Kapitel 1

Festigkeit

1.1 Zugversuch

Betrachten Sie das in Abb. 1.1 links oben dargestellt Kraft-Weg-Diagramm eines Stahls, das in einem Zugversuch aufgenommen wurde. Rechts daneben ist eine Ausschnittsvergrößerung des Bereichs um den Ursprung gegeben.

1. Charakterisieren Sie die Art des Bruchs.

2. Geben Sie die Bezeichnungen und deren Bedeutung an, die durch die Formelzeichen $R_{p0.2}$, R_m, E, A und Z abgekürzt werden. Welche dieser fünf Größen werden im

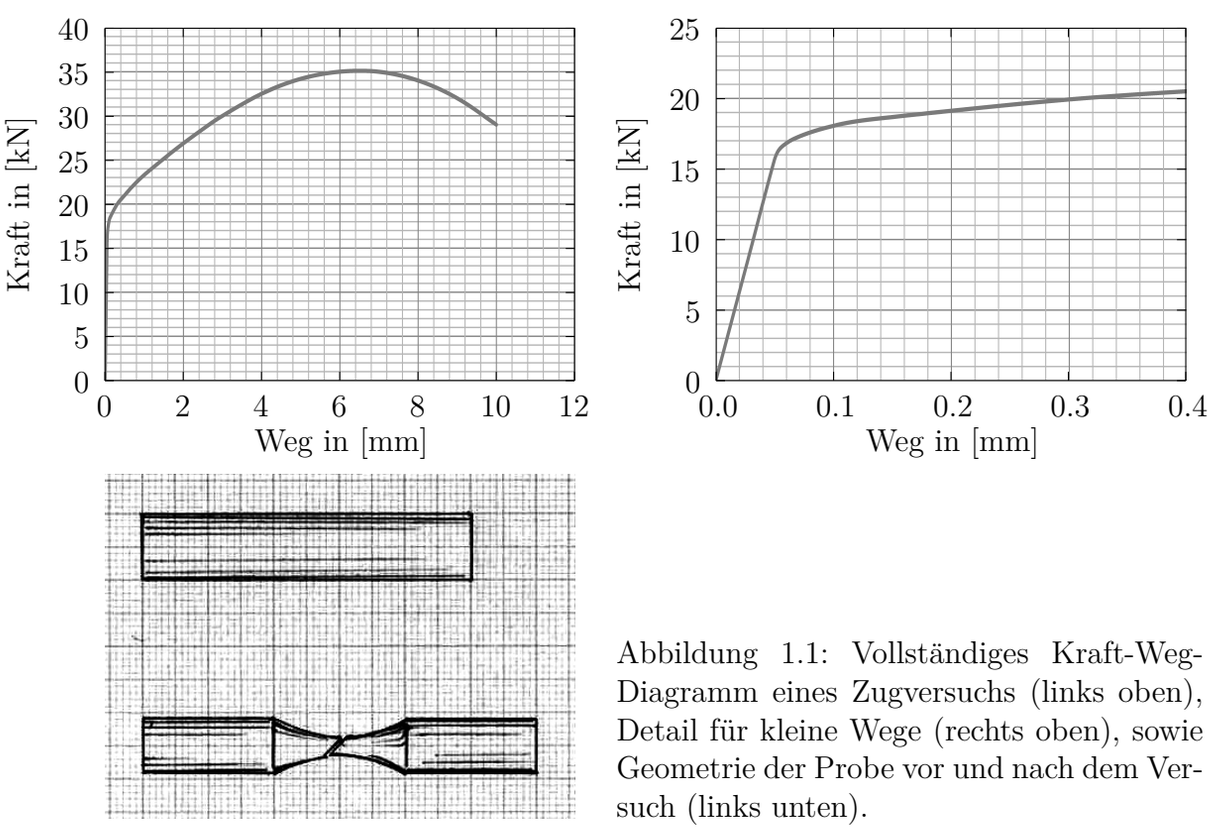


Abbildung 1.1: Vollständiges Kraft-Weg-Diagramm eines Zugversuchs (links oben), Detail für kleine Wege (rechts oben), sowie Geometrie der Probe vor und nach dem Versuch (links unten).

im Zugversuch bestimmt, sind aber *grundsätzlich* nicht aus dem Kraft-Weg-Diagramm ableitbar?

