMMA (Polymethylmethacrylat)	20
Silikonummi	700

Die Elastizität eines Körpers kann mit der **elastischen Rückstellung** charakterisiert werden. Sie ist die maximal mögliche reversible Dehnung: $\epsilon_{\text{elast.max.}} (\%)$

Die Größe $\epsilon_{\text{elast.max.}}$ könnte man auch **Elastizität** nennen.

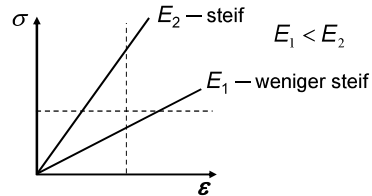
15

16

In dem **Proportionalitätsbereich** gilt: Zugspannung ~ Dehnung

- **Hookesches Gesetz:** $\sigma = E\varepsilon$

Young-Modul oder Elastizitätsmodul oder **Steifigkeit (Pa)**



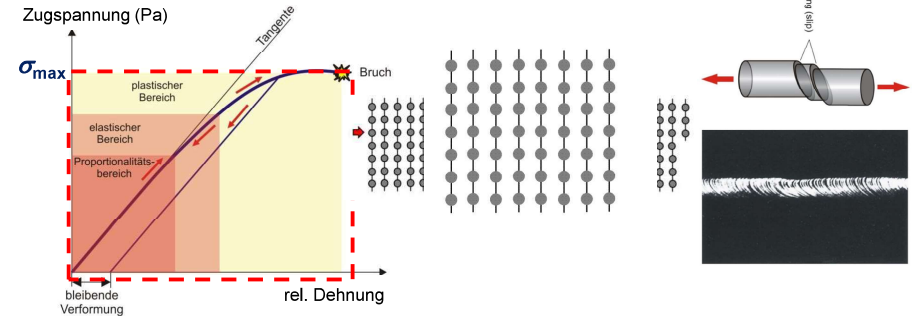
Stoff	E (GPa)
Knochen	10-15
Kollagen	0,3-2,5
Bandscheibe	0,005
Elastin	0,0005
Aluminiumoxid	350-410
Stahl	220
Titan	110
PMMA (Polymethylmethacrylat)	2,4-3,8
Silikon Gummi	≈ 0,0002

Wovon hängt die Steifigkeit der Materialien ab?



Eine andere Form des hookeschen Gesetzes (für eine Feder):

c) Plastische Verformung – Festigkeit und Zähigkeit:

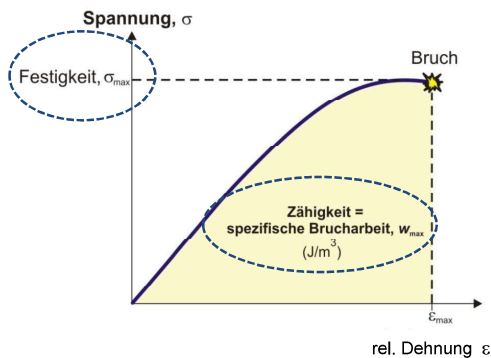


- **Festigkeit (σ_{\max} (Pa)):** die maximale Spannung, bei welcher der Bruch auftritt

Material	σ_{\max} (MPa)
Knochen	100
Kollagen	60
Elastin	0,6
kohlenstoffaserverstärktes (61%) Epoxid	≈ 1700
Stahl	500
Titan	430
Aluminiumoxid	250
PMMA (Polymethylmethacrylat)	≈ 50

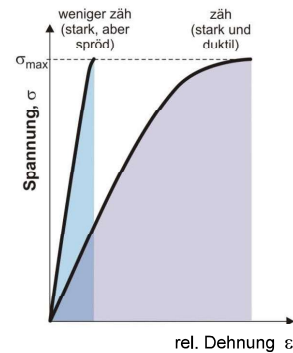


Wovon hängt die Festigkeit der Materialien ab?

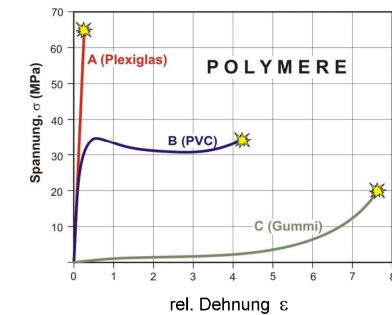
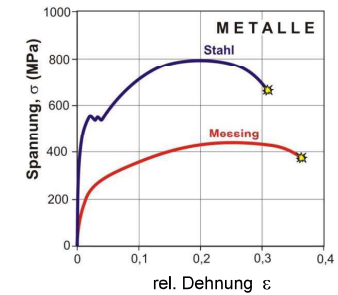
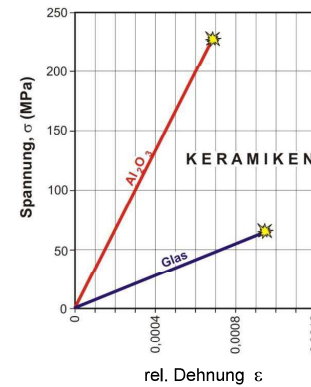


