

Anhang

Antworten zu den Kontrollfragen

In diesem letzten Kapitel des Skriptums Grundlagen Werkstoffe werden Antworten zu den Kontrollfragen vorgeschlagen, die sich am Ende jedes Abschnitts befinden. Die hier aufgelisteten Vorschläge schließen nicht aus, dass man auch andere Antworten geben kann.

A1 Kontrollfragen Kapitel 1: Allgemeine Zusammenhänge

1.1) Wie haben sich die Werkstoffe historisch entwickelt?

Früher:

- Herstellung von Waffen, Werkzeugen und religiösen Gegenständen
- schrittweises Loslösen vom Naturgegebenen (Glas, Keramik, Metalle)

Heute: (mit Entwicklung):

- gesellschaftliche Strukturen, Lebensauffassungen änderten sich
- Interesse an modernen Werkstoffen und Bearbeitungstechniken
- Kunststoffe wurden entwickelt
- 'Erschöpfung' der Ressourcen an Rohstoffen und Energie.
- Verbindungen mehrerer Werkstoffe (durch Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften)

1.2) Wann waren Stein-, Bronze- und Eisenzeit?

- Stein 100 000 bis 10 000 v. Chr.
- Bronze 3000 v. Chr. (in Europa 1800 – 700 v. Chr.)
- Eisen 1400-1200 v. Chr. (in Europa 1000 n. Chr.)

1.3) Wann wurden Glas, Porzellan, Aluminium und Kunststoff erstmals hergestellt?

- Glas ab 2000 v. Chr. (im Vorderen Orient)
- Porzellan im 7. Jahrhundert (China), ab 1710 (Europa)
- Alu ab 1889 (Neuhausen/Schweiz)
- Kunststoff ab 1839 Kautschuk-Vulkanisation
ab 1930 Vollsynthetische Kunststoffe [industrielle Produktion]

1.4) Welcher Anteil der Welt-Rohstoffproduktion entfällt auf Werkstoffe?

- 20%

1.5) Wie viel Tonnen Stahl und Aluminium werden weltweit erzeugt?

- 1200 Millionen Tonnen Stahl, 31,9 Millionen Tonnen Aluminium

1.6) Besteht die Gefahr, dass weltweit Rohstoffe verarmen?

Nein, da...

- Verbrauchsdaten *nicht* exponentiell steigen
- Geologische Prospektion neue Vorkommen erschließen
- verbesserte Technologien die Ausbeutung „armer“ Reserven gestatten
- steigendes Preisniveau Vorhaben rentabel macht

Jedoch:

- steigende 'Rohstoffverbrauchsdaten' in Entwicklungsländern
- Rohstoffe nur in wenigen Fällen wirtschaftlich gewinnbar

1.7) Welcher Zusammenhang besteht zwischen Energie und Werkstoffen?

Gegenseitige Abhängigkeit:

- Bereitstellung erfordert hohe Energiebeträge
- Energieerzeugung erfordert große Mengen hoch entwickelter Werkstoffe

1.8) Warum sollten Werkstoffingenieure/-innen besonders umweltbewusst denken?

- Herstellung/Verarbeitung: umweltbelastend (durch Rauch, Staub, SO₂-haltige Gase, Lärm)
- viel Energie und hohe Kräfte erforderlich
- Ressourcenknappheit

1.9) Im Zusammenhang mit dem Werkstoffkreislauf sind die Begriffe Verbrauch, Prospektion, Substitution, Lager, Güter, Dissipation und Verbrauchskanal zu erläutern.

- *Verbrauch:* Einmalnutzung
Verlust durch Verschleiß/ Korrosion
Modische Veralterung
- *Prospektion:* Aufsuchen von Rohstoffen in der Erdkruste
- *Substitution:* 'Altes' wird durch „Neues“ ersetzt
- *Lager:* dient als Puffer; weist zu und Abflüsse auf; bietet Flexibilität bei Verknappungs- und / oder Überschusserscheinungen.
- *Güter:* aus Rohstoffen hergestellte Nutzungsgegenstände mit unterschiedlicher Nutzungsdauer.
- *Dissipation:* Abrieb, sonstiger Verlust in breitgestreuter Verteilung über ganze Erdoberfläche; Verfall der Werkstoffe durch Umwelteinflüsse (Korrosion); Halbwertszeiten
- *Verbrauchskanal:* 'Aufbrauchen' der Ressourcen oder der daraus hergestellten Werkstoffe

1.10) Welchen Einfluss hatte die Werkstofftechnologie auf unsere Lebensbedingungen in der Vergangenheit und heute?

- Optimierung/Verbesserung der Lebensbedingungen und der Infrastruktur
- Erleichterung von alltäglichen Arbeiten

1.11) Welche Rolle spielen Werkstoffe in der Mikrotechnik, der biomedizinischen Technik und der Nanotechnologie?

Mikrotechnik:

- kleine Dimensionen, besondere Anforderungen an Werkstoffe und Verarbeitung

Biomedizin:

- Biokompatibilität der Werkstoffe sind notwendig, ständige Weiterentwicklung
- Möglichst „gute“ Nachbauten von Implantaten
- bessere Verträglichkeit und Funktionsweise

Nanotechnologie:

- Extrem kleine Dimensionen (nm-Bereich)
- neue Verarbeitungs- und Charakterisierungstechniken werden benötigt (Rasterkraftmikroskop, Nanoindenter)

A2 Kontrollfragen Kapitel 2: Werkstoffgruppen und -eigenschaften

2.1) Welche Werkstoffklassen gibt es?

- Metalle
- Nichtmetalle
- Naturstoffe

2.2) Wie unterteilt man die Eisenwerkstoffe?

- Stahl (C-Gehalt < 2%)
- Gusseisen (mit C-Gehalten > 2%)

2.3) Was sind die wichtigsten Gruppen der Nichteisenmetalle?

- Leichtmetalle
- Edelmetalle
- Lötmetalle
- Kupfer (Kupferlegierungen)

2.4) Wo verwendet man Halbleiter?

Elektronikbranche (Solarzellen)

2.5) Was sind anorganische und organische Naturstoffe?

Anorganische Stoffe:

- Glas, Keramiken, Baustoffe und Bindemittel, Ziegel Beton (allgemein „tote“ Materie“)

Organische Naturstoffe:

- Holz, Kautschuk, Naturfasern (allgemein „lebendige“ Materie)

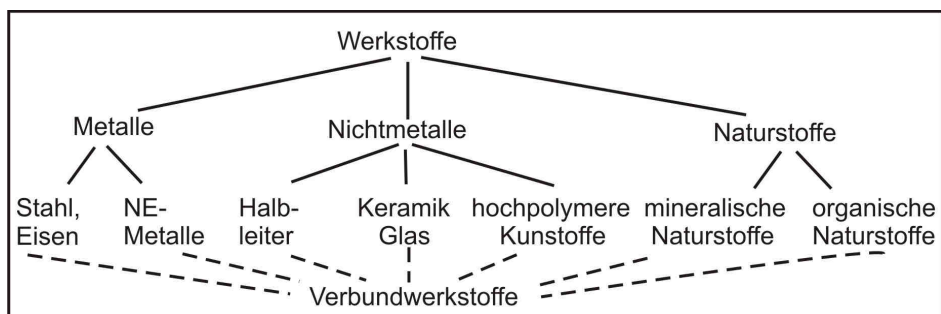
2.6) Was ist ein Verbundwerkstoff?

Ein Werkstoff, der makroskopisch homogen erscheinen kann, jedoch aus Werkstoffen zusammengesetzt ist, die verschiedenen Werkstoffhauptgruppen angehören.

2.7) Welche Werkstoffe gehören zu den nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen?

- Glas
- Keramiken
- Baustoffe
- Bindemittel
- (Ziegel, Beton, Porzellan)

2.8) Wie teilt man die Werkstoffeigenschaften ein? Zeichnen Sie zwei einfache Übersichtsbilder!



2.9) Welche mechanischen und chemischen Werkstoffeigenschaften gibt es?

Mechanisch:

Elastizität, Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, Druckfestigkeit, Bruchfestigkeit, Härte, Zähigkeit, Warmfestigkeit, Verschleißfestigkeit, Wechselfestigkeit, Kaltzähigkeit

Chemische:

Korrosionsbeständigkeit, Oxidationsbeständigkeit, Brennbarkeit

2.10) Welche volkswirtschaftlichen und gesellschaftlichen Faktoren sind für Werkstoffe von Bedeutung?

- Rohstoffverfügbarkeit und Kosten
- Energiebedarf, Wiederverwendbarkeit
- Umweltbelastung, Halbwertszeit, Festigkeit (Dehnung / Spannung; E-Modul)

A3 Kontrollfragen Kapitel 3: Chemische Bindung

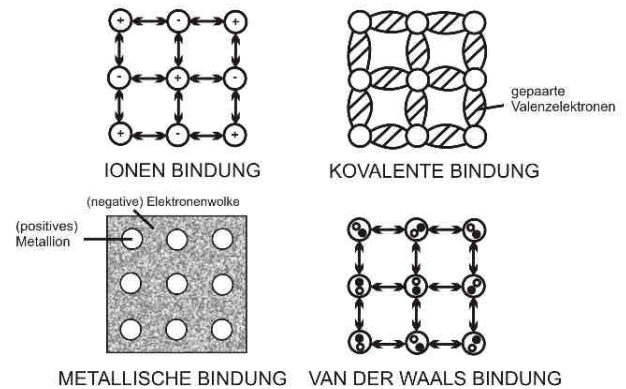
3.1) Welche Bindungstypen gibt es?

Starke Bindungen:

Ionenbindung, Kovalente Bindung, Metallische Bindung

Schwache Bindungen:

Van der Waals-Bindung, Wasserstoffbrückenbindung



3.2) Was ist der Unterschied zwischen kovalenter und metallischer Bindung?

Metallische Bindung:

- positive Atomrümpfe teilen sich Elektronengas
- Bauprinzip, dichteste Packung

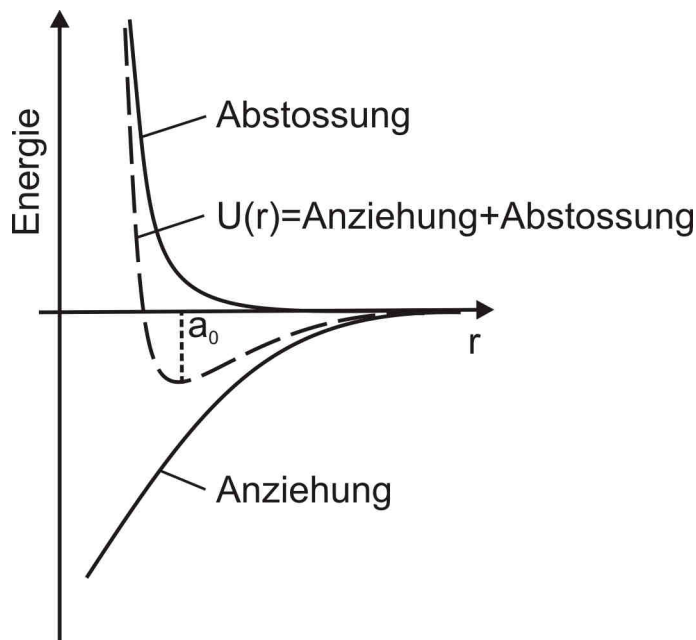
Kovalente Bindung:

- Atome bilden gemeinsame Elektronenpaare
- Bevorzugung bestimmter räumlicher Richtungen, Atome streben weitesten Abstand an

3.3) Wie lautet das Hooksche Gesetz?

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

3.4) Zeichnen Sie die Bindungsenergie U zwischen zwei Atomen als Funktion des Atomabstandes r .



3.5) Überlegen Sie: Warum gibt es eine abstoßende Komponente von $U(r)$?

Weil man die Ionen/Atome nicht ineinander schieben kann.

3.6) Erläutern sie den E-Modul auf Grundlage der U(r)-Kurve

$$E = \frac{d^2U}{dr^2}$$

E = Bindungsenergie
 d^2U = Gitterenergie
 dr^2 = Atomabstand

- Je stärker die U(r) - Kurve gekrümmt ist, desto schwieriger ist es ein Atom aus seiner Gleichgewichtslage auszulenken.
- Der E-Modul ist ein Maß für die Steifigkeit des Gitters eines Kristalls.

3.7) Was ist Spannung und Dehnung? Warum führt man diese Größen ein und arbeitet nicht einfach mit Lasten und Verschiebungen?

Spannung und Dehnung sind geometrieunabhängige Größen.

Spannung:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Spannung} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$$

- Belastung einer Probe wird auf Ausgangsquerschnitt bezogen
- Spannung ist im Gegensatz zur Belastung geometrieunabhängig
- *Einheit:* MPa (Mega-Pascal)

Dehnung:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Dehnung} = \frac{\text{Längenänderung}}{\text{Ausgangslänge}}$$

- Verlängerung einer Probe wird auf Ausgangslänge bezogen
- Dehnung ist im Gegensatz zur Verlängerung geometrieunabhängig
- *Einheit:* %

3.8) Was hat der Elastizitätsmodul mit der Bindungsenergie eines kristallinen Festkörpers zu tun?

- Bindungsenergie drückt sich direkt im E-Modul aus
- Je höher die Bindungsenergie, desto höher der E-Modul

3.9) Wie groß sind die E-Moduli von Stahl und Alu?

Alu 70 GPa
 Stahl 210 GPa

3.10) Wenn Stahl einen höheren E- Modul als Aluminium hat, was kann man dann über die jeweilige metallische Bindung aussagen? Wie verhalten sich die Stahlkonstruktionen im Vergleich zu Aluminiumkonstruktionen bei Belastung im elastischen Grenzbereich mit der gleichen Spannung?

- höherer E-Modul = höhere Steifigkeit des Gitters
- Metallische Bindung stärker => schwieriger ein Atom aus seiner Gleichgewichtslage auszulenken.

Es gilt das Hooksche Gesetz ($\sigma = \varepsilon \cdot E$)

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{\text{Stahl}}} < \frac{\sigma}{E_{\text{Alu}}}$$

Bei gleicher Belastung ist die elastische Dehnung in einem geometrisch gleichen Bauteil aus Aluminium größer als in dem Bauteil aus Stahl.

A4 Kontrollfragen Kapitel 4: Härte**4.1) Was verstehen wir unter der Härte eines Werkstoffs?**

Der Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines sehr viel härteren Körpers (Prüfkörpers) entgegensetzt.

4.2) Welche beiden Instrumente braucht der Vickers Härteprüfer?

- Mikroskop und Identer (Prüfkörper)

4.3) Wie sieht der Prüfkörper beim Vickers-Verfahren aus?

- Diamantpyramide (mit 136° Spitzenwinkel zwischen gegenüberliegenden Flächen)

4.4) Schildern Sie den Ablauf einer Vickers-Härteprüfung:

- Wahl der Prüflast
- Probe auf Prüfgerät auflegen
- Scharfstellen des Bildes
- Identieren der Probe (Prüfkörper dringt ein)
- Vermessung des Härteeindrucks

4.5) Welche Vickers-Härten können Stähle aufweisen?

Nach verschiedenen Wärmebehandlungen können sie zwischen 200 – 920 HV aufweisen.

A5 Kontrollfragen Kapitel 5: Kristalle

5.1) Was versteht man unter einem Translationsgitter?

- Raumgitter, aus vielen Elementarzellen aufgebaut
- diese sind durch Translation ineinander überführbar

5.2) Was ist eine Elementarzelle?

- Eine Elementarzelle beschreibt Raumgitter, die den kristallinen Aufbau von Festkörpern kennzeichnen
- beschreibt ein Molekül vollständig
- lässt auf Eigenschaften und physikalischen Aufbau rückschließen

5.3) Nennen Sie die 7 Kristallsysteme:

- Triklin, Monoklin, Rhombisch, Rhomboedrisch, Hexagonal, Tetragonal, Kubisch
- Die 7 Kristallsysteme unterscheiden sich in ihren Gitterkonstanten und Raumwinkeln
siehe auch Frage 5.5

5.4) a) Liegt die Richtung [100] in der Ebene (100)

b) Liegt die Richtung [110] in der Ebene (022)

Lösungsansatz:

Wenn das Skalarprodukt aus Ebenennormale und Richtung null ergibt, liegt eine Richtung in einer Ebene.

a)

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{\text{Richtung}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{\text{Ebenennormale}} = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 1 \neq 0$$

→ Die Richtung [100] liegt nicht in der Ebene (100)!

b)

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{\text{Richtung}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}_{\text{Ebenennormale}} = 1 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 2 = 2 \neq 0$$

→ Die Richtung [110] liegt nicht in der Ebene (022)!

5.5) Welche Ebene wird im kubischen Kristallsystem durch die beiden Richtungen [001] und [010] festgelegt?

Lösungsansatz:

Man muss das Vektorprodukt der beiden Vektoren bilden. Der Ergebnisvektor steht auf den beiden Ausgangsvektoren senkrecht. Der Ergebnisvektor entspricht der Normalen einer Ebene, die durch die beiden Ausgangsvektoren bestimmt wird.

Die beiden Richtungen [001] und [010] legen die (100)-Ebene fest, denn:

$$\begin{array}{c}
 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \cdot 0 - 1 \cdot 1 \\ 1 \cdot 0 - 0 \cdot 0 \\ 0 \cdot 1 - 0 \cdot 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{array}{cc}
 0 & 0 \\
 0 & 1
 \end{array}
 \end{array}$$

Der Vektor $[-1 \ 0 \ 0]$ entspricht einer Normalen auf der Ebene (100). Die beiden Vektoren legen deshalb die (100) Ebene fest.

5.6) a) Wo schneiden sich die beiden Ebenen (001) und (010) eines kubischen Kristallsystems?

b) Wo schneiden sich die beiden Ebenen (011) und (010) eines kubischen Kristallsystems?

Lösungsansatz:

Die Schnittlinie legt einen Vektor fest, der auf beiden Ebenennormalen senkrecht steht. Wir erhalten deshalb die Schnittlinie durch Anwendung des Vektorprodukts der beiden Ebenennormalen.

a) Die beiden Ebenen (001) und (010) besitzen folgende gemeinsame Richtung (Schnittlinie):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Ebenennormale 1}} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{\text{Ebenennormale 2}} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

b) Die beiden Ebenen (011) und (010) besitzen folgende gemeinsame Richtung (Schnittlinie):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{Ebenennormale 1}} \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{\text{Ebenennormale 2}} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

5.7) a) Wie groß ist der Winkel zwischen den beiden Ebenen (010) und (001)?

b) Wie groß ist der Winkel zwischen den beiden Ebenen (100) und (011)?

$$\text{Lösungsansatz: } \cos \alpha = \frac{h_1 \cdot h_2 + k_1 \cdot k_2 + l_1 \cdot l_2}{\sqrt{(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2) \cdot (h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)}}$$

a) Der Winkel zwischen den beiden Ebenen (010) und (001) ergibt sich zu:

$$\cos \alpha = \frac{0 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1}{\sqrt{(0^2 + 1^2 + 0^2) \cdot (0^2 + 0^2 + 1^2)}}$$

$$\Rightarrow \cos \alpha = 0 \Rightarrow \alpha = 90^\circ$$

Die Ebenen (010) und (001) stehen senkrecht aufeinander.

b) Der Winkel zwischen den beiden Ebenen (100) und (011) ergibt sich zu:

$$\cos \alpha = \frac{1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1}{\sqrt{(1^2 + 0^2 + 0^2) \cdot (0^2 + 1^2 + 1^2)}}$$

$$\Rightarrow \cos \alpha = 0 \Rightarrow \alpha = 90^\circ$$

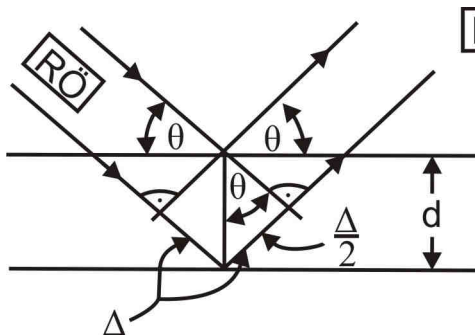
Die Ebenen (100) und (011) stehen senkrecht aufeinander.

5.8) Was gehört alles zum Gefüge von Werkstoffen?

- Gesamtheit ungestörter Kristallbereiche (Körner) mit ihren 0-, 1-, 2- und 3-dimensionalen Gitterfehlern (Leerstellen+Fremdatome, innere Grenzflächen wie Kornseigerungen Ausscheidungen und Einschlüsse)

5.9) Was ist wichtiger für einen Werkstoff, seine chemische Zusammensetzung oder sein Gefüge?

- Chemische Zusammensetzung und Gefüge bestimmen beide die Eigenschaften des Werkstoffs
- Bei gleicher chemischen Zusammensetzung eines Werkstoffs können die Eigenschaften in Abhängigkeit von seinem Gefüge unterschiedlich ausfallen

5.10) Leiten Sie die Braggsche Gleichung ab.**MIKRO**

Der Gangunterschied zweier benachbarter gebeugter Strahlen muss dem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge entsprechen.

Aus dem Dreieck ergibt sich:

$$\sin \theta = \Delta/2 / d$$

$$\text{mit } \Delta = n \cdot \lambda$$

Braggsche Gleichung:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

5.11) Warum kann man Kupfer durch eine röntgenographische Messung von Chrom unterscheiden?

- Verfahren misst Netzebenenabstände
- Chrom und Kupfer unterscheiden sich in ihren Netzebenenabständen

5.12) Wie funktioniert eine röntgenographische Spannungsmessung?

Braucht man hierfür auch das Hooksche Gesetz? Welche Probleme sehen Sie?

Spannungen / Dehnungen werden röntgenographisch gemessen:

- Unter Spannung rücken Gitterebenen näher zusammen oder auseinander, je nach Kornorientierung und Belastung
- Änderung der Gitterkonstanten können röntgenografisch bestimmt werden.
- Rückschlüsse auf elastischen Dehnung können getroffen werden
- über Elastizitätstheorie wird die Spannung bestimmt (Hooksches Gesetz wird benötigt)

Probleme: Ausschließlich Erfassung von Oberflächen, somit Anisotropie von Werkstoffen unberücksichtigt

5.13) Nennen Sie einen typischen Wert für die Gitterkonstante eines Kristalls:

$$d_{\text{typisch}} = 2,00 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_{\text{Eisen}} = 2,86 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_{\text{Kupfer}} = 3,61 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$d_{\text{Gold}} = 4,10 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

5.14) Was sind 0 - dimensionale Gitterfehler?

- Leerstellen
- Zwischengitteratome

- (interstitielle und substitutionelle) Fremdatome

5.15) Was sind 1 – und 2 –dimensionale Gitterfehler?

1- Dimensional:

- Versetzungen
- Stufenversetzungen / Schraubenversetzungen

2- Dimensional:

- Grenzfläche
- Großwinkelkorngrenzen in einem dünnen Film
- Grenzflächen zwischen Ausscheidungsteilchen

A6 Kontrollfragen Kapitel 6: Mikroskopie

6.1) Was ist der Unterschied zwischen einem reellen und einem virtuellen Bild?

reelles Bild: entsteht, wo sich Strahlen eines Lichtbündels selbst schneiden (direktes Bild eines Gegenstandes).

virtuelles Bild: entsteht dort, wo sich die Verlängerungen der Strahlen eines Lichtbündels schneiden (Spiegelbild)

6.2) Wie lautet die Linsengleichung?

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

g = Gegenstandsweite
b = Bildweite
f = Brennweite

6.3) Was macht das Auge beim Scharfstellen?