3. Die Probe hatte vor der Belastung einen Durchmesser $d_0 = 10$ mm und eine Länge $L_0 = 50$ mm. Bestimmen Sie diejenigen der gerade genannten Größen, von denen es möglich ist, sie aus dem gegebenen Diagramm zu bestimmen.

4. In Abb. 1.1 links unten ist schematisch das Aussehen der Probe vor und nach dem Bruch gezeigt, die Rasterlinien symbolisieren übliches Millimeterpapier. Bestimmen Sie die bisher fehlenden der fünf zuvor genannten Größen (die zu bestimmen das Diagramm nicht ausreicht).

5. Wie groß war die lokale Spannung im Bereich der Bruchfläche zum Zeitpunkt des Versagens?

Kapitel 2

Härte

2.1 Statische Härteprüfung

Wir nehmen einen Stahl, für den folgende Werte für die Härte zu erwarten sind.

HV10	HBS	HRC
240	228	20.3

1. Benennen Sie für alle drei Angaben der Härte, was die Buchstabenkürzel HV10, HBS und HRC genau bedeuten.

2. Basierend auf der angegebenen Vickers-Härte, beschreiben Sie den Prüfablauf (Kräfte, Wege, Zeiten, Reihenfolge der Belastung, soweit relevant) sowie wie der Prüfeindruck aussehen wird und welche Abmessungen er hat.

3. Basierend auf der angegebenen Brinell-Härte und ausgehend von einem Kugeldurchmesser von 2.5 mm, geben Sie eine geeignete Prüfkraft an und beschreiben Sie den Prüfablauf (Kräfte, Wege, Zeiten, Reihenfolge der Belastung, soweit relevant) sowie wie der Prüfeindruck aussehen wird und welche Abmessungen er hat.

4. Basierend auf der angegebenen Rockwell-Härte, beschreiben Sie den Prüfablauf (Kräfte, Wege, Zeiten, Reihenfolge der Belastung, soweit relevant) sowie welche Eindringtiefe Sie erwarten.

Kapitel 3

Zähigkeit

3.1 Kerbschlagbiegeversuch

Wir nehmen einen Stahl mit einer Kerbschlagarbeit K von 60 J gemessen an CHARPY-V-Proben (siehe Abb. 3.1 links). Sie wollen nun den selben Stahl statt dessen anhand von KLST-Proben prüfen (siehe Abb. 3.1 rechts). Sie haben einen Kerbschlaghammer mit einem Hebelarm von $r = 50$ cm zur Verfügung. Sie können unterschiedliche Gewichte m an der Hammerfinne befestigen, in 1 kg Schritten bis zu 5 kg (alle anderen Massen werden vernachlässigt). Der Fallwinkel α_0 beträgt 170°.

1. Wäre es möglich, eine CHARPY-V-Probe mit diesem Kerbschlaghammer zu zerstören?
2. Welche Kerbschlagarbeit erwarten Sie etwa in der KLST-Probe?
3. Geben Sie das minimale Hammergewicht vor, das Sie brauchen werden.
4. Von welchem Hammergewicht erwarten Sie, dass es die besten Versuchsergebnisse liefert? Warum?
5. Welche Steigwinkel α erwarten Sie in diesem Fall?

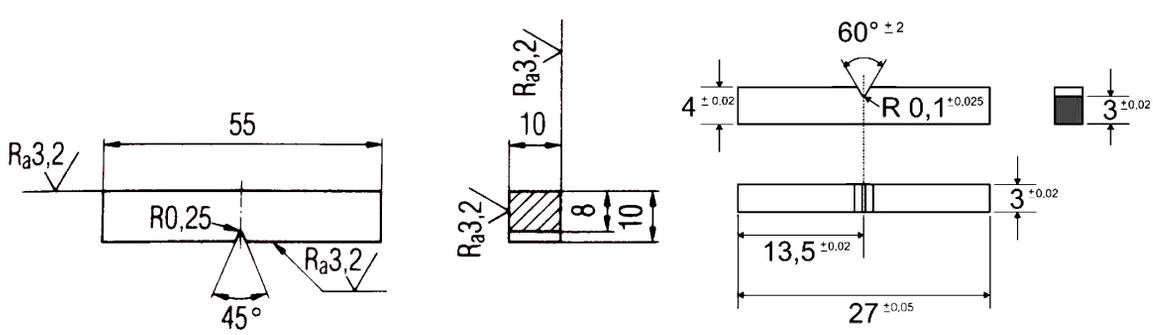


Abbildung 3.1: CHARPY-V-Probe (links) und KLST-Probe (rechts).

