

## Struktur der Materie

### II. Aggregatzustände: Flüssigkeiten, feste Körper

#### 6. Fester Aggregatzustand - Kristalle

- a) Makroskopische Beschreibung
- b) Mikroskopische Beschreibung
- c) Kristalltypen
- d) Apatit
- e) Gitterfehler
- f) Elektronenstruktur (Bändermodell)

#### 7. Fester Aggregatzustand - amorphe Stoffe

- a) Makroskopische Beschreibung
- b) Mikroskopische Beschreibung

#### 8. Flüssigkristalle

- a) Makroskopische Beschreibung:
- b) Mikroskopische Beschreibung:
- c) Anwendungen von Flüssigkristallen:
- d) Lyotrope Flüssigkristalle:

### III. Mechanische Eigenschaften der Materialien

#### 1. Mechanischen Eigenschaften von festen Stoffen

- a) Deformationstypen und das Belastungsdiagramm
- b) Elastische Verformung – Elastizität und Steifigkeit
- c) Plastische Verformung – Festigkeit und Zähigkeit

## e) Gitterfehler:

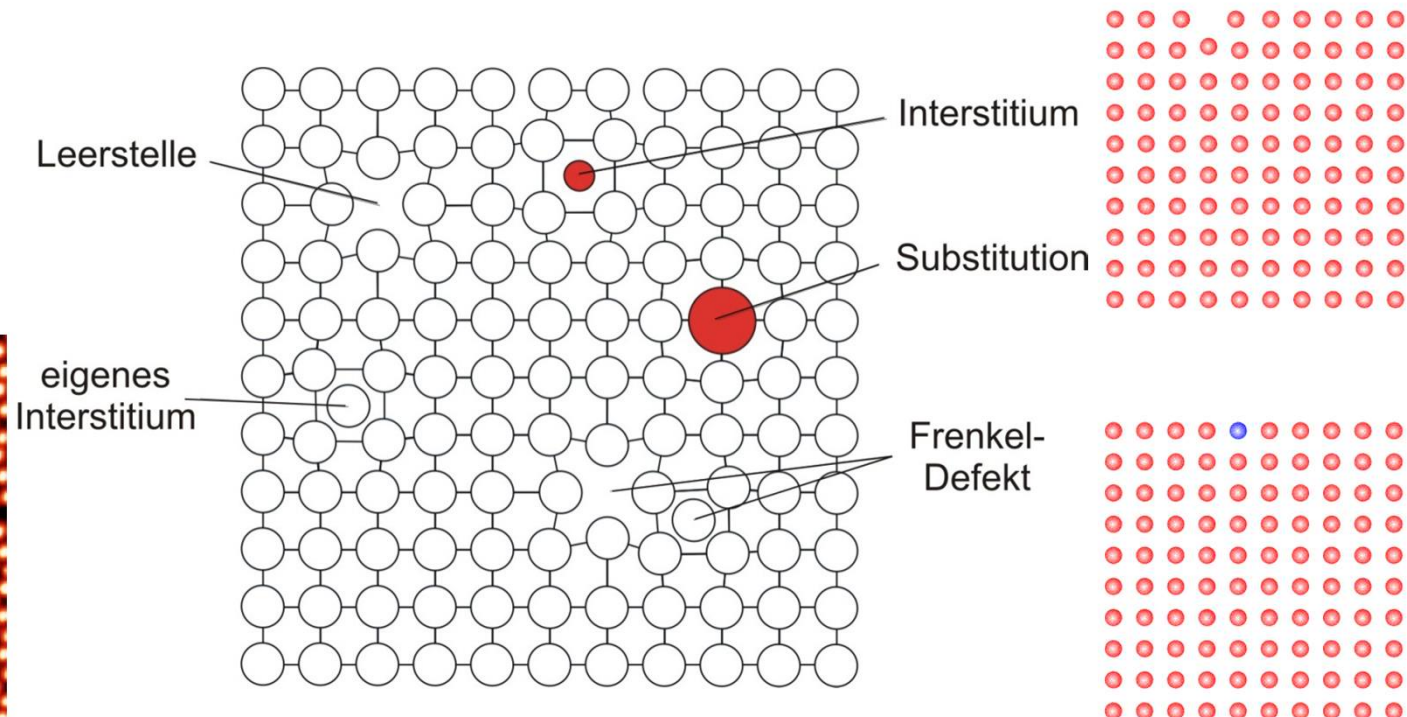
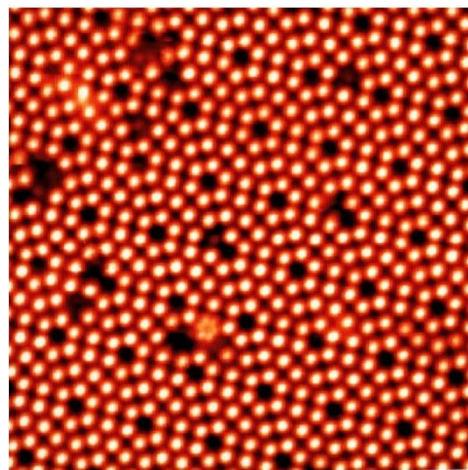
- Punktfehler
  - Thermische Fehler
    - Leerstelle (Vakanz, Schottky-Defekt)
    - Interstitium (Zwischengitteratom)
    - Frenkel-Defekt
- Fremdatome (chemische Fehler, Dotierung)
  - Substitutionsatom
  - Interstitielles Atom (Interstitium)

← Zahl der Schottky-Defekte ( $n_s$ ):

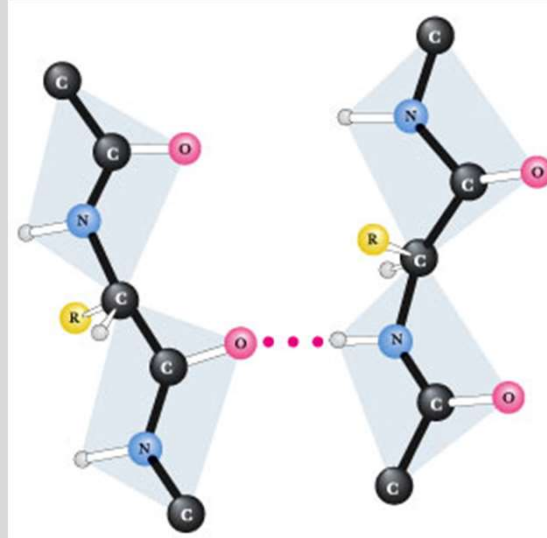
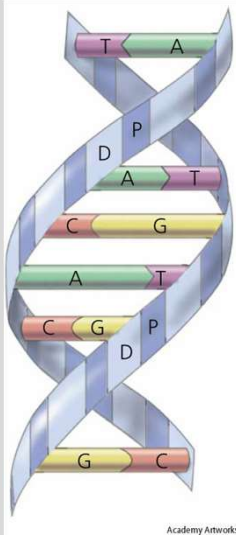
Aktivierungsenergie  
( $\approx$  Bindungsenergie)

$$n_s = N \cdot e^{-\frac{\varepsilon_s}{kT}}$$

Zahl der besetzten Gitterstelle  
( $\approx$  Zahl der Atome)



## Thermische Fehler in biologischen Makromolekülen:



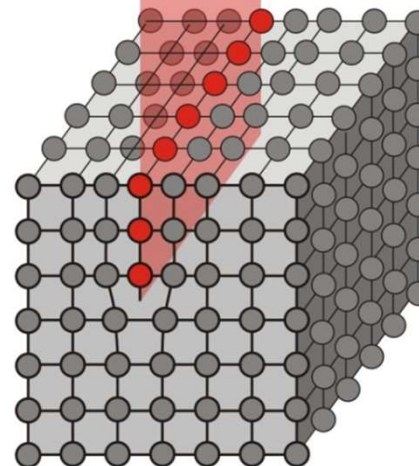
Zahl der aufgespaltenen H-Brücken

$$n_S = N \cdot e^{-\frac{\epsilon_s}{kT}}$$

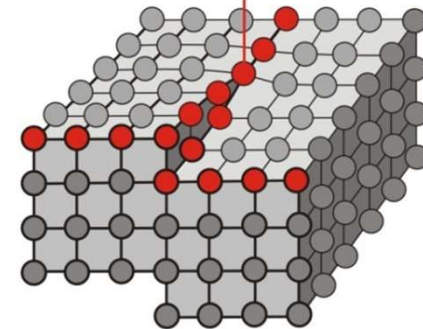
Zahl der intakten H-Brücken

## — Versetzungen (Dislokationen)

Stufenversetzung

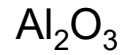


Schraubenversetzung



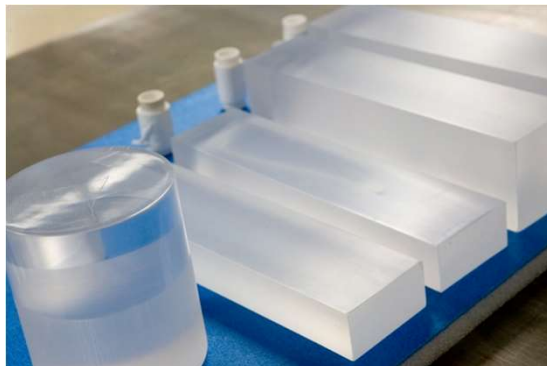
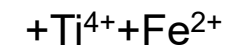
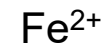
# Gitterfehler $\Rightarrow$ Eigenschaften!!