- Auge verändert Brennweite (Bildweite unveränderlich)
- Krümmungsradius der Augenlinse wird durch Kontraktion eines Muskels (unbewusst) verändert: Akkomodation

6.4) Was versteht man unter der Bezugssehweite s?

- kleinster Betrachtungsabstand, auf den ein normalsichtiges Auge ermüdungsfrei akkomodieren kann
- deutliche Sehweite s=25 cm

6.5) Wie funktioniert eine Lupe?

- ist eine Sammellinse mit Gegenstand innerhalb der Brennweite: $g < f$.
- Vergrößerung der Lupe umso stärker, je höher die Brennweite ist.
- für die Vergrößerung gilt: $V_L = s/g$
- Bild entsteht auf der Objektseite ($b < 0$, vergrößert, aufrecht und virtuell)

6.6) Wodurch wird die Vergrößerung eines Mikroskops bestimmt?

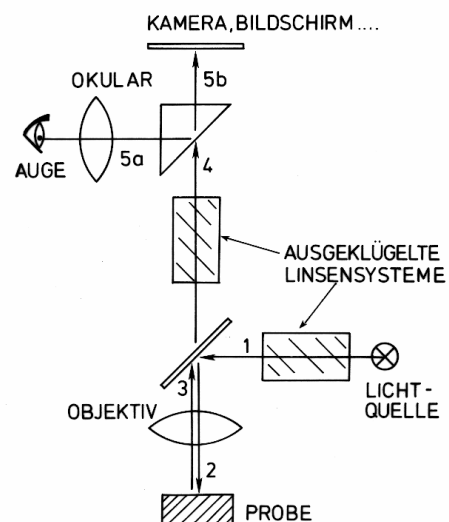
$$V_{\text{Vergrößerung}} = V_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} = \frac{\Delta}{f_1} \cdot \frac{s}{f_2}$$

6.7) Wie hoch können Lichtmikroskope vergrößern?

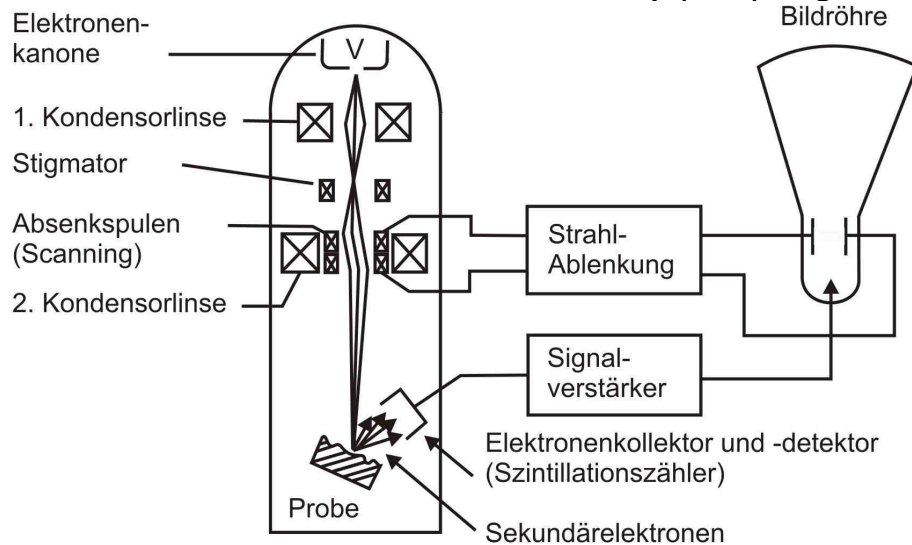
≈ 1000-fach

6.8) Wie sieht der Strahlengang im Auflichtmikroskop aus?

Das Mikroskop besteht aus zwei konvexen Linsen, dem Objektiv und dem Okular. Der zu vergrößernde Gegenstand liegt nahe am Objektiv. Das Objektiv erzeugt ein Zwischenbild innerhalb der Brennweite des Okulars. Mit diesem wird das Zwischenbild wie mit einer Lupe betrachtet.



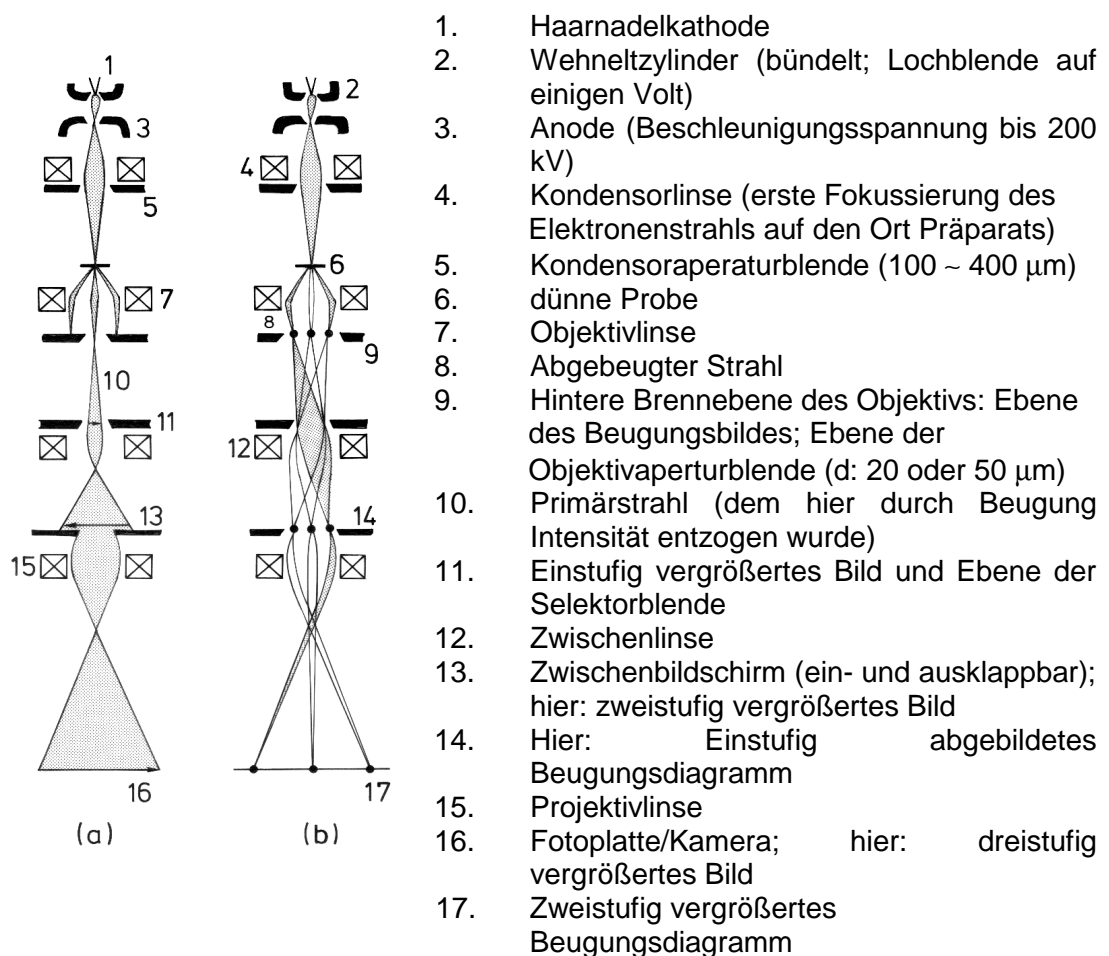
6.9) Wie ist ein einfaches Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgebaut?



6.10) Wie entsteht die Vergrößerung im REM?

Die Vergrößerung im REM ergibt sich aus dem Verhältnis zweier Flächen, der Fläche des Bildschirms (wie Fernsehbildschirm, z.B. 400 cm²) zur abgerasterten Fläche (z.B. 40000 μm²).

6.11) Wie sieht der Strahlengang im TEM für Bild und Beugung aus (Zeichnung)?



6.12) Was kann man mit den drei Mikroskoparten typischerweise sehen?

<i>LiMi:</i> Messung von Korngrößen große Ausscheidungsteilchen	<i>REM:</i> Bruchflächen Analyse technischer Schadensfälle	<i>TEM:</i> Kristallfehler kleine
Ausscheidungsteilchen große Einschlüsse und Poren	Risse und Fehler	Versetzungen

6.13) Wofür braucht man ein Durchstrahlungselektronenmikroskop?

- Abbildung von kleinen Teilchen und Versetzungen
- für lokale kristallographische und chemische Analyse

6.14) Warum benutzt man in der Werkstofftechnologie Mikroskope?

- Qualitative/quantitative Gefügeanalyse
- Änderung von Gefügen von Werkstoffen im Einsatz
- für das Erforschen von Beziehungen zwischen Werkstoffaufbau und Eigenschaften
- für die Schadenanalyse

6.15) Was versteht man unter Bildanalyse? Wie kann man eine Korngröße bestimmen?

- quantitative Auswertung mikroskopischer Bilder
- Korngrößen werden z.B. durch das Linienschnittverfahren bestimmt

6.16) Kann man mit einem zweidimensionalen Schnitt durch einen Kirschkuchen auf die Größe der Kirschen schließen?

Ja, mit Hilfe der Stereologie.

6.17) Was gehört alles zum Gefüge von Werkstoffen? Welche Gefügebestandteile kann man mit welchem Mikroskop beobachten?

- Gesamtheit ungestörter Kristallbereiche (Körner) zusammen mit ihren 0-, 1-, 2- und 3-dimensionalen Gitterfehlern

(0-dimensional: Leerstellen, Zwischengitteratome, substituierte Atome)

1-dimensional: Versetzungen

2-dimensional: Korngrenzen

3-dimensional: Ausscheidungsteilchen, Einschlüsse)

A7 Kontrollfragen Kapitel 7: Amorphe Festkörper

7.1) Was ist Glas?

- Festkörper mit amorphem Aufbau
- besitzt nur Nahordnung, keine Fernordnung

Glasbildung => Schmelze hat keine Zeit kristallin zu erstarren

7.2) Hat Glas einen festen Schmelzpunkt?

Nein, beim Erhitzen beobachtet man ein Erweichungsintervall

7.3) Was versteht man unter Keramik?

- Feinteilige Ausgangsstoffe werden in Form gebracht und erfahren dann eine Hochtemperaturbehandlung (Brennen von Ziegeln, Keramik)
- Enthält nicht-kristalline und kristalline Anteile

7.4) Wie wichtig ist die Porosität von Keramik? Wie kann man sie beeinflussen?

- Porosität kann die Bildung von Rissen erleichtern
- Porosität = Verhältnis aller Hohlräume im Werkstoff zum äußeren Werkstoffvolumen
- Hohe Sintertemperaturen, lange Sinterzeiten und hohe Pressdrücke verringern die Porosität

7.5) Nennen Sie drei wichtige Gruppen keramischer Werkstoffe mit je 2 Beispielen:

<i>Silikatkeramische Werkstoffe:</i>	Ziegel, Porzellan
<i>Oxidkeramische Werkstoffe:</i>	Aluminium-, Magnesiumoxid
<i>Nichtoxidische keramische Werkstoffe:</i>	Nitride, Kohlenstoff

7.6) Erläutern Sie die Bedeutung von Glas:

- Einsatzbereiche: Optik, Bauwesen, Lebensmittelindustrie, Chemieindustrie, für Fensterglas, Gläser, Kirchenscheiben
- Glas ist hart, durchsichtig/lichtdurchlässig, elektrisch isolierend und korrosionsfest.

7.7) Erläutern Sie die Bedeutung von Keramik:

- Einsatzbereiche: Geschirr, Skulpturen, Filter, Tiegel, feuerfeste Komponenten
- Keramik ist hochtemperaturbeständig, hat eine gute Verschleiß-, und Korrosionsbeständigkeit, und weist eine hohe Härte auf

7.8) Was versteht man unter Fernordnung?

Die regelmäßige, sich immer wiederholende Anordnung von Atomen in Kristallgittern (Translationssymmetrie)

7.9) Was ist Nahordnung?

- zwischen nächsten atomaren Nachbarn herrscht Ordnung (z.B. sp^3 -Hybridisierung)
- es besteht keine Translationssymmetrie

7.10) Wodurch zeichnet sich eine Glasphase aus?

- besitzt nur Nahordnung, keine Fernordnung
- hat keinen festen Schmelzpunkt sondern ein Erweichungsintervall
- ist amorph bzw. nicht kristallin

7.11) Was bedeutet amorpher Zustand?

Amorphes Material:

- keine regelmäßige Atomanordnung (keine Translationssymmetrie)
- es gibt zwischen Atomen eine Nahordnung, aber keine Fernordnung

7.12) Wie entstehen Gläser und welcher wichtige Unterschied besteht zwischen glasartiger und kristalliner Erstarrung?

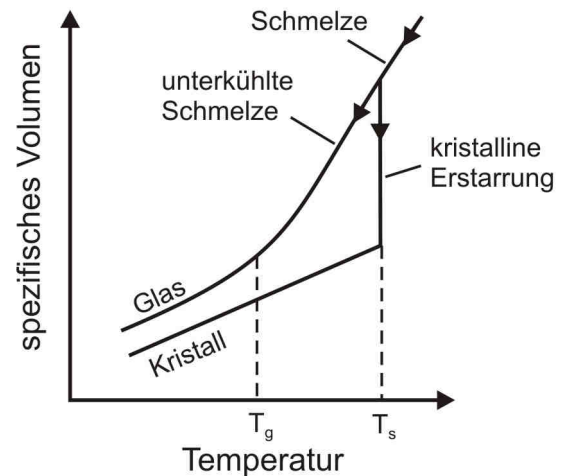
Entstehung: durch Unterkühlung und Erstarren von Schmelzen

Glasartige Erstarrung:

- Beim Unterkühlen der Schmelze nimmt das Volumen stetig ab
- Man beobachtet beim Abkühlen ein Erstarrungsintervall
- Bei T_g nimmt thermischer Ausdehnungskoeffizient sprunghaft ab

Kristalline Erstarrung:

- Langsame Abkühlung, sprunghafte Änderung im spezifischen Volumen am Schmelzpunkt
- es gibt einen festen Schmelzpunkt



7.13) Warum und wie hängt die Lage der Glasstemperatur von der Abkühlgeschwindigkeit ab?

Schnelle Abkühlung: höhere Glasstemperaturen

Langsame Abkühlung: niedrigere Glasstemperaturen

- Glasstemperatur keine feste Größe, wie Schmelzpunkt von Kristallen, weil langsame Abkühlungsgeschwindigkeiten den schwingenden Atomen mehr Zeit für Relaxationsprozesse lassen

7.14) Können amorphe Phasen im festen Zustand kristallisieren?

Ja, durch nachträgliche Wärmebehandlung (unterhalb der Glasstemperatur)

A8 Kontrollfragen Kapitel 8: Polymere

8.1) Was ist ein Kunststoff?

- hochpolymerer Werkstoff, bestehend aus organischen, kettenartigen Riesenmolekülen
- durch den Zusammenschluss vieler Moleküle entstanden

Eigenschaften:

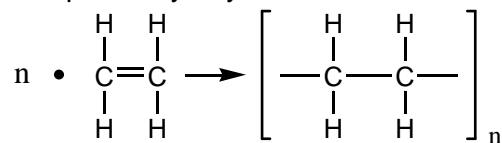
- leicht, flexibel (niedrige E-Module)
- niedrige Verarbeitungs-(Umform)-Temperatur und Fertigungskosten
- niedrige elektrische Leitfähigkeit => können somit als Isolatoren verwendet werden
- transparent und höhere Zähigkeit als Glas
- Korrosions- und chemische Beständigkeit
- hohe Atomabstände und somit hohe Durchlässigkeit für kleine Moleküle (Membranenfunktion)

8.2) Beschreiben Sie die Begriffe Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition mit je einer chemischen Formel

Polymerisation:

- Aufbrechen von C-Doppelbindungen durch Initiator
- Dann Verbinden und schließlich ein Abbruch der Kettenreaktion

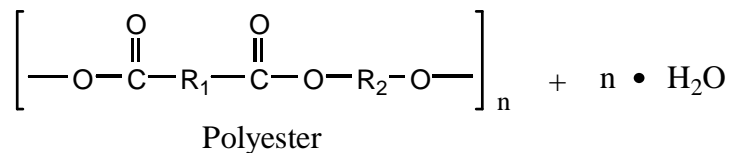
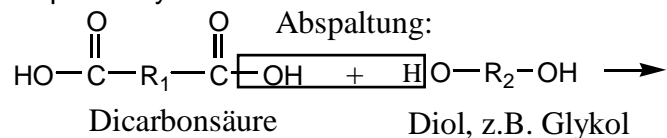
Beispiel: Polyäthylen



Polykondensation:

- es erfolgt eine Abspaltung niedermolekularer Gruppen (oft H₂O)
- es sind Moleküle mit entsprechenden Endgruppen z.B. -COH und COOH nötig

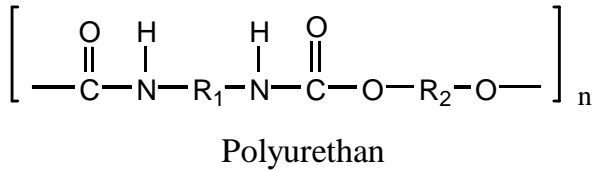
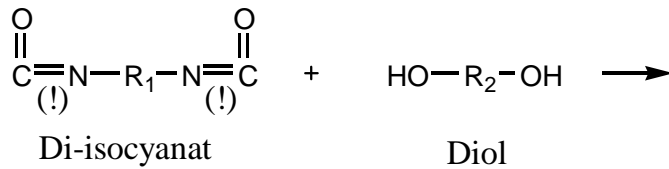
Beispiel: Polyester



Polyaddition:

- Interne Umlagerung an reaktiver Gruppe
- z.B. Aufspaltung einer N=C Doppelbindung

Beispiel: Polyurethan

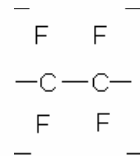
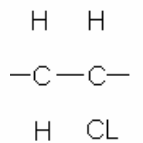
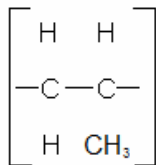


8.3) Was hatte eine Polymerkette mit sp^3 – Hybridisierung zu tun?

- die Atome des Kohlenstoff sind sp^3 -hybridisiert (Tetraederwinkel $109^\circ 28'$)
- sie können über ihre Hybridorbitale Bindungen zu anderen Kohlenstoffatomen eingehen und Ketten bilden

8.4) Nennen Sie drei wichtige Kunststoffe und geben Sie deren Strukturformeln an

Polypropylen (Hostalenpp): Polyvinylchlorid (Lonza): Polytetrafluorethylen (Teflon):



8.5) Was bewirkt eine Verlängerung der Ketten von Kunststoffmolekülen?

- höheren E-Modul
- höhere Viskosität der Schmelze
- höhere Erweichungstemperatur

aber auch:

- niedrige Verformbarkeit
- niedrige Ermüdungsbeständigkeit
- niedrige Löslichkeit in Lösungsmitteln und hohe Viskosität

8.6) Erläutern Sie das Entstehen kristalliner Bereiche in Kunststoffen

- Kristallisation = Parallelanordnung von Molekülabschnitten
- Kristalline Bereiche entstehen bei bestimmten Temperaturen und meist hohen Drücken von Kettenmolekülen

8.7) Welche Rolle spielen Zusätze für Kunststoffe?

Zusätze können Aussehen und Eigenschaften von Kunststoffen erheblich verändern

- Weichmacher: Abstand der Molekülketten werden vergrößert
Wechselwirkung der Makromoleküle werden verringert
- Füll- und Farbstoffe: Ruß oder aktivierte Kieselsäure werden z.B.: in der Kautschukindustrie als Vernetzungsbeschleuniger eingesetzt
Kaolin und Kreise z.B. werden als Farbstoffe verwendet.

- Fasern: Kohlefasern oder Stahlfaser werden zur Erhöhung der Steifigkeit zugegeben

8.8) Haben Kunststoffe einen festen Schmelzpunkt? Was passiert beim Erwärmen?

- keinen festen Schmelzpunkt
- fangen an zu Erweichen/Gasen, wenn sie erwärmt werden

8.9) In welche drei Gruppen kann man Kunststoffe einteilen? Was haben diese Gruppen für Eigenschaften?

Thermoplaste:

- Erweichen beim Erwärmen
- Erstarren beim Abkühlen (Vorgang reversibel)
- Besitzen eine Einfrier-Erweichungstemperatur („Glastemperatur“)
- Sind unvernetzte Ketten und einfach verformbar
- Beispiele: PE, PVC, PTFE, PMMA

Duromere:

- Bei Raumtemperatur hart und glasig, bei Erwärmung keine Erweichung, sondern chemische Zersetzung (da sie über Hauptvalenzen vernetzt sind)
- bilden sich aus zähflüssigen Vorprodukten
- räumlich fest vernetzt
- Beispiele: Epoxidharze (UHU), ungesättigte Polyester

Elastomere:

- formfest, aber trotzdem elastisch verformbar
- räumlich lose vernetzt
- Gummielastizität
- Beispiele: aus Naturkautschuk hergestellte Gummiprodukte, Polyurethan

8.10) Was ist Entropieelastizität?

Die bei geringer Spannung starke elastische Verformung, gefolgt von anschließendem „Zusammenschnurren“ des Molekülknäuels aufgrund der Entropie der Anordnung wird als Entropieelastizität bezeichnet. Der Zustand des ungeordneten Knäuels ist wahrscheinlicher als der durch mechanische Belastung lang gestreckter Ketten!

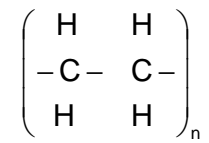
8.11) Wie funktioniert ein Extruder?

Prinzip des *Fleischwolfs*:

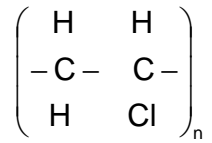
- Thermoplaste werden im Spritzgussverfahren verarbeitet:
- Granulat wird über Trichter einer Transportschraube zugestellt, erhitzt und in Werkzeugform gepresst

8.12) Wie lauten die Strukturformeln von Polyethylen, Polyvinylchlorid und Polytetrafluorethylen?

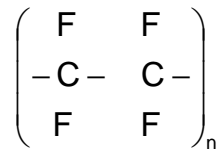
Polyethylen (Lupolen, Hostalen)



Polyvinylchlorid (Lonza)



Polytetrafluorethylen (Teflon)



A9 Kontrollfragen Kapitel 9: Gleichgewichte

9.1) Was bedeutet der Begriff Zustand? (Beispiele)

- Zustand: Gesamtheit der messbaren / erkennbaren Merkmale eines Systems
- Wird durch Zustandsparameter bestimmt: chemische Zusammensetzung, Temperatur, Druck, mechanische Spannungsfelder, elektromagnetische Felder, thermomechanische Vorgeschichte

9.2) Was ist eine Phase?

- Nach Struktur einheitlich aufgebaut und von seinen Nachbarphasen abgegrenzter Systembestandteil
- Innerhalb einer Phase gleiche chemische + physikalische Eigenschaften ohne sprunghafte Änderungen
- Beim Überschreiten der Phasengrenze: sprunghafte Änderung der Eigenschaften

9.3) Was ist der Unterschied zwischen Thermodynamik und Kinetik?

- Thermodynamik (Wärmelehre): liefert Energie und Triebkräfte von Reaktionen. Gibt die Richtung von Reaktionen an.
- Kinetik: befasst sich mit der Geschwindigkeit von Reaktionen

9.4) Was ist Triebkraft von Umwandlungen, und welche zwei Komponenten hat sie?

Wie kann man sich die Entropie vorstellen?

