

Werkstofftechnik 1

WS 2000/2001

Mitschrift: Karsten Knebel

Werkstofftechnik 2

SS 2002

Mitschrift: Daniel Poersch

Dozent: Prof. Dr. Ulf Brossmann

25. September 2002

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
2 Aufbau kristalliner Werkstoffe	7
2.1 Bindungsarten	7
2.1.1 Metallische Bindung	7
2.1.2 Kovalente Bindung (Elektronenpaarbindung)	7
2.1.3 Ionenbindung	9
2.2 Kristallstrukturen	9
2.2.1 Aufbau eines Idealkristalls	9
2.2.2 Beschreibung der Kristalle (Millersche Indizes)	10
2.3 Gefüge	10
2.4 Gitterbaufehler	12
2.4.1 Punktförmige Gitterbaufehler	12
2.4.2 Linienförmige Gitterbaufehler (Versetzungen)	12
2.4.3 Flächenförmige Gitterbaufehler	13
3 Zustandsdiagramme	14
3.1 Erstarren einer reinen Metallschmelze	14
3.2 Legierungsbildung	15
3.2.1 Mischkristalle	15
3.2.2 Intermediäre Verbindungen	16
3.3 Primärkristallisation bei Legierungen	16
3.3.1 Vollkommene Löslichkeit im festen Zustand	16
3.3.2 Vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand	18
3.3.3 Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand	18
3.3.4 Zusammengesetzte Zustandsdiagramme	20
4 Eisenwerkstoffe	22
4.1 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	22
4.2 Phasen und Gefüge	22
4.3 Bezeichnung und Anwendung	22
4.4 Eigenschaftsänderungen von Eisenwerkstoffen	25
5 Wärmebehandlung	27
5.1 Diffusion	27
5.2 Glühen	28
5.3 Umwandlungshärten (bei Eisen)	28
5.3.1 Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild	28
5.3.2 Härteverfahren	30

6	Mechanische Eigenschaften	32
6.1	Elastische Verformung	32
6.2	Plastische Verformung	33
6.2.1	Gleitung, Versetzungsbewegung, Zwillingsbildung	34
6.2.2	Erholung und Rekristallisation	35
6.2.3	Kriechen	36
6.2.4	Methoden zur Festigkeitssteigerung	36
7	Werkstoffprüfung	37
7.1	Zusammensetzung und Kristallgefüges	37
7.1.1	Analysen und optische Untersuchung	37
7.1.2	Elektronenmikroskope	37
7.2	Zerstörende Prüfverfahren	38
7.2.1	Zugversuch	38
7.2.2	Härteprüfung	38
7.2.3	Kerbschlagbiegeversuch	40
7.3	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	40
7.3.1	Röntgenverfahren	40
7.3.2	Ultraschallverfahren	40
7.3.3	Farbeindringverfahren	41
7.3.4	Magnetpulververfahren	41
7.3.5	Schallemissionsprüfung	41
8	Elektrische Eigenschaften von Festkörpern	42
8.1	Bändermodell	42
8.2	Elektr. Leitfähigkeit	44
8.3	Thermoelektrische Effekte	45
9	Leiterwerkstoffe, Nichteisenwerkstoffe	47
9.1	Kupfer	47
9.2	Kupferlegierungen	48
9.3	Aluminium Al	50
9.4	Aluminiumlegierungen	51
9.5	Weiter Nichteisenmetalle	52
9.6	Gefügebilder von Nichteisenmetallen	53
9.7	Werkstoffe für besondere Anwendungen	54
9.7.1	Kontaktwerkstoffe	54
9.7.2	Widerstände	54
9.7.3	Supraleiter	57
10	Halbleiter	59
10.1	Eigenleitung(intrinsische Leitfähigkeit)	59
10.2	Störstellenleitung(extrinsische Leitfähigkeit)	59
10.3	Verbindungshalbleiter	61
10.4	Anwendung:	61
10.5	Halbleiter-Technologie	61
11	Isolierwerkstoffe	63

12 Organische Werkstoffe, Kunststoffe (KS)	65
12.1 Molekularer Aufbau	65
12.2 Kopplungsprozesse, Makromolekulare Verbindungen	65
12.3 Einteilung der Kunststoffe	65
12.4 Kunststoffprüfung	68
12.5 Technologie	68
13 Magnetwerkstoffe	69
13.1 Magnetisierungskurve und Hystereseschleifen	71
13.2 Weichmagnetische Werkstoffe	71
13.3 Hartmagnetische Werkstoffe	72
Prüfung SS 2001	75

Vorwort

Hallo liebe CommulitonInnen

Vorgestern habe ich nun meine Werkstofftechnikprüfung hinter mich gebracht und ich denke ich habe sie auch bestanden. Somit ist meine Arbeit an diesem Skript für mich beendet. Es hat Spaß gemacht soviel tolle Sachen mit $\text{\LaTeX}$ herauszufinden, es hat aber auch viel Zeit beansprucht. Ich hoffe ihr könnt mit dem Vorliegenden etwas anfangen.

Der Form halber möchte ich an dieser Stelle anbringen das weder KARSTEN KNEBEL, noch ich DANIEL POERSCH für den Inhalt dieses Dokumentes irgendwelche Verantwortung übernehmen. Stattdessen ist jeder der mit diesen Skript arbeiten und lernen will dazu angehalten die vorliegenden Informationen zu überprüfen. Solltet ihr irgendwelche Fehler finden dann scheut nicht mir eine e-mail zu schreiben: <mailto:danielpoe@web.de>.

So zum Schluss noch ein kleines Anliegen. Im 1.Semester hat sich KARSTEN sehr viel Mühe gegeben und alle Zeichnungen mittels *StarDraw* in Computer gebracht, die meisten Bilder des 2.Semesters sind lediglich gescannt (vielen Dank an CHRISTIAN SCHIRRMEISTER für die tollen Zeichnungen!!!). Ich würde mich also freuen wenn sich mal jemand die Zeit nimmt und die restlichen Zeichnungen in Computer hackt. Taugliche Programme sind wie erwähnt *StarDraw* oder auch jedes andere Vektorprogramm, z.B.: *FreeHand*. Ihr könnt die Bilder dann, soweit ihr etwas $\text{\LaTeX}$ beherrscht, selbst einfügen (ich werde die Source-Files ins Internet stellen, sollte dies noch nicht geschehen sein, <mailto:danielpoe@web.de>), oder ansonsten einfach mir schicken dann übernehme ich das. (Ich benötige es aber unbedingt in .eps oder .pdf Format)

So jetzt möchte ich euch nicht weiter langweilen (solltet ihr überhaupt soweit gelesen haben:). Viel Erfolg mit Werkstofftechnik, herzlichen Dank an Prof. Broßmann und auf wiedersehen ...

2 Aufbau kristalliner Werkstoffe

Metalle bilden im festen Zustand *Kristalle* (regelmäßiger Aufbau, räumlich). Stoffe ohne regelmäßige Anordnung der Atome nennt man *amorphe* Stoffe (Flüssigkeiten, Glas, Kunststoffe, glassy metals). Die Eigenschaften metallischer Stoffe hängen von den *Bindungsarten* und der *Kristallstruktur* ab.

2.1 Bindungsarten

Wesentlich ist die äußere Schale und die dort befindlichen Elektronen. Atome möchten in gesättigten, stabilen Zustand (*Edelgaskonfiguration*) übergehen. Dies erreichen sie entweder durch Abgabe oder Aufnahme von Elektronen.

2.1.1 Metallische Bindung

Metalle und Metalllegierungen (z.B. Cu, AlMg) gehen diese Bindung ein. Metalle haben 1 bis 3 Elektronen auf der äußersten Schale. Sie geben Ihre Valenzelektronen ab und verbleiben als Ion im Kristall. Es entstehen freie Elektronen (Elektronengas oder -wolke) (Abb. 2.1).

Die metallische Bindung besitzt folgende Eigenschaften:

- gute elektrische Leitfähigkeit aufgrund der freien Elektronen
- gute Verformbarkeit aufgrund leichtem Abgleiten der Ionen

2.1.2 Kovalente Bindung (Elektronenpaarbindung)

Halbleiter (Halbmetall) und Halbleiterlegierungen (z.B. Si, GaAs, Ge, InAb) haben 4 Elektronen auf ihrer äußersten Schale. Die Elektronen werden nicht abgegeben, sondern von den Nachbaratomen paarweise mitbenutzt (Abb. 2.3). Die Bindung erfolgt durch Elektronenpaare und positive Ionen. Es entstehen keine freien

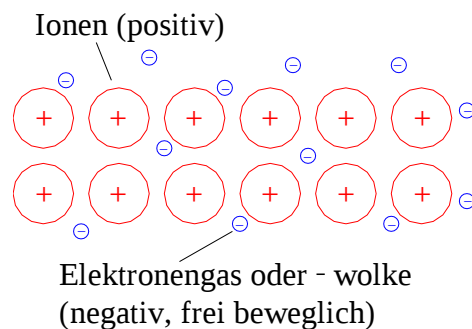


Abbildung 2.1: Metallische Bindung

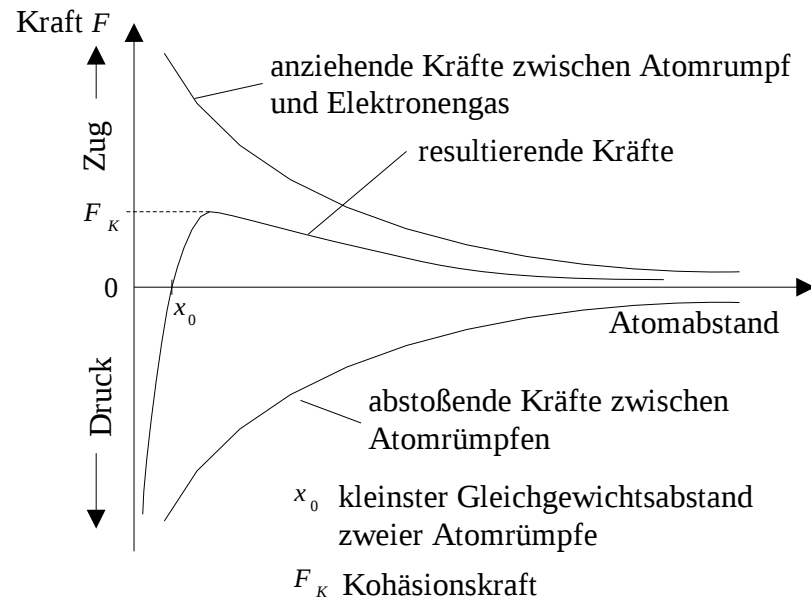


Abbildung 2.2: Kräfte in der metallischen Bindung

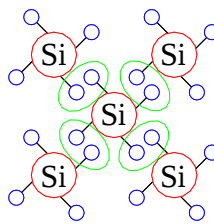


Abbildung 2.3: Kovalente Bindung

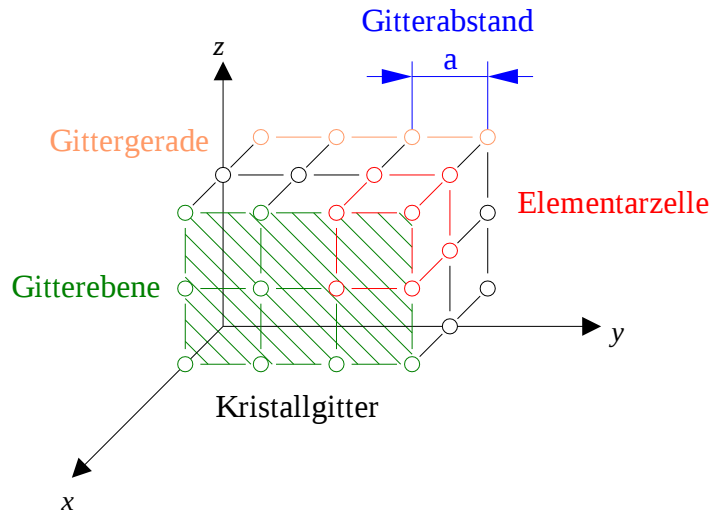


Abbildung 2.4: Aufbau eines Idealkristalls

Elektronen.

Eigenschaften der kovalenten Bindung:

- keine elektrische Leitfähigkeit, da keine freien Elektronen (Leitfähigkeit mögl. durch Störstellen, Wärme, Licht usw.) (Kap. 13).
- schlechte Verformbarkeit

2.1.3 Ionenbindung

Eine Ionenbindung ist eine Bindung von einem Metall mit einem Nichtmetall (z.B. NaCl). Das Metall gibt seine Elektronen ab (hier: Na gibt 1 Elektron ab) und wird zu einem positiv geladenen Ion (hier: Na^+). Das Nichtmetall nimmt diese Elektronen auf (hier: Cl nimmt 1 Elektron auf) und wird zu einem negativ geladenen Ion (hier: Cl^-). Die Bindung entsteht durch die Anziehungskraft zwischen dem positiv geladenen und dem negativ geladenen Ion.

Die Eigenschaften der Ionenbindung:

- keine elektrische Leitfähigkeit, da keine freien Elektronen (Unter Einfluss eines äußeren Feldes wandern Ionen in wässriger Lösung -> Massentransport, Elektrolyse/Galvanik).

2.2 Kristallstrukturen

2.2.1 Aufbau eines Idealkristalls

Ein *Kristallgitter* ist ein geometrischer, regelmäßiger Aufbau der Ionen. Der Abstand der Ionen untereinander wird mit *Gitterabstand* oder *Gitterkonstante* a bezeichnet. Unter *Ionenabstand* versteht man den Gleichgewichtszustand der Abstoß- und Anziehungskräfte im Gitter (Abb. 2.2). Zur Beschreibung eines Kristallgitters dient die *Elementarzelle*. Da a in den verschiedenen Gitterebenen *nicht* gleich sein muß, gibt es 7 unterschiedliche Elementarzellen.

Für Metalle besonders wichtig sind:

- **kubische Elementarzellen**

- **Kubisch raumzentrierte Elementarzelle (krz)** (Abb. 2.5)
Eigenschaften: Schlechte Verformung (z.B. Mo)
- **Kubisch flächenzentrierte Elementarzelle (kfz)** (Abb. 2.5)
Eigenschaften:
sehr gut verformbar
(Abgleiten unter 45° , dichte Packung)
(dichteste Ionenpackung unter $45^\circ \rightarrow$ Gleitebene)
(z.B. Al, Cu)

- **tetragonale Elementarzellen**

- **hexagonale Elementarzellen**

Hier ist im besonderen die **hexagonal dichteste Packung (hdp)** (Abb. 2.5) zu beachten.

Eigenschaften:

nicht verformbar, z.B. Diamant

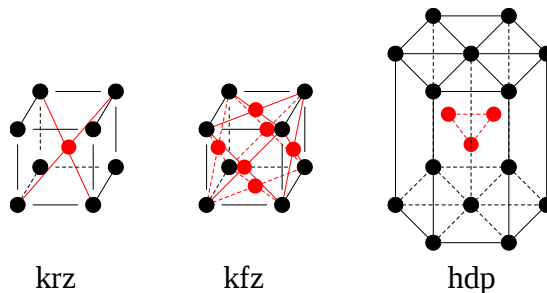


Abbildung 2.5: Unterschiedliche Elementarzellen

Die unterschiedlichen Abstände der Ionen im Kristallgitter haben zur Folge, dass die Eigenschaften des Werkstoffes *richtungsabhängig* sind. Man spricht von *Anisotropie*. Das Gegenteil davon ist die *Isotropie*. Einige Metalle kristallisieren bei bestimmten Temperaturen um (z.B. krz $\rightarrow$ kfz). Man spricht von *Polymorphie* oder *Allotropie*.

2.2.2 Beschreibung der Kristalle (Millersche Indizes)

Die *Millerschen Indizes* kennzeichnen Ebenen mit runden Klammern () und Richtungen mit eckigen Klammern [] im Kristall:

2.3 Gefüge

Technische Metalle sind vielkristallin (polykristallin) aufgebaut. Viele Kristalle bilden ein *Korn*. Ein Kristallverbund nennt man *Gefüge*. Ein Gefüge (Abb. 2.7) kennzeichnet sich durch

- Korngröße (fein-, grobkörnig)
- Kornform (globular, stengelartig)

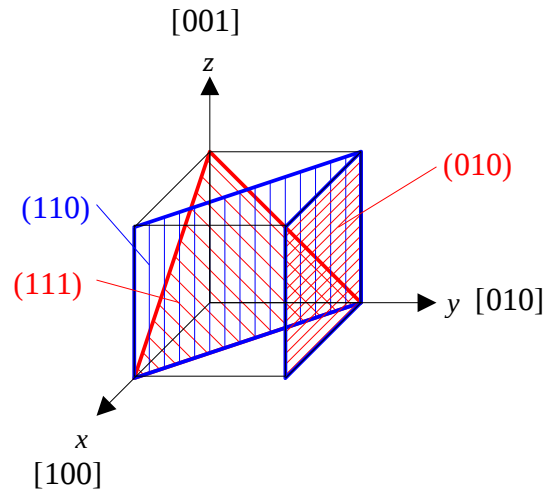


Abbildung 2.6: Hauptrichtungen und -ebenen in der kubischen Elementarzelle

- Korngrenzen
 - geringere Bindungskräfte
 - Anlagerung von Verunreinigungen
 - Beginn von Ausscheidungen

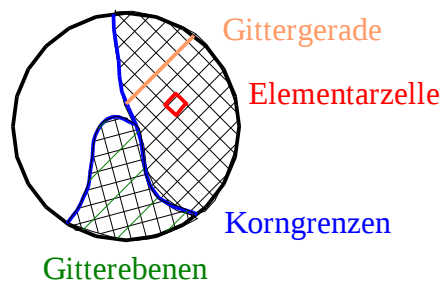


Abbildung 2.7: Gefüge

Man unterscheidet:

- homogene Gefüge: reine Metalle, Mischkristalle
- heterogene Gefüge: 2 Mischkristalle nebeneinander vorhanden ($\alpha + \beta$ MK, Mischungslücke)

Eigenschaften kristalliner Werkstoffe

- Kristalline Werkstoffe reagieren *quasi-isotrop* (Ein Einzelkristall ist anisotrop. Aber die Anisotropie der Einzelkristalle wirkt sich auf den Werkstoff nicht aus, da die Elementarzellen räumlich regellos verteilt sind) (Abb. 2.8).
- Durch Wärmebehandlung und Walzen erhält man eine Ausrichtung der Elementarzellen. Es entsteht eine *Textur*. Dadurch wird der quasi-isotrope Werkstoff anisotrop (Abb. 2.8).

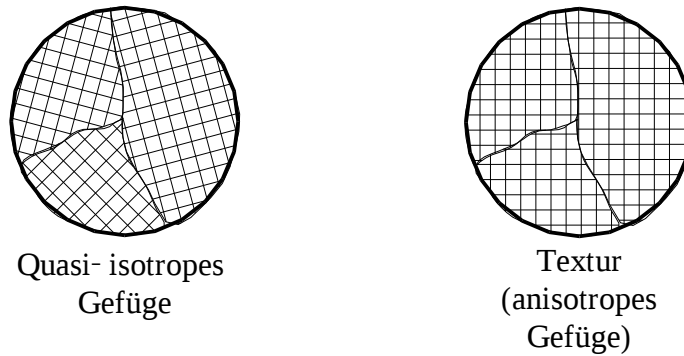


Abbildung 2.8: Quasi-isotropes und anisotropes Gefüge

2.4 Gitterbaufehler

Technische Metalle sind nicht fehlerfrei aufgebaut (kein Idealkristall). Fehler entstehen durch:

- Herstellung
- mechanische Bearbeitung
- Wärmebehandlung
- Bestrahlung mit energiereichen Teilchen

2.4.1 Punktförmige Gitterbaufehler

- a) Leerstelle
- b) Zwischengitteratom (*Schottky-Defekt*)
- c) *Frenkel-Defekt* (Kombination aus a) und b))
- d) Substitutionsatom (Fremdatom, groß)
- e) Einlagerungsatom (Fremdatom, klein)

(Siehe Abb. 2.9)

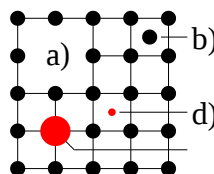


Abbildung 2.9: Punktförmige Gitterfehler

2.4.2 Linienförmige Gitterbaufehler (Versetzungen)

- a) Stufenversetzung: Gittergerade wird nicht fortgesetzt Abb. 2.10
- b) Schraubenversetzung: Gittergerade wendelförmig versetzt Abb. 2.10.

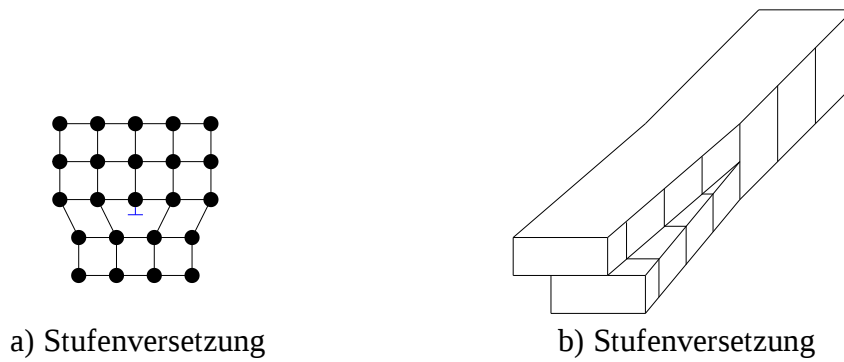


Abbildung 2.10: Stufen- und Schraubenversetzung

2.4.3 Flächenförmige Gitterbaufehler

- a) Korngrenzen: 2 Kristalle mit unterschiedlicher Orientierung der Gittergeraden werden durch eine Korngrenze getrennt (Abb. 2.11).