z. B. optische  
Eigenschaften



Rubin

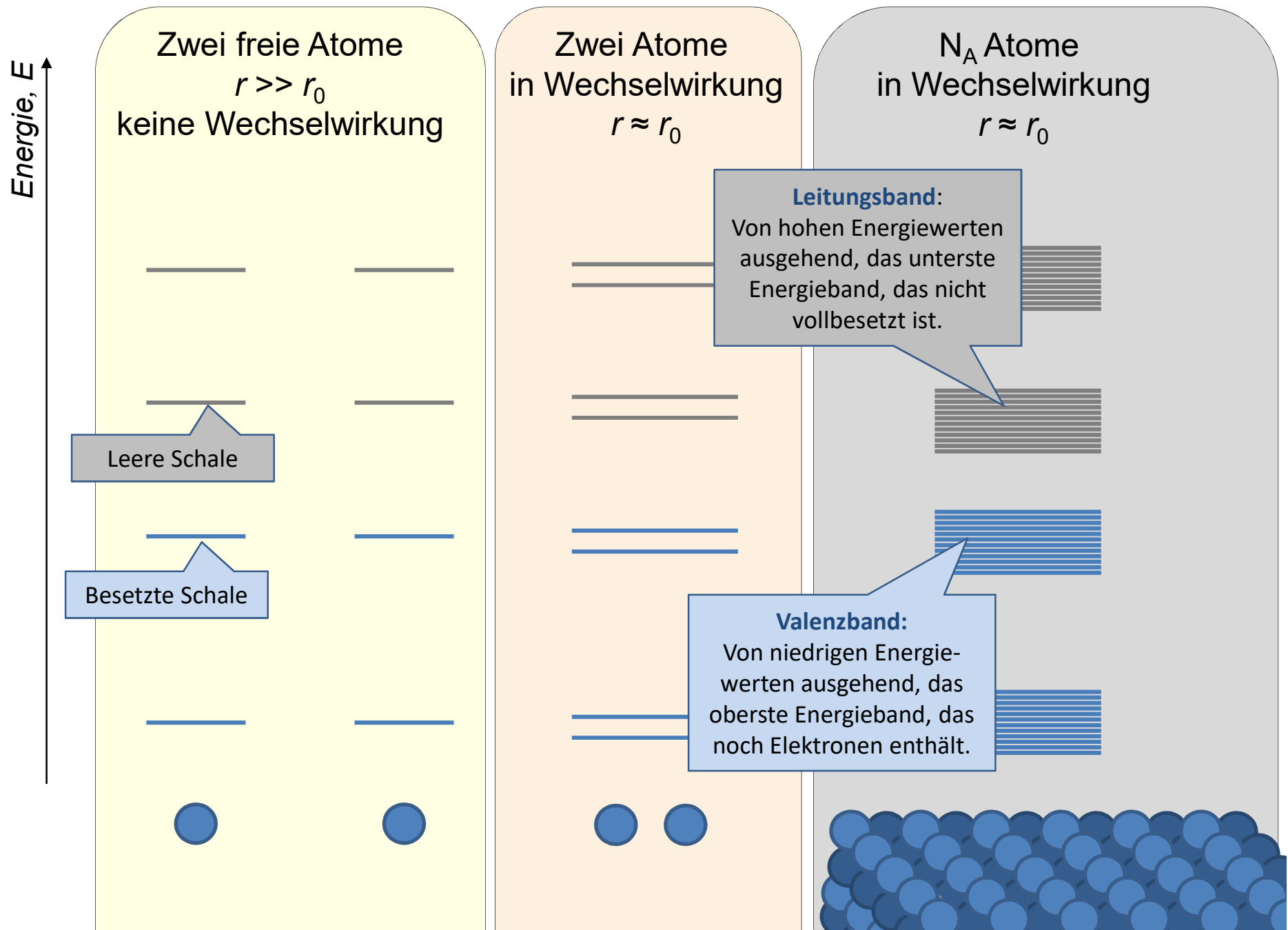
$\rightarrow$  siehe Rubinlaser



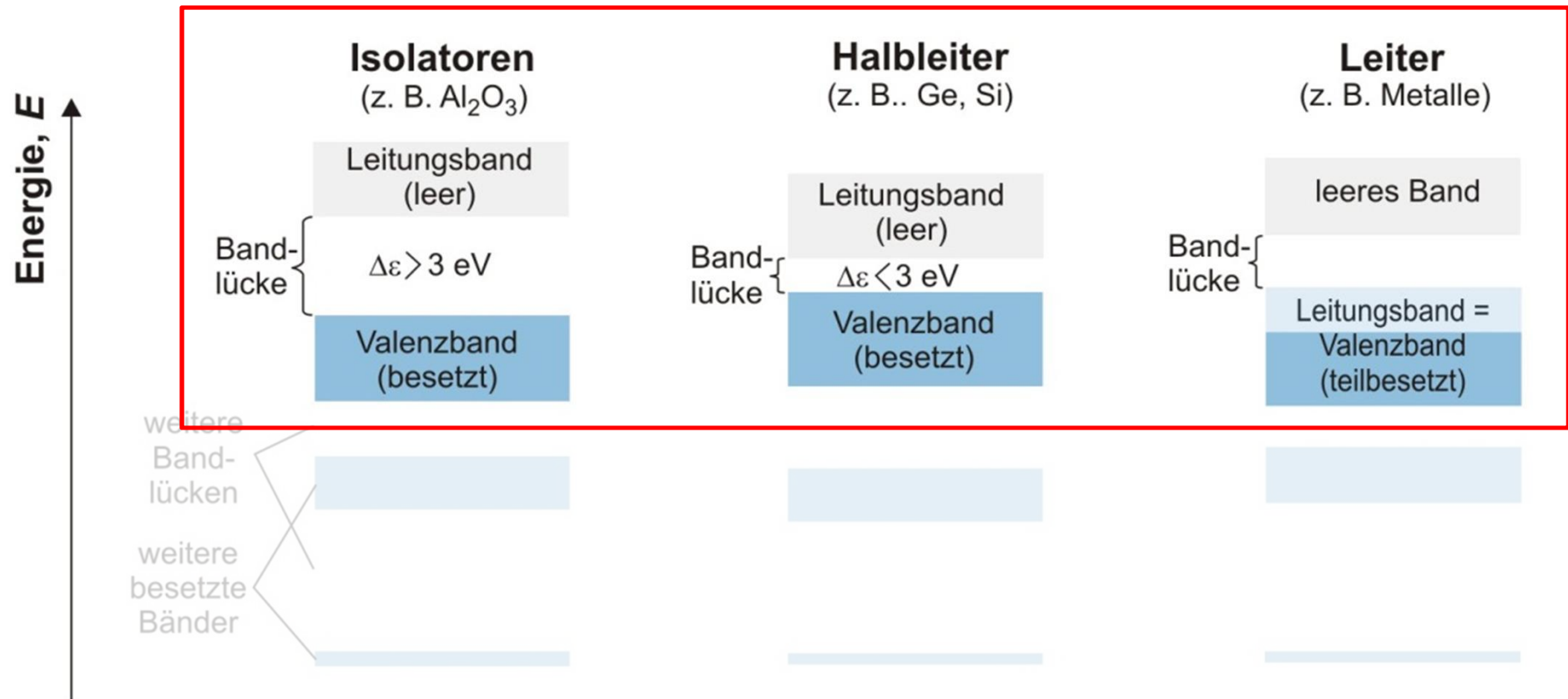
(unter Röntgenbestrahlung)

$\rightarrow$  siehe Szintillationskristall  
in der Nuklearmedizin  
Praktikum „Nukleare  
Grundmessung“

## f) Elektronenstruktur von Festkörpern (Bändermodell):







Breite der  
Bandlücke  
(verbotene  
Zone):

z.B.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :  $\Delta\epsilon = 6,5 \text{ eV}$