Die Triebkraft von Umwandlungen ist (ein negatives) ΔG . Das System kann z.B. zwei Phasen bilden, eine flüssige und eine feste. Es gibt Werte für innere Gibbsche freie Enthalpien G , einen für die flüssige (G_F) und einen für die feste Phase (G_S). Wenn $G_F < G_S$, wandelt die flüssige Phase mit der Triebkraft $\Delta G = G_F - G_S$ in die feste Phase um.

ΔG hat zwei Komponenten, ΔH und $-T \cdot \Delta S$. ΔH entspricht einem Unterschied in Wärmeinhalten. $-T \cdot \Delta S$ ist ein Term, dessen Betrag mit steigender Temperatur zunimmt. ΔS entspricht einer Tendenz, Zustände hoher Unordnung einzustellen.

Entropie: Maß für die Unordnung:

- Hoher Grad von Ordnung: geringe Entropie
- Starke Unordnung: hohe Entropie

9.5) Was ist die Grundgleichung der Kinetik?

Geschwindigkeit = Triebkraft x Beweglichkeit

9.6) a) Was ist ein Gleichgewichtszustand (GG-Zustand)?

b) Kann man ein System aus dem GG bringen?

c) Was passiert mit einem Nicht-GG-System?

- Im Gleichgewicht liegt keine Triebkraft für eine Zustandsänderung vor, $\Delta G = 0$.
- Ein System kann durch äußere Einflüsse aus dem Gleichgewicht gebracht werden, dann kann sich z.B. die Temperatur ändern.
- Es erfolgt Zustandsänderung durch Triebkraft ΔG , bis GG-Zustand vorliegt.

9.7) Wie funktioniert thermische Analyse?

Prinzip:

Verfolgung kontinuierlicher Erwärmungs- bzw. Abkühlkurven $T(t)$

Vorgang: Erhitzen des Systems => dann Abkühlen unter Beobachtung der Temperatur/Zeit

normales Abkühlen:

$$\frac{dQ}{dt} = \text{const} \cdot (T - T_0)$$

Beim Erreichen z.B. eines Schmelzpunktes bei der Abkühlung -> Freisetzen von Umwandlungswärme -> Abweichung von normaler Abkühlkurve, Auftreten eines Haltepunktes bei Erstarren von reinen Metallen und bei reinen eutektischen und peritektischen Reaktionen. Beobachtung von verzögerter Abkühlung beim Durchlaufen von Zweiphasenbereichen.

Ziel: Bestimmung von Schmelzpunkten / Phasenübergängen. Experimentelle Bestimmung von Zustandsdiagrammen.

9.8) Aufgrund welcher physikalischen Effekte kann man Temperaturen messen?

- Wärmeausdehnung
- Thermospannung
- Elektrischer Widerstand

9.9) Welche Thermospannungen liefert ein NiCr-Ni- bzw. ein PtRh-Pt - Thermoelement bei 1000°C?

NiCr-Ni – Thermoelement: 41,32 mV

PtRh-Pt – Thermoelement: 9,60 mV

9.10) Wie werden die Zustandsfelder in Zustandsdiagrammen bezeichnet?

Phasenbereiche (z.B.: Einphasen- und Zweiphasenbereiche)

9.11) Umrechnen einer Zusammensetzung von 30 Atom - % Ni (in Cu-Ni) auf Gewichtsprozent (Atommassen Cu: 63,54 ; Ni: 58,71)

$$c_{\text{Ni}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{\text{Cu}} \cdot A_{\text{Cu}}}{x_{\text{Ni}} \cdot A_{\text{Ni}}} \right)}$$

$$c_{\text{Ni}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0,7 \cdot 63,54}{0,3 \cdot 58,71} \right)} = 0,28$$

Ergebnis: 28 Gew.-% Ni; 72 Gew.-% Cu

9.12) Was sind Zweiphasen- und Dreiphasenreaktionen?

Zweiphasenreaktion:

An einer Zweiphasenreaktion sind zwei Phasen beteiligt. Hierzu gehört die Umwandlung einer Phase in eine andere (z.B. für reines Fe: $\text{Fe}_{\text{krz}} \rightarrow \text{Fe}_{\text{kfz}}$). Hierzu gehört auch das Wachstum einer Phase bei Durchlaufen eines Zweiphasenbereichs.

Dreiphasenreaktion:

An der Dreiphasenreaktion nehmen drei Phasen teil:

1. eutektische Reaktion
2. eutektoide Reaktion
3. peritektische Reaktion

9.13) Was ist ein Eutektikum, was ist ein Peritektikum?

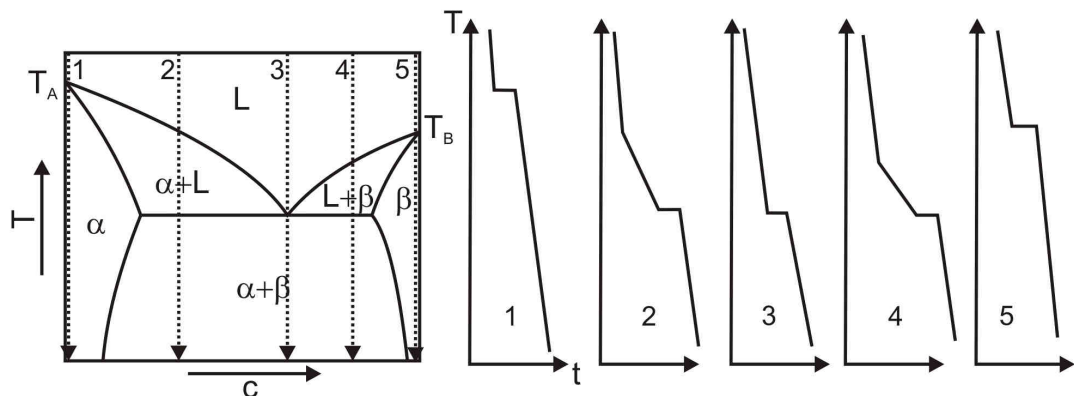
Eutektikum:

- Abkühlen aus einer Hochtemperaturphase, zerfallen der Schmelze in zwei Mischkristalle:
Schmelze \rightarrow Mischkristall $_1$ + Mischkristall $_2$

Peritektikum:

- Beim Abkühlen Reaktion zweier Hochtemperaturphasen, Bildung einer Tieftemperaturphase: Schmelze + Mischkristall $_1 \rightarrow$ Mischkristall $_2$

9.14) Zu zeichnen ist ein einfaches eutektisches System (A, α mit geringer Löslichkeit für B, L, β mit geringer Löslichkeit für A, B) und je eine Abkühlkurve für: (i) reines A, (ii) links vom Eutektikum, (iii) Eutektikum, (iv) rechts vom Eutektikum und (v) reines B



9.15) Was passiert mit der Schmelze, wenn man neben dem Eutektikum abkühlt?

- Auskristallisieren von Teilchen aus der Schmelze, eutektischer Zerfall der Restschmelze
- es entstehen große Primärkristalle und drum herum ein feines, eutektisches Gefüge

9.16) Was sind die markanten Punkte im Fe-C-Diagramm?

Eutektikum :	1147°C,	4,3 Gew.-% C,	$L \rightarrow \gamma - Fe + Fe_3C$
Perlitpunkt:	727°C,	0,8 Gew.-% C,	$\gamma - Fe \rightarrow \alpha - Fe + Fe_3C$
Peritektikum:	1493°C,	0,16 Gew.-% C,	$\delta - Fe + L \rightarrow \gamma - Fe$
Max C in $\alpha - Fe$ bei	727°C	0,022 Gew.-% C	
Max C in $\gamma - Fe$ bei	1147°C	2,1 Gew.-% C	

9.17) Rechnen mit Hebelregel

Massenbilanz: $m = m_L + m_s$

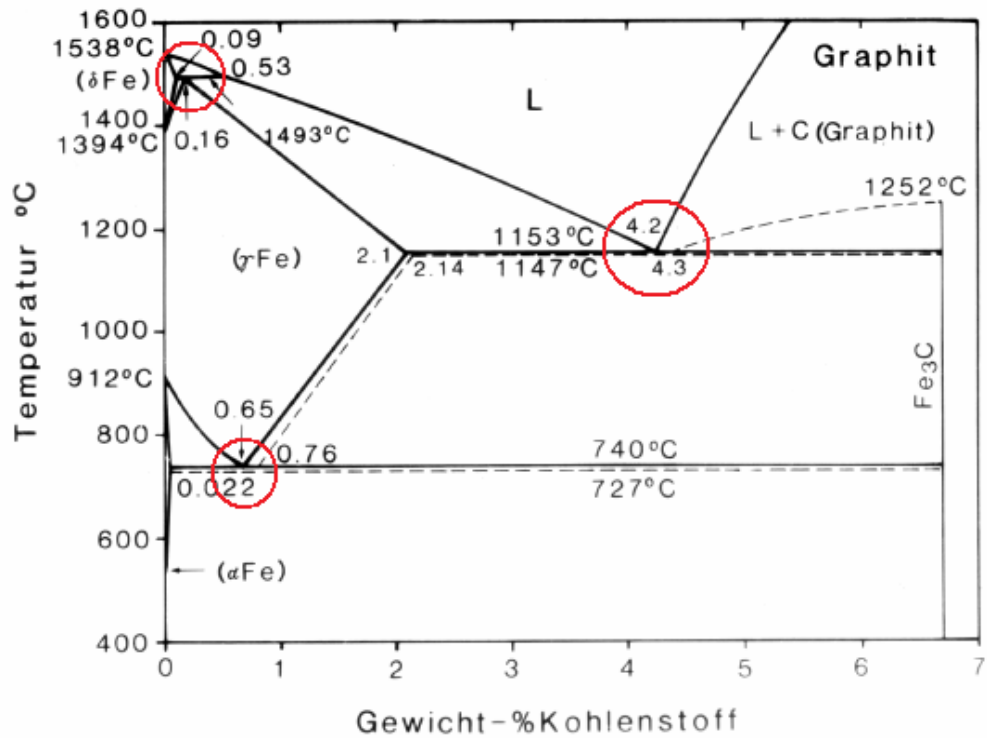
(Gesamtmasse des Systems ist gleich Masse Schmelze (m_L) + Masse an Mischkristall m_s)

Konzentrationsbilanz: $c \cdot m = c_L \cdot m_L + c_s \cdot m_s$

Es folgt: $m_L (c - c_L) = m_s \cdot (c_s - c)$ (Hebelregel)

9.18) Welche Eutektika und Peritektika gibt es in den Systemen Fe-C, Al-Cu und Cu-Zn?

Fe-C-System:

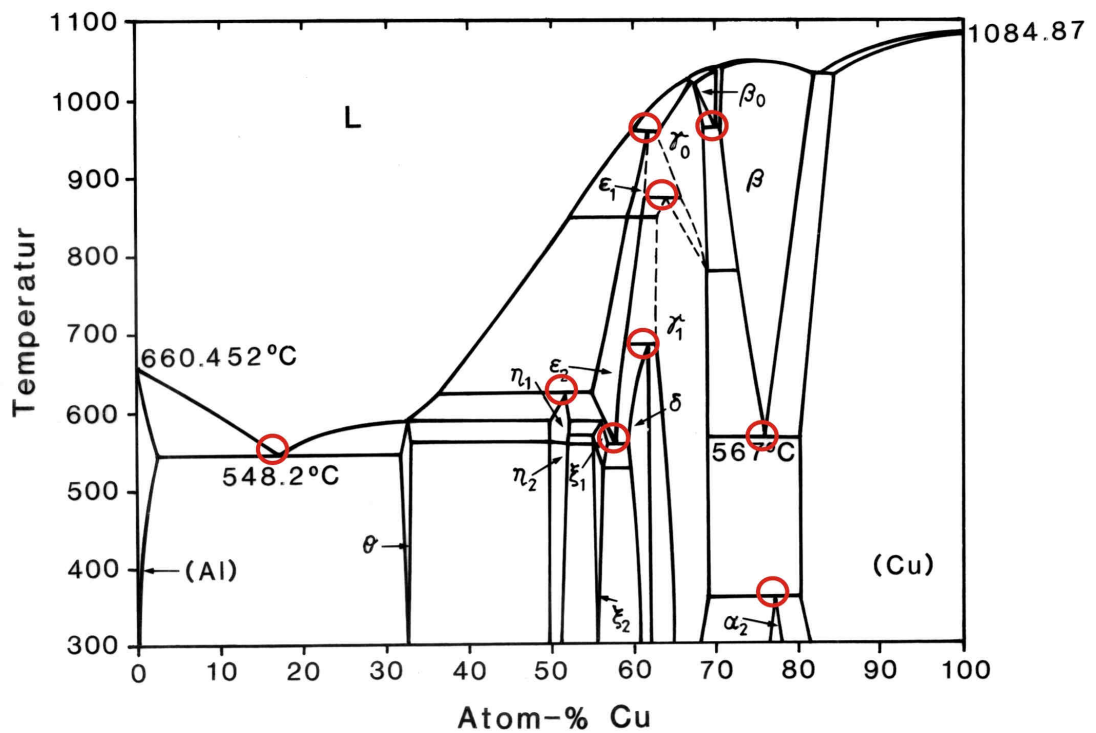


Eutektikum :
1147°C, 4,3 Gew.-% C

Eutektoid:
727°C, 0,8 Gew.-% C

Peritektikum:
1493°C, 0,16 Gew.-% C

Al-Cu-System:

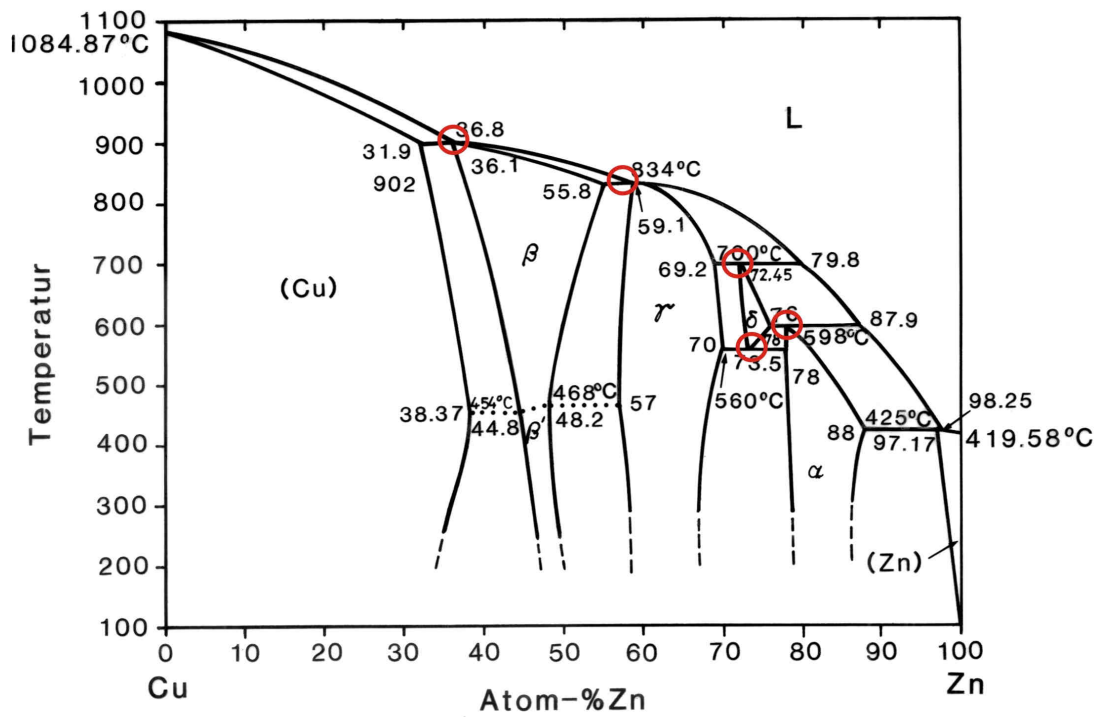


Eutektikum z.B. :
548°C, 18 At.-% Cu

Eutektoid z.B.:
567°C, 77 At.-% Cu
550°C, 58 At.-% Cu
950°C, 71 At.-% Cu

Peritektikum z.B.:
350°C; 78 At.-% Cu
660°C, 61 At.-% Cu
640°C, 52 At.-% Cu
880°C, 65 At.-% Cu
950°C, 62 At.-% Cu

Cu-Zn-System:



Eutektikum z.B.:

560 °C, 73,5 At.-% Zn

902 °C, 36,1 At.-% Zn

834 °C, 58,9 At.-% Zn

Peritektikum z.B.:

600 °C, 78 At.-% Zn

700 °C, 72,45 At.-% Zn

A10 Kontrollfragen Kapitel 10: Diffusion

10.1) Was ist der Unterschied zwischen Diffusion und Konvektion?

Diffusion: individuelle Atome wandern und tauschen ihre Plätze
Konvektion: es bewegen sich Volumenelemente mit vielen Atomen gemeinsam fort; Stofftransport in Gasen und Flüssigkeiten (Strömungslehre)

10.2) Was ist Diffusion?

Unter Diffusion versteht man Stofftransport im Festkörper. Fe-Atome können sich in ihren Kristallgittern bewegen (über Leerstellen). C-Atome können in einem Fe-Kristall ihre Plätze wechseln (durchs Zwischengitter). Man misst den Stofftransport j_A der Atomsorten A als Anzahl der Atome n_A pro Fläche [in m^2] und pro Zeit [in s]. Eine mögliche Einheit des Stofftransportsystems ist $1/(m^2s)$.

10.3) Warum steht im ersten Fickschen Gesetz ein Minuszeichen?

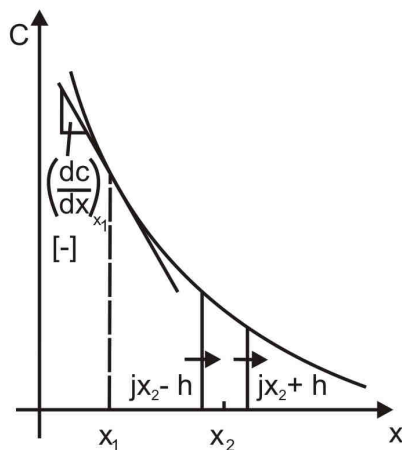
Wenn in einem $c(x)$ -Koordinatensystem die Konzentration von links nach rechts abnimmt, diffundieren die Atome von links (viele Atome) nach rechts (wenige Atome). Dies entspricht einem positiven Stofftransportstrom j in x -Richtung. Weil aber dc/dx negativ ist und der Diffusionskoeffizient eine positive Größe ist, braucht man für diesen Fall im ersten Fickschen Gesetz ein Minus:

$$j(\text{positiv}) = -D(\text{positiv}) \cdot \left(\frac{dc}{dx}, \text{negativ} \right)$$

Auf der rechten Seite steht nur ein positives Ergebnis, wenn wir mit -1 multiplizieren!

10.4) Wie leitet man aus dem ersten Fickschen Gesetz das zweite Gesetz ab?

Man betrachtet ein dünnes Scheibchen an der Stelle x_2 mit der Dicke $2h$.



Auf der linken Seite des Scheibchens, bei x_2-h , fließen Atome in das Scheibchen hinein. Auf der rechten Seite, bei x_2 , verlassen Atome das Scheibchen. So wie die $c(x)$ -Kurve gezeichnet ist, hat sie bei x_2-h eine stärker negative Steigung als bei x_2+h . Aus dem ersten Fickschen Gesetz folgt damit: links fließt mehr in das Scheibchen hinein als rechts heraus. Wenn j in x -Richtung abnimmt steigt also die Konzentration an, wir beobachten eine Konzentrationszunahme oder ein positives dc/dt . Wir können das genau ausrechnen:

$$\frac{dc}{dt} = - \frac{j_{x2-h} - j_{x1-h}}{\Delta x}$$

Wir müssen auf die Scheibchendicke Δx normieren. Wenn wir das Scheibchen sehr dünn machen (Differentialrechnung!) erhalten wir:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{\partial j}{\partial x}$$

Jetzt setzen wir das erste Ficksche Gesetz ein und nehmen an, dass D nicht von der Konzentration abhängt:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{\partial \left(-D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right)}{\partial x} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Einmal nach der Zeit ableiten liefert das gleiche Ergebnis wie zweimal nach dem Weg ableiten und mit D multiplizieren!

10.5) Was ist eine Lösung des zweiten Fickschen Gesetzes?

Als Lösung des zweiten Fickschen Gesetzes erhalten wir Konzentrationen $c(x, t)$, die vom Ort x und von der Zeit t abhängen. Diese Lösungen müssen so beschaffen sein, dass sie dem zweiten Fickschen Gesetz genügen:

$$\frac{dc(x,t)}{dt} = D \cdot \frac{d^2 c(x,t)}{dx^2}$$

10.6) Ableiten und diskutieren der Lösung für den Diffusionsfall:

Extrem dünne Schicht zwischen zwei endlosen Halbräumen.

Man kann sich überlegen, dass der folgende Ausdruck eine Lösung darstellt:

$$c(x, t) = \left(A / \sqrt{t} \right) \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right)$$

Man muss die Konstante A bestimmen. Man führt die Masse der diffundierenden Substanz M ein und bestimmt sie aus:

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} c dx$$

Bei der Rechnung führt man eine Substitution durch (Integration durch Substitution):

$$\frac{x^2}{4 \cdot -D \cdot t} = \xi^2 \quad \Rightarrow \quad dx = 2 \cdot \sqrt{D \cdot t} \cdot d\xi$$

Damit erhält man:

$$M = 2 A \sqrt{D} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\xi^2) d\xi$$

Der Wert des Integrals ist bekannt:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-\xi^2) d\xi = \sqrt{\pi}$$

Damit erhält man:

$$M = 2 A \sqrt{\pi \cdot D}$$

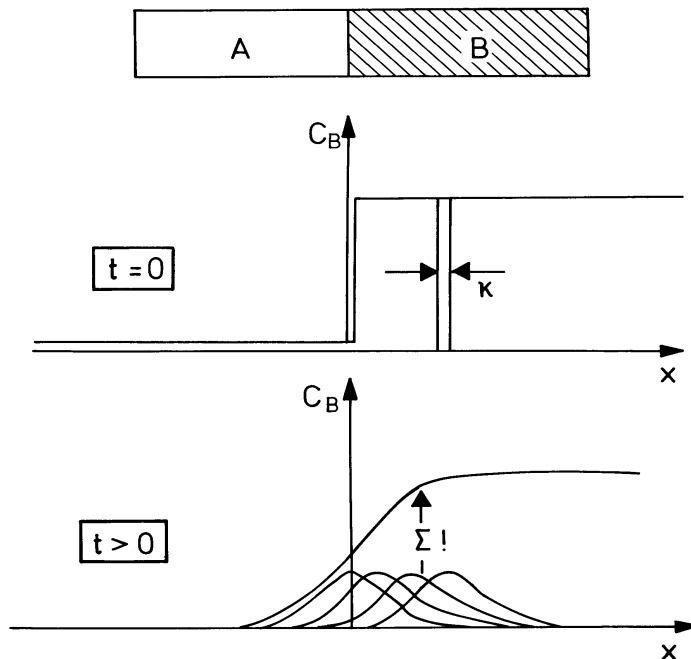
und:

$$c(x, t) = \frac{M}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right)$$

.

10.7) Wie kommt man zu der Lösung für den Diffusionsfall: Interdiffusion in zwei unendlichen Halbräumen.

Die Grafik erläutert die Situation und die Ableitung (qualitativ):



Oben: Metalle A und B sind miteinander im Kontakt.

Mitte: Zu Beginn des Diffusionsvorgangs liegt eine sprunghafte Änderung der Konzentration an der Kontaktstelle vor.