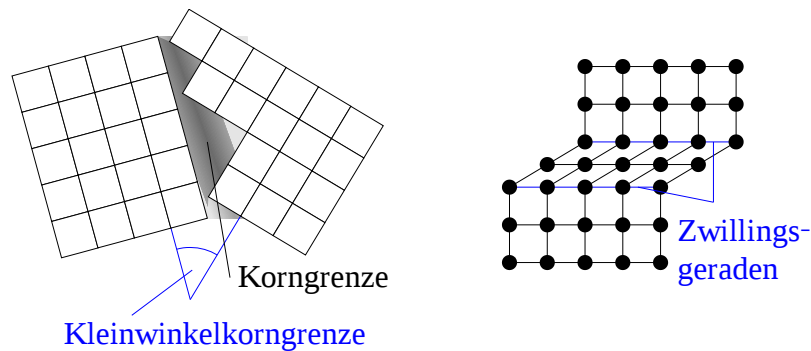


Abbildung 2.11: Korngrenze und Zwillingsgrenzen

- b) Zwillingsgrenze: Bereich klappen in andere Orientierung um (Abb. 2.11).

Eigenschaften der Werkstoffe durch Gitterbaufehler

- (Zug-)Festigkeit $R_m \uparrow$ steigt.
- elektrische Leitfähigkeit $\kappa \downarrow$ sinkt.

Anwendung

- Legierungstechnik
- Halbleitertechnik (Dotieren)

3 Zustandsdiagramme

Werkstoffe bestehen in der Regel aus verschiedenen Atomen. Man nennt diese Werkstoffe *Legierungen*. Legierungen haben bestimmte Eigenschaften.

3.1 Erstarren einer reinen Metallschmelze

Abkühlungskurve (Abb. 3.1)

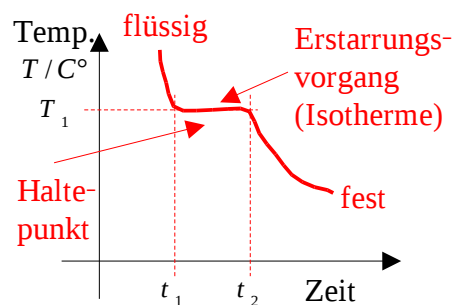


Abbildung 3.1: Abkühlungskurve

Kristallisationsprozess (Abb. 3.2)

1. Punkt T_1, t_1 :
Kristallisationskeime bilden sich durch Verunreinigungen.
2. Punkt T_1, t_1 bis t_2 :
Metall-Atome lagern sich mit beliebiger Orientierung, räumlich an Keime an.
3. Punkt T_1, t_2 :
Kristallwachstum ist beendet (alles fest) und Körner sind durch Korngrenzen begrenzt.

Kristallert ein Stoff zum ersten mal, so spricht man von *Primärgefüge* und *Primärkristalisation*.

Form und Größe der Kristalle (Körner)

1. gleichmäßige Abkühlung -> globulares Gefüge
2. ungleichmäßige Abkühlung -> Stengelförmige Körner
3. langsame Abkühlung -> wenig Keime -> grobes Korn
4. rasche Abkühlung -> viele Keime -> feines Korn

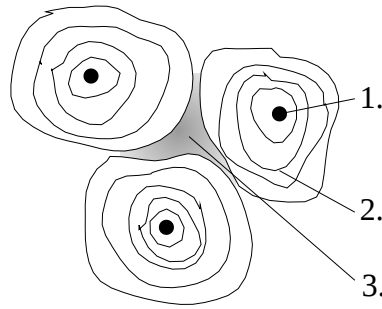


Abbildung 3.2: Kristallisationsprozess

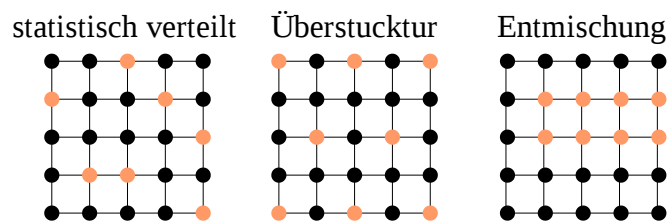


Abbildung 3.3: Substitutionsmischkristallarten

3.2 Legierungsbildung

3.2.1 Mischkristalle

Bei der Mischung von Atomen A und B entstehen *Mischkristalle*, die sich je nach Verteilung unterscheiden.

- **Substitutions-Mischkristalle** (Abb. 3.3)
B-Atome besetzen die Plätze des Wirtsgitters aus A-Atomen
 - statistisch verteilte B-Atome
 - Überstruktur der B-Atome (regelmäßig)
 - Entmischung (Clusterbildung der B-Atome)
- **Einlagerungs-Mischkristalle** (Abb. 3.4)
B-Atome besetzen Zwischengitterplätze

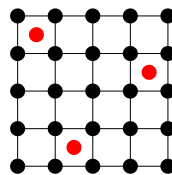


Abbildung 3.4: Einlagerungs-Mischkristall

3.2.2 Intermediäre Verbindungen

Intermediäre Verbindungen sind chemische Verbindungen. Sie sind sehr hart, spröde und werden nur in besonderen Fällen angewand.

- *Intermetallische Verbindung*
Zwei Metalle sind chemisch Verbunden. Das daraus entstehende Material hat ebenfalls metallische Eigenschaften (z.B. Al_2Cu , Nb_2Sn , NbTi50).
- *Intersititelle Verbindung*
Ein Metall und ein Nichtmetall sind chemisch verbunden. Das daraus entstehende Material hat nicht-metallische Eigenschaften (z.B. Karbide, Nitride).

3.3 Primärkristallisation bei Legierungen

Die Kristallisation erfolgt unter 3 Randbedingungen:

- Temperatur T
- Konzentration c
- Druck p

In der Regel erfolgt die Kristallisation bei 1bar Druck. Dadurch entfällt die Darstellung des Drucks. Es entsteht ein Diagramm, in dem die Temperatur über der Konzentration aufgetragen ist. Dieses nennt man *Zustandsdiagramm*. Das Zustandsdiagramm stellt die Zustandsänderung des Gefüges aller Legierungen der Komponenten A und B dar. Bei Abkühlung entstehen verschiedene *Phasen*. Eine Phase ist ein Bereich gleicher Gitterstruktur mit gleichen chemischen und physikalischen Eigenschaften. Metalle sind begrenzt durch *Phasengrenzen*:

- Schmelze
- Reinmetall
- Mischkristalle
- Intermediäre Verbindungen
- Gemische
 - Schmelze & Mischkristall
 - Mischkristall & Mischkristall

3.3.1 Vollkommene Löslichkeit im festen Zustand

Bildung eines lückenlosen Mischkristalls aus A-Atomen (Ni) und B-Atomen (Cu) (Abb. 3.5).

Entstehung der Seigerung

Ausgleich über Diffusion (Abb. 3.6)

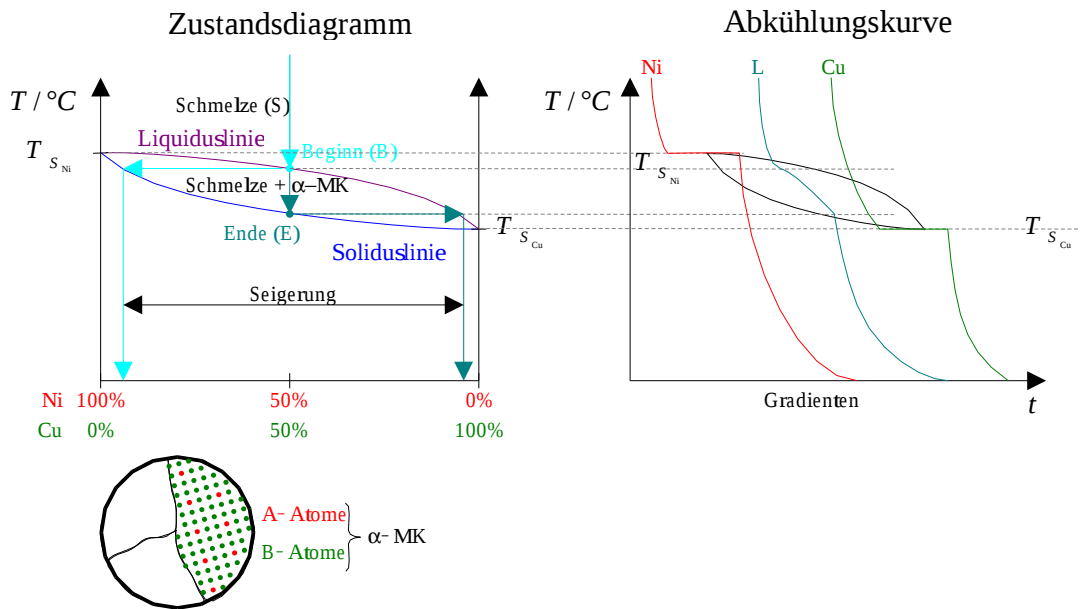


Abbildung 3.5: Vollkommene Löslichkeit im festen Zustand

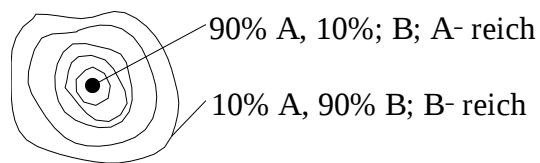


Abbildung 3.6: Entstehung der Seigerung

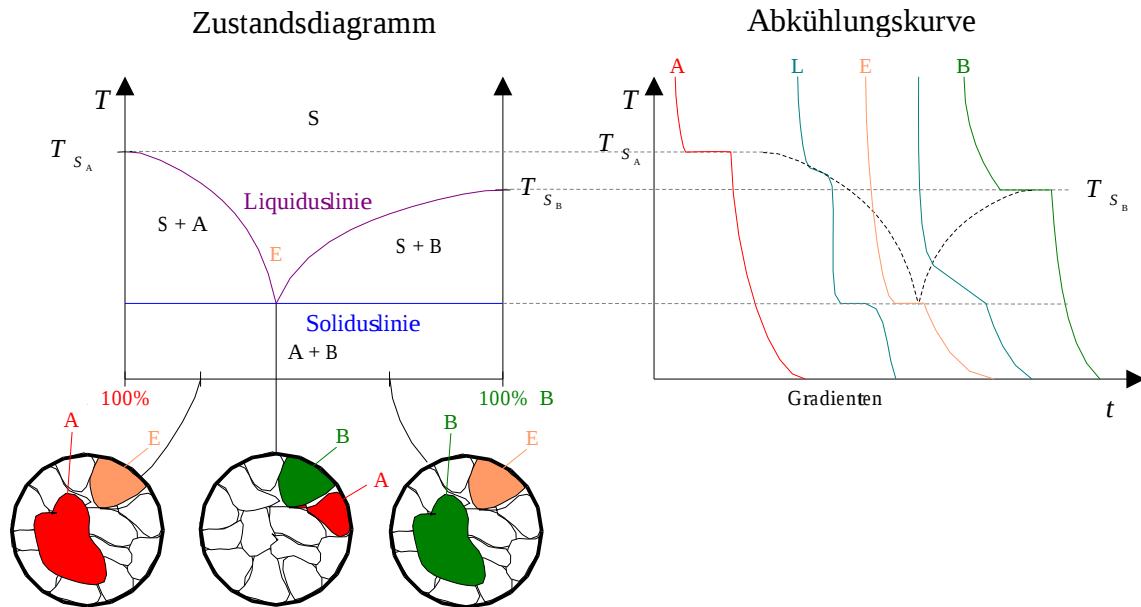


Abbildung 3.7: Vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand

3.3.2 Vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand

Es entsteht kein Mischkristall, sondern nur A- und B-Kristalle. Eutektikum bedeutet „gut schmelzend“ (Abb. 3.7).

- 2 Kristalle (A + B)
- fein verteiltes Gefüge (feinkörnig)
- Haltepunkt
- Eutektische Reaktion: $S \rightleftharpoons A + B$

3.3.3 Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand

Systeme mit Mischungslücke

Eutektische Systeme ($T_{SA} \approx T_{SB}$)

Es entstehen nur Mischkristalle und Gemische aus Mischkristallen (z.B. AlSi). Unter der Löslichkeitsgrenze bilden sich Segregate (Ausscheidung eines festen Bestandteiles aus einem anderen festen Kristall) (Abb. 3.8).

Peritektische Systeme ($T_{SA} \ll T_{SB}$)

Peritektikum bedeutet „ringsherum schmelzend“

Peritektische Reaktion: $S + \beta \rightleftharpoons \alpha$

(z.B. AgPt) (Abb. 3.9)

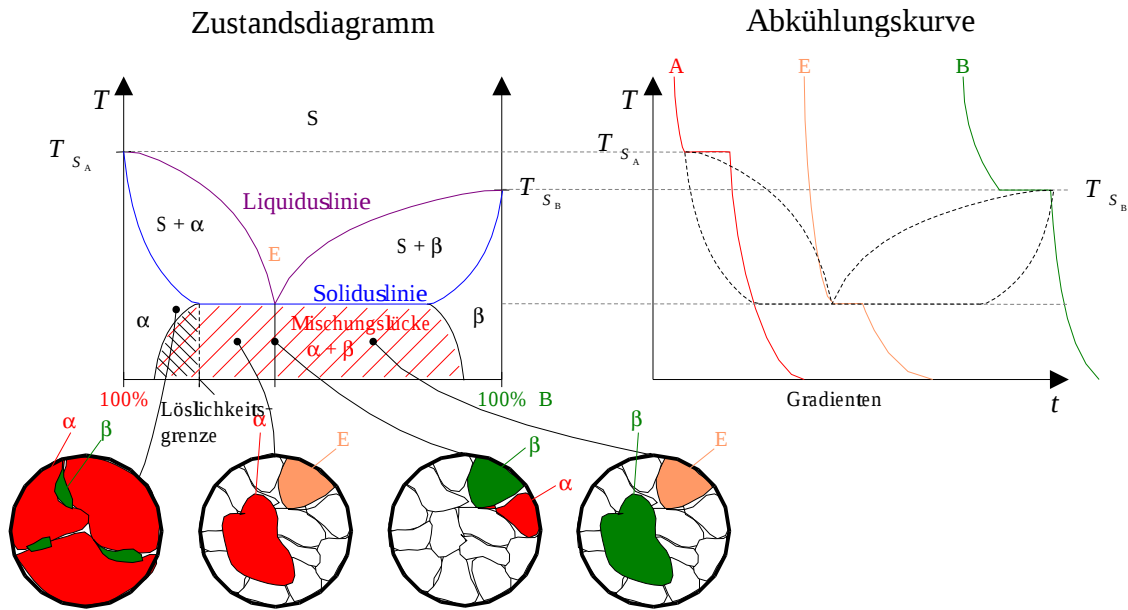


Abbildung 3.8: Eutektisches System

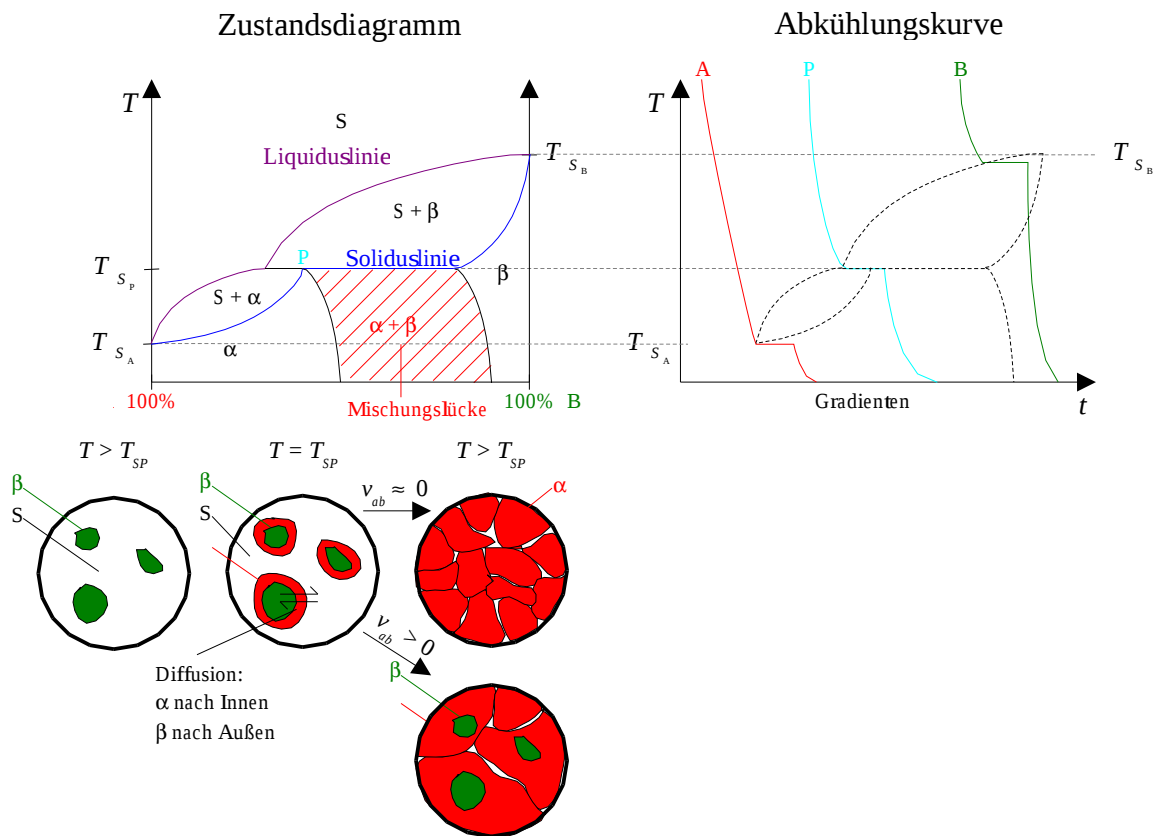


Abbildung 3.9: Peritektisches System

Abhängigkeit der Leitfähigkeit κ vom Zustandsdiagramm (Abb. 3.10)

- $\kappa \uparrow$ bei reinen Werkstoffen (100%)
- $\kappa \uparrow$ bei feinem Gefüge (Eutektikum)
- $\kappa \downarrow$ bei Mischkristallen



Abbildung 3.10: Leitfähigkeit κ im Zustandsdiagramm

3.3.4 Zusammengesetzte Zustandsdiagramme

Eigenschaften

- hart und spröde
- chemische Verbindung (Intermetallische Verbindung)
- technisch nur selten in der Anwendung
- verhält sich wie Reinmetall

(Siehe Abb. 3.11)

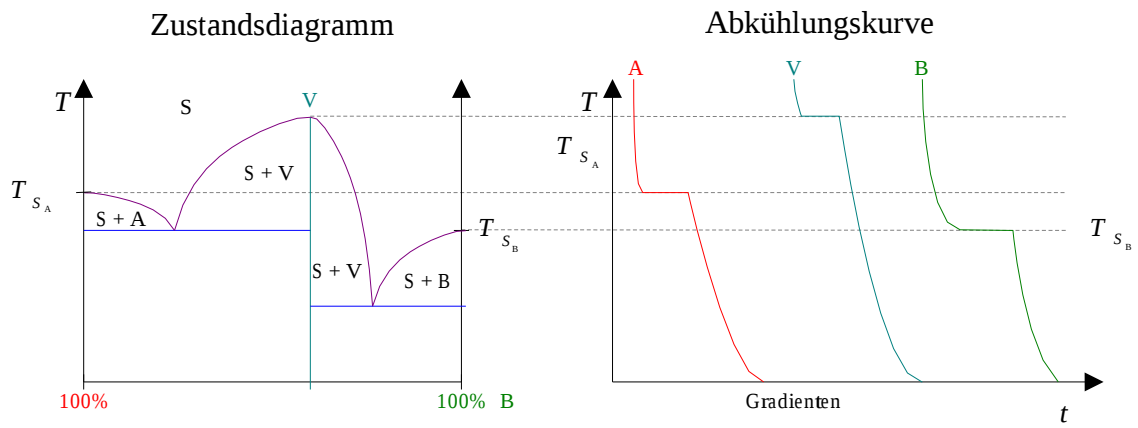


Abbildung 3.11: Zusammengesetztes System

4 Eisenwerkstoffe

4.1 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (Abb. 4.1)

Einteilung der Eisenwerkstoffe (Abb. 4.2)

4.2 Phasen und Gefüge

α -Mischkristall (Ferrit) (Abb. 4.3):

- reines Eisen, max 0,02%C
- ferromagnetisch bis Curie-Temperatur, 769°C, danach paramagnetisch
- kubisch-raumzentriert

γ -Mischkristall (Austenit) (Abb. 4.3):

- bis max. 2%C
- kubisch flächenzentriert

Fe₃C Eisenkarbid (Zementit):

- intermetallische Phase (6,67%C)
- sehr hart, sehr spröde (HV = 11 000 Nmm⁻²)
- Umwandlung in Graphit möglich durch “tampern” (Grauguss) langes Glühen nötig (= tampern) Fe₃C zerfällt in 3Fe und C(= Graphit).

Perlit (Abb. 4.4):

- eutektoider Zerfall des γ -Mischkristalls in Perlit
- $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$
- bei 0,8%C, Gefüge feinlamellar

4.3 Bezeichnung und Anwendung

1. Normumng nach DIN 17 006

vorangestellt	Kern	nachgestellt
↑		↑
Herstellverfahren		Wärmebehandlung

2. Kennzeichnung nach Eigenschaften (Zugfestigkeit)

Massenstähle, die nicht wärmebehandelt werden (C-Gehalt nicht wichtig).

