

Verständnistest 2.1

Warum sind die relativen Atommassen in der Regel keine ganzen Zahlen? Nennen Sie zwei Gründe!

Antwort:

Die relative Atommassen sind in der Regel keine ganzen Zahlen, weil: (1) die Atommasse eines Atoms normalerweise keine ganze Zahl ist (außer die von ^{12}C , auf die sich alle anderen beziehen), und (2) die Atommasse eine durchschnittliche Masse aller natürlich vorkommenden Isotope ist.

Verständnistest 2.2

Geben Sie die Elektronenkonfiguration des Fe^{3+} - und des S^{2-} -Ions an!

Antwort:

Das Fe^{3+} -Ion ist ein Eisenatom, das drei Elektronen abgegeben hat. Aus der Elektronenkonfiguration für das Fe-Atom $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$ (siehe Tabelle 2.2) folgt für das Fe-Ion $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5$.

Das S^{2-} Ion hat gegenüber dem S-Atom zwei Elektronen zusätzlich. Mit einer Elektronenkonfiguration für das S-Atom von $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$ (siehe Tabelle 2.2) ergibt sich für die Konfiguration von S^{2-} $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$.

Verständnistest 2.3

Erklären Sie, warum kovalent gebundene Werkstoffe im Allgemeinen eine geringere Dichte haben als ionisch gebundene Werkstoffe oder Metalle.

Antwort:

Kovalent gebundene Werkstoffe haben im Allgemeinen eine geringere Dichte als ionisch oder metallisch gebundene Werkstoffe, weil kovalente Bindungen gerichtet sind, während dies für ionische und metallische Bindungen nicht gilt. Wenn Bindungen gerichtet sind, können sich die Atome nicht so dicht anordnen, so dass im Endeffekt eine geringere Masendichte resultiert.

3.1 Verständnistest

Worin besteht der Unterschied zwischen Kristallstruktur und Kristallsystem?

Antwort:

Eine Kristallstruktur wird sowohl durch die Geometrie wie auch die Anordnung der Atome in der Elementarzelle beschrieben. Dagegen wird das Kristallsystem nur durch die Geometrie der Elementarzelle beschrieben. Als Beispiel kann man die flächenzentrierte und die raumzentrierte kubische Kristallstruktur anführen, die Beide zu den kubischen Systemen gehören.

3.2 Verständnistest

Nimmt der Abstand zwischen benachbarten parallelen Ebenen in kubischen Kristallen mit wachsenden Miller'schen Indizes h , k und l zu oder ab? Begründen Sie Ihre Antwort

Antwort:

Die Abstände zwischen benachbarten parallelen Ebenen nehmen ab mit zunehmenden Werten von h , k und l . In dem Maße, wie die Miller'schen Indizes zunehmen, steigt auch der Wert des Nenners in Gleichung 3.4. Als Resultat nimmt der Abstand (d_{hkl}) zwischen den kristallografischen Ebenen ab.

3.3 Verständnistest

Wird bei nichtkristallinen Werkstoffen das Phänomen der Allotropie (oder Polymorphie) beobachtet? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Nichtkristalline Stoffe zeigen das Phänomen der Allotropie *nicht*. Sie haben keine definierte Kristallstruktur und können deshalb auch nicht mehr als eine Kristallstruktur haben. Dies ist aber die Definition von Allotropie.

Verständnistest 4.1

Die Oberflächenenergie eines Einkristalls hängt von der kristallografischen Orientierung ab. Wird diese Oberflächenenergie größer oder geringer mit sinkender planarer Dichte? Begründen Sie Ihre Aussage!

Antwort:

Die Oberflächenenergie hängt von der planaren Dichte (d.h., von der atomaren Packungsdichte) an der freien Oberfläche ab, und der dort vorhandenen Anzahl ungesättigter Bindungen. Sobald die planare Dichte ansteigt, steigt auch die Anzahl von Atomen in dieser Ebene und damit die Anzahl interatomarer (gesättigter) Bindungen. Entsprechend sinkt die Anzahl ungesättigter Bindungen.

In dem Maße, in dem die ungesättigten Bindungen auf der Oberfläche verschwinden, sinkt die Oberflächenenergie.

(Also: sinkt die Oberflächenenergie mit steigender planarer Dichte.)

Verständnistest 4.2

Wird die Korngrößenkennzahl (G aus Gl. 4.16) größer oder kleiner mit abnehmender Korngröße?

Antwort:

Löst man die Gleichung 4.16 nach G auf, so erkennt man den logarithmischen Zusammenhang zwischen der Korngrößenzahl G und der Anzahl Körner m . Nimmt G zu, so steigt auch die Anzahl Körner.

$$m = 8 \times 2^G \quad m/8 = 2^G \quad \lg(m/8)/\lg 2 = G \quad G \approx \lg m$$

m ist nun definiert als die Anzahl, die auf einen mm^2 passt. Müssen mehr Körner auf diese Fläche passen, dann muss die Korngröße abnehmen.

Verständnistest 5.1

Ordnen Sie die Diffusionskoeffizienten für folgende Systeme nach abnehmender Größe:

N in Fe bei 700 °C

Cr in Fe bei 700 °C

N in Fe bei 900 °C

Cr in Fe bei 900 °C

Begründen Sie Ihre Antworten! (Beachten Sie dabei, dass sowohl Fe als auch Cr eine kubisch raumzentrierte Kristallstruktur aufweist und dass die Atomradien für Fe, Cr und N die Werte 0,124 nm, 0,125 nm bzw. 0,065 nm haben. Hinweise dazu finden Sie auch in Abschn. 4.3.)

Antwort:

Die Reihenfolge der Diffusionskoeffizienten ist folgendermaßen:

N in Fe bei 900 °C; $D_N(900)$

N in Fe bei 700 °C; $D_N(700)$

Cr in Fe bei 900 °C; $D_{Cr}(900)$

Cr in Fe bei 700 °C; $D_{Cr}(700)$

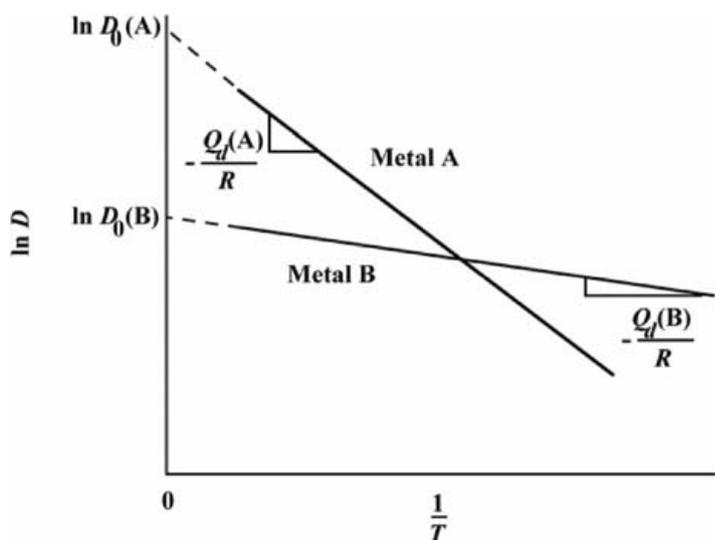
Stickstoff ist ein Zwischengitteratom in Eisen (wenn man die Atomradien betrachtet), während Chrom ein Substitutionsatom ist. Im Vergleich findet die Diffusion von Zwischengitteratomen schneller statt als die eines Substitutionsatoms, also gilt $D_N > D_{Cr}$. Weil der Diffusionskoeffizient mit zunehmender Temperatur ebenfalls steigt, gilt $D(900) > D(700)$.

Verständnistest 5.2

Betrachten Sie die Selbstdiffusion zweier hypothetischer Metalle A und B unter der Annahme $D_0(A) > D_0(B)$ und $Q_d(A) > Q_d(B)$! Vergleichen Sie den Verlauf von $\ln D$ als Funktion von $1/T$ für beide Metalle.

Antwort:

Im Diagramm ist schematisch $\ln D$ gegen $1/T$ aufgetragen mit Linien für die Metalle A und B.



Wie in dem vorangehenden Abschnitt gezeigt wurde, ist der Schnittpunkt der vertikalen Achse gleich $\ln D_0$. Das Diagramm zeigt, dass der Schnittpunkt für das Metall A größer ist als für B, $D_0(A) > D_0(B)$ [oder $\ln D_0(A) > \ln D_0(B)$]. Gleichzeitig ist die Steigung der Geraden gleich $-Q_d/R$. Die zwei Geraden in diesem Diagramm sind so konstruiert worden, dass die negative Steigung der Gerade von Metall A größer ist als die von B, also $Q_d(A) > Q_d(B)$.

Verständnistest 6.1

Nennen Sie grundlegende Unterschiede zwischen elastischen, anelastischen und plastischen Verformungseigenschaften!

Antwort:

Elastische Verformung ist zeitunabhängig und nicht dauerhaft; anelastische Verformung ist zeitabhängig und nicht dauerhaft; plastische Verformung ist zeitabhängig und dauerhaft.

Verständnistest 6.2

Welcher von den in Tabelle 6.3 aufgeführten metallischen Werkstoffen

- (a) wird die größte Brucheinschnürung erfahren? Begründen Sie Ihre Antwort!
- (b) ist der Werkstoff mit der höchsten Festigkeit? Begründen Sie Ihre Antwort!
- (c) besitzt die höchste Steifigkeit? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Tab. 6.3 Kennwerte aus Spannungs-Dehnungs-Messungen unter Zugbeanspruchung für einige hypothetische Metalle zur Lösung der Verständnistests 6.2 und 6.4.

Werkstoff	Streckgrenze (MPa)	Zugfestigkeit (MPa)	Bruchdehnung	Bruchfestigkeit (MPa)	Elastizitätsmodul (GPa)
A	310	340	0,23	265	210
B	100	120	0,40	105	150
C	415	550	0,15	500	310
D	700	850	0,14	720	210
E	Bricht vor Erreichen der Streckgrenze			650	350

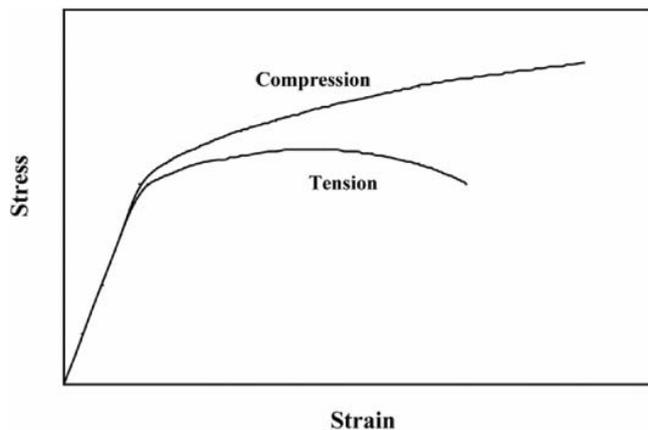
- (a) Material B wird die größte Brucheinschnürung erfahren, weil es den größten Wert für die Bruchdehnung hat und deshalb am duktilsten ist.
- (b) Material D hat die größte Festigkeit, weil es die größte Streckgrenze und Zugfestigkeit hat.
- (c) Material E besitzt die größte Steifigkeit, weil es den größten Elastizitätsmodul besitzt.

Verständnistest 6.3

Skizzieren Sie schematisch das technische Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines metallischen Werkstoffs unter Zugbeanspruchung bis zum Versagen der Probe! Anschließend fügen Sie das Verhalten derselben Legierung unter Druckbeanspruchung in das bestehende Diagramm ein. Erklären Sie die Unterschiede im Kurvenverlauf!

Antwort:

Das schematische Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt die Kurven für Zug- und Druckbeanspruchung.



Der anfänglich lineare Verlauf im elastischen Bereich ist bei beiden Kurven identisch. Danach gibt es die drei folgenden Unterschiede zwischen den Kurven:

1. Jenseits des elastischen Bereichs liegt die Zugspannungskurve unter der Druckspannungskurve. Der Grund dafür liegt darin, dass sich unter Druck die Querschnittsfläche der Probe vergrößert. D. h., für zwei Proben mit gleicher anfänglicher Querschnittsfläche A_0 ist bei einem gegebenen Spannungswert die momentane Querschnittsfläche unter Druck größer als unter Zug. Daraus folgt, dass die zum Aufrechterhalten der Spannung benötigte Kraft bei Druckbeanspruchung größer ist als bei Zugbeanspruchung. Da die technische Spannung gemäß Gl. 6.1 als

$$\sigma = F/A_0$$

definiert ist, ist die aufgewendete Kraft unter Druck größer und damit auch die Spannung (A_0 ist in beiden Fällen gleich groß).

2. Die Druckbelastungskurve weist kein Maximum auf, da eine Probe unter Druck keine Einschnürungen ausbildet – die Querschnittsfläche, über welcher die Deformation abläuft, wächst unter Druckbelastung kontinuierlich an.
3. Die Spannung, bei der es zum Materialversagen kommt, ist bei Druckbeanspruchung größer. Auch dies erklärt sich durch das Fehlen von Einschnürungen unter Druck.

Verständnistest 6.4

Welcher der in Tabelle 6.3 aufgeführten Werkstoffe ist der härteste? Begründen Sie Ihre Entscheidung!

Antwort:

Material D ist am härtesten, da es die größte Zugfestigkeit aufweist.

Verständnistest 7.1

Welches der gegebenen Gleitsysteme gehört zum kubisch primitiven Gitter? Begründen Sie!

$\{100\} \langle 110 \rangle$

$\{110\} \langle 110 \rangle$

$\{100\} \langle 010 \rangle$

$\{110\} \langle 111 \rangle$

Die Elementarzelle für kubisch primitive Gitter ist in Abb. 3.24 dargestellt.

Antwort:

Das Gleitsystem einer bestimmten Kristallstruktur korrespondiert mit der am dichtesten gepackten kristallographischen Ebene und in dieser mit der am dichtesten besetzten kristallographischen Richtung. Für das kubisch primitive Gitter hat die $\{100\}$ -Ebene die größte Dichte, die am dichtesten gepackte Richtung innerhalb dieser Ebene ist $\langle 010 \rangle$. Darum ist das Gleitsystem des kubisch primitiven Gitters $\{100\} \langle 010 \rangle$.

Verständnistest 7.2

Erklären Sie den Unterschied zwischen der Schmid-Spannung und der kritischen Schmid-Spannung!

Antwort:

Die *Schmid-Spannung* ist die Schubspannungskomponente einer anliegenden Zug- (oder Druck-)Spannung, welche zerlegt wird entlang einer Gleitebene, die weder senkrecht noch

parallel zur Spannungsachse ist. Die *kritische* Schmid-Spannung ist diejenige Schmid-Spannung, bei welcher die plastische Verformung bzw. das Fließen beginnt; sie ist eine Materialeigenschaft.

Verständnistest 7.3

Welcher Effekt tritt auf, wenn während einer Härtemessung ein Eindruck sehr nahe an einem vorher gesetzten Eindruck platziert wird? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Die Härtemessung anhand eines Eindrucks, der sehr nahe an einem bereits bestehenden Eindruck gesetzt wurde, ergibt einen erhöhten Wert, da das Material in der unmittelbaren Umgebung des ersten Eindrucks kaltverfestigt ist.