Unten: Nach einer Zeit t stellt sich ein allmählicher Übergang ein. Man erhält den genauen Ausdruck für diesen Verlauf, wenn man den Raum in lauter kleine Scheibchen zerlegt, denen man jeweils eine Glockenkurve-Lösung zuordnet. Den Kurvenverlauf erhält man dann durch Aufsummieren aller dieser Glockenkurven. Man macht sich zunutze, dass wenn c_1 und c_2 Lösungen der Differentialgleichungen sind, $c_3 = c_1 + c_2$ auch eine Lösung der Differentialgleichung darstellt.

10.8) Was sind die Einheiten von j , D und c ? was sind typische Werte für D in Metallen?

$$j: \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}; \quad D: \frac{\text{m}^2}{\text{s}}; \quad c: \frac{\text{Mole}}{\text{m}^3}$$

typische Werte für D :

bei $2/3 T_s$ (K):

$$D = 10^{-14} \text{ m}^2 / \text{s}$$

kurz unterhalb T_s :

$$D = 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$$

in der Schmelze:

$$D = 10^{-9} \text{ m}^2 / \text{s}$$

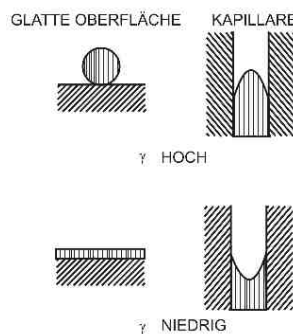
A11 Kontrollfragen Kapitel 11: Grenzflächen

11.1) Was ist die Oberflächenenergie?

Jede Oberfläche ist mit einer Energie, der Oberflächenenergie, verbunden. Es ist die Energie, die man aufbringen muss, um im Falle eines Festkörpers oder einer Flüssigkeit neue Oberflächen zu erzeugen. Die Oberflächenenergie wird meist als γ bezeichnet und hat die Einheit J/m². Atome im Innern eines ungestörten Kristalls haben die niedrigste Energie (G_K). Liegen diese an einer Oberfläche, steigt ihre Energie (G_O). Die Oberflächenenergie ist: $\gamma = G_O - G_K$

11.2) Schildern Sie die Situation bei Kontakt einer Flüssigkeit mit einem Festkörper (glatte Kontaktfläche und Kapillare) für hohe und niedrige Grenzflächenenergie!

Wenn die Oberflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper hoch ist (z.B. Quecksilber auf Keramik) versucht das System die Kontaktfläche zu minimieren. Wir finden deshalb Quecksilberkügelchen auf Keramikkacheln.



In einer Kapillaren beobachten wir im Falle hoher Oberflächenenergie einen konvexen Meniskus, d.h. die Flüssigkeit steht in der Mitte höher als an den Rändern (Quecksilberthermometer).

Im Falle von niedriger Oberflächenenergie stellt das System eine hohe Kontaktfläche ein. Alkohol bildet auf einer Glasoberfläche ausgedehnte Pfützen. In einer dünnen Glaskapillare bildet Alkohol einen konkaven Meniskus aus, d.h. die Flüssigkeit steht am Rand höher als in der Mitte.

11.3) Was sind die beiden Stufen eines Sinterprozesses?

Stufe 1: Zusammenwachsen und Halsbildung

Stufe 2: Schrumpfung des Sinterkörpers durch Abbau von Porosität

11.4) Wann und wie erfolgt Kornwachstum?

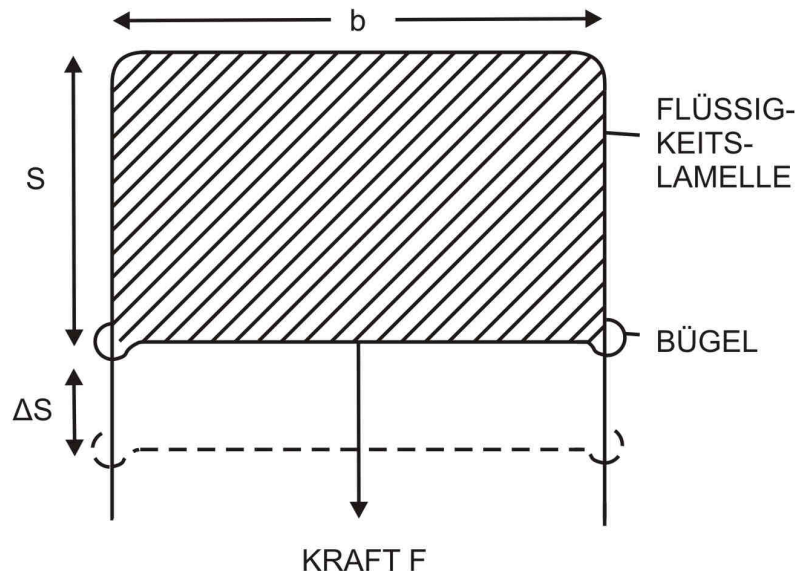
Wenn man einen polykristallinen Werkstoff ausreichend hohen Temperaturen aussetzt erfolgt Kornwachstum. Triebkraft ist die Verringerung der Grenzflächenenergie wenn man von feinen Körnern (großen Gesamtkorngrenzflächen) zu größeren Körnern (kleinere Gesamtkorngrenzfläche) gelangt. Man beobachtet, dass die mittlere Korngröße zunimmt. An Korngrenztripelpunkten stellen sich aus Gleichgewichtsgründen oft 120° Winkel ein.

11.5) Was passiert mit Teilchendispersionen bei hohen Temperaturen?

Teilchendisersion (z.B. Karbide im Stahl) wachsen bei hohen Temperaturen. Aus vielen feinen Ausscheidungsteilchen werden wenige größere Ausscheidungsteilchen. Im Falle von Teilchen nennt man diesen Vergrößerungsprozess Ostwaldreifung. Der mittlere Teilchenradius nimmt proportional zur Zeit hoch ein Drittel ($t^{1/3}$) zu. Es gilt: $r^3 - r_0^3 = k \cdot t$, wobei r – mittlerer Radius der Teilchen, r_0 – mittlerer Teilchenradius zu Beginn der Glühbehandlung, k - Konstante, t – Zeit. Feine Teilchendispersionen stärken den Werkstoff gegen plastische Verformung. Deswegen stellt die Ostwaldreifung einen Erweichungsprozess dar.

11.6) Wie kann man Grenzflächenenergien von Flüssigkeiten messen?

Man kann die Oberflächenenergie einer Flüssigkeitslamelle mit Hilfe der Bügelmethode messen.



Wenn man den Bügel (Länge: b) um das Stück ΔS nach außen zieht, muss man eine Kraft F wirken lassen und leistet eine mechanische Arbeit ΔW_{mech} :

$$\Delta W_{\text{mech}} = F \cdot \Delta S$$

Mit dieser Arbeit hat man zwei neue Grenzflächen geschaffen (oben und unten auf der Lamelle), die das Aufbringen von Grenzflächenenergie ΔW_{GF} erfordert.

$$\Delta W_{\text{GF}} = 2 \cdot (b \cdot \Delta S) \cdot \gamma$$

Man setzt die mechanische Arbeit mit der Grenzflächenenergie gleich:

$$\Delta W_{\text{mech}} = \Delta W_{\text{GF}}$$

$$F \cdot \Delta S = 2 \cdot (b \cdot \Delta S) \cdot \gamma$$

Man erhält schließlich:

$$\gamma = \frac{F}{2 \cdot b}$$

γ hat hier die Einheit einer Kraft pro Länge, es entspricht der Kraft, die auf die Länge b des Bügels wirkt. Wir können den Bruch durch eine Längeneinheit erweitern und erhalten γ so als Energie pro Fläche.

11.7) Für welche Vorgänge in und an Werkstoffen ist die Grenzflächenenergie von Bedeutung?

Unterschiede in Grenzflächenenergien wirken als Triebkraft für:

- Das Sintern von Pulvern (brennen von Keramik)
- Das Kornwachstum in polykristallinen Werkstoffen
- Die Ostwaldreifung (vergrößerung feiner Teilchendispersionen in Werkstoffen, z.B. Karbide im Stahl)

11.8) Woher kommt die Beziehung: $p = (2\gamma) / r$?

Wir überlegen uns, welche Arbeit wir leisten müssen, um ein kugelförmiges Teilchen mit dem Radius r um ein kleines Stück dr anwachsen zu lassen. In der Kugeloberfläche steckt die Energie G_F

$$G_F = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \gamma$$

Wenn wir wissen wollen, wie sich G_F mit r ändert, bilden wir die Ableiten dG_F/dr :

$$dG_F = 8 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot r \cdot dr \quad (1)$$

Wir können andererseits die Änderung der Energie G_F mit wachsendem Radius dG_F/dr als Kraft auffassen:

$$dG_F / dr = F$$

Und diese Kraft F können wir mit einem Druck p in Beziehung setzen, der auf der Kugelfläche wirkt:

$$F = p \cdot 4\pi \cdot r^2$$

Dies liefert unsere zweite Bestimmungsgleichung:

$$dG_F = p \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot dr \quad (2)$$

Wir setzen gleich (1)=(2) und erhalten:

$$p = \frac{2\gamma}{r}$$

Über einem kleinen kugelförmigen Teilchen wirkt ein Druck p , der umso größer ist, je größer die Grenzflächenenergie γ und je kleiner der Teilchenradius r ist. Es ist als ob eine kleine Faust jedes Teilchen zusammendrückt.

11.9) Welchen Einfluss haben Fremdatome auf die Grenzflächenenergie?

Fremdatome können die Korngrenzenenergie von Werkstoffen erniedrigen. In diesem Fall $d\gamma/dc_{Kg}$ kommt es zu einer Segregation von Fremdatomen an Grenzflächen. Aus den gleichen Gründen kommt es zur Adsorption von Fremdatomen an Oberflächen.

A12 Kontrollfragen Kapitel 12: Keimbildung

12.1) Welche Arten von heterogener Keimbildung sind Ihnen aus dem täglichen Leben bekannt?

- Ein Teich fängt am Ufer an zu gefrieren
- Gasblasen eines kohlensäurigen Mineralwassers bilden sich immer am Glasrand
- Eisblumen entstehen am Fensterrand

12.2) Erläutern Sie die Überlegungen, die der Theorie der homogenen Keimbildung zugrunde liegen:

Man geht davon aus, dass ein kugelförmiger Keim entsteht ($V = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi$, $O = 4 \cdot r^2 \cdot \pi$), was pro Volumen einen Energieterm ΔG_v liefert. Dies bringt den Term $-\frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot \Delta G_v$ in die Energiebilanz ein. Dieser Term treibt die Umwandlung. Andererseits geht man davon aus, dass Oberflächenenergie γ benötigt wird, um den Keim zu bilden. Dies muss man in der Energiebilanz mit $4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot \gamma$ berücksichtigen. Dieser Term macht die Umwandlung schwierig. Die Energiebilanz ist die Summenkurve aus diesen beiden Termen. Sie weist ein Minimum auf, das die Parameter ΔG^* (kritische Keimbildungsarbeit) und r^* (kritischer Keimradius) liefert. Um ΔG^* und r^* zu erhalten muss man die Methoden der Infinitesimalrechnung anwenden (1. Ableitung bilden und gleich Null setzen, ΔG^* ausrechnen, ΔG^* in Energiebilanz einsetzen und r^* ausrechnen; siehe Gleichungen 12.1 bis 12.6).

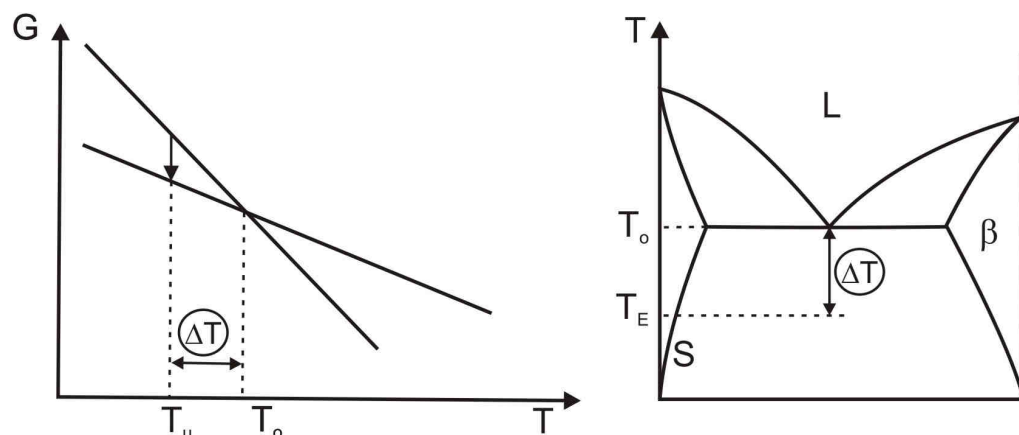
12.3) Was hat Keimbildung mit Oberflächenenergie zu tun?

Für die Bildung eines Keims muss man Oberflächenenergie γ aufbringen. Die Oberflächenenergie γ ist eine Energie pro Oberfläche. Für einen Keim der Oberfläche $4 \cdot r^2 \cdot \pi$ braucht man deshalb eine Energie $4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot \gamma$. Diese Energie behindert die Keimbildung und muss aufgebracht werden.

12.4) Welche Rolle spielt die Unterkühlung ΔT bei der Keimbildung?

- *starke* Unterkühlung = *kleine* Keime
 - *geringe* Unterkühlung = *große* Keime
- (siehe Gleichung 12.10, die aus Gleichungen 12.1 bis 12.9 folgt)

12.5) Illustrieren Sie eine Unterkühlung ΔT in einem G(T)-Diagramm und in einem Zustandsdiagramm



12.6) Ableitung der Theorie für die homogene Keimbildung. Diskussion der Begriffe ΔG^* und r^* Rolle der Temperatur.

- (1) Bilanzgleichung mit negativem (treibenden) Term ($\sim \Delta G_v$) und positivem (bremsenden) Term ($\sim \gamma$):

$$\Delta G(r) = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot \Delta G_v + 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \gamma$$

Diese Kurve hat ein Minimum, das durch r^* und ΔG_v^* beschrieben wird.

- (2) Bildung der ersten Ableitung+

$$\frac{\partial \Delta G(r)}{\partial r} = 4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot \Delta G_v + 8 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma$$

- (3) Minimum. Nullsetzen der ersten Ableitung. Liefert Bedingungen für r^* und ΔG_v^* , die Koordinaten des Minimums der $\Delta G(r)$ -Kurve.

$$r^* = -\frac{2 \cdot \gamma}{\Delta G_v^*} \quad (> 0 \text{ weil } \Delta G_v^* < 0)$$

- (4) Einsetzen von r^* in die Bilanzgleichung liefert:

$$\Delta G^* = \frac{16}{3} \cdot \pi \cdot \frac{\gamma^3}{\Delta G_v^2}$$

Die kritische Keimbildungsarbeit hängt stark von der Grenzflächenenergie ($\sim \gamma^3$) und der Umwandlungsarbeit ($\sim 1/\Delta G_v^2$) ab!

- (5) Einführung einer Bedingung für Gleichgewicht bei der Gleichgewichtstemperatur T_E :

$$\Delta G_v = 0 = \Delta H_v - T_E \cdot \Delta S_v$$

- (6) Annahme, dass dies auch bei einer Temperatur T in einer gewissen Umgebung von der Gleichgewichtstemperatur T_E gilt:

$$\Delta H_v = T_E \cdot \Delta S_v$$

- (7) Damit kann man schreiben:

$$\Delta G_v(T) = T_E \cdot \Delta S_v - T \cdot \Delta S_v = \Delta S_v \cdot \Delta T$$

- (8) Man weiß, dass $\Delta S_v = \frac{\Delta H_v}{T}$ ist. Damit erhält man:

$$\Delta G_v(T) = \frac{\Delta T}{T_E} \cdot \Delta H_v \sim \Delta T$$

$\Delta G_v(T)$ ist also proportionale zur Unterkühlung ΔT . Damit ist wegen $r^* = 1/\Delta G_v$ und $r^* \sim 1/\Delta T$:

$$r^* \sim \frac{1}{\Delta T}$$

12.7) Warum erfolgt Keimbildung praktisch immer heterogen?

Weil dies den energetischen Aufwand für die Keimbildung stark herab setzt. Die Umwandlung kann mit kleinen Volumina beginnen.

12.8) Was hat heterogene Keimbildung mit Benetzbarkeit zu tun?

Heterogene Keimbildung erfolgt an gut benetzbaren Oberflächen. Nur so kann die Umwandlung mit kleineren Volumina beginnen.

12.9) Wo beginnen in der Regel metallische Schmelzen zu erstarren?

An der Wand des Schmelztiegels, wo heterogene Keimbildung stattfindet.

12.10) Wo beginnt in der Regel die Ausscheidung von Teilchen in einem vielkristallinen Festkörper?

An den Gitterbaufehlern, insbesondere an Versetzungen, Korngrenzen und Einschlüssen. Dort ist der Energiebedarf für die Keimbildung niedriger als im ungestörten Volumen.

A13 Kontrollfragen Kapitel 13: Erstarren von Schmelzen

13.1) Was ist Blockseigerung?

- durch Erstarrungsvorgänge, die nicht im Gleichgewicht erfolgen, bedingter inhomogener Konzentrationsverlauf im gesamten Gussstück

13.2) Was ist Kornseigerung?

- durch Erstarrungsvorgänge, die nicht im GG erfolgen, bedingter inhomogener Konzentrationsverlauf in einzelnen Körnern

13.3) Kann man Seigerungen durch eine Wärmebehandlung beseitigen?

Kornseigerungen können durch Diffusionsglühen beseitigt werden, Blockseigerungen nicht.

13.4) Welche technologischen Gesichtspunkte spielen beim Gießen eine Rolle?

- Schmelzpunkte
- Erstarrungsgeschwindigkeiten/Erstarrungsfronten (Lunker, Gefüge, Eigenschaften)
- Reaktivitäten (Umgebungsmedium)
- Gegenseitige Mischbarkeit von Legierungskomponenten im flüssigen Zustand

13.5) Spielt die heterogene Keimbildung für die Erstarrung metallischer Schmelzen eine große Rolle?

spielt eine *große* Rolle:

- Keimbildung erfolgt praktisch in den meisten technologisch wichtigen Fällen heterogen, weil homogene Keimbildung viel mehr Energie erfordert.

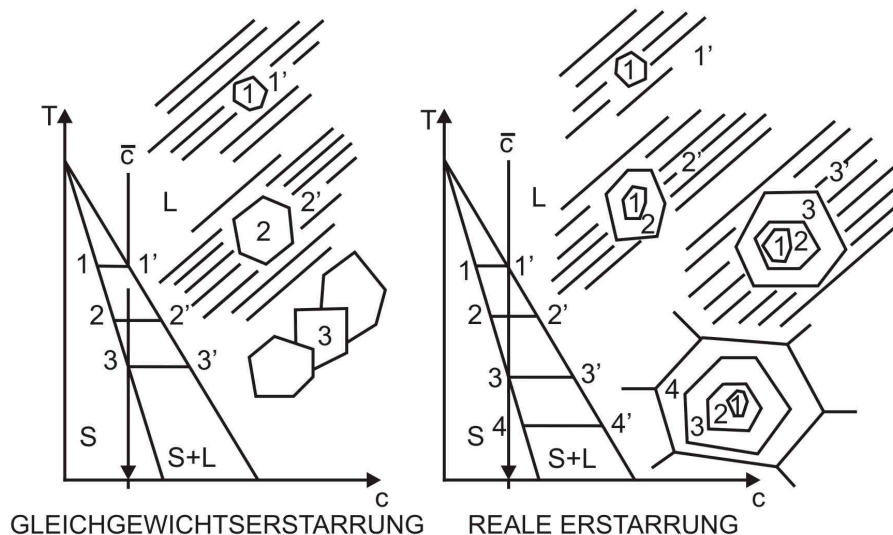
13.6) Beschreiben Sie für ein einfaches binäres System den Unterschied zwischen einer Gleichgewichts- und einer Ungleichgewichtserstarrung

Gleichgewichtserstarrung:

- im Zweiphasenbereich stellen sich überall die im Gleichgewicht stehenden Mengen- und Konzentrationsverhältnisse laut Zustandsdiagramm ein, d.h. Festkörper und Schmelze ändern beim Durchlaufen ständig ihre Zusammensetzung

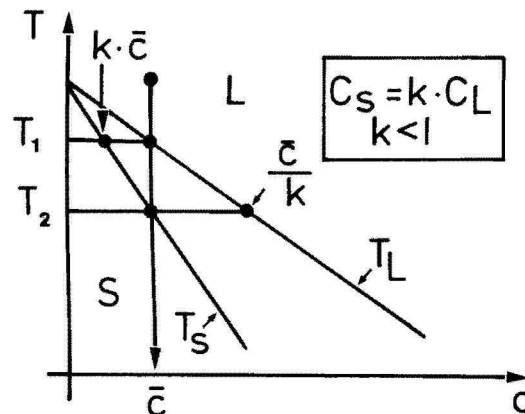
Ungleichgewichtserstarrung:

- wegen der langsamen Festkörperdiffusion behält der erstarrte Keim seine Konzentration auch bei Durchlaufen des Zweiphasenbereichs
- es bilden sich Schalen mit zunehmender Konzentration den Keim

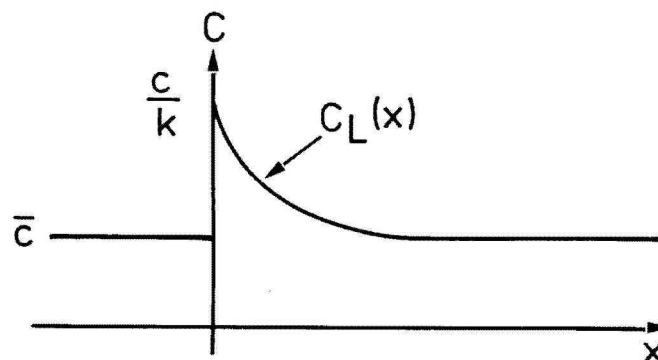


13.7) Wie sehen Konzentrationsverläufe in der Schmelze vor Erstarrungsfronten aus, wenn Konvektion in der Schmelze keine Rolle spielt?

Für ein Zustandsdiagramm folgenden Typs



sieht der Konzentrationsverlauf in der Schmelze vor der Erstarrungsfront folgendermaßen aus:

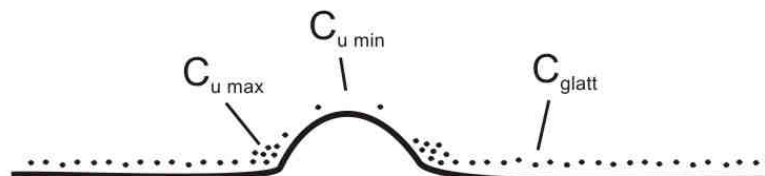


13.8) Aus welchen Gründen kommt es zur konstitutionellen Unterkühlung? Wie sehen die entstehenden Gefüge aus? Ist konstitutionelle Unterkühlung erwünscht oder unerwünscht?