$\text{NaI}$ :  $\Delta\epsilon = 5 \text{ eV}$

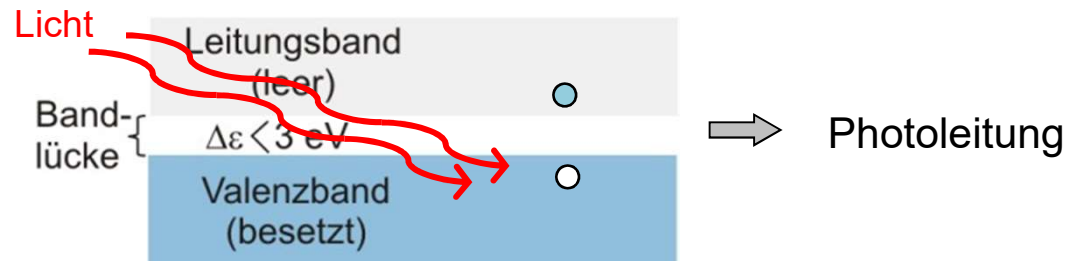
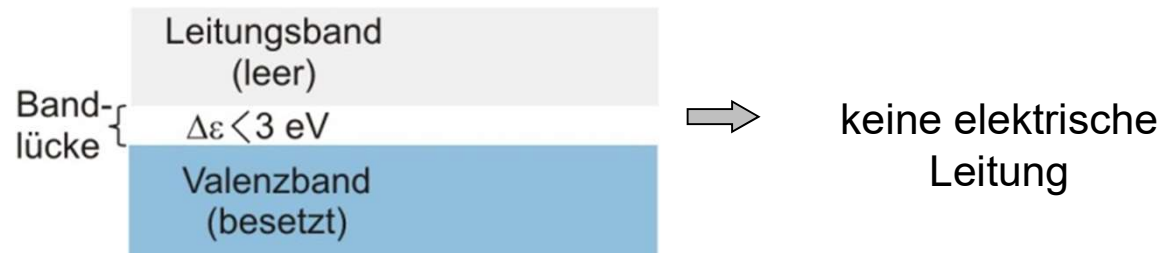
z.B. Si:  $\Delta\epsilon = 1,1 \text{ eV}$

Ge:  $\Delta\epsilon = 0,7 \text{ eV}$

→ siehe die optischen  
Eigenschaften später

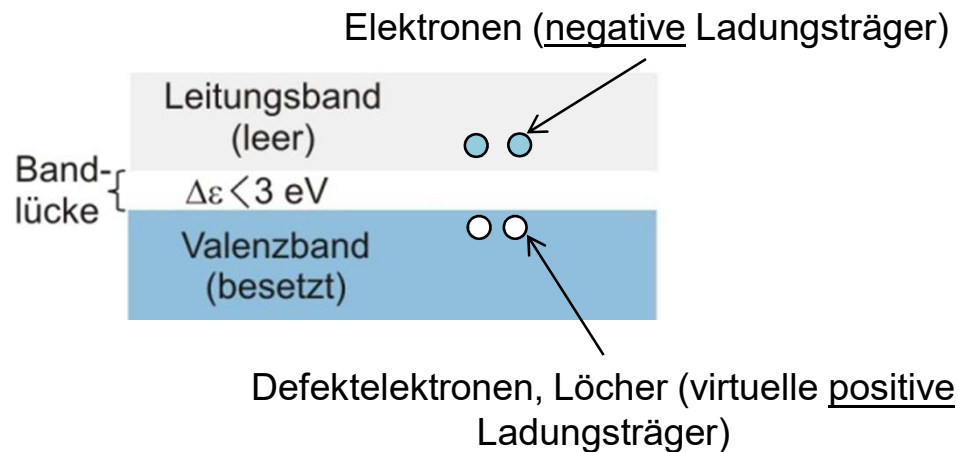
- Eigenhalbleiter (intrinsic Halbleiter)

Bei  $T = 0 \text{ K}$  :



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

Annähernd Boltzmann-Verteilung!



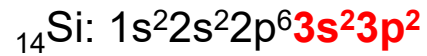
Zahl der freien  
Ladungsträger

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

elektrische  
Leitfähigkeit

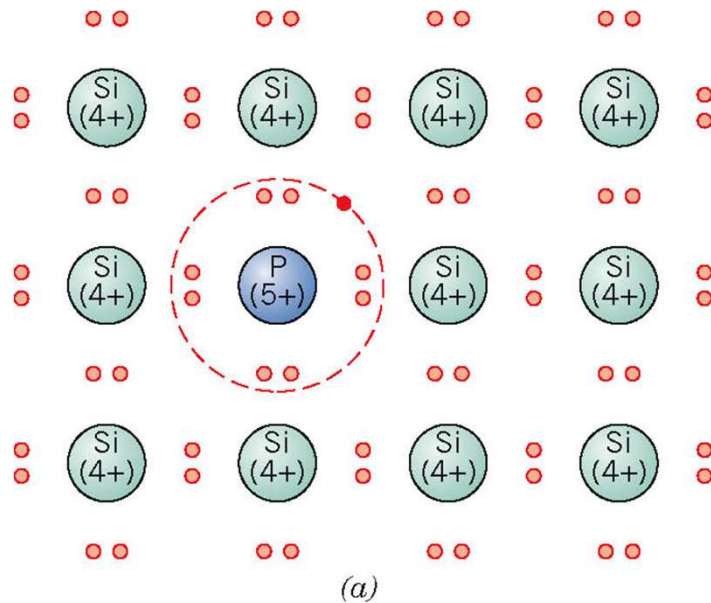
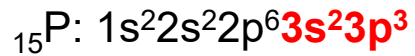
## ▪ Dotierte Halbleiter

Grundkristall z.B. Si



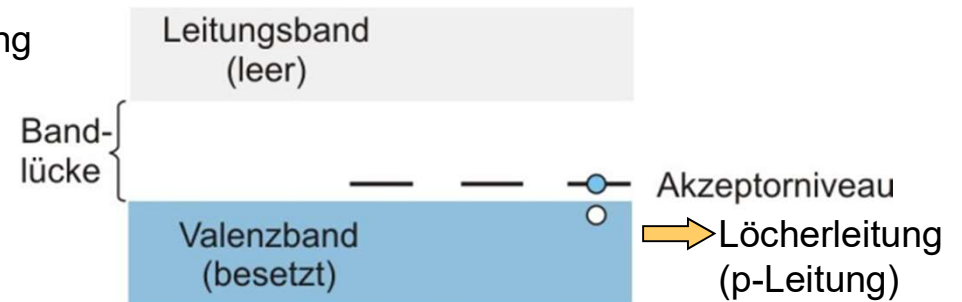
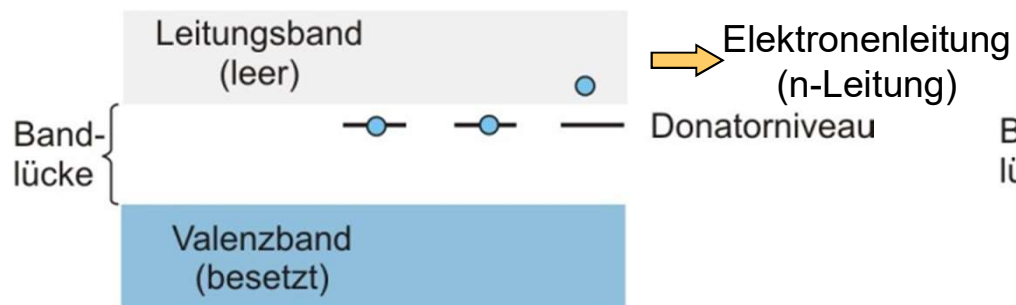
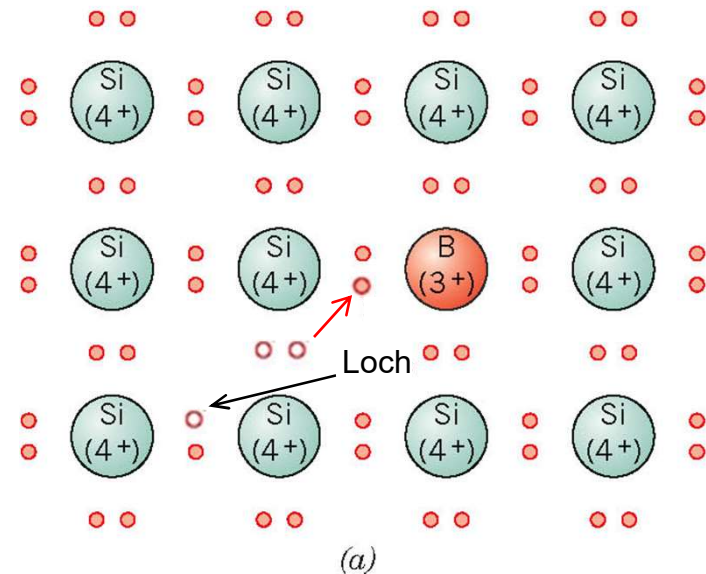
*n*-Halbleiter

z. B. + P



*p*-Halbleiter

z. B. + B





## 7. 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

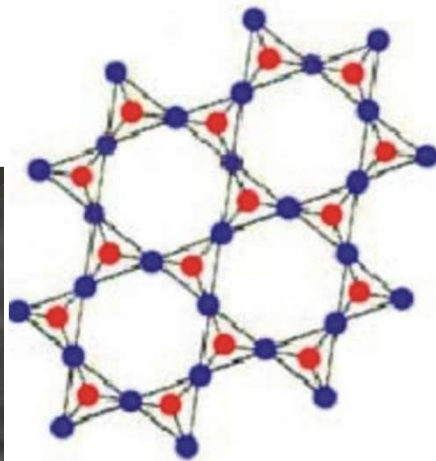


Siehe: Pechtropfenexperiment

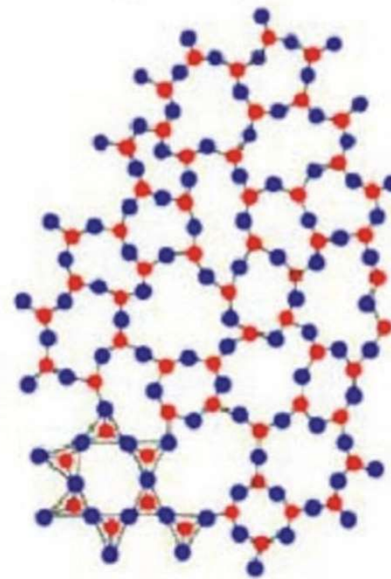


= gefrorene unterkühlte Flüssigkeiten, Gläser !