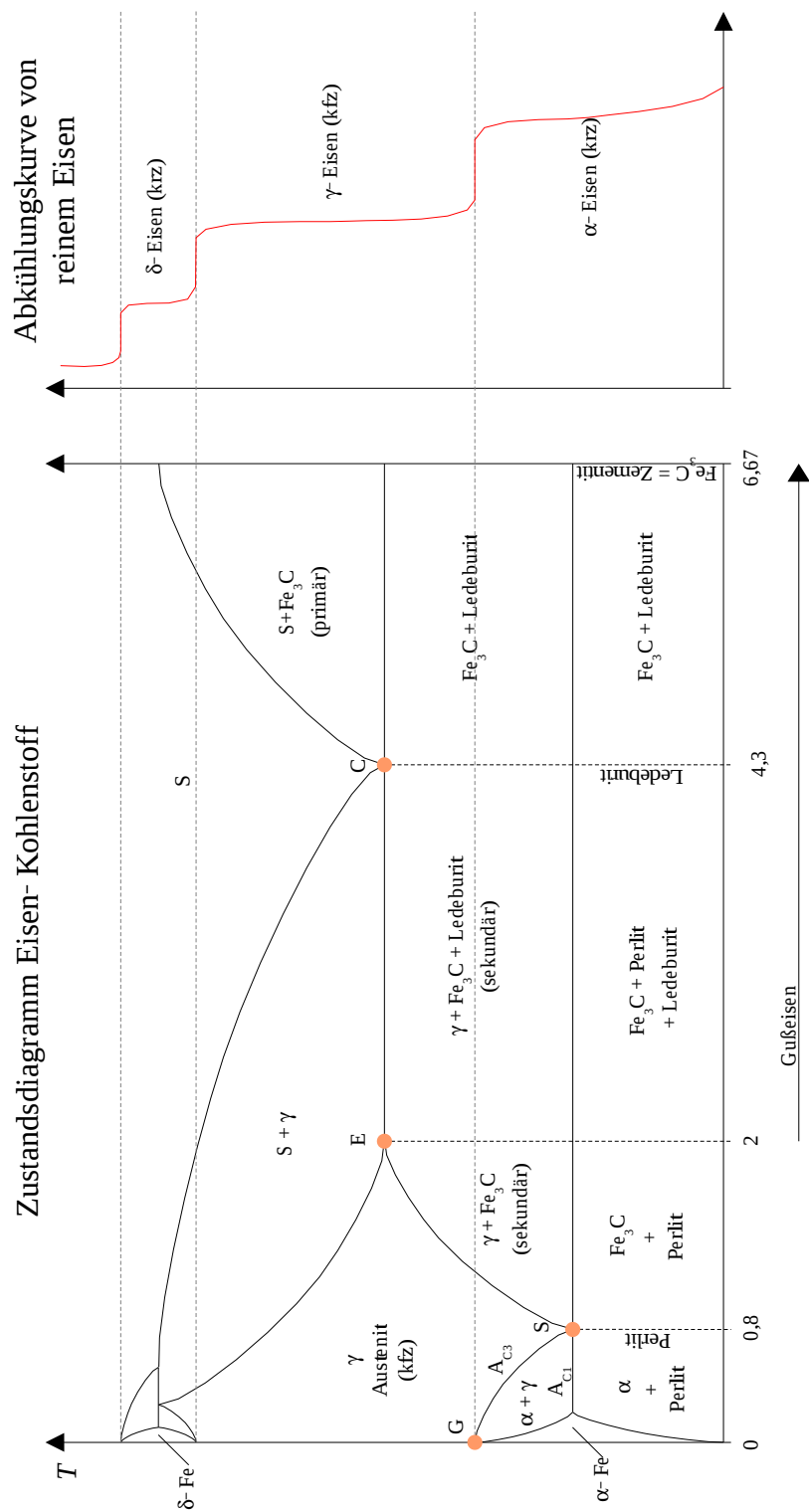


Abbildung 4.1: Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm & Abkühlungskurve reines Eisen

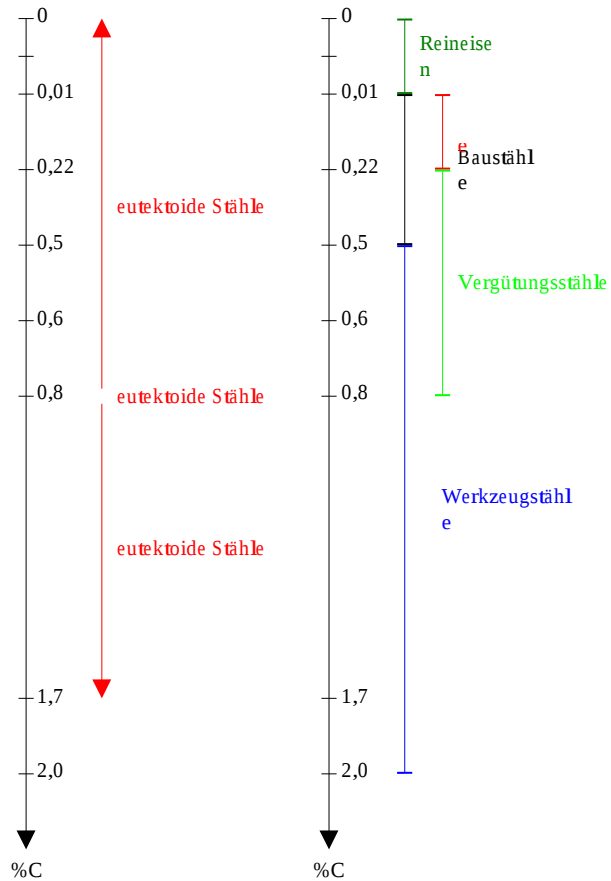


Abbildung 4.2: Einteilung der Eisenwerkstoffe

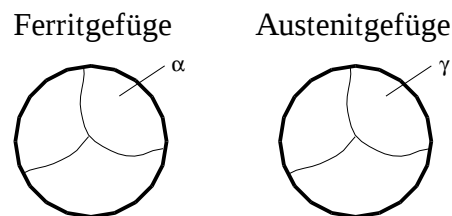


Abbildung 4.3: Ferrit- und Austenitgefüge

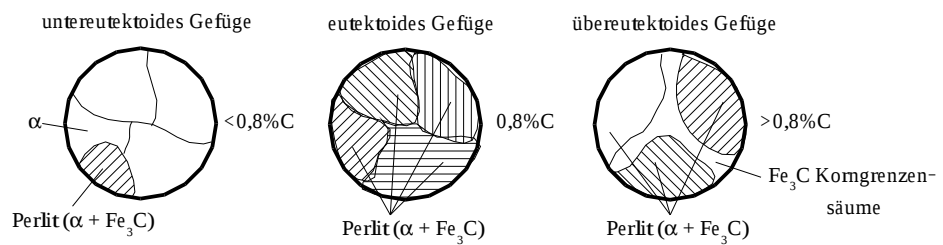


Abbildung 4.4: Unter-, über- und eutektisches Gefüge

St37: Baustahl mit Mindestzugfestigkeit $R_m = 370 \text{ Nmm}^{-2}$
Euronorm StE370: Baustahl mit Mindestzugfestigkeit $R_{eH} = 370 \text{ Nmm}^{-2}$

3. Kennzeichnung nach Analyse

Qualitätsstähle, geeignet für Wärmebehandlung u.a.

a) unlegierte Qualitätsstähle (Fe, C)

C-Gehalt wird angegeben mit Kennzahl 100:

- C 15 Unlegierter Qualitätsstahl mit $\frac{15}{100} \% \text{C}$, Rest Eisen (Einsatzstahl)
C 22 Unlegierter Qualitätsstahl mit $0,22 \% \text{C}$, Rest Eisen (Vergütungsstahl)
Ck 22 Unlegierter Qualitätsstahl mit $0,22 \% \text{C}$, Rest Eisen,
k = besondere Reinheit, wenig P und S

b) Niedrig legierter Qualitätsstahl (<5% Legierungsanteile)

Vorangestellt wird C-Gehalt mit Kennzahl 100, dann Elemente mit fallendem Prozentgehalt mit folgenden Kennzahlen:

- 4 Cr, Co, Mn, Ni, Si, W
(Chrom konnte man nicht sicher wahrnehmen)
10 Alle übrigen, außer
100 C, N, S, P
1000 B

Beispiele:

- 13 CrMo 4 4 Niedrig legierter Qualitätsstahl mit
0,13%C, 1%Cr, 0,4%Mo, Rest Eisen
25 CrMo 4 Niedrig legierter Qualitätsstahl mit
0,25%C, 1%Cr, <1%Mo, Rest Eisen
60 SiMn 5 Niedrig legierter Qualitätsstahl mit
0,6%C, 1,25%Si, <1%Mn, Rest Eisen

c) Hochlegierter Qualitätsstahl (>5% Legierungsanteile)

vorangestellt X, dann C-Gehalt mit Kennzahl 100, dann Elemente nach fallenden Prozentgehalten ohne Kennzahlen

Beispiele:

- X-200 Cr 13 Hochlegierter Qualitätsstahl mit
2%C, 13%Cr, Rest Eisen
X-12 CrNiTi 18 8 Hochlegierter Qualitätsstahl mit
0,12%C, 18%Cr, 8%Ni, <1%Ti, Rest Eisen

4.4 Eigenschaftsänderungen von Eisenwerkstoffen

1. Legierungstechnik (Änderung der chemischen Zusammensetzung)

a) Verschiebung der Phasengrenzen

- Ferritbildner: α -Mischkristall: Cr, Si, Al, ...
Austernitbildner: γ -Mischkristall: Ni, Co, Mn
Karbidbildner: sehr hart, spröde: Nb, W

4 Eisenwerkstoffe

b) Elemente mit besonderen Wirkungen und Eigenschaften

$R_m \uparrow$:	Mn, Ni, Cr
Warmfestigkeit $\uparrow$:	W, V
Magnetismus $\uparrow$:	Al, Ni, Co
Korrosionsfestigkeit $\uparrow$:	Cr

2. Wärmebehandlung

- Glühen
- Umwandlungshärten
- Ausscheidungshärten
- Härteverfahren (ZTU-Diagramm)

3. plastische Verformung

5 Wärmebehandlung

- Verfahren, um mit Temperaturänderungen Eigenschaften zu erzielen (im festen Zustand) -> Diffusion
- Zwei Verfahren:
 - Glühen -> Gleichgewichtszustand im Gefüge
 - Härten -> Ungleichgewichtszustand im Gefüge
- Temperaturführung (T - t -Diagramm) (Abb. 5.1)

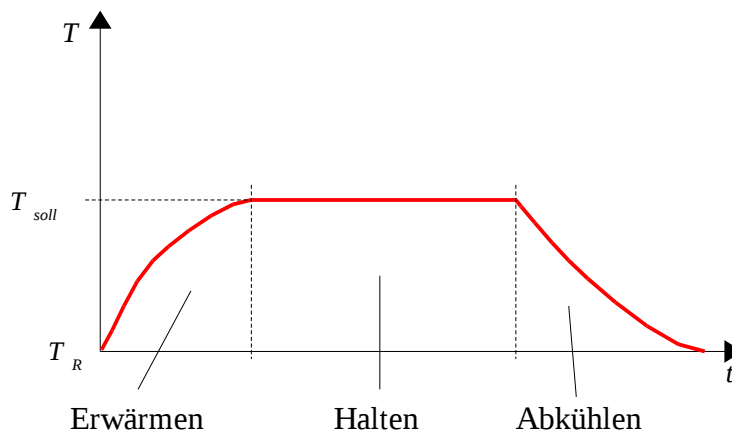


Abbildung 5.1: Temperaturführung

5.1 Diffusion

Bei der Diffusion findet ein temperaturabhängiger Platzwechsel von Atomen statt (Massentransport).



Je höher die Temperatur, desto größer die Schwingungsfrequenz der Atome. Diese können ihren Platz leichter wechseln. Durch Temperaturerhöhung wird *Aktivierungsenergie* zugeführt, die *Diffusion* einleitet. Diffusion wird durch Gleichgewichtszustand beendet.

Diffusionsvorgänge

- Ausgleich von Konzentrationen im Zonen-Mischkristall (Abb. 5.2)
- Rekristallisation
- Kriechvorgänge

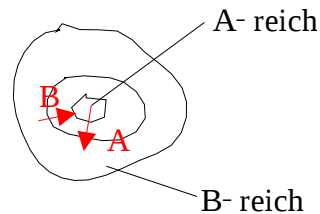


Abbildung 5.2: Diffusion

5.2 Glühen

Das Gefüge wird durch Glühen in den Gleichgewichtszustand versetzt.

- Abkühlungszeit $\uparrow$
- Abkühlungsgeschwindigkeit $\downarrow$

Bei Eisenwerkstoffen gibt es 6 Glühverfahren (Tab. 5.1).

5.3 Umwandlungshärten (bei Eisen)

Herstellung von *Ungleichgewicht* im Gefüge. Dies wird durch eine schnelle Abkühlung aus dem γ -Gebiet erreicht. Durch diese hohe Abkühlgeschwindigkeit entstehen weniger α -Mischkristalle und es entsteht weniger Perlit. Man unterscheidet 3 Gefügearten (Abb. 5.4), die dabei entstehen.

1. Perlitstufe
2. Zwischenstufe (Bainit)
3. Martensitstufe (Martensit)

5.3.1 Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild

Die Umwandlung von γ -Mischkristallen in Abhängigkeit von v_{ab} und T wird im ZTU-Diagramm dargestellt. Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm gilt theoretisch nur für $v_{ab} \rightarrow 0$. In der Praxis ist v_{ab} aber immer größer 0. Dadurch entstehen Ungleichgewichte. Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm wird um die dritte Komponente v_{ab} ergänzt zu einem räumlichen Diagramm. Das ZTU-Diagramm sind ebene Schnitte parallel v_{ab} - T -Ebene (Abb. 5.3).

Perlitstufe

Die Perlitstufe wird durch langsames Abkühlen aus dem γ -Gebiet erreicht. Der Kohlenstoff diffundiert und es entsteht α -Mischkristall- und Fe_3C -Lamellen.

Zwischenstufe (Bainit)

Die Zwischenstufe erreicht man durch schnelles Abkühlen aus dem γ -Gebiet. Die Kohlenstoffdiffusion nimmt ab und es bildet sich aus dem γ -Mischkristall viel Kohlenstoff-übersättigter α -Mischkristall und wenig „normale“ α -Mischkristall- und Fe_3C -Lamellen.

Glühbehandlung	Zweck der Wärmebehandlung	Bedingungen	Anmerkungen
Diffusionsglühen (Homogenisieren)	Ausgleich von Konzentrationsunterschieden im Mischkristall (Seigerungen)	für alle Metalle Glühtemperatur: für Stahl 1100...1300°C für CuZn 700...900°C	es entsteht grobkörniges Gefüge und weiche Oberfläche besonders für Stahlguß teuer
Grobkornglühen (Hochglühen)	Grobkörnige Gefüge ermöglichen eine gute spannenbende Bearbeitung	nur für Stahl Glühtemperatur: 950...1100°C, langsame Abkühlung bis PSK, dann wieder schneller für alle Metalle Glühtemperatur: für Stahl 560...630°C für CuZn 250...300°C Glühdauer ca. 0,5h langsam Abkühlen, um keine neuen Spannungen zu erzeugen	es entsteht ein grobkörniger, lamellarer Perlit günstig zu zerspanen (Reißspan) teuer
Spannungsarmglühen	Beseitigung von inneren Spannungen, z.B. Entstanden durch ungleichmäßiges Erwärmen, Verformung, spannhebende Bearbeitung, Umwandlungsvorgänge (ZTU)	für Stahl 560...630°C für CuZn 250...300°C Glühdauer ca. 0,5h langsam Abkühlen, um keine neuen Spannungen zu erzeugen	keine Festigkeitsänderung keine unerwünschte Gefügeänderung (daher nicht in Rekristallisationsgebiet erhitzen) Polygonisation (=Auflösen von Versetzungen)
Rekristallisationsglühen	Rückgängig machen der durch Kaltverformung erzeugten Eigenschaftsänderungen	für alle Metalle Glühtemperatur und Glühzeit hängen vom Kaltverformungsgrad ab Glühtemperatur: für Stahl 500...700°C für CuZn 500...600°C Glühzeit: 0,5h	Gefahr der Grobkornbildung, wenn Glühtemperatur, Glühzeit und Kaltverformungsgrad nicht genau aufeinander abgestimmt sind
Weichglühen	Erreichen eines möglichst weichen Zustandes des Stahls für eine günstige spannhebende Bearbeitung Hohe Kaltverformung möglich Bester Ausgangszustand zum Härten und Vergüten	nur für Stahl Glühen dicht unterhalb A_{C1} , oder Pendeln um A_{C1} ($>0,8\%C$) lange Haltezeit (ca. 100h) langsam Abkühlen (ca. 3h)	lamellares ferritisch-perlitisches Gefüge wird in energiereicheren körnigen Zementit (eingeformter Perlit) übergeführt
Normalglühen	Erzeugung eines gleichmäßig, feinkörnigen Gefüges mit optimalen Festigkeitseigenschaften	nur für Stahl Glühen 30...50°C über A_{C3} (untereutektoide Stähle), 30...50°C über A_{C1} (überutektoide Stähle) geringe Haltezeit (ca. 10min) Abkühlen an Luft	Gefahr des Alterns, Überzeiten und Überhitzen führen zu einem groben Korn Stahlguß wird fast immer normalisiert, um das spröde Gefüge (Wiemannstäten'sches Gefüge) zu beseitigen

Tabelle 5.1: Übersicht über die wichtigsten Glühbehandlungen

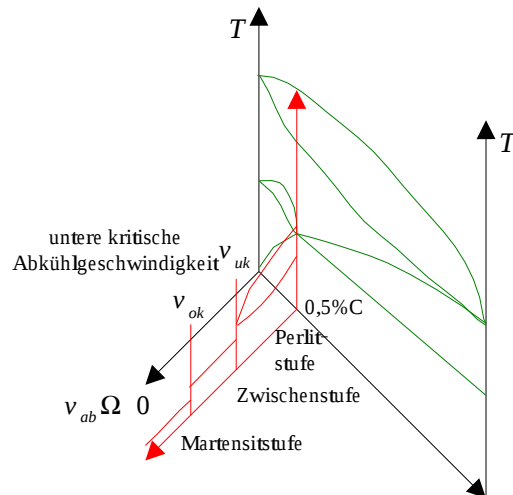


Abbildung 5.3: Entstehung des ZTU-Diagramms

Matensitstufe (Martensit)

Durch sehr schnelle Abkühlung entsteht Martensit. Der Kohlenstoff kann nicht mehr diffundieren und bleibt bei der $\gamma - \alpha$ -Umwandlung im Kristallgitter. Dadurch entsteht ausschließlich Kohlenstoff-übersättigter α -Mischkristall. Es bildet sich ein nadeliges Martensitgefüge.

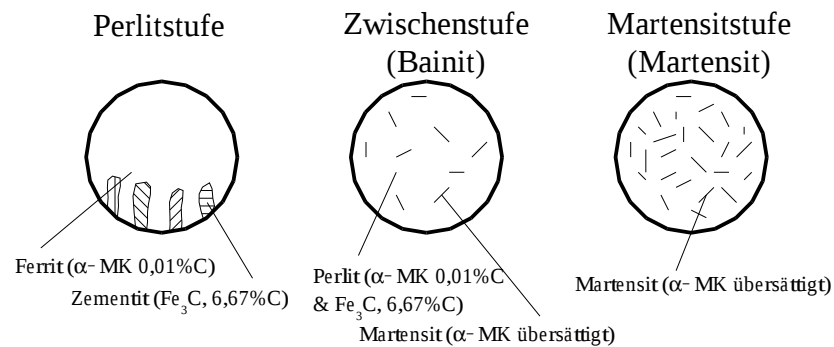


Abbildung 5.4: Gefügearten bei unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeit

5.3.2 Härteverfahren

Verfahren werden am ZTU-Diagramm dargestellt (Abb. 5.5 und 5.6).

1. Normalglühen (N)

Durch Normalglühen wird nahezu Gleichgewicht erreicht. Es entsteht α und Fe_3C

2. Einfaches Härten (H)

Es wird ein starkes Ungleichgewicht erzeugt. Es entsteht 100% Martensit. Martensit ist sehr spröde und hart(Glashärte). (Durch Vergüten wird die Glashärte entfernt.)

3. **Gebrochens Härten (G)** Auch hier entsteht ein Ungleichgewicht und 100%tiges Martensit zunächst in Wasser, dann Öl und danach wieder Wasser. Das Gefüge ist hart, aber nicht Glashart.
4. **Warmbadhärten (W)**
Mit diesem Verfahren wird z.B. die Zwischenstufe erreicht. Die Abkühlung wird mit *Wasser* erreicht. Die Temperatur wird in einem *Salzbad* konstant gehalten.

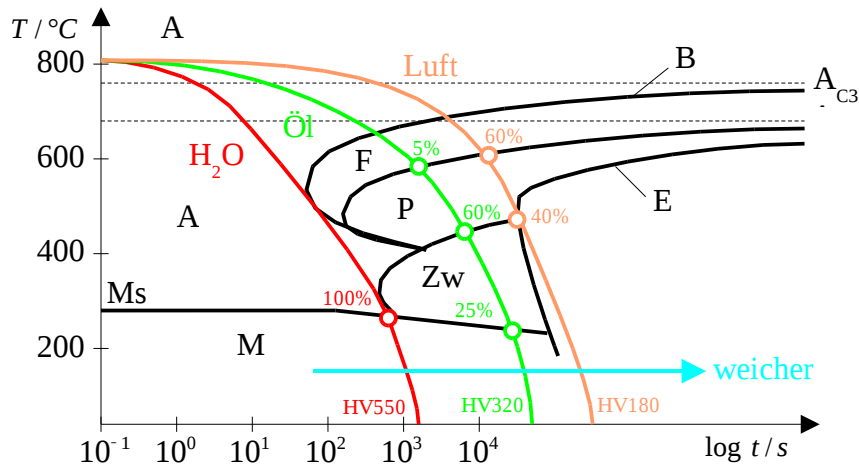


Abbildung 5.5: ZTU-Diagramm

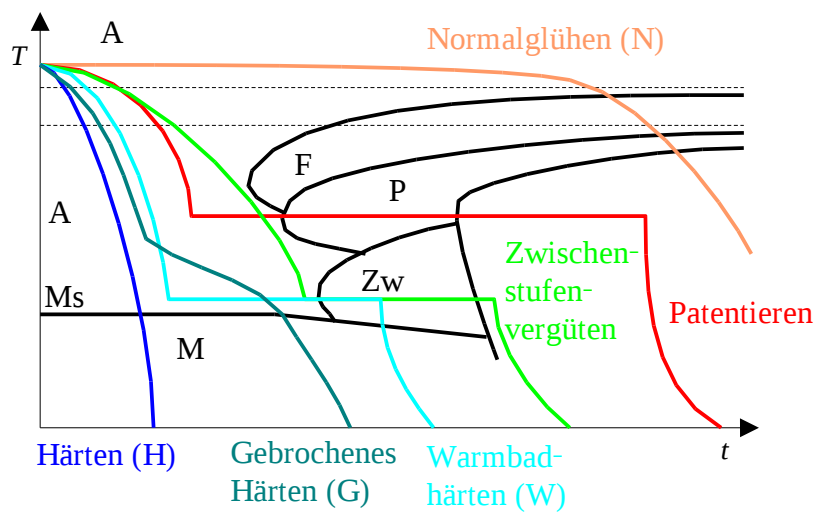


Abbildung 5.6: Härteverfahren

6 Mechanische Eigenschaften

6.1 Elastische Verformung

Die elastische Verformung bleibt nicht bestehen. Die Atome ändern ihre relative Lage zueinander nicht. Die Verformung hängt von folgenden Einflussfaktoren ab:

- Atombindung
- Kristallaufbau (kfz $\uparrow$, krz $\downarrow$)
- Gitterbaufehler
- Wärmebehandlung

Als Beispiel soll der Einfluss einer Legierung auf die Festigkeit dienen (Abb. 6.1).

