



Werkstoffprüfung und -kunde

Unterrichtsplanung für TGT

Inhaltsverzeichnis

Lehrplan TGT	3	Messgröße.....	11	Eigenschaften der Gittertypen.....	23
Bezeichnungen metallischer Werkstoffe	4	Typische Härtewerte.....	11	Ferrit (α -Eisen, krz).....	23
.. nach Zusammensetzung	4	Ermittlung des Härtewertes	11	Austenit (γ -Eisen, kfz)	23
unlegierte Stähle	4	Kennzeichnung	11	Fe-Fe₃C-Diagramm	24
(niedrig-)legierte Stähle	4	Zusammenhänge	11	Gefügearten	24
(hoch-)legierte Stähle	4	Anwendung	11	(Der) Zementit (6,67% C)	24
Schnellarbeitsstähle	4	Prüfbedingungen	11	(Der) Grafit	24
NE-Metalle	4	Sonstiges	11	übereutektische Legierungen	24
.. nach Verwendungszweck	5	andere Verfahren	11	(Der) Ledeburit	24
Stähle	5	sonstige Werkstoffprüfungen	13	untereutektische Legierungen	24
Gusseisen	5	Martenshärte HM	13	übereutektische Legierungen	24
Sonstige Bezeichnungen	5	Kerbschlagbiegeversuch	13	(Der) Perlit	24
Stahlgruppen nach Einsatzzweck	5	LPE07 Werkstoffkunde	14	(Der) Ferrit	24
Einteilung nach Gebrauchseigenschaften	5	Abkühlungskurven	14	(Der) Austenit	24
Werkstoff-Nr / Stahlschlüssel	5	andere untersuchbare Eigenschaften	14	Curie-Linie	24
Stahl für Bleche	5	Zustandsschaubilder (erstellen)	15	Magnetismus nach dem Ising-Modell	24
Sintermetalle	5	Zweck	15	nicht unterrichten	25
Stahlschlüssel	5	Ermittlung der Phasen	15	Wärmebehandlung von Stahl	25
Einteilung nach Reinheit	5	Vorgänge im Gefüge beim Abkühlen	16	Abschreckhärten, martensitisches Härten	25
Aufbau metallischer Werkstoffe	6	Kristallgemisch	16	Zweck	25
Bindungsmechanismus bei Metallen	6	Legierungssystem Pb-Sn	16	Vorgang	25
typische Merkmale der Metalle	6	Mischkristall	16	Erwärmen auf Härtetemperatur	25
Verformung von Metallen unter Spannung	6	Legierungssystem Cu-Ni	16	Abschrecken / Martensitbildung	25
elastische Verformung	6	Zustandsschaubilder (Beispiele)	17	Anlassen bei 100 .. 300°C	25
plastische Verformung	6	Kristallgemische (eutektische Systeme)	17	ZTU-Schaubilder	25
Kaltverfestigung	6	Pb – Sn (idealisiert)	17	Härterisse	25
Legierung	6	Pb – Sn (real: mit Randlöslichkeit)	17	Abschreckgeschwindigkeit	25
mikroskopische Struktur	6	Tonerde Al ₂ O ₃ – Kryolith Na ₃ AlF ₆	17	Werkstoffe	25
Wachstum aus der Schmelzen	6	H ₂ O – NaCl	17	Vergüten	25
Gefüge	6	H ₂ O – Ethylenglykol	17	Werkstoffe	25
Gitterfehler	6	Al – Si	17	Oberflächenhärten	26
LPE 03 Werkstoffprüfung	7	Pb – Sb	17	Abschreckhärten	26
Zugversuch	7	Pb – Bi (fehlt)	18	Nitrierhärten	26
Zweck	7	Cd – Bi (fehlt)	18	Verfahren	26
Durchführung	7	Pb – Ag (fehlt)	18	Einsatzhärten	26
Zugprobe	7	Ag – Cu (fehlt)	18	Randschichthärten	26
Ablauf	7	Al – Zn (fehlt)	18	Werkstoffe / Vorgang	26
Standardisierung	7	Mischkristalle	18	Merkmale	26
Zugkraft F $\leftrightarrow$ Zugspannung σ_z	7	Pd – Ag	18	Nitrocarburieren	26
Längenänderung $\Delta L \leftrightarrow$ Dehnung ϵ	7	Au – Cu	18	Sonstige Wärmebehandlungen	26
Spannungs-Dehnungs-Diagramm	7	Ti – Mo	18	Spannungsarmglühen	26
mit ausgeprägter Streckgrenze	7	Au – Ag (fehlt)	18	Rekristallisationsglühen	26
ohne ausgeprägte Streckgrenze	7	Peritektische Systeme	18	Weichglühen	26
Vorgänge im Werkstoff	8	Hg – Cd	18	Pendelglühen	26
elastische Verformung	8	Mehrstofflegierungen	19	Normalglühen	26
Einschwingverhalten	8	ternäres Phasendiagramm	19	Diffusionsglühen	26
plastische Verformung	8	Gibbs'sches Dreieck	19	NE-Metalle	26
Kaltverfestigung	8	Eigenschaften von Legierungen	20	Einteilung	26
Einschnürung	8	Kristallgemische	20	Bezeichnung	26
Kennwerte aus dem Zugversuch	8	Mischkristalle	20	Eigenschaften	26
Streckgrenze R _e – Dehngrenze R _{p0,2}	8	Eigenschaften	20	Ag	26
(Der) Elastizitätsmodul E	8	Festigkeit	20	AgCd	26
Zugfestigkeit R _m	8	Gusslegierung	20	Al	26
Bruchdehnung A (=A ₅) oder A ₁₀	8	Knetlegierung	20	Au	27
Brucheinschnürung Z	8	Einfluss von Verunreinigungen	20	Bi	27
Streckgrenzenverhältnis V _S	8	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	21	C	27
Bruchdehnung A ₅ $\leftrightarrow$ A ₁₀	9	Eisen-Kohlenstoffdiagramm	21	Cd	27
Zusammenhang zwischen A ₅ , A ₁₀ und A _g	9	Legierungssystem Fe-C	21	E-Cu	27
Zugversuch im Mindmap	10	Abkühlung Reineisen	21	Hg	27
Eindringhärteprüfung	11	Abkühlung von C50	21	Mg	27
Eindringkörper	11	Abkühlung von C150	21	Ni	27
Form	11	Abkühlung von Gusseisen mit 3% C	22	Pb	27
Werkstoff	11	Abkühlung von Gusseisen mit 5% C	22	Sn	27
Ausführung	11	Gesetz der abgewandten Hebelarme	22	W	27
Prüfkraft	11	Analogie zu einer Waage	22	Zn	27
Messgröße	11	Zusammensetzung grafisch	22	Notizen	27
Anwendung	11	Gittertypen	23	Kupellation	27
Brinell (HB, HBW)	11	Gittertypen (Elementarzelle)	23	Quartation (Scheiden durch die Quart)	27
Vickers (HV)	11	Gitterkonstanten (Fe)	23	Diffusion	27
Rockwell (HRB, HRC u.a.)	11			Wärmeleitfähigkeit	27
Prüfkörper	11			Erfahrungen	29