Verständnistest 7.4

Würden Sie erwarten, dass ein keramischer Werkstoff bei Raumtemperatur ein Kaltverfestigungsverhalten aufweist? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Nein, das wäre nicht zu erwarten. Damit ein Werkstoff kaltverfestigt werden kann, muss er plastisch verformt werden; da keramische Werkstoffe aber bei Raumtemperatur spröde sind, werden sie brechen, bevor es zu einer plastischen Verformung kommen kann.

Verständnistest 7.5

Erläutern Sie, warum einige Metalle (z. B. Blei und Zinn) während der Verformung bei Raumtemperatur nicht kaltverfestigt werden können!

Antwort:

Metalle wie Blei und Zinn lassen sich bei Raumtemperatur nicht kaltverfestigen, da ihre Rekristallisationstemperatur unterhalb des Gefrierpunkts liegt (Tabelle 7.2).

Verständnistest 7.6

Halten Sie Rekristallisation bei keramischen Werkstoffen für möglich? Begründen Sie ihre Antwort!

Antwort:

Nein, bei keramischen Werkstoffen ist Rekristallisation nicht zu erwarten. Hierfür wäre zunächst eine plastische Verformung notwendig, wofür keramische Materialien aber (bei Raumtemperatur) zu spröde sind.

Verständnistest 8.1

Geben Sie zwei Beispiele an, in denen die Möglichkeit eines Werkstoffversagens Bestandteil des Designs eines Bauteils oder eines Produktes ist!

Antwort:

Es gibt eine Reihe von Beispielen dafür, dass ein mögliches Werkstoffversagen zum Design eines Bauteils oder Produkts gehört:

1. Die Aufreißflasche von Getränkedosen;
2. Masten aus Aluminium für Straßenlaternen oder Telefonleitungen an Straßen, die beim Aufprall eines Fahrzeugs minimale Schäden verursachen;
3. Ein Abscherstift, der bei bestimmten Maschinen benutzt wird, um ein Getriebe o. Ä. mit einer Welle zu verbinden – der Stift wird so ausgelegt, dass er bei Überlast bricht, bevor Getriebe oder Welle Schaden nehmen können.

Verständnistest 8.2

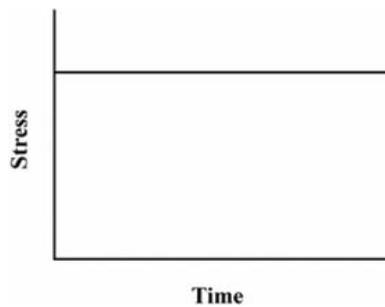
Skizzieren Sie die Zeitabhängigkeit der Belastung für den Fall, dass das Lastverhältnis den Wert +1 hat!

Antwort:

Bei einem Lastverhältnis von $R = +1$ folgt aus Gl. 8.17

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$$

In diesem Fall bleibt also die Belastung konstant (bzw. fluktuiert nicht) und das Last-Zeit-Diagramm ergibt eine waagerechte Gerade:



Verständnistest 8.3

Zeigen Sie auf Grundlage der Gleichungen 8.16 und 8.17, dass sich bei einer Vergrößerung des Lastverhältnisses R die Lastamplitude σ_a verringert!

Antwort:

Aus Gl. 8.17 folgt

$$\sigma_{\min} = R \sigma_{\max}$$

Weiterhin besagt Gl. 8.16

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Einsetzen von σ_{\min} aus der ersten Gleichung in die zweite ergibt

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - R\sigma_{\max}}{2} = \frac{\sigma_{\max}}{2} (1 - R)$$

Dies bedeutet, dass wenn R zunimmt (oder stärker positive Werte annimmt), der Wert von σ_a abnimmt.

Verständnistest 8.4

Die Bruchflächen einiger Stahlproben haben nach einem Ermüdungsversagen ein helles kristallines oder körniges Aussehen. Laien könnten das Werkstoffversagen dadurch erklären, dass das Metall unter Betriebsbedingungen kristallisiert ist. Nehmen Sie zu dieser Erklärung Stellung!

Antwort:

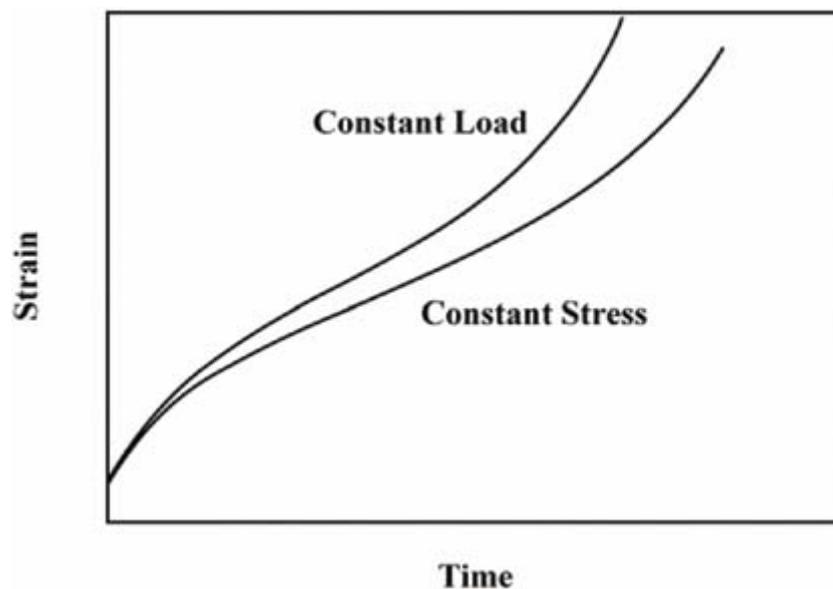
„Kristallisieren“ bedeutet eine kristalline Struktur anzunehmen. Insofern ist die Aussage „Das Metall ist gebrochen, weil es kristallisiert ist“ irreführend, da das Metall auch schon vor der Belastung kristallin war (praktisch alle Metalle sind kristallin).

Verständnistest 8.5

Stellen Sie in ein und demselben Dehnungs-Zeit-Diagramm schematische Kriechkurven sowohl für eine konstante Zugspannung als auch für eine konstante Zugbelastung dar und begründen Sie die Unterschiede im Verlauf!

Antwort:

Die Grafik zeigt Kriechkurven für konstante Zugspannung und für konstante Zugbelastung:



Mit zunehmender Zeit liegt die Kurve für konstante Last immer mehr über der Kurve für konstante Spannung. Da es sich um Zugbelastungstests handelt, nimmt die Querschnittsfläche mit fortschreitender Deformation ab. Daher muss zum Aufrechterhalten einer konstanten Spannung die angelegte Last entsprechend vermindert werden, da ja $\text{Spannung} = \text{Last}/\text{Fläche}$ ist.

Verständnistest 9.1

Was unterscheidet die Zustände im Phasengleichgewicht vom metastabilen Zustand?

Antwort:

Im Phasengleichgewicht ist die freie Energie minimal, das System ist vollständig stabil, d. h. mit der Zeit bleiben die Eigenschaften der Phasen dauerhaft konstant. Ein metastabiles System befindet sich nicht im Gleichgewicht und die Eigenschaften der Phasen ändern sich mit der Zeit minimal (oft unmerklich).

Verständnistest 9.2

Eine Kupfer-Nickel-Legierung mit der Zusammensetzung 70 Ma.-% Ni/30 Ma.-% Cu wird langsam auf eine Temperatur von 1300 °C erhitzt.

- (a) Bei welcher Temperatur bildet sich erstmals eine flüssige Phase?
- (b) Wie ist diese flüssige Phase zusammengesetzt?
- (c) Bei welcher Temperatur kommt es zum vollständigen Aufschmelzen der Legierung?
- (d) Wie ist die restliche feste Phase kurz vor dem vollständigen Aufschmelzen zusammengesetzt?

Antwort:

Beim langsamen Erhitzen der Kupfer-Nickel-Legierung mit 70 Ma.-% Ni/30 Ma.-% Cu auf 1300 °C geschieht folgendes (Abb. 9.3a, b):

- (a) Die erste flüssige Phase bildet sich bei derjenigen Temperatur, bei welcher eine vertikale Linie bei der Zusammensetzung mit 70 Ma.-% Ni die α -($\alpha + L$)-Phasengrenze (Soliduslinie) schneidet, etwa bei 1350 °C.
- (b) Die Zusammensetzung dieser flüssigen Phase entspricht dem Schnittpunkt der Konode (Parallele zur x -Achse) durch diesen Punkt mit der ($\alpha + L$)-L-Phasengrenze (Liquiduslinie), etwa 59 Ma.-% Ni.
- (c) Zum vollständigen Aufschmelzen kommt es bei derjenigen Temperatur, bei welcher die vertikale Linie bei der Zusammensetzung mit 70 Ma.-% Ni die ($\alpha + L$)-L-Phasengrenze (Liquiduslinie) schneidet, etwa bei 1380 °C.
- (d) Die Zusammensetzung der letzten Reste an fester Phase kurz vor dem vollständigen Aufschmelzen ergibt sich aus dem Schnittpunkt der entsprechenden Konode mit der α -($\alpha + L$)-Phasengrenze (Soliduslinie) zu etwa 78 Ma.-% Ni.

Verständnistest 9.3

Gibt es eine Kupfer-Nickel-Legierung, die unter Gleichgewichtsbedingungen aus einer α -Phase mit der Zusammensetzung 37 Ma.-% Ni/63 Ma.-% Cu und einer flüssigen Phase mit der Zusammensetzung 20 Ma.-% Ni/80 Ma.-% Cu besteht? Wenn ja: Bei welcher Temperatur existiert diese Legierung? Wenn nein: Begründen Sie Ihre Aussage!

Antwort:

Eine solche Cu-Ni-Legierung, bei der eine flüssige Phase mit 20 Ma.-% Ni/80 Ma.-% Cu und eine α -Phase mit 37 Ma.-% Ni/63 Ma.-% Cu im Gleichgewicht stünden, ist unmöglich. Aus Abb. 9.3a geht hervor, dass es innerhalb des ($\alpha + L$)-Bereichs keine Konode geben kann, welche die Phasengrenzen bei den angegebenen Zusammensetzungen schneidet. Bei 20 Ma.-% Ni liegt die ($\alpha + L$)-L-Phasengrenze bei rund 1200 °C, bei 37 Ma.-% Ni liegt die α -($\alpha + L$)-Phasengrenze bei rund 1225 °C.

Verständnistest 9.4

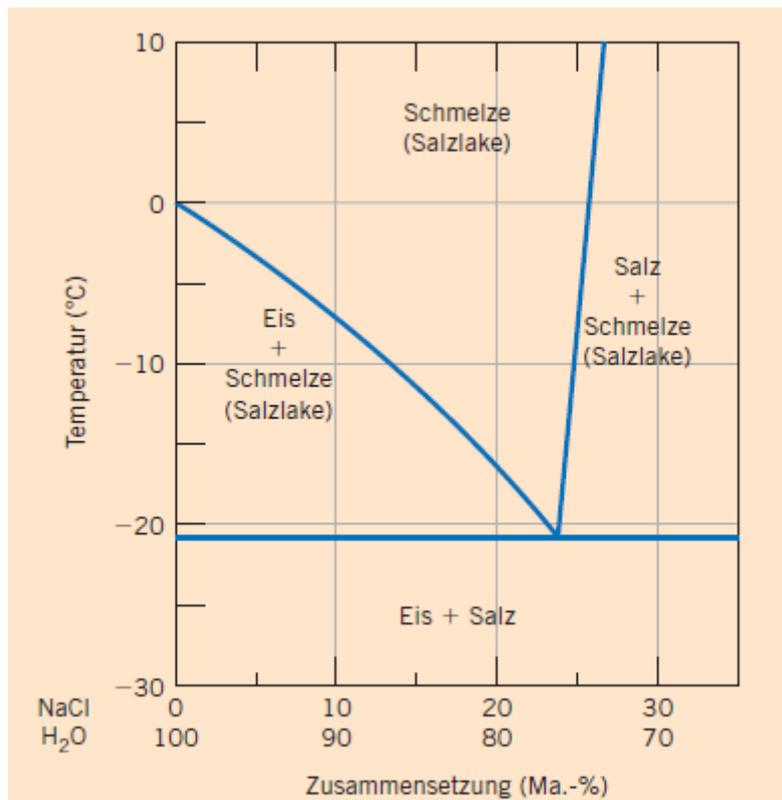
Wie hoch ist die maximale Löslichkeit (a) von Cu in Ag und (b) von Ag in Cu bei 700 °C?

Antwort:

- (a) Aus dem Kupfer-Silber-Phasendiagramm (Abb. 9.7) liest man die maximale Löslichkeit von Cu in Ag bei 700 °C als Position der β -($\alpha + \beta$)-Phasengrenze bei dieser Temperatur ab, und zwar zu rund 6 Ma.-% Cu.
- (b) In derselben Abb. entspricht die Position der α -($\alpha + \beta$)-Phasengrenze bei dieser Temperatur der maximalen Löslichkeit von Ag in Cu, nämlich etwa 5 Ma.-% Ag.

Verständnistest 9.5

Im Folgenden ist ein Teilbereich des H₂O-NaCl-Phasendiagramms dargestellt:



- (a) Erklären Sie anhand dieses Diagramms, wie die Zugabe von Streusalz zu Eis zum Schmelzen des Eises bei Temperaturen unterhalb von 0 °C führt!
- (b) Bei welcher Temperatur hat die Zugabe von Salz keinen praktischen Nutzen mehr zum Schmelzen von Eis?