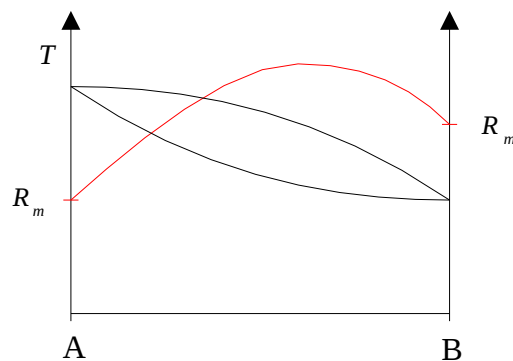


Abbildung 6.1: Festigkeit in Abhängigkeit von der Legierung

Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abb. 6.2)

Aus dem Diagramm kann folgendes abgelesen werden:

- Fließgrenze
- Streckgrenze
- Zugfestigkeit
- Elastizitätsmodul
- plastischer und elastischer Verformungsbereich
- Bruchdehnung
- Bruchaussehen (Probe)

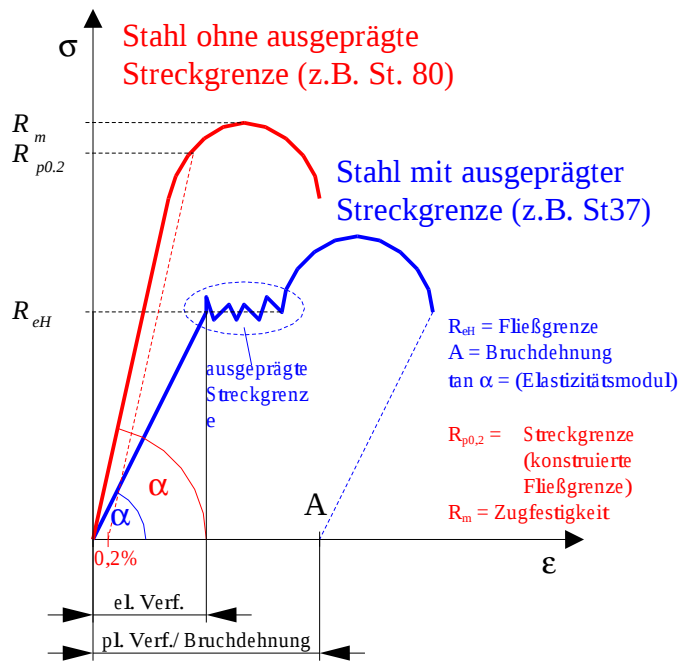


Abbildung 6.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Unterschiedliche Bruchaussehen (Abb. 6.3)

1. Verformungsbruch (starke Einschnürung)
2. Sprödbbruch (keine Einschnürung)
3. Mischbruch (schwache Einschnürung)

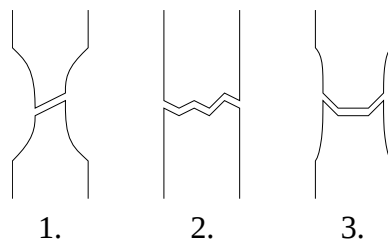


Abbildung 6.3: Verschiedene Bruchaussehen

6.2 Plastische Verformung

Die plastische Verformung ist eine bleibende Verformung, d.h. die Atome ändern ihre Lage zueinander.

6.2.1 Gleitung, Versetzungsbewegung, Zwillingsbildung

Gleiten

- Bei Zugbeanspruchung entstehen unter 45° maximale Schubspannungen
- Je dichter die Atome gepackt sind, desto leichter sind sie verschiebbar (z.B. kfz, ebenfalls unter 45°). Die Bewegung der Atomreihe ist ein Vielfaches des Atomabstandes (Abb. 6.4).

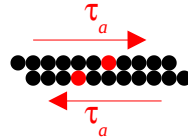


Abbildung 6.4: Bewegung der Atome

- Bevorzugte Gleitebenen (Abb. 6.5)

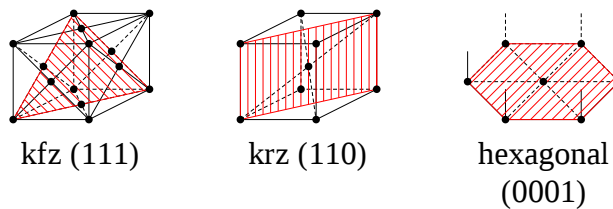


Abbildung 6.5: Gleitebenen verschiedener Kristallgitter

Versetzungsbewegung

Bei Stufenversetzung kombiniert mit Schubspannung erfolgt ein Gleiten nicht entlang einer Atomreihe, sondern von Atom zu Atom. Dazu ist nur geringe Schubspannung notwendig (Abb. 6.6).

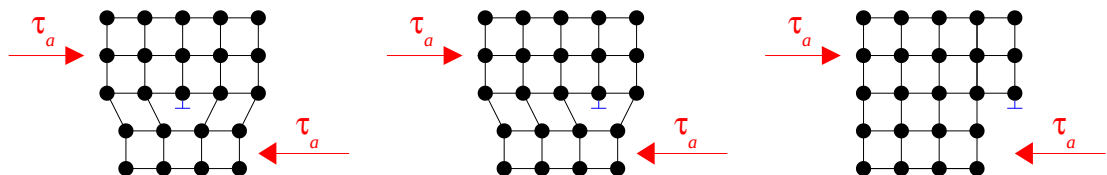


Abbildung 6.6: Versetzungsbewegung

Zwillingsbildung

Gitterbereiche klappen in neue Orientierung um. Diese Bereiche sind zu den unverformten symmetrisch (Symmetrieebene). Hier ist die Bewegung kleiner als der Atomabstand. (Abb. 6.7).

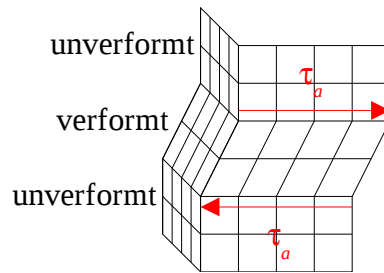


Abbildung 6.7: Zwillingsbildung

6.2.2 Erholung und Rekristallisation

Die Änderung der Werkstoffeigenschaften nach plastischer Verformung kann durch „Ausheilvorgänge“ reduziert werden. Durch Kaltverformung wird Energiezustand im Werkstoff erhöht. Tendenz des Werkstoffes ist aber in einen energieärmeren Zustand zurückzukehren. Dies wird durch 3 Maßnahmen erreicht.

1. Erholung

Durch geringe Erwärmung (unter Phasengrenze) können Atome diffundieren. Dadurch werden innere Spannungen abgebaut. Es entsteht allerdings kein neues Kristallgitter.

2. Rekristallisation

Der Werkstoff wird im Vergleich zur Erholung höher erwärmt (unter Phasengrenze). Hierbei diffundieren die Atome stärker. Die im Werkstoff vorhandene Energie wird zusätzlich zur zugeführten Wärmeenergie frei. Es entstehen neue Keime und dadurch ein neues Gitter gleicher Art.

3. Grobkornbildung

Bei der Grobkornbildung wird der Werkstoff höher erwärmt, als bei der Rekristallisation. Dadurch schließen sich Kristalle zusammen und es entstehen grobe Körner.

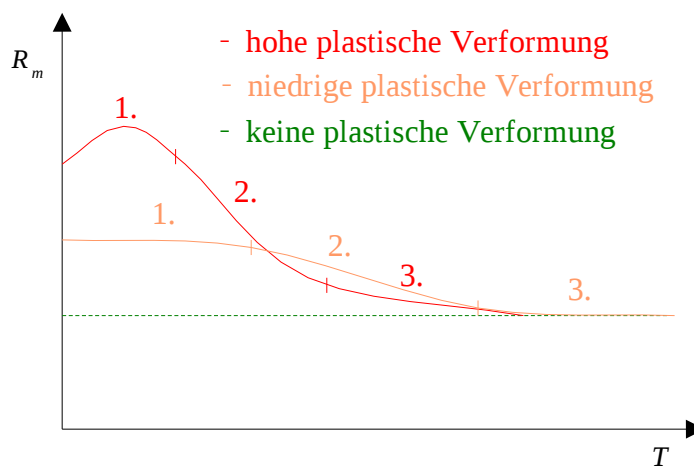


Abbildung 6.8: Erholung und Rekristallisation bei unterschiedlicher plastischer Verformung

6.2.3 Kriechen

Die Auswirkungen von Belastungen unter höheren Temperaturen bezeichnet man als *Kriechen*.

6.2.4 Methoden zur Festigkeitssteigerung

1. **kleine Körner erzeugen**
Je kleiner das Korn, desto geringer ist die Verztzungsbewegung (Feinkornbaustahl).
2. **plastische Verformung**
Verdichtung behindert Versetzungsbewegung.
3. **Legierungsbildung**
Mischkristalle, Fremdatome behindern Versetzungsbewegung.
4. **Umwandlungshärten**
Ungleichgewicht(verspanntes Gitter), viele Fehler behindern Versetzungsbewegung.
5. **Ausscheidungshärten**
Übersättigte Mischkristalle behindern Versetzungsbewegung.

7 Werkstoffprüfung

Untersuchungs- und Prüfverfahren

7.1 Bestimmung der Zusammensetzung und Kristallgefüges

7.1.1 Analysen und optische Untersuchung

- qualitativ(siehe Umdruck 6.1.1)
 - Funkenprobe
 - Magnetprobe
 - Tüpfelprobe
 - Brennprobe
- quantitativ
 - Maßanalyse(Titration)
- optisch(siehe U 1.2)

Prüfung: 1 der 3 Mikroskope

7.1.2 Elektronenmikroskope

1. Transmissions-Elektronen-Mikroskop (TEM (siehe Abb. 7.1(a)))

(*Prüfung:* Vorteile der verschiedenen Mikroskope)

Probenherstellung: Flache Probe wird geätzt bis kleines Loch entsteht, Lochränder werden untersucht.

Vorteil: zur Erkennung von Gitterbaufehlern

2. Raster-Elektronen-Mikroskop (REM (siehe Abb. 7.1(b)))

Funktionsweise: **Sekundärelektronen** ; Ausschlag aus Probenoberfläche; “Abrastern”

Vorteil: keine spezielle Probenvorbereitung

Anwendung: Oberflächen; Bruchflächen

7.2 Zerstörende Prüfverfahren

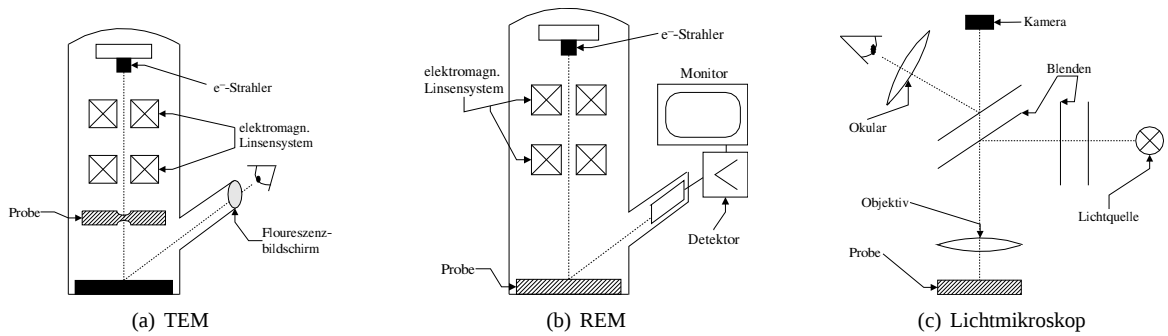
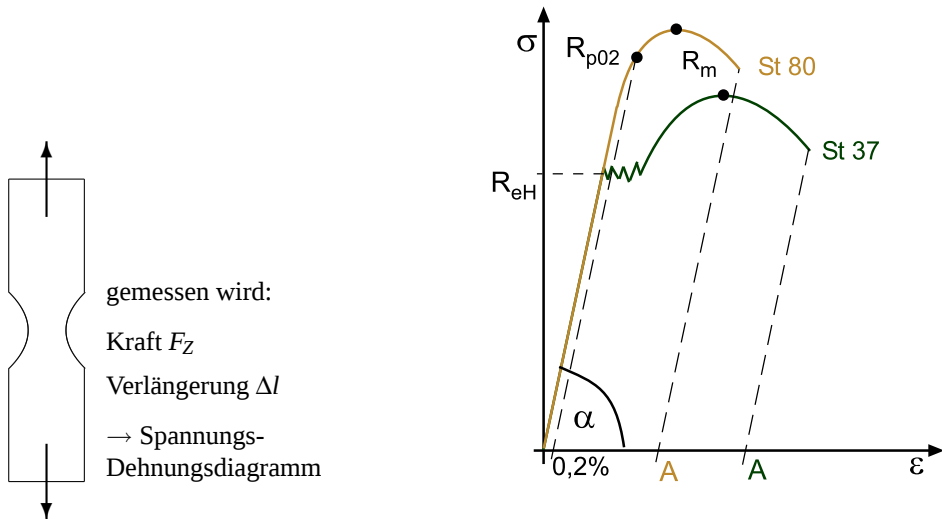


Abbildung 7.1: Mikroskope

(zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten)

7.2.1 Zugversuch(Prüfung: !!!)



7.2.2 Härteprüfverfahren(Prüfung: 1 aus 3!)

1. **Brinell (siehe Abb. 7.2(a))** (für dicke Bauteile; $> 2 \cdot d$)

gehärtete Stahlkugel (Geometrie genormt) $\underbrace{HB}_{\text{HaerteBrinell}} = \frac{F_d}{A} \leftarrow \text{Haertewert}$

$$\text{Norm: } \underbrace{120}_{\text{Haertewert}} HB \underbrace{5}_{D \text{ in mm}} / \underbrace{250}_{F_d \text{ in kp}} / \underbrace{30}_{t \text{ in s}}$$

2. **Vickers (siehe Abb. 7.2(b))** (Probendicke $> 1,5d$)

Diamantpyramide(Geometrie genormt)

$$HV = \frac{F \cdot 2 \cdot \cos(22)}{d^2} = \frac{F \cdot 1,854}{d^2}$$

Norm: 120 HV 300/30

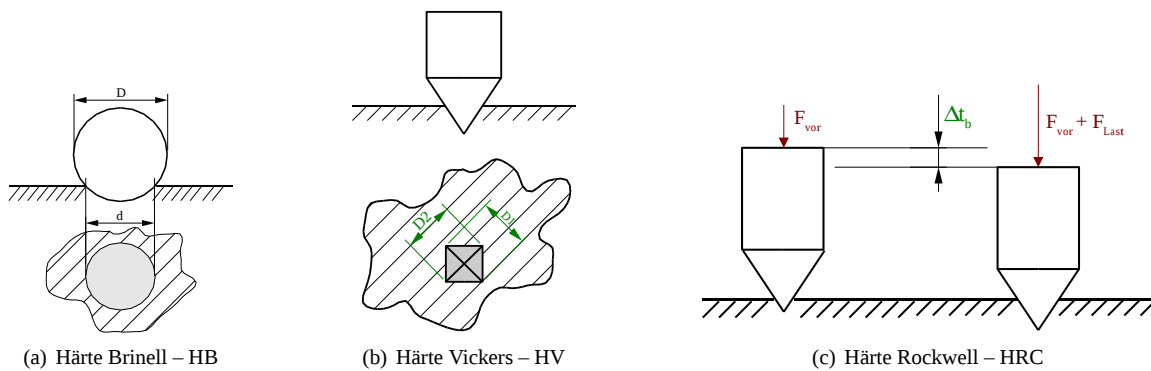


Abbildung 7.2: Härteprüfverfahren

(Härtewert – HV – Prüfkraft/Einwirkdauer
(wenn ohne Angabe: 100N/10s))

3. Rockwell (siehe Abb. 7.2(c))

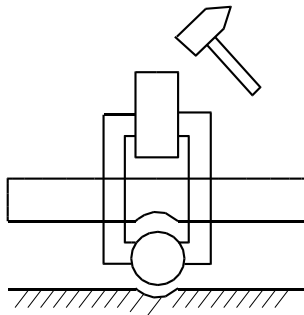
gehärtete Stahlkegel(Cone) → HRC

gehärtete Stahlkugel(Ball) → HRB ⇒ Eindringtiefe messen!

Norm: 59 HRC (Cone) — 72 HRB (Ball)

Dynamische Härteprüfung(mobil)

1. Poldihammer

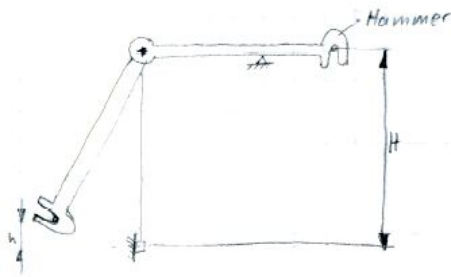


2. Federhärtemesser

kein Vergleichsnorm; Prüfkraft wird über Federkraft eingebracht

7.2.3 Kerbschlagbiegeversuch

Verfahren zur empirischen Prüfung der Zähigkeit, Trennbruchneigung und Güte von Wärmebehandlungen.



Gemessen wird Energie

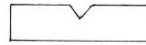
$$W = mg(H - h)$$

$W \uparrow \Rightarrow \text{Zähigkeit } \alpha_k \uparrow \text{ zäh!}$

$W \downarrow \Rightarrow \text{Zähigkeit } \alpha_k \downarrow \text{ spröde!}$

Verschlagproben sind genormt:

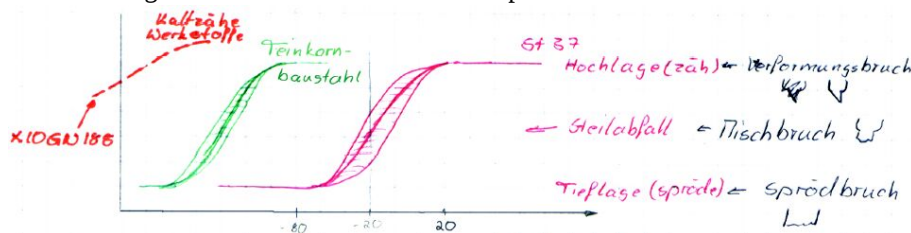
ISO:



DVM:



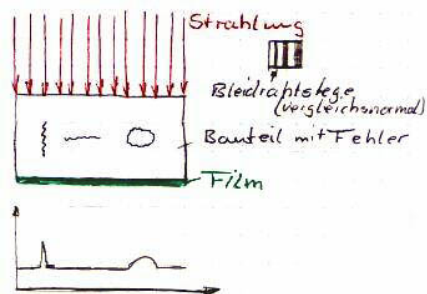
Untersuchungen bei unterschiedlichen Prüftemperaturen



7.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

keine Werkstoffkennwerte, sondern Werkstofffehler!

7.3.1 Röntgenverfahren



Röntgen bzw. Gammastrahlen durchdringen Metalle, je nach Bauteildicke/Werkstoff/Fehler wird Strahlung abgeschwächt und Reststrahlung hinter Bauteil auf Film registriert.

Genormte Bleidrahtstäbe dienen als Vergleichsnorm für die Fehlergrößenerkennung. Muß in zwei Richtungen gemacht werden, da Längsriße sonst nicht erkennbar sind! Vgl. Zeichnung!

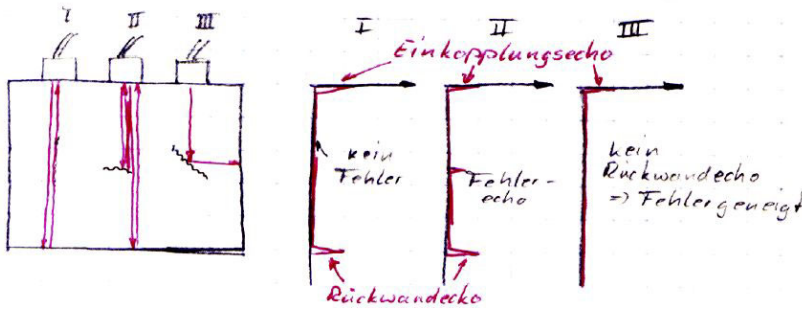
Zur Erkennung von Fehlern im Inneren (Risse, Lunker, Inhomogenitäten)

7.3.2 Ultraschallverfahren

Schallwellen dringen in Bauteil ein. Hochfrequenter Schallstrahl (für Metalle 0,5-10MHz) läßt sich gut bündeln, daher können auch kleine Fehler erkannt werden. Ankopplung an Bauteil über Öl, da bei Luftspalt Totalreflexion. Zur Erkennung von Fehlern im Innern (Risse, Lunker, Doppellungen, Einschlüsse)

1. Impulsschallverfahren

Ein Schaltkopf der Impuls sendet und empfängt.



2. Durchschallverfahren

Zwei Köpfe, Sender und Empfänger (schräg) (Schweißnahtprüfung)

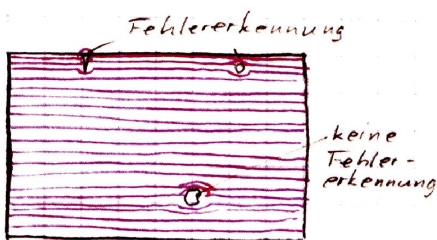


7.3.3 Farbeindringverfahren -

Risse an Oberfläche

Flüssigkeit mit geringer Zähigkeit und Oberflächenspannung dringt in Oberflächenrisse ein (Kapilarwirkung), nach Abwaschen wird Bauteil mit Kreidefilm überzogen. Flüssigkeit dringt in trockenen Kreidefilm ein, dadurch sichtbar machen des Fehlers.