Lehrplan TGT

Richtziele des Unterrichts in Jahrgangsstufe TGT-E und TGT-J1

Werkstoffe werden nach ihren Eigenschaften unterschieden und unter Verwendungs- und Umweltaspekten bewertet. Die Schülerinnen und Schüler erfahren, wie Werkstoffeigenschaften geprüft und durch Kennwerte und Diagramme dargestellt werden können. Diese Kenntnisse sind Voraussetzung, das in Projektunterricht entwickelte technische Objekt analysieren, beurteilen und optimieren zu können.

Jahrgangsstufe TGT-E

T 3	Werkstoffe I	15 Stunden
3.1	Werkstoffe nach Merkmalen unterscheiden und bezüglich Umweltaspekte bewerten	Werkstoffeigenschaften Verwendung von Werkstoffen Umweltaspekte Auch moderne Werkstoffe
3.2	Die Systematik der Werkstoffnormung verstehen und anwenden	Stähle Gusswerkstoffe NE-Metalle Bezug nehmen auf Stücklisteneintragung, Tabellenbuch
3.3	Das Verhalten metallischer Werkstoffe unter Zugbelastung erläutern, die wichtigsten Werkstoffkennwerte aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm entnehmen, berechnen und deuten	Zugversuch - Proportionalstab - Kraft-Verlängerungs-Diagramm - Spannungs-Dehnungs-Diagramm - elastische und plastische Verformung - E-Modul - Streckgrenze bzw. Dehngrenze - Zugfestigkeit - Bruchdehnung Ausblick auf Statik und Festigkeitslehre
3.4	Einen Überblick über die Härteprüfverfahren und ihre Einsatzgebiete geben	Härteprüfung - Brinell - Vickers - Rockwell Elastischer und plastischer Anteil Nur HRC
3.5	Projekt hinsichtlich neugewonnener Erkenntnisse analysieren, beurteilen und verbessern	Andere Fertigungsverfahren und Werkstoffe Wirtschaftlichkeit, Umwelt Vgl. LPE 1.1 Gruppenarbeit Kurzreferate

Jahrgangsstufe TGT-J1

T 7	Werkstoffe II	15 Stunden
7.1	Abkühlungskurven und Zustandsschaubild einander zuordnen, Werkstoffeigenschaften von Zweistofflegierungen ableiten	Raumgittertypen Erstarrungsvorgänge bei reinen Metallen Zweistofflegierung - Zustandsschaubild bei Mischkristallbildung Zustandsschaubild bei Kristallgemischbildung
7.2	Legierungsbildung als gezielte Beeinflussung von Werkstoffeigenschaften verstehen	Schematische Gefügebilder Werkstoffeigenschaften anhand von Gefügebildern und Zustandsschaubildern Gussmetalle, Lote
7.3	Das Eisen-Eisenkarbid-Diagramm erläutern und die Eigenschaften des Stahls ableiten	Fe-Fe ₃ C-Legierung - Zustandsschaubild - Erstarrungsvorgänge, Abkühlungskurven - Kristallbildung, Gefügebestandteile Nur bis 2,1 %C
7.4	Die Eigenschaftsänderung des Stahls durch Wärmebehandlung verstehen und Anwendungsbeispielen zuordnen	Wärmebehandlung - Abschreckhärten - Randschichthärten - Vergüten - Normalglühen Schliffbilder, Gefügebeurteilung Einsatzbereiche von Stählen Einsatz-, Flamm- und Induktionshärten, ohne Nitrieren



Bezeichnungen metallischer Werkstoffe

Ziel: Werkstoffbezeichnung kennen und im TabB finden.

[Schwab 2013]: Ggü den alten Bezeichnungen fallen die Leerstellen weg, Zahlen werden durch Bindestriche getrennt.

.. nach Zusammensetzung

unlegierte Stähle

Stahl = Fe mit max. 2% C

C45E

C Kennbuchstabe (enthält neben Fe nur C)

45 Kohlenstoffgehalt 0,45%

E Zusatzsymbole (hier: wenig S)

(niedrig-)legierte Stähle

kein Legierungselement über 5%

30NiCrMo16-6

30 Kohlenstoffgehalt 0,30%

→ Fe und C sind immer drin,
muss man nicht angeben

Ni, Cr, Mo Legierungselemente Nickel, Chrom ..

→ TaB „Periodensystem“

16 Ni-Gehalt = 16%/4 = 4%

6 Cr-Gehalt = 6%/4 = 1,5%

Mo-Gehalt = nicht angegeben

(hoch-)legierte Stähle

mind. ein Legierungselement > 5%

X38CrMoV5-3

X Kennbuchstabe für hochlegierter Stahl

38 Kohlenstoffgehalt 0,38%

Cr, Mo, V Legierungselemente Chrom,

Molybdän ..

→ TaB „Periodensystem“

5 Cr-Gehalt =

3 Mo-Gehalt = 3%

V-Gehalt nicht angegeben

Schnellarbeitsstähle

Stähle für Bohrer, Drehmeißel usw.