kristallines  $\text{SiO}_2$

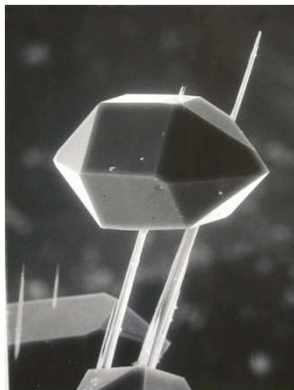


amorphes  $\text{SiO}_2$



• Si • O

Quartz



Glas



## Ein Beispiel: Längster Versuch der Welt

- Pechtropfen-Experiment
- In 1927 gestartet
- 9 Tropfen



Thomas  
Parnell

(in 1938, 1947, 1954,  
1962, 1970, 1979,  
1988, 2000 und 2014



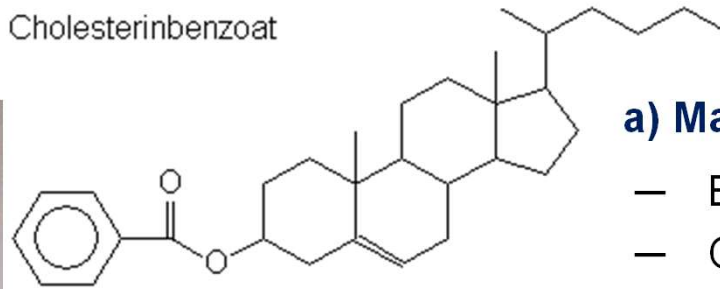
<https://de.wikipedia.org/wiki/Pechtropfenexperiment>

<http://www.nature.com/news/world-s-slowest-moving-drop-caught-on-camera-at-last-1.13418>

## 8. 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

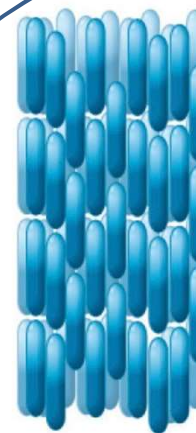
### b) Mikroskopische Beschreibung:

- Teilweise geordnete Strukturen (Orientierung, Schichten)

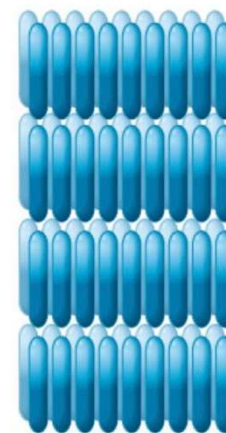
- Faden-, stäbchen, oder scheibenförmige Moleküle



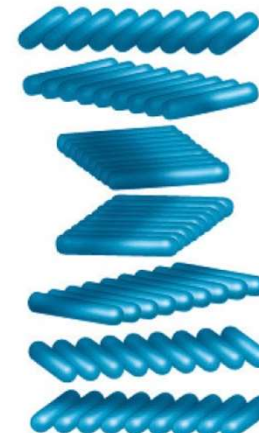
Translations-, und Orientationsordnung



nematisch



smektisch

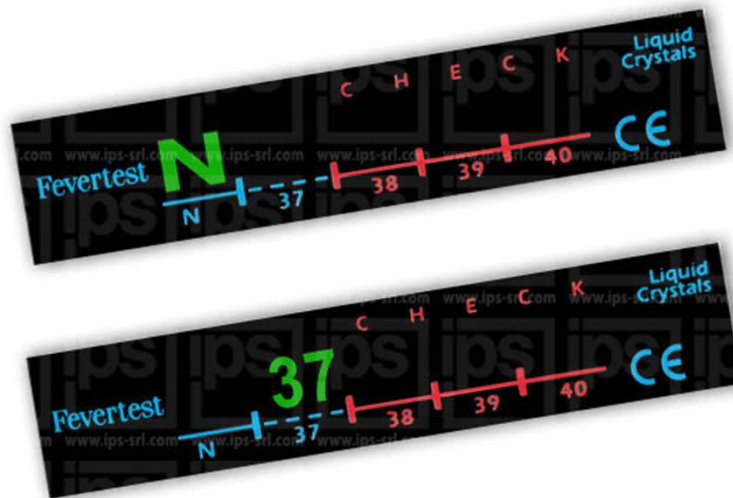
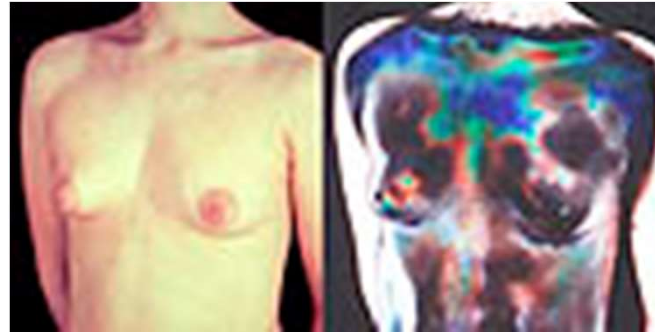
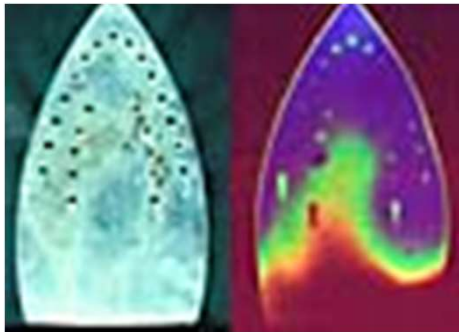


cholesterisch

### c) Anwendungen von Flüssigkristallen:

#### Kontaktthermographie/Plattenthermographie

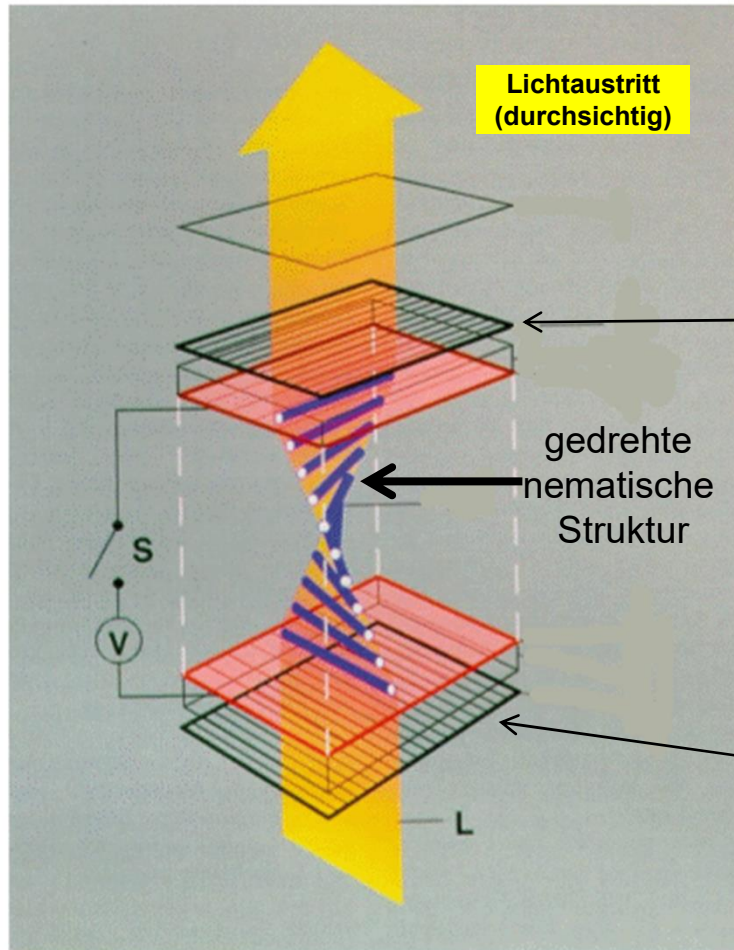
Grundlage: thermo-optisches Phänomen  
(bei Temperaturänderungen ändern sich  
die optischen Eigenschaften)