7.3.4 Magnetpulververfahren



Risse an Oberfläche oder knapp darunter. Werkstoff muß ferromagnetisch sein!

Der Verlauf der Feldlinien wird durch Fehler gestört, Eisenspanne in Ölemulsion machen Feldlinien sichtbar.

7.3.5 Schallemissionsprüfung

Zur Feststellung von Rißentstehung bzw. Rißfortpflanzung — Bei Rißentstehung gehen von dem sich bewegenden Atomen, Schallwellen aus, diese werden mit Spezialmikrofon abgehört. Größe und Ort des Risses können nicht festgestellt werden.

8 Elektrische Eigenschaften von Festkörpern

Elektrische Eigenschaften hängen vom Vorhandensein freier Elektronen ab. Es kann also der Atomaufbau zur Hilfe gezogen werden.

- positiv geladener Kern (Protonen + Neutronen)
- negativ geladene e^- die den Kern auf definierten Bahnen umkreisen

Elektrische Eigenschaften hängen weiter von den Bindungsarten ab:

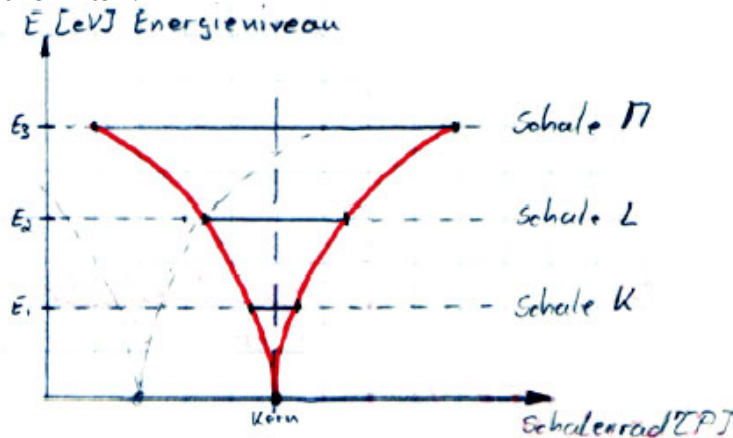
Metallische Bindung: gute elektrische Leitfähigkeit (viele freie e^-) → Leiter!

Kovalente Bindung: keine elektrische Leitfähigkeit (e^- paarweise gebunden) aber Leitungsvorgänge sind möglich, z.B.: durch äußeres Feld, Wärme, Licht und Störstellen.

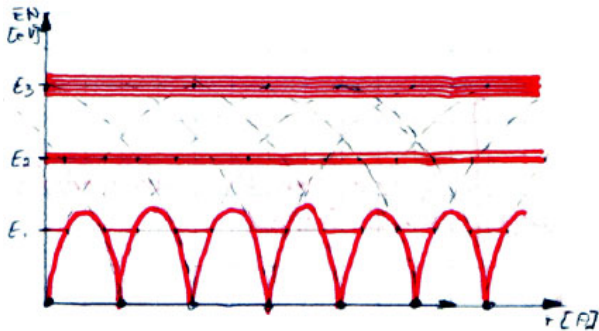
Ionenbindung: keine elektrische Leitfähigkeit (keine freien e^-) → Isolator!

8.1 Bändermodell

Die Lage jedes Elektrons ist gegenüber dem Kern durch ein bestimmtes Energieniveau gekennzeichnet, z.B.: für ein Atom:



Treten viele Atome in Wechselwirkung, so werden die Energieniveaus am stärksten gestört. Nach Pauli-Prinzip können benachbarte Elektronen nicht das gleiche Energieniveau besitzen, somit treten Energiebänder auf!



Für die elektrische Leitfähigkeit, sind die beiden äußersten Energiebänder maßgebend. Das äußerste Band wird **Leiterband** genannt und ist nur teilweise oder gar nicht mit Elektronen besetzt. Das darunter liegende Band heist **Valenzband** und ist voll mit Elektronen besetzt.

Stromleitung beruht auf gerichteter Bewegung der e^- , dies erfolgt zum Beispiel durch ein äußeres Feld (=Energiezufuhr). Damit erhalten e^- ein anderes höheres Energieniveau und können andere Bänder erreichen. Somit unterscheidet man 3 Leitungsmechanismen im Bändermodell.

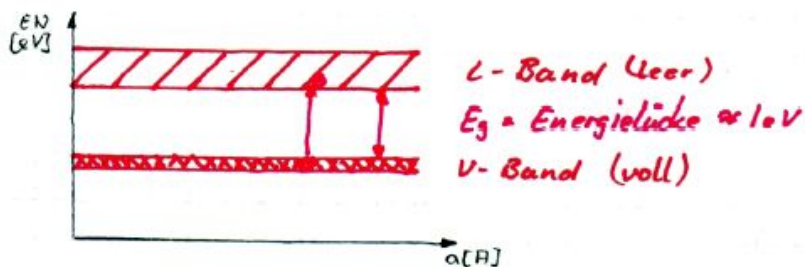
- **Isolator:** (Nichtleiter)



Selbst bei Zufuhr hoher Energie können keine e^- aus V-Band die Energieschlücke überspringen und ins L-Band gelangen.

z.B.: $\text{SiO}_2 \Rightarrow E_g \approx 8 \text{ eV}$

- **Halbleiter:**

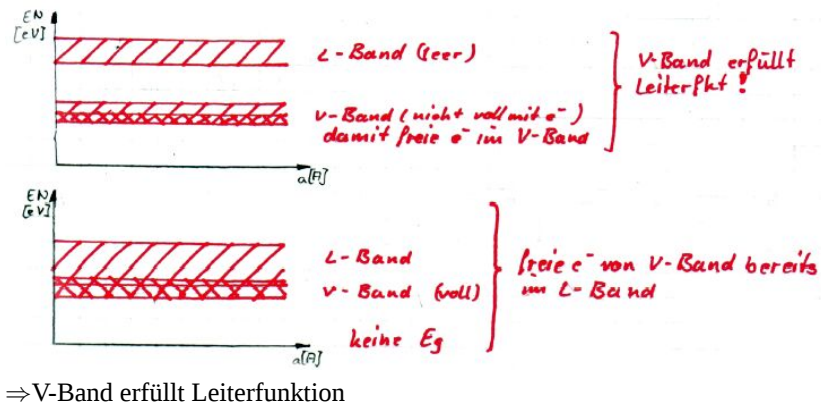


Ohne Energiezufuhr können keine e^- die Energieschlücke überspringen! $\Rightarrow$ Isolator !

Bei Energiezufuhr gelangen e^- von V ins L-Band, damit freie e^- im L-Band $\Rightarrow$ Leiter!

z.B.: $\text{Ai} \Rightarrow E_g \approx 1,1 \text{ eV}$

- **Leiter:** $\Rightarrow$



8.2 Elektr. Leitfähigkeit κ metallischer Werkstoffe

$$A_g \approx 63 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$

$$Cu \approx 57 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$

$$Au \approx 45 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$

$$Al \approx 37 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$

1. Einfluß auf die Leitfähigkeit

Konzentration/dichte der Leitungs- e^- (Anzahl der e^- pro Volumen)

$$n_e \left[\frac{\text{As}}{\text{m}^3} \right]$$

Beweglichkeit der Elektronen

$$\mu_e \left[\frac{\text{m}^2}{\text{Vs}} \right]$$

daraus folgt für κ :

$$\kappa = n_e \cdot \mu_e = \frac{1}{\rho} [\text{S/m}]$$

κ = elektrische Leitfähigkeit [S/m]

ρ = spezifischer Widerstand [Ωm]

Metalle haben gegenüber Halbleitern höhere Konzentration und niedrigere Beweglichkeit.

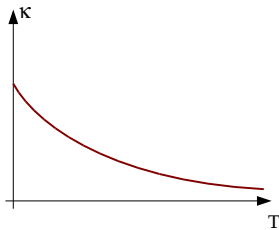
Metalle: $n_e \uparrow$; $\mu_e \downarrow$

Halbleiter: $n_e \downarrow$; $\mu_e \uparrow$

2. Möglichkeiten, die el. Leitfähigkeit zu beeinflussen

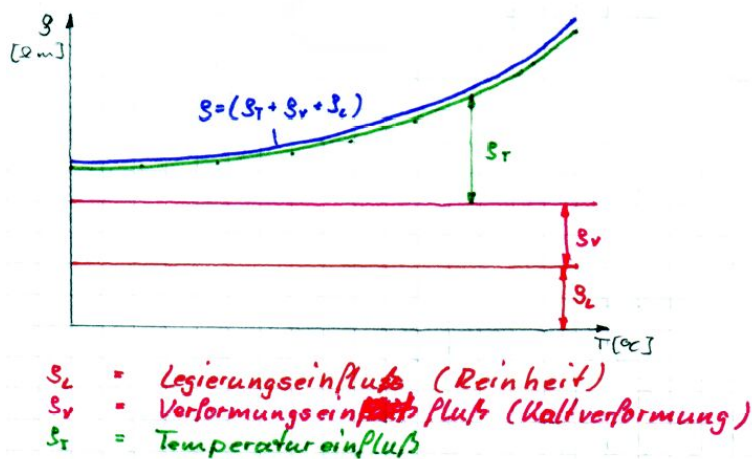
κ wird umso größer, wenn (ρ wird umso kleiner, wenn):

- Reinheitsgrad der Kristalle sehr hoch ist. (Besser keine Legierung $\Rightarrow$ MK) (reines Cu: OFHC-Cu $\Rightarrow \kappa \approx 58 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) Kappa wird mit größeren Legierungsanteilen geringer, da stärkere Gitterverspannung durch unterschiedliche Atomrumpffgrößen, dadurch Behinderung der freien e^- . Prüfung:

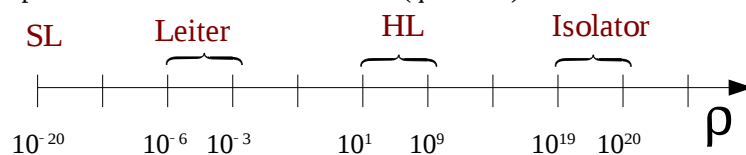


- Kristallgitter wenig oder gar nicht elastisch bzw. plastisch verformt (keine Kaltverformung !) Bei Kaltverformung, Versetzungen durch Atome $\Rightarrow$ Behinderung der freien e^- .
- Werkstoffe wenig Korngrenzen aufweisen (Monokristalle, Grobkornwerkstoff) (schlecht ein Feinkornwerkstoff $\Rightarrow$ Polykristallin)
- Temperatur im Leiter gering (je höher Temperatur, umso größer ist Schwingung der Atomrümpfe $\Rightarrow$ Behinderung der Beweglichkeit der e^-)

Die Mathiessen Regel fasst diese Einflüsse zusammen:



spezifischer elektrischer Widerstand (qualitativ) für verschiedene Werkstoffe:

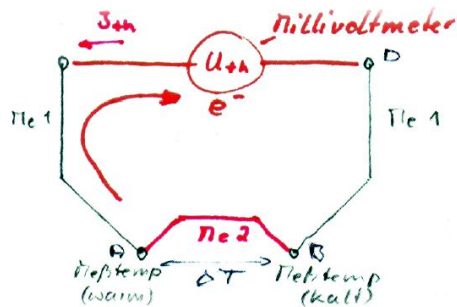


8.3 Thermoelektrische Effekte

1. Seebeck-Effekt

Befinden sich Kontaktstellen zweier unterschiedlicher Metalle auf verschiedenen Temperaturen, diffundieren e^- von warmer zu kalter Stelle, es fließt Thermostrom I_{therm} .

Anwendung: Thermoelement $\Rightarrow$



Kontaktstellen CD haben gleiche Temperatur und sind mit mV-Meter verbunden. Da A wärmer als B fließen e^- von A nach B $= I_{therm}$, somit kann zwischen CD U_{therm} gemessen werden.

$U_{therm} \sim \Delta T$ damit kann Temperatur gemessen werden. Vergleichstemperatur ist entweder Raum- oder Eiswassertemperatur.

Thermospannung ist abhängig von Werkstoffkombinationen, z.B.:

Fe - Konstantan $\Rightarrow 700^\circ\text{C}$

Ni - Cr $\Rightarrow 1000^\circ\text{C}$

PtPh - Pt $\Rightarrow 1300^\circ\text{C}$

2. Peltiereffekt (Umkehrung vom Seebeck)

Durch anlegen einer Gleichspannung an CD fließen e^- von A nach B, dies bedeutet Wärmeleitung und es entsteht eine Temperaturdifferenz von A und B.

Anwendung: Kühlung z.B.: Halbleiterelemente, Bauelemente auf Leiterplatte, Camping

3. Joule Effekt

ρ ändert sich abhängig von T wegen Schwingungen der Ionen im Gitter. Dieser Zusammenhang ist nahezu Proportional. (Ausnahme Supraleiter)

Anwendung: Widerstandsthermometer und Widerstandsheizung

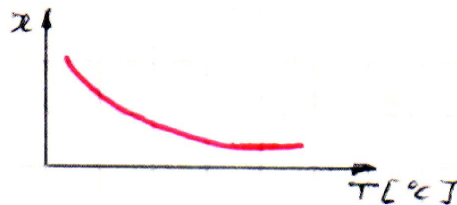
9 Leiterwerkstoffe, Nichteisenwerkstoffe

9.1 Kupfer

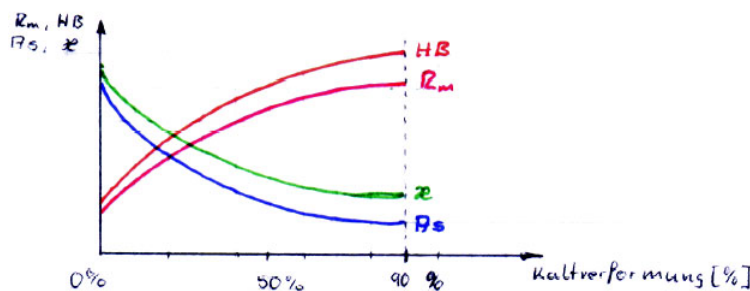
Wichtigster Konstruktionswerkstoff in E-Technik. Nach Silber höchstes κ E-CU:
hochleitfähiges Cu in der E-Technik(DIN 40500).

Richtwerte:

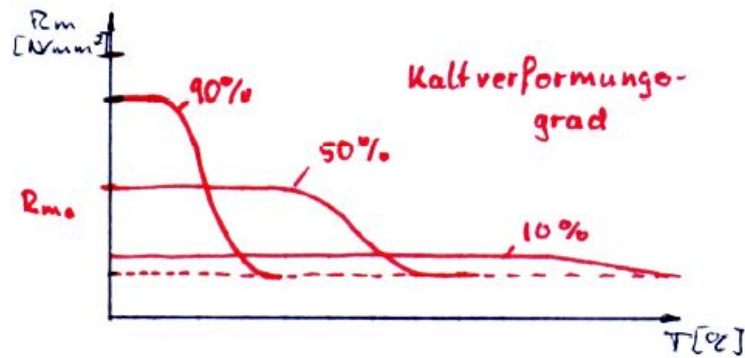
- Reinheit $> 99,9\%$ Cu
- Leitfähigkeit $\kappa \approx 58 \cdot 10^6 S/m$
Bei höheren Temperaturen nimmt κ ab (ca 0,4 % pro Grad)



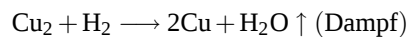
- Wärmeleitfähigkeit $\uparrow$
- Korrosionsbeständigkeit $\uparrow$, wegen Cu_2O Kupferoxidul (Überzug)
→ Freileitungen
- Festigkeit $\downarrow$; $R_M \approx 220 N/mm^2$
- Warm- bzw. Kaltverformung $\uparrow$, wegen kfz - Gitter !
Kaltverformung bis 90%(hohe Versetzungsdichte) $\rightarrow \kappa \downarrow$ (durch Rekristallisationsglühen $\rightarrow$ altes kfz-Gitter $\Rightarrow \kappa \uparrow$)
 - Auswirkungen der Kaltverformung auf R_M, HB, A_5, κ **Prüfung:**



- Auswirkungen der Rekristallisierens abhängig von Temp(T) und Kaltverformungsgrad bei größerer Kaltverformung



In E-Cu sind geringe Mengen an Cu_2O vorhanden !!! Wird Cu unter H-haltigen Schutzgas auf ca. 500°C erhitzt reagiert O mit H zu H_2O -Dampf:



H_2O tritt in Form von Dampf unter hohen Druck auf, dies führt zu Rissen, Poren und Versprödungen. In solchen Fällen muß anderer Cu-Werkstoff verwendet werden.

SE-Cu:(OHFC) Sauerstofffreies Cu in der E-Technik

- Leitfähigkeit (bei 20°C) $\kappa \approx 59 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
- Sehr gute Schweiß und Lötbarkeit

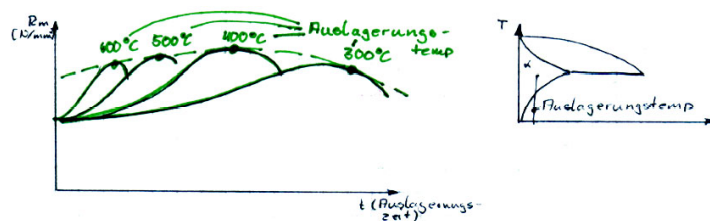
Anwendung für E und SE-Cu:

Halterungen, Stromschienen, Kontakte, Kabelschuhe, Platinen unedler Metalle, Ummantellung von Stahl-drähten, Leiterbahnen auf Platinen, usw. ...

9.2 Kupferlegierungen

1. Niedriglegierte Cu-Sorten (κ nimmt ab)

- κ -günstige Elemente: Cd, Cr, Ag, Be, Sn, ...
Abnahme je nach Prozentgehalt bis 20 %. z.B.: CuCd 1(1% Cd, 99% Cu) $\kappa = 48 \cdot 10^6 \text{ S/m}$; Hoch-leitfähiger Werkstoff für Freileitungen
- κ -schädliche Elemente: O, Sb, As, Si, Fe, ... (bis zu 50% Minderung!)
- R_m -günstige Elemente: (Ausscheidungshärten $\Rightarrow$ Wärmehärten) Zr, Cr, CrZr, Be
Festigkeitssteigerung, abhängig von Auslagerungstemperatur
z.B.: CuZr (mit 0,1% Zr $\Rightarrow$ mikrolegiert) $\kappa = 49 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ und $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$
 $\Rightarrow$ Hochwarmfester Werkstoff im Reaktorbau und Raketenbau

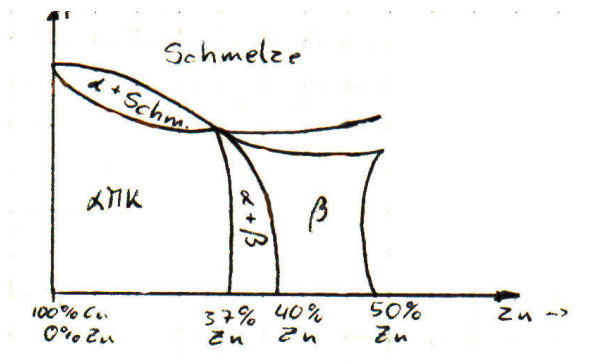


2. hochlegiertes Kupfer

Fremdatome verzerren Gitter $\rightarrow R_m \uparrow$ und $\kappa \downarrow$

- CuZn (Messing)

- Zn-Zugabe verbilligt Werkstoff; $\kappa \downarrow$; Verformbarkeit $\downarrow$; Zerspanbarkeit $\uparrow$ Gießbarkeit $\uparrow$
- Bezeichnung: CuZn37 : 37 % Zn, Rest Cu
- alte Bezeichnung : Ms63 : 63 % Cu, Rest Zn
- Zustandsschaubild:



- Bis 20% Zn:
Tombake, el. Leiter $\kappa \approx 30 \cdot 10^6 \text{ S/m}$; kfz; keine Spannungsrißkorrosion= mechanische Beanspruchung und chemischer Angriff gleichzeitig.
Anwendung: wie reines Cu, aber billiger!!!
- Bis 37% Zn:
noch α -MK; gut verformbar; schlecht zerspannbar; $\kappa \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. z.B.: CuZn35 (Ms65)
- Von 37% bis 42% Zn:
Mischungslücke; $\alpha + \beta$ -MK; krz; schlecht verformbar gut zerspannbar.
z.B.: CuZn42(Ms58)
- Bis 50% Zn:
 β -MK; krz; hart; spröde; nur noch vergießbar; z.B.: CuZn48 (Ms52)
Anwendung: Hochspannungsamaturen, Leitungsträger, Steckklemmschraubkontakte, Lampenfassungen, Hartlot.
- $> 50\% \text{ Zn}$: nicht brauchbar!!!

a) Sondermessing

Besondere Eigenschaften durch zulegieren von Fe, Mn, Pb, Sn.

Bezeichnung: **So**Ms58 : 58% Cu; 40% Zn; 1%Mn; 1% Fe (Seewasserbestimmt)

b) Gußmessing

ab 37% Zn $\left[\begin{array}{cc} \alpha + \beta & \text{Mk} \\ \beta & \text{Mk} \end{array} \right] \text{KRZ}$

Bezeichnung: G-CuZn40 meist Pb-Zusatz; wegen guter Zerspannbarkeit

– Cu-Ni-Zn-Legierung; Neusilber

Teil von Zn wird durch Ni ersetzt. 60 - 63% Cu; 17 - 19% Ni; Rest Zn; $\kappa \approx 3 \cdot 10^6 \text{ S/m}$

Bezeichnung: CuNiZn 1918 : 19%; 18% Zn; Rest Cu

Anwendung: leitende Federn, Schleifkontakte, Lampenfassungen,...

Bronzen: Cu-Werkstoffe mit $> 60\%$ Cu und kein Zn!!!