Kapitel 4

Defekte

4.1 Punktdefekte

Überlegen Sie für kubische Gitter mit Gitterabstand a, bestehend aus harten Kugeln die sich gerade berühren, an welchen Positionen am meisten Platz ist, ein Fremdatom einzulagern. Berechnen Sie, wie groß der Radius r dieses Fremdatoms sein darf, *ohne* das Gitter zu verzerren, ausgedrückt als Vielfaches des Radius' des Wirtsatoms R. Beachten Sie, dass es zwei Arten ausgezeichneter Positionen gibt (siehe Abb. 4.1): Oktaederlücken (durch sechs Atome begrenzt) und Tetraederlücken (durch vier Atome begrenzt). Die großen Atome gehören jeweils zum Wirtsgitter, das kleine Atom im Zentrum des Polyeders ist das Einlagerungsatom.

1. Vergleichen Sie den nutzbaren Platz in Oktaeder- und Tetraederlücke im fcc-Gitter.
2. Tun Sie dasselbe für ein bcc-Gitter.

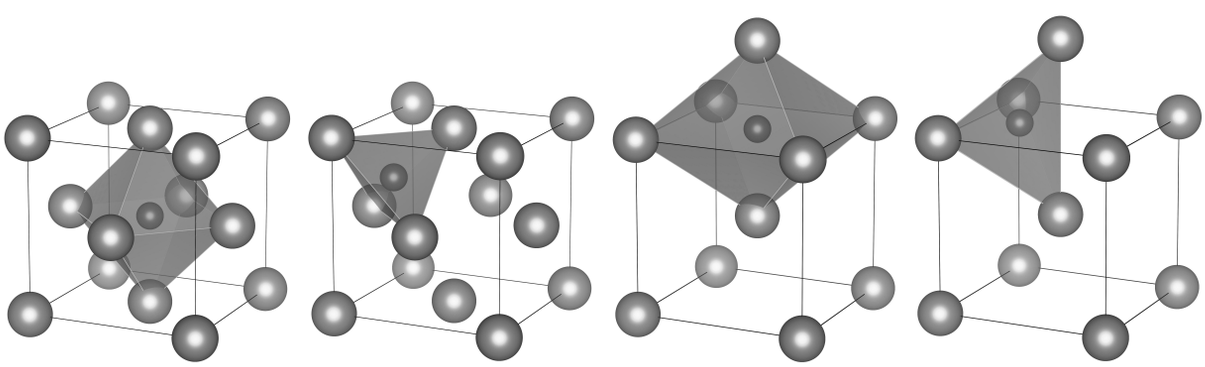


Abbildung 4.1: Fremdatom in der Oktaederlücke im fcc-Gitter; Tetraederlücke im fcc-Gitter; Oktaederlücke im bcc-Gitter; und Tetraederlücke im bcc-Gitter (v.l.n.r.). Visualisiert mit VESTA Version 3.1.7 [MI11].

4.2 Diffusion

Wir betrachten die Zwischengitter-Diffusion von Kohlenstoffatomen in Eisen. In α-Eisen (Ferrit, bcc-Struktur) beträgt die Aktivierungsenergie $Q_\alpha = 87.6$ kJ/mol, in γ-Eisen (Austenit, fcc-Struktur) sind es $Q_\gamma = 138$ kJ/mol. Die Diffusionskonstante für α-Eisen beträgt $D_{0,\alpha} = 0.011$ cm^2/s, für γ-Eisen sind es $D_{0,\gamma} = 0.23$ cm^2/s. Berechnen Sie für beide Strukturen den Diffusionskoeffizienten D beim Phasenübergang Ferrit zu Austenit ($\vartheta = 911$ °C). In welcher von beiden Strukturen wird bei gegebener Temperatur und gegebenem Konzentrationsgefälle der betraglich größere Diffusionsstrom auftreten?