## LCD (liquid crystal display)

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



2. Polarisator

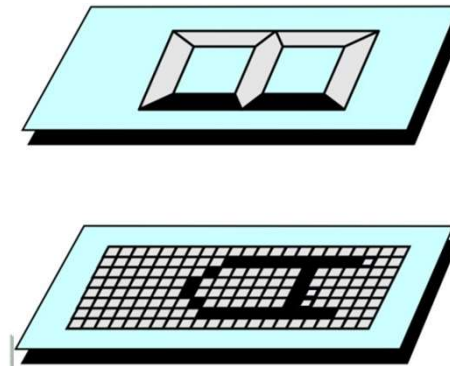
Orientierungs-  
fläche

Flüssigkristall-  
moleküle

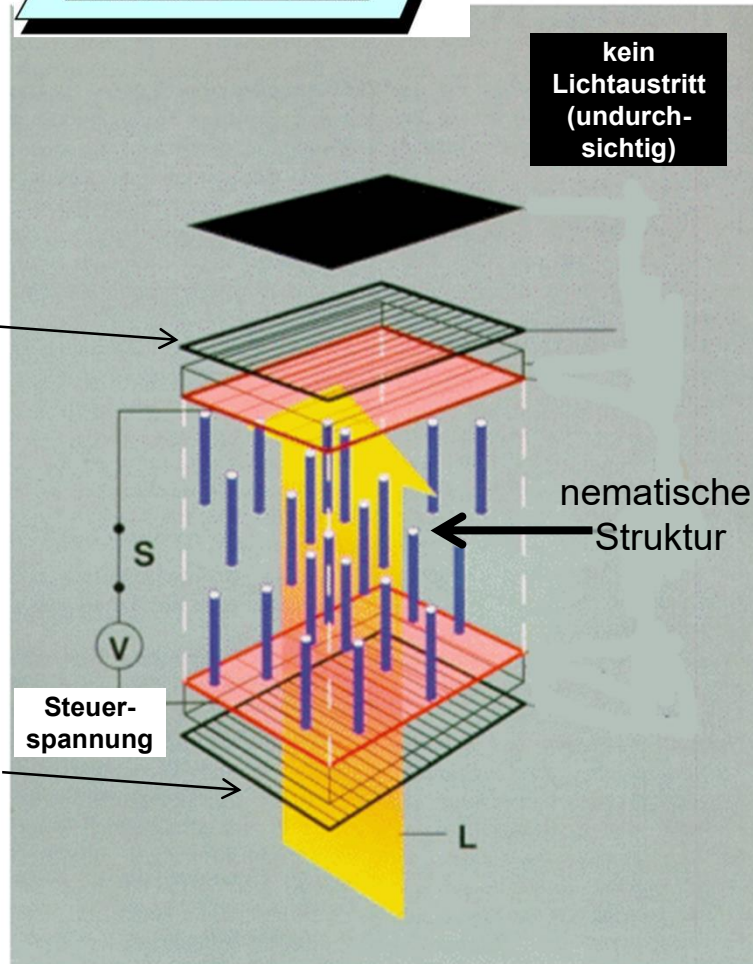
Orientierungs-  
fläche

1. Polarisator

unpolarisiertes  
Licht



kein  
Lichtaustritt  
(undurch-  
sichtig)



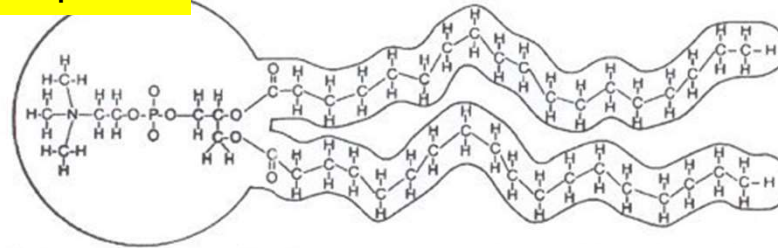
Steuer-  
spannung



## d) Lyotrope Flüssigkristalle:

Beispiel

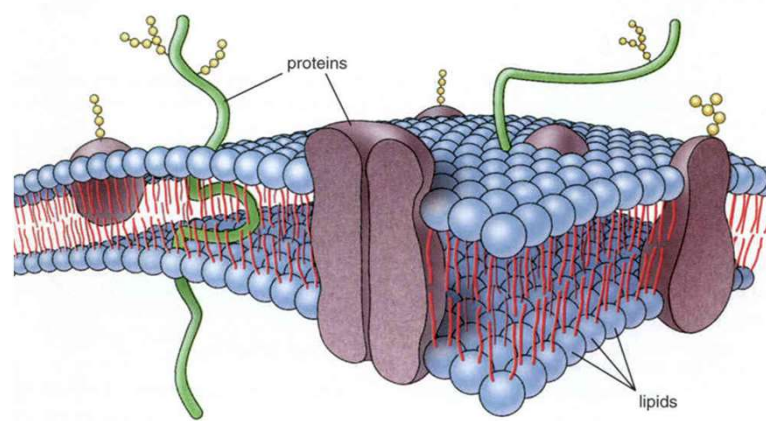
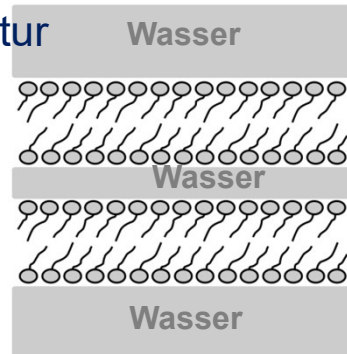
Phospholipidmolekül



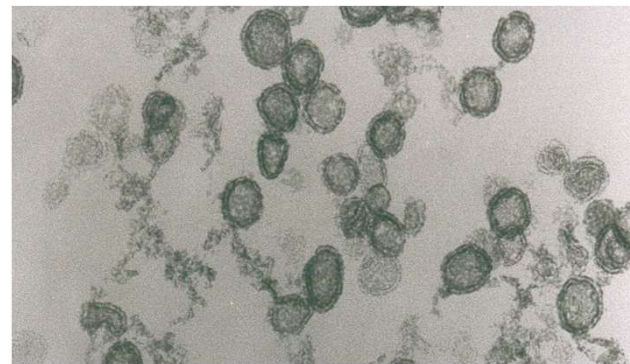
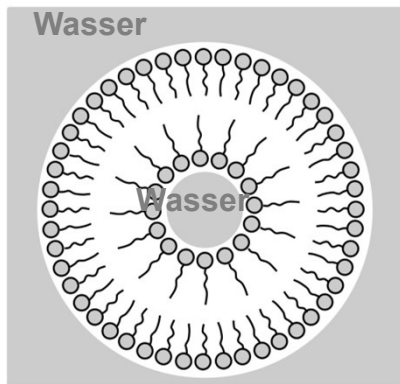
Hydrophiler Teil