HS10-4-3-10

HS Kennbuchstabe für Schnellarbeitsstahl

'High Speed Steel'

10-4-3-10 Anteile W-Mo-V-Co

10% W, 4% Mo, 3% V, 10% Co

NE-Metalle

EN AW – AlZn5Mg3Cu

ENEuropäische Norm (entfällt oft)

AW Aluminium-Halbzeug (Knetlegierung)

AC: Gusslegierung

Al Hauptlegierungselement

Zn5 5% Zink

Mg3 3% Magnesium

Cu Anteile Kupfer

keine Teiler, Elemente und Anteil stehen beieinander

1) Nehmen Sie das TabB, Kapitel Werkstofftechnik (Griffleiste W), suchen Sie Werkstoffe und nennen Sie mir die Abkürzungen.

[EuroTabM46] S.130..144 (Stahl); S.163ff (Gusseisen); S.171..181 (NE-Metalle)

Alle Abkürzungen durcheinander (!) an der Tafel notieren. Anschließend je ein Beispiel aus den Werkstoff-Gruppen verschieden markieren (Farben). Für die anderen Beispiele geben SuS nach dem Prinzip der Mustererkennung die Farbe an.

2) GA: Erklären Sie die Bedeutung der Werkstoffbezeichnung.

Eine Schülergruppe je Werkstoffgruppe.

Beispiele → [EuroTabM46] S.133 (Einsatzstähle), S.134 (Vergütungsstähle), S.135 (Stähle für Flamm- und Induktionshärtung), S.136 (Werkzeugstähle), S.140 (Automatenstähle), weitere möglich

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.125

1) Am TG suchen wir die Werkstoffe meist wegen der Festigkeitswerte. Wie unterscheiden sich diese Werte bei C60 und C60E?

Im Rohzustand (normalgeglüht) sind die Festigkeitswerte bei beiden Werkstoffen gleich, der Unterschied kommt erst durch die Wärmebehandlung Vergüten (+QT) zustande.

Beispiele → [EuroTabM46] S.133 (Einsatzstähle), S.134 (Vergütungsstähle), S.135 (Stähle für Flamm- und Induktionshärtung), S.136 (Werkzeugstähle), weitere möglich

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.125 (einschließlich Faktoren)

1) 16% Ni und 6% Cr wäre nicht niedriglegiert. Bedeutung der Zahlen?

Man möchte Kommas und mehrstellige Zahlen in der Bezeichnung vermeiden.

2) Welchen Teiler hat Kohlenstoff?

Kohlenstoff hat den Teiler 100 (s.o.):

3) Eselsbrücke für die Elemente mit dem Teiler 4 (M für Mangan statt Mn):

Das Cr Co Si Wohnt Meist am Ni

Teiler heißen im TabB „Faktoren für die Anteile“.

Erst die Liste der Elemente, dann die Liste der Anteile!

Teiler beachten! → TabB S.....

Beispiele → [EuroTabM46] S.136 (Werkzeugstähle), S.137f (Nichtrostende Stähle)

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.126

1) Entschlüsselung der Legierungsanteile?

In der Hoffnung, das SuS den Teiler einsetzen..

2) Warum jetzt wieder keinen Teiler

Bei höheren Anteilen braucht es keine Kommastellen. Und wenn alles so einfach wäre, bräuhete man keine Abiturienten :-)

X → Fe und C sind immer drin, muss man nicht angeben

X → keine Faktoren (außer für C)

Beispiele → [EuroTabM46] S.136 (Werkzeugstähle)

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.125

TG: nicht benötigt

Beispiele → [EuroTabM46] S.171-173 (Al), S.177 (Mg, Ti), S.180-181 (Cu)

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.170 (Al Knet-Leg.), S.173 (Al Guss-Leg.), S.179 (Schwermetalle)

Man unterscheidet zwei Legierungstypen:

Gusslegierungen bestehen aus verschiedenen Kristallen, die wie bei einem Wasser-Salz-Gemisch den Schmelzpunkt senken. Knetlegierungen bestehen aus Kristallen, die 'intern' legiert sind; wegen ihres gleichartigen Aufbaus nehmen sie die Umformarbeit gleichmäßig auf und sind für Umformen geeignet.

Halbzeug: Halbfertiges Produkt, z.B. Stangen, Rohre, Platten .. werden durch Walzen oder anderen Umformverfahren hergestellt.



.. nach Verwendungszweck

Stähle

S275JR

S Verwendungszweck

S: structure steel = Baustahl, für Stahlbau

E: engineering steel = Maschinenbaustahl

P: pressure vessel steel = Druckbehälterstahl

275 Eigenschaft

(hier: Streckgrenze $R_e = 275 \text{ N/mm}^2$

über 275 MPa beginnt plastische Verformung)

JR Zusatzsymbole

Kerbschlagarbeit 27J bei RT = 20°C

Gusseisen

GJL-150

G Gusseisen

J Iron

L Lamellengrafit

S: Kugelgrafit (Sphärisch)

150 Eigenschaft

(hier: Zugfestigkeit $R_m = 150 \text{ N/mm}^2$)

Sonstige Bezeichnungen

Stahlgruppen nach Einsatzzweck

– Einsatz- und Vergütungsstähle

– Stähle für Flamm- und Induktionshärtung

→ für Wärmebehandlungsverfahren

– Werkzeugstähle

→ Drehmeißel ..

– Automatenstähle

→ für Verarbeitung auf Dreh- und Fräsaufmaschinen besonders geeignet

Einteilung nach Gebrauchseigenschaften

Grundstähle: ohne besondere Eigensch.

Qualitätsstähle: höhere Reinheit

→ für Wärmebehandlung

Edelstähle: besonders rein und gleichmäßig

→ für Vergütung und Randschichthärtung

Werkstoff-Nr / Stahlschlüssel

Stahl für Bleche

D C 04 – A – m Blech

H C 300 B höherfestes Blech

DX53D+Z veredeltes Blech

Sintermetalle

Sint E Sinter-Aluminium

Stahlschlüssel

Einteilung nach Reinheit

Allgemeiner Baustahl, Einsatzstahl, Vergütungsstahl, Nitrierstahl, Federstahl, Ventilstahl, Automatenstahl, Werkzeugstahl, Kesselstahl (Druckbehälterstahl?)

