

Feinstruktur

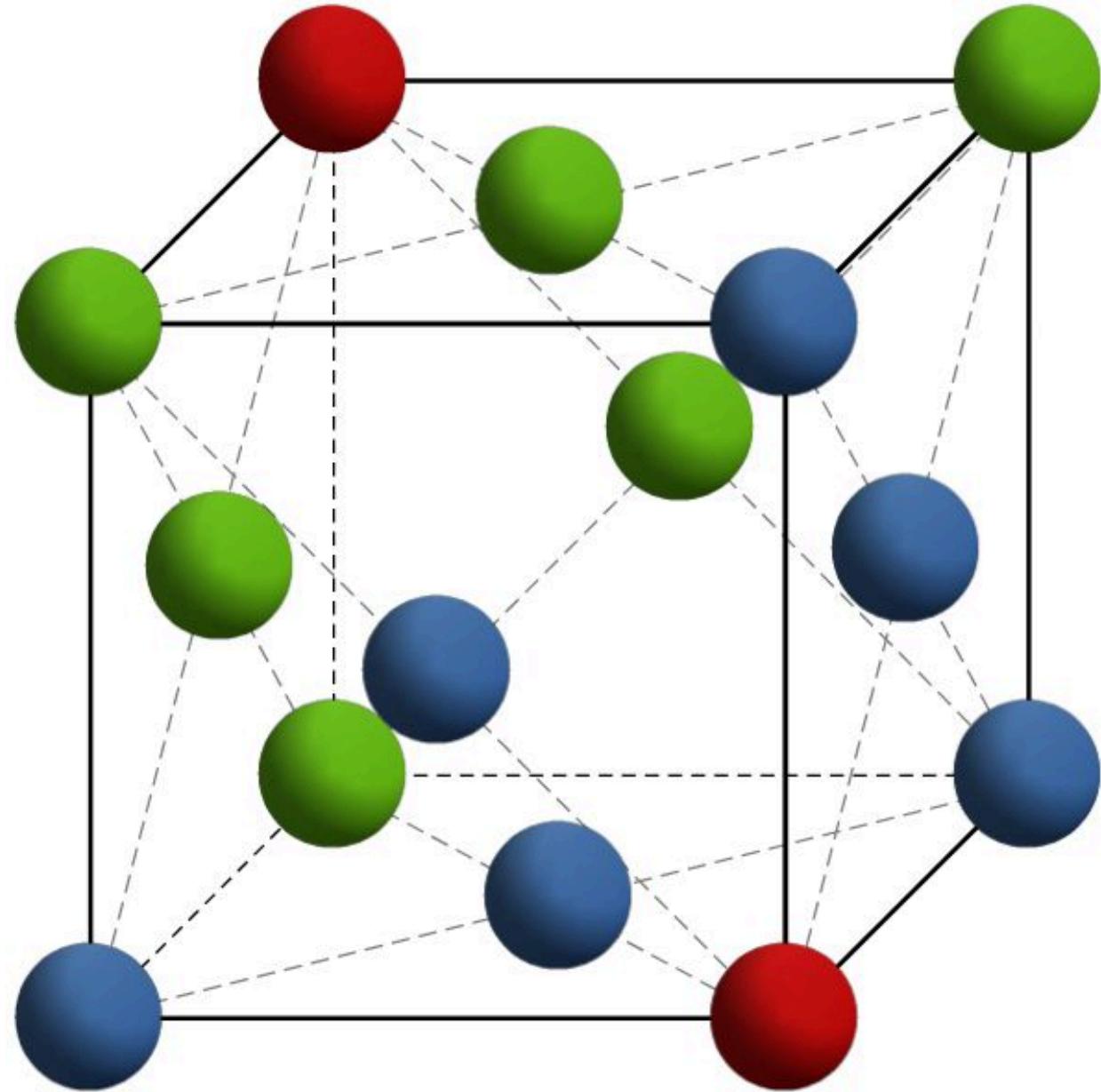
Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg ^{id}

Kontakt: christian.willberg@h2.de

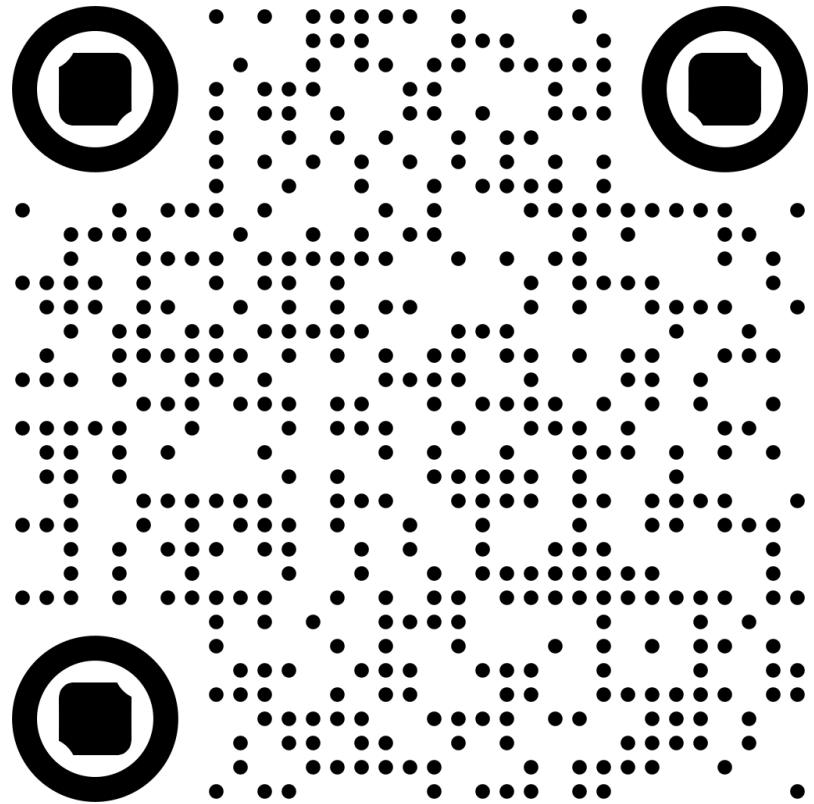
Teile des Skripts sind von

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Häberle

übernommen



Inhalte

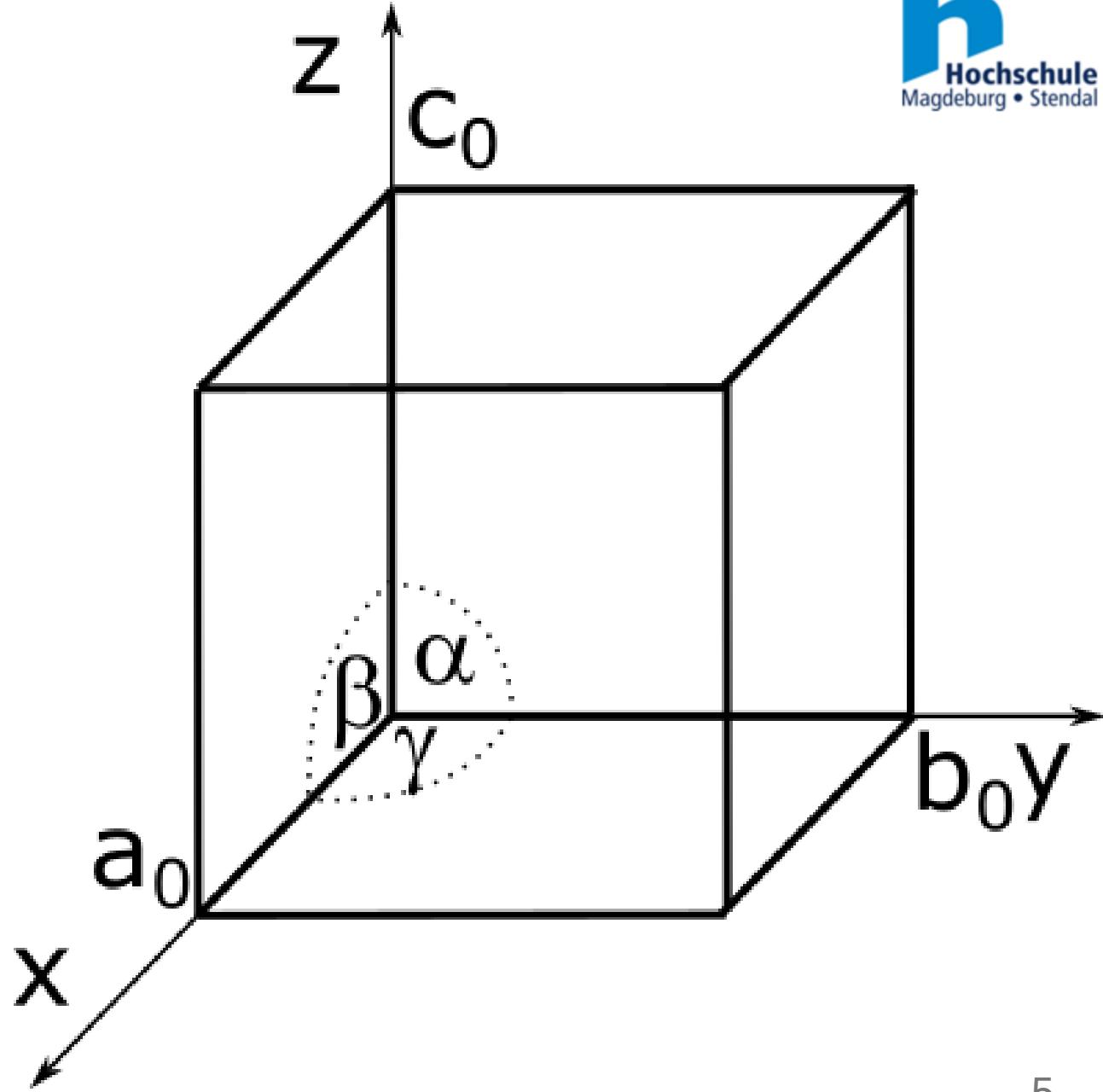


Feinstruktur

- Kristallstrukturen
- Molekülstrukturen
- Glasig-amorphe Strukturen
- Realstruktur