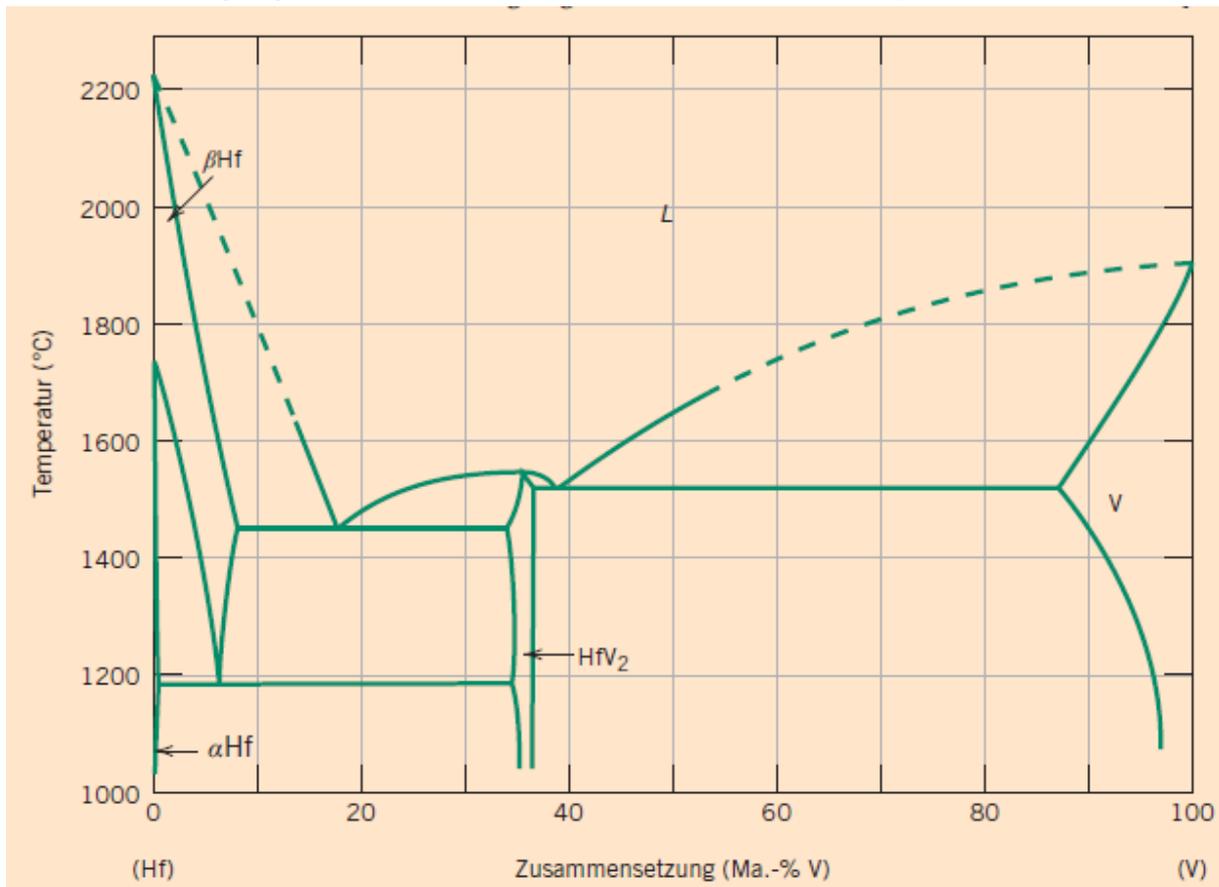
Antwort:

- (a) Das Ausstreuen von Salt auf Eis senkt dessen Schmelztemperatur, da die Temperaturwerte auf der Liquiduslinie von 0 °C bei 100 Ma.-% H₂O bis zur eutektischen Temperatur -21 °C bei 77 Ma.-% H₂O (23 Ma.-% NaCl) abfallen. Darum kann man Eis mit einer Temperatur zwischen 0 °C und -21 °C durch Zugabe von Salz in die flüssige Phase überführen.
- (b) Bei -21 °C oder darunter kann man Eis nicht mehr durch Salzzugabe zum Schmelzen bringen, da dies die niedrigste Temperatur ist, bei der sich überhaupt eine flüssige Phase bilden kann (es ist die eutektische Temperatur für dieses System).

Verständnistest 9.6

Unten ist das Hafnium-Vanadium-Phasendiagramm abgebildet und es sind nur Einphasengebiete markiert. Geben Sie alle Temperatur-Zusammensetzungs-Punkte an, an denen eutektische, eutektoide, peritektische und kongruente Phasenumwandlungen auftreten! Formulieren Sie für jeden dieser Punkte die Reaktionsgleichungen! [Phasendiagramm aus

ASM Handbook, Bd. 3, Alloy Phase Diagrams, H. Baker (Hrsg.), 1992, S. 2244. Mit freundlicher Genehmigung von ASM International, Materials Park, OH.]

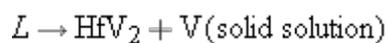


Antwort:

Es gibt zwei eutektische Punkte in diesem Phasendiagramm. Einer von ihnen liegt bei 18 Ma.-% V/82 Ma.-% Hf und einer Temperatur von 1455 °C. Beim Abkühlen läuft die Reaktion



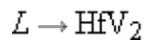
ab. Der andere eutektische Punkt liegt bei 39 Ma.-% V/61 Ma.-% Hf und 1520 °C. Die Reaktion beim Abkühlen lautet:



Es gibt einen eutektoiden Punkt bei 6 Ma.-% V/94 Ma.-% Hf und 1190 °C. Die Reaktion beim Abkühlen ist:



Es gibt einen kongruenten Schmelzpunkt bei 36 Ma.-% V/64 Ma.-% Hf und 1550 °C. Die Reaktion beim Abkühlen lautet:



Es sind keine peritektischen Punkte vorhanden.

Verständnistest 9.7

In einem ternären System existieren drei Komponenten, die Temperatur ist variabel. Welche maximale Anzahl von Phasen entsteht in diesem ternären System, wenn der Druck konstantgehalten wird?

Antwort:

Für ein ternäres System ($K = 3$) bei konstantem Druck ($N = 1$) lautet die Gibbs'sche Phasenregel (Gl. 9.16)

$$P + F = K + N = 3 + 1 = 4$$

bzw.

$$P = 4 - F$$

P wird somit maximal, wenn $F = 0$ ist, und hat dann den Wert $P = 4$. Es gibt also maximal 4 Phasen unter den angegebenen Bedingungen.

Verständnistest 9.8

Erläutern Sie, warum die voreutektoiden Phasen (Ferrit oder Zementit) entlang der Austenitkorn Grenzen gebildet werden! (Ziehen Sie auch Abschn. 4.6 zu Rate.)

Antwort:

Mit einer Korngrenze ist immer eine Grenzflächenenergie verbunden (Korngrenzenenergie). Der Nettozuwachs dieser Energie ist geringer, wenn sich die voreutektoide Phase entlang bestehender Austenitkorn Grenzen bildet, als wenn sie innerhalb der Körner entsteht.

Verständnistest 10.1

Welches Gefüge ist stabiler, Perlit oder kugeliges Zementit? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Die Mikrostruktur des kugeligen Zementits ist stabiler als die von Perlit. Da sich Perlit in kugeligen Zementit umwandelt, muss letzterer stabiler sein.

Verständnistest 10.2

Geben Sie zwei wesentliche Unterschiede zwischen einer martensitischen und einer perlitischen Umwandlung an!

Antwort:

Es gibt zwei wesentliche Unterschiede:

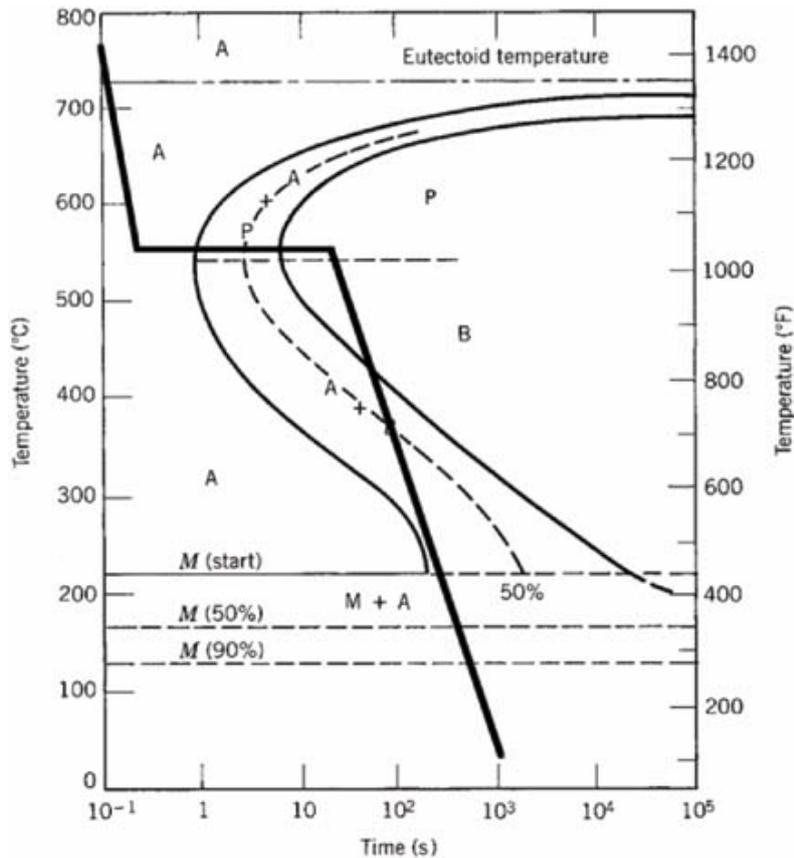
1. Für die perlitische Umwandlung ist atomare Diffusion notwendig, die martensitische Umwandlung erfolgt diffusionsfrei.
2. Die martensitische Umwandlung geschieht praktisch instantan, die Rate ist also zeitunabhängig. Im Gegensatz dazu ist die perlitische Transformationsrate zeitabhängig.

Verständnistest 10.3

Kopieren Sie das isotherme ZTU-Diagramm für einen Stahl mit eutektoider Zusammensetzung (Abb. 10.22) und zeichnen Sie in dieses Diagramm einen Zeit-Temperatur-Verlauf ein, der auf ein Gefüge aus 100 % feinlamellarem Perlit führt!

Antwort:

Das isotherme ZTU-Diagramm für einen Stahl mit eutektoider Zusammensetzung zeigt einen Zeit-Temperatur-Verlauf, der zu einem Gefüge aus 100 % feinlamellarem Perlit führt.



Verständnistest 10.4

Beschreiben Sie für den legierten Stahl 40NiCrMo6 (WNr. 1.6565) mit dem ZTU-Diagramm aus Abbildung 10.28 das einfachste Verfahren zur Wärmebehandlung mit kontinuierlicher Abkühlung, durch das ein Gefüge aus Martensit und Bainit in eine Mikrostruktur aus Ferrit und Perlit umgewandelt wird.

Antwort:

Um ein Martensit-Bainit-Gefüge in eine Ferrit-Perlit-Mikrostruktur umzuwandeln, muss die Temperatur über 720 °C gehalten werden, sodass eine vollständige Austenitisierung gewährleistet ist. Anschließend wird die Probe auf Raumtemperatur mit einer Rate von höchstens 0,006 °C/s abgekühlt (Abb. 10.28).

Verständnistest 10.5

Ordnen Sie die folgenden Stähle mit den angegebenen Gefügen nach ihrer Zugfestigkeit:

0,25 Ma.-% C mit kugeligem Zementit,

0,25 Ma.-% C mit grobstreifigem Perlit,

0,6 Ma.-% C mit feinstreifigem Perlit,

0,6 Ma.-% C mit grobstreifigem Perlit.
Begründen Sie die gewählte Reihenfolge!

Antwort:

Die gesuchte Reihenfolge ist die folgende:

1. 0,6 Ma.-% C mit feinstreifigem Perlit
2. 0,6 Ma.-% C mit grobstreifigem Perlit
3. 0,25 Ma.-% C mit grobstreifigem Perlit
4. 0,25 Ma.-% C mit kugeligem Zementit

Von den beiden Stählen mit 0,25 Ma.-% C ist der mit grobstreifigem Perlit stärker als der mit kugeligem Zement, da bei gleicher Zusammensetzung grobstreifiger Perlit stärker als kugeliges Zement ist. Erhöht man den C-Anteil beim grobstreifigen Perlit auf 0,6 Ma.-%, nimmt die Zugfestigkeit weiter zu, da bei gleicher Mikrostruktur ein höherer C-Anteil eine höhere Zugfestigkeit bedeutet. Noch fester als 0,6 Ma.-% C mit grobstreifigem Perlit ist dieselbe Zusammensetzung mit feinstreifigem Perlit, da in letzterem wesentlich mehr Ferrit-Zementit-Phasengrenzen vorliegen.

Verständnistest 10.6

Ein Bauteil aus eutektoidem Stahl soll eine Rockwell-Härte von 93 HRB aufweisen. Beschreiben Sie eine geeignete isotherme Wärmebehandlung!

Antwort:

Aus Abb. 10.30(a) entnimmt man, dass eine Rockwell-Härte von 93 HRB bei einem C-Anteil von 0,76 Ma.-% eine groblamellare Perlit-Mikrostruktur erfordert. Entsprechend dem vollständigen isothermen ZTU-Diagramm für diese Legierung (Abb. 10.22) verfährt man wie folgt: Zunächst wird die Probe bei etwa 760 °C austenitisiert und dann schnell auf eine Temperatur abgekühlt, bei welcher sich Perlit bildet (d. h. auf ca. 675 °C). Anschließend lässt man sie sich isotherm vollständig zu groblamellarem Perlit umwandeln. Bei dieser Temperatur ist eine isotherme Wärmebehandlung für mindestens 200 s erforderlich. Schließlich lässt man auf Raumtemperatur abkühlen, wobei die Kühlrate beliebig gewählt werden kann.

Verständnistest 10.7

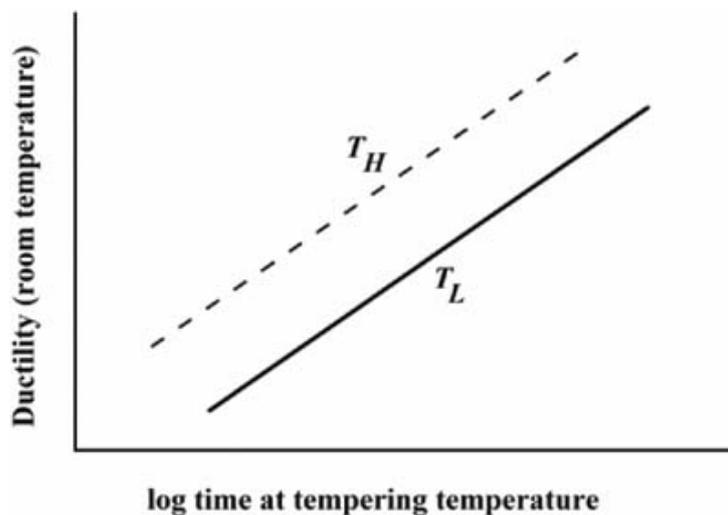
Ein Stahl wird aus dem Bereich der Austenitphase in Wasser mit Raumtemperatur abgeschreckt, sodass sich Martensit bildet. Anschließend wird dieser Stahl bei erhöhter, konstanter Temperatur angelassen.

(a) Zeigen Sie schematisch, wie sich die Duktilität bei Raumtemperatur mit dem Logarithmus der Anlassdauer ändert! (Achten Sie auf eine korrekte Bezeichnung der Achsen!)

(b) Zeichnen Sie in dasselbe Diagramm den Verlauf der Duktilität ein, der sich für eine höhere Anlasstemperatur ergibt! Erklären Sie den Unterschied zwischen den Kurvenverläufen bei den zwei unterschiedlichen Temperaturen!

Antwort:

(a) Die unten stehende Grafik zeigt das gewünschte Diagramm:



(b) Die Gerade für die höhere Temperatur (T_H) liegt oberhalb derjenigen für die niedrigere Temperatur (T_L), weil die Fe_3C -Partikel in getempertem Martensit bei höherer Temperatur schneller wachsen. Daher sind sie die Partikel bei einer vorgegebenen Temperzeit größer bei höherer Temperatur. Da die Fe_3C -Partikel bei höherer Tempertemperatur größer werden, gibt es dort weniger $\alpha\text{-Fe}_3\text{C}$ -Phasengrenzen, welche die Versetzungsbewegung behindern, wodurch das Material duktiler wird.

Verständnistest 11.1

Erklären Sie, warum ferritische und austenitische Stähle nicht durch eine Wärmebehandlung härtbar sind. Hinweis: Lesen Sie ggf. im ersten Teil von Abschnitt 11.3 nach.

Antwort:

Ferritische und austenitische nichtrostende Stähle können nicht durch Wärmebehandlung gehärtet werden, weil „wärmehandelbar“ bedeutet, dass sich Martensit verhältnismäßig einfach durch Abschrecken von heißem Austenit bilden kann.