Beispiele → [EuroTabM46] S.131: S185

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.123

Alt: St 37

1) Am TG suchen wir die Werkstoffe meist wegen der Festigkeitswerte. Wie unterscheiden sich diese Werte bei S235 JR, S235JO und S235J2?

Bei Baustählen werden häufig Angaben zur Kerbschlagarbeit gemacht (JR, JO...), weil Baustählen bei Kälte, Kerbwirkung und schlagartiger Belastung zum spröden Brechen (ohne Vorankündigung) neigen. Angegeben wird die Kerbschlagarbeit (J für 27J; K für 40 J) und zugehörige Temperatur (R für 20°C, 0 für 0°C, 2 für -20°C). Je niedriger die Temperatur und je höher die Kerbschlagarbeit, desto besser.

Zusatzsymbole können am TG meist ignoriert werden

Beispiele → [EuroTabM46] S.164..166

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.163

Alt: GG-15

S.261: J für Iron, weil man im Englischen manchmal J statt I schreibt, um das I nicht mit der 1 zu verwechseln, die im Englischen ebenfalls I geschrieben wird. Da Gusseisen praktisch keinen plastischen Bereich hat, wird weiterhin R_m angegeben.

2) Was ist ein Vergütungsstahl?

Vergütungsstähle sind für das Wärmebehandlungsverfahren Vergüten geeignet, und erreichen nach dem Vergüten deutlich höhere Festigkeitswerte.

Automatenstähle enthalten geringe Anteile von S, Pb (kommt aus der Mode, Bismut als Ersatzstoff siehe NE-Metalle)... die Späne brechen. A. werden verwendet, wenn spanende Fertigung gewünscht ist und keine besonderen Werkstoffeigenschaften gefordert sind. Pb kommt aus der Mode wegen seiner gesundheitsgefährdenden Wirkung.

Beispiele → [EuroTabM46] bei jedem Werkstoff

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.122

Beispiele → [EuroTabM46] S.143f

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.124

Beispiele → [EuroTabM46]

Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.183

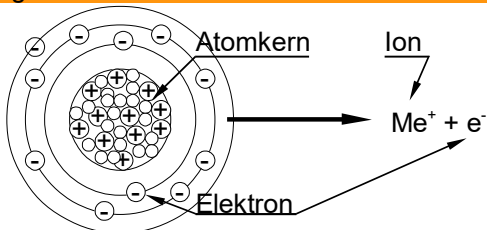
Sintern = Urformen durch Pressen von Metallpulver

Grundstahl, Qualitätsstahl, Edelstahl



Aufbau metallischer Werkstoffe

Bindungsmechanismus bei Metallen



Me geben leicht die äußeren (Valenz-)elektronen ab. e⁻ bilden frei bewegliches Elektronengas und binden Me⁺.

Die Bindung ist richtungsunabhängig (isotrop).

typische Merkmale der Metalle

Elektronenwolke / Elektronengas

→ hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit
elektrochemische Korrosion, Supraleitung

→ hohe Festigkeit

FO Schildkröttaktik

→ richtungsunabhängige Bindung (Isotropie)

→ Metallatome streben zur dichtesten Packung

→ einfache umformbare Gitter (Kristalle)

Gleitebenen ermöglichen Verschieben und erneute Bindung, Details s.u..

Erst Umformbarkeit macht Metalle technisch nutzbar.

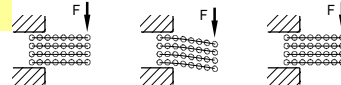
→ Atome sind austauschbar → Legierbarkeit

→ metallischer Glanz nach dem Bruch

Verformung von Metallen unter Spannung

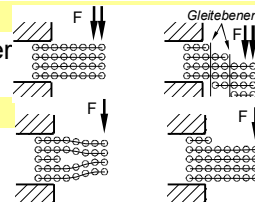
elastische Verformung

erfordert Überbiegen o.ä.



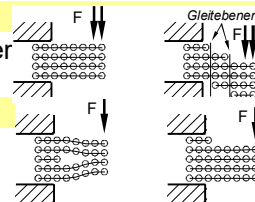
plastische Verformung

durch Versatz an Gleitebenen oder



Kaltverfestigung

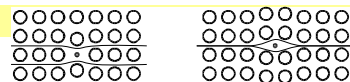
durch Schließen von Gitterfehlern



Legierung

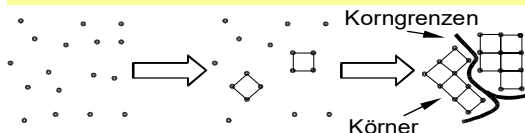
stört Gleitebenen

→ steigert Festigkeit



mikroskopische Struktur

Wachstum aus der Schmelzen



Gefüge

- Körner (Kristalle) + Korngrenzen = Gefüge
(feines Korn erhöht die Festigkeit)

[Schwab 2013] S.45: „Erst bei hohen Temperaturen stellen Korngrenzen Schwachpunkte dar, weil dann ein Korn am anderen abgleiten kann, so wie Menschen auf Glatteis.“

Gitterfehler

- Fremdatome (→ erhöhte Festigkeit)
- Lücken (→ Umformbarkeit)
- Verschiebung ganzer Lagen
- Gitterfehler senken die Festigkeit

Ohne Gitterfehler sind Metalle mechanisch nicht nutzbar.

[GrundwissenIng8] S.1003: „Metallische Bindung beruht darauf, dass Metalle sehr dazu neigen, positive Atomrümpfe zu bilden, wobei sie Elektronen der äußeren Schale abgeben, die dann nicht mehr zu einem bestimmten Atom gehören, sondern sich gewissermaßen 'frei' zwischen den positiven Atomrümpfen bewegen (freie Elektronen, Elektronengas). Sie bewirken als 'Kitt' den Zusammenhalt der gleichnamig geladenen Metallatomrümpfe. Außerdem ist ihre Beweglichkeit die Ursache für die gute Leitfähigkeit der Metalle für Elektrizität und Wärme.“

AM Al-Blech mit großen Kristallen

- 1) Welche Struktur ist hier zu erkennen?
- 2) Welcher Bindungsmechanismus verursacht solche Strukturen? bzw. Wie sind Metallatome miteinander verbunden?