(1) Eine Erstarrungsfront ist nie ganz glatt. Es gibt Unregelmäßigkeiten:

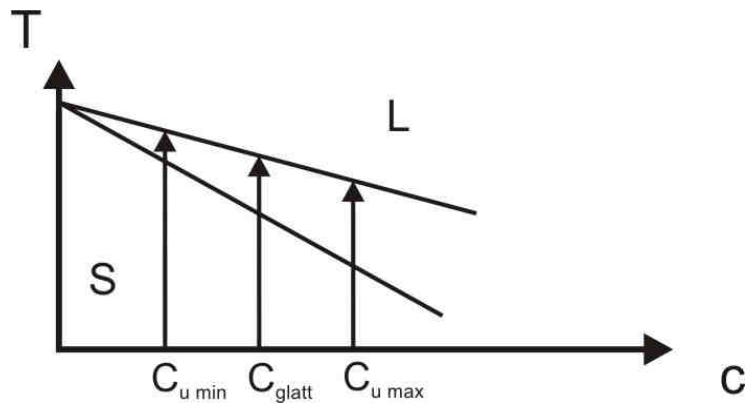


(2) Beim Erstarren schieben Erstarrungsfronten immer Fremdatome vor sich her. Vor der Unregelmäßigkeit sind das weniger, neben der Unregelmäßigkeit sind das mehr (vgl. Schneepflug):



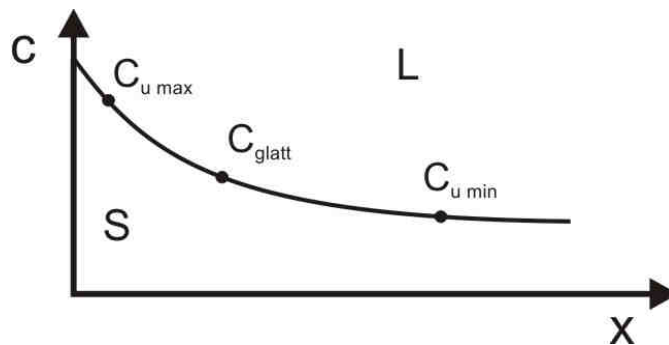
$$C_{u \max} > C_{\text{glatt}} > C_{u \min}$$

(3) Mit dem Zustandsdiagramm können wir aussagen:

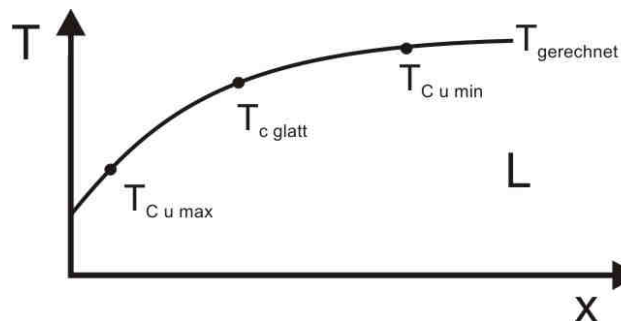


Vor der Spitze der Unregelmäßigkeit hat die Schmelze den höchsten Schmelzpunkt. Neben der Unregelmäßigkeit liegt der Schmelzpunkt am niedrigsten.

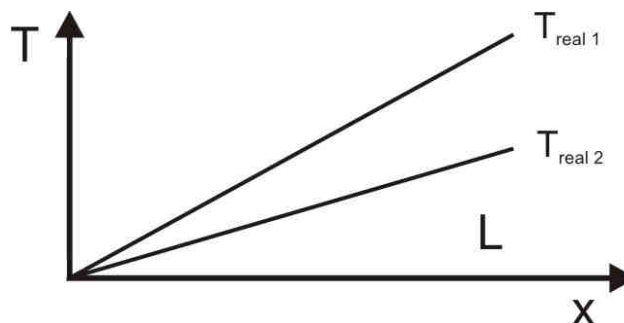
(4) Wir wissen, wie ein Konzentrations-Orts-Verlauf vor der Erstarrungsfront aussieht:



Diesen können wir mit Hilfe des Zustandsdiagramms in einen Gleichgewichtstemperatur-Orts-Verlauf umrechnen:



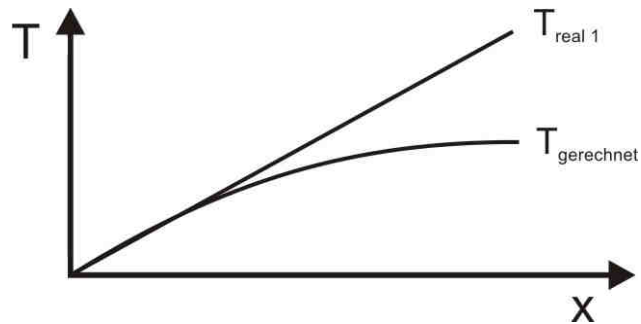
(5) Beim Erstarren liegen reale Temperaturgradienten vor, die man beeinflussen kann:



Wenn man z.B. rechts stärker kühlt, dann verschiebt sich der Temperaturverlauf von $T_{real 1}$ nach $T_{real 2}$.

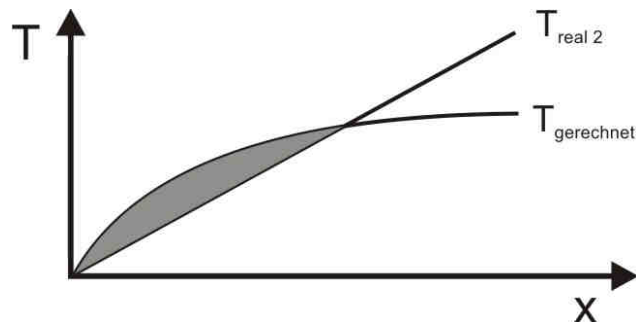
(6) Man muss nun die gerechneten mit den realen Temperaturverläufen vergleichen.

Fall 1:



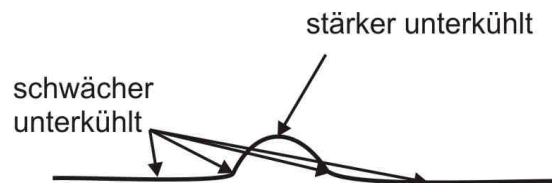
Wir erhalten eine glatte Erstarrungsfront.

Fall 2:



Im gefüllten Bereich ist die Schmelze unterkühlt und hat eine Tendenz schnell zu erstarren.

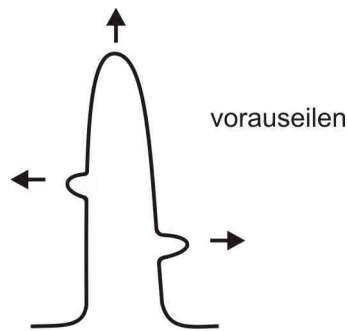
(7) Bei einer Konzentration $c_{u \max}$ ist die Schmelze stärker unterkühlt als wenn eine Konzentration c_{glatt} oder $c_{u \min}$ vorliegt. Dies ist vor unserer Unregelmäßigkeit der Fall:



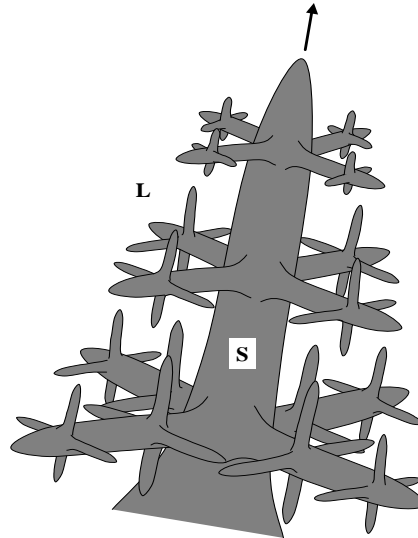
(8) Deshalb schaukelt sich eine zufällige Schwankung auf, unsere Unregelmäßigkeit eilt fingerförmig voraus in die Schmelze:



(9) Dies führt auch zur Bildung von Dendriten, aus den gleichen Gründen:



(10) Dendriten sind sehr interessante elemente einer Erstarrungsstruktur:



13.9) Vergleichen Sie schmelzmetallurgische und pulvermetallurgische Herstellungsverfahren

Schmelzmetallurgie (Gießen):

Vorteile:

Kostengünstig, schnell
Zustand nicht viel Erfahrung vorhanden
sind, können verbunden
werden, keine Seigerungen

Nachteile:

Seigerungen, Lunkerbildung,
Mikroporositäten

Pulvermetallurgie (Sintern):

Vorteile:

Stoffe die im flüssigen
mischbar

Nachteile:

Pulver nicht einfach
herzustellen,
dauert länger als Gießen

A14 Kontrollfragen Kapitel 14: Umwandlung im festen Zustand

14.1) Skizzieren Sie ein isothermes ZTU-Diagramm und begründen Sie die Nasenform:

Die Nasenform verdeutlicht die ablaufenden Vorgänge in Abhängigkeit von der Temperatur:

Oben

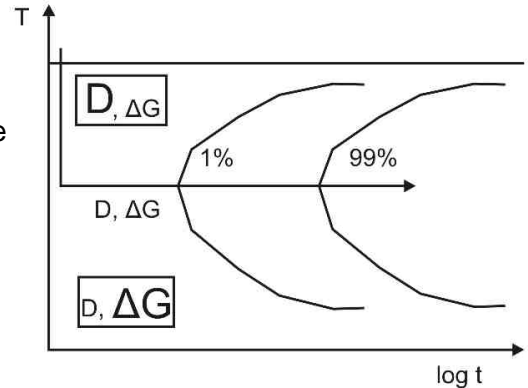
Hohe Temperaturen
Schnelle Diffusion, kleine Triebkraft ΔG für die Umwandlung (bzw. großes ΔG^* für die Keimbildung)
=> Es dauert lange, bis Umwandlung beginnt

Unten

Das System ist stark unterkühlt.
Diffusion ist langsam, Triebkraft für Umwandlung ΔG ist groß (bzw. Keimbildungsarbeit ΔG^* ist klein)
=> Es dauert lange, bis Umwandlung beginnt

Mitte

Optimum: Triebkraft zur Keimbildung ausreichend groß und Diffusion hinreichend schnell
=> Umwandlung beginnt nach kurzen Zeiten



14.2) Wie erfolgt heterogene Keimbildung bei Ausscheidungsprozessen in Festkörpern?

Keimbildung erfolgt an Gitterfehlern des Kristalls, insbesondere an Versetzungen und Korngrenzen

14.3) Was sind metastabile Phasen, was versteht man unter Ausscheidungssequenzen?

Metastabile Phasen:

- keine Gleichgewichtsphasen => also nicht im Zustandsdiagramm angegeben
- entstehen, weil sie sich leichter bilden als stabile Phasen

Ausscheidungssequenzen:

Es bilden sich zuerst metastabile Phasen, bevor die stabilen Phasen entstehen. Beispiel Al-Cu-Legierungen.



14.4) Erläutern der Begriffe Perlit, Bainit und Martensit:

Bei Perlit, Bainit und Martensit handelt es sich um drei Gefügetypen des Werkstoffs Stahl. Ein Stahl mit einer chemischen Zusammensetzung kann durch verschiedene Wärmebehandlungen diese unterschiedlichen Mikrostrukturen einstellen.

Perlit entsteht als Folge einer eutektoiden Reaktion: $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$

Bei der Perlitbildung entsteht ein lamellares Gefüge, mit abwechselnd α - und Fe_3C -Lamellen. Bei der Perlitbildung erfolgt Diffusion von C im unterkühlten γ (Austenit) vor der Umwandlungsfrent.

Kennzeichen: Lamellare Struktur, Unabhängigkeit von der Kristallographie des γ -Korns.

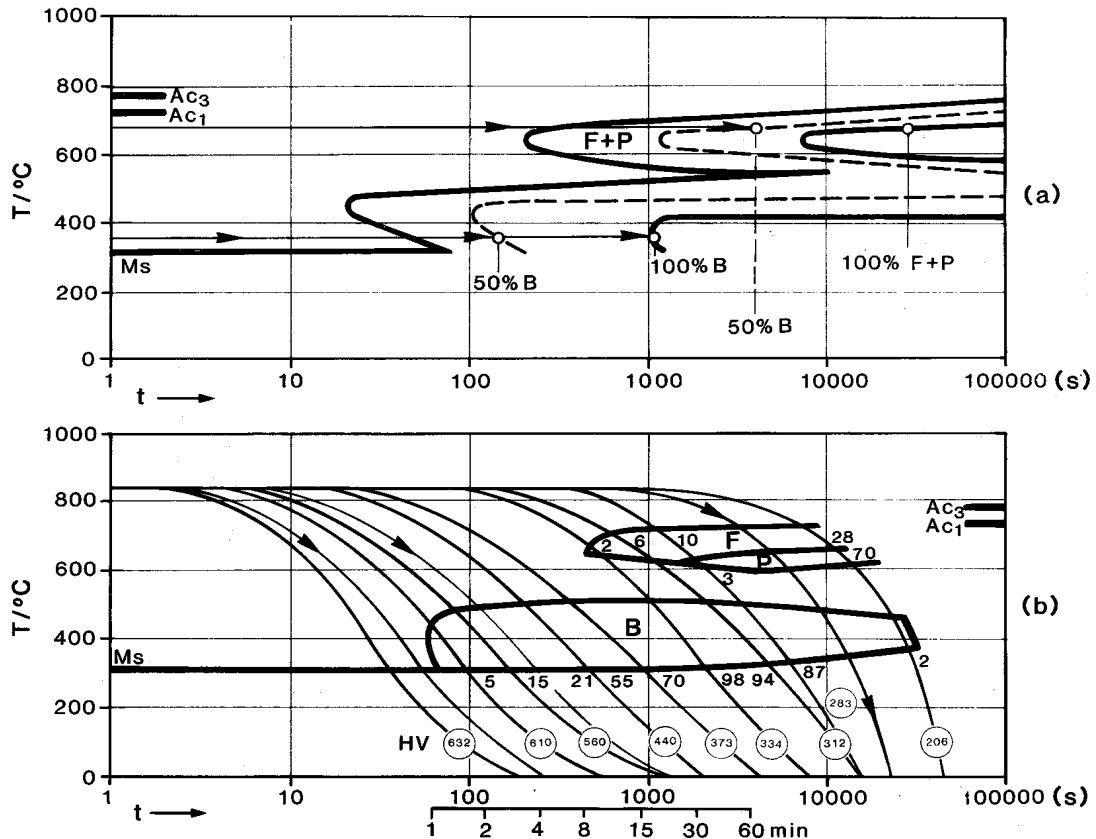
Bainit bildet sich bei tiefen Temperaturen, wo C im unterkühlten γ (Austenit) nicht mehr diffundieren kann. Das Gitter klappt in ein an C übersättigtes α -Gitter um.

Dieses ist (im Gegensatz zu γ) nicht dichtest gepackt. C kann nach dem Umkappen wieder diffundieren, das führt zur Ausscheidung von Karbiden.

Kennzeichen: nadeliges Gefüge mit fein verteilten Karbiden, sind im früheren γ -Korn in bestimmter Weise kristallographisch ausgerichtet.

Martensit: Entsteht durch eine diffusionslose Umwandlung. Das Gitter klappt um. Dabei kommt es zu inneren Verzerrungen, die eine hohe Versetzungsdichte bewirken. Martensit entsteht beim Härten von Stahl und ist für die hohe Härte verantwortlich.

14.5) Zeichnen Sie ein isothermes und ein kontinuierliches ZTU-Diagramm eines untereutektoiden Stahls



Man muss das Zeichnen dieser beiden Diagramme mehrmals üben!

14.6) Wie beeinflusst Cr das Umwandlungsverhalten von niedriglegiertem Stahl?

Cr verzögert die Umwandlung in der Perlitstufe. Die Nasen des ZTU-Diagramms werden nach rechts, zu längeren Zeiten verschoben.

Grund: Aus dem System müssen sich Karbide ausscheiden. Cr_3C ist stabiler als Fe_3C , deshalb entsteht kein Fe_3C . Und in typischen Stählen hat man niedrige Chromgehalte, so dass Cr diffundieren muss. Cr-Atome sind groß und diffundieren langsam. Deshalb dauert es länger, bis die Umwandlung beginnt, als im Falle des binären Systems Fe-C.

14.7) Wie entsteht Perlit?

- Bei hohen Temperaturen aus dem α -Fe
- Keimbildung des Perlits beginnt an den γ - Korngrenzen (Fe_3C -Keim bildet sich zuerst)
- Die Perlitumwandlung erfolgt unabhängig von der Kristallographie des Austenitkorns
- Gekoppeltes Wachstum von Fe_3C - und α -Lamellen
- C diffundiert im Austenit vor der Umwandlungsfront

Bei *hohen* Temperaturen: grobstreifiger Perlit

Bei *niedrigen* Temperaturen: feinstreifiger Perlit

14.8) Wie entsteht Bainit?

- Temperatur ist niedrig, Diffusion von C im unterkühlten γ - Eisen nicht mehr möglich, Perlit kann nicht mehr gebildet werden, es entsteht Bainit
- durch Umklappen entsteht an C übersättigtes α -Fe an den Korngrenzen/Gitterstörstellen
- in diesen erfolgt eine feine Ausscheidung von Karbiden
- Bainitumwandlung orientiert sich an der Kristallographie des Austenitkorns

14.9) Was ist Martensit?

- entsteht bei sehr schneller Abkühlung, keine Zeit für Perlit- oder Bainitbildung
- Umklappen kleiner Gitterbereiche, entstehen „tetragonal verzerrter“ Zellen, in denen Kohlenstoff eingeklemmt ist
- hohe Versetzungsdichte
- nadelartiges Gefüge mit hoher Härte, leider spröde

14.10) Erläutern Sie für einen niedriglegierten Stahl den Zusammenhang zwischen Wärmebehandlung, Mikrostruktur und Härte.

Durch Wärmebehandlungen können die Mikrostrukturen und Härten eingestellt werden.

Langsames Abkühlen: Ferrit+Perlit (weich)

Schnelleres Abkühlen: Bainit (härter)

Sehr schnelles Abkühlen: Martensit (sehr hart und spröde)

Für größere Bauteile bedeutet das Probleme bei der Durchhärtung, d.h. es ist nicht einfach über dem gesamten Bauteilquerschnitt ein gleichmäßiges Gefüge und konstante Härtewerte einzustellen.

A15 Kontrollfragen Kapitel 15: Korrosion

15.1) Was ist Korrosion?

Ein chemischer Vorgang, bei dem die Lebensdauer eines Werkstoffs durch äußere Einflüsse von der Oberfläche her erniedrigt wird. Korrosion kann in wässrigen Lösungen (Fahrzeugkarosserie, Maschendrahtzaun) und in heißen Gasen (Auspufftopf, Turbinenschaufel) erfolgen.

15.2) Was ist ein elektrochemisches Element (elektrochemische Zelle)?

Ein elektrochemisches Element bzw. eine elektrochemische Zelle besteht aus Glasgefäßen mit flüssigen Elektrolyten, in die zwei Elektroden eintauchen, die so elektrisch verbunden sind, dass man die elektrische Spannung und den elektrischen Strom messen kann. Dieser wird durch eine Triebkraft ΔG erzwungen, die mit einer elektrochemischen Reaktion zusammenhängt. Im Elektrolyten erfolgt der Stromtransport durch Ionen. Positive Ionen fließen zur negativen Kathode, aus der Elektronen austreten. Negative Ionen bewegen sich zur positiven Anode, die Elektronen aufnimmt. An der Kathode können positive Ionen entladen werden (z.B. $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$). Im Fall einer metallischen Anode, kann das Metall in Lösung gehen (z.B. $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$). Die Kathode ist eine Quelle negativer, die Anode positiver Ladungen.

15.3) Was ist eine Anode, was ist eine Kathode?

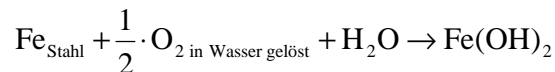
Siehe Beschreibung von Anode und Kathode in Antwort zu 15.2.

15.4) Was sind die wichtigsten Korrosionsreaktionen (anodischer Teilreaktion, kathodischer Teilreaktion und Bruttoreaktion)?

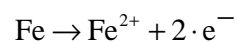
Die wichtigsten Korrosionsreaktionen sind das Rosten von Eisen (bzw. niedriglegierter Stähle) und das Zundern des Eisens bei hoher Temperatur (z.B. Auspufftopf):

Sauerstoffkorrosion in wässrigen Lösungen:

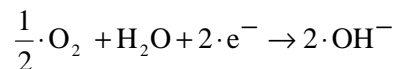
Bruttoreaktion:



Anodische Teilreaktion:



Kathodische Teilreaktion:



15.5) Was ist Passivität?

Unter der Passivität eines Metalls versteht man seine Fähigkeit, in korrodierenden Medien eine hauchdünne (2-10nm), dichte und schützende Deckschicht zu bilden, die keine weitere Korrosion zulässt.

15.6) Wenn man Cr zu Fe legiert, verbessert man die Beständigkeit gegen Hochtemperaturkorrosion. Warum?

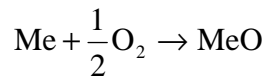
Das Cr diffundiert nach außen. Dort reagiert es mit Sauerstoff und bildet eine Cr_2O_3 -Schicht. Cr_2O_3 ist nicht fehlgeordnet, es enthält keine Leerstellen. Deshalb kann in Cr_2O_3 auch bei hoher Temperatur kaum Diffusion erfolgen. Die Cr_2O_3 Schicht (Dicke < 1µm) schützt deshalb die darunter liegende Legierung.

15.7) Was heißt Korrosionsgerechtes Konstruieren?

Man versteht darunter einen Konstruktionsprozess, in welchem man um die Gefahr der Korrosion weiß und Gegenmaßnahmen vorsieht. Man vermeidet die Möglichkeit, dass sich Wasser ansammeln kann.

15.8) Was ist die Rolle des Gleichgewichtssauerstoffpartialdrucks bei der Hochtemperaturkorrosion?

Bei hohen Temperaturen können Metalle mit Sauerstoff reagieren, und Oxide bilden:



Für diese Reaktion gibt es ein Gleichgewicht, dass durch das Massenwirkungsgesetz bestimmt wird.

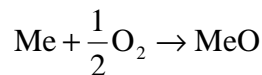
$$\frac{a_{\text{MeO}}}{a_{\text{Me}} \cdot p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}} = K(T)$$

$a_{\text{MeO}} = a_{\text{Me}} = 1$ (Die Aktivität von festen Stoffen ist 1!)

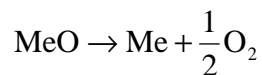
Die Konstante $K(T)$ kann man in Tabellenwerten nachsehen. Damit kann man einen Sauerstoffpartialdruck $p_{\text{O}_2}^*$ ausrechnen, der diesem Gleichgewicht entspricht:

$$p_{\text{O}_2}^* = \frac{-1}{K(T)^2}$$

Wenn der herrschende Sauerstoffpartialdruck größer ist, als der Gleichgewichtssauerstoffpartialdruck ($p_{\text{O}_2} > p_{\text{O}_2}^*$) erfolgt Oxidation:



Wenn der herrschende Sauerstoffpartialdruck kleiner ist als der Gleichgewichtssauerstoffpartialdruck ($p_{\text{O}_2} < p_{\text{O}_2}^*$) erfolgt Reduktion:



15.9) Wie sieht das Wachstumsgesetz einer durch Diffusion wachsenden Oxidschicht bei Hochtemperaturkorrosion aus?

Die Schichtdicke Δx nimmt proportional mit \sqrt{t} zu. Parabolisches Wachstumsgesetz: $\Delta x \sim \sqrt{t}$

15.10) Nennen sie von der nassen Korrosion gefährdete Bauteile

- Autokarosserien an feuchter Luft
- Schiffe, Hafenanlagen (im Meerwasser)
- Dosen (Lebensmittel und Gesundheitsbereiche)
- Dampferzeuger, Sanitäranlagen

15.11) Welche Elemente legiert man metallischen Hochtemperaturwerkstoffen zu, um vor Hochtemperaturkorrosion zu schützen?

Aluminium, Chrom und Nickel

15.12) Was heißt gut schützende Deckschicht?