4.3 Instabile Rissausbreitung

Eine große, dicke Stahlplatte wird mit Röntgenstrahlung untersucht. Dabei findet man keine nachweisbaren Risse. Die Apparatur kann einen einseitigen Riss mit einer Länge von mindestens $a = 3$ mm nachweisen. Der Stahl weist eine Risszähigkeit $K_c = 40$ MPa$\sqrt{\text{m}}$ und eine Streckgrenze von 500 N/mm^2 auf. Nehmen Sie an, dass die Platte Risse gerade unterhalb der Nachweisgrenze enthält, und berechnen Sie, ob die Platte sich plastisch verformt oder durch instabile Rissausbreitung versagt, bevor plastische Verformung auftritt. Bei welcher Spannung setzt instabile Rissausbreitung ein?

Kapitel 5

Schwingfestigkeit

5.1 Ermüdung

Eine Aluminiumlegierung mit einer Zugfestigkeit R_m von 450 N/mm^2 für einen Flugzeugrumpf wurde im Labor getestet, indem man die Probe mit einer sinusförmigen um den Mittelwert null schwingenden Spannung belastete. Bei einer Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ von 280 N/mm^2 versagte die Legierung nach 10^5 Lastspielen, bei einer Spannungsschwingbreite von 200 N/mm^2 nach 10^7 Lastspielen.

1. Nehmen Sie an, dass sich das Ermüdungsverhalten mit der Basquin-Beziehung beschreiben lässt und bestimmen Sie die Materialkonstanten a und C_1.

2. Berechnen Sie damit die Zahl N_B der Lastspiele bis zum Versagen für ein Bauteil, das einer sinusförmigen Spannung der Spannungsschwingbreite 140 N/mm^2 ausgesetzt ist.

3. Berechnen Sie außerdem die Zahl N_B der Lastspiele bis zum Versagen für ein Bauteil, das einer sinusförmigen Spannung der Spannungsschwingbreite 70 N/mm^2 ausgesetzt ist, mit einer Mittelspannung von 35 N/mm^2.

4. Vergleichen Sie die Ergebnisse der beiden letzten Teilaufgaben und begründen Sie die Differenz.

Kapitel 6

Phasendiagramme

6.1 Binäre Zustandsdiagramme

Sie haben die Aufgabe, das Zustandsdiagramm einer Zweistofflegierung mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen Zustand und vollständiger Unlöslichkeit im festen Zustand zu ermitteln. Hierzu führen Sie eine thermische Analyse an den beiden reinen Metallen A und B sowie an fünf Legierungen durch. Ermitteln Sie aus den gegebenen Abkühlungskurven (siehe Abb. 6.1 links) näherungsweise das Zustandsdiagramm der Legierung (rechts) und beschriften Sie die Phasengebiete.

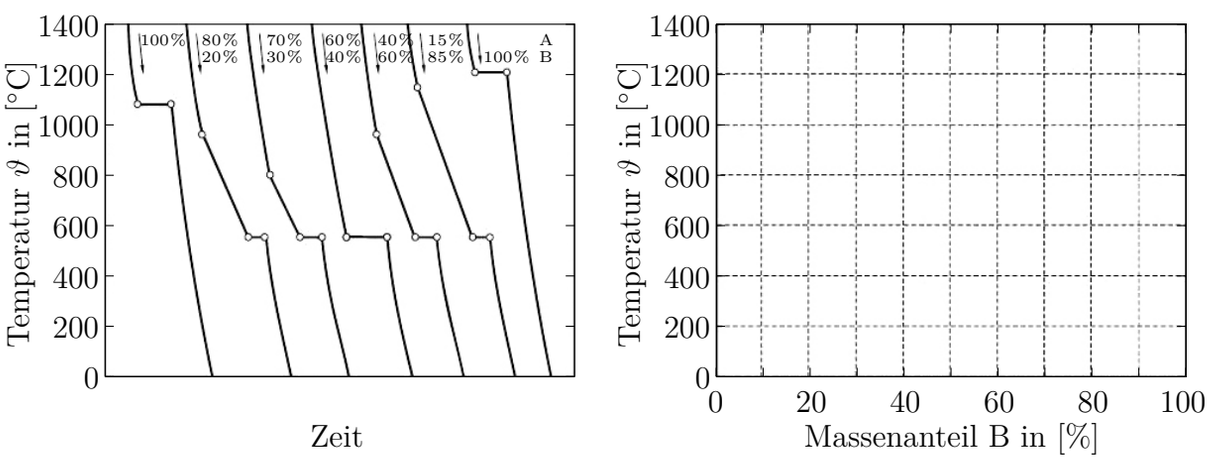


Abbildung 6.1: Abkühlungskurven (links) und Zustandsdiagramm (rechts) für eine Zweistofflegierung.