- Cu-Sn-Legierung: Zinnbronze

Älteste Legierung $\Rightarrow$ Bronzezeit; $\kappa \approx 18 \cdot 10^6 \text{ S/m}$

Bezeichnung: CuSn6 : 6% Sn; Rest Cu

$T_s=800^\circ\text{C}$, $R_m \uparrow$; HV $\uparrow$; Verformbarkeit $\downarrow$; Korrosionsbeständigkeit $\uparrow$; Giessbarkeit $\uparrow$

Anwendung: Leitende Kontaktfedern und Steckverbindungen,

- a) Sonderzinnbronzen: Zusätzliche Elemente verbessern Eigenschaften, z.B.: Al oder Mn $\rightarrow$ Seewasserbeständig; Pb $\rightarrow$ Zerspanbarkeit
- b) Gußzinnbronzen: $> 10\%$ Sn; kein α -Mk!; schlechte Verformung
Bezeichnung: G-CuSn14
- c) Mehrstoffzinnbronze: Teil von Sn mit Zn ersetzt
Bezeichnung: CuSn4 Zn4 Pb4 : Rotguß $\Rightarrow$ Gleitlagerbüchse mit Notlaufeigenschaften! (funktioniert auch ohne Schmiermittel)

- Cu-Ni Legierung; Nickelbronze

α -MK; Widerstandswerkstoff; $\kappa \approx 12 - 30 \cdot 10^6 \text{ S/m}$

Bezeichnung und **Anwendung:**

CuNi 5-10: Kondensator mit 1,5% Fe; Korrosionsbeständig mit 2% Mn

CuNi 15-25: Münzen

CuNi 30 : Nickel, Widerstände

CuNi 45 : Konstantan(Widerstand $f \neq f(T)$); mit 1% Mn $\rightarrow$ Thermoelement

- Cu-Be Legierung, Berylliumbronze:

0,4% - 2,1% Be, $\kappa \approx 12 - 34 \cdot 10^6 \text{ S/m}$

Ausscheidungshärten $\rightarrow$ federhart; $R_m = 1200 \text{ N/mm}^2$; korrosionsbeständig; Verschleißfest; unmagnetisch; gut Lötbar(leicht/hart)

Bezeichnung: CuBe2 : 2% Be, Rest Cu

Anwendung: Kontaktfedern, Kontaktbrücken bei Schiebewiderständen,...

9.3 Aluminium Al

Leichtmetall, Dichte $\rho = 2,7 \text{ kg/dm}^3$; Schmelztemperatur $T_s = 600^\circ\text{C}$

E-Al: hochleitfähiges Aluminium in der E-Technik

Richtwerte:

- Reinheit $> 99,5\%$
- Leitfähigkeit $\kappa \approx 35 - 37 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
- Wärmeleitfähigkeit $\uparrow$
- Korrosionsbeständigkeit $\uparrow$, wegen Al_2O_3 (Al-Oxid) Überzug; farblos, dünn $1\mu\text{m}$ dick; festhaftend; lösbar nur mit Säuren; Schicht kann auch elektrochemisch aufgebracht werden (Anodisation $\rightarrow$ Eloxieren); Schicht dicker ; einfarbbar
- Festigkeit: $R_m \approx 80 \text{ N/mm}^2$
- Kaltverformung $\uparrow$, kfz; $\Rightarrow$ Festigkeitsteigung ($R_m \approx 230 \text{ N/mm}^2 \parallel \kappa \downarrow$) Durch Rekristallisation $\Rightarrow$ altes Gitter $R_m \downarrow \parallel \kappa \uparrow$

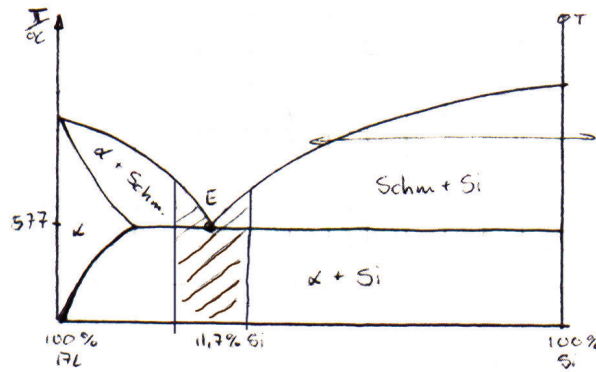
- Vier Eigenschaften für heutige Stellung von Al in Technik:
 1. Geringes Gewicht(Freileitung, Fahrzeugbau)
 2. Gute Leitfähigkeit (Hochspannungsfreileitungen)
 3. Gute Korrosionsbeständigkeit (Freileitung, Bauwesen, Folien)
 4. Gute Kaltverformbarkeit (Tiefziehen)

9.4 Aluminiumlegierungen

mittlere Leitfähigkeit $\kappa \approx 30 \cdot 10^6 \text{ S/m}$

1. Aluminium-Knetlegierung

- Nicht aushärtbare Knetlegierungen:
AlMg oder AlMn: z.B.: AlMg3.5Mn : 3,5% Mg ; < 1% Mn; Rest Al
Verwendung: Leiterdraht; gut kaltverformbar; polierbar; korrosionsfest
Anwendung: Leitungen, Schiffbau, Architektur, Nahrungsmittelindustrie
- Aushärtbare Knetlegierungen:
Kalt- und Warmaushärten!(Ausscheidungshärten)
Eigenschaften veränderbar:
 - κ noch hoch: Fremdatome in Ausscheidungspartikel gebunden.
 - R_m ebenfalls hoch(Ausscheidungspartikel verpannen Gitter).
 - α_k noch hoch: Kerbschlagzähigkeit(Ausscheidungen im Gitter eingeformt)
 - ϵ noch hoch: siehe α_k
 - AlCuMg(Duralu)
z.B.: AlCu4Mg: 4% Cu; <1% Mg; Rest Al. Mg beschleunigt Ausscheidungshärten. Cu geringere Korrosionsfestigkeit $R_m = 450 \text{ N/mm}^2$
Anwendung: Amaturen in Energietechnik, Flugzeugbau
 - AlMgSi(Aldrey-Legierung)
z.B.: AlMgSi 0,5 : 0,5 % Si ; < 1% Mg ; Rest Al
Neben Ausscheidungshärten auch Kaltverformung, Korrosionsfest, $R_m \approx 450 \text{ N/mm}^2$; $\kappa \approx 33 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
Anwendung: Mechanisch hoch belastete Leiter
 - AlZnMg:
chemische Beständigkeit, keine Spannungsrißkorrosion
schweißbar, $R_m \approx 440 \text{ N/mm}^2$
Anwendung: Fahrzeug und Flugzeugbau
 - AlZnMgCu:
geringere Korrosionsfestigkeit wegen Cu; $R_m \approx 550 \text{ N/mm}^2$
Anwendung: Flugzeugbau
- Aluminium Gußlegierung
Grundlage: Eutektische Zusammensetzung, damit T_s niedrig. Wichtigstes Legierungselement Si(gute Vergießbarkeit, gute Festbarkeit)
 - AlSi 12:
11,7 % Si , Rest Al $\Rightarrow$ Eutektoide Legierung, $T_s \approx 577^\circ \text{C}$
Zustandschaubild:



Anwendung: Halterung und Rahmen für Elektrotechnische Geräte, Hartlot zum Löten von Weichmetallen

– AlSiCu:

Je höher Cu-Anteil desto schlechter vergießbar

Anwendung: wie AlSi!

2. Aluminium-Sinterwerkstoffe

SAP = Sinter - Aluminium - Produkt

warmfeste Legierung wegen Al_2O_3 , diese Partikel werden gesintert (Verformung unter hohem Druck, hohe Temperatur) → Folge: Spröde

Anwendung: Substrate für Mikroelektronik

3. Aluminium-Automatenwerkstoffe

Wegen guter Zerspanbarkeit Legierung mit Pb → kurzer Spann

z.B.: AlCuMgPb, AlSiMgPb

9.5 Weiter Nichteisenmetalle

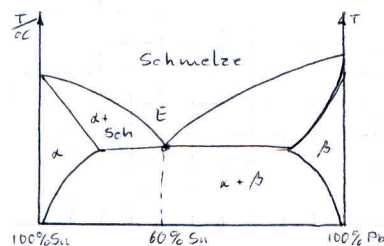
• Zink Zn:

Schwermetall, gut vergießbar(Druckguß), Korrosionsschutz für Fe, $\kappa \approx 17 \cdot 10^6 S/m$; el. Leiter in Notzeiten!!

• Zinn Sn:

Schwermetall, Korrosionsschutz für Eisen, keine Kaltverformung möglich, da Rekristallisation unter Raumtemperatur;

wichtigstes Legierungselement ist Pb:



Lotwerkstoff bei E:

L - Sn 60

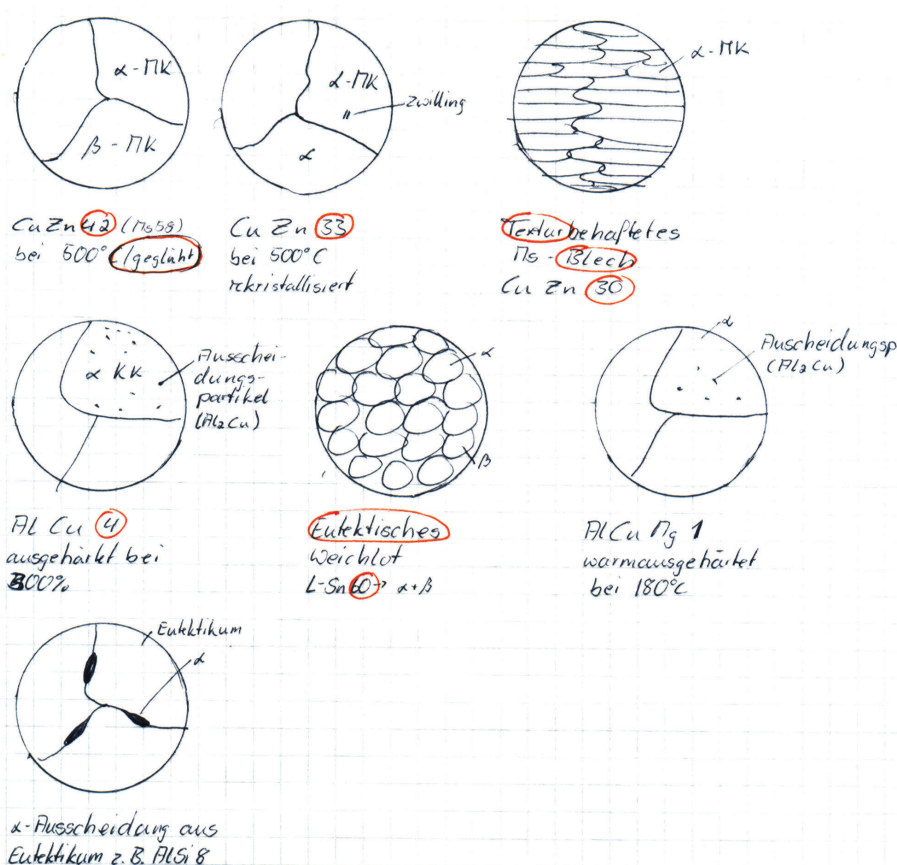
60% Sn + 40% Pb !!

Lötwerkstoff bei E: L-Sn 60 : 60% Sn, 40% Blei **Prüfung: !!!!!**

Anwendung: Verzinnen von Lotanschlüssen , Schmelzeinsätze für Sicherungen

- Titan Ti:
Leichtmetall, teuer, seewasserbeständig, wegen TiO_2 - Schicht
Wichtige Legierungen:
 - NbTi50: Supraleiter
 - TiAl5Fe2.5: Biokompatibler Werkstoff (Chirurgie, Kniegelenke, Knochenfixierungen)
 - TiAl6V4: Krz, sehr hohe Festigkeit $R_m \approx 1200 N/mm^2$ (Flugzeugbau, Hubschrauber)
- Silber Ag:
Edelmetall, höchste Leitfähigkeit $\kappa \approx 61 \cdot 10^6 S/m$, Wärmeleitfähigkeit hoch, Oxidfreie Oberfläche.
Anwendung: Lote, Kontakte (Abhebe), Schmelzsicherungen
- Gold Au:
Edelmetall, sehr gut verformbar, $\kappa \approx 44 \cdot 10^6 S/m$, Oxidfreie Oberfläche, chemisch sehr stabil
Anwendung: Kontakte, Feinstdrähte für Mikrokantaktierungen, Lotstifte
Schmuck $\rightarrow$ AuAg : Weißgold – AuCu : Rotgold
- Platin Pt:
Edelmetall, chemisch Beständigkeit, Leitfähigkeit $\kappa \approx 10 \cdot 10^6 S/m$
Anwendung: Thermoelement, Widerstandsdrähte, Heißeiter, Oberflächenveredelung, Überzüge bei Kontakten

9.6 Gefügebilder von Nichteisenmetallen



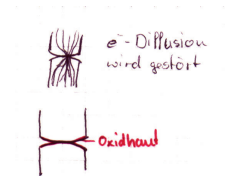
9.7 Werkstoffe für besondere Anwendungen in der E-Technik

9.7.1 Kontaktwerkstoffe

stellen beim Berühren zweier Werkstoffe einen elektr. Kontakt her.

Forderungen:

- kleiner Kontaktwiderstand
 - 1.) R_E = Engwiderstand
höher Antriebskraft
 - 2.) R_H = Hautwiderstand
Haut entfernen
- hohe Korrosionsesständigkeit
- mittlere bis hohe Leitfähigkeit



Man unterscheidet:

- Festkontakte :
 - lösbar: Schraub-Steck-Klemmkontakte
 - nicht lösbar: Schweiß-Löt-Kleb-Wickelkontakte

Werkstoffe: Cu und Cu-Legierungen (CuZn, CuNiZn)
Cu Legierungen mit Überzügen (Au, Pt)
- Schleifkontakte :

Verschleiß ! Stromabnehmer, Widerstände, Werkstoffpaarung → hart verschleißfest und weich verschleiß(Austausch)

Werkstoffe: Cu-Legierungen z.B.: CuCd1: hart!, Graphit Metallkohle (Gemisch aus Metallpulver, Cu und Graphit)weich
- Druck - Abhebe - Kontakte:

leitende Federn, beim Schalten auf Lichtbögen und Funkenziehen achten!
⇒Forderungen: keine Materialwanderung, kein Verschweißen, kein Abbrand, geringer mech. Verschleiß

Werkstoffe: CuBe (Kontaktfedern) ; Ag, Ag-Legierungen (AgNi, AgMgNi, AgCu ...) ; Au-Legierungen,(AuNi...)
- Hochleistungskontakte:

Hohe Ströme und Leistungen, Achten, dass kein Verschmelzen der Kontaktflächen auftritt!!

Sinterwerkstoffe: niedrige Abbrandneigung, Verschweißen ↓, keine Materialwanderung

 - Silbercadmiumoxid AgCdO
 - Wolframcarbid-silber WCAg
 - Wolframsilber WAg

9.7.2 Widerstände

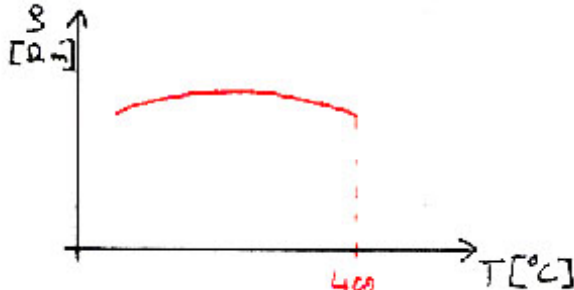
Forderungen:

$\rho \uparrow$, Temperaturkoeffizient des Widerstandes $TC_p \downarrow$, Wärmeausdehnungskoeffizient $\downarrow$, Korrosionsbeständigkeit $\uparrow$, Je nach Anwendung Gebrauchstemperatur beachten!

Man unterscheidet:

1. Lineare Widerstände (Lineares Strom-Spannungs-Verhalten)

- Präzisionswiderstände (Nachrichtentechnik, Meßtechnik $\Rightarrow$ schwach belastet)
 $TC_p \downarrow$, Drahtwiderstände auf Cu-Basis, Au-Basis



CuMn12Ni2	(Manganin)	} $T_{max} \approx 400^\circ C$
CuMn12Al14Fe1	(Novokonstant)	
AuCr2		

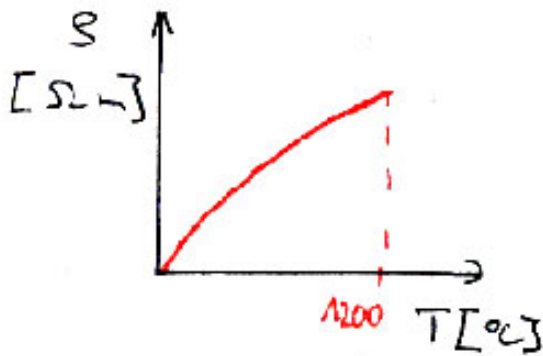
- Normal-Widerstände: $\Rightarrow$ mäßig belastet
 - Drahtwiderstände: auf Cu-Basis

CuNi45Mn1	(Konstantan)	} $T_{max} \approx 400^\circ C$
CuMn13Al3	(Isabellin)	

Anwendung: Einstellbare Widerstände in Steuer- und Regeltechnik
 - Schichtwiderstände: auf Metall oder Edelmetall-Basis

CuNi	$\Rightarrow T_{max} \approx 125^\circ C$
AuPt	$\Rightarrow T_{max} \approx 165^\circ C$
SnO ₂	$\Rightarrow T_{max} \approx 150^\circ C$

- Brenn- und Heizwiderstände: (Starkstromtechnik, hoch belastet)
 $TC_p \uparrow$; Drahtwiderstände auf Fe-Basis

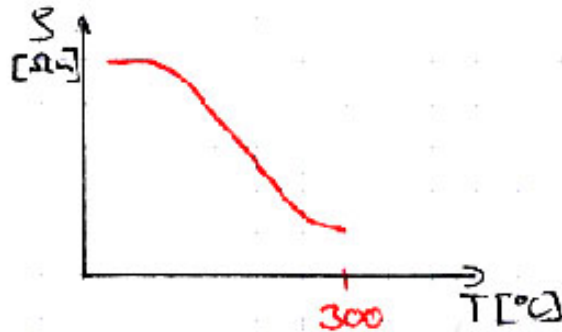


Werkstoffe:

FeCr30Al5	(hohe Zunderbeständigkeit)	} $T_{max} = 1000^\circ C$
FeNi30Cr20		
NiFe30	$\Rightarrow T_{max} = 1200^\circ C$	

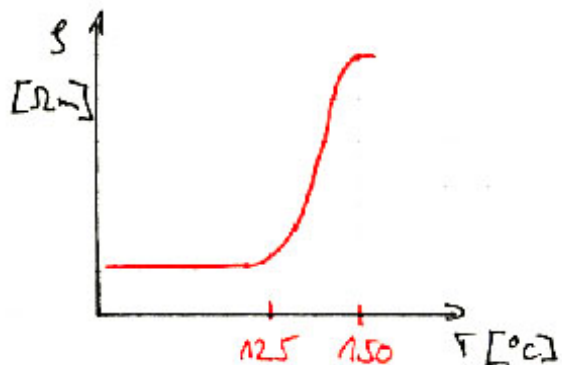
2. Nichtlineare Widerstände (Widerstand ist von Temp. abhängig)

- Heißleiter:
negativer Temperaturkoeffizient; $TC_p < 0$; Halbleiter aus ME-Oxid-Pulver (Fe_2O_3) mit Zusätzen (TiO_2)(Verbindung durch Sintern) $T_{max} = 350^\circ C$



Anwendung: Temperatur-Messung und Regelung, Einschaltstrombegrenzung

- Kaltleiter:
positiver Temperaturkoeffizient $TC_p \uparrow \uparrow$; Keraumik aus Bariumtitanat ($BaTiO_2$) mit Zusätzen (MeO) $T_{max} = 220^\circ C$

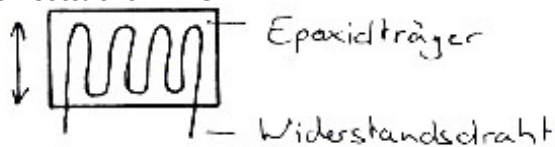


Anwendung: Temperatur-Messung und Regelung

3. Dehnungsabhängige Widerstände

Wird ein metallischer Körper verformt, ändern sich seine Abmessungen und damit sein Widerstand $\Rightarrow$ Mech. Spannungen können gemessen werden. $\sigma = E \cdot \epsilon$

Dehnbeßstreifen DMS



Kaltgezogene Drahtwiderstände auf Cu-Basis CuMn12Ni2 (Manganin)

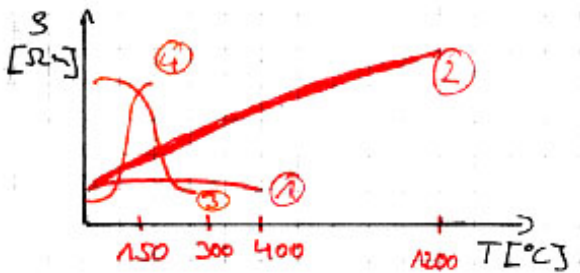
Anwendung: Experimentelle Spannungsanalyse

Übung:

Geben Sie für folgende Widerstände die Abhängigkeit von ρ und T sowie Werkstoffbezeichnungen an.

1. Präzisionswiderstände $\Rightarrow$ CuMn12Ni2
2. Heizleiter $\Rightarrow$ FeCr30Al

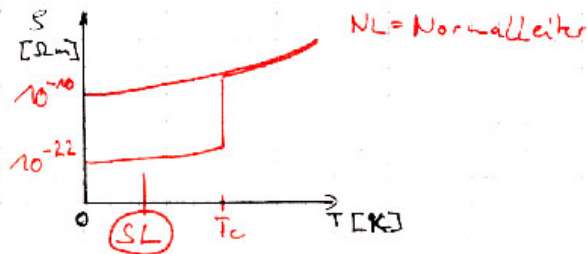
3. Heißeiter $\Rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$
 4. Kaltleiter $\Rightarrow \text{BaTiO}_3\text{MeO}$



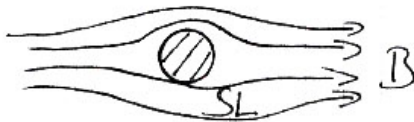
9.7.3 Supraleiter

Ein Supraleiter besitzt zwei Eigenschaften:

1. Unterhalb der Sprungtemperatur T_c findet eine praktisch Widerstandslose elektrische Leitung statt.



2. Im Supraleiterbereich wird ein Magnetfeld völlig verdrängt aufgrund von Oberflächenströmen $\Rightarrow$ idealer Diamagnet (Meißner - Ochsensfeld - Effekt)



Werkstoffe und Kategorien der SL:

Trägt man die magnetisierung M über der magnetischen Flussdichte B auf so ergeben sich unterschiedliche Effekte abhängig vom Werkstoff.