- **Zähigkeit (w_{\max} (J/m³)):** die zur Verformung zugeführte Energie (Arbeit) bis zum Bruch (pro m³)
 - Sie kann durch das Flächenstück unter der Kurve bis zum Bruch veranschaulicht werden.
 - Die Zähigkeit hängt von der Festigkeit aber auch von der maximalen Dehnbarkeit des Stoffes ab.

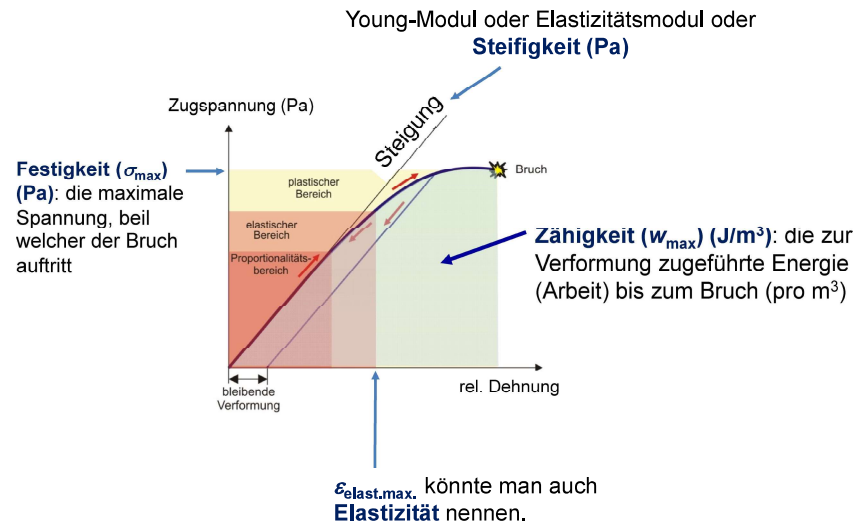
Gleiche Festigkeit aber unterschiedliche Zähigkeit:



Beispiele:



Zusammenfassung der wichtigsten Grössen bei der Beschreibung der Elastischen Eigenschaften lastische Verformung – Festigkeit und Zähigkeit:



21

2. Elektrische Eigenschaften

s. Grundschrift

Elektrische Leitfähigkeit (σ) (S/m)

Flüssigkeiten: Leitfähigkeit ~ Ionenkonzentration

Feste Stoffe:

Stoff	σ (S/m)
Silber	$6,8 \cdot 10^7$
Gold	$4,3 \cdot 10^7$
Platin	$0,94 \cdot 10^7$
Titan	$0,24 \cdot 10^7$
Germanium	2,2
Silizium	$4 \cdot 10^{-4}$
Zirkon	$\approx 10^{-10}$
Porzellan	$\approx 10^{-11}$
Glas	$\approx 10^{-13}$
PMMA	$\approx 10^{-12}$
Polyethylene	$\approx 10^{-16}$

Leiter

Halbleiter

Isolator

s. Bändermodell

Körpergewebe:

Gewebe	σ (mS/m)
Blut	700
graue Hirnmasse	300
weiße Hirnmasse	150
Haut	100
Fett	40
Knochen	10

22

3. Thermische Eigenschaften

a) Erwärmung/Abkühlung

spezifische Wärmekapazität (c)

„Erwärmbarkeit“

Stoff	c (J/(kg·K))
Wasser	4190
Muskelgewebe	3760
Fettgewebe	3000
Körpergewebe (durchschnittlich)	3500
Gold	126
Porzellan	1100
Glas	800

hohe Temperaturstabilisierungsfähigkeit

Stoff	λ (W/(m·K))
Silber	420
Titan	22
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

b) Wärmeleitung

Wärmeleitfähigkeit (λ)

s. im 2. Semester

c) Wärmeausdehnung

Längenausdehnung:

Längenänderung

Temperaturänderung

ursprüngliche Länge

linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (Längenausdehnungskoeffizient) ($1/\text{K}$)

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

Stoff	α ($10^{-6} 1/\text{K}$)
Knochen	≈ 25
Zahnschmelz	$\approx 11,4$
Porzellan	4-16
Glas	≈ 8
Zirkon	≈ 11
Titan	8,6
Gold	14,2
Amalgam	≈ 25
PMMA	70-81
Wachs	300-500

Volumenausdehnung:

Volumenänderung

ursprüngliches Volumen

räumlicher Wärmeausdehnungskoeffizient (Volumenausdehnungskoeffizient) ($1/\text{K}$)

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

~ 1/Bindungsenergie!