Metallatome geben leicht ihre äußeren Valenzelektronen ab. Da im reinen Metall keine Atome vorhanden sind, die Elektronen aufnehmen, bilden sie eine frei bewegl. Elektronenwolke, die für die typischen metallischen Eigenschaften verantwortlich ist. Die richtungsunabhängige Bindung bewirkt, dass Metallatome zu dichten und dichtesten Packungen neigen.

FO Bindungsarten

[Tipler 1995] S.1317: Die „Wellenfunktion (der Valenzelektronen) erstreckt sich über das ganze Volumen“

Bindungsarten: [Hering 1992] S.634

Kräfte: Elektromagnet. Kraft bindet Atome zu Molekülen, schwache und starke Kraft binden Protonen und Neutronen, starke Kraft bindet Quarks. Protonen bestehen aus 2 up- und 1 down-Quarks, Neutronen aus 2 down- und 1 up-Quark. Isotropie = Unabhängigkeit einer Eigenschaft von der Richtung. Nicht zu verwechseln mit isentrop (= Zustandsänderung mit konstanter Entropie → Thermodynamik)

- 1) Welche typischen Merkmale folgen aus dem Bindungsmechanismus?

[Hering 1992] S.684: „In reinen Metallen ist die Wärmeleitfähigkeit durch Elektronen stets ein bis zwei Größenordnungen größer als durch Gitterschwingungen.“

[Hütte 29] B156: Elektrischer Widerstand bei Metallen durch Gittergrenzen und –fehler und durch schwingende Atome.

Salze zerfallen unter elektrischem Strom (Elektrolyse). Ihre thermische Leitfähigkeit beruht auf der engen Kopplung der Ionen, die Gitterschwingungen übertragen, und ist vermutlich geringer als bei Metallen.

Tischtennisbälle (Metallatome) ordnen sich in einer Kiste richtungsunabhängig, im Gegensatz zu Nägeln (Salzionen mit gerichteter Ionenpaarbindung).

- 2) Wie ordnen sich TT-Bälle an?

Verformung findet in den Gitterebenen statt. Komplizierte Gitter (Zementit, Diamant, Quarz usw.) sind schwerer verformbar. Salze haben gerichtete Pole (Ionen), die bei Verschiebung einer Atomlage zu Abstoßung führen; [Skolaut 2014] S.344 Salze brechen im Spröbruch.

FO Gittertypen

Kristall (von grch. *krystallos* bzw. lat. *crystallus* = 'Eis, Bergkristall') bedeutet 'fester, regelmäßig geformter, von ebenen Flächen begrenzter Körper'.

Weil die Atomrümpfe rund erscheinen und ähnlich groß sind, sind sie vielen Kombinationen austauschbar. Fremdatome stören die Gitterebenen und erhöhen die Festigkeit. Salze können kaum Fremdionen aufnehmen, weil auch die Richtung der Bindungen passen müsste. Verformung und Bruch findet in den Gitterebenen statt, sodass frische Bruchflächen sehr glatt sind und glänzen.

Kurve Kräfte zwischen Atomen,

- 1) Vergleiche die harte Feder: Wie verhält sich die Bindung unter Druck
Abstand zwischen 2 Atomen verringert sich, abstoßende Kraft steigt sehr stark an: Metall kann nicht komprimiert werden.
- 2) Wie verhält sich die Bindung unter leichtem Zug
Verschiebung der Atomkerne, federn nach Entlastung ohne Veränderung (außer Hysterese) zurück: elastische Verformung
- 3) Wie verhält sich die Bindung unter großem Zug
Es verschieben sich komplette Lagen des Gitters und springen in ein neues Gitter: plastische Verformung. Die Besonderheit von Metallen ist, dass der Körper nicht nur nicht bricht, sondern eine hohe Festigkeit behält. Zwillingsbildung: Teile eines Kornes klappen in eine spiegelbildliche Lage (besonders hexagonale Gitter)

Kaltverfestigung entsteht durch Schließen der Gitterfehler. Für monokristallines Fe wird $R_m \approx 14000 \text{ N/mm}^2$ errechnet, tatsächlich ist $R_m(\text{Fe}) \approx 150 \text{ N/mm}^2$. Die Verschiebung entlang der Gitterebene muss also abgeschwächt sein.

Die Verschiebung der Gitterebenen endet an den Korngrenzen oder an Gitterfehlern. Ohne Gitterfehler wären Metalle praktisch nicht verformbar bzw. bearbeitbar, d.h. technisch nicht verwendbar. Im Bild: Substitutionsmischkristall: Fremdatom ersetzt Wirtsatom, z.B. CuNi. Einlagerungsmischkristall: Fremdatom auf Zwischengitterplätzen, z.B. C in Fe.

AM Rogers Connection

- 1) Wie wird Metall fest? Wie erstarrt es aus einer Schmelze?

Wenn die Atome beim Abkühlen Bewegungsenergie verlieren, binden sich an vielen Stellen einzelne Atome. Mit weiterer Abkühlung binden sich weitere Atome an die Keimzellen, die Kristalle wachsen und bilden ein System von Körnern mit Korngrenzen. [Schwab 2013] S.45: Korngrenzen haben meist eine Dicke von 1 bis 2 AtomØ. Bei Stahl erfolgt das Wachstum aus der Schmelze in Dendriten ähnlich wie bei Eisblumen. "Runde" Kristallen mit höherer Festigkeit entstehen erst beim Umformen. Korngrenzen beeinflussen die Festigkeit: Je kleiner die Körner, desto höher die Festigkeit (vgl. Kettenglieder beim Kettenhemd: Je kleiner, desto fester). Viele Körner erhöhen die Umformbarkeit, das es mehr Gleitebenen in mehr Richtungen gibt.