Hydrophober Teil

Lamellare Struktur



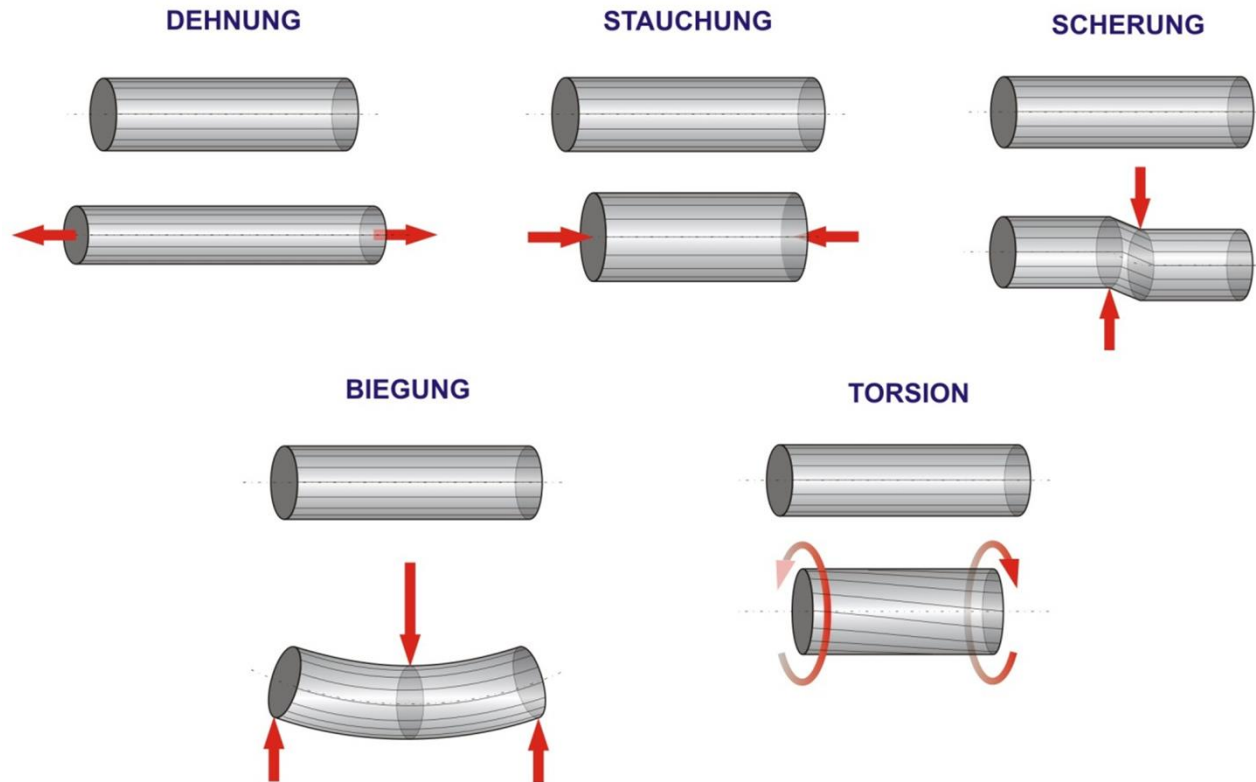
Liposom



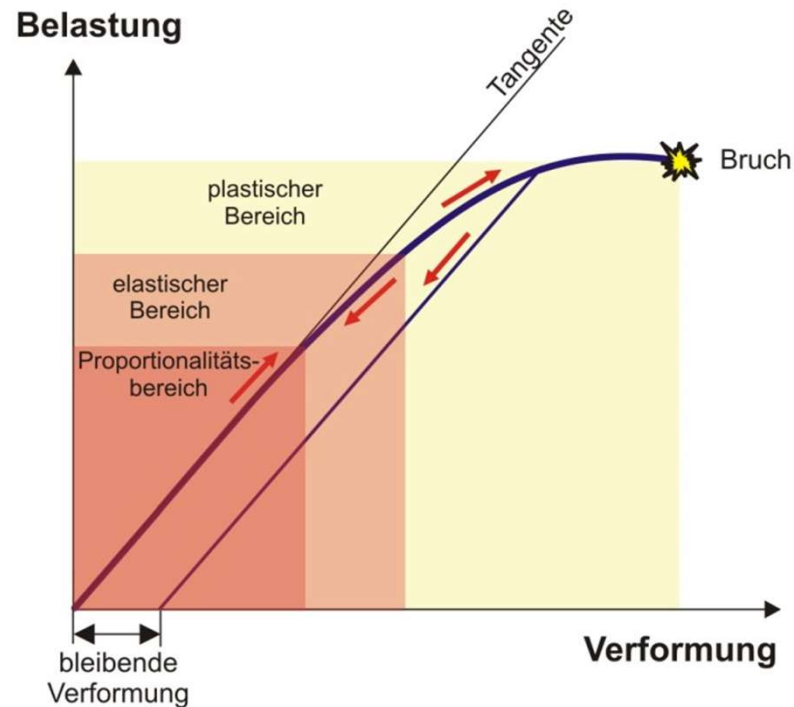
# III. Mechanische Eigenschaften der Materialien

## 1. Mechanischen Eigenschaften von festen Stoffen

### a) Deformationstypen und das Belastungsdiagramm:



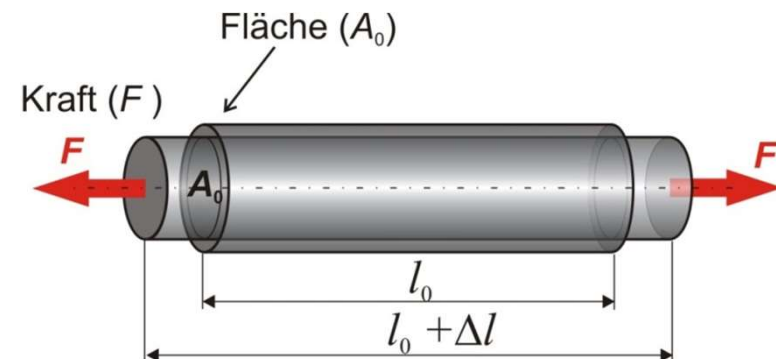
## Belastungsdiagramm/Belastung-Verformungs-Diagramm/Spannung-Dehnungs-Diagramm:



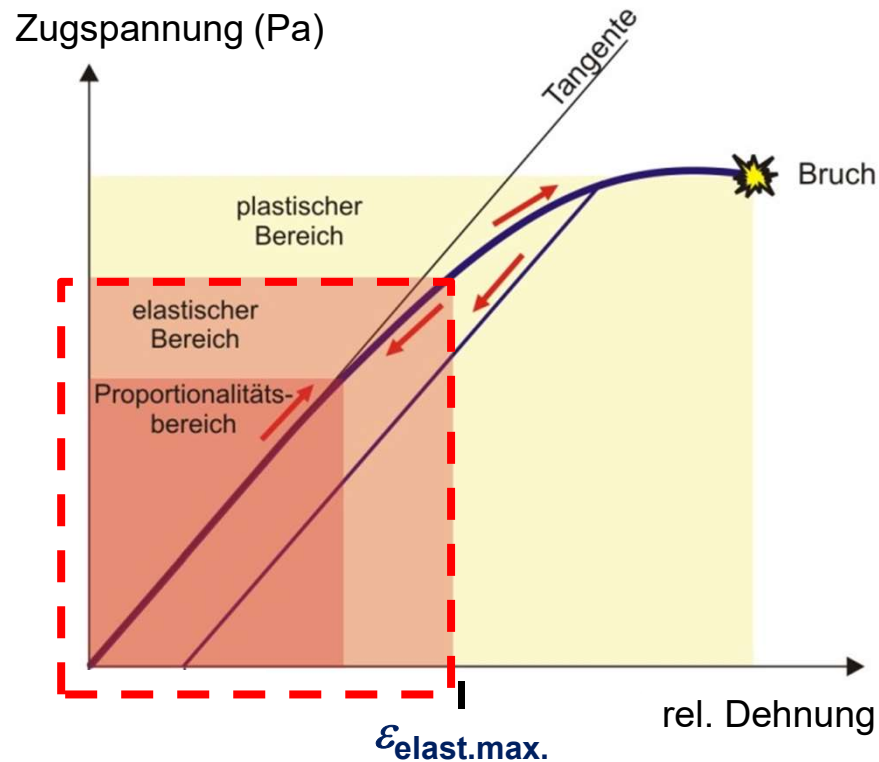
Als Beispiel wird die **Dehnung (Zug)** im Weiteren diskutiert.

Bei der Dehnung (Zug) wird die Belastung mit Hilfe der Zugspannung ( $\sigma$ ) und die Verformung mit Hilfe der Dehnung ( $\varepsilon$ ) quantitativ charakterisiert:

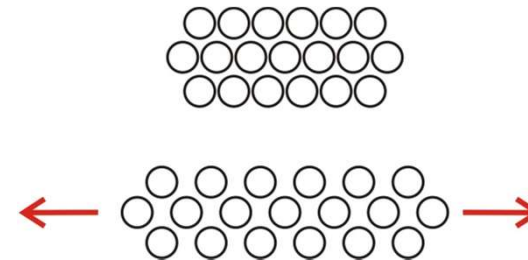
- **Zugspannung ( $\sigma$ ):**  $\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \left( \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \right)$
- **Dehnung ( $\varepsilon$ ):**  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} (\cdot 100\%)$



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



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



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

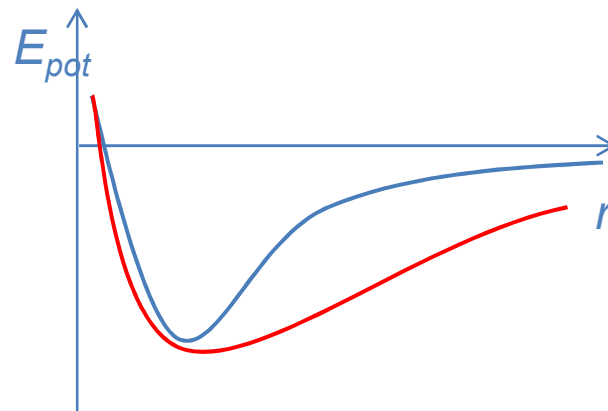
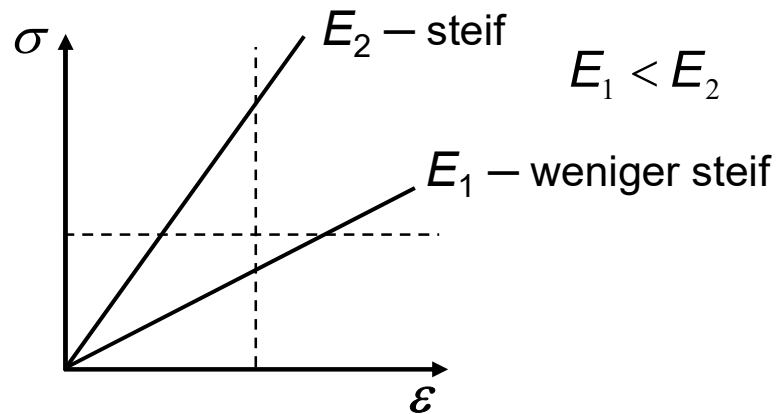
Die Elastizität eines Körpers kann mit der **elastischen Rückstellung** charakterisiert werden. Sie ist die maximal mögliche reversible Dehnung:  $\epsilon_{\text{elast.max.}}$  (%)

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

In dem **Proportionalitätsbereich** gilt: Zugspannung  $\sim$  Dehnung

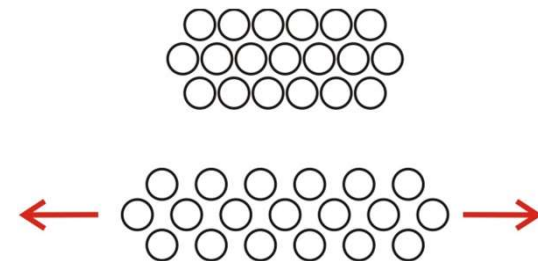
- **Hookesches Gesetz:**  $\sigma = E \varepsilon$