6.2 Lötzinn

Sie haben die Abkühlungskurve einer Pb-Sn-Legierung aufgenommen. Ihnen steht ebenfalls ein Pb-Sn-Zustandsdiagramm zur Verfügung (siehe Abb. 6.2).

1. Um welchen Typ von Zweistoffsystem handelt es sich bei dem dargestellten Pb-Sn-Zustandsdiagramm?

2. Auf welche gegenseitige Löslichkeit von Pb und Sn im flüssigen und im festen Zustand lässt dieses Zustandsdiagramm schließen?

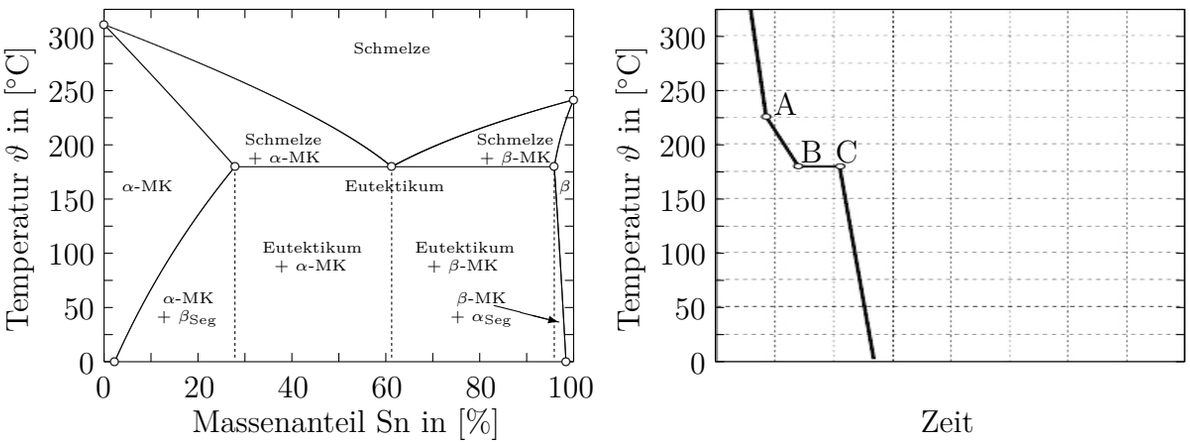


Abbildung 6.2: Zustandsdiagramm (links) und Abkühlungskurven (rechts) für Lötzinn.

3. Ermitteln Sie anhand der gegebenen Abkühlungskurve und des Pb-Sn-Zustandsdiagramms die beiden möglichen Legierungszusammensetzungen.

4. Schlagen Sie ein Verfahren vor, mit dessen Hilfe die in Teilaufgabe 3 gefundenen Legierungszusammensetzungen unterschieden werden können.

5. Welcher physikalischer Vorgang verlangsamt die Abkühlungsgeschwindigkeit zwischen den Knickpunkten A und B sowie zwischen B und C (siehe Abkühlungskurve)?

6. Zeichnen Sie zusätzlich die Abkühlungskurven der folgenden Metalle bzw. Legierungen in das rechte Teilbild:

   (a) 100 % Pb, 0 % Sn

   (b) 80 % Pb, 20 % Sn

   (c) Eutektische Legierung

7. Ermitteln Sie für eine Legierung mit 35 % Sn und 65 % Pb:

   (a) Die chemische Zusammensetzung der Schmelze sowie der α-Mischkristalle bei einer Temperatur von 225 °C.

   (b) Die prozentualen Mengenanteile an Schmelze sowie an α-Mischkristallen bei einer Temperatur von 225 °C.

   (c) Die prozentualen Mengenanteile an Eutektikum sowie α-Mischkristallen unmittelbar nach Unterschreiten der Eutektikalen (bei 175 °C).

   (d) Die chemische Zusammensetzung des Eutektikums sowie der α-Mischkristalle nach Abkühlung auf Raumtemperatur (25 °C).

Kapitel 7

Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

7.1 Gewinnung von Eisen

1. Die Roheisengewinnung erfolgt hauptsächlich im Hochofen. Beschreiben Sie den Aufbau eines Hochofens und erläutern Sie die wesentlichen chemischen Vorgänge in den einzelnen Abschnitten.