Rekristallisation: [Bargel/Schulze 2005]

- 2) Bezug auf Eingangsbeispiel

Gitter beginnen beim Abkühlen an vielen Kristallkeimen zu wachsen, jedes Gitter bildet ein Korn. An den Korngrenzen lagert sich ab: Schlacke, nicht gelöste Fremdstoffe, Grafit in GJ

[EuroTabM]: Schliffbilder

- 3) Welche Bauweise hält besser: Mit Zement verbundene große Steine oder feinkörniger Kies mit Zement (= Beton)?

- 4) Folgen von Gitterfehlern

Wie sehr die Form von den äußeren Bedingungen, vor allem Abkühlgeschwindigkeit und Störfaktoren abhängen kann, sieht man bei Eiskristallen an der Fensterscheibe. **Verformbarkeit:** Bei plastischer Verformung muss nicht eine ganze Gitterebene verschoben werden, sondern nur bis zur nächsten Lücke. Die theoretische Festigkeit idealer Kristalle ist 100-fach höher als die reale → kann nicht bearbeitet werden könnten. **Fremdatome** können leicht von Lücke zu Lücke wandern. Dies ist wichtig beim Ändern von Stoffeigenschaften, (z.B. Aufkohlen) **Kaltumformung** nutzt die Gitterfehler aus. Der Werkstoff lässt sich bis zu einer bestimmten Grenze kalt umformen, dabei wird er härter und spröder (Kaltverfestigung). Wenn alle nutzbaren Baufehler genutzt sind, beginnt ein Teil zu reißen. **el. und therm. Widerstände** Gitterfehler stören el. und therm. Leitfähigkeit.



LPE 03 Werkstoffprüfung

Zugversuch

Zweck

- dient der Ermittlung des Werkstoffverhaltens bei einachsiger Zugbeanspruchung
- liefert wichtige Werkstoffkennwerte, die auf viele andere Belastungsarten übertragbar sind.

Durchführung

Zugprobe

wegen ihres Einflusses auf das Ergebnis sind genormt:

- Form (rund oder flach)
- Zylinderköpfe (glatt oder Gewinde)
- Oberfläche (Rz 6,3)
- Längenverhältnis (Proportionalstäbe)

Kurzer Prop.-Stab rund bzw. beliebig	Langer Prop.-Stab (für Sonderfälle)
$\frac{L_0}{d_0} = 5$ bzw. $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 5,65$	$\frac{L_0}{d_0} = 10$ bzw. $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 11,3$

Ablauf

man zieht die Zugprobe langsam und ruckfrei bis zum Bruch und zeichnet die Kraft F und Länge L auf.

Standardisierung

Werkstoffkennwerte werden unabhängig von den Maßen des Bauteiles angegeben.

Zugkraft F ↔ Zugspannung σ_z

$$\sigma_z = \frac{F}{S_0} \quad \text{in} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right] \quad S_0 = \text{Anfangsquerschnitt}$$

Längenänderung ΔL ↔ Dehnung ϵ

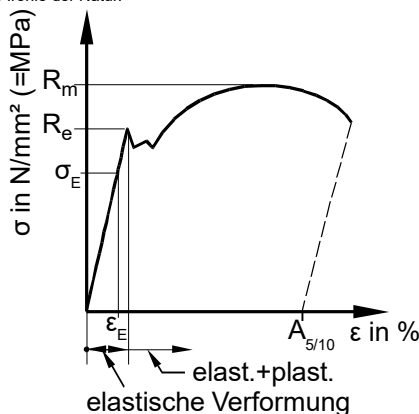
$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad \text{in} \quad [\% \text{ oder o.E.}] \quad L_0 = \text{Anfangsmesslänge}$$

Die Werte werden aufgezeichnet im

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

mit ausgeprägter Streckgrenze

[Schwab 2013] S.154: „... ausgeprägte Streckgrenze [tritt] nur bei wenigen Werkstoffen auf[...] .. ausgerechnet bei den einfachen Baustählen, der meistgebrauchten metallischen Werkstoffgruppe, eine Ironie der Natur.“



3) Beschreiben Sie den Kurvenverlauf (makroskopische Vorgänge)

4) Gleichmaßdehnung A_g ist verzichtbar

5) dann Bezug auf die mikroskopischen Vorgänge

AB verschiedene gezogene Zugproben

Quellen: DIN EN 10002:2001 Metallische Werkstoffe - Zugversuch in [Klein 2008], [Hering 1992], [Bargel/Schulze 2005]

1) Ein: Bauarbeiter unter schwebender Last; Bungeespringen
Was gibt dennoch einigermaßen Sicherheit?

2) Aufbau und Ablauf mündlich entwickeln, anschließend Zugversuch in der Werkstatt durchführen oder Video zeigen.

Prüfungen sind lange üblich, z.B. enthält [Musschenbroeck 1729] Hinweise zu Prüfmaschinen und Spannungsprüfungen bei Drähten [Ferguson 1992] S.204, Fußnote 9). Ein anderes Beispiel ist [Agricola 1548]

-> [EuroTabM] „Zugversuch“

FO verschiedene Zugproben

FO Einfluss des Längenverhältnisses auf die Bruchdehnung

AM Papierstreifen

FO gespannte und umgeformte Gewinde

Abhängig vom Längenverhältnis ist z.B. die Bruchdehnung A, weil die Verformung nach der Einschnürung nicht von der Anfangslänge abhängt.

Die Proportionalitätsfaktoren $k = 5,65$ bzw. $11,3$ ([Bargel/Schulze 2005] S.98; [EuroTabM] „Baustähle, unlegierte“) für beliebige Querschnitte wurden im Abi bisher nicht verwendet, sondern nur $L_0/d_0 = 5$ bzw. $L_0/d_0 = 10$ für runde Proportionalstäbe, gelegentlich mit Umrechnung in entsprechende Flachproben.
Die Proportionalitätsfaktoren $k = 5$ für runde Stäbe und $k = 5,65$ für beliebige Stäbe können ineinander umgerechnet werden.

$$\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{L_0}{\sqrt{\pi/4 \cdot d_0^2}} = \frac{L_0}{\sqrt{\pi/4} \cdot d_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi/4}} \cdot \frac{L_0}{d_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi/4}} \cdot 5 \approx 5,65$$

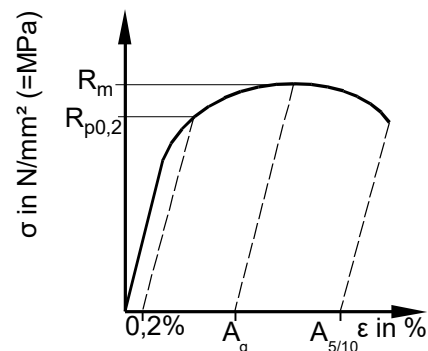
Langsam und ruckfrei wegen dynamischer Kräfte, vergleiche: Spalten von Holz.
Was langsam ist, hängt vom Werkstoff ab.