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



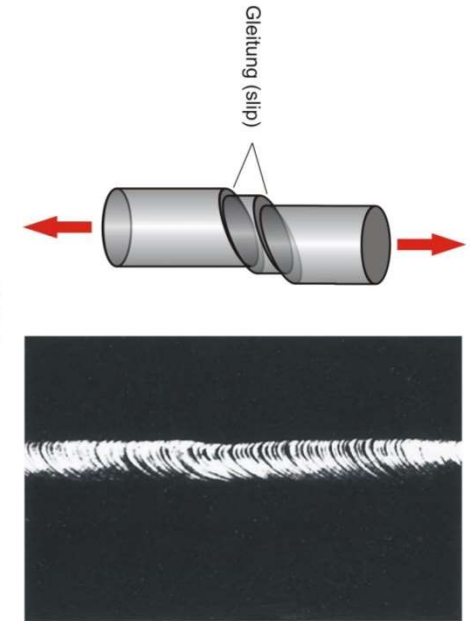
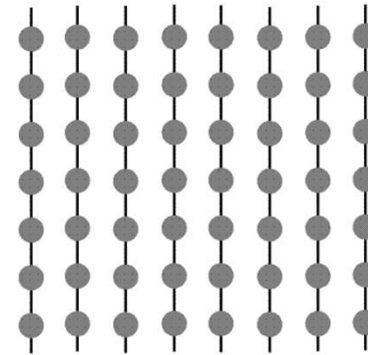
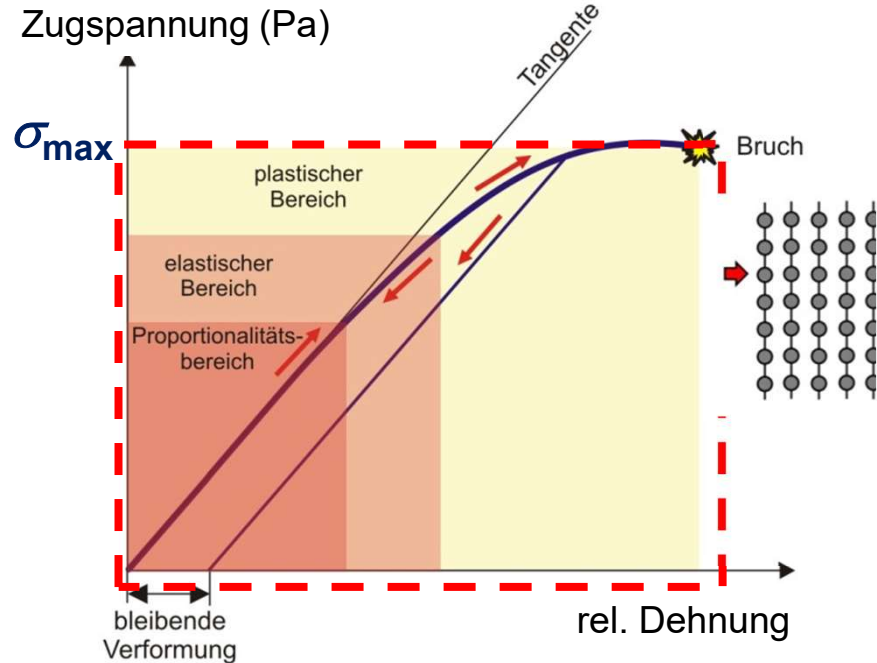
Stoff	$E$ (GPa)
Knochen	10-15
Kollagen	0,3-2,5
Bandscheibe	0,005
Elastin	0,0005
Aluminiumoxid	350-410
Stahl	220
Titan	110
PMMA (Polymethylmethacrylat)	2,4-3,8
Silikongummi	$\approx 0,0003$

Wovon hängt die Steifigkeit der Materialien ab?





### c) Plastische Verformung – Festigkeit und Zähigkeit:

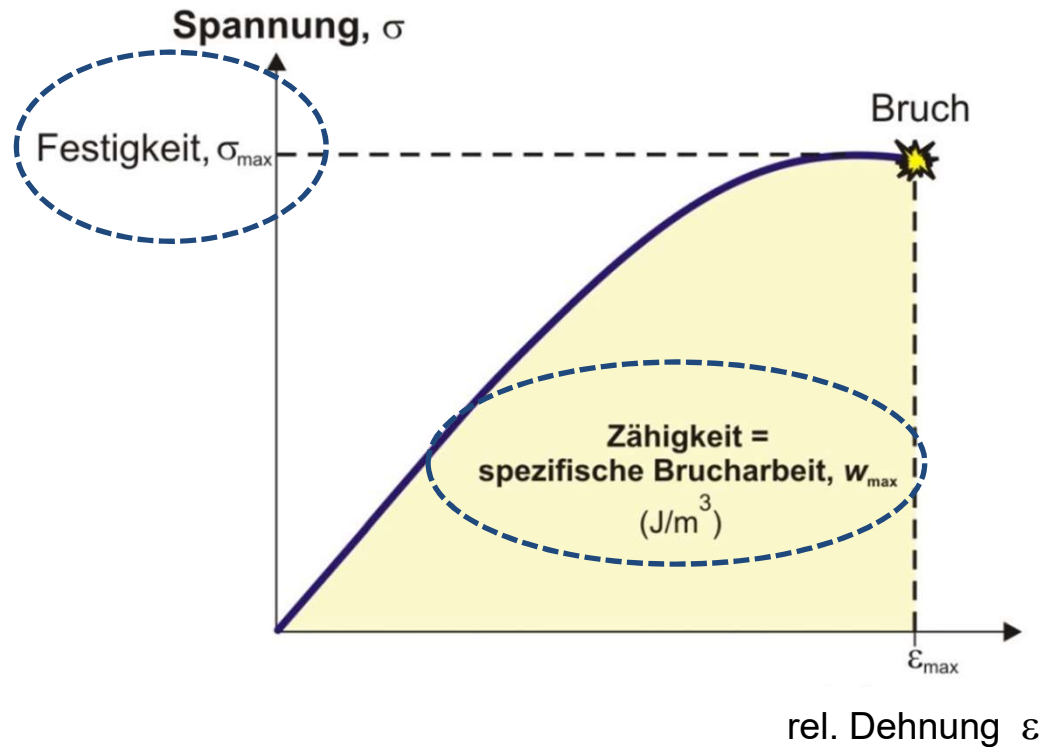


- **Festigkeit ( $\sigma_{\max}$ ) (Pa):** die maximale Spannung, bei welcher der Bruch auftritt



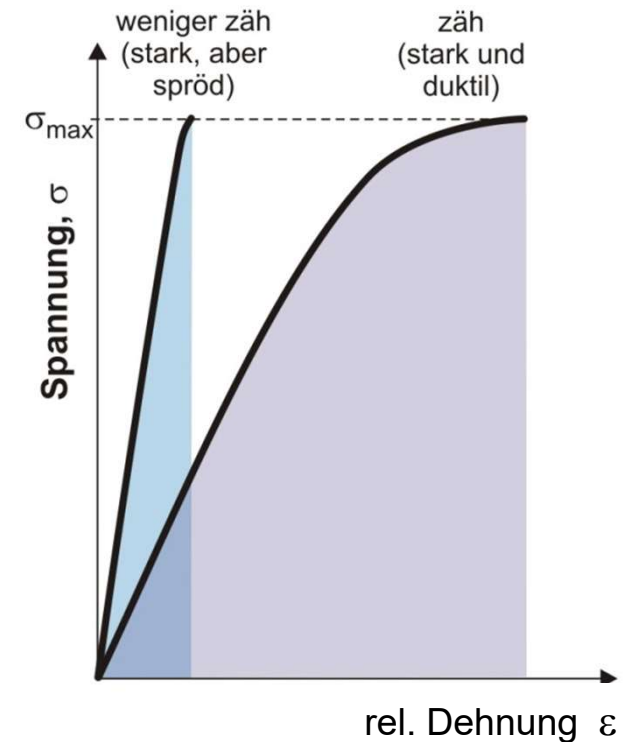
Wovon hängt die Festigkeit der Materialien ab?