Ferritische nichtrostende Stähle wandeln sich nicht durch Wärmezufuhr in Austenit um und können deshalb auch keinen Austenit-Martensit-Übergang vollführen.

Bei austenitischen nichtrostenden Stählen erstreckt sich der austenitische Phasenbereich bis zu so niedrigen Temperaturen, dass es zu keinem martensitischen Übergang kommt.

Verständnistest 11.2

Prinzipiell kann Gusseisen mit martensitischer Matrix und eingebetteten Graphitteilchen in Lamellen-, Rosetten- oder Kugelform hergestellt werden. Beschreiben Sie die zur Einstellung jeder der drei Mikrostrukturen notwendige Behandlung!

Antwort:

Graphit in Lamellenform (Flockenform) bildet sich in Grauguss. Dieser muss dann auf eine Temperatur erhitzt werden, bei welcher Ferrit sich in Austenit umwandelt, der dann durch Abschrecken in Martensit übergeht (Abschnitt 11.2).

Graphit in Rosetten- und Kugelform bildet sich in duktilem Gusseisen und Temperguss, was wieder jeweils austenitisiert und dann abgeschreckt wird (Abschnitt 11.2).

Verständnistest 11.3

Erläutern Sie den Hauptunterschied zwischen Messing und Bronze.

Antwort:

Sowohl Messing als auch Bronze sind Kupferlegierungen. Bei Messing ist das Hauptlegierungselement Zink, bei Bronzen kann es Zinn, Aluminium, Silicium oder Nickel sein.

Verständnistest 11.4

Erläutern Sie, warum es nicht empfehlenswert ist, ein Bauteil aus der Legierung AlMn-Cu zu schweißen! Hinweis: Lesen Sie ggf. in Abschnitt 7.12 nach.

Antwort:

AlMn-Cu wird durch Kaltverformung verfestigt. Wenn eine kaltverformte Struktur aus dieser Legierung geschweißt wird, kommt es zur Rekristallisation und damit zu einem Verlust an Festigkeit.

Verständnistest 11.5

Diskutieren Sie auf Grundlage der Schmelztemperaturen, der Oxidationsbeständigkeit, der Streckgrenze und dem Grad der Sprödigkeit, ob es empfehlenswert ist, (a) Aluminiumlegierungen und (b) Magnesiumlegierungen warm oder kalt umzuformen. Hinweis: Lesen Sie ggf. in den Abschnitten 7.10 und 7.12 nach.

Antwort:

- (a) Die meisten Aluminiumlegierungen können kaltverformt werden, da sie duktil sind und relativ geringe Fließgrenzen besitzen.
- (b) Magnesiumlegierungen werden gewöhnlich durch Warmumformung behandelt, da sie bei Raumtemperatur recht spröde sind. Außerdem haben Magnesiumlegierungen verhältnismäßig hohe Rekristallisationstemperaturen.

Verständnistest 11.6

Nennen Sie (a) zwei Vorteile und (b) zwei Nachteile der Pulvermetallurgie gegenüber der Schmelzmetallurgie!

Antwort:

- (a) Vorteile der Pulvermetallurgie gegenüber der Schmelzmetallurgie sind
 1. Sie ist für Legierungen mit hohen Schmelzpunkten geeignet.
 2. Bessere Ergebnisse bezüglich Maßtoleranz
 3. Der Grad an Porosität kann kontrolliert werden (was bei z. B. bei Anwendungen wie selbstschmierenden Lagern wünschenswert ist).
- (b) Nachteile der Pulvermetallurgie gegenüber der Schmelzmetallurgie sind
 1. Die Herstellung der Pulver ist teuer.
 2. Nach der Verdichtung ist eine Wärmebehandlung notwendig.

Verständnistest 11.7

Welche prinzipiellen Unterschiede gibt es zwischen Schweißen, Hart- und Weichlöten?
Ziehen Sie ggf. weitere Quellen heran!

Antwort:

Beim Schweißen werden die zu verbindende Werkstücke in der Nachbarschaft des Verbindungspunkts aufgeschmolzen, Schweißzusatzwerkstoffe können benutzt werden oder auch nicht.

Beim Hartlöten wird ein Zusatzstoff (Lot) benutzt, dessen Schmelztemperatur über 450 °C liegt; der Zusatzstoff wird aufgeschmolzen, die zu verbindenden Werkstücke nicht.

Beim Weichlöten hat der Zusatzstoff (das Lot) einen Schmelzpunkt unterhalb von 450 °C, auch hier schmilzt das Lot, die Werkstücke schmelzen nicht.

Verständnistest 11.8

Nennen Sie drei Faktoren, die die Martensitbildung innerhalb des Querschnitts einer Stahlprobe beeinflussen! Erklären Sie für jeden Parameter, wie der Anteil des gebildeten Martensits erhöht werden kann!

Antwort:

Die drei Faktoren, welche den Grad der Martensitbildung beeinflussen, sind:

1. Legierende Elemente: durch Zugabe von Legierungselementen lässt sich die Martensitbildung verstärken.
2. Größe und Gestalt der Probe: die Martensitbildung nimmt zu, wenn die Querschnittsfläche der Probe abnimmt und die Gestalt irregulärer wird.
3. Das Medium, mit welchem abgeschreckt wird: je intensiver abgeschreckt wird, desto mehr Martensit bildet sich. Wasser schreckt stärker ab als Öl, gefolgt von Luft. Umrühren oder Verwirbeln des Mediums verstärkt ebenfalls die Wirkung des Abschreckens.

Verständnistest 12.1

Aus Tabelle 12.3 sind die Ionenradien für K^+ und O^{2-} zu entnehmen (0,138 nm bzw. 0,140 nm).

(a) Wie ist die Koordinationszahl für das O^{2-} -Ion?

(b) Beschreiben Sie kurz die entsprechende Kristallstruktur von K_2O !

(c) Erklären Sie, warum diese Struktur Antifluoritstruktur genannt wird!

Antwort:

(a) Zunächst bestimmen wir die Koordinationszahl des O^{2-} -Ions in K_2O . Für das Kationen-Anionen-Radienverhältnis

$$\frac{r_{K^+}}{r_{O^{2-}}} = \frac{0.138\text{nm}}{0.140\text{nm}} = 0.986$$

lesen wir aus Tab. 12.2 die Koordinationszahl 8 ab.

(b) Aus Tab. 12.4 geht hervor, dass die Kristallstruktur für eine Koordinationszahl 8 bei Kat- und Anionen vom Typ Cäsiumchlorid ist. Es gibt jedoch doppelt so viele K^+ - wie O^{2-} -Ionen. Daher sitzen die K^+ -Ionen an den Ecken einer kubischen Elementarzelle, während die Hälfte der Elementarzell-Mittelpunkte von O^{2-} -Ionen eingenommen wird.

(c) Die Struktur heißt Antifluoritstruktur, weil im Vergleich zur Fluoritstruktur Kat- und Anionen vertauscht sind (Abb. 12-5).

Verständnistest 12.2

Kann es einen Schottky-Defekt in K_2O geben? Wenn ja, beschreiben Sie diesen Defekt. Wenn er nicht existieren kann, begründen Sie dies!

Antwort:

Die Frage lässt sich auf zweierlei Weise beantworten:

1. Ja, in K_2O können Schottky-Defekte auftreten; jeder Defekt besteht aus einer O^{2-} - und zwei K^+ -Leerstellen.
2. Nein, strenggenommen kann es in K_2O keine Schottky-Defekte geben, insofern diese Art von Defekten immer aus einem Kation-Anion-Paar besteht – für jede O^{2-} -Leerstelle müssen in K_2O aber zwei K^+ -Leerstellen entstehen.

Verständnistest 12.3

Welche Art Punktdefekt ist durch Verunreinigung von Al_2O_3 mit MgO möglich? Wie viele Mg^{2+} -Ionen müssen jeweils hinzugefügt werden, um einen solchen Defekt zu bilden?

Antwort:

Wenn ein Mg^{2+} -Ion ein Al^{3+} -Ion im Al_2O_3 -Gitter ersetzt, wird netto eine positive Elementarladung entfernt. Damit die elektrische Neutralität erhalten bleibt, muss entweder eine positive Ladung hinzugefügt oder eine negative entfernt werden.

Positive Ladungen lassen sich einfügen, indem Al^{3+} -Ionen auf Zwischengitterplätze gesetzt werden, und zwar je ein Al^{3+} -Zwischengitterion auf drei ins Gitter eingefügt Mg^{2+} -Ionen.

Negative Ladungen können durch Bildung von O^{2-} -Leerstellen entfernt werden, und zwar je eine O-Leerstelle auf zwei eingefügte Mg^{2+} -Ionen.

Verständnistest 12.4

- (a) Welches ist die höchstmögliche Temperatur für das SiO_2 - Al_2O_3 -System ohne die Bildung einer flüssigen Phase?
- (b) Für welche Zusammensetzung oder in welchem Bereich der Zusammensetzung wird diese Temperatur erreicht?

Antwort:

- (a) Gemäß Abb. 12.27 beträgt die maximale Temperatur 1890 ± 10 °C.
- (b) Dies geschieht bei einer Zusammensetzung von ≈ 77 –100 Ma.-% Al_2O_3 .

Verständnistest 13.1

Erklären Sie, warum Glaskeramiken nicht transparent sind! Sie können dazu auch Kapitel 21 heranziehen.

Antwort:

Glaskeramiken können dann nicht transparent sein, wenn sie polykristallin sind. Licht wird an den Korngrenzen eines polykristallinen Materials gestreut, wenn der Brechungsindex anisotrop ist und wenn die der Grenzfläche benachbarten Körner verschiedene kristallographische Orientierungen haben. Dieses Phänomen wird in Abschnitt 21.10 diskutiert. Dort wird auch erklärt, dass Glaskeramiken transparent sein können, wenn die Kristalle kleiner als die Wellenlänge sichtbaren Lichts ist.

Verständnistest 13.2

Welche der beiden Zusammensetzungen ist unter Berücksichtigung des SiO_2 — Al_2O_3 -Phasendiagramms (Abb. 12.27) als Feuerfestwerkstoff zu bevorzugen? Begründen Sie Ihre Entscheidung!

20 Ma.-% Al_2O_3 —80 Ma.-% SiO_2

oder

25 Ma.-% Al_2O_3 —75 Ma.-% SiO_2

Antwort:

Die Zusammensetzung 25 Ma.-% Al_2O_3 —75 Ma.-% SiO_2 ist besser geeignet, weil die Liquidustemperatur mit 1740 °C höher ist als die der anderen Zusammensetzung (1710 °C). Im Bereich „Mullit (ss) + flüssig“ des Phasendiagramms ist daher der Anteil der flüssigen Phase bei jeder Temperatur für 25 Ma.-% Al_2O_3 —75 Ma.-% SiO_2 niedriger als für die andere Zusammensetzung, weswegen erstere eine höhere mechanische Integrität besitzt.

Verständnistest 13.3

Erklären Sie, warum es wichtig ist, Zement zu feinem Pulver zu vermahlen.

Antwort:

Es ist wichtig, Zement zu feinem Pulver zu vermahlen, weil dadurch die Oberfläche der Partikel zunimmt. Die Hydrationsreaktion zwischen Wasser und Zement läuft an der Oberfläche der Zementpartikel ab. Je größer diese Oberfläche ist, desto besser wird die Bindung.

Verständnistest 13.4

Wie beeinflusst die Dicke eines Glasgegenstandes die Größenordnung der thermischen Spannung, die entstehen kann? Warum?

Antwort:

Je dünner ein Glasgegenstand ist, desto kleinere thermische Spannungen entstehen darin bei Erwärmung oder Abkühlung. Der Grund dafür ist, dass die Temperaturdifferenz über einen Querschnitt des Gegenstands bei dünneren Gegenständen niedriger ist und damit die Wärmeausdehnung (oder -kontraktion) entsprechend schwächer ausfällt.

Verständnistest 13.5

Dicke Keramikteile neigen eher dazu, während des Trockenprozesses zu brechen als dünne. Warum ist das so?

Antwort:

Dicke Keramikteile brechen beim Trocknen eher als dünne, weil die Unterschiede in der Schrumpfung zwischen Oberfläche und Innerem über eine Querschnittsfläche bei einem dicken Keramikteil größer sind. Dies wiederum liegt daran, dass das Wasser aus oberflächennahen Bereichen beim Trocknen einen kürzeren Weg zurücklegen muss als aus dem Inneren des Bauteils; der Unterschied in der Weglänge ist bei dickeren Keramikteilen größer als bei dünneren.

Verständnistest 13.6

Erklären Sie, warum bei höheren Temperaturen gebrannter Ton seine Hydroplastizität verliert.

Antwort:

Das Phänomen der Hydroplastizität beruht darauf, dass Wassermoleküle einen dünnen Film um die kleinen Tonpartikel bilden. Beim Brennen mit hoher Temperatur schmelzen die Partikel teilweise auf und es entsteht eine viskose flüssige Glasphase, welche das Porenvolumen einnimmt, das im hydroplastischen Zustand mit Wasser gefüllt war. Beim anschließenden Abkühlen wird die viskose Phase zu einer Glasmatrix.

Verständnistest 14.1

Erklären Sie den Unterschied zwischen Polymorphie (Kap. 3) und Isomerie.

Antwort:

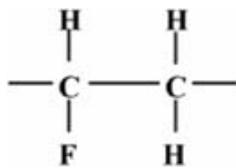
Polymorphie liegt vor, wenn ein Material mit gegebener Zusammensetzung zwei oder mehr verschiedene Kristallstrukturen annehmen kann. Von *Isomerie* spricht man, wenn zwei Kohlenwasserstoffmoleküle mit gleicher Summenformel unterschiedliche räumliche Anordnungen der Atome bzw. Atombindungen aufweisen.

Verständnistest 14.2

Zeichnen Sie die sich wiederholende Struktureinheit für Polyvinylfluorid. Orientieren Sie sich dabei an den in diesem Abschnitt behandelten Strukturen.

Antwort:

Polyvinylfluorid unterscheidet sich von Polyvinylchlorid dadurch, dass sich an derselben Stelle im Monomer (der Struktureinheit) einmal ein Fluor- und einmal ein Chloratom befindet. Die Struktur von PVF ergibt sich also direkt aus der von PVC (Tab. 14.3), wie in der Grafik dargestellt.



Verständnistest 14.3

Worin besteht der Unterschied zwischen Konfiguration und Konformation von Polymerketten?

Antwort:

Bei Polymerketten beschreibt die *Konfiguration* die räumliche Struktur des Moleküls, wobei jedoch Drehungen um Einfachbindungen nicht berücksichtigt werden; eine Änderung der Konfiguration ist nur durch Aufbrechen und Neubilden von Valenzbindungen möglich. Die *Konformation* berücksichtigt dagegen auch mögliche reine Drehungen um Einfachbindungen, insbesondere entlang des Kettenrückgrats, ohne dass die Bindungen neu geformt werden.

Verständnistest 14.4

Einige Polymere (z. B. Polyester) können sich thermoplastisch oder duroplastisch verhalten. Nennen Sie einen Grund dafür!

Antwort:

Duroplaste haben vernetzte Seitenketten, während Thermoplaste im Wesentlichen linear sind und keine Vernetzung aufweisen.