Damit die Ergebnisse unabhängig von der Probengröße werden, bezieht man sie auf Querschnittsfläche und Länge der Probe. Den Einfluss von Oberfläche und Längenverhältnis vernachlässigt man zunächst. Wenn es genauer sein muss: Im TabB sind die Streckgrenzen R_e bei Stahl abhängig von der Erzeugnisdicke angegeben, und bei der Bruchdehnung gibt man das Längenverhältnis als Index an, z.B. A_5 oder A_{10} , wg. des seines Einflusses.
Andere Beispiele: zulässige Stromdichte
Spannung ist auf Fläche bezogene Kraft.

Ingenieure rechnen mit Zugspannungen, die auf den Anfangsquerschnitt bezogen sind, und ignorieren, dass der Querschnitt kleiner und die tatsächlichen Spannungen größer werden, weil man Bauteile kaum noch beeinflussen kann. Dagegen betrachten Festkörperphysiker bei der Untersuchung von Werkstoffverhalten die tatsächlichen Spannungen im engsten Querschnitt.

100% = 1, kann in der Formel auch entfallen

ohne ausgeprägte Streckgrenze



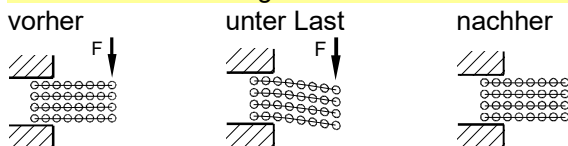
AB SDD kombiniert mit Gitterbildern und 2ten Achsen F und ΔL



Vorgänge im Werkstoff

Metallische Gitter sind einfach angeordnet

elastische Verformung



Werkstoff verhält sich wie eine Feder und nimmt nach Entlastung die ursprüngliche Form wieder an.

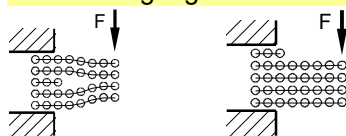
Einschwingverhalten

plastische Verformung



Werkstoff wird bleibend verformt

Kaltverfestigung.



Gitterfehler werden geschlossen, die Streckgrenze eines Metalles steigt beim Umformen (Walzen, Schmieden ..)

Hinweise: Einen gebogenen Draht kann man nicht einfach an der Biegestelle zurückbiegen. Bis zur Bruchseinschnürung bleiben Zugproben zylindrisch, weil bereits gedehnte Bereiche eine höhere Festigkeit bekommen und die weitere Dehnungen erstmal woanders stattfindet.

Einschnürung

Nach Überschreiten von R_m tritt Einschnürung der Probe ein. Die Kraft im Diagramm sinkt bis zum Bruch.

Kennwerte aus dem Zugversuch

Es gilt das Hooke'sche Gesetz: $\sigma = E \cdot \epsilon$

Streckgrenze R_e – Dehngrenze $R_{p0,2}$

= Grenze des elastischen Bereiches [N/mm² = MPa]

(Der) Elastizitätsmodul E

[kN/mm²] (E-Modul)

– ist ein Maß für die Steifigkeit

– $E = \frac{\sigma_E}{\epsilon_E}$ mit einem Wertepaar (σ_E ; ϵ_E) von der Hooke'schen Geraden

Zugfestigkeit R_m

in [N/mm² = MPa]

– das Überschreiten von R_m führt zum Bruch

Bruchdehnung A (=A₅) oder A₁₀

in [% oder ohne Einheit]

– Bleibende Verformung nach dem Bruch

– Index = Längenverhältnis der Zugprobe
→ starker Einfluss auf die Bruchdehnung (s.u.)

Brucheinschnürung Z

→ TabB

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S}$$

Streckgrenzenverhältnis V_s

$$V_s = \frac{R_e}{R_m}$$

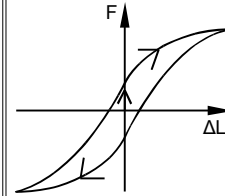
Vertiefung

1) Ordnen Sie Kurven mit verschiedenen Streckgrenzenverhältnissen zu:

Bruchgetrenntes Pleuel, FO Tiefziehen

Seil einer Hängebrücke (plastische Verformung erwünscht, um Überlastung anzuzeigen). Zum Thema → [Schwab 2013] „Kerbschlagbiegeversuch“

Tatsächlich ist die elastische Verformung im oberen Bereich nicht genau linear. Doch die Abweichungen von der Geraden sind schwer zu ermitteln und meist vernachlässigbar, so dass man meist auf der Ermittlung der Proportionalitätsgrenze verzichtet.



Auch beim elastischen Verformen von Material kommt es durch innere Reibung zu einer Hysteresese [Bargel/Schulze 2005] S.112. Deshalb wollen Radfahrer möglichst steife Fahrradbauteile.

AB Hysteresese

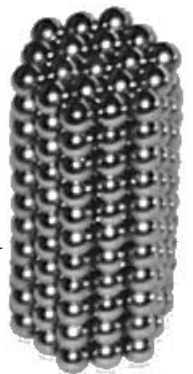
Man unterscheidet: (1) linear elastisches Verhalten, für das das Hooke'sche Gesetz gilt (gilt für alle Festkörper für kleine Verformungen bis $\epsilon=0,1\%$); (2) nicht-linear- elastisches Verhalten, z.B. Gummi und (3) anelastisches Verhalten (elastische Hysteresese): der Werkstoff gibt nicht mehr die ganze Verformungsenergie zurück [Hütte 29] D42. [Hering 1992] S.92.