1. Supraleiter 1. Art

Elementar Supraleiter :

	Al	Th	In	Sn	Pb
$T_c[K]$	1,2	—	—	$\rightarrow$	7,3

2. Supraleiter 2. Art

Elementar Supraleiter : Zn, V, Nb: $T_c = 0,9 - 9,2K$

Verbindungs Supraleiter : NbSn_2 , BiBa, Nb_2Au : $T_c = 2,6 - 11K$

3. Supraleiter der 3. Art

Versetzungen (intermetallische Verbindungen) behindern das Eindringen des Magnetfeldes $\Rightarrow$ Pinning-Zentren Harte Supraleiter bzw. VerbindungsSL :

	NbTi50	V ₂ Ga	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Ge
$T_c [K]$	9,3	14,5	18	23

Harte SL werden technisch angewendet, Kühlmedium ist flüssiges Helium(4,2K)

4. Hochtemperatur SL (Mischoxid SL)

Bei Keramiken mit Petrowskit-Struktur (bei Bindung von seltenen Erden mit Sauerstoff entstehen Sauerstoff Leiterstellen) wurden Sprungtemp. mit über 135K gefunden. Es genügt Flüssigstickstoff zur Kühlung. Theorie noch unbekannt.

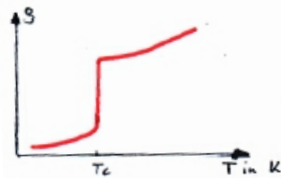
z.B.: 1-2-3 SL $YBa_2Cu_3O_7 \Rightarrow T_c \approx 135K$

Einflüsse auf SL

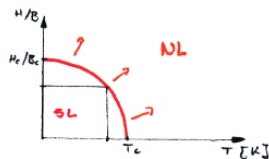
Supraleitung hängt ab von 3 kritischen Größen:

1. Sprungtemp T_c

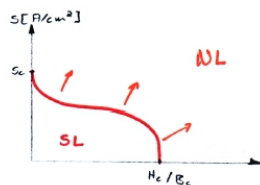
Oberhalb $T_c \Rightarrow NL \iff T < T_c \Rightarrow SL$



2. kritische magn. Flussdichte(H_c) und Feldstärke(B_c)



3. kritische Stromdichte S_c :



Anwendung: 50 % $\Rightarrow$ Medizintechnik; 40% $\Rightarrow$ Forschung; 10% $\Rightarrow$ Technik $\Rightarrow$ Schwierigkeiten: Kühltechnik

Probleme:

- Verbindungstechnik: Kein Schweißen wegen Gefügeänderungen (=kein Supraleiter). $\Rightarrow$ Weichlöten und Klemmen.
- Kältetechnik (Tiefsttemperatur 4,2K $\Rightarrow$ flüssiges Helium)
- Fertigung (spröde, harte Werkstoffe $\Rightarrow$ intermetallische Verbindungen)

10 Halbleiter

Bändermodell:

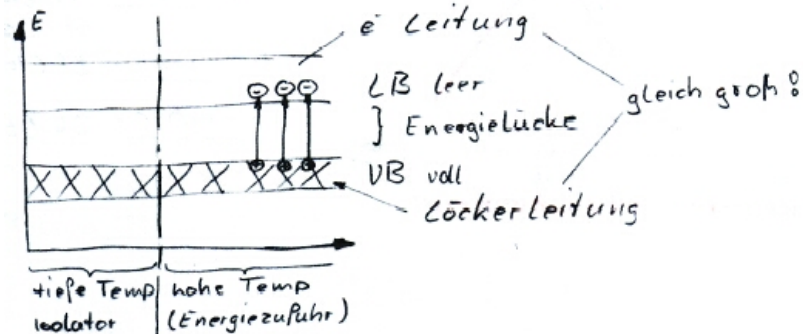
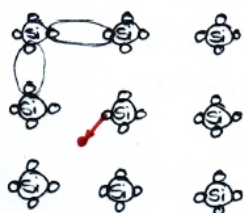


10.1 Eigenleitung (intrinsische Leitfähigkeit)

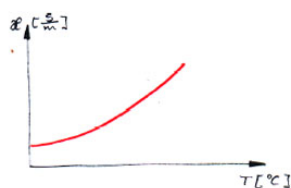
Werkstoffe: Gruppe IV $\Rightarrow$ Ge, Si

Kristallgitter:

Bändermodell:



Temperatureinfluss



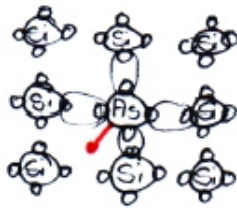
10.2 Störstellenleitung (extrinsische Leitfähigkeit)

Einbau von Störstellen $\Rightarrow$ Fremdatome $\left[\begin{array}{l} \text{Gruppe IV} \rightarrow \text{n-Leitung} \\ \text{Gruppe III} \rightarrow \text{p-Leitung} \end{array} \right.$

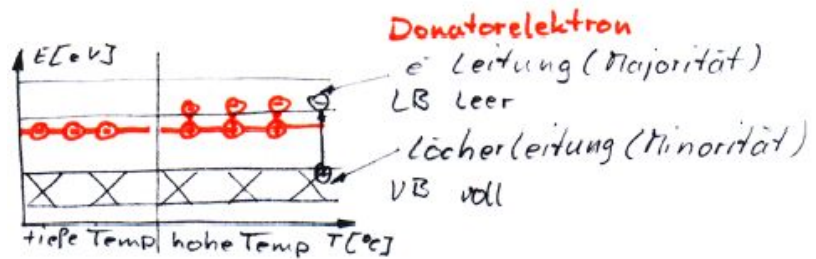
1. Negativleiter, n-Leiter

Elemente der Gruppe IV (z.B.: As) werden mit Gruppe V dotiert!

Kristallgitter:



Bändermodell:

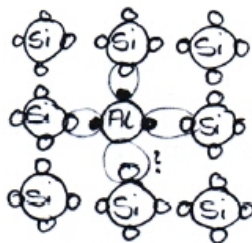


Energieniveau der Elemente der Gruppe V liegen näher am Leiterband!

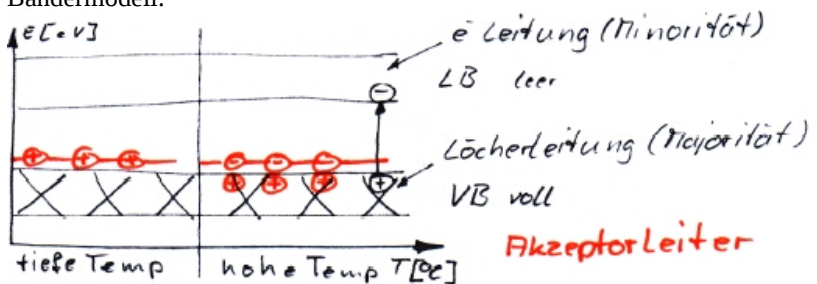
2. Positivleiter, p-Leiter

Elemente der Gruppe III dotieren mit Gruppe IV

Kristallgitter:

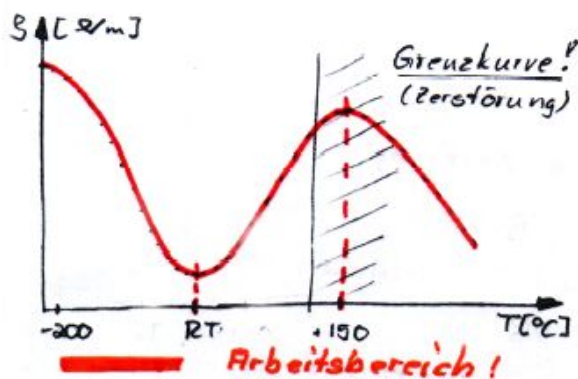


Bändermodell:



Energieniveau der Elemente der Gruppe III liegen näher am Valenzband!

Temperatureinfluss



- $< -200^{\circ}\text{C}$: Donator(Akzeptor)atome noch nicht ionisiert $\Rightarrow \rho \uparrow$ (Reservezustand)
- $-200^{\circ}\text{C} - \text{RT}$: Ionisierung $\Rightarrow \rho \downarrow$; bis Erschöpfungszustand

- RT- 150°C : Wegen Ionenschwingung Anstieg von ρ
- >150°C : wegen Eigenleitung $\rho \downarrow$

10.3 Verbindungshalbleiter

Legieren der Gruppe III und IV $\Rightarrow$ Paarbindung ähnlich Gruppe IV

Werkstoffe: GaAs; InSb $\Rightarrow$ Eigenleitung

Durch Dotieren mit $\left\{ \begin{array}{l} \text{Gruppe VI} \Rightarrow \text{n-Leiter} \\ \text{Gruppe II} \Rightarrow \text{p-leiter} \end{array} \right\}$ extrinsisch

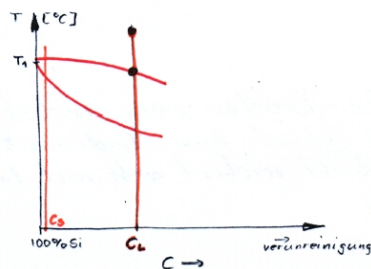
10.4 Anwendung:

PN-Übergang; Transistor; Feldeffekt-Transistoren(FET); MOS-FET; **Prüfung:** Bändermodelle !!!!

10.5 Halbleiter-Technologie

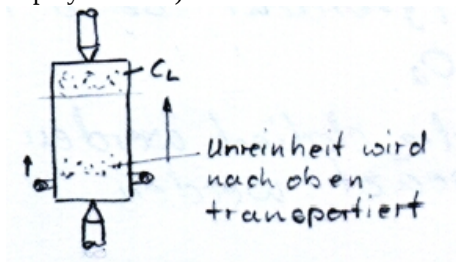
Kennzeichen: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Reinheit (1ppm)} \\ \text{Einkristall} \end{array} \right.$

1. Reinstdarstellung(Zonenschmelzverfahren)



C_L = Si-Schmelze verunreinigt (Konzentration)
 C_S = Konzentration der Si-Schmelze nach 1. Zonenzugvorgang
 $\Rightarrow$ sehr reiner MK!! (1ppm $\Rightarrow$ polykristallin)

Kühlt man Schmelze mit Verunreinigungskonzentration C_L ab, so scheiden sich bei T_1 erste feste MK mit der reineren Konzentration C_S ab. Vorgang wird mehrfach durchgeführt $\Rightarrow$ sehr reiner MK !!! (1ppm $\Rightarrow$ polykristallin)



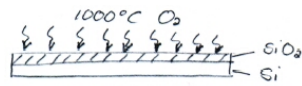
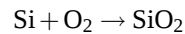
2. Einkristallzüchtung

Ziel: kein MK; keine Fehler; lückenloser Einkristall

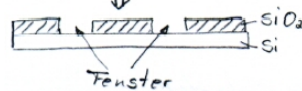
- Tiegelziehverfahren $\rightarrow$ U.

3. Dotierung

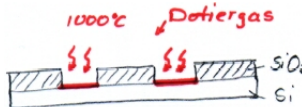
- Legierungsverfahren: Nur für Ge geeignet! Auf n-leitendes Ge wird ein Iridium (Akzeptor)- Plättchen erhitzt. Grenzschicht reichert sich mit Iridium an und wird p-leitend.
- Planartechnik: Auf Si-Scheibe wird Oxidschicht aufgebracht, bei ca 1000°C reagiert O_2 mit Si:



Bereiche die dotiert werden sollen, müssen geätzt werden:



Bei etwa 1000°C werden Fenster einem Dotiergas ausgesetzt (Diboran B_2H_6)



Übergänge nicht scharf begrenzt, hohe Temperatur (Nachteile)

- Ionenimplantationsverfahren:
 1. Schritt: wie bei Planartechnik (SiO_2)
 2. Schritt: wie bei Planartechnik (Ätzen)
 3. Schritt: bei Raumtemperatur werden Fenster mit hochbeschleunigten Dotierionen beschossen, es entstehen scharf begrenzte pn-Übergänge.



11 Isolierwerkstoffe

Anforderungen

- $\rho \uparrow \uparrow$
- große Dielektrizitätszahl
- große Durchschlagfestigkeit
- große Kriechfestigkeit
- hohe Korrosionsbeständigkeit
- kleiner Verlustfaktor

Man unterscheidet

nach Isolationsklassen und Werkstoffarten

- natürliche anorganische Stoffe
 - Glimmer: Schichtstruktur, z.B.: Mica-Folie
Anwendung: hochwertige Isolation für Heiz- und Meßgeräte
 - Asbest: Faserstruktur, unbrennbar
Anwendung: thermisch, hochbeanspruchte Isolationen
 - Quarz: SiO_2
Anwendung: Chemikalien- und hochtemperatur-beständige Isolation
 - Gase: **E** ist abhängig von Leiterabstand und Druck
 - Luft
Anwendung: Freileitungen, Sammelschienen ($E_D \approx 20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$)
 - Stickstoff
Anwendung: Pressgas für Energiekabel ($E_D \approx 20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$)
 - Schwefelhexafluorid(SF_6):
Anwendung: Leistungsschalter ($E_D \approx 100 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$)
- natürliche organische Stoffe
 - Papier: Zellulose, Holz, getränkte Papiere
 - Textilstoffe: Leinen, Seide, Baumwolle, getränkte Stoffe
 - Öle
Anwendung: Kondensator
- künstliche anorganische Stoffe
 - Glas: amorph erstarrende Schmelze

11 Isolierwerkstoffe

- Porzellan: Feldspat oder Kaolie gepresst oder gebrannt
Anwendung: Freileitungsisolation, Sicherungselemente
- Keramik: (wie Porzellan aber) exakte Mischung, wird gepresst und gebrannt
Anwendung: Spulenkörper, Durchführungen
- Ferroelektrika: (ähnlich ferromagn. Werkstoffe), z.B.: Blei-Zirkon-Titanat
Anwendung: Ultraschallsender - empfangen
- künstliche organische Stoffe
 - Silikon: Basis Si, Auslagerung v. Fremdatomen, Harze, Öle $\Rightarrow$ Temperaturabhängige Isolation
Anwendung: Kabelisolation, Motorwicklung
 - Thermoplaste, Duromere, Elastomere: Basis C, Auslagerung von Fremdatomen $\Rightarrow$ Kapitel 12

12 Organische Werkstoffe, Kunststoffe (KS)

Vorteile:

leicht, billig, gut verfügbar, gute elektrische und thermische Isolation, gute Schalldämmung, Korrosionsbeständig, färbbar, (klebbar), leicht verformbar, ...

Nachteile:

nicht zersetzbar, oft giftig, umweltfeindlich, brennbar, elektrostatisch aufladbar

12.1 Molekularer Aufbau

Kunststoffe sind organische C-Verbindungen. Sie bestehen aus Grundmolekülen (Einzelmoleküle, Monomere). Sie werden in der Primärbindung kovalent gebunden mit anderen Atomen, z.B.: H, F, N, O, ...

Grundmoleküle werden in der Sekundärbindung zusammengeschlossen zu Polymeren $\Rightarrow$ Makromoleküle $\Rightarrow$ Molekülketten. Makromoleküle werden aus Erdöl, Kohle, Erdgas hergestellt. Sie sind nicht kristallin, sie besitzen Fehlstellen.

12.2 Kopplungsprozesse, Makromolekulare Verbindungen

- Polymerisation: Vereinigung vieler gleicher Gruppenmoleküle zu einem Makromolekül unter Aufspaltung der C-Doppelbindung. Es entstehen keine Nebenprodukte.

Anwendung: Thermoplaste $\Rightarrow$ Polymerisat

z.B.: Polyethylen PE – Ethylen + Ethylen ... = Polyethylen

- Polykondensation: Zusammenschluss verschiedener Grundmoleküle unter Austritt von Wasserdampf (Autoklaven mit Druck und Temperatur)

Anwendung: Duromere, Thermoplaste $\Rightarrow$ Polykondensat

z.B.: Phenolharz PU Phenol + Formaldehyd + ... = Phenolharz

- Polyaddition: gleiche oder verschiedene Grundmoleküle werden zusammengeschlossen, ohne Nebenprodukte

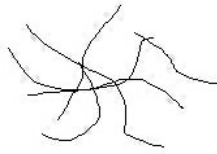
Anwendung: Duromere (Gießharze), Elastomere $\Rightarrow$ Polyaddukt

z.B.: Polyurethan – Diol + Diisocyanat + ... = Polyurethan

12.3 Einteilung der Kunststoffe

1. **Thermoplast:** Nicht vernetzter, amorpher KS mit kettenförmigen Makromolekülen. Bei Wärmeentwicklung, abgleiten der Ketten, dadurch Verformung. Schweiß-, kleb-, form-, recyclebar.

↪ Struktur:



↪ Verarbeitung: Spritzgießen, Extrudieren, Spritzpressen, Vakuumverformen, Profilmformen

↪ Ausgangsprodukt: Granulat, Folien, Profile

↪ **Werkstoffe:**

- Polyamid(**PA**): Polymerisat, fast glasklar bis milchig $T_{max} \approx 140^\circ\text{C}$
Anwendung: Verteilerkästen, Spulenkörper
- Polyethylen(**PE**): Polymerisat, Massen KS, preiswert, gut recyclebar, $T_{max} \approx 80^\circ\text{C}$, harmlose Verbrennungsprodukte
- Polyvinylchlorid(**PVC**): Polymerisat, Massenprodukt, **umweltschädliche** Verbrennungsprodukte.
 - PVC-U: hartes PVC, weichmacherfrei, hart, spröde $T_{max} \approx 100^\circ\text{C}$
Anwendung: Schaltergehäuse
 - PVC-P: weiches PVC, Weichmachermoleküle (siehe g.), flexibel, $T_{max} \approx 60^\circ\text{C}$
Anwendung: Kabelummantelung
- Polystyrol(**PS**): Polymerisat, steif, hart, kerbempfindlich, gut recyclebar, $T_{max} \approx 70^\circ\text{C}$
Anwendung: Relaissteile, Spulenkörper. Mit Treibmittelzusatz (siehe 5.) aufgeschäumter KS
⇒ formtreue Verpackungen, Dämmmaterial.
- Polypropylen(**PP**): Polymerisat, gut recyclebar, $T_{max} \approx 140^\circ\text{C}$
Anwendung: Trafogehäuse
- Polytetrafluorethylen(**PTFE**): (Teflon), Polymerisat, $T_{max} \approx 300^\circ\text{C}$
Anwendung: Kabelisolierung ($T \uparrow$)
- Polymethylmethacrylat(**PMMA**): (Plexiglas), Polymerisat, optische Eigenschaften gute Festigkeit, $T_{max} \approx 100^\circ\text{C}$
Anwendung: Schalterteile, Bedienknöpfe
- Polyoxymethylen(**POM**): Polymerisat, gute Federungseigenschaften, harmlose Verbrennungsprodukte, $T_{max} \approx 130^\circ\text{C}$
Anwendung: Schnappverschlüsse
- Acryl-Nitril-Budabien-Styrol(**ABS**): Polymerisat, Mischprodukt, schlag-stoßfest bei $T \downarrow$ (bis -40°C), $T_{max} \approx 100^\circ\text{C}$
Anwendung: Gehäuse (Handy, Taschenrechner, ...)

2. Duomere: völlig vernetzter KS, hart, spröde, weder schweiß- noch klebbar, nicht recyclebar !

↪ Struktur:



↪ Verarbeitung: Preßformen

↪ Ausgangsprodukt:

Formmassen: rieselfähiges Material wird mit $p \uparrow$, $T \uparrow$ vernetzt

Pregreps: Faser (siehe 6) imprägniert mit Harz, Aushärten unter Temperatur

Gießharz: ohne Fasern, knet- bzw gießbares Rohmaterial wird durch Zugabe von Härtern (siehe h) vernetzt

↪ **Werkstoffe:**

- Polyesterharz(KP): Polykondensat, $T_{max} \approx 200^\circ\text{C}$
Anwendung: Spulengehäuse, Kontaktleisten
- Epoxidharz(EP): Polyaddukt, hohe Festigkeit, $T_{max} \approx 180^\circ\text{C}$
Anwendung: Hochspannungsdurchführung
- Phenolharz(PF): Polykondensat, $T_{max} \approx 160^\circ\text{C}$
Anwendung: Trägermaterial für gedruckte Schaltungen

3. Elastomere: weitmaschiger, geringvernetzter KS, Gummielastisch

↪ Struktur:



↪ Verarbeitung: Spritzgießen, Extrudieren, Rotationsumformen

↪ Ausgangsprodukt: Granulat

↪ **Werkstoffe:**

- Polymethan(PUR): Polyaddukt, $T_{max} \approx 110^\circ\text{C}$
Anwendung: Schwingungsdämpfende bzw. rotationsmindernde Elemente

4. Polare und unpolare KS

Bei polaren KS sind die Ladungsschwerpunkte verschoben, zwei Elemente bilden permanenten Dipol.

⇒ gut klebbar, z.B.: PVC(CL gegenüber H elektronegativer)

Makromoleküle von unpolaren KS (PTFE, PE) sind Ladungsneutral

⇒ kein Dipol ⇒ schwer klebbar

5. Schaumstoffe

Sie entstehen durch Zugabe von Treibmitteln (Frigan, Flour), sie besitzen gute Wärme-Schall-Isolation und geringes Gewicht.

6. Faserverstärkte KS

Durch Einbringen eines Verstärkungsmaterials, werden mechanische Eigenschaften verändert. Geeignet für Duomere und Thermoplaste.