Verständnistest 14.5

(a) Vergleichen Sie den kristallinen Zustand von Metallen und Polymeren! (b) Vergleichen Sie den nichtkristallinen Zustand von Polymeren und Gläsern.

Antwort:

(a) Bei kristallinen Metallen sind die einzelnen Atome in einem periodischen räumlichen Gitter angeordnet auf Skalen, die groß gegen die Abmessungen der Atome sind. Die langreichweitige Ordnung in einem Polymerkristall beruht dagegen auf der Ausrichtung benachbarter Polymerketten.

(b) Nichtkeramische Gläser haben außerhalb der SiO_4^{4-} -Einheiten eine zufällige atomare Struktur. Die Unordnung in nichtkristallinen Polymeren beruht auf fehlender Ausrichtung der Polymerketten.

Verständnistest 15.1

Wenn für ein teilkristallines Polymer die Dehnbarkeit (Duktilität) in Prozent Dehnung angegeben wird, ist es nicht erforderlich, die Messlänge der Probe mit anzugeben, wie das für Metalle der Fall ist. Warum?

Antwort:

Der Grund dafür, dass man für ein teilkristallines Polymer bei Angabe der prozentualen Dehnbarkeit die Messlänge der Probe nicht zu nennen braucht, ist, dass sich für diese Stoffe eine Einschnürung normalerweise über die gesamte Messlänge ausdehnt. Daher gibt es keine lokalisierte Einschnürung wie etwa bei Metallen und die Größe der relativen Längenänderung (Dehnbarkeit, Duktilität) ist unabhängig von der Messlänge.

Verständnistest 15.2

Welches Verhalten aus Abbildung 15.5 sollte ein bei 120 °C verformtes amorphes Polystyrol zeigen?

Antwort:

Amorphes Polystyrol verhält sich bei 120 °C gummiartig (viskoelastisch, Abb. 15.8, Kurve C), daher entspricht das Last-Zeit-Verhalten dem aus Abb. 15.5(c).

Verständnistest 15.3

Betrachten Sie das untenstehende Paar von Polymeren. (a) Kann man entscheiden, ob eines der Polymere einen höheren Zugmodul aufweist? (b) Wenn ja, geben Sie an, welches der beiden Polymere das ist und begründen Sie ihre Antwort! (c) Wenn nein, begründen Sie dies ebenfalls!

- syndiotaktisches Polystyrol mit einer mittleren Molmasse (Zahlenmittel) von 400 000 g mol⁻¹
- isotaktisches Polystyrol mit einer mittleren Molmasse (Zahlenmittel) von 650 000 g mol⁻¹

Antwort:

Nein, man kann diese Entscheidung nicht treffen. Sowohl syndio- als auch isotaktisches Polystyrol neigen zum Kristallisieren und haben daher offenbar einen ähnlichen Kristallisationsgrad (ähnliche Kristallinität). Da außerdem der Zugmodul praktisch unabhängig von der Molekülmasse ist, kann man erwarten, dass beide Materialien ungefähr denselben Zugmodul haben.

Verständnistest 15.4

Betrachten Sie das untenstehende Paar von Polymeren. (a) Kann man entscheiden, ob eines der Polymere eine höhere Zugfestigkeit aufweist? (b) Wenn ja, geben Sie an, welches der beiden Polymere das ist, und begründen Sie ihre Antwort! (c) Wenn nein, begründen Sie dies ebenfalls!

- syndiotaktisches Polystyrol mit einer mittleren Molmasse (Zahlenmittel) von 600 000 g mol⁻¹
- isotaktisches Polystyrol mit einer mittleren Molmasse (Zahlenmittel) von 500 000 g mol⁻¹

Antwort:

Ja, es *ist* möglich. Das syndiotaktische Polystyrol hat eine höhere Zugfestigkeit. Sowohl syndio- als auch isotaktisches Polystyrol neigen zum Kristallisieren und haben daher annähernd denselben Kristallisationsgrad (Kristallinität). Die Zugfestigkeit dagegen nimmt mit der Molekülmasse zu, und diese ist bei syndiotaktischem PS (600 000 g mol⁻¹) höher als bei isotaktischem (500 000 g mol⁻¹).

Verständnistest 15.5

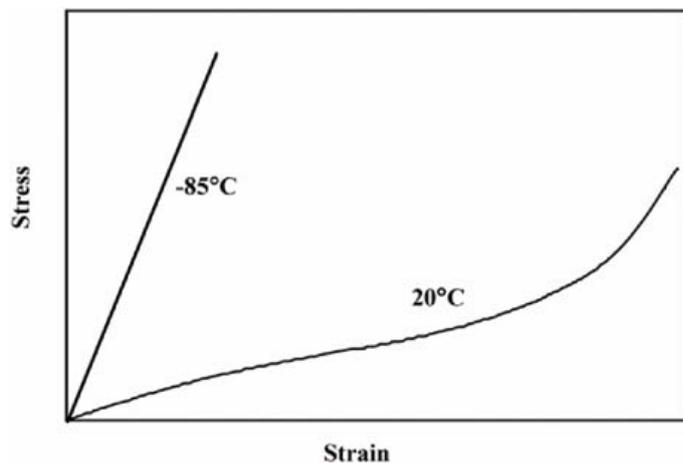
Zeichnen Sie für das folgende Polymerpaar schematisch die Spannungs-Dehnungs-Verläufe in ein Diagramm und beschriften Sie sie!

- Polystyrol-Butadien-Copolymer mit einer Molmasse (Zahlenmittel) von 100 000 g mol⁻¹ und 10 % der verfügbaren Vernetzungsstellen vernetzt, getestet bei 20 °C.
- Polystyrol-Butadien-Copolymer mit einer Molmasse (Zahlenmittel) von 120 000 g mol⁻¹ und 15 % der verfügbaren Vernetzungsstellen vernetzt, getestet bei -85 °C.

Hinweis: Polystyrol-Butadien-Copolymer zeigt elastomeres Verhalten.

Antwort:

Die Grafik zeigt die Spannungs-Dehnungs-Verläufe für die zwei Polystyrol-Butadien-Copolymere.



Das bei 20 °C getestete Copolymer zeigt elastomeres Verhalten (Kurve C in Abb. 15.1), insofern es ein leicht vernetztes Copolymer ist. Die Testtemperatur liegt zudem über der Glasübergangstemperatur. Die Temperatur -85 °C liegt dagegen unter der Glasübergangstemperatur des anderen Copolymers, das Spannungs-Dehnungs-Verhalten entspricht daher dem eines spröden Materials (Kurve A in Abb. 15.1).

Verständnistest 15.6

Erklären Sie anhand der molekularen Struktur, warum Phenolformaldehydharz (Bakelit) kein Elastomer ist! (Die molekulare Struktur von Phenolformaldehyd ist in Tabelle 14.3 aufgeführt.)

Antwort:

Die Moleküle eines Elastomers bilden zweidimensionale Ketten, die nur teilweise vernetzt sind und im unbelasteten Zustand verdreht und geknickt werden können. Phenolformaldehydharz hat aber eine starre dreidimensionale Struktur aus trifunktionalen

Baueinheiten und erfüllt daher nicht die Anforderungen an Kettenkonformation und Flexibilität für elastomeres Verhalten.

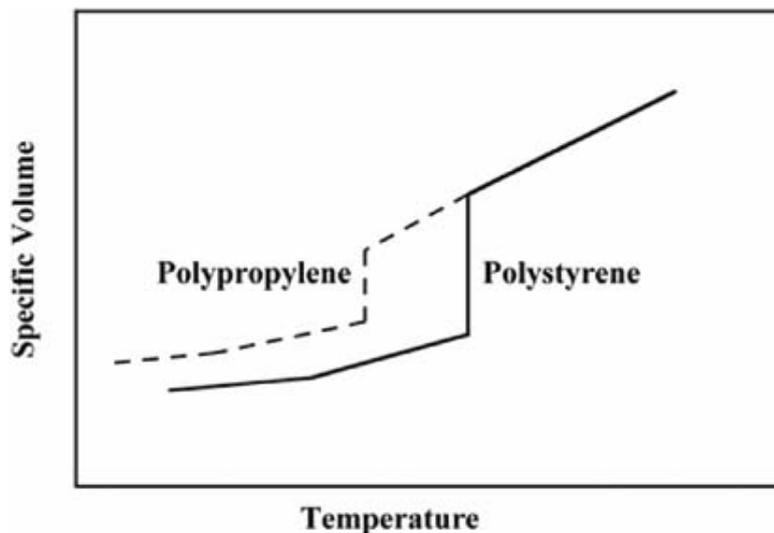
Verständnistest 15.7

Zeichnen und beschriften Sie für jedes der beiden Polymere den Verlauf der spezifischen Volumina als Funktion der Temperatur (beide Kurven in ein Diagramm):

- sphärolithisches Polypropylen mit einer Kristallinität von 25 % und einer Molmasse (Massenmittel) von $75\,000\text{ g mol}^{-1}$
- sphärolithisches Polystyrol mit einer Kristallinität von 25 % und einer Molmasse (Massenmittel) von $100\,000\text{ g mol}^{-1}$

Antwort:

Die Grafik zeigt die Abhängigkeit des spezifischen Volumens von der Temperatur für Polypropylen und Polystyrol mit den angegebenen Eigenschaften.



Da beide Polymere zu 25 % kristallin (also teilkristallin) sind, wird ihr Verhalten dem in Kurve B aus Abb. 15.18 gezeigten entsprechen. Allerdings sind Schmelz- und Glasübergangstemperatur von Polystyrol höher wegen der kompakteren Seitengruppen in der Polymerbaueinheit und wegen der höheren massengemittelten Molekülmasse.

Verständnistest 15.8

(a) Erklären Sie für die beiden folgenden Polymere, ob man entscheiden kann, ob eines der Polymere einen höheren Schmelzpunkt aufweist! (b) Wenn ja, entscheiden Sie, welches

den höheren Schmelzpunkt besitzt und nennen Sie Gründe für Ihre Entscheidung! (c)
Wenn es nicht möglich ist, begründen Sie dies!

- isotaktisches Polystyrol mit einer Dichte von $1,12 \text{ g cm}^{-3}$ und einer Molmasse (Massenmittel) von $150\,000 \text{ g mol}^{-1}$
- syndiotaktisches Polystyrol mit einer Dichte von $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ und einer Molmasse (Massenmittel) von $125\,000 \text{ g mol}^{-1}$

Antwort:

Ja, es ist möglich festzustellen, welches Polymer den höheren Schmelzpunkt hat. Das isotaktische Polystyrol hat einen höheren Schmelzpunkt wegen seiner höheren Dichte (geringere Verzweigung) und der höheren massengemittelten Molekülmasse.

Verständnistest 15.9

Während der Wintermonate fällt die Temperatur in Teilen Alaskas auf Werte von bis zu $-55 \text{ }^\circ\text{C}$. Welche der folgenden elastischen Werkstoffe können unter diesen Bedingungen für Autoreifen verwendet werden: natürliches Isopren, Styrol-Butadien, Acrylnitril-Butadien, Chloropren, Polysiloxan? Begründen Sie ihre Antwort!

Antwort:

Aus Tab. 15.4 liest man ab, dass bei natürlichem Isopren, Styrol-Butadien und Polysiloxan der Einsatztemperaturbereich bis unter $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ reicht. Unterhalb der Untergrenze dieses Temperaturbereichs wird das jeweilige Material spröde und ist dann nicht mehr geeignet für den Einsatz in Autoreifen.

Verständnistest 15.10

Silikonpolymere können so hergestellt werden, dass sie bei Raumtemperatur flüssig sind. Nennen Sie Unterschiede bezüglich der Molekülstruktur zwischen den flüssigen Silikonen und den Silikonkautschuken! Hinweis: Sie können die Abschnitte 14.5 und 15.9 zu Rate ziehen.

Antwort:

Bei Raumtemperatur flüssige Silikone haben niedrige Molekülmassen und nur sehr geringe Vernetzung, elastomere Silikonkautschuke haben viel höhere Molekülmassen und sind zumindest teilweise vernetzt.

Verständnistest 15.11

Entscheiden Sie, ob die Molmasse eines Polymers, das durch Additionspolymerisation unter folgenden Bedingungen hergestellt wurde, vergleichsweise hoch, im mittleren Bereich oder gering ist:

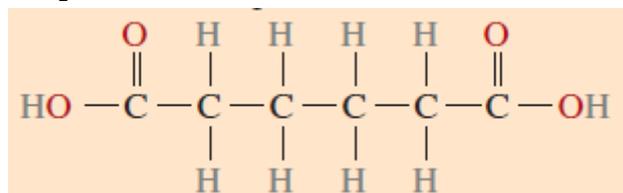
- (a) schneller Start, langsames Wachstum und schneller Abbruch
- (b) langsamer Start, schnelles Wachstum und langsamer Abbruch
- (c) schneller Start, schnelles Wachstum und langsamer Abbruch
- (d) langsamer Start, langsames Wachstum und schneller Abbruch

Antwort:

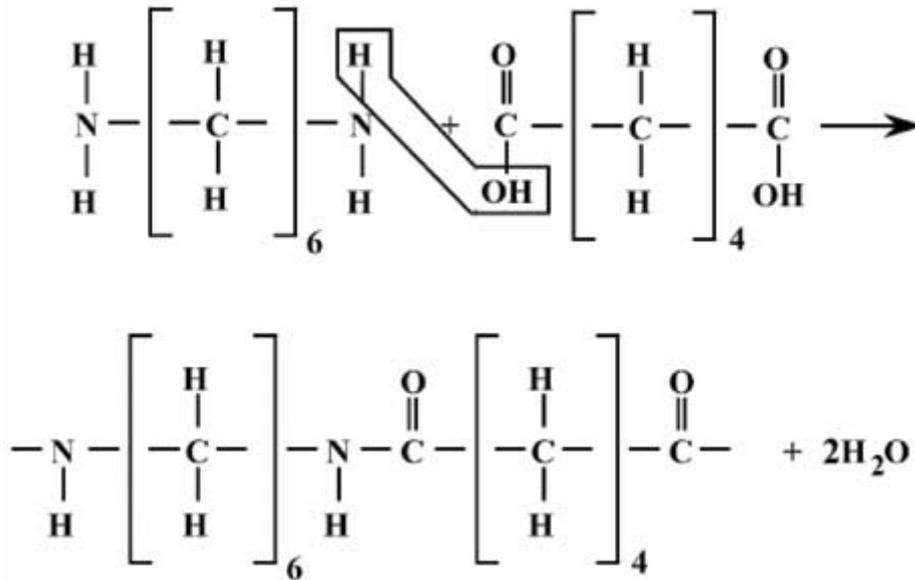
- (a) Bei schnellem Start, langsamem Wachstum und schnellem Abbruch wird die Molmasse relativ niedrig ausfallen.
- (b) Bei langsamem Start, schnellem Wachstum und langsamem Abbruch wird die Molmasse relativ hoch sein.
- (c) Bei schnellem Start, schnellem Wachstum und langsamem Abbruch wird eine mittlere Molmasse erreicht.
- (d) Bei langsamem Start, langsamem Wachstum und schnellem Abbruch wird eine niedrige oder mittlere Molmasse erreicht.