Mit der Dehnung ϵ erfolgt eine Verringerung des Querschnittes. Ihr Maß ist die Querkürzung ϵ_q $v = \frac{\epsilon_q}{\epsilon}$

bzw. die Poisson- oder Querdehnzahl v . Sie beträgt für Stahl $v = 0,3$ [Decker 2009] S.30.

Sechseckige Säule aus Nanodots, Elmo:

Bei Verdrehung ist die elastische und plastische Verformung gut zu sehen. Wenn man die mittleren Magnete entnimmt, wird die plast. Verformung zufälliger



Nach der 2011 geltenden Theorie entsteht die Einschwingphase ([GrundwissenIng14] S.533: Lüders-Dehnung) durch Zwischengitteratome (ZGA: C, N), die etwas größer als die Zwischengitterplätze sind und das Wirtsgitter verzerren. Durch die energetische Situation bewegen sich die ZGA bei angelegter (Zug-)Spannung auf die Versetzungen zu, bilden dort s.g. Cottrell-Wolken und blockieren plast. Vfg. (erhöhen Streckgrenze). Wenn sie bei R_{mH} endlich doch beginnt, verlieren die C-Wolken ihre Wirkung und die relativ hohe Spannung dehnt den Werkstoff. Ohne Alterung zeigt der Werkstoff keine ausgeprägte Streckgrenze mehr. [de.Wikipedia.org/./Cottrell-Wolke], [Bargel/Schulze 2005] S.105f., [Schwab 2013] S.156f.

Umklappen eines nichtorthogonalen Gitters ist ebenfalls möglich. Gleitebenen gehören zu den typischen metallischen Eigenschaften. Sie werden möglich durch Isotropie (richtungsunabhängige Bindung) der Metalle, die zu einfachen und dichten Gittern führt.

Die Verschiebung endet an den Korngrenzen oder an Gitterfehlern. Ohne Gitterfehler wären Metalle praktisch nicht verformbar bzw. bearbeitbar. Für monokristallines Fe wird $R_m = 14000 \text{ N/mm}^2$ errechnet, tatsächlich ist R_m (Fe100) $\approx 150 \text{ N/mm}^2$. Die Verschiebung entlang der realen Gitterebene muss also abgeschwächt sein.

Bruchmechanismen siehe [SdW] 01/2000

Die auf den Ausgangsquerschnitt bezogene Spannung sinkt im Diagramm jenseits von R_m , die tatsächliche Spannung unter Berücksichtigung des verengenden Querschnitts steigt aber weiter an; es tritt sogar noch Kaltverfestigung auf. Die tatsächliche Spannung spielt für den Ingenieur aber keine Rolle, solange er den Querschnitt an belasteten Stellen nicht wachsen lassen kann – wie die Natur es bei Bäumen, Knochen usw. tut ([Mattheck 2003]).

→ [EuroTabM] „Zugversuch“

[Schwab 2013] S.149: R kommt von engl.: resistance für mechanischen Widerstand. DIN EN 10002:2001 unterscheidet Obere (R_{mH}) und untere (R_{mL}) Streckgrenze [Klein 2008], [Bargel/Schulze 2005]. Ich verwende die obere Streckgrenze R_e wie in → [EuroTabM] „Zugversuch“. R_e auch technische Elastizitätsgrenze.

Dehngrenze: Bei Werkstoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze ist der Übergang von elastischer zu plastischer Verformung, von der Geraden zur Kurve, messtechnisch nur schwer erfassbar, außerdem wird der Werkstoff dort nicht voll ausgenutzt. Deshalb verwendet man die Dehngrenze, bei der ein bestimmtes Maß an plast. Verformung auftritt, $R_{p0,2}$ ist die gängigste.

→ [EuroTabM] „Elastizitätsmodul“; Tabellenwerte → [Hütte 29] E66 und D44

Der (!) E-Modul ist der Proportionalitätsfaktor zwischen Normalspannung und Dehnung. Bildlich ist er eine Federkonstante oder die Steigung der Hooke'schen (!) Geraden und damit die gedachte Spannung für 100% Dehnung. Vergleiche auch Schubmodul G für Schubspannungen und Kompressionsmodul K für hydrostatischen Druck.

[Bargel/Schulze 2005] S.97: Es gibt nichtlineare Elastizität (z.B. Grauguss), der E-Modul für Zug und Druck muss nicht symmetrisch sein (z.B. Sinterwerkstoffe, Nichtmetalle).

E-Modul aus SDD ermitteln (HP96/97-3)

R_m ist eine rechnerische Größe mit dem Anfangsquerschnitt S_0 , die für Konstruktionen zweckmäßig ist. Will man das Werkstoffverhalten untersuchen, legt man den tatsächlichen Querschnitt zugrunde und erhält eine wesentlich größere Spannung.

[Schwab 2013] S.150: A kommt von vermutlich von frz. allongement für Dehnung. A_5 oder $A_{5,65}$ oder ohne Index sind kurze; A_{10} und $A_{11,3}$ lange Prop.-Stäbe.

FO Zugprobe: Folgen des Längenverhältnisses

[Bargel/Schulze 2005] S.96: Die Rückfederung parallel zur Hooke'schen Geraden ist eine Vereinfachung, die bei höheren Temperaturen oder Kriechversuchen nicht zulässig ist.

Verhältnis kleinster Querschnitt nach Bruch zu Anfangsquerschnitt.

Verformungskennwerte (Bruchdehnung, Brucheinschnürung, Dehnung bei Höchstkraft) dienen nicht der Konstruktion, aber der Beurteilung des Werkstoffverhaltens.

Wird benötigt bei:

- Festigkeitsklassen von Schrauben
- Umrechnung von Brinellhärten auf R_m
- Anhaltswert der Verformbarkeit für Umformverfahren

Gespeicherte Energie im elastischen Bereich, Verformungsenergie im plastischen Bereich (Zähigkeit) und freiwerdende elastische Energie beim Bruch berechnen. [Hering 1992] S.92



Video Zugversuch

Zeigt Durchführung des Zugversuches und Ermittlung der Kennwerte