Eine gut schützende Deckschicht trennt die Reaktionspartner und lässt keine weitere Reaktion zu. Sie kann sich schnell bilden und ist wenig fehlgeordnet, d.h. sie verbietet Diffusion. Im Falle der nassen Korrosion in wässrigen Lösungen sind Passivschichten (Dicke 2-10nm) schützende Deckschichten. Diese unterscheiden Elektronenleitung. Im Falle der Hochtemperaturoxidation bilden wenig fehlgeordnete Oxide schützende Deckschichten (Dicke $\approx 1 \mu\text{m}$). Diese haben kaum Leerstellen und unterbinden die Diffusion von Ionen durch die Schicht.

15.13) Wo spielt die Hochtemperaturkorrosion eine Rolle?

Auspufftopf, Heizspiralen, Müllverbrennungsanlagen, Flugtriebwerke, Turbinenschaufel, Heißdampfleitungen, Wärmetauscher

15.14) Leiten Sie das parabolische Zeitgesetz ab.

Wie kommt es zustande und was besagt es?

Ansatz:

$$\frac{\partial \Delta x}{\partial t} \sim \frac{1}{\Delta x}$$

D.h. in Worten: Die Schicht wächst umso langsamer, je dicker sie ist.

Umformen:

$$\Delta x \cdot \partial \Delta x \sim \partial t$$

Integration zwischen 0 und Δx , bzw. 0 und t :

$$\int_0^{\Delta x} \Delta x \partial \Delta x = \int_0^t \partial t$$

$$\frac{\Delta x^2}{2} = \text{const.} \cdot t$$

$$\Rightarrow \Delta x \sim \sqrt{t}$$

Das Gesetz drückt aus, dass Schichten anfänglich schnell und dann immer langsamer Wachsen. Nach 4-facher Zeit sind sie doppelt so dick, nach 9-facher Zeit 3-mal so dick usw.

A16 Kontrollfragen Kapitel 16: Physikalische Eigenschaften

16.1) Leiten Sie die Einheit des spezifischen elektrischen Widerstandes ab.

Es gilt:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Der elektrische Widerstand R eines Drahtes in Ω ist umso höher, je größer sein spezifischer Widerstand ρ ist und je länger er ist. Der Widerstand R ist außerdem umgekehrt proportional zum Querschnitt des Drahtes (größere Querschnitte erlauben einfacheren Stromtransport). Für den spezifischen Widerstand gilt:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}$$

Als Einheit ergibt sich:

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \cdot \text{m}$$

Technisch wird oft die Einheit

$$[\rho] = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

verwendet.

16.2) Wie ändert sich der Widerstand des Metalls mit der Temperatur?

Der Widerstand nimmt linear mit steigender Temperatur zu (wegen stärker werdenden Gitterschwingungen).

Ab 20°C gilt:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (t - 20^\circ\text{C})]$$

t = Temperatur

α_{20} = Temperaturkoeffizient

16.3) Wie unterscheiden sich Leiter, Halbleiter und Nichtleiter? Was ist der physikalische Hintergrund?

Leiter, Halbleiter und Nichtleiter unterscheiden sich in ihrer elektrischen Leitfähigkeit. Leiter leiten gut, Nichtleiter leiten nicht. Und im Falle von Halbleitern ist unter bestimmten Bedingungen elektrische Leitung möglich. Wir diskutieren das auf der Grundlage des Bändermodells. Bei Metallen überschneiden sich Valenz- und Leitungsband und Valenzelektronen sind gleichzeitig Leitungselektronen. Schon die alte Elektronengasttheorie der Metalle (1900) konnte die gute Leitfähigkeit der Metalle erklären. Äußere Elektronen gehören dem Metallkristall als ganzes an, sie sind nicht lokalisiert und leicht beweglich. Im Falle von Nichtleitern gibt es eine verbotene Zone zwischen Valenzband und Leitungsband und es ist nicht möglich Elektronen durch Energiezufuhr vom Valenzband ins Leitungsband zu bringen.

Bei Halbleitern ist die Bandlücke zwischen Valenzband und Leitungsband klein und kann thermisch (' $k \cdot T$ ') überwunden werden. Im Falle von Halbleitern nimmt der elektrische Widerstand mit steigender Temperatur ab, weil mehr Elektronen durch thermische Aktivierung ins Leitungsband gelangen.

16.4) Beschreiben Sie das Phänomen der Supraleitung

Das Phänomen der Supraleitung besteht darin, dass ein Werkstoff beim Abkühlen bei der Sprungtemperatur seinen elektrischen Widerstand vollständig verliert.

16.5) Wie entstehen thermische Spannungen?

Wenn es in einem Bauteil Temperaturunterschiede gibt, resultieren daraus

thermische Spannungen. Das kann statisch erfolgen, in Fällen wo es z.B. außen immer kalt und innen immer warm ist. Thermische Spannungen können aber auch dynamisch auftreten. Wenn in der Energietechnik ein heißes Arbeitsmedium (z.B. Brenngas) auf ein Bauteil (z.B. Turbinenschaufel) trifft, steigt die Oberflächentemperatur an. Im Bauteilinneren ist es aber noch kalt. Dies erzeugt eine thermische Spannung, die abklingt, wenn das Bauteil durchwärmt. Die thermische Spannung klingt umso schneller ab, je größer die thermische Leitfähigkeit eines Materials ist. Wichtige Beziehungen sind:
Thermische Ausdehnung:

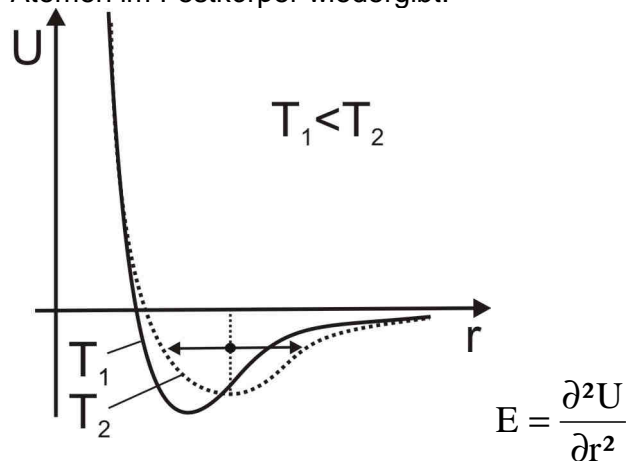
$$\varepsilon_{th} = \alpha_{th} \cdot \Delta T$$

Eine Druckspannung σ entsteht, wenn man die thermische Ausdehnung ε_{th} vollständig unterdrückt:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{th} = E \cdot \alpha_{th} \cdot \Delta T$$

16.6) Wie hängt der Elastizitätsmodul von der Temperatur ab?

Mit steigender Temperatur nimmt der E-Modul ab. Der E-Modul entspricht der zweiten Ableitung der Energie-Ortskurve, die die Wechselwirkung zwischen zwei Atomen im Festkörper wiedergibt:



Atome im Gitter schwingen um ihre Gleichgewichtslage. Bei Temperaturerhöhung nimmt die Amplitude der Schwingung zu ($\longleftrightarrow \Rightarrow \longleftrightarrow$). Die $U(r)$ -Kurve ist nur in erster Näherung eine Parabel. In Wirklichkeit steigt sie zu kleineren r -Werten (Annäherung der Atome) steiler an als zu größeren r -Werten (Entfernung der Atome). Entsprechend verschiebt sich bei Temperaturerhöhung der Gleichgewichtsabstand zu größeren r (= thermische Ausdehnung). Gleichzeitig verändert sich die $U(r)$ -Kurve so, dass ihre zweite Ableitung schwächer wird. Deshalb sinkt der E-Modul mit steigender Temperatur.

16.7) Wie ist die thermische Leitfähigkeit definiert?

Die thermische Leitfähigkeit ist durch ein Gesetz definiert, das den Wärmefluss j_{th} (Energie pro Fläche und Zeit) mit dem Temperaturgradienten in Beziehung setzt:

$$j_{th} = -\lambda_{th} \cdot \frac{dT}{dx}$$

λ_{th} ist die thermische Leitfähigkeit.

16.8) Diskutieren Sie qualitativ den Zusammenhang zwischen E - Modul, thermischer Leitfähigkeit und thermischer Spannungen.

Bei Temperaturerhöhung ΔT erfolgt thermische Ausdehnung $\varepsilon_{th} = \alpha_{th} \cdot \Delta T$.

Ist diese Ausdehnung behindert, entstehen thermische Spannungen $\sigma_{th} = \varepsilon_{th} \cdot E$.

Höhere E-Module führen hier zu höheren Spannungen. Im Falle einer dynamisch

anwachsenden/abklingenden thermischen Spannung ist eine hohe Wärmeleitfähigkeit günstig, weil thermische Spannungsspitzen schneller (durch Temperatenausgleich) abgebaut werden als im Falle niedriger Wärmeleitfähigkeit.

16.9) Was ist Magnetismus?

Eigenschaft eines Materials, eine Kraft auf magnetisierte oder magnetisierbare Gegenstände und elektr. Ladungen auszuüben.

16.10) Gibt es einen Zusammenhang zwischen thermischer und elektrischer Leitfähigkeit?

Für Metalle gilt: mit steigender elektrischer Leitfähigkeit nimmt auch die thermische Leitfähigkeit zu. Allgemein leiten gute elektrische Leiter auch die Wärme gut. Nicht alle guten Wärmeleiter sind gute elektrische Leiter.

16.11) Warum sind austenitische Stähle im Hinblick auf thermische Spannungen weniger günstig zu bewerten, als ferritische Stähle?

Austenitische Stähle haben eine größere thermische Ausdehnung und eine kleinere Wärmeleitfähigkeit als ferritische Stähle. Deshalb steigen bei der Unterdrückung der thermischen Ausdehnung Spannungen stärker an. Dynamische Effekte sind wegen der schlechteren Wärmeleitfähigkeit (langsames Abklingen) auch stärker ausgeprägt.

16.12) Nennen Sie Beispiele für thermische Spannungen in der Technik

- Innengekühlte Turbinenschaufel
- Fusionsreaktor mit Wasserkühlung

16.13) Wie hängt Ferromagnetismus vom Werkstoffgefüge ab?

Beim Anlegen eines Magnetfeldes an ein ferromagnetisches Material, wachsen günstig orientierte Weißsche Bezirke. Weißsche Bezirke sind kleine Bereiche einheitlichen magnetischen Moments, die durch Blochwände getrennt sind. Beim Wachstum günstig orientierter Weißscher Bezirke bewegen sich die Blochwände. Diese Bewegung wird durch Gitterfehler (Versetzungen, Korngrenzen) behindert. Ein ferromagnetischer Werkstoff mit hoher Versetzungsdichte ist deshalb schwerer zu magnetisieren.

16.14) Wo setzt man weich- bzw. hartmagnetische Werkstoffe ein?

Weich:

In Relais oder in Trafoblechen.

Hart:

In Dauermagneten für die Stromerzeugung (Generatoren), in Fahrraddynamos und für Dauermagnete aller Art.

A17 Kontrollfragen Kapitel 17: Mechanische Eigenschaften

17.1) Wie reagiert ein Werkstoff auf eine mechanische Belastung?

- Zuerst mit Formänderung, bei zunehmender Belastung Bruch.

17.2) Wie kann man aus dem einachsigen Zugversuch auf mehrachsige Spannungszustände rückschließen?

- Umrechnung der mehrachsigen Spannungszustände mit Hilfe von geeigneten Spannungshypothesen (Mises, Tresca) in eine einachsige Vergleichsspannung
- Vergleichsspannung kann dann mit Daten aus einachsigem Zug verglichen werden

17.3) Was verstehen wir unter dem allgemeinen Begriff Festigkeit eines Werkstoffs?

- Widerstand, den ein Werkstoff aufgrund seiner atomaren Struktur und aufgrund seines Gefüges der Formänderung bzw. dem Bruch entgegensetzt.

17.4) Wie ist der Zusammenhang zwischen der technischen Dehnung/Spannung und der wahren Dehnung/Spannung?

Technische Werte für Spannung und Dehnung (σ_0 und ε_0) beziehen sich auf Ausgangsgeometrie, wahre Werte (σ und ε) beziehen sich auf die aktuelle Längenänderung und die aktuelle Länge.

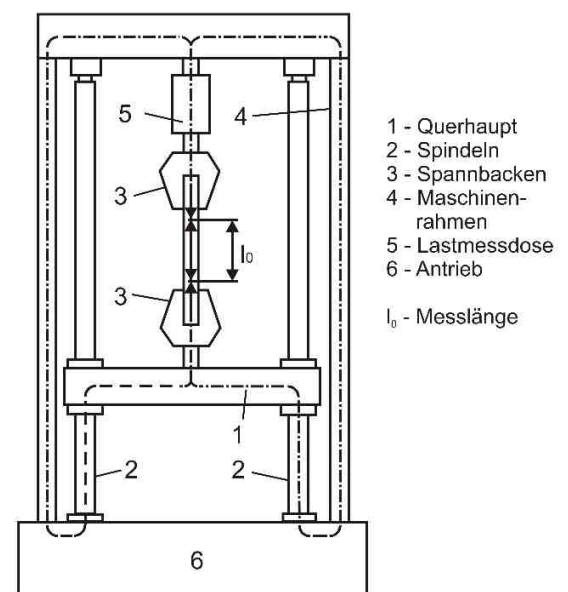
Technische und wahre Werte können ineinander umgerechnet werden:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \frac{l}{l_0} = \sigma_0 \cdot \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \sigma_0 \cdot (1 + \varepsilon_0) = \sigma_0 \cdot \exp \varepsilon$$

$$\varepsilon = \int_0^{\varepsilon} d\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right) = \ln (1 + \varepsilon_0)$$

17.5) Erläutern des Prinzip des einachsigen Zugversuchs

- Probe in Spannbacken der Prüfmaschine einspannen und bei konstanter Querschnittsgeschwindigkeit bis zum Bruch verformen
- die durch den Antrieb erzeugten Kräfte werden mittels der Einspannköpfe auf die Probe übertragen
- in den dabei entstehenden Kraftschluss ist eine elektronische Kraftmessvorrichtung eingeschaltet, welche auf der Basis von Dehnungsmessstreifen arbeitet und Kräfte misst
- zur Messung der Verlängerung der Probe dienen induktive oder kapazitive Wegegeber, die für genaue Messungen unmittelbar an der Probe befestigt werden
- Aufzeichnung des Kraft-Verlängerungs-Diagramms erfolgt mit einem PC, der auch die Maschine steuert



17.6) Was sind die E-Module von Stahl und Aluminium?

Alu	71 GPa
Stahl	210 GPa

17.7) Was ist der Zusammenhang zwischen E-Modul, Gittersteifigkeit, U(r)-Kurve und Schmelzpunkt?

- E-Modul = Maß für die Gittersteifigkeit.
- Je \uparrow der E-Modul ist, umso schwieriger ist es, ein Atom aus seiner Gleichgewichtslage aus zulenken
- Die Krümmung der U(r) - Kurve (zweite Ableitung) ist ein Maß für die Steifigkeit eines Werkstoffes und bestimmt damit den E-Modul ($E \sim d^2U/dr^2$)

17.8) Wie lauten die Gesetze von Hooke und von Ludwik?

Das Hooksche Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Das Ludwicksche Gesetz:

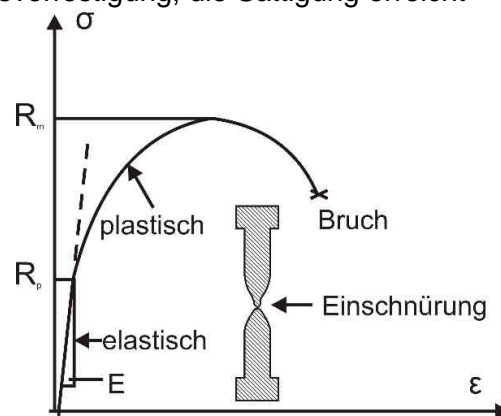
$$\sigma = K \cdot \varepsilon^m, m < 1$$

17.9) Was ist der Grund für das Maximum in der technischen Spannungs-Dehnungs-Kurve?

zwei gegenläufige Prozesse:

- 1) Physikalisch gibt es eine Dehnungsverfestigung, die Sättigung erreicht
- 2) Geometrisch gibt es eine Entfestigung, der Probenquerschnitt nimmt ab

→ Wenn nun Dehnungsverfestigung die geometrische Entfestigung nicht mehr kompensieren kann, ist ein Maximum zu beobachten. Hier beginnt die Probe einzuschnüren (Übergang: Gleichmaßdehnung - Einschnürdehnung)

**17.10) Was sind die Träger der plastischen Verformung; wie kommt es zum spröden Bruch?**

Versetzungen sind Träger der plastischen Verformung. Sie tragen gemäß der

Beziehung $\dot{\varepsilon} = \rho \cdot b \cdot \bar{v}$ bei ($\dot{\varepsilon}$ - Verformungsgeschwindigkeit, ρ -

Versetzungsdichte, b - Burgersvektor, \bar{v} mittlere Versetzungsgeschwindigkeit)

Sprödbbruch:

- Trennbruch ist zu beobachten, wenn in einem Körper die Trennfestigkeit von der größten Zugspannung erreicht wird, ehe die Schubspannung den Gleitwiderstand überschreitet
- Risse / Kerben begünstigen den Sprödbbruch
- Bruch setzt plötzlich und ohne warnende Verformungen ein

17.11) Was passiert, wenn man während eines Zugversuchs (i) im elastischen, (ii) im plastischen Bereich entlastet und dann erneut Belastet?

Im elastischen Bereich:

- Aufzwingen einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit erzwingt zunächst einen linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung (Hooksches Gesetz)
 - Bei Entlastung geht der Werkstoff in seinen Ausgangszustand zurück (ohne bleibende Formänderung)
- reversibel

Im plastischen Bereich:

- Beginn im elastischen Bereich, bei R_p dann Beginn des plastischen Fließens
 - der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung ist nicht mehr linear
 - es bleibt nach der Entlastung eine plastische Verformung
 - tritt erneute Belastung auf, liegt der Spannungswert R_p des schon verfestigten Materials höher, nämlich genau dort, wo man im ersten Belastungszyklus die Verformung abgebrochen hat
- irreversibel

17.12) Nennen Sie verschiedene Arten mechanischer Werkstoffbelastung!

- Ruhende Belastung, statische Belastung
- Schwellende Belastung
- Schwingende, wechselnde Belastung

17.13) Wie können Kräfte zeitlich wirken?

Kräfte können in verschiedener Weise zeitlich wirken. Bei statischer Belastung (konstantes Gewicht auf Unterlagen) bleibt die Belastung als Funktion der Zeit konstant. Bei schwellender Belastung (Einsteigen von Fahrgästen in einen Linienbus) nimmt die Belastung als Funktion der Zeit zu. Im Falle einer Ermüdungsbelastung können sich Kräfte zyklisch ändern. Dies kann in einer sinusförmigen Weise erfolgen (Fahrzeugachse). Das kann aber auch in komplexer Weise stattfinden (Flugzeugflügel bei unruhigen Luftverhältnissen).

17.14) Was ist eine Vergleichsspannung?

Sie stellt einen Spannungswert dar, den man direkt mit einachsigen Versuchsdaten vergleichen kann. Sie erlaubt einen mehrachsigen Spannungszustand (Komponente im Betrieb) auf der Grundlage von einachsigen Werkstoffdaten (Zugprobe) zu beurteilen.

A18 Kontrollfragen Kapitel 18: Versetzungen

18.1) Was sind die Hauptmerkmale von Stufen- und Schraubenversetzungen?

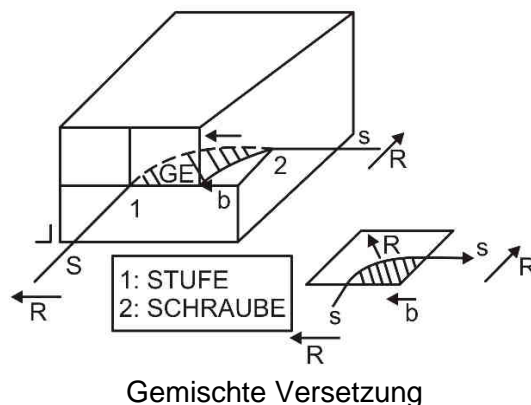
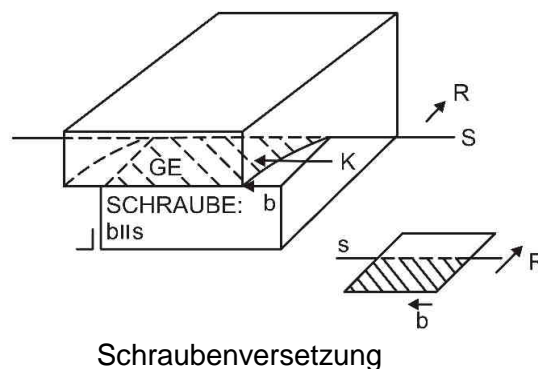
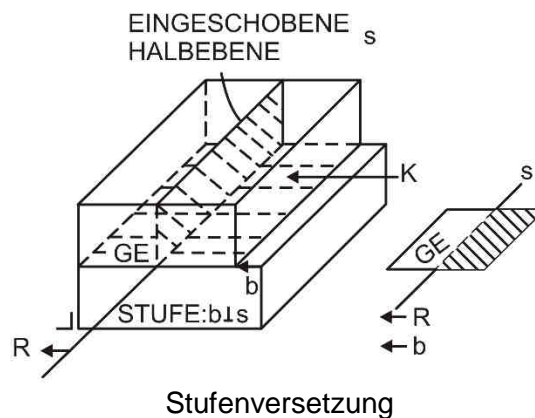
Was sind gemischte Versetzungen? (Zeichnungen)

Versetzungen sind eindimensionale Kristallfehler, die abgeglittene von noch nicht abgeglittenen Bereichen trennen. Der Burgersvektor stellt den Elementarschritt der plastischen Verformung dar.

Stufenversetzung: Burgersvektor senkrecht zur Versetzungslinie, Gleitung erfolgt parallel zum Burgersvektor und parallel zur Bewegungsrichtung

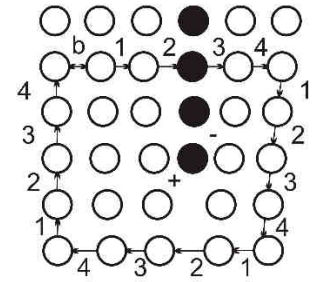
Schraubenversetzung: Burgersvektor parallel zur Versetzungslinie, Gleitung erfolgt parallel zum Burgersvektor und senkrecht zur Bewegungsrichtung der Versetzung.

Gemischte Versetzungen weisen an einigen Stellen reinen Stufen- und an anderen reinen Schraubencharakter auf. Im allgemeinen Fall besitzen sie jedoch einen gemischten Charakter, den man in Beiträgen gedachter Schrauben und Stufenversetzungen zerlegen kann.

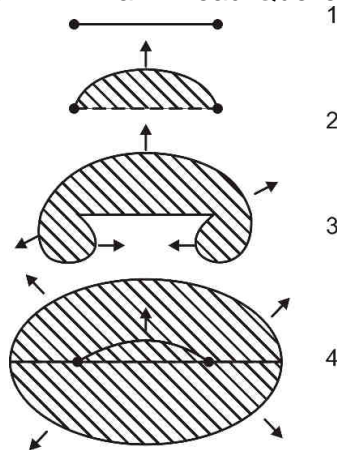


18.2) Was ist ein Burgersumlauf?