Verständnistest 15.12

Die Herstellung von Nylon6,6 kann als Kondensationspolymerisation durch die Reaktion von Hexamethyldiamin $[\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2]$ mit Adipinsäure durchgeführt werden. Als Nebenprodukt entsteht Wasser. Formulieren Sie die Reaktionsgleichung! Die Struktur von Adipinsäure ist

**Antwort:**

Die folgende Grafik zeigt die Reaktion zwischen Hexamethyldiamin und Adipinsäure zu Nylon 6,6 mit Wasser als Nebenprodukt.



Verständnistest 15.13

- (a) Warum muss der Dampfdruck eines Weichmachers relativ niedrig sein?
- (b) Wie wird die Kristallinität eines Polymers durch den Zusatz eines Weichmachers beeinflusst?
- (c) Wie wirkt der Zusatz von Weichmachern auf die Zugfestigkeit eines Polymers? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

- (a) Wenn der Dampfdruck eines Weichmachers nicht niedrig genug ist, entweicht dessen Moleküle, was das Polymer verspröden lässt.
- (b) Die Kristallinität eines Polymers mit Weichmacherzusatz vermindert sich, da die Weichmachermoleküle sich zwischen den Polymermolekülen einlagern, wodurch die Ausrichtung der letzteren abnimmt.
- (c) Die Zugfestigkeit eines Polymers mit Weichmacherzusatz vermindert sich. Da die Weichmachermoleküle die Polymerketten auseinanderdrücken, nimmt die Stärke der sekundären Zwischenkettenbindungen ab, womit die Zugfestigkeit sinkt, da diese eine Funktion der Stärke dieser Bindungen ist.

Verständnistest 15.14

Sollte bei einem Kautschukelement, das in seiner endgültigen Form vulkanisiert werden soll, die Vulkanisation vor oder nach der Formgebung erfolgen? Warum? (Sie können Abschnitt 15.9 zu Rate ziehen.)

Antwort:

Die Vulkanisation eines Kautschukbauteils sollte vor der Formgebung erfolgen, denn nach der Vulkanisation ist eine plastische Verformung des Werkstoffs nicht mehr möglich, da zu viele Quervernetzungen eingefügt worden sind.

Verständnistest 16.1

Nennen Sie die generellen Unterschiede im Mechanismus der Verstärkung bei teilchenverstärkten und dispersionsverstärkten Verbundwerkstoffen.

Antwort:

Der wichtigste Unterschied im Verstärkungsmechanismus bei teilchen- und dispersionsverstärkten Verbundwerkstoffen besteht darin, dass die Teilchen-Matrix-Wechselwirkungen bei dispersionsverstärkten Verbundwerkstoffen auf molekularer Ebene behandelt werden, bei teilchenverstärkten hingegen nicht.

Verständnistest 16.2

In der nachfolgenden Tabelle sind vier hypothetische, mit gerichteten Fasern verstärkte Verbundwerkstoffe (A bis D) und ihre Eigenschaften aufgelistet. Ordnen Sie auf Basis dieser Daten die vier Verbundwerkstoffe entsprechend ihrer Festigkeit in Längsrichtung von hoch nach niedrig. Begründen Sie Ihre Antwort!

Komposit	Fasertyp	Volumenanteil Fasern	Faserfestigkeit (MPa)	Durchschnittliche Faserlänge (mm)	Kritische Länge (mm)
A	Glas	0,20	$3,5 \times 10^3$	8	0,70
B	Glas	0,35	$3,5 \times 10^3$	12	0,75
C	Kohlefaser	0,40	$5,5 \times 10^3$	8	0,40
D	Kohlefaser	0,30	$5,5 \times 10^3$	8	0,50

Antwort:

Die Anordnung von der höchsten zur niedrigsten longitudinalen Festigkeit ist C, D, B und dann A. Der Verbundwerkstoff C ist am festesten, da die Kohlefasern stärker als Glasfasern sind und außerdem als Endlosfasern vorliegen, welche generell fester als Kurzfasern sind. Dazu hat C den größten Faservolumenanteil. Verbundwerkstoff D hat eine geringere Festigkeit als C, da er einen geringeren Faservolumenanteil aufweist, die Fasern sind aber ebenfalls Endlosfasern. Werkstoff B kommt als nächstes, da die Glasfasern schwächer sind als Kohlefasern, auch diese Fasern sind aber bei B noch Endlosfasern. Die niedrigste

Festigkeit hat Werkstoff A, da er die schwächeren Glasfasern enthält, diese Kurzfasern sind und der Faservolumenanteil den kleinsten Wert aller vier Materialien hat.

Verständnistest 16.3

Nennen Sie für die folgenden Verbundwerkstoffe jeweils eine erwünschte und eine unerwünschte Eigenschaft: faserverstärktes Komposit mit (1) ausgerichteten und (2) statistisch orientierten Kurzfasern.

Antwort:

Ein Verbundwerkstoff mit ausgerichteten Kurzfasern hat den Vorteil, dass die Festigkeit in einer Richtung recht hoch ist; ein Nachteil ist, dass die mechanischen Eigenschaften anisotrop sind.

Ein Verbundwerkstoff mit zufällig orientierten Kurzfasern hat den Vorteil, dass die mechanischen Eigenschaften isotrop sind; ein Nachteil ist, dass es keine Richtung mit höherer Festigkeit gibt.

Verständnistest 17.1

Erwarten Sie, dass Eisen in hochreinem Wasser korrodiert? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Eisen würde in hochreinem Wasser nicht korrodieren, da die Reaktionen in Gln. 17.3 bis 17.7 alle von der Anwesenheit ionischer Verunreinigungen (H^+ oder M^{n+}) oder gelösten Sauerstoffs abhängen.

Verständnistest 17.2

Modifizieren Sie Gleichung 17.19 für den Fall, dass M_1 und M_2 Legierungen sind!

Antwort:

In diesem Fall muss man die Zusammensetzungen der Metalle M_1 und M_2 berücksichtigen. Wenn $[M_1]$ und $[M_2]$ die Konzentrationen der Metalle M_1 und M_2 in ihrer jeweiligen Legierung beschreiben, dann wird aus Gl. 17.19

$$\Delta V = (V_2^\circ - V_1^\circ) - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M_1^{n+}][M_2]}{[M_2^{n+}][M_1]}$$

Verständnistest 17.3

Erklären Sie, warum die Konzentrationspolarisation in der Regel nicht geschwindigkeitsbestimmend für Oxidationen ist!

Antwort:

Die Konzentrationspolarisation ist normalerweise für Oxidationen nicht geschwindigkeitsbestimmend, weil es immer einen unbegrenzten Vorrat an Metallatomen an der korrodierenden Elektrode gibt.

Verständnistest 17.4

- a) Wählen Sie drei Metalle oder Legierungen aus Tabelle 17.2 aus, die Nickel im aktiven Zustand schützen können.
- b) Mitunter wird Bimetallkorrosion verhindert, indem zwischen den verbundenen Metallen und einem dritten Metall, das sich den beiden anderen gegenüber anodisch verhält, eine leitende Verbindung hergestellt wird. Nennen Sie ein Metall aus der elektrochemischen Spannungsreihe, das für den Schutz einer Kupfer-Aluminium-Verbindung genutzt werden kann.

Antwort:

- (a) Mit den folgenden Metallen und Legierungen lässt sich Nickel galvanisch im aktiven Zustand schützen (d. h., sie liegen unterhalb von Ni in der Spannungsreihe): Zinn, Blei, die Stähle WNr. 1.4401 und WNr. 1.4301, Gusseisen, Stahl, Al-Cu-Mg-Legierung, Kadmium, Al 3.0205, Zink und Magnesium und seine Legierungen.
- (b) Zink, Magnesium und Magnesiumlegierungen können ein Kupfer-Aluminium-Element schützen.

Anmerkung: In der Aufgabenstellung steht irrtümlich anstelle von „Kupfer-Aluminium-Element“ „Kupfer-Aluminium-Verbindung“.

Verständnistest 17.5

Nennen Sie zwei Beispiele für eine nützliche Anwendung von Kontaktkorrosion. Hinweis: Ein Beispiel wird später in diesem Kapitel erläutert.

Antwort:

Zwei beispielhafte Anwendungen der Kontaktkorrosion sind der kathodische Korrosionsschutz und die Trockenbatterie.

Verständnistest 17.6

Gilt Gleichung 17.23 für gleichförmige Korrosion und für Lochkorrosion gleichermaßen? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Gl. 17.23 gilt *nicht* gleichermaßen für gleichförmige Korrosion und für Lochkorrosion. Dies liegt daran, dass bei der Lochkorrosion das Material sehr lokalisiert angegriffen wird und das entstehende Loch mit der Zeit das gesamte Werkstück durchdringen kann (was zum Materialversagen, d. h. maximalem Schaden führt), wobei nur wenig Material verloren geht und die Korrosionsgeschwindigkeit klein ist. Bei gleichförmiger Korrosion dagegen ist die Korrosionsgeschwindigkeit ein gutes Maß für den durch Korrosion hervorgerufenen Schaden.

Verständnistest 17.7

Blechdosen werden aus Stahl hergestellt, dessen Innenseite durch eine dünne Zinnschicht geschützt ist. Diese verhindert die Korrosion durch Lebensmittel in gleicher Weise, wie Zink den Stahl vor atmosphärischer Korrosion schützt. Erläutern Sie, wie der kathodische Schutz von Blechdosen funktioniert; Zinn soll entsprechend der elektrochemischen Spannungsreihe (Tab. 17.2) weniger aktiv sein als Stahl.

Antwort:

Zinn schützt Stahl in Blechdosen kathodisch, obwohl Zinn in der elektrochemischen Spannungsreihe weniger aktiv ist als Stahl. Der Grund dafür ist, dass diese Spannungsreihe die Reaktivitäten der Metalle und Legierungen in Meerwasser beschreibt; für Nahrungsmittellösungen, wie sie in Blechdosen üblicherweise aufbewahrt werden, gilt eine andere Spannungsreihe, in der Zinn das aktivere Metall ist.

Verständnistest 17.8

Erklären Sie, warum aus molekularer Sicht stärkere Vernetzung und höhere Kristallinität eines polymeren Werkstoffs seine Widerstandsfähigkeit gegen Aufquellen und Auflösen verbessern! Erwarten Sie den größeren Einfluss von der Vernetzung oder der Kristallinität?

Begründen Sie Ihre Antwort! Sie können dazu Abschnitt 14.7 und 14.11 zu Rate ziehen.

Antwort:

Beim Aufquellen und Auflösen eines Polymermaterials diffundieren die eindringenden Moleküle auf Positionen zwischen den Polymermakromolekülen, wodurch diese auseinandergedrückt werden. Eine Erhöhung des Vernetzungsgrads wie auch der Kristallinität vergrößern den Widerstand des Polymers gegen diese Art des Abbaus, indem sie die intermolekularen Bindungen zwischen benachbarten Ketten verstärken. Auf diese Weise gelangen weniger eindringende Moleküle zwischen die Makromolekülketten.

Vernetzung ist dabei der effektivere Mechanismus. Bei linearen, hochgradig kristallinen Polymeren sind die intermolekularen Bindungen sekundäre Bindungen (Van-der-Waals-Bindungen oder Wasserstoffbrücken) und daher verhältnismäßig schwach im Vergleich zu den starken kovalenten Bindungen bei der Vernetzung.

Verständnistest 17.9

Nennen Sie drei Unterschiede zwischen der Korrosion von Metallen und

- a) der Korrosion von Keramiken und
- b) dem Abbau von Polymeren.

Antwort:

(a) Es gibt die folgenden Unterschiede zwischen der Korrosion von Metallen und der von Keramiken:

1. Keramiken sind in den meisten Milieus resistenter gegen Korrosion als Metalle.
2. Korrosion von Keramiken ist normalerweise nur ein chemischer Lösungsvorgang, während Metallkorrosion gewöhnlich elektrochemisch ist.
3. Keramiken sind insbesondere bei hohen Temperaturen korrosionsbeständiger.

(b) Zwischen der Korrosion von Metallen und dem Abbau von Polymeren bestehen die folgenden drei Unterschiede:

1. Der Abbau von Polymeren erfolgt meist biochemisch, während Metalle elektrochemisch korrodieren.
2. Biochemischer Polymerabbau ist ein wesentlich komplexerer Vorgang als die Korrosion von Metallen.
3. Es sind noch mehrere weitere Abbauprozesse bei Polymeren möglich, z. B. Lösungsvorgänge, Aufquellen oder das Aufbrechen von chemischen

Bindungen (unter Einwirkung von Strahlung, Wärme oder chemischen Reaktionen).

Verständnistest 18.1

Wenn ein flüssiges Metall extrem schnell unter seinen Schmelzpunkt abgekühlt wird, bildet es einen nichtkristallinen Festkörper (d. h. ein metallisches Glas). Wird die elektrische Leitfähigkeit des nichtkristallinen Metalls größer oder kleiner sein als die des Metalls im kristallinen Zustand? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Die elektrische Leitfähigkeit in einem metallischen Glas ist kleiner als in seinem kristallinen Gegenstück. Das Glas besitzt praktisch keine periodische atomare Struktur und daher werden die den Leitungsvorgang vermittelnden Elektronen häufig und wiederholt gestreut, was die elektrische Leitfähigkeit vermindert. (In einem perfekten Kristallgitter gibt es keine Elektronenstreuung.)

Verständnistest 18.2

Bei Raumtemperatur hat der spezifische Widerstand von reinem Blei und reinem Zinn die Werte $2,06 \times 10^{-7}$ bzw. $1,11 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$.

(a) Erstellen Sie eine schematische Darstellung des spezifischen Widerstandes bei Raumtemperatur als Funktion der Zusammensetzung bei der Variation von reinem Blei zu reinem Zinn!

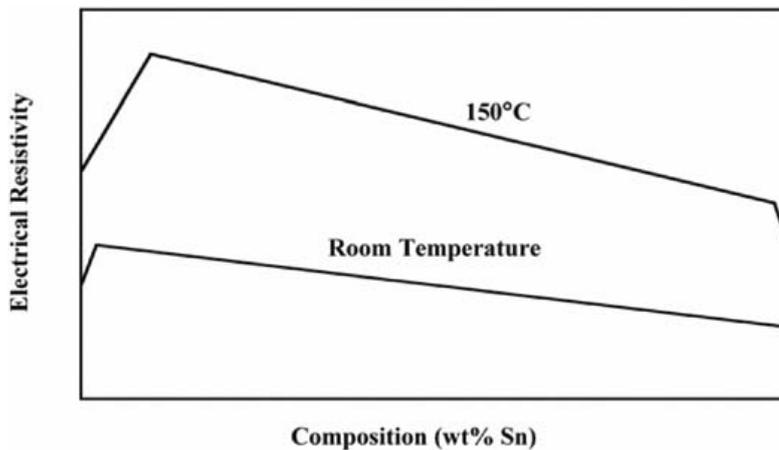
(b) Tragen Sie in die gleiche Darstellung schematisch den Kurvenverlauf bei 150°C ein!

(c) Erklären Sie die Form der beiden Kurven sowie die Unterschiede zwischen ihnen!

Hinweis: Betrachten Sie das Pb-Sn-Phasendiagramm in Abbildung 9.8.

Antwort:

(a) und (b): Betrachten Sie den untenstehenden Plot des spezifischen Widerstands gegen die Zusammensetzung einer Blei-Zinn-Legierung bei Raumtemperatur und bei 150°C .