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

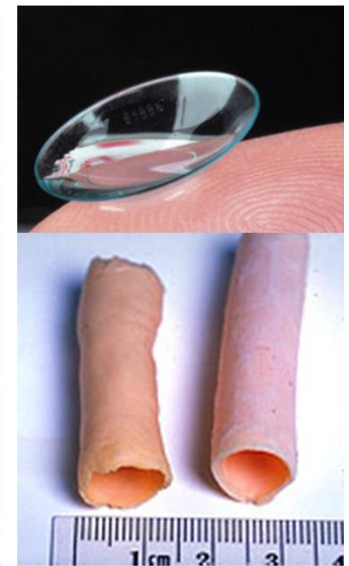
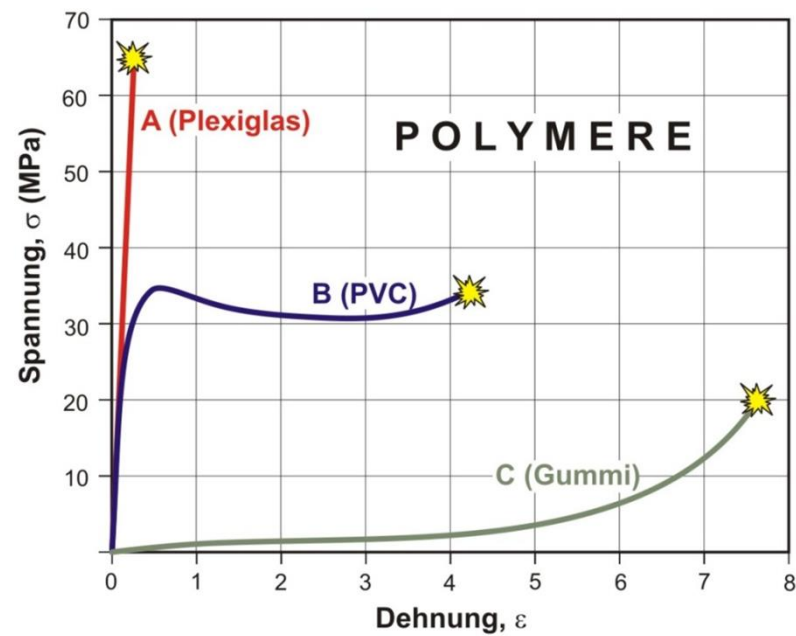
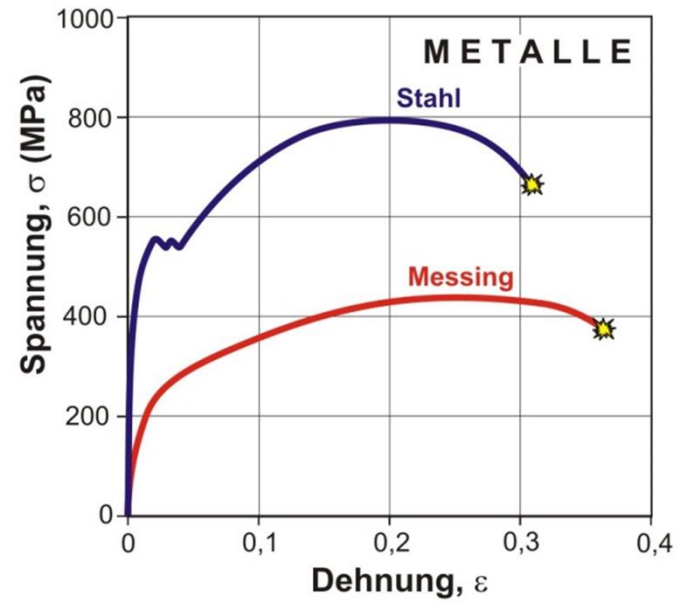
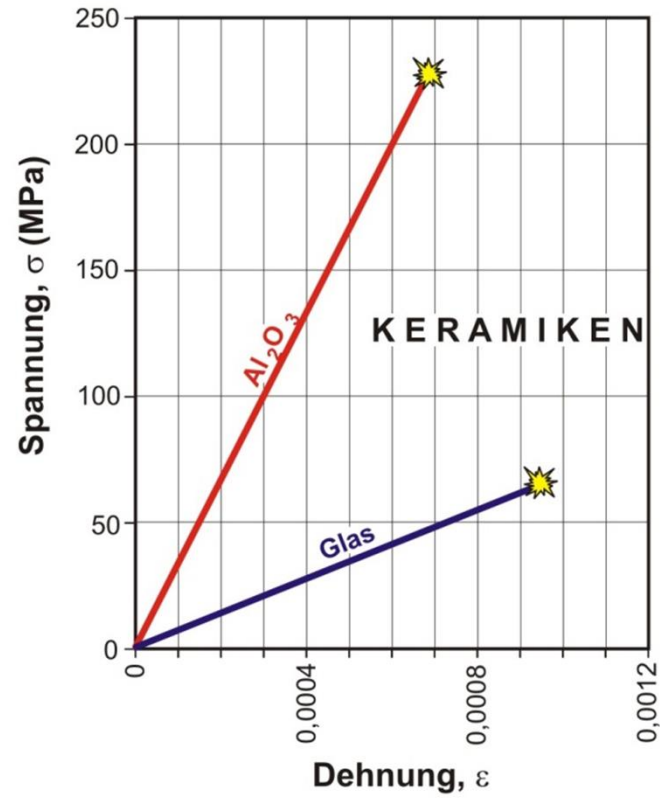


- **Zähigkeit ( $w_{\max}$ ) ( $\text{J/m}^3$ ):** die zur Verformung zugeführte Energie (Arbeit) bis zum Bruch (pro  $\text{m}^3$ )
  - Sie kann durch das Flächenstück unter der Kurve bis zum Bruch veranschaulicht werden.
  - Die Zähigkeit hängt von der Festigkeit aber auch von der maximalen Dehnbarkeit des Stoffes ab.

Gleiche Festigkeit aber unterschiedliche Zähigkeit:



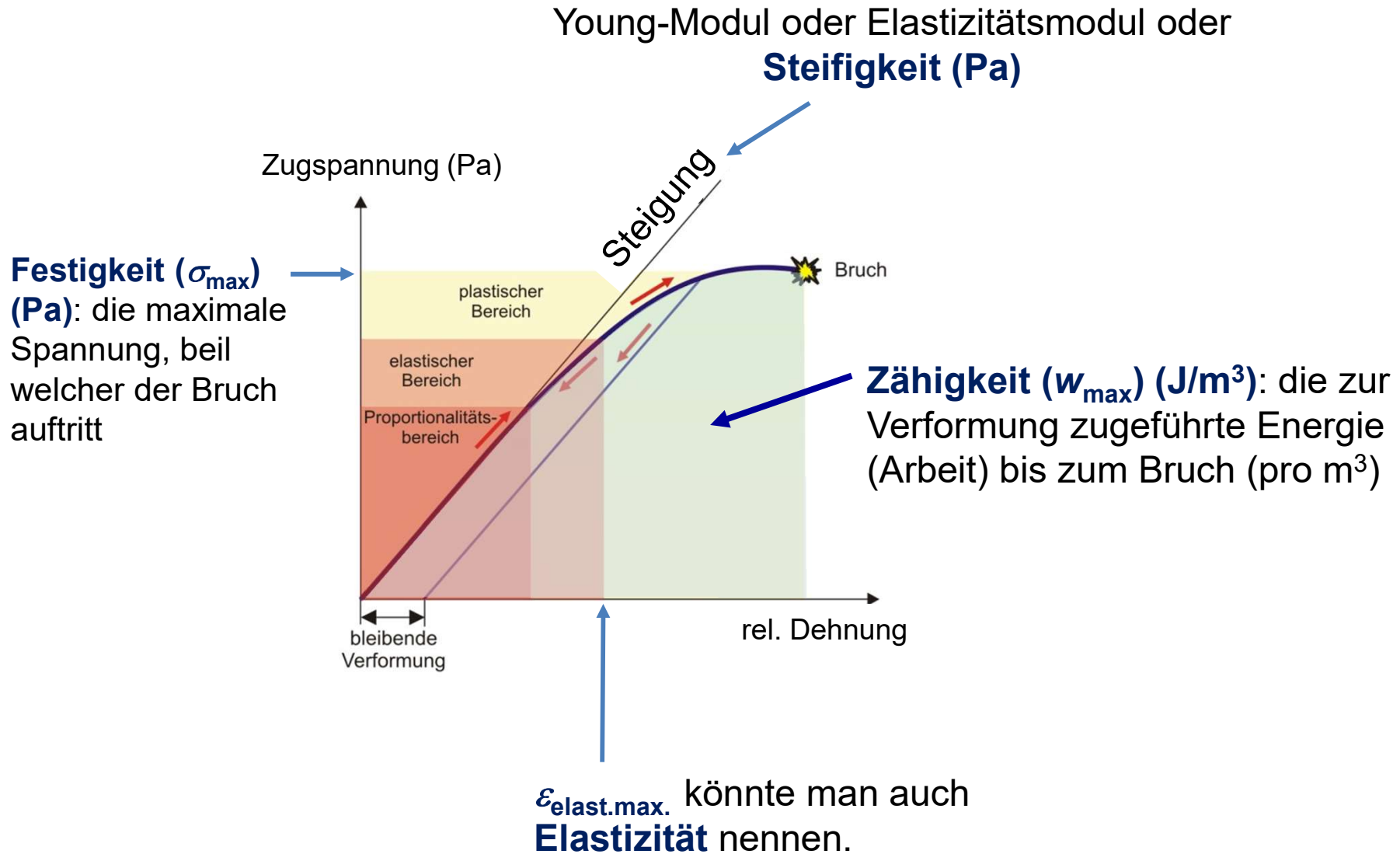
Beispiele:



Ein Beispiel für die Verwendung unterschiedlichen Materialtypen  
(in Hüftgelenkprothese):



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





Hausaufgaben: ■ Aufgabensammlung

1. 43, 44, 47, 49, 50a, 51

1.56, 59, 61-63, 65-72