2. Begründen Sie, weshalb der Hochofenprozess kein reines Eisen liefert.

3. Worin unterscheidet sich, hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung, das Roheisen vom Stahl?

4. Die weitaus größte Menge von Stahl wird heute durch das Sauerstoff-Blasverfahren aus dem flüssigen Roheisen des Hochofens erzeugt. Beschreiben Sie stichwortartig das Sauerstoff-Blasverfahren sowie die relevanten chemischen Vorgänge in der Roheisenschmelze.

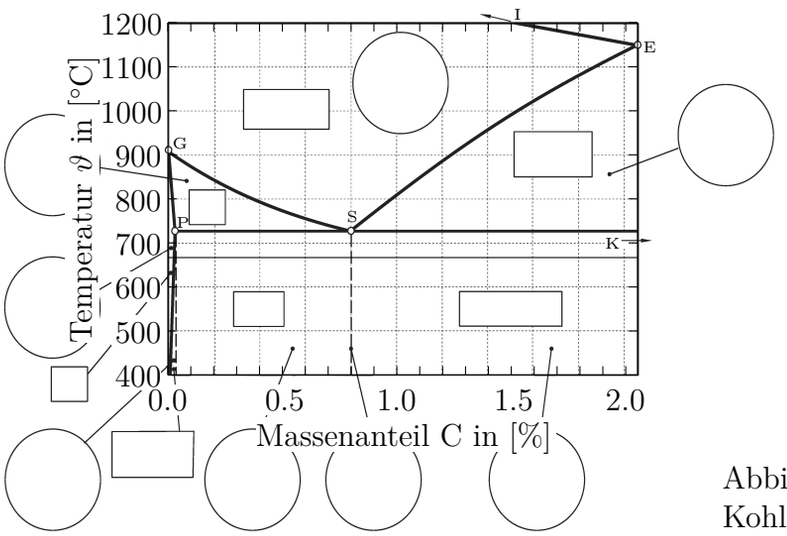


Abbildung 7.1: Stahlecke des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms

7.2 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Abbildung 7.1 zeigt die Stahlecke des metastabilen Zustandsdiagramms Eisen-Kohlenstoff.

1. Beschriften Sie die Phasengebiete und skizzieren Sie die jeweiligen Gefüge in die einzelnen Phasenfelder. Benennen Sie außerdem die Gefügebestandteile.

2. Beschreiben Sie für die nachfolgend genannten Phasengrenzen die dort stattfindenden Phasenumwandlungen:

   - Phasengrenze G-S
   - Phasengrenze S-E
   - Phasengrenze P-S-K

3. Bestimmen Sie mit Hilfe des Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms für einen Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von 1.4 % die bei 820 °C im Austenitkristall lösbare Kohlenstoffmenge. In welcher Phase befindet sich der restliche Kohlenstoff des Stahls?

7.2.1 Gusseisen

Neben Stählen werden in der Technik vielfach auch Gusseisenwerkstoffe eingesetzt.

1. Erläutern Sie den Unterschied zwischen grauem und weißem Gusseisen.

2. Gusseisen mit Kugelgraphit (Sphäroguss) hat gegenüber Gusseisen mit Lamellengraphit (Grauguss) eine höhere Festigkeit und vor allem eine gewisse Plastizität. Skizzieren Sie die Gefüge beider Gusseisensorten (mit Benennung der Gefügebestandteile) und erläutern Sie anhand dieser Gefüge stichwortartig die Unterschiede.

Kapitel 8

Wärmebehandlung

8.1 ZTU-Diagramme

ZTU-Diagramme stellen ein wichtiges Hilfsmittel für die technische Durchführung einer Wärmebehandlung dar. Ihnen steht in Abb. 8.1 das kontinuierliche ZTU-Diagramm des unlegierten Vergütungsstahls C45 zur Verfügung.

1. Sie schrecken eine Stahlwelle (C45) kontinuierlich aus der Härtetemperatur auf Raumtemperatur ab und führen im Anschluss eine Härtemessung durch. Als Härtewert ermitteln Sie 533 HV10. Mit welcher Gefügezusammensetzung müssen Sie im Bereich der Messstelle rechnen?

2. Beurteilen Sie die Qualität der Härtung im Hinblick auf das Erreichen eines möglichst hohen Härtewerts. Machen Sie einen Vorschlag, was verändert werden könnte, um die Härte zu steigern.

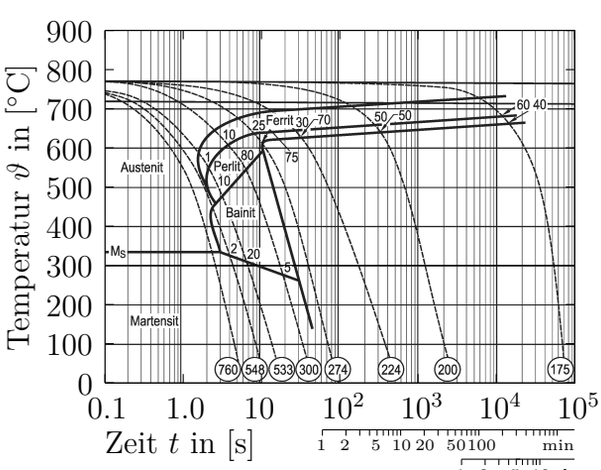


Abbildung 8.1: Kontinuierliches ZTU-Diagramm für C45.

Kapitel 9

Elektronen im Festkörper

9.1 Freies Elektronengas

1. Betrachten Sie einen Kubikzentimeter Lithium (Atommasse 6.94 u, volumenbezogene Masse 0.534 g/cm^3) und geben Sie die FERMI-Energie an. Gehen Sie davon aus, dass jedes Lithium-Atom ein Elektron beisteuert.

2. Berechnen Sie für $T = 0$ K die Zustandsdichte bei der FERMI-Energie.

3. Geben Sie für endliche Temperatur, bspw. 300 K, an wie groß die tatsächliche Besetzung bei der FERMI-Energie ist.

4. Ebenfalls bei 300 K, geben Sie an, in welchem Abstand von der FERMI-Energie die tatsächliche Besetzung auf ein Viertel der Zustandsdichte abgefallen ist.

Kapitel 10

Konduktivität

10.1 Wiedemann-Franz-Gesetz

1. Die Resistivität von Eisen (Atommasse 55.845 u, volumenbezogene Masse 7.874 g/cm^3) beträgt etwa 0.1 μΩm bei Raumtemperatur. Gehen Sie von einer Elektronendichte von $8.5 \cdot 10^{28}$ 1/m^3 aus. Wie viele Elektronen steuert jedes Eisen-Atom etwa zum Elektronengas bei? Vergleichen Sie mit typischen Oxidationszuständen von Eisen (2+ und 3+).

2. Berechnen Sie die Stoßzeit τ bei Raumtemperatur.

3. Berechnen Sie die Transportgeschwindigkeit für eine elektrische Leitungsstromdichte von 10 A/mm^2.

4. Schätzen Sie die Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C aus dem Wiedemann-Franz-Gesetz ab; vergleichen Sie mit dem Literaturwert von 80 W/(Km).

10.2 Supraleiter

1. Beschreiben Sie mit Ihren Worten den Unterschied zwischen einem Supraleiter 1. und 2. Art.

2. Beschreiben Sie mit Ihren Worten den Unterschied zwischen einem harten und einem weichen Supraleiter 2. Art.

3. Im Zusammenhang mit Hochtemperatursupraleitern wird (natürlich) viel über die Sprungtemperatur geredet. Geben Sie qualitative Gründe, warum ein Einsatz dieser Werkstoffe nahe an dieser Temperatur technologisch i.d.R. nicht vernünftig ist.

Kapitel 11

Permittivität

11.1 Elektronen-Polarisation

1. Helium He hat einen kovalenten Radius (halbe Distanz zweier gleichartiger, kovalent gebundener Atome) von 28 pm und eine Masse von 4.0026 u. Unter Normalbedingungen hat es eine volumenbezogene Masse von 0.1785 mg/cm^3. Welche Suszeptibilität χ_{el} erwarten Sie? Vergleichen Sie mit dem experimentellen Wert von $68.8 \cdot 10^{-6}$. Geben Sie mögliche Gründe an, falls es eine Diskrepanz gibt.

2. Bei welcher elektrischen Feldstärke wird $d = R$?

11.2 Ionen-Polarisation

Natriumchlorid NaCl (Kochsalz) hat einen E-Modul von 39.98 GPa und eine Gitterkonstante von $a = 5.64$ Å (Achtung: der Abstand zwischen zwei Ionen ist die *Hälfte* davon!).

1. Berechnen Sie die "Federkonstante" k, die mit der ionischen Bindung einhergeht.

2. Berechnen Sie daraus die Suszeptibilität χ_{ion}.

11.3 Orientierungs-Polarisation

Nehmen Sie an, in einem Werkstoff befänden sich Dipole, die gerade einem Pärchen Na^+ und Cl^- entsprechen, mit dem Bindungsabstand, der sich in Kochsalz ergibt (vgl. Aufgabe zur Ionen-Polarisation). Diese Dipole seien frei beweglich (was sie in NaCl natürlich nicht sind). Wir nehmen an, die Anzahldichte der Atome entspräche der in NaCl.

1. In einem elektrischen Feld mit Feldstärke 1 kV/m, wie groß ist das maximale Drehmoment auf diesen Dipol? Wie ist der Dipol zu diesem Zeitpunkt relativ zur elektrischen Feldstärke orientiert?

2. Wie groß ist die Energiedifferenz zwischen minimaler und maximaler potentieller Energie im Feld (immer noch bei 1 kV/m)?

3. Welche Suszeptibilität ergibt sich bei Raumtemperatur (20 °C)?

4. Vergleichen Sie mit dem Ergebnis für die Ionen-Polarisation.

5. Welche Polarisation ergibt sich bei 1 kV/m?

6. Was ist die maximal mögliche Polarisation? Hinweis: hier müssen Sie gerade den *anderen* Grenzfall der LANGEVIN-Funktion betrachten als in der Vorlesung. Was fällt Ihnen auf?

Kapitel 12

Permeabilität

12.1 Weichmagnetische Werkstoffe

1. Formulieren Sie die Vorteile und Nachteile der Legierung von Weicheisen mit Nickel, Kobalt und Silizium für elektromagnetische Komponenten. Nennen Sie gebräuchliche Legierungslagen, und welche Vorteile diese Legierungen jeweils haben.

2. Definieren Sie H_c, J_s, B_r und $\mu_{\max}$.

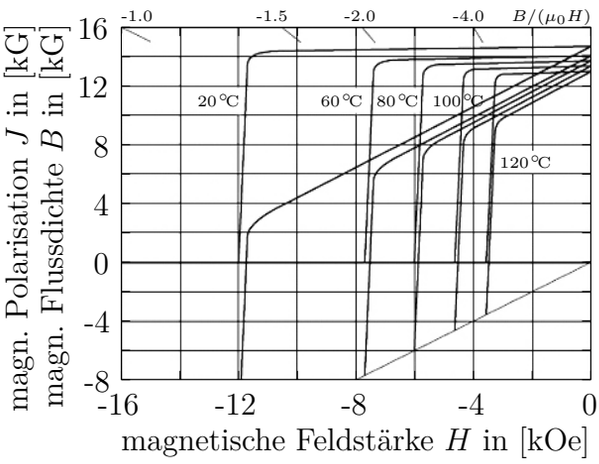
3. Beschreiben Sie, in welchem Zusammenhang diese Größen jeweils wichtig sind, und ob große oder kleine Zahlenwerte vorteilhaft sind. Schließen Sie in diese Diskussion ρ_{el} ein.

12.2 Hartmagnetische Werkstoffe 1

1. Definieren Sie H_{cB}, H_{cJ}, B_r und $(BH)_{\max}$.

2. Beschreiben Sie, in welchem Zusammenhang diese Größen jeweils wichtig sind, und ob große oder kleine Zahlenwerte vorteilhaft sind. Schließen Sie in diese Diskussion den Temperaturkoeffizienten von B_r und von H_{cJ} mit ein.

12.3 Hartmagnetische Werkstoffe 2



Der Entmagnetisierungsfaktor β einer Kugel ist gerade 1/3. Betrachten wir daher eine NdFeB-Kugel mit 1 cm Durchmesser. Nehmen Sie das nebenstehend gezeigte Materialverhalten an.

1. Welcher Arbeitspunkt stellt sich bei Raumtemperatur etwa ein?
2. Lesen Sie aus dem Diagramm das Verhalten $H_{cJ}(T)$ ab und stellen Sie es graphisch dar. Kommentieren Sie die Bestimmung des TK.
3. Ab welcher Temperatur erwarten Sie irreversible Verluste allein durch die geometrisch bedingte Entmagnetisierung?

Literaturverzeichnis

[MI11] K. Momma and F. Izumi. VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *J. Appl. Crystallogr.*, 44:1272–1276, Juni 2011.