- (c) Aus dem Pb-Sn-Phasendiagramm (Abb. 9.8) schließen wir durch Extrapolation der beiden Solvuslinien (Löslichkeitslinien) auf Raumtemperatur (z. B. 20 °C), dass der α -Phase-Mischkristall bei 100–98 Ma.-% Pb existiert. Im Bereich 1–0 Ma.-% Pb ist die β -Phase stabil. Innerhalb dieser beiden Regionen steigt der spezifische Widerstand in Einklang mit Gl. 18.11 an. Aus der Aufgabenstellung entnehmen wir nun, dass der spezifische Widerstand von reinem Blei größer ist als der von reinem Zinn. Bei Zusammensetzungen zwischen diesen beiden Extremen koexistieren die α - und die β -Phase und der spezifische Widerstand der Legierung ist eine Funktion der spezifischen Widerstände der einzelnen Phasen und ihrer Volumenanteile (Gl. 18.12). Die Massenanteile von α - und β -Phase hängen in der Koexistenzregion linear von der Zusammensetzung ab (entsprechend dem Hebelgesetz, Abschnitt 9.8.3). Die Dichte von Blei (11,35 g/cm³) unterscheidet sich recht deutlich von der von Zinn (7,3 g/cm³). Daher entsprechen die Phasenvolumenanteile nicht exakt den Massenanteilen, was bedeutet, dass der spezifische Widerstand nicht ganz linear mit der Zusammensetzung variiert. Der Einfachheit halber wurde aber in der obigen Grafik die Kurve des spezifischen Widerstands im Koexistenzbereich durch eine Gerade angenähert.

Bei 150 °C hat diese Kurve dieselbe generelle Form, sie ist aber signifikant zu höheren Widerstandswerten verschoben, da der spezifische Widerstand mit der Temperatur zunimmt (Gl. 18.10 und Abb. 18.8). Weiterhin zeigt Abb. 9.8, dass die Löslichkeit von Zinn in Blei bei 150 °C auf etwa 10 Ma.-% Sn ansteigt – das Gebiet der reinen α -Phase ist entsprechend breiter und die Erhöhung des spezifischen Widerstands aufgrund des Mischkristall-Effekts macht sich in einem breiteren Bereich der Zusammensetzung bemerkbar, was sich ebenfalls an der obigen Grafik ablesen lässt. Das Temperaturverhalten des spezifischen Widerstands ist auf der Zinn-reichen Seite des Diagramms ähnlich. Dort erstreckt sich der β -Phasen-Bereich von 0 bis etwa 2 Ma.-% Pb (98 Ma.-% Sn). Der Koexistenzbereich ist wie bei der Kurve für Raumtemperatur durch eine Gerade angenähert, die sich zwischen den Werten des spezifischen Widerstands bei den maximalen Löslichkeiten der beiden Phasen erstreckt.

Verständnistest 18.3

Welche der Halbleiterverbindungen ZnS und CdSe hat eine größere Bandlücke E_g ? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

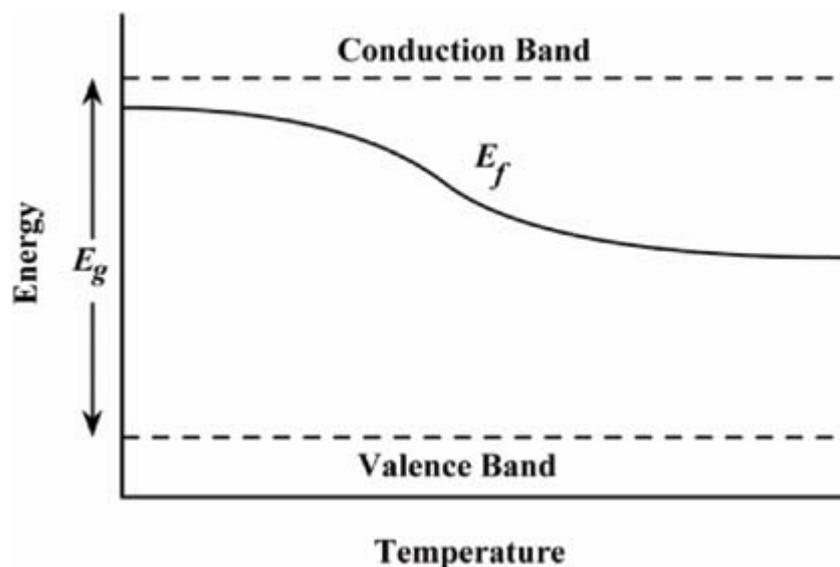
Zinksulfid hat eine größere Bandlücke als Cadmiumselenid. Beide sind II-VI-Halbleiter und Zink und Schwefel stehen beide höher im Periodensystem als Cadmium und Selen. Da die Bandlücke im Periodensystem innerhalb einer Gruppe von unten nach oben zunimmt, muss die Bandlücke von ZnS größer sein.

Verständnistest 18.4

Bei relativ hohen Temperaturen zeigen sowohl p- als auch n-dotierte Halbleiterwerkstoffe das Verhalten von Eigenleitern (Abschn. 18.12). Stellen Sie auf der Grundlage der Betrachtungen in Abschnitt 18.5 und des vorangegangenen Abschnittes für einen n-Leiter den Verlauf der Fermi-Energie als Funktion der Temperatur bis in den Temperaturbereich dar, in dem die Eigenleitung dominiert! Markieren Sie in Ihrer Darstellung die Oberkante des Valenzbandes und die Unterkante des Leitungsbandes!

Antwort:

Die Grafik zeigt schematisch, wie die Fermi-Energie E_f von der Temperatur abhängt.



Wie im vorherigen Abschnitt erklärt, ist der Werkstoff bei tiefen Temperaturen extrinsisch (fremdleitend) und die Fermi-Energie liegt am oberen Ende der Bandlücke knapp

unterhalb des Leitungsbands, in der Nähe des Donator-Niveaus für einen n-Halbleiter. Mit zunehmender Temperatur wird der Werkstoff allmählich intrinsisch (eigenleitend) und die Fermi-Energie liegt eher in der Mitte der Bandlücke (Abschnitt 18.5).

Verständnistest 18.5

Wirkt Zn als Donator oder Akzeptor, wenn es zur Dotierung des Verbindungshalbleiters GaAs verwendet wird? Begründen Sie Ihre Antwort! (Gehen Sie davon aus, dass die Zn-Atome auf Gitterplätzen des GaAs eingebaut werden.)

Antwort:

Zink verhält sich in GaAs als Akzeptor. Da Zink im Periodensystem der Gruppe IIB (12) angehört, nimmt es Ga-Plätze im Halbleitergitter ein. Da es ein Valenzelektron weniger als Gallium hat, muss es ein Akzeptor sein.

Verständnistest 18.6

Diskutieren Sie ausgehend von Abbildung 18.17, ob die Temperatur, bei der die Eigenleitung in einem Störstellenhalbleiter dominant wird, mit wachsender Dotierung steigt, im Wesentlichen konstant bleibt oder fällt!

Antwort:

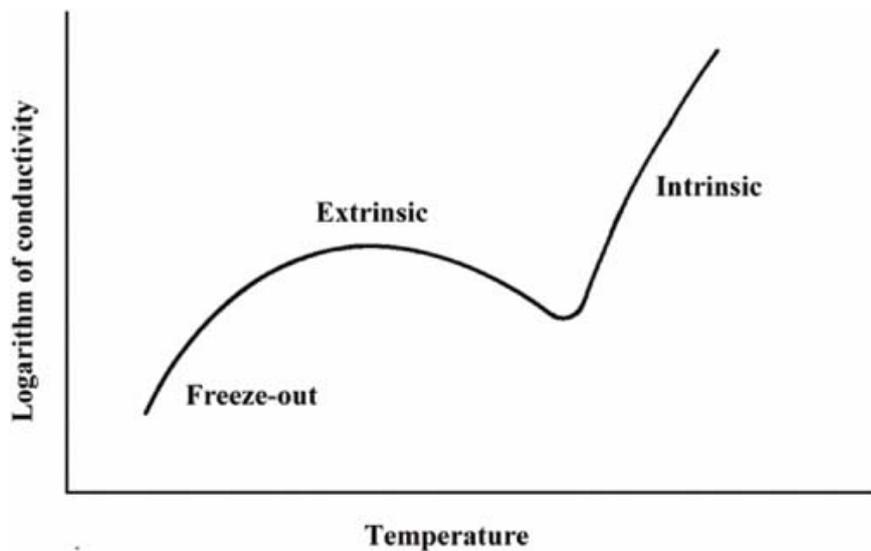
Abb. 18.17 zeigt, dass mit steigender Dotierung die horizontale „Fremdleitungslinie“ („extrinsischer Bereich“) sich nach oben verschiebt. Dies bedeutet, dass sich der Punkt, an welchem die Eigenleitung dominant wird („intrinsischer Bereich“), sich in Richtung höherer Temperaturen verlagert.

Verständnistest 18.7

Erstellen Sie ein Diagramm der Temperaturabhängigkeit des Logarithmus der elektrischen Leitfähigkeit von Silizium, das mit einem Donatoranteil von 10^{21} m^{-3} dotiert ist! Verwenden Sie dazu die Temperaturabhängigkeit der Elektronenkonzentration für n-leitendes Silizium aus Abbildung 18.17 und die Temperaturabhängigkeit des Logarithmus der Elektronenmobilität aus Abbildung 18.19a.

Antwort:

Die Grafik zeigt schematisch die Temperaturabhängigkeit der logarithmierten elektrischen Leitfähigkeit ($\log \sigma$).



Nach Gl. 18.16 ist die elektrische Leitfähigkeit eines n-Halbleiters proportional zum Produkt aus Konzentration n und Mobilität (Beweglichkeit) μ_e der Elektronen:

$$\sigma \propto n \mu_e$$

In Abb. 18.19a gibt es keine Kurve für $n = 10^{21} \text{ m}^{-3}$, diese würde aber zwischen den Kurven für „ $< 10^{20} \text{ m}^{-3}$ “ und „ 10^{22} m^{-3} “ liegen und eine ähnliche Form wie diese haben: der Logarithmus der Elektronenmobilität nimmt mit steigender Temperatur überall ab.

Betrachten wir nun einzeln die drei Gebiete in Abb. 18.17: Im Bereich der Störstellenreserve („Freeze-out“) nimmt die logarithmierte Elektronenkonzentration mit der Temperatur stark zu. Multipliziert man diese Werte mit denen für die logarithmierte Elektronenmobilität aus Abb. 18.19a, ergibt sich insgesamt ein Anwachsen von $\log \sigma$ mit der Temperatur, da $\log n$ schneller wächst als $\log \mu_e$ abfällt.

Im Temperaturbereich des Fremdleitungsgebiets („extrinsischer Bereich“) ist $\log n$ konstant, während $\log \mu_e$ weiter abnimmt, $\log \sigma$ nimmt also ebenfalls ab. Daraus folgt, dass die $\log \sigma$ -Kurve notwendigerweise ein Maximum einnimmt, und zwar bei einer Temperatur knapp unterhalb des Einsetzens der Fremdleitung.

Schließlich steigt $\log n$ im Bereich der Eigenleitung („intrinsischer Bereich“) erneut stark an, sodass trotz weiterhin abnehmender Mobilität $\log \sigma$ mit weiter zunehmender wieder Temperatur anwächst. In der Nähe des Einsetzens der Eigenleitung hat die $\log \sigma$ -Kurve somit ein Minimum.

Verständnistest 18.8

Erwarten Sie, dass mit steigender Temperatur die Funktion von pn-Gleichrichtern und Transistoren beeinflusst wird? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Wenn die Temperatur eines pn-Gleichrichters oder eines Transistors hinreichend hoch wird, setzt in den Halbleitern die Eigenleitung ein und die Bauteile verlieren ihre Funktionalität. Darüber hinaus fangen die n- und p-Dotieratome an, merklich zwischen n- und p-Gebiet hin- und herzudiffundieren, was ebenfalls die Funktion beeinträchtigt.

Verständnistest 18.9

Welche Art(en) der Polarisation können bei festem Bleititanat (PbTiO_3) auftreten und warum? Hinweis: Bleititanat hat die gleiche Kristallstruktur wie Bariumtitanat (Abb. 18.35).

Antwort:

In Bleititanat kann elektronische, ionische und Orientierungspolarisation auftreten. Elektronische Polarisation ist in allen dielektrischen Materialien möglich. Ionische Polarisation ist möglich, da die Blei-, Titan- und Sauerstoffatome alle weitgehend ionischen Charakter in der Verbindung haben. Schließlich kann es auch zur Orientierungspolarisation kommen, da permanente Dipolmomente in derselben Weise wie in Bariumtitanat induziert werden können (Abb. 18.35).

Verständnistest 18.10

Erwarten Sie, dass sich die räumlichen Dimensionen eines piezoelektrischen Werkstoffs wie BaTiO_3 ändern, wenn dieser einem elektrischen Feld ausgesetzt wird? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Ja, die äußeren Abmessungen eines piezoelektrischen Materials wie Bariumtitanat ändern sich, wenn ein elektrisches Feld bzw. eine Spannung angelegt wird. Abb. 18.36 zeigt, dass bei einer Formänderung in einem piezoelektrischen Material eine elektrische Spannung (bzw. ein elektrisches Feld) induziert wird. Es ist nur logisch, dass der umgekehrte Effekt ebenfalls auftritt, also ein Piezoelektrikum seine Form unter Einwirkung eines äußeren elektrischen Feldes ändert.

Verständnistest 19.1

(a) Erklären Sie, warum sich der Messingring am Verschluss eines Glasgefäßes bei Erwärmung lockert! (b) Stellen Sie sich vor, dass der Ring aus Wolfram anstatt aus Messing besteht. Welchen Effekt hat die Erwärmung von Glas und Deckel? Begründen Sie Ihre Antwort.

Antwort:

- (a) Der Messingring auf einem Glasgefäß wird lose, weil Messing einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten ($20 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$) hat als Glas ($9 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$, vgl. Tab. 19.1).
- (b) Ein Ring aus Wolfram würde sich im Gegensatz dazu sogar festziehen, wenn Glas und Deckel erwärmt werden; der Wärmeausdehnungskoeffizient von Wolfram beträgt nur $4,5 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$.

Verständnistest 19.2

Warum ist die Wärmeleitfähigkeit eines unlegierten Stahls größer als die eines legierten Stahls? Hinweise dazu finden Sie in Abschnitt 11.2.

Antwort:

Die Wärmeleitfähigkeit von unlegiertem Stahl ist größer als etwa die von rostfreiem Stahl, da in jenem die Konzentration von Legierungselementen viel größer ist. Atome dieser Elemente wirken als Streuzentren für die den Wärme- (und Strom-)Transport vermittelnden freien Elektronen.

Verständnistest 19.3

Die Wärmeleitfähigkeit eines einkristallinen keramischen Festkörpers ist etwas größer als die eines polykristallinen Körpers aus dem gleichen Werkstoff. Worauf ist das zurückzuführen?

Antwort:

Die Wärmeleitfähigkeit eines Einkristalls ist größer als bei einem polykristallinen Körper aus dem gleichen Werkstoff, da Phononen und Elektronen an Korngrenzen im polykristallinen Körper gestreut werden, wodurch die Effizienz des Wärmetransports abnimmt.