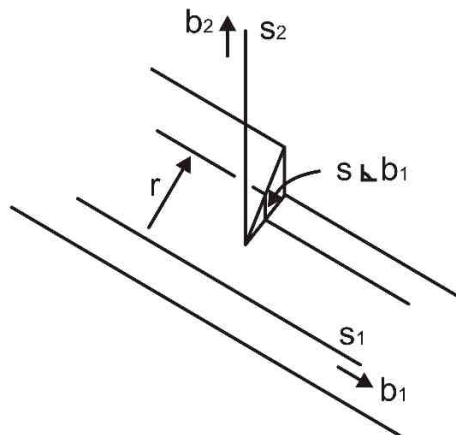
- Man umgeht den Versetzungskern in einem geeigneten Abstand. Dabei führt man gleiche Schrittzahlen (1 Schritt - 1 Atomabstand im Gitter) in alle vier Richtungen durch.
- Differenz zwischen Anfangs- und Endpunkt eines Burgersumlaufs bestimmt den Burgersvektor

**18.3) Wie können Versetzungen sich vermehren?**

Durch Versetzungsquellen z.B. Frank-Read-Quelle

**18.4) Warum gibt es einen Bremseffekt, wenn zwei Schraubenversetzungen sich schneiden?**

Das entstehende Linienelement s , muss seine Gleitebene verlassen, wenn es seiner Hauptversetzungslinie folgen soll, wodurch die Hauptversetzungslinie gebremst wird. Beim Schneiden zweier Schraubenversetzungen entsteht ein Sprung.



Dieser hat Stufencharakter und sein Burgersvektor zeigt nicht in die Bewegungsrichtung der Schraube. Deshalb kann der Sprung (engl. jog) der Schraube nicht durch Gleitung erfolgen. Das behindert die Bewegung der Schraube.

18.5) Erläuterung der Spannungsfelder um Stufen- und Schraubenversetzungen.Stufenversetzung:

- es existieren Normalspannungen und Schubspannungen
- Oberhalb der eingeschobenen Halbebene herrscht maximale Drucknormalspannung
- Unterhalb der eingeschobenen Halbebene herrscht maximale

Zugnormalspannung

- $\sigma(r, \varphi) = \text{const.} \cdot \frac{G \cdot b}{r} \cdot f(\varphi)$
- oberhalb und unterhalb des Versetzungskerns herrschen maximale Normalspannungen, rechts und links findet man maximale Schubspannungen

Schraubenversetzung

- es gibt nur Schubspannungen (die Winkelabhängigkeit entfällt)

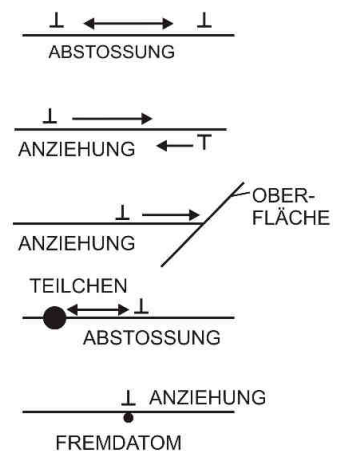
18.6) Warum gibt es nur ganz bestimmte Gleitsysteme?

Gleitsysteme werden durch Gleitrichtung und Gleitebene bestimmt. Gleitebenen sind meist Ebenen mit hoher Atomdichte, und Gleitrichtungen sind meist dichtest gepackte Richtungen.

18.7) Wie können Versetzungen wechselwirken?

Versetzungen können sich:

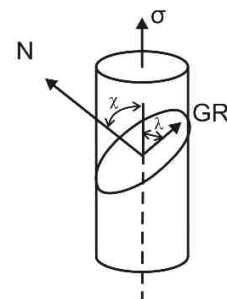
- gegenseitig auslöschen (Stufenversetzungen müssen in der gleichen Gleitebene gleiten)
- gegenseitig abstoßen/anziehen
- gegenseitig behindern (wenn sich die Versetzungen schneiden)
- mit Teilchen abstoßen
- mit Fremdatomen anziehen



18.8) Schmid'sches Schubspannungsgesetz und Geometrie der Gleitung

$$\tau = \sigma \cdot \cos(\chi) \cdot \cos(\lambda) < 1$$

- 1) Wenn die Gleitebene parallel zur Spannungsrichtung steht, gibt es keine Gleitung
- 2) Wenn die Gleitebene senkrecht zur Spannungsrichtung steht, erfolgt keine Gleitung



18.9) Grundgleichungen der Versetzungsbewegung bei Raumtemperatur?

Es gibt drei Grundgleichungen der Versetzungsbewegungen:

- 1) Orowangleichung: $\dot{\epsilon} = \rho \cdot b \cdot v$
Verformungsgeschwindigkeit,

$\dot{\epsilon}$:

ρ : Versetzungsdichte,
 b : Burgersvektor,
 v : mittlere

Versetzungsgeschwindigkeit

- 2) Versetzungsgeschwindigkeit: $v = v_0 \cdot (\sigma - \sigma_i)^n$

- hängt nicht nur von der angelegten Spannung σ , sondern auch von der Differenz von σ und einer inneren Gegenspannung σ_i ab. Die innere Gegenspannung stellt den Widerstand des Festkörpers gegen Verformung

dar und erhöht sich, wenn z.B. die Versetzungsdichte ansteigt.

(3) Innere Spannung: $\Delta\sigma = \sigma_i = G \cdot b \cdot \sqrt{\rho}$

- Spannungsanstieg bei Verfestigung erfolgt proportional zur Wurzel aus der Versetzungsdichte

18.10) Wie kann man ein Material härten? Welche Härtungsbeiträge sind bei hohen Temperaturen noch wirksam?

- Kaltverformen, $\Delta\sigma \sim \sqrt{\rho}$ (ρ -Versetzungsdichte)
- Zulegieren von Fremdatomen, $\Delta\sigma \sim \sqrt{c}$ (c -Konzentration von Fremdatomen)
- Härtung durch Korngrenzen, $\Delta\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{L}}$ (L -Korngröße)
- Teilchenhärtung, $\Delta\sigma \sim \frac{G \cdot b}{d}$ (d -Teilchenabstand)

Nur die Teilchenhärtung stellt bei hohen Temperaturen einen wirksamen Härtungsmechanismus dar.

A19 Kontrollfragen Kapitel 19: Bruchmechanik

19.1) Was sind die Aufgaben der Bruchmechanik?

Die Bruchmechanik muss folgende Fragen beantworten können:

- (1) Wie groß ist die kritische Risslänge?
- (2) Welche Risslängen können toleriert werden?
- (3) Wie lange braucht ein Riss, um von einer Ausgangslänge auf eine kritische Risslänge zu wachsen?
- (4) Welche Oberflächengüte muss am Einsatzbeginn eines Bauteils vorliegen?
- (5) Wie oft muss ein Bauteil einer Inspektion (Risslänge) unterworfen werden?

19.2) Wie lautet das Bruchkriterium nach Griffith?

Die bei Rissausbreitung pro Risslänge freigesetzte Energie $\Delta U_E = \frac{\pi \cdot a^2 \sigma^2}{E}$

muss größer als die aufzuwendende Oberflächenenergie $\Delta U_S = 4 \cdot a \cdot \gamma$ sein, oder:

$$\frac{d(\Delta U_E)}{2 \cdot da} \geq \frac{d(\Delta U_S)}{2 \cdot da}$$

Daraus ergibt sich:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot a}}$$

19.3) Was ist die Rissausbreitungskraft G und der Spannungsintensitätsfaktor K_{IC} ?

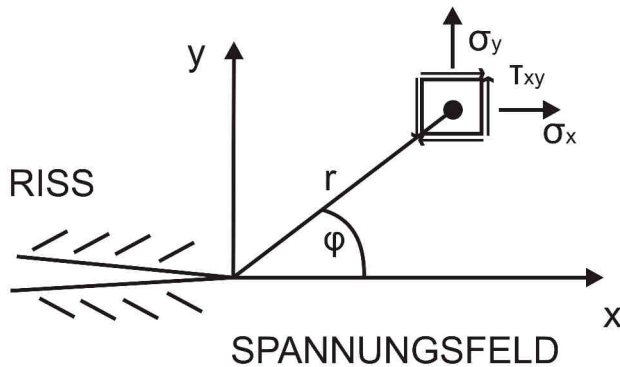
Die Rissausbreitungskraft G erhält man für einen ebenen Dehnungszustand nun nach:

$$G = \frac{d(\Delta U_E)}{2 \cdot da} = \frac{\pi \cdot a \cdot \sigma^2}{E}$$

19.4) Wie sehen die Spannungsfelder um eine Rissspitze aus?

- Intensität des Spannungsfeldes ist überall ~ zum Lade- K_I
- deshalb heißt K_I auch der Spannungsintensitätsfaktor. Das Spannungsfeld wird auch durch den Abstand r von der Rissspitze und den Winkel φ bestimmt => es gilt:

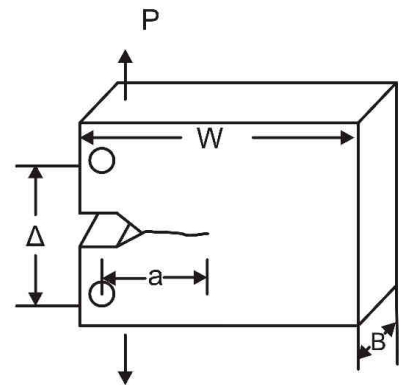
$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3 \cdot \varphi}{2}\right)\right) \\ \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \left(1 + \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3 \cdot \varphi}{2}\right)\right) \\ \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{3 \cdot \varphi}{2}\right) \end{pmatrix}$$



19.5) Wie misst man einen K_{IC} -Wert?

- Belastung einer CT-Probe mit kontinuierlich ansteigender Last
- Messung der Kraft P als Funktion der Verschiebung Δ (zunächst linearer Zusammenhang)
- Bei kritischer Belastung erfolgt Rissausbreitung, und ein plötzliches Absinken der Last
- Mit der maximalen Belastung erhält man dann den K_{IC} nach:

$$K_{IC} = \frac{P_{max} \cdot \sqrt{a}}{W \cdot b} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$



19.6) Was ist eine plastische Zone?

- kennzeichnet den Bereich vor der Risspitze, wo das Material plastisch verformt ist (Überschreitung der Fließspannung)

19.7) Wo kommen Risse her?

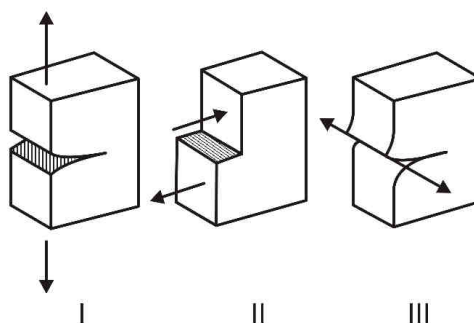
- Oberflächenrauigkeiten können Risskeime darstellen
- In glatten Oberflächen können durch mechanische Einwirkung (z.B. Ritzen) Risskeimstellen entstehen
- Lokalisierte Korrosion kann Risse einleiten
- Einschlüsse stellen Risskeime dar

19.8) Hängt für einen Stahl die Bruchzähigkeit K von der Wärmebehandlung ab?

Ja, denn durch Wärmebehandlungen können Gefüge beeinflusst werden. Einschlüsse/Seigerungen können vermindert werden, harte spröde Gefüge (Martensit) können entspannt werden.

19.9) Was sind die drei Bruchmodi, und welcher ist der wichtigste?

- K_{IC} , K_{IIc} , K_{IIIc} (alle drei Bruchmodi sind auch kombinierbar)
- K_{IC} ist der in der Praxis wichtigste Bruchmodus



19.10) Darf man die linear elastische Bruchmechanik auch dann einsetzen wenn es eine plastische Zone vor der Rissspitze gibt?

Für kleine plastische Zonen, kann weiterhin mit G und K gerechnet werden, wenn man für $a=a+r_p$, wobei r_p die Abmessung der plastischen Zone darstellt. Es muss gelten $r_p \ll w, a$ und B .

19.11) Hat die Geometrie einen Einfluss darauf, ob ein Werkstoff plastisch oder spröde versagt?

Ja, da z.B. Kerben, Kanten und Rundungen das Bruchverhalten stark beeinflussen

<u>Plastisch</u> (glatte Probe):	Überschreitung der Fließspannung	=>
Einschnürung		
<u>Spröde</u> (gekerbte Probe):	örtliche Begrenzung des Fließbereiches	=>
Bruch		

A20 Kontrollfragen Kapitel 20: Ermüdung

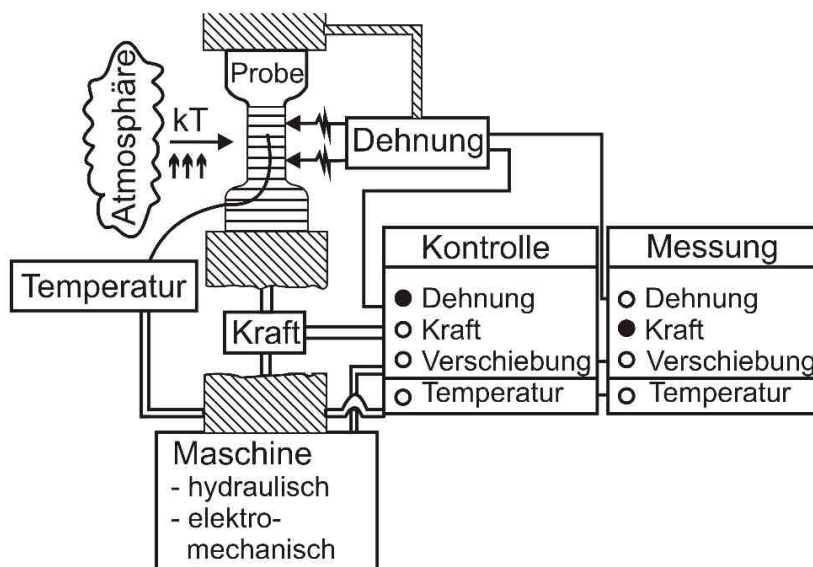
20.1) Was ist Werkstoffermüdung?

- Wenn ein Werkstoff zyklisch (unterhalb von Fließ- oder Bruchspannung) belastet wird, und es nach einer hohen Zahl von Lastzyklen zum Werkstoffversagen kommt

20.2) Wodurch ist ein Ermüdungsexperiment gekennzeichnet?

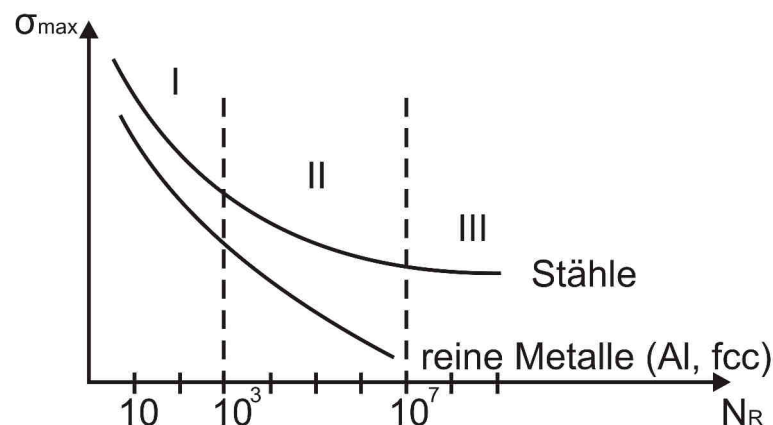
- Art der Belastung: lastkontrolliert-dehnungskontrolliert
- Probengeometrie
- Oberflächenzustand der Probe
- Wärmebehandlungszustand (und damit Gefüge) des Materials
- Umgebende Atmosphäre
- Zyklenform (Dreieckszyklus, Sinuszyklus,...)
- Temperatur

20.3) Wie sieht (schematisch) eine moderne Prüfmaschine aus?

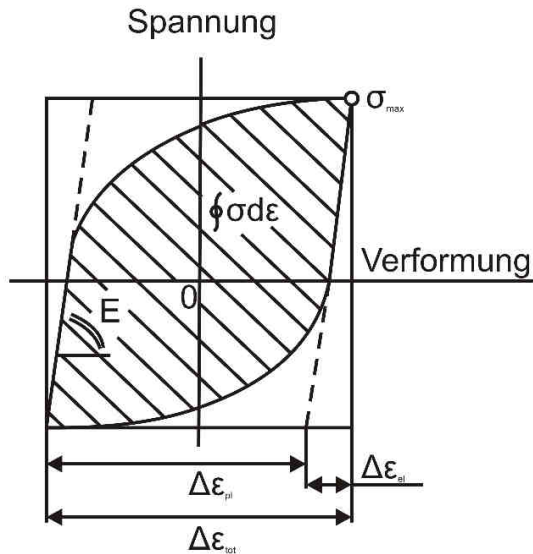


20.4) Was ist eine Wöhlerkurve?

- Wird zur Darstellung von Versuchen mit zyklischer Lastkontrolle verwendet
- Es wird die Maximalspannung σ_{\max} als Funktion der Zyklenzahl bis zum Bruch N_R aufgetragen



20.5) Was ist eine Spannungs- Dehnungs- Hysterese?



Eine Phasenverschiebung zwischen aufgeprägter Spannung und resultierender Dehnung im Ermüdungsexperiment ist zu beobachten. Das drückt sich in einer Spannungs-Dehnungs-Hysterese aus.

Die von der Hysterese eingeschlossene Kurve entspricht einer Energie:

$$\underline{\text{Energie/Zyklus}} = \oint \sigma d\epsilon$$

Der Ermüdungsversuch ist nicht reversibel, es geht Energie verloren. Die Hysteresen können sich im Verlauf des Ermüdungsversuches ändern.

20.6) Was heißt zyklische Verfestigung und zyklische Entfestigung?

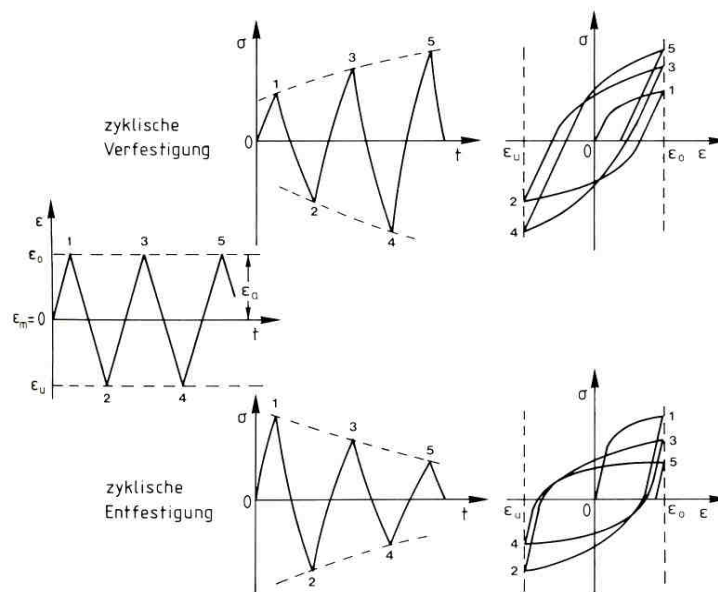
Allgemein:

zyklische Verfestigung und Entfestigung beschreiben zwei Vorgänge, die unterschiedliches Materialverhalten in dehnungskontrollierten Versuchen zeigen.

Einfluss:

Ob der Werkstoff bei beginnender Belastung ver- oder entfestigt, hängt von der Vorgeschichte des Werkstoffs ab:

Normal- oder weichgeglühte Werkstoffe neigen zur Verfestigung. Dagegen tendieren plastisch vorverformte Werkstoffe zum Entfestigen



Grund:

- mikrostrukturelle Veränderungen (zunehmende, abnehmende Versetzungsdichte)
- es stellt sich immer ein stationärer Zustand ein

- Im Bereich der Sättigungshysteresen ändert sich das Spannungs-Dehnungs-Verhalten über viele Zyklenzahlen nicht

20.7) Wie hängt die Ermüdungsrissausbreitung von ΔK ab?

Bereich A:

$\Delta K < \Delta K_0$, keine Rissausbreitung. ΔK_0 stellt einen Schwellwert dar.

Bereich B:

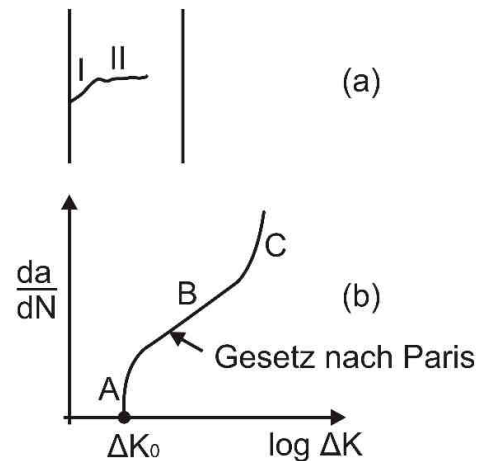
Hier gilt oft das Gesetz von Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

da/dN – Rissverlängerung pro Lastspielzahl

Bereich C:

Für sehr hohe Werte von ΔK entspricht der Bruchmodus dem des einachsigen Zugversuchs.



20.8) Welche mikrostrukturellen Beobachtungen kennzeichnen die Ermüdung?

- Lokalisierung der plastischen Verformung in Gleitbändern
- Oberflächenrisse an Korngrenzen/Einschlüsse in Oberflächennähe
- Umgebende Atmosphäre entscheidend für Ermüdung

20.9) Welche Einflussgrößen bestimmen das Ermüdungsverhalten eines Werkstoffs?

- Probengeometrie
- Oberflächenqualität der Probe
- Mikrostruktur, Atmosphäre
- Temperatur und Art der Belastung

A21 Kontrollfragen Kapitel 21: Verformung und Temperatur

21.1) Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede gibt es zwischen Erholung und Rekristallisation

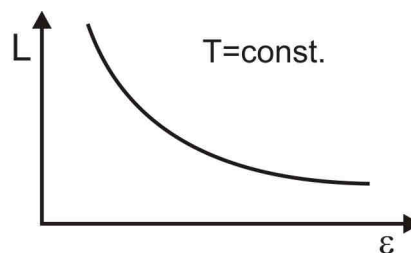
Beide Prozesse führen zu einer Abnahme der Härte von verfestigten Werkstoffen. Im Falle der Erholung erfolgt Abnahme der Versetzungsdichte und Polygonisation bei ortsfesten Korngrenzen. Bei der Rekristallisation entstehen neue, defektfreie Körner, bei denen durch Wachstum die verformte Matrix aufgezehrt wird.

21.2) Was ist der Unterschied zwischen normalen Kornwachstum und dem Kornwachstum bei der Rekristallisation

Normales Kornwachstum erfolgt unter Abnahme der insgesamt vorhandenen Korngrenzenenergie (Triebkraft: Grenzflächenenergie, die sich insgesamt zu verringern trachtet). Das Kornwachstum bei der Rekristallisation erfolgt unter einer Triebkraft, die durch die Linienenergie der Versetzungen im verformten Gefüge bestimmt wird.

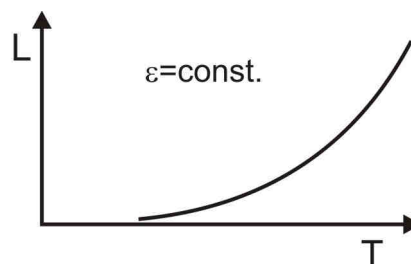
21.3) Zeichnen und diskutieren Sie ein Rekristallisationsdiagramm

- (a) Bei konstanter Glühtemperatur nimmt die Korngröße nach der Rekristallisation mit zunehmendem Reckgrad ε (Verformung vor der Glühbehandlung) ab:

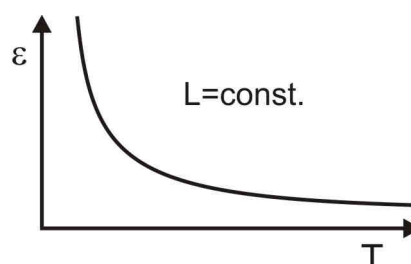


Es gibt einen kritischen Reckgrad ε_c , unterhalb dessen keine Rekristallisation erfolgt. Höhere Reckgrade erzeugen mehr Versetzungen, die wiederum für mehr Keimstellen bei der Neubildung von Körnern sorgen.