Für die meisten Stoffe gilt annähernd: $\beta \approx 3\alpha$

Optische Eigenschaften: s. später im 1. Semester

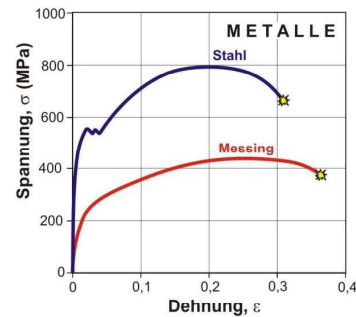
Chemische und biologische Eigenschaften: s. andere Kurse

23

24


1. Metalle

- Definition: Metallbindung
- Bindungstyp: Metallbindung
- Aggregatzustand bei üblichen Bedingungen: fest (kristallin) mit einigen Ausnahmen (z.B. Hg)
- Herstellung: aus Schmelze
- Struktur: Polykristalle, aber Einkristalle und amorphe Metalle (Metallgläser) auch möglich
- Dichte: groß
- Mechanische Eigenschaften: mittelhohe Steifigkeit, **hohe Festigkeit**, breiter plastischer Bereich und **hohe Zähigkeit**
- Elektrische Eigenschaften: hohe elektrische Leitfähigkeit
- Thermische Eigenschaften: mittelhoher Schmelzpunkt, mittelgroßer Wärmeausdehnungskoeffizient, hohe Wärmeleitfähigkeit
- Weitere Eigenschaften: Neigung zur Korrosion, Metallische Farbe, **oft nicht biokompatibel**



25

- Beispiele aus der Medizin: Titan, Ni-Ti-Legierungen
- Anwendungsbeispiele: **Implantate, Zahnkrone, Brücke, kieferorthopädischer Bogen**



Günstige Eigenschaften von Titan:

- Kleine Dichte ($4,5 \text{ g/cm}^3$)
- Hohe Festigkeit
- Kleine Steifigkeit (Young-Modul)
- Kleine elektrische und Wärmeleitfähigkeit
- Biokompatibel
- Nicht ferromagnetisch, geeignet für MRT-Untersuchungen

Material	σ_{max} (MPa)	E (GPa)
Knochen	100	10
Kollagen	10	0,3
Elastin	0,3	0,001
kohlenstofffaserverstärktes (61%) Epoxid	35	0,001
Stahl	220	210
Titan	110	110
Aluminiumoxid	2,4	2,4
PMMA (Polymethylmethacrylat)	~0	~0
Silikongummi	~0	~0

Stoff	σ (S/m)
Silber	$6,8 \cdot 10^7$
Gold	$4,3 \cdot 10^7$

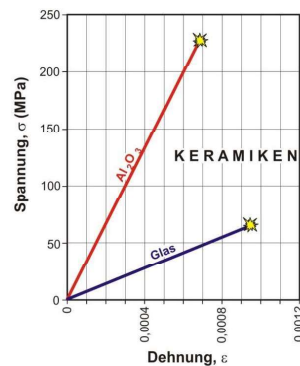
Stoff	λ (W/(m·K))
Silber	420
Titan	22
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025

Stoff	σ (S/m)
PMMA	$\approx 10^{-16}$
Polyethylene	$\approx 10^{-16}$

26

2. Keramiken

- Definition: Verbindungen von metallischen und nichtmetallischen Elementen
- Bindungstyp: Ionenbindung, weniger auch kovalente Bindung
- Aggregatzustand bei üblichen Bedingungen: fest (kristallin/amorph)
- Herstellung: Sintern oder aus Schmelze
- Struktur: Polykristalle/Einkristalle/amorphe Struktur (Gläser)
- Dichte: mittelgroß
- Mechanische Eigenschaften: **hohe Steifigkeit**, mittelmäßige Festigkeit, plastischer Bereich fehlt, sehr geringe Zähigkeit, brüchig
- Elektrische Eigenschaften: sehr geringe elektrische Leitfähigkeit (Isolator)
- Thermische Eigenschaften: hoher Schmelzpunkt, geringer Wärmeausdehnungskoeffizient, geringe Wärmeleitfähigkeit