Verständnistest 19.4

Hat lineares ($M_n = 450\,000\text{ g mol}^{-1}$) oder leicht verzweigtes ($M_n = 650\,000\text{ g mol}^{-1}$) Polyethylen eine höhere Wärmeleitfähigkeit? Begründen Sie Ihre Antwort! Einen Hinweis dazu finden Sie in Abschnitt 14.11.

Antwort:

Lineares Polyethylen hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit als leicht verzweigtes, weil es wegen der linearen Molekülstruktur einen größeren Kristallisationsgrad aufweist. Da die Wärmeleitung hier durch Kettenschwingungen der Makromoleküle vermittelt wird und die Koordination dieser Schwingungen mit dem Kristallisationsgrad zunimmt, steigt auch die Wärmeleitfähigkeit mit dem Kristallisationsgrad an.

Verständnistest 19.5

Erklären Sie, warum sich an kalten Tagen der metallische Türgriff eines Autos kälter anfühlt als ein Lenkrad aus Kunststoff, obwohl beide die gleiche Temperatur haben!

Antwort:

An kalten Tagen fühlt sich ein metallischer Türgriff kälter an als ein Bauteil aus Plastik, da Metalle eine höhere Wärmeleitfähigkeit besitzen und deshalb die Körperwärme schneller abführen.

Verständnistest 20.1

Geben Sie die wichtigsten Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen ferromagnetischen und ferrimagnetischen Stoffen an!

Antwort:

Es bestehen folgende Ähnlichkeiten zwischen ferro- und ferrimagnetischen Stoffen:

1. Zwischen den magnetischen Momenten benachbarter Atome bzw. Kationen wirken bei beiden Materialklassen Kopplungskräfte.
2. Sowohl in Ferro- als auch Ferrimagneten bilden sich Domänen aus.
3. In beiden Materialklassen beobachtet man B - H -Hysterese, weswegen eine permanente Magnetisierung möglich ist.

Unterschiede zwischen ferro- und ferrimagnetischen Stoffen sind:

1. Die gekoppelten magnetischen Momente stehen in Ferromagnetika parallel, in Ferrimagnetika antiparallel.
2. Ferromagnetika sind Metalle und daher gute elektrische Leiter, Ferrimagnetika sind Keramiken und daher elektrische Isolatoren.
3. Ferromagnetische Stoffe haben eine größere Sättigungsmagnetisierung.

Verständnistest 20.2

Wodurch unterscheiden sich die Kristallstrukturen von Spinellen und inversen Spinellen?
Bemerkung: Hinweise dazu finden Sie in Abschnitt 12.2.

Antwort:

Sowohl Spinelle als auch inverse Spinelle haben eine Kristallstruktur, in welcher die Anionen kubisch-flächenzentriert dicht gepackt sind. Die Kationen sitzen in Tetraeder- oder Oktaederlücken. In beiden Strukturen nehmen die zweiwertigen Kationen (z. B. Fe^{2+}) dabei die Tetraederlücken ein. Der Unterschied zwischen normalem und inversem Spinell liegt darin, dass die dreiwertigen Kationen (z. B. Fe^{3+}) im Spinell sich *alle* in Oktaederlücken befinden, im inversen Spinell dagegen sitzt die Hälfte der dreiwertigen Kationen in Oktaederlücken, die andere Hälfte in Tetraederlücken.

Verständnistest 20.3

Erklären Sie, warum ein Permanentmagnet entmagnetisiert wird, wenn er wiederholt herunterfällt!

Antwort:

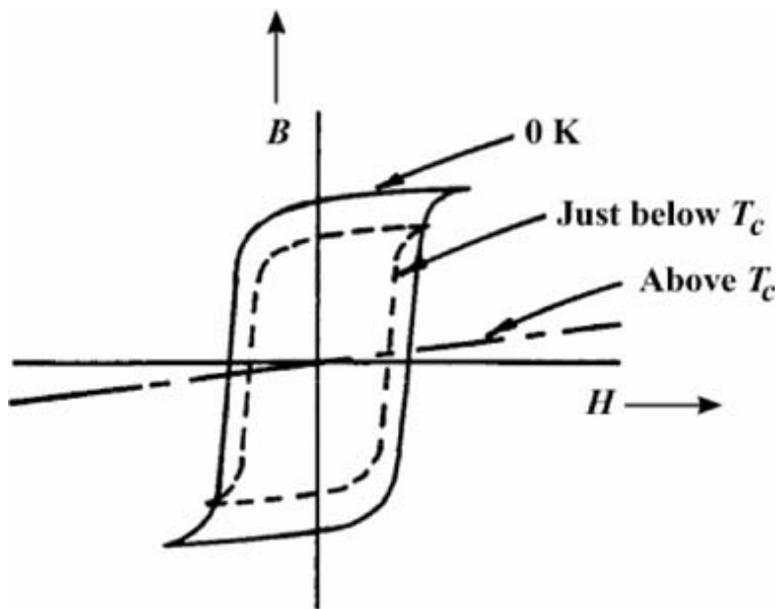
Wenn ein Permanentmagnet wiederholt auf den Boden fällt, wird er entmagnetisiert, da die Erschütterungen eine große Zahl von zuvor ausgerichteten magnetischen Dipolen aus der Vorzugsrichtung kippen lassen.

Verständnistest 20.4

Stellen Sie die $B(H)$ -Kurven eines ferromagnetischen Werkstoffs bei (a) 0 K, (b) einer Temperatur kurz unterhalb seiner Curie-Temperatur T_c und (c) einer Temperatur kurz oberhalb von T_c gemeinsam in einem Diagramm dar! Erklären Sie, warum sich die Kurvenverläufe voneinander unterscheiden!

Antwort:

Die schematische B - H -Hysteresekurve ist in der Grafik dargestellt.



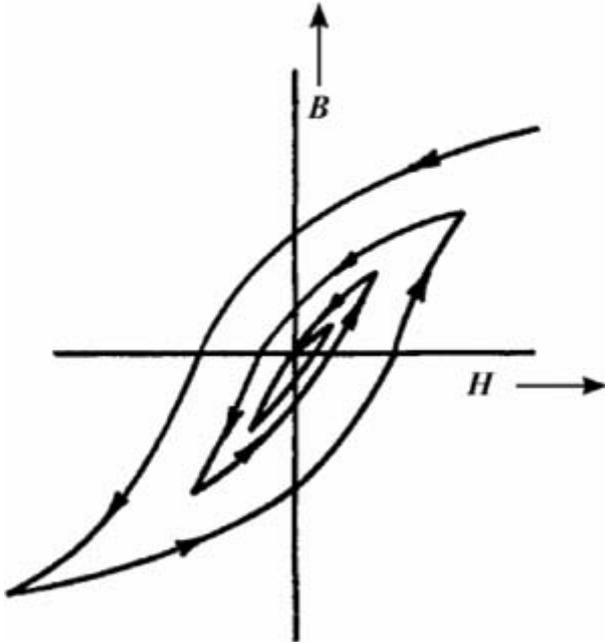
Bei 0 K ist die Sättigungsmagnetisierung maximal und die Hystereseschleife hat die größte Fläche. Bei einer höheren Temperatur, die aber noch unter der Curie-Temperatur T_c liegt, nehmen Sättigungsmagnetisierung und Größe der Hystereseschleife ab. Oberhalb von T_c verschwindet das ferromagnetische Verhalten und der Werkstoff wird paramagnetisch. B hängt dann linear von H ab, die Gerade hat eine geringe positiven Steigung.

Verständnistest 20.5

Ein Ferromagnet wird dadurch allmählich entmagnetisiert, dass er einem äußeren Feld mit alternierender Richtung und abnehmender Amplitude ausgesetzt wird. Stellen Sie das Hystereseverhalten während dieses Vorganges schematisch dar!

Antwort:

Die schematische Skizze zeigt das Hystereseverhalten eines Ferromagneten, der allmählich in einem äußeren Feld mit alternierender Richtung und abnehmender Amplitude entmagnetisiert wird.

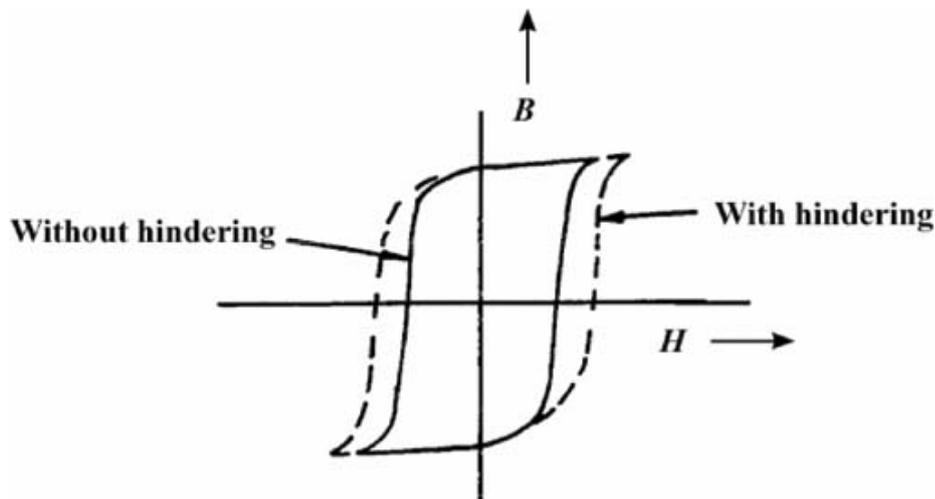


Verständnistest 20.6

Durch die Änderung der Mikrostruktur und den Zusatz von Fremdstoffen ist es möglich, die Beweglichkeit der Domänenwände in ferro- und ferrimagnetischen Werkstoffen zu steuern. Damit wird ihre Reaktion auf die Änderung des äußeren Magnetfeldes beeinflusst. Skizzieren Sie die Hystereseschleife $B(H)$ für einen ferromagnetischen Werkstoff! Zeichnen Sie die Änderungen des Kurvenverlaufs ein, wenn die Bewegung der Domänenwände erschwert ist!

Antwort:

Wenn die Bewegung der Domänenwände behindert wird, steigt die Koerzitivfeldstärke (Koerzitivkraft) des magnetischen Materials an, ohne dass es eine signifikante Änderung der Sättigungsflussdichte gäbe. Es ergibt sich daher das in der schematischen Skizze dargestellte $B-H$ -Hystereseverhalten mit bzw. ohne Behinderung der Domänenwandbewegung.



Verständnistest 21.1

Diskutieren Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Photonen und Phononen! Hinweise dazu finden Sie in Abschnitt 19.2.

Antwort:

Gemeinsamkeiten zwischen Photonen und Phononen sind:

1. Beide lassen sich als natürliche Wellenerscheinungen beschreiben.
2. Die Energie ist in beiden Fällen quantisiert.

Unterschiede zwischen Photonen und Phononen sind:

1. Phononen sind elastische Wellen in Festkörpern. Photonen sind elektromagnetische Wellenpakete, die in Festkörpern existieren können, aber auch in anderen Medien sowie im Vakuum.
2. Die Wellengeschwindigkeiten von Photonen und Phononen unterscheiden sich stark. Photonen pflanzen sich mit (der im jeweiligen Medium gültigen) Lichtgeschwindigkeit fort, Phononen mit der Schallgeschwindigkeit, die in der Regel um viele Größenordnungen kleiner ist.

Verständnistest 21.2

Elektromagnetische Strahlung kann aus klassischer und aus quantenmechanischer Sicht betrachtet werden. Vergleichen Sie beide Zugänge!

Antwort:

Klassisch gesehen ist elektromagnetische Strahlung eine Welle, deren Energie beliebige Werte annehmen kann. Quantenmechanisch betrachtet kann die elektromagnetische Strahlungsenergie nur bestimmte Werte annehmen (sie ist quantisiert) und die Strahlung besitzt eine „Doppelnatur“: Sie zeigt je nach experimenteller Fragestellung Wellen- oder Teilcheneigenschaften.

Verständnistest 21.3

Warum sind Metalle für hochfrequente Röntgen- und γ -Strahlung durchsichtig?

Antwort:

Metalle sind für hochfrequente Röntgen- und Gammastrahlung durchsichtig, weil die Strahlungsenergie in diesem Fall so groß ist, dass keine Elektronen durch Absorption eines Strahlungsquants in einen erlaubten Zustand höherer Energie innerhalb des Metalls übergehen können.

Verständnistest 21.4

Bei Zugabe welcher der folgenden Oxide erhöht sich der Brechungsindex von Quarzglas (SiO_2): Al_2O_3 , TiO_2 , NiO , MgO ? Begründen Sie Ihre Antwort! Sie können dabei auf die Angaben in Tabelle 12.3 zurückgreifen.

Antwort:

In ionischen Materialien nimmt der Grad der elektronischen Polarisierung mit der Größe der einzelnen Ionen zu. In Tab. 12.3 finden wir, dass Al^{3+} , Ti^{4+} , Ni^{2+} und Mg^{2+} alle einen größeren Ionenradius haben als das Si^{4+} -Ion (0,053 nm, 0,061 nm, 0,069 nm und 0,072 nm gegenüber 0,040 nm). Daher erhöhen alle diese Ionen den Brechungsindex, wenn sie zu SiO_2 hinzugefügt werden.

Verständnistest 21.5

Sind die Elementhalbleiter Silizium und Germanium für sichtbares Licht durchlässig? Begründen Sie Ihre Antwort! (Hinweise in Tabelle 18.3).

Antwort:

Um zu klären, ob Silizium oder Germanium für sichtbares Licht durchlässig sind, müssen wir die Bandlücken dieser Elemente untersuchen. Wir entnehmen Tab. 18.3 die Werte

1,11 eV für Si und 0,67 eV für Ge. Nach Gl. 21.16b sind Halbleiter mit einer Bandlücke unterhalb von etwa 1,8 eV undurchlässig für sichtbares Licht. Diese Bedingung wird von beiden Halbleitern erfüllt, sodass alles einfallende Licht bei elektronischen Übergängen vom Valenz- ins Leitungsband absorbiert wird.

Verständnistest 21.6

Vergleichen Sie die Faktoren, die die charakteristische Färbung von Metallen und durchsichtigen Nichtmetallen bestimmen!

Antwort:

Die charakteristische Farbe eines Metalls wird bestimmt durch die Wellenlängenverteilung (das Spektrum) des nicht absorbierten Lichts, das von der Oberfläche *reflektiert* wird. Die charakteristische Färbung eines transparenten Nichtmetalls wird bestimmt durch die Wellenlängenverteilung des nicht absorbierten Lichts, welches durch das Material *hindurchdringt*.

Verständnistest 21.7

Ist der Halbleiter Zinkselenid (ZnSe) mit einer Bandlücke von 2,58 eV fotoleitend, wenn er sichtbarem Licht ausgesetzt wird? Begründen Sie Ihre Antwort!

Antwort:

Zinkselenid hat eine Bandlücke von 2,58 eV und ist fotoleitend. Dies bedeutet, dass Elektronen durch Absorption von einfallendem Licht vom Valenz- in das Leitungsband angeregt werden können. Nach Gl. 21.16a beträgt die maximale Bandlücke, bei der noch sichtbares Licht absorbiert werden kann, 3,1 eV. Da die Bandlücke von ZnSe kleiner als dieser Wert ist, sind fotoinduzierte Elektronenübergänge vom Valenz- in das Leitungsband möglich.