Raumgitter

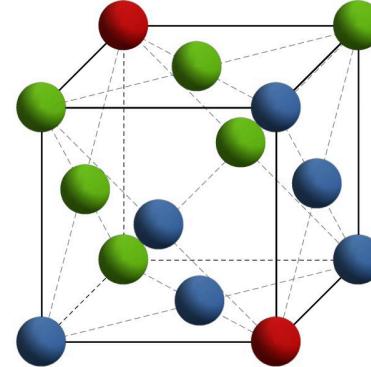
- entsteht durch die dreidimensional-periodische Verschiebung seiner Bausteine
- charakterisiert durch drei Raumachsen x, y und z liegenden Winkel α , β , γ die Abstände auf den Achsen das jeweilige Raumgitter
- a_0 , b_0 und c_0 (Gitterkonstanten)
-> Einheitszelle



Kristallsystem	Gitterkonstanten	Winkel	Beispiele
triklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Silikat-Minerale
monoklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$	Mo_2S_3 ; $\beta\text{-Pu}$
(ortho)rhombisch	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	U, S, P, Ga, $\gamma\text{-Sn}$
rhomboedrisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	As, Hg, Sb
hexagonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$	$\alpha\text{-Ti}$, Mg, Zn
tetragonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	B, CuTi_3 , Sn ($T > 13,5^\circ$)

Häufigste Gitterformen bei Metallen

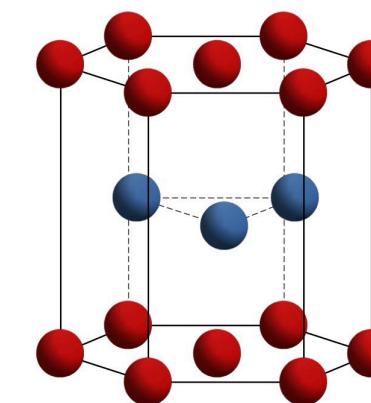
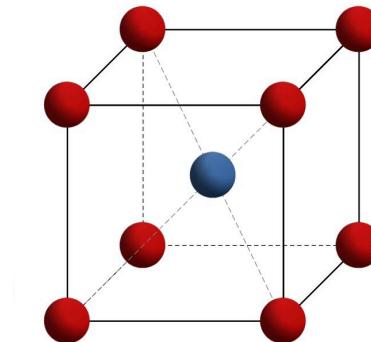
Kristallsystem	Gitterkonstanten	Winkel	Beispiele
kubisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Cu, Al, Ni, Au, Ag; γ -Eisen (kfz); α -Eisen, V, Cr, W (krz); Mn, Po (kp)



Kubisch flächenzentriert (kfz)

Kubisch raumzentriert (krz)

Hexagonal dichteste Packung (hpd)



Einflüsse

- Korrosion: Angriff aggressiver Medien erfolgt an bevorzugten Ebenen
- Verformung: Plastische Verformung erfolgt entlang bevorzugter kristallografischer Ebenen und Richtungen → Gleitsysteme
- Ultraschall: Verwendung von Schwingquarzen mit speziellen kristallografischen Begrenzungsflächen
- Leitfähigkeit: Verwendung von Germanium- oder Silizium-Wafern in (1 1 1)- oder (1 0 0) - Orientierung für Halbleiterelemente
- Magnetisierung: leichteste Magnetisierung von Eisen-Silizium-Transformatorenblechen entlang der Würfelkante [1 0 0]

Polymorphie bei Metallen

- Polymorphie: ist die Ausbildung von verschiedenen Gitterstrukturen in Abhängigkeit von der Temperatur
- die verschiedenen Gitterformen sind die allotropen Modifikationen

(auch: Polymorphie des Kohlenstoffs: Graphit, Diamant,...).

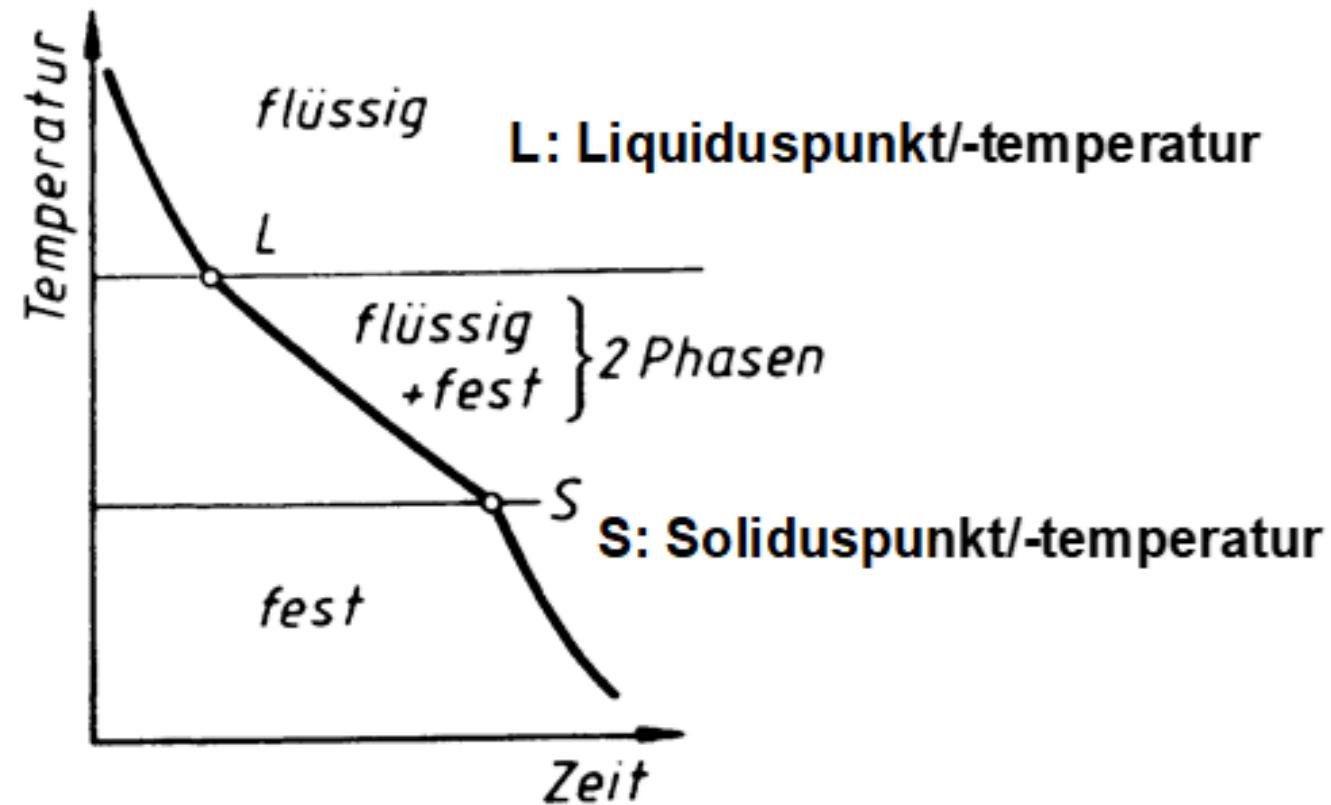
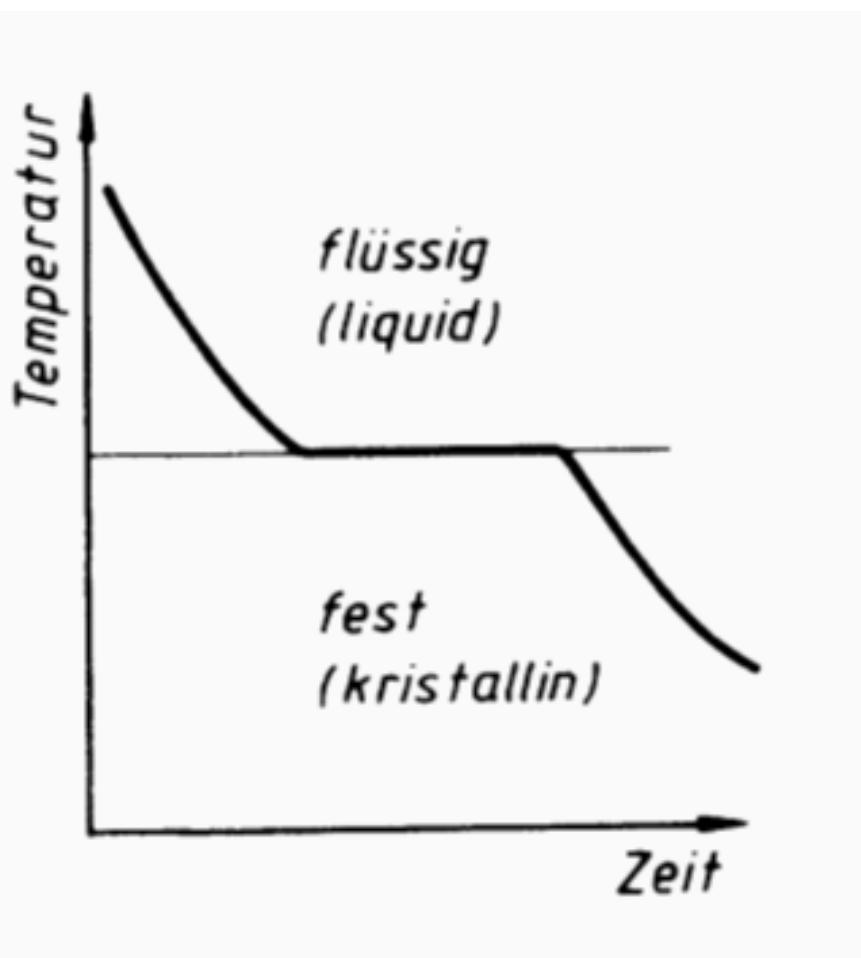
Bestimmung der Umwandlungspunkte

Dilatometrie

- Messung der Längenänderung aufgrund der Gitterumwandlung

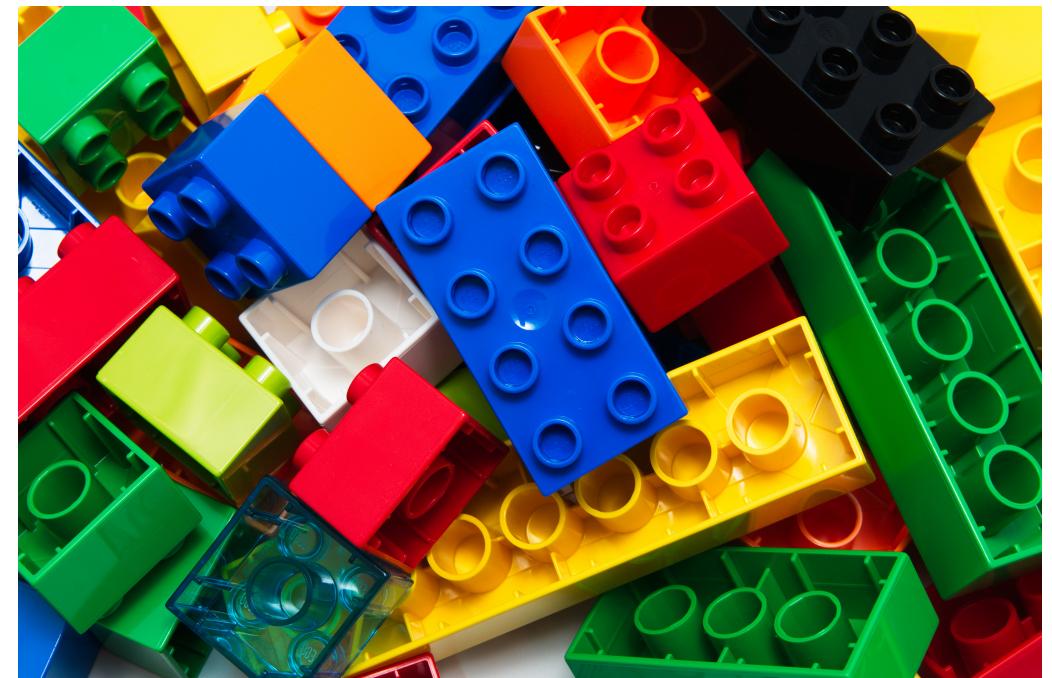
Thermische Analyse

- Aufzeichnung des Temperaturverlaufs
- Gitterwandlerungen (Phasenänderungen) brauchen Wärmeenergie oder geben sie ab
- Halte- bzw. Knickpunkte in den Erwärmungs- oder Abkühlungskurven.
- Haltepunkte: bei reinen Metallen

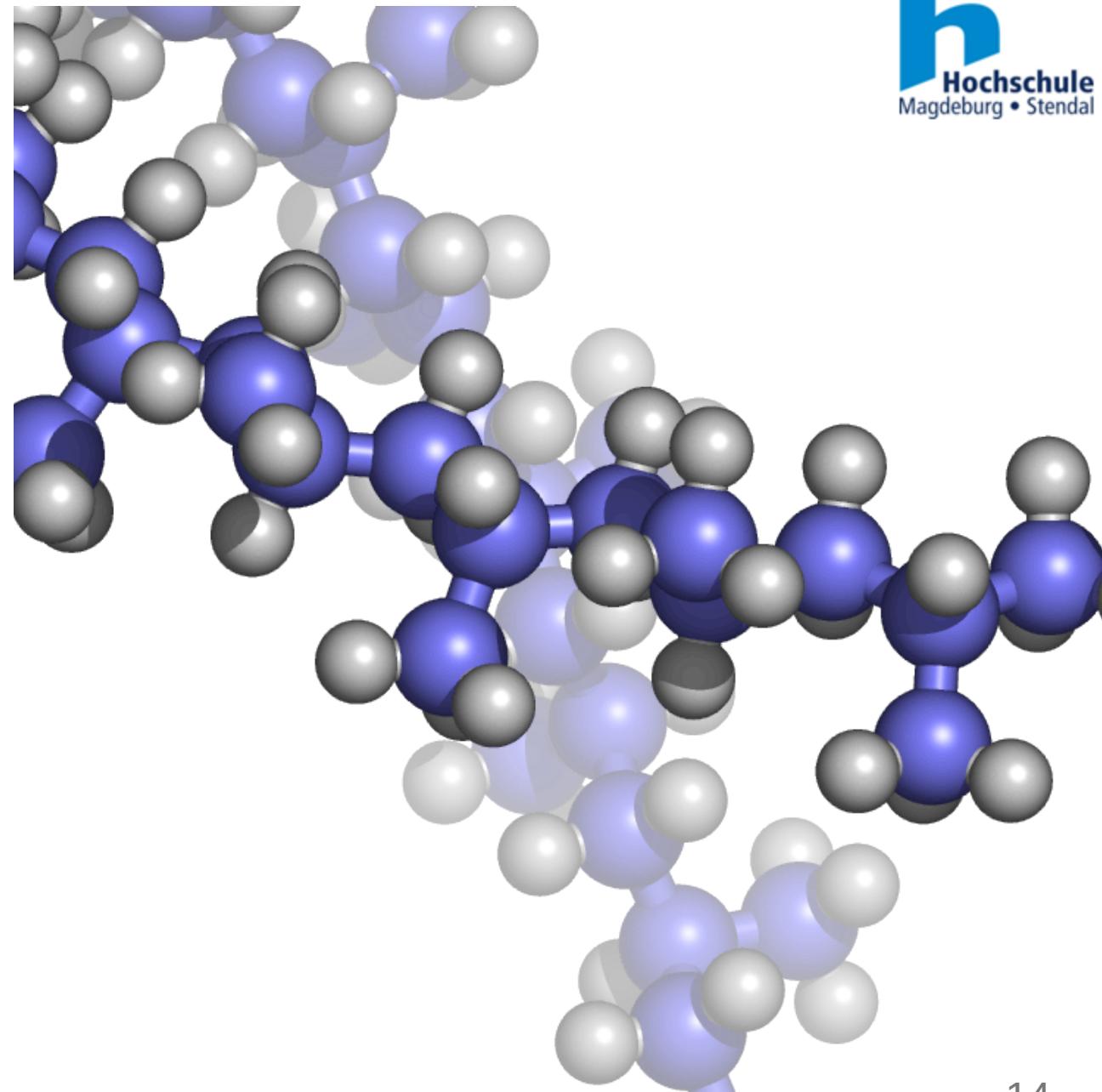


Molekülstrukturen

- typisch für nichtmetallisch-organische Werkstoffe
 - natürliche Materialien: Holz, Kautschuk, Leder, Fasern usw.
 - synthetische Kunststoffe: PMMA, Epoxid, usw.



- entsteht durch Aufbaureaktionen von monomeren Grundbausteine zu Kettenmolekülen
- innerhalb der Ketten treten Atombindungen auf
- zwischen den Ketten existieren Nebenvalenzbindungen und Molekülverhakungen

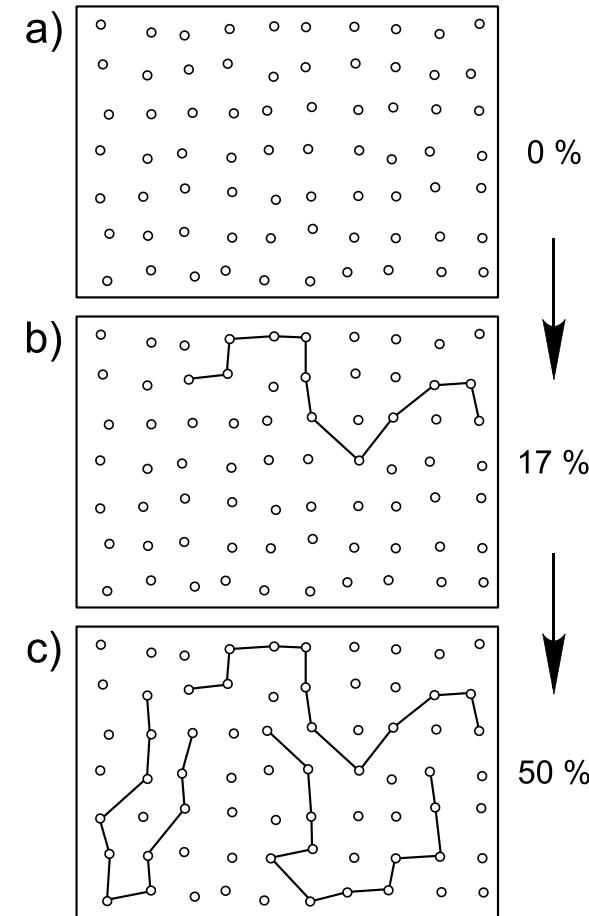


Aufbaureaktion (Polymerisation)

- Es müssen freie Bindungen in den Monomeren erzeugt werden
- die Monomere "brauchen" neue Partner, um wieder energetisches Minimum zu erreichen

Kettenpolymerisationen

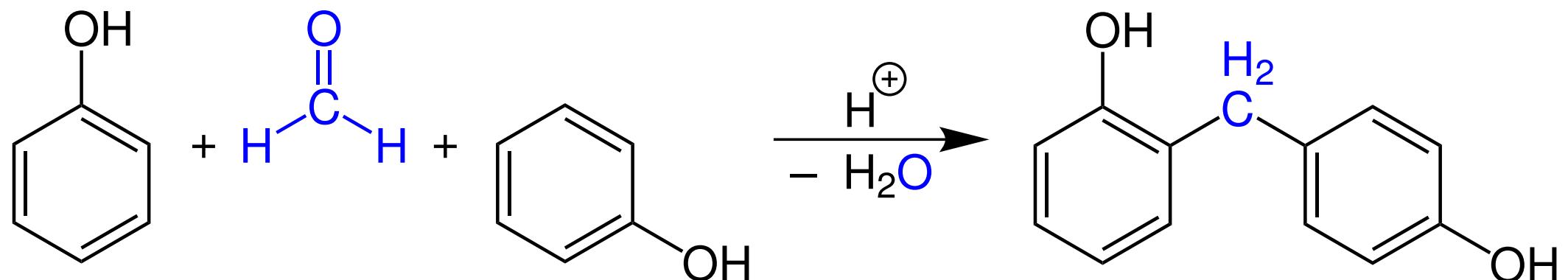
- Aufspalten von C=C-Doppelbindungen im Monomer (katalytischer Prozess durch Druck, Temperatur, Katalysator)
- Verbindung der aufgespaltenen Monomere zu Makromolekülen



Stufenwachstumsreaktionen

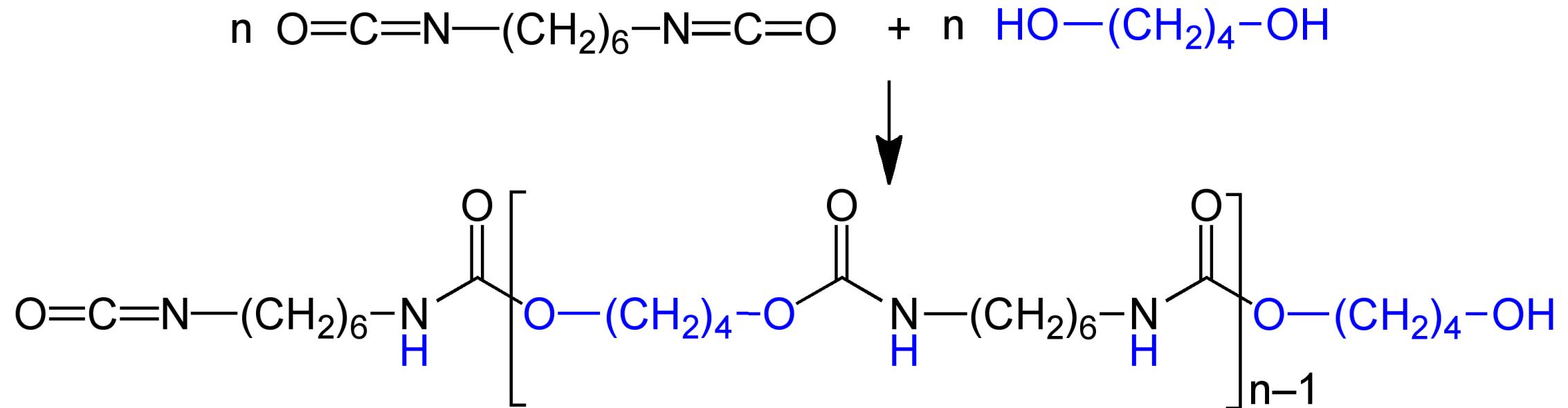
Polykondensation

- Abspaltung niedermolekulare (z.B. H₂O) Reaktionsprodukte durch eine chemische Reaktion schafft frei Bindungen
- schrittweise Reaktion oder Unterbrechung führen zur Bildung von linearen, verzweigten oder vernetzten Polymeren (Thermoplaste, Elastomere oder Duromere)



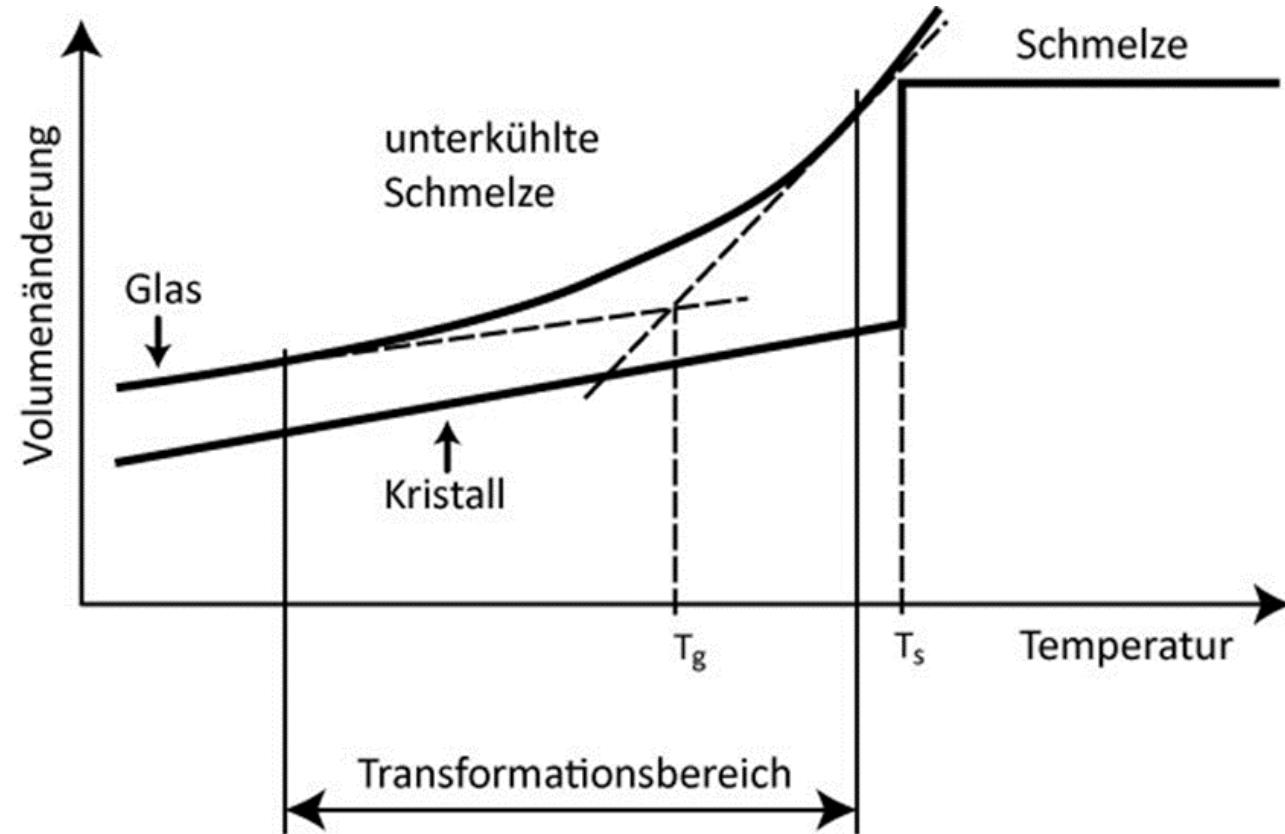
Polyaddition

- freie Bindungen entstehen durch Umlagerungen von Doppelbindungen zweier unterschiedlicher Monomermoleküle
- diese bilden dann Molekülketten



Glasig-amorphe Strukturen

- Gläser sind ein nichtmetallisch-anorganisches, vorzugsweise silikatisches Schmelzprodukte
- nichtkristallinen, also amorphen Zustand
- bei Glas, wird die Schmelze zunächst unterkühlt und dann unterhalb der Transformations-temperatur T_g „eingefroren“.



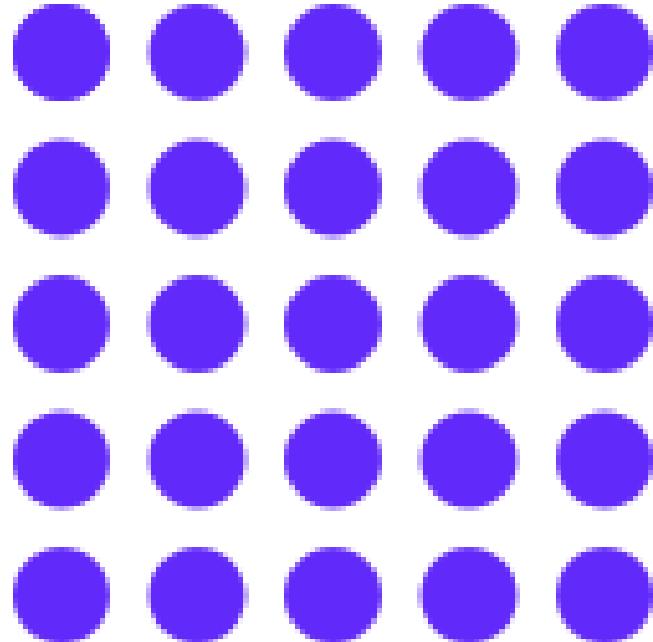
Realstruktur von Kristallen

Gitterbaudefekte

- Nulldimensionale Fehlstellen (Punktdefekte): Leerstellen, Zwischengitteratom, Zwischengitter-Fremdatome, Substitutions-Fremdatom
- Eindimensionale Fehlstellen (Liniendefekte): Versetzungen
- Zweidimensionale Fehlstellen (Flächendefekte): Stapelfehler, Korngrenzen, Subkorn-grenzen, Phasengrenzen

Nulldimensionale Fehlstellen

- Was gibt es für mögliche Varianten?



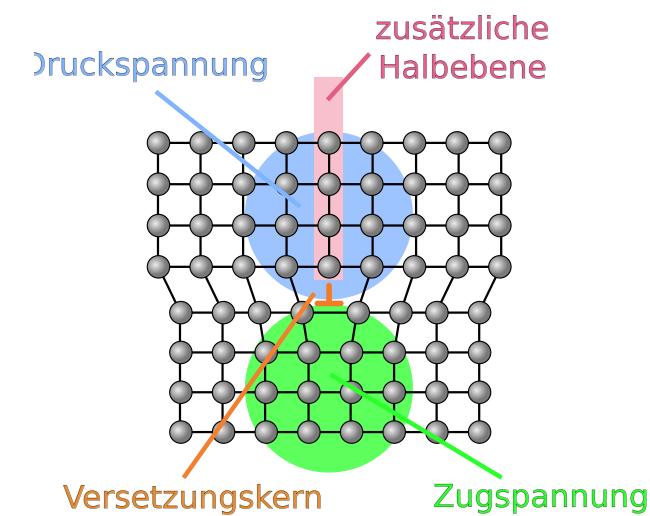
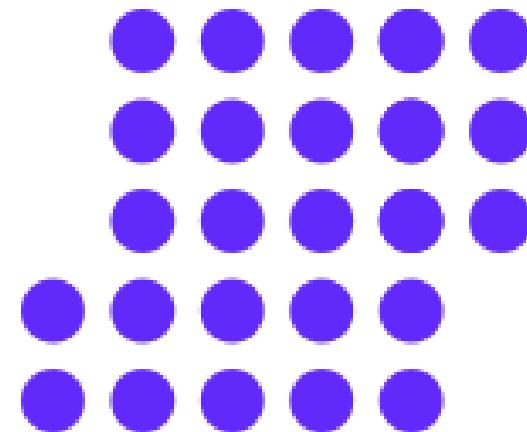
Fremdatome

- Wie lassen sich Fremdatome nutzen?

Versetzungen

Versetzungen entstehen

- beim Kristallwachstum
- aufgrund von Eigenspannungen
- durch plastische Verformungen



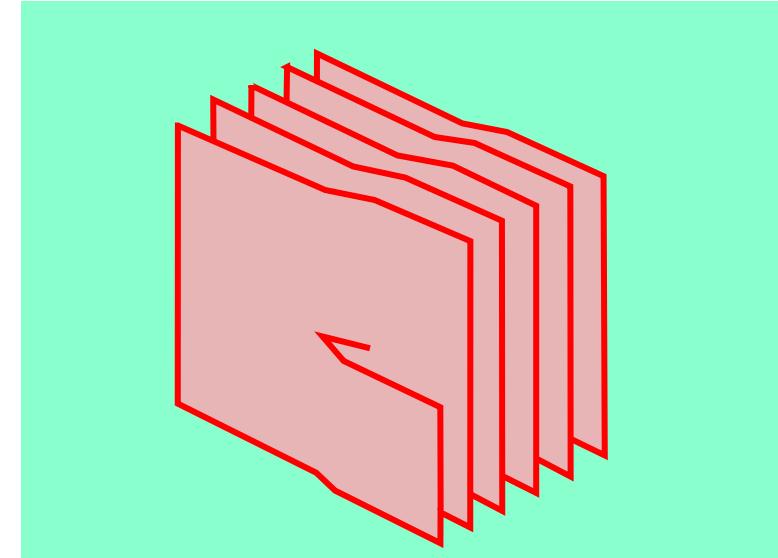
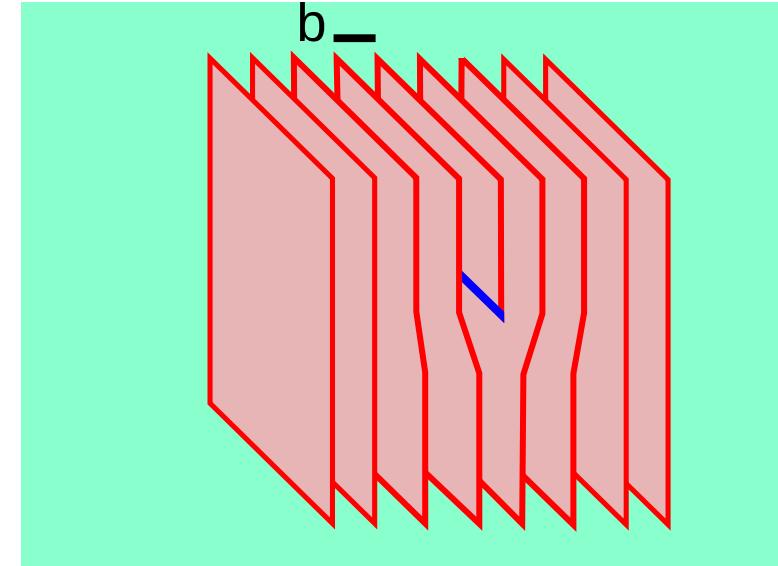
Versetzungarten

- Stufenversetzung

$$E \approx \frac{3}{4}Gb^2$$

- Schraubenversetzungen

$$E \approx \frac{1}{2}Gb^2$$

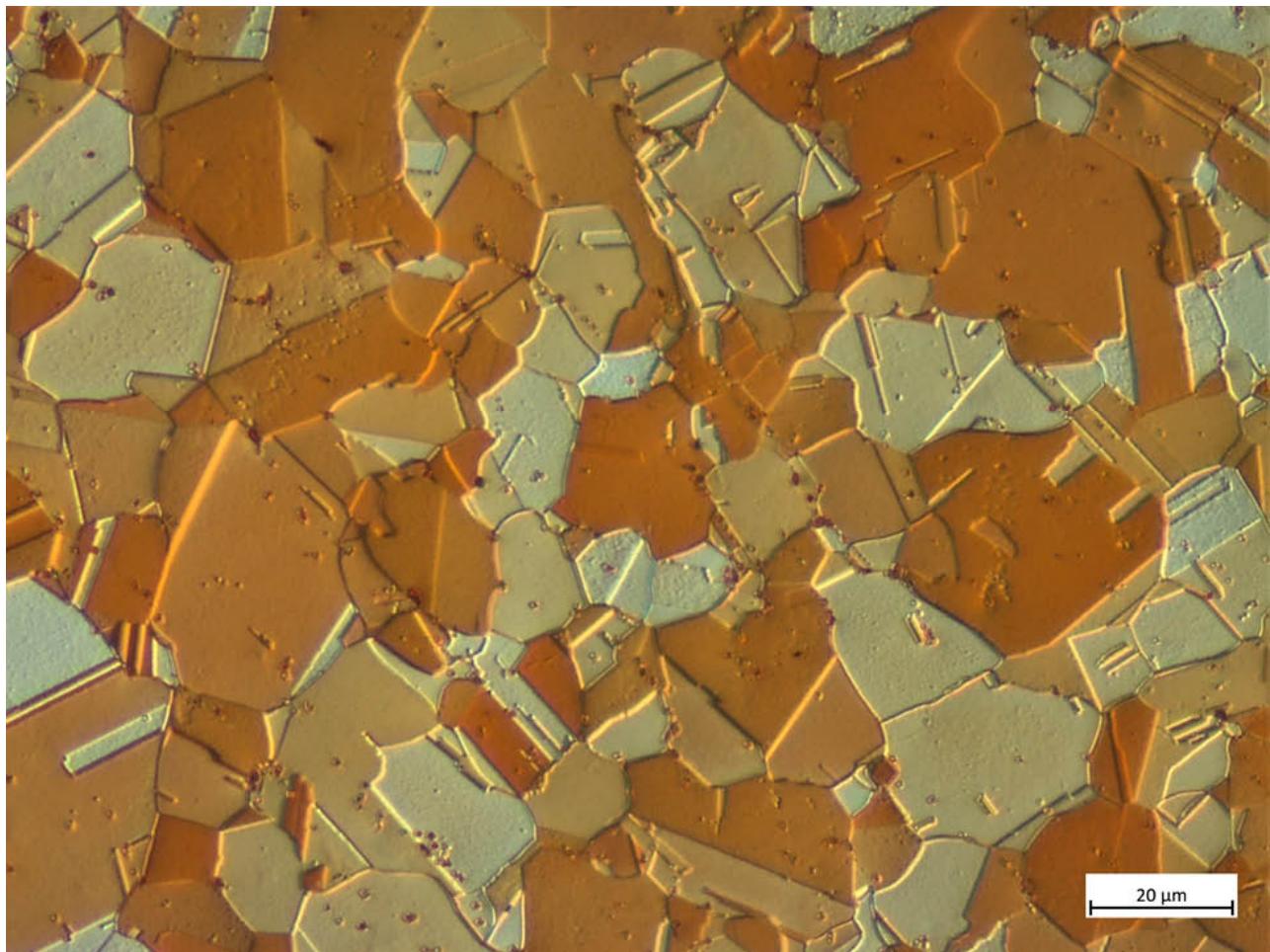


Defektübersicht

Zweidimensionale Fehlstellen - Korngrenzen

- Korngrenzen
- Phasengrenzen
- Subkorngrenzen

Skript



Plastizität

Gut oder Schlecht



Beispiele

Hohe Plastizität:

- Knete
- feuchter Ton
- Metalle und Metalllegierungen mit geeignetem Atomgitter:
 - glühender Stahl beim Schmieden
 - Kaltumformung von Blechen

Geringe Plastizität:

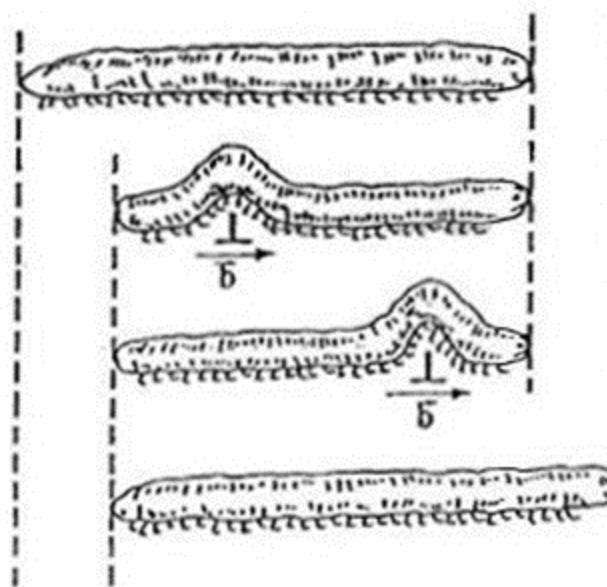
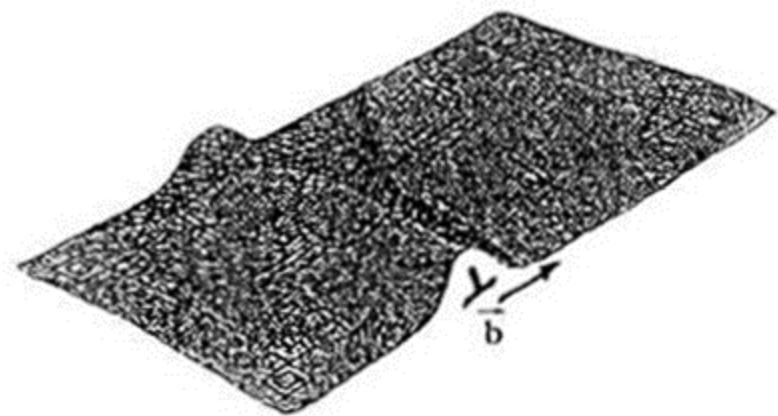
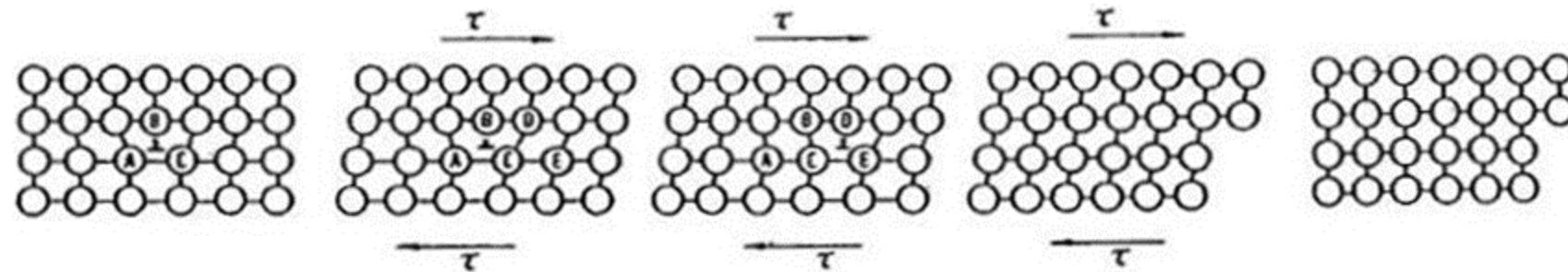
- Gummi
- Keramik
- Faserkunststoffverbunde (Epoxid-Glasfaser oder Epoxid-Kohlefaser)

Plastizität - Einkristall

Die plastische Verformung eines Kristalls vollzieht sich im Wesentlichen durch Abgleiten von Atomschichten entlang bestimmter kristallographischer Ebenen und Richtungen unter Einwirken von Schubspannungen.

- Gleitsystem besteht aus Gleitebene und Gleitrichtung
- kritische Schubspannung ($\tau_{K_r} \approx G/10$ - Abschätzung oder theoretische Schubfestigkeit)
- Realität um Faktor ~100 niedriger durch Versetzungen

Bild



Plastische Verformung des polykristallinen Werkstoffs

- Mikro- und Makroplastizität
 - Plastische Verformung beginnt bei "ungünstigen" Orientierungen
- Korngrenzen
 - Barriere für Versetzungsbewegung
 - bei hohen Temperaturen können Korngrenzen gleiten (Kriechen)
 - gezielte Fertigung kann durch Korngrenzen Zähigkeit erhöhen
- Heterogenität
 - Mehrphasigkeit
 - inhomogene Verteilung der Spannungen und Verformungen
- Anisotropie

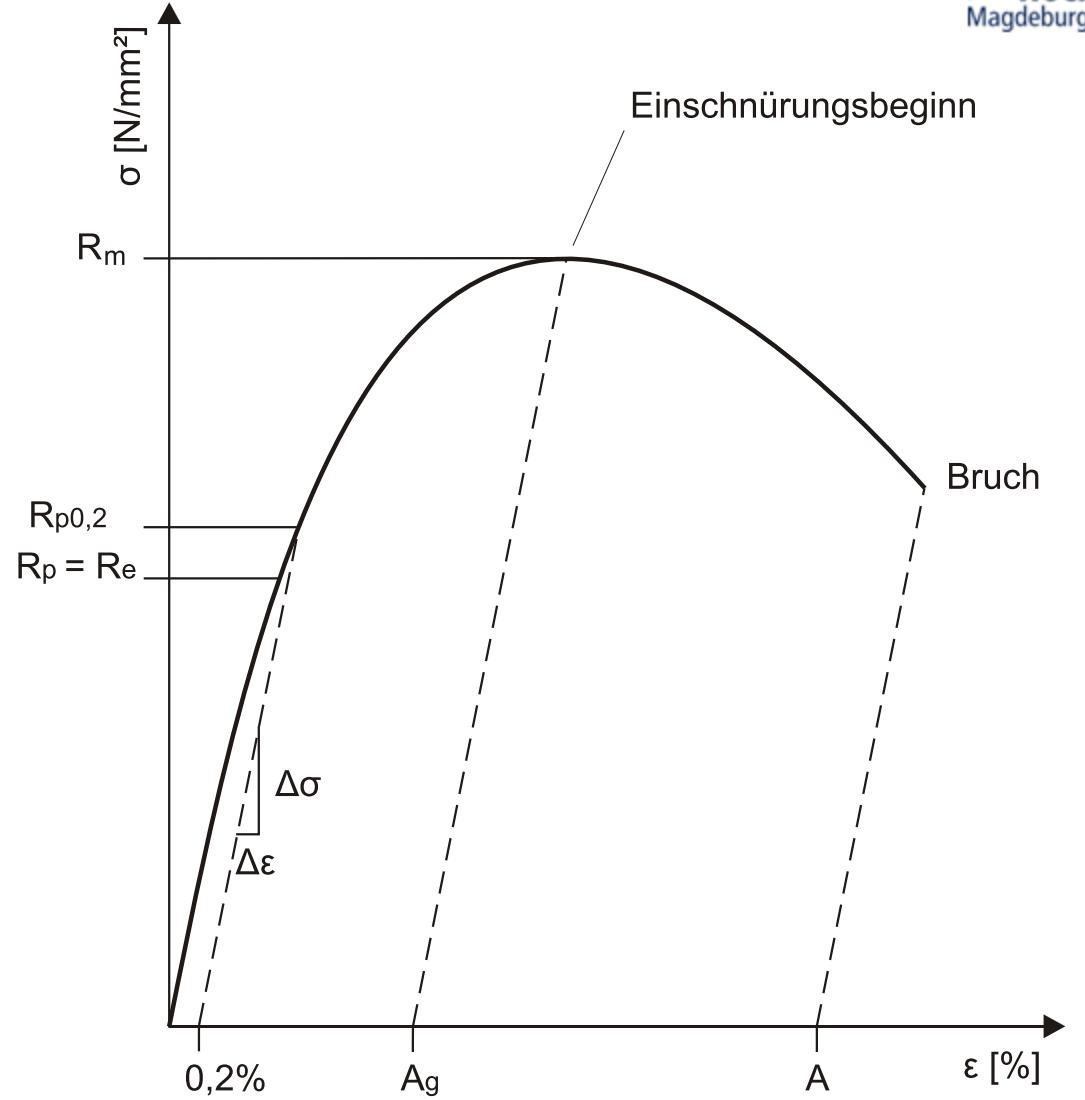
Polykristall Plastizität

Beispiel aus einer Simulation

Streckgrenze

- R_m - Zugfestigkeit
- R_e - Streckgrenze
- Dehngrenze oder
Elastizitätsgrenze $R_{p0,2}$
 - Belastung und dann
Entlastung 0.2% Dehung
verbleibt
- Dehngrenze wird als
Ersatzstreckgrenze verwendet

Datenblatt Stahl

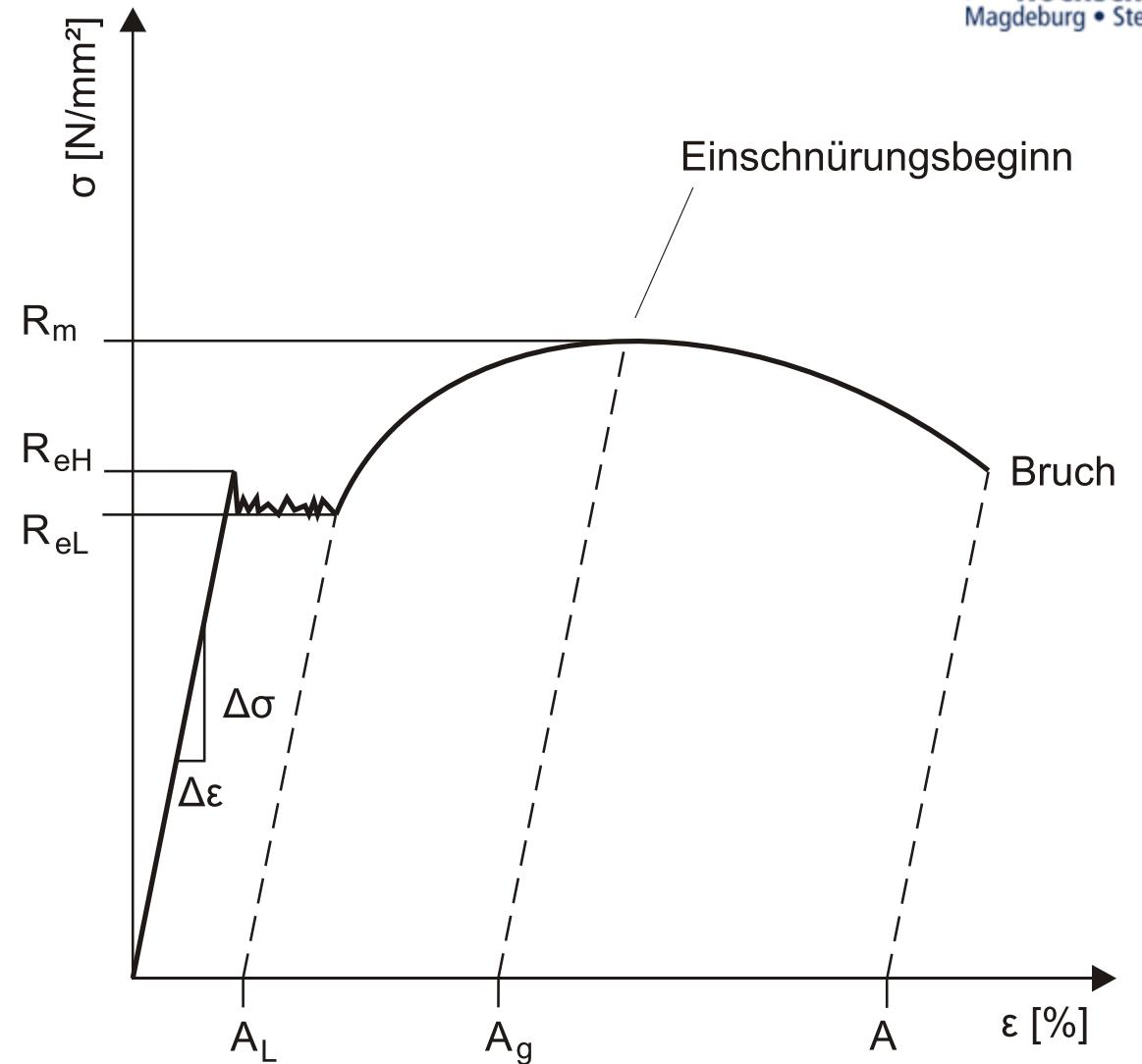


Streckgrenze

- obere Streckgrenze R_{eH}
- untere Streckgrenze R_{eL}

gezackter Bereich:
Lüdersbereich

[Beispielvideo](#)

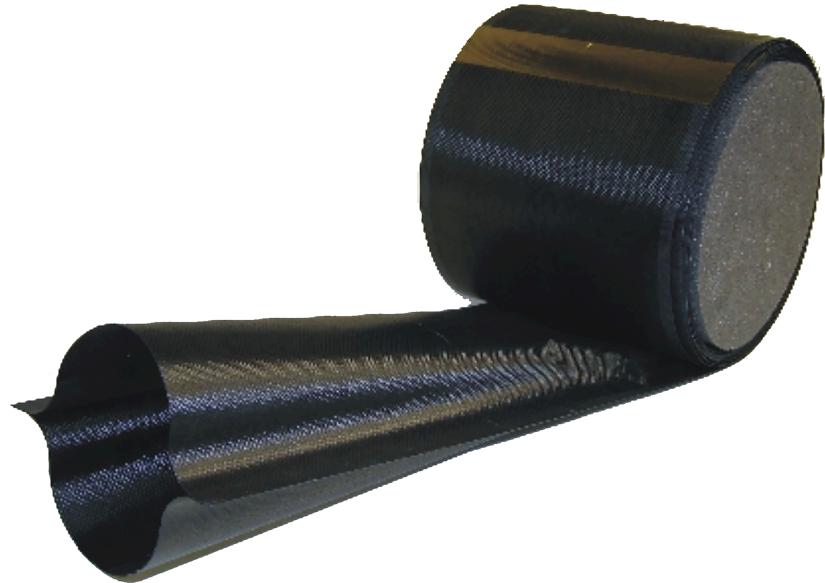


Plastizität - Umformen

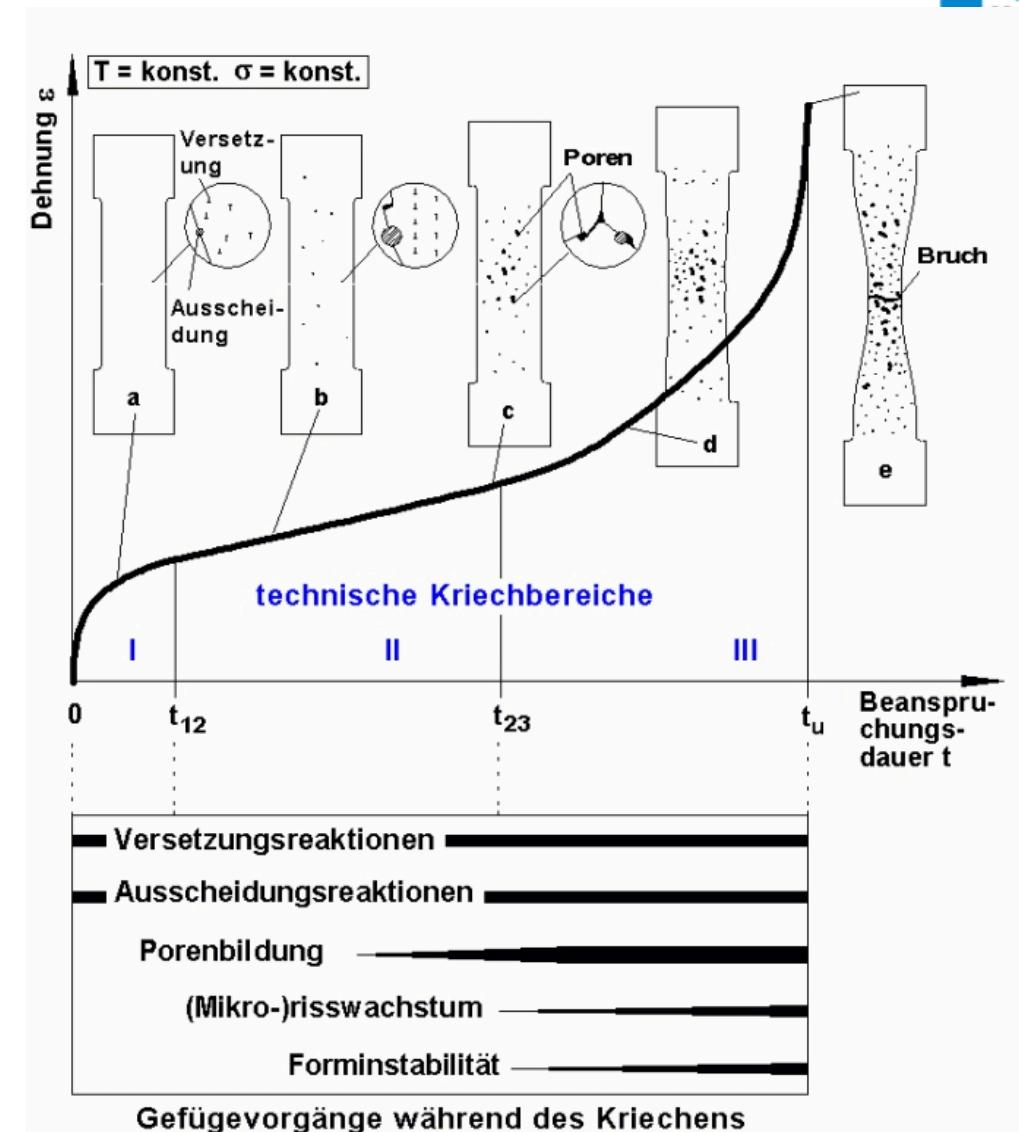
- Tiefziehen Prinzip
- Tiefziehen Real

Kriechen

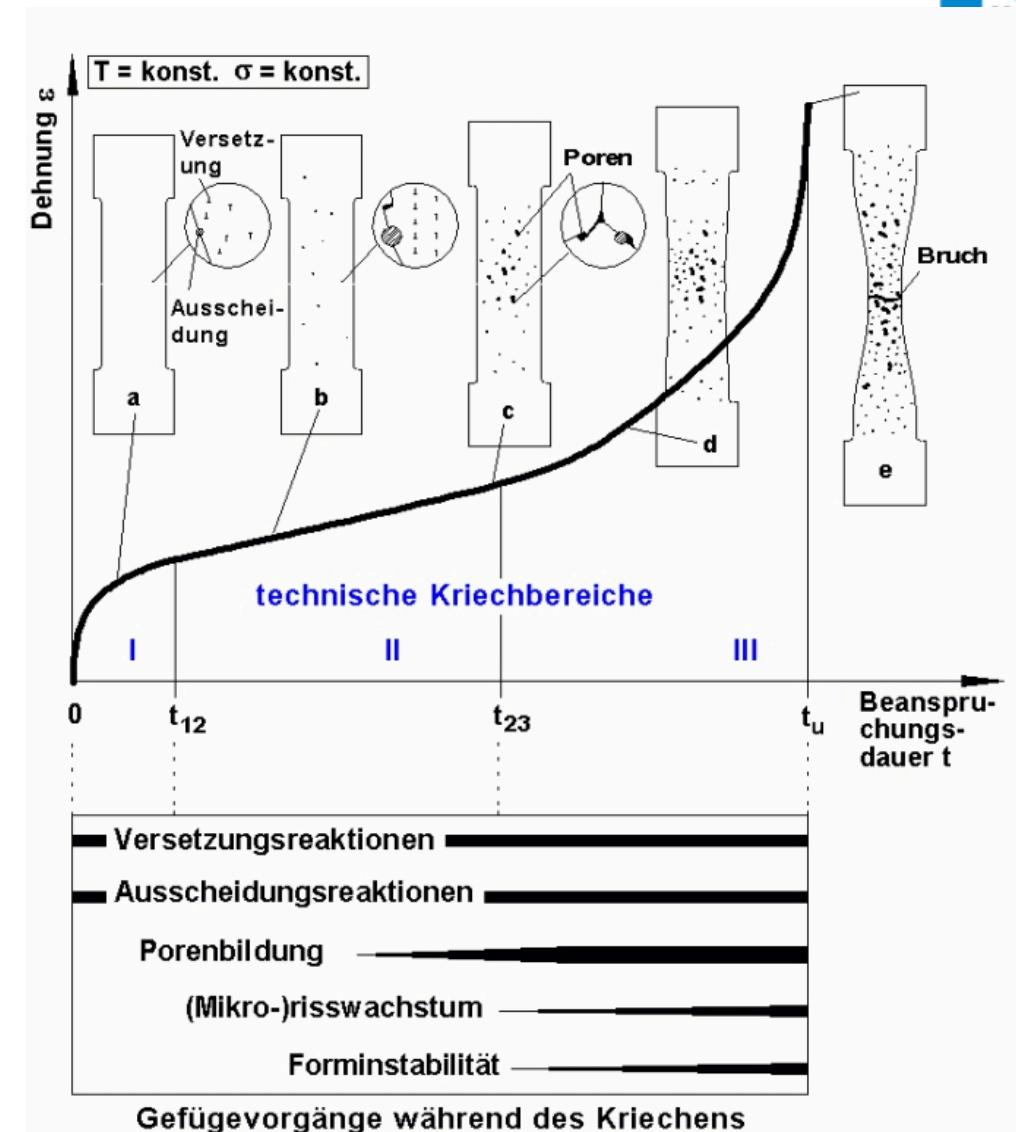
- Zeitabhängige Verformung bei konstanter Belastung
- Beispiel [entfallbare Raumfahrtstrukturen](#)



- findet bei Metallen oberhalb einer Übergangstemperatur statt ($0.3 - 0.4 \cdot T_S$)
- auch bei geringen mechanischen Spannungen unterhalb der Streckgrenze R_e findet eine irreversible plastische Verformung, die langsam, aber stetig voranschreitet statt



- temperatur-, spannungs-, zeit- und werkstoffabhängig
- Ursache:
Versetzungsbewegungen,
Leerstellendiffusion,
Korngrenzengleiten,
Korngrenzendiffusion



Kriechen in Kunststoffen

- bestehen aus Molekülketten
- diese gleiten bzw. entknäueln sich diese unter äußerer
- Sekundärbindungen zwischen den Makromolekülen werden neu gebildet und Deformation bleibt erhalten