27

- Beispiele aus der Medizin: Aluminiumoxid (Al_2O_3), Zirkoniumdioxid (ZrO_2), Hydroxiapatit (HAP)
- Anwendungsbeispiele: Implantate, Zahnkrone, Brücke



Al_2O_3



ZrO_2



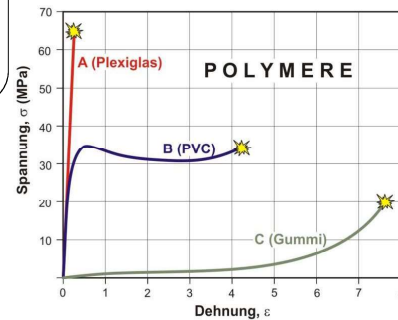
HAP



28

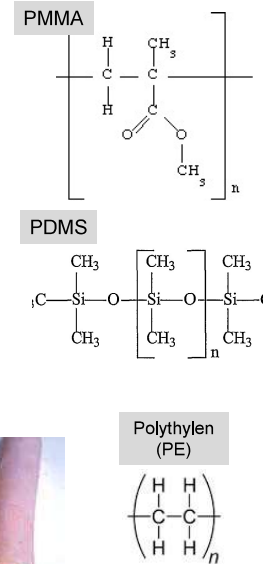
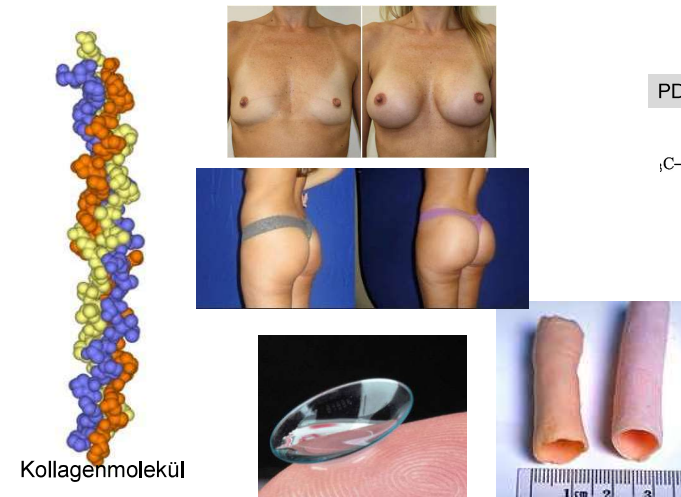
3. Polymere

- Definition: Bestehen aus durch Wiederholung einer Grundeinheit aufgebauten kettenförmigen Molekülen.
- Bindungstyp: kovalente Bindung+sekundäre Bindungen
- Aggregatzustand bei üblichen Bedingungen: flüssig/fest (kristallin/amorph)
- Herstellung: durch Polymerisation aus Monomeren
- Struktur: amorph/teilweise kristallin
- Dichte: klein
- Mechanische Eigenschaften: kleine Steifigkeit, geringe Festigkeit, **breiter elastischer** und/oder **plastischer Bereich** und mittelmäßige/hohe Zähigkeit
- Elektrische Eigenschaften: geringe elektrische Leitfähigkeit (Isolator)
- Thermische Eigenschaften: niedriger Schmelzpunkt, mittelmäßiger Wärmeausdehnungskoeffizient, geringe Wärmeleitfähigkeit



29

- Beispiele aus der Medizin: Polymethylmethacrylate (PMMA), Polydimethylsiloxan (PDMS)
- Anwendungsbeispiele: **Kontaktlinsen, Venen, Venenklappen, Brustimplantate**



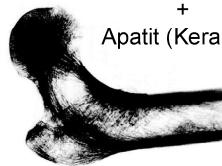
30

4. Komposite (Verbundwerkstoffe)

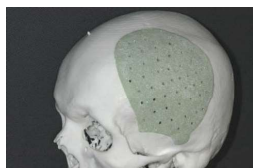
- Definition: Bestehen aus mindestens zwei Materialien der früheren 3 Familien.
- Bindungstyp: -
- Aggregatzustand bei üblichen Bedingungen: fest (kristallin/amorph)
- Struktur: -
- Dichte: klein/mittelmäßig
- Mechanische Eigenschaften: **hohe Festigkeit** und **Zähigkeit**
- Beispiele aus der Medizin: mit Keramiken verstärkte Polymere
- Anwendungsbeispiele: **Prothesen, Zahnfüllung**

Knochengewebe und Dentin sind Komposite:

Kollagen (Polymer)
+
Apatit (Keramik)



Hausaufgaben: ■ Aufgabensammlung
1.56, 59, 61-63, 65-72



31

32