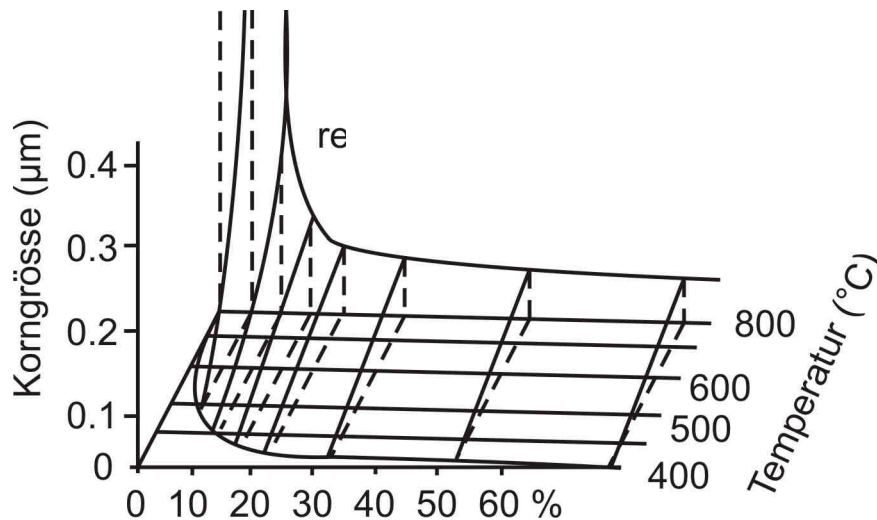
- (b) Bei einem konstanten Reckgrad nimmt die Korngröße nach der Rekristallisation mit zunehmender Glühtemperatur zu:



- (c) Will man nach der Rekristallisation eine bestimmte Korngröße, braucht man für kleine Reckgrade höhere Temperaturen:



Aus (a) bis (c) ergibt sich ein dreidimensionales Rekristallisationsdiagramm:

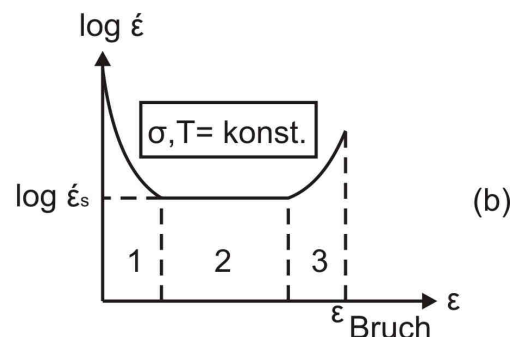
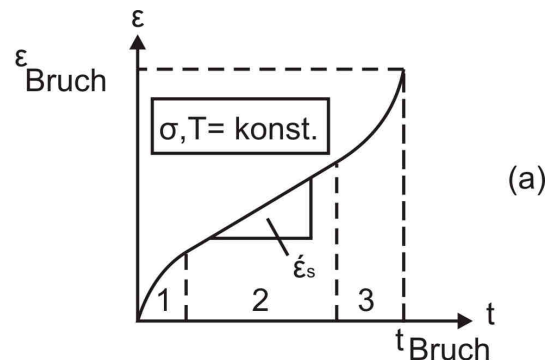


21.4) Was ist der Unterschied zwischen der plastischen Verformung bei Raumtemperatur und bei hoher Temperatur?

Bei hohen Temperaturen erfolgt eine zeitabhängige plastische Verformung: die Dehnung nimmt (bei konstanter Belastung!) mit der Zeit zu. Durch Erholung kann bei hoher Temperatur Verfestigung kontinuierlich abgebaut werden (Auslöschung Versetzungen und Polygonisation).

21.5) Zeichnen Sie eine Kriechkurve, und erläutern Sie die drei Bereiche der Kurve

- 1) Primäres Kriechen:
 $\frac{d\dot{\epsilon}}{d\epsilon} < 0$, es überwiegt Verfestigung:
 Versetzungsdichte \uparrow Kriechrate \downarrow
- 2) Sekundäres Kriechen:
 Verfestigung wird durch Erholung kompensiert, dynamisches Gleichgewicht
 Kriechrate konstant
- 3) Tertiäres Kriechen:
 $\frac{d\dot{\epsilon}}{d\epsilon} > 0$, mikrostrukturelle Erweichung und
 Schädigungsprozesse
 Kriechrate $\uparrow \Rightarrow$ Bruch



21.6) Wie hängt die sekundäre Kriechgeschwindigkeit von der Spannung und von der Temperatur ab?

Spannungsabhängigkeit: $\dot{\varepsilon} \sim \sigma^n$ ($n=4 \dots 10$)

Temperaturabhängigkeit: $\dot{\varepsilon} \sim \exp\left(-\frac{Q_{\text{Kriech}}}{RT}\right)$ ($Q_{\text{Kriech}} = 200 \dots 500 \text{ kJ/mol}$)

$$\dot{\varepsilon} = K \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q_{\text{Kriechen}}}{RT}\right)$$

21.7) Warum findet man oft, dass die Aktivierungsenergie des Kriechens mit der Aktivierungsenergie der Diffusion übereinstimmt?

Weil kriechen durch dynamische Erholung bestimmt wird, die vom Klettern von Versetzungen abhängt. Letzteres ist ein diffusionskontrollierter Prozess.

21.8) Wie misst man den Spannungsexponenten n (1) und die Aktivierungsenergie ΔH (2) des Kriechens?

Man misst den Spannungsexponent in dem man die Kriechrate über der Spannung doppeltlogarithmisch aufträgt. Man erhält eine Gerade deren Steigung n darstellt. Die scheinbare Aktivierungsenergie Q_{Kriech} des Kriechens erhält man aus einer Arrheniusauftragung (natürlicher Logarithmus der sekundären Kriechrate gegen den Kehrwert der absoluten Temperatur). Die Steigung der resultierenden Geraden entspricht $-Q_{\text{Kriech}}/R$ (R- Gaskonstante: $8,314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$).

21.9) In welchen drei Belastungsfällen sollte der einachsige Zugversuch nicht die alleinige Grundlage der Festigkeitsberechnung darstellen? Begründung!

- Statische Belastung bei hohen Temperaturen (Kriechen)
- Wechselbelastung (Ermüdung)
- Rissbehaftete Bauteile (Bruchmechanik)

21.10) Hängen mechanische Festigkeitskennwerte vom Gefüge des Werkstoffs ab?

Ja, durch die Einstellung unterschiedlicher Gefüge können Festigkeitswerte eingestellt werden

21.11) Was ist die wichtigste mechanische Werkstoffkenngröße?

Das kommt auf den Anwendungs- und Belastungsfall an. Im Schadensfall ist es diejenige mechanische Werkstoffkenngröße, deren Überschreitung zum Versagen geführt hat.

A22 Kontrollfragen Kapitel 22: Reibung und Verschleiß

22.1) Was versteht man unter Reibung

Unter Reibung versteht man den Widerstand, den ein Tribosystem der Relativbewegung zweier Körper entgegensetzt. Für die Reibungskraft gilt $F_R = f \cdot F_N$. f ist die Reibungszahl, die von der Rauigkeit der Grenzfläche abhängt und davon, ob ein Ölfilm zwischen beiden Körpern vorliegt. Je stärker man mit der Normalkraft F_N auf den Körper drückt, desto schwerer ist es, ihn seitlich wegzuziehen.

22.2) Was ist Verschleiß?

Der fortschreitende Materialverlust aus einer Werkstoffoberfläche, hervorgerufen durch Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssige oder gasförmigen Gegenkörpers. Die Beanspruchung der Oberfläche wird als tribologische Beanspruchung bezeichnet.

22.3) Nennen Sie Beispiele für Tribosysteme in der Technik!

Funktionsbereiche

Bewegungsübertragung, Führung

Bewegungshemmung

Kraftübertragung

Transport

Materialbearbeitung

Bauteile

Gleitlager, Wälzlager, Spindel,

Gelenk

Reibungsbremse, Stoßdämpfer

Getriebe, Riemenbetrieb, Kupplung

Rad/Schiene, Reifen/Straßen,

Förderband

Dreh-, Fräs, Schleifwerkzeug

22.4) Warum muss man Verschleiß auf der Grundlage von Tribosystemen betrachten?

Weil ein Tribosystem die Gesamtheit der für Reibung und Verschleiß wichtigen Einflussgrößen darstellt und der Ingenieur nur durch Berücksichtigung dieser Einflussgrößen dem Verschleiß mit den richtigen Maßnahmen entgegenwirken kann.

22.5) Welche vier stofflichen Elemente kennzeichnen ein Tribosystem?

Grundkörper

Zwischenstoff

Gegenkörper

Umgebungsmedium

wirken zusammen

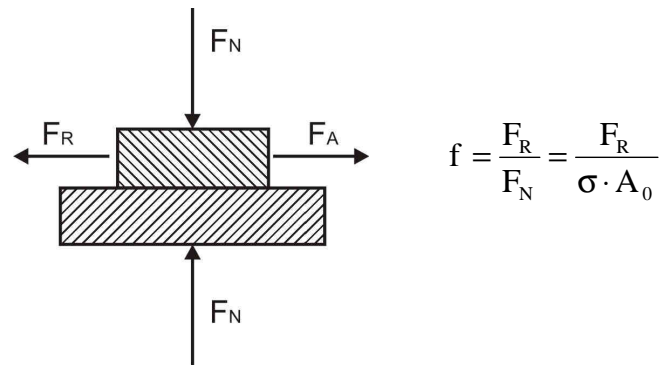
22.6) Was ist Adhäsionsenergie und welche Rolle spielt sie bei der Reibung?

Die Adhäsionsenergie zwischen dem Stoff A und B ist durch die Diffusion von γ_{AL} und γ_{BL} , der Summe der Oberflächenenergien der Stoffe A und B und der Grenzflächenenergie γ_{AB} zwischen den Stoffen A und B gegeben. Die Reibung ist hoch, wenn die Adhäsionsenergie stark negativ ist.

22.7) Von welchen physikalischen Größen hängt der Reibungskoeffizient f ab?

Von dem Verhältnis von Reibungskraft (F_R) und der Normalkraft (F_N)

Unter der Reibungszahl f verstehen wir das Verhältnis von Reibungskraft F_R und Normalkraft F_N :



22.8) Geben Sie eine einfache Gleichung für die Verschleißrate w an!

$$w = \frac{\Delta W}{L \cdot A \cdot \rho}$$

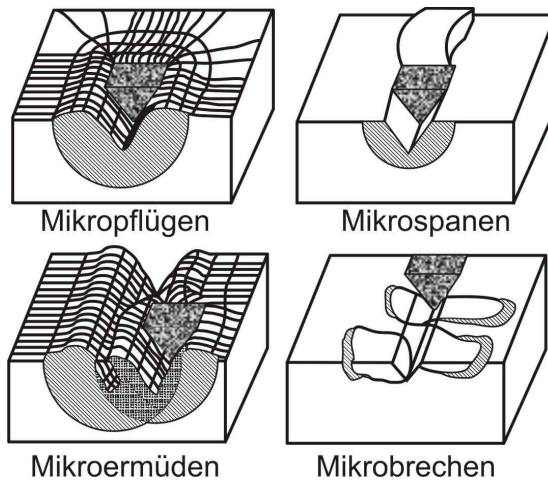
ΔW = Gewichtsverlust
 A = Kontaktfläche
 L = Gleit- / Verschleißweg

22.9) Welche Materialkennwerte spielen beim Verschleiß eine Rolle?

- die Konstante: C ,
- der Belastungsdruck: p ,
- der E-Modul: E ,
- die Fließspannung: R_p ,
- der Spannungsintensitätsfaktor: K_{IC} ,
- Härte: H

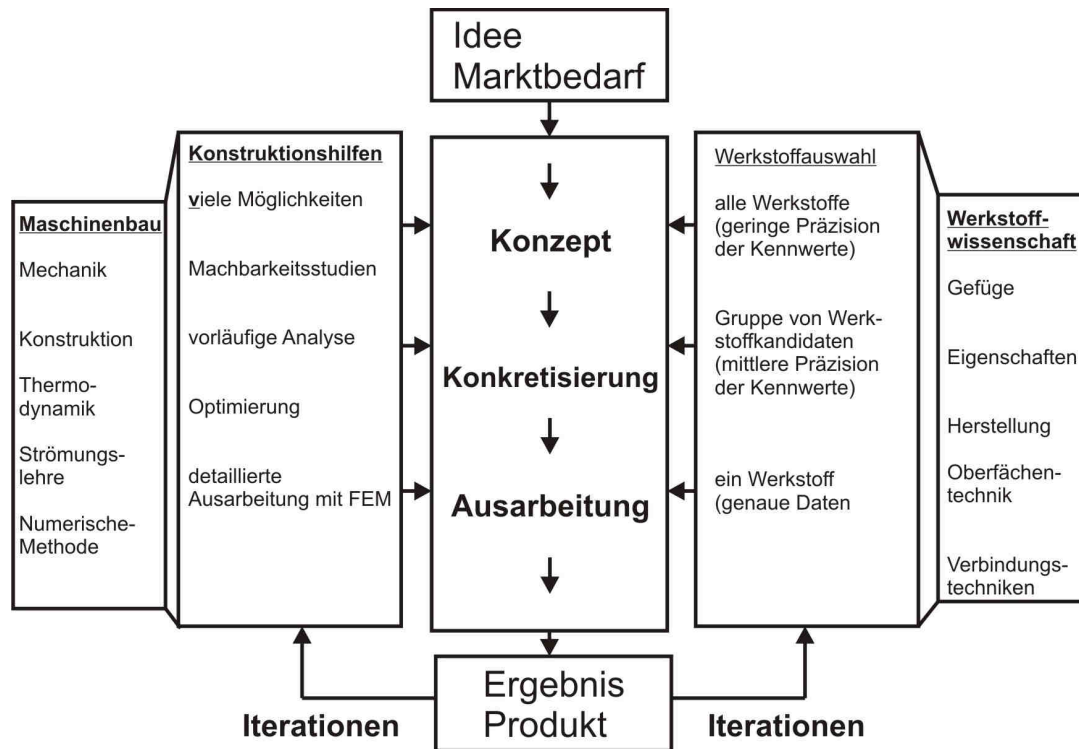
22.10) Nennen Sie 4 Mikromechanismen des abrasiven Verschleißes!

- Mikroflügen
- Mikroermüden
- Mikrospanen
- Mikrobrechen



A23 Kontrollfragen Kapitel 23: Werkstoffauswahl und Konstruktion

23.1) Wie wird systematisch konstruiert?



Art der Konstruktion definieren:

- (i) Neukonstruktion (nach einer völlig neuen Idee),
=> viele Möglichkeiten sollen bedacht werden
- (ii) Verbesserung (evolutionäre Entwicklung)
=> Leistungssteigerung der Konstruktion
- (iii) die Anpassung (Änderung von Größe, Zweck oder Form ohne Änderung der Funktion)

zu Berücksichtigen:

- Wechselwirkungen zwischen Funktion, Werkstoff, Form und Herstellung
- Einsatzbereiche
- *Kritische Werkstoffkennwerte:* Zugfestigkeit, Duktilität, Bruchzähigkeit, Korrosionsbeständigkeit
- Kosten, Form, Aussehen, Farbe, Oberflächengüte und Klasse
- Produktgestaltung, Fertigung und Gebrauch => Recycling, Life Cycle Engineering

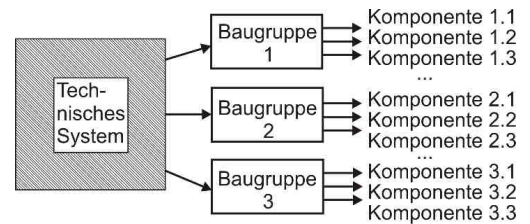
Wichtig:

- Erkennung der Wechselwirkung zwischen Funktion, Bauteil, Form und Herstellung
- Werkstoffauswahl und Form der herzustellenden Komponente sind stark aneinander gekoppelt
- Aus dem Werkstoff entsteht durch Formgebung (Gießen, Schmieden, spanend Bearbeiten, Fügen und Endbearbeitung) die Komponente

- Formgebung hat mit Werkstoffdaten / den Eigenschaften der Komponente selbst zu tun

23.2) Wie wählt man Werkstoffe aus?

- 1) geeignete Werkstoffgruppe bestimmen
- 2) mehrere Möglichkeiten in Erwägung ziehen, sukzessive Auswahlkriterien definieren und verschärfen
- 3) Ermittlung der Werkstoffdaten, die dem Anwendungsfall Rechnung tragen
- 4) Werkstoffauswahl erfolgt auf der Komponentenebene
- 5) Wechselwirkungen zwischen Funktion, Werkstoff, Form und Herstellung bilden den Kern des Werkstoffauswahlprozesses für Konstruktionen



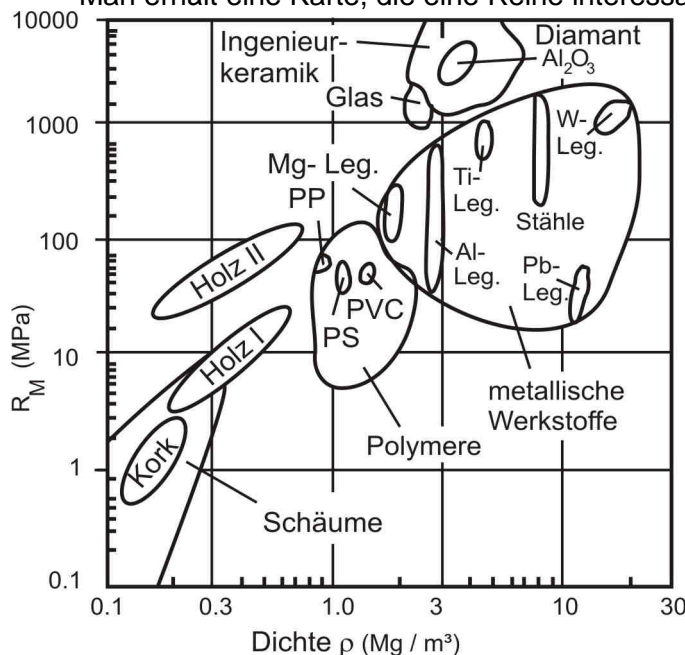
23.3) Was ist wichtiger, Stahl oder Aluminium?

Beide Werkstoffe sind aufgrund ihrer Eigenschaften im Maschinenbau unabkömmlich.

23.4) Was kann man einer Auftragung von E über ρ entnehmen?

Größen E / ρ werden gegeneinander aufgetragen:

Man erhält eine Karte, die eine Reihe interessanter Eigenschaften aufweist:



- Vielzahl von leicht zugänglichen Informationen
- zeigt Beziehungen zwischen Materialeigenschaften auf
- ermöglicht ein erstes Überprüfen / Abschätzen von Kennwerten
- Man kann mit ihrer Hilfe systematisch Werkstoffe auswählen
- Will man die Komponente für diesen Belastungsfall optimieren, muss mit Blick auf den Werkstoff E / ρ möglichst groß sein

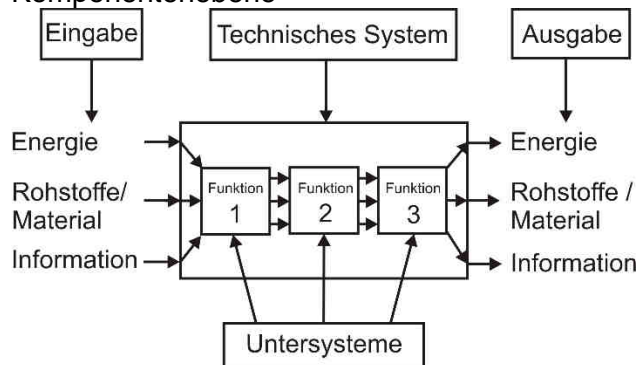
23.5) Warum ist es im Maschinenbau heute viel wichtiger als vor 30 Jahren, ein gutes Grundwissen über Werkstoffe zu haben?

- Werkstoffe können über Erfolg oder Misserfolg neuer Technologien entscheiden.
- Nur wer Werkstoffe herstellen kann, kann aus seinen Kenntnissen über die Beziehungen zwischen Aufbau und Eigenschaften auch wirtschaftlichen

Nutzen ziehen

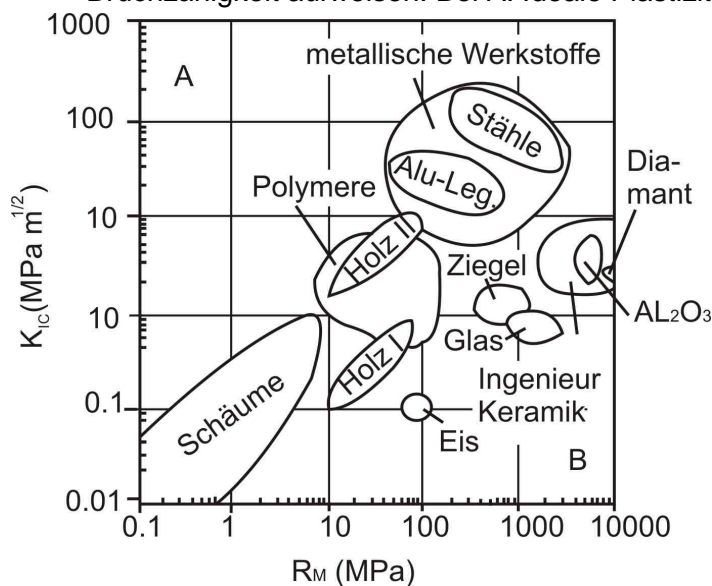
23.6) Auf welchen Ebenen erfolgt die Werkstoffauswahl in einem technischen System?

- Komponentenebene



23.7) Was kann man einem Diagramm mit Bruchzähigkeit gegen Festigkeit entnehmen?

Zeigt auf einen Blick, welche Werkstoffe bei hohen Festigkeiten auch gute Bruchzähigkeit aufweisen. Bei A: Ideale Plastizität. Bei B: Maximale Sprödigkeit.



23.8) Was versteht man unter dem Eigenschaftsprofil eines Werkstoffs, und wie muss man es im Vergleich zum Beanspruchungsprofil einer Komponente sehen?

Eigenschaftsprofil: alle Kennwerte eines Werkstoffs

Beanspruchungsprofil: die kritischen Werte, denen ein Werkstoff im Einsatz standhalten muss.

=> Bei der Werkstoffauswahl muss man bestmöglich das Beanspruchungsprofil der Zielkomponente mit dem Eigenschaftsprofil des Konstruktionswerkstoffes zur Deckung bringen.

23.9) Wie groß sind die E-Moduli von Eisen, Aluminium und Holz?

Eisen/Stahl	210 GPa
Aluminium	71 GPa

Holz 20 GPa

23.10) Wie groß sind die Dichten von Eisen, Aluminium und Holz?

Eisen/Stahl	$7,9 \text{ Mg m}^{-3}$
Aluminium	$2,7 \text{ Mg m}^{-3}$
Holz	$0,2 \text{ Mg m}^{-3}$