↪ Fasern: Kurzfasern, Watten, Gewebe

- Glas: sehr häufig eingesetzt, gute Zugfestigkeit
- Kohle(CF): geringe Wärmedehnung, sehr hohe Zug-Druckfestigkeit
- Bor: hohe Steigigkeit, höchste Zug- und Druckfestigkeit, allerdings großer Faserdurchmesser
⇒ kein Gewebe

7. Weichmacher

Erzeugen weitmaschiges Netz ⇒ weicher KS, niedermolekulare Substanzen (Ester)

8. Härter

Sie führen zu Vernetzungen von Molekülen. Chemisch gesehen sind sie Katalysatoren

12.4 Kunststoffprüfung

1. Bestimmung von Kunststoff

Brennprobe: Untersuchung der Flamme

⇒ Farbe, Geruch, Entflammbarkeit, Rauchentwicklung, Schmelzverhalten

Duromere: glimmen dunkelrot, ohne Zersetzung

Thermoplaste: erweichen und schmelzen

2. Mechanische Prüfung

⇒ siehe 7.2 Zugversuch, Zeitstandversuch

3. elektrische Prüfung

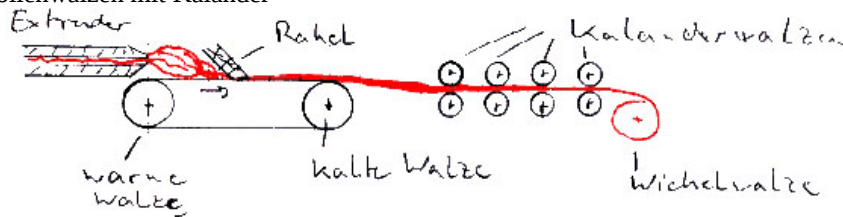
Durchschlagsfestigkeit, Dielektrizitätszahl, Durchgangswiderstand

12.5 Technologie

Eine Skizze für Prüfung: !!!

1. Thermoplaste (Verarbeitung meist ohne Füllstoffe)

- Spritzgießen, Extrudieren (siehe Skript)
Urformen in einem Arbeitsgang auch kontinuierlich möglich. Ausgangswerkstoff: kaltes Granulat
- Spritzpressen mit Kolbendruckpresse
Urformen in einen Arbeitsgang. Pro Hub begrenzte Menge einer Formmasse (z.B.: vom Extruder)
- Folienwalzen mit Kalandern



- Warmformgebung im Vakuumverfahren (siehe Skript)

2. Duromere (Überwiegend mit Füllstoffen)

- Preßformen (siehe Skript)

Formteile aus faserverstärkten Gießharzen oder Formmassen. Diese werden in beheizten Werkzeugen

hergestellt. $\left(\begin{array}{ll} \text{Preßtemp:} & 150-170^{\circ}\text{C} \\ \text{Preßdruck:} & 2000-4000 \text{ bar} \\ \text{Preßzeit:} & \text{pro mm Wandstärke ca. 30s} \end{array} \right)$

!! lange Verarbeitungszeit, teuer !!

13 Magnetwerkstoffe

Durch Bahn- und Spinnmoment der e^- im Atom reagiert jede Materie auf ein äußeres Magnetfeld (MF). Je nach Art der Reaktion unterscheidet man drei Mechanismen.

1. Diamagnetismus

Äußeres Magnetfeld induziert ein inneres MF das dem äußeren entgegenwirkt. Das resultierende Magnetfeld ist äußerst schwach. $\mu_r \ll 1 (10^{-5})$

Werkstoffe: Cu, Bi, Pb

2. Paramagnetismus

Äußeres MF induziert inneres MF, das etwas stärker als das äußere MF ist. $\mu_r > 1 (1,05)$

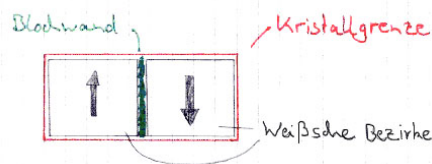
Werkstoffe: Al, Pr, Ta, ...

3. Ferromagnetismus

Ferromagnetismus ist eine Kristalleigenschaft. Er hängt ab von Curie-Temperatur T_c ($T_{cFe} = 769^\circ\text{C}$) und von der Größe des äußeren Feldes (Feldstärke H).

In Metallen sind elementare magn. Momente der Atome in Bezirken mit gleicher Ausrichtung zusammengeschlossen $\Rightarrow$ Weiß'sche Bezirke

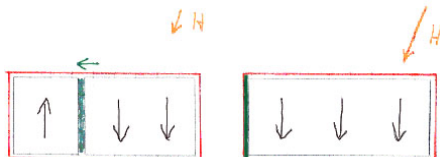
Untereinander (Σ aller Weiß'scher Bezirke im Kristall) kompensieren sich magn. Momente $\Rightarrow$ magn. neutr. Grenzbereiche zwischen Weiß'schen Bezirken heißen Blockwände:



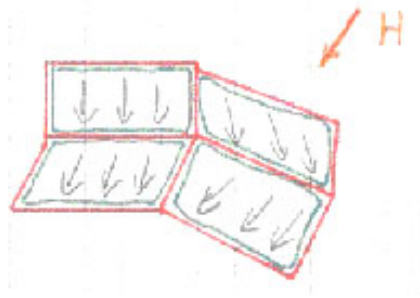
Erst ein äußeres MF (Feldstärke H) dringt in Weiß'sche Bezirke ein und verändert deren magn. Moment $\Rightarrow \mu \gg 1 (10^6)$

2 Polarisationsvorgänge spielen sich ab

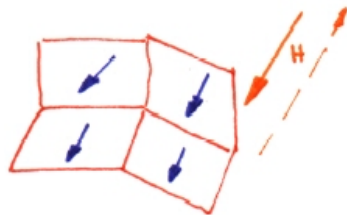
- Verschiebung der Blockwände
ein äußeres Magnetfeld richtet magn. Momente in Weiß'schen Bezirken in seine eigene Orientierung aus, dabei verschieben sich Blockwände:



Wird äußeres MF verstärkt, wandern Blockwände bis an Kristallgrenzen! Jeder Kristall ist ein Weis'scher Bezirk, dessen Moment nahezu in Richtung des äußeren Feldes wirkt. Für mehrere Kristalle gilt:



- Verdrehvorgänge



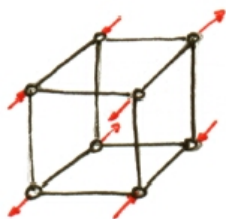
Wird äußeres Magnetfeld weiter verstärkt, so werden alle Elementarmagnete der Kristalle in Richtung des äußeren Magnetfeldes ausgerichtet. H steigt bis "magnetische Sättigung" erreicht ist B_S (magnetische Induktion, Flussdichte)

Folge: Magnetostriktion

Polarisationsvorgänge führen zu einer Änderung des Kristallvolumens (durch mechanische Kräfte, die bei Blochwandverschiebung und Verdrehung durch äußeres Feld entstehen)
 $\Rightarrow$ magnetostriktive Volumenänderung

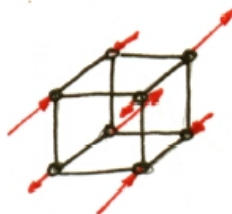
Im Wechselfeld entstehen ständig sich ändernde Volumina. Dies bringt Umgebungsluft zum Schwingen $\Rightarrow$ Brummgeräusch im Trafo

4. Anti-Ferro-Magnetismus



Elementarmagnete ordnen sich paarweise antiparallel. Sie kompensieren sich völlig. Werkstoffe sind unmagnetisch (MnO , NiO ...). $\mu_r \approx 1$

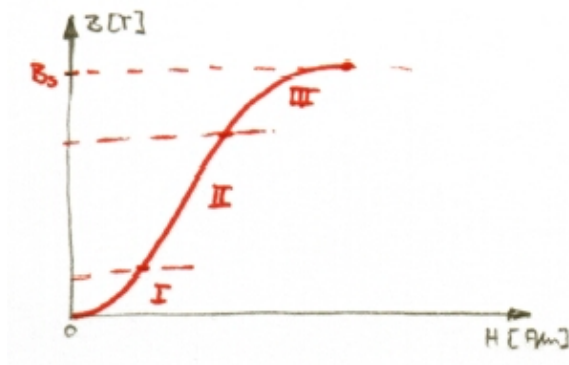
5. Ferri-Magnetismus



Elementarmagnete ordnen sich paarweise antiparallel, sie kompensieren sich jedoch **nicht**. Werkstoffe sind stark magnetisch und heißen Ferrite (MeFe_2O_4) (Me, Ni, Mn, Cr). $\mu_r \gg 1$
 (Ferrite sind Sinterwerkstoffe, sehr spröde)

13.1 Magnetisierungskurve und Hystereseschleifen

- Anfangsmagnetisierungskurve (Neukurve)

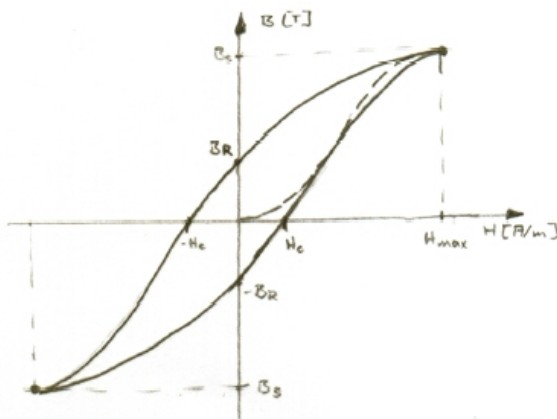


Ein unmagnetischer Werkstoff durchläuft 3 Bereiche:

- Bereich I:** Blockwandverschiebung (noch reversible)
- Bereich II:** Blockwandverschiebung und Drehvorgänge (irreversibel)
- Bereich III:** Drehvorgänge (irreversibel)

- Entmagnetisierungskurve, Hystereseschleife

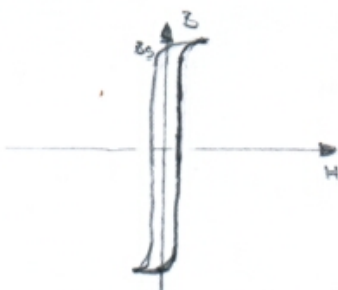
Beim Abschalten des magn. Feldes ($H=0$) ist der Werkstoff nicht völlig unmagnetisch, sondern besitzt magn. Restflussdichte. Diese heisst B_r =Remanenzflussdichte. Mit einer Gegenfeldstärke ($-H$) gelingt es den Werkstoff unmagnetisch zu machen ($B=0$). Diese Gegenfeldstärke heisst H_c =Koezitivfeldstärke. Damit entsteht eine Hystereseschleife, die im Wechselfeld permanent durchlaufen wird.



H_c ist ein Maß für die Entmagnetisierung. Damit können 2 Werkstofftypen unterschieden werden:

- $H_c \downarrow$ = gute Entmagnetisierung $\Rightarrow$ schmale Hysterese $\Rightarrow$ Weichmagnete
- $H_c \uparrow$ = schlechte Entmagnetisierung $\Rightarrow$ breite Hysterese $\Rightarrow$ Hartmagnete

13.2 Weichmagnetische Werkstoffe



Anisotrope Werkstoffe, Texturbildung, keine Gitterstörungen (Inhomogenität) nur Blockwandverschiebungen, geringe Drehvorgänge

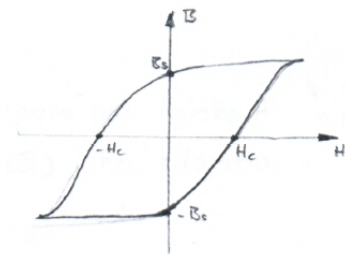
Anforderungen:

- leicht ummagnetisierbar
- geringe Verluste (H_c 1 - 40 A/m)
- hohes, konstantes $\mu_r = 10^6$
- hohe $B_s \approx 2,1T$

Werkstoffe:

- Reines Eisen(C-frei) $\rightarrow \alpha - Fe$: nicht kaltverformt, $H_c < 10$
Anwendung: Relaissteile, Polschuhe, Ankerkörper
- Eisen-Silizium-Legierungen:(z.B.: FeSi2) Textur, Kaltgewalzt
Anwendung: Trafoblech
- Eisen-Nickel-Legierungen: (bis 80% Ni) z.B.:
 $FeNi_{25} \Rightarrow$ HF-Technik;
 $FeNi_{75} \Rightarrow$ (Mu-Metall) Abschirmen kleiner Felder **Prüfung:**
 $FeNi_{79} \Rightarrow$ (Supermalloy) Dünnschichtspeicher
- Weichmagnetische Ferrite: (Keramiken) $\Rightarrow$ Isolatoren
z.B.:
Mn-Zn-Ferrite $\Rightarrow$ Antennen, Magnetköpfe
Ni-Zn-Ferrite $\Rightarrow$ Spulen f. Schwingkreis
Granate: Mg-Mn-Ferrite; Y-Fe; Y-Al-Ferrite
 $\Rightarrow$ Mikrowelle

13.3 Hartmagnetische Werkstoffe

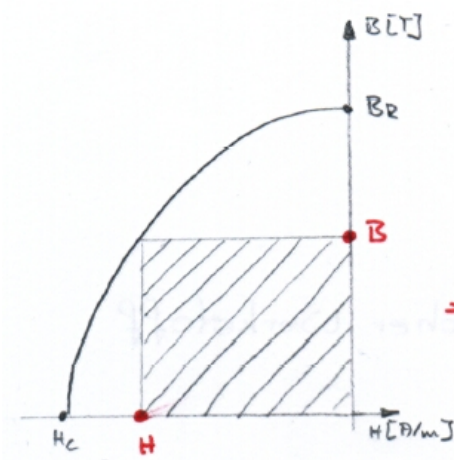


Anisotrope Werkstoffe durch Kristall... im Magnetfeld, oder durch Kaltverformung (geringe Textur) $\Rightarrow$ mechanische und magnetische Härte $\Rightarrow$ Dauermagnete

Anforderungen

- schwer ummagnetisierbar
- hohe Verluste
- kleine $\mu_r \approx 1 - 5$
- breite Hysterese $\Rightarrow$ hohe Energieprodukt $B * H$

Energieprodukt(II-Quadrant)



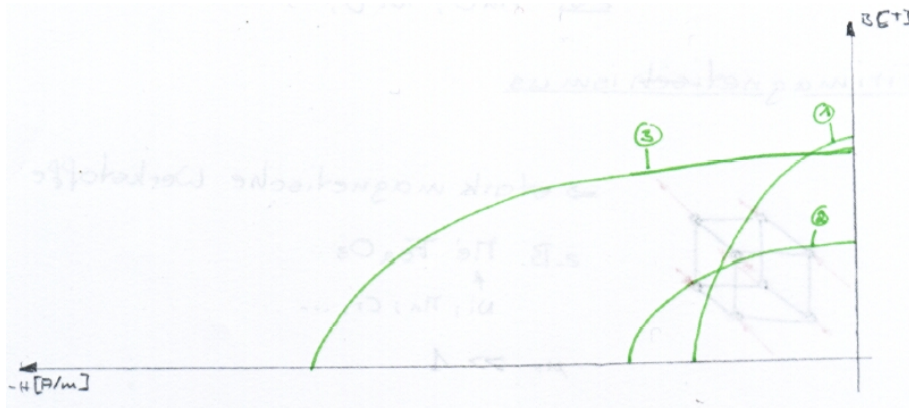
$B * H$ ist gespeicherte Energie im Hartmagneten (=Verlustenergie beim Ummagnetisieren)

Werkstoffe:

- Martensitischer Stahl: Anisotrope Umwandlungshärten, magn. Verbesserungen durch Legieren Co, W, Cr, Al. $H_c \approx 4 \text{ kA/m}$; $B_r = 1 \text{ T}$ (nicht mehr gebräuchlich)
- Fe-Al-Ni-Co-Legierung: Anisotropie durch Ausscheidungshärten, jedes Korn $\Rightarrow$ Weiß'scher Bezirk. Sinter-Pulver-Magnete AlNiCo 5 (Gütezziffer) $H_c = 50 \text{ kA/m}$; $B_r = 1,3 \text{ T} \Rightarrow$ Lautsprecher und Mikrofone
- Hartmagnetische Ferrite: $\text{MeO} + 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Me z.B.: Ba $\Rightarrow$ Ba-Ferrit. Sr $\Rightarrow$ Strontium - Ferrit) $H_c = 200 \text{ kA/m}$; $B_r = 0,5 \text{ T}$ Sinter-Pulver-Magnete
Anwendung: Motoren und Generatoren, Haftmagnete
- Seltenen-Erde-Magnete: Se Co 5 z.B.: SmCo 5, CsCo 5
- NdFeB (Nedymmagn.)
 $H_c = 800 \text{ kA/m}$; $B_r = 1 \text{ T}$
Anwendung: Hörhilfen, Teilchenablenksysteme

Prüfungsaufgabe: Skizzieren sie qualitativ die Energiefläche verschiedener Hartmagnete

1. AlNiCo5
2. Ba-Ferrit
3. SmCo5



Werkstofftechnik Prüfung SS 2001

1. Beschreiben Sie die Entstehung von Martensit anhand des Fe-Zustandsdiagrammes und Begründen sie dies. Geben Sie Technische Anwendung an
 - Zeichnung
 - Begründung: Im Fe muss C(0,2-1,5%) enthalten sein, dann rasche Abkühlung aus den Gamma-Gebiet(kfz) ins Alpha-Gebiet(krz, tetragonal)
 - techn. Anwendung: Werkzeugstahl, gehärteter Bohrer, ...
2. a) Welche Gitterebene ist für die plastische Verformung zuständig und Warum
 - (111) – Ebene kfz, wegen vieler Gleitebenen(45°), Hauptschubspannungsrichtungb) Warum wird [100] – bei magn. Werkstoffen eingesetzt ?
 - Anisotropie, Texturc) Zeichnen Sie eine der Ebenen aus a) oder b)
3. Zeichnen sie das CuZn – Diagramm und tragen Sie eine Legierung für Blechverformung (Leg. 1) und eine Legierung für Drehteil mit Gewinde (Leg. 2) ein. Begründen Sie dies!
 - Leg 1: z.B.: CuZn37 wegen α , kfz, gut verformbar
 - Leg 2: z.B.: CuZn42 wegen alpha und beta, beta = krz, gut spannbar, schlecht verformbar
4. Zeichnen Sie schematisch folgende Gefügebilder
 - unlegierter Baustahl 0,25% C
 - CuZn42, geglüht 500°C
 - AlCu4 ausgehärtet
5. Zeichnen Sie den Aufbau eines Lichtmikroskopes, erklären Sie dessen Funktionsweise und nennen Sie Einsatzgebiete:
6. Zeichnen Sie das Spannungs – Dehnungsdiagramm für:
 - reines Aluminium
 - AlCuMg (Duralu)
7. Nennen Sie 3 Verfahren der ZfP und nennen Sie die Fehler die damit gefunden werden können.
 - Röntgenverfahren – Volumen – Fehler
 - Ultraschall – Flächenfehler
 - Farbeindringverfahren – Oberflächenfehler
 - Magnetspulververfahren – Oberflächennahe Fehler
8. Zeichnen Sie qualitativ den spezifischen Widerstand ρ in Abhängigkeit von T. Für:
 - Neusilber
 - kaltverformtes Cu
 - weichgeglühtes Cu
9. Skizzieren Sie die Bändermodelle von Donator und Akzeptor – Halbleiter und nennen Sie ein Beispiel für die Technologische Herstellung:
 - technologische Herstellung: Ionenimplantationsverfahren
10. Nennen Sie geeignete Werkstoffe für:
 - Hochleitfähige Hochspannungsleitung: CuCd1
 - Widerstandswerkstoff Meßgerät: CuNi45, CuMn12Ni2, ...
 - Supraleiter für Magnetspule: NbTi50, Nb3Sn, aber nicht 1-2-3-SL !!!!

11. Beschreiben und skizzieren Sie den Meissner – Ochsenfeld – Effekt :
- Beschreibung: Bei tiefen Temperaturen in flüssigen N_2 ist 1-2-3-SL supraleitend, im inneren des SL kann kein Magnetfeld eindringen, somit schwebt SL auf Magnetfeld
12. Ordnen Sie die folgenden Werkstoffe den Bauteilen zu und geben Sie ihre Analyse in % an.
FeSi4, NiFe30Al, CuNi45Mn, CuBe2, X5CrNi 18 8, 25CrMo4
- Trafoblech: FeSi4 – 4% Si , Rest Fe
 - Heizwiderstand: NiFe30Al – 30% Fe, <1% Al, Rest Ni
 - Präzessionswiderstand: CuNi45Mn – 45%Ni, <1%Mn, Rest Cu
 - Kontaktfeder: CuBe2 – 2% Be, Rest Cu
 - Waschmaschine: X5CrNi18 8 – 0,05%C, 18% Cr, 8% Ni, Rest Fe
 - Vergütete Welle: 25CrMo4 – 0,25% C, 1% Cr, <1% Mo, Rest Fe
13. Nennen Sie vier besondere Eigenschaften für heutigen Stand in der Technik von Cu:
- Leitfähigkeit
 - gut verformbar
 - gut legierbar
 - Farbe, nicht magnetisch, ...?
14. Eigenschaften und Einsatzgebiete von CuBe2
- Eigenschaften: Federeigenschaften, hart, fest , aushärtbar
 - Einsatzgebiete: Federkontakte, Relais
15. Skizzieren Sie das Kolbendruckgußverfahren und nennen Sie seine Anwendung
16. Einsatzgebiete Kunststoff und Begründung:
- Temperaturbeständiger KS: PTFE(Teflon) wegen temp.beständigkeit der Halogene
 - elektr. Isolierende KS: PVC, PS wegen Dipoleigenschaften
17. Wie werden Anisotrope Bauteile hergestellt, nennen Sie eine Anwendung:
- Kaltverformen oder Abkühlen im Magnetfeld
 - Anwendung: Walz – Blech, Magnet FeSi2
18. Zeichnen sie das Energieprodukt für:
- anistropen
 - isotroper Hartmagnet
 - Nennen sie Anwendungsbeispiele: AlNiCo 5
19. Zeichnen Sie die Hystereseschleifen für einen Hart- und einen Weichmagnet und nennen Sie die charakteristischen Größen:
- weichmagnet: μ_r , B_s
 - Hartmagnet: H_C , $(B^*H)_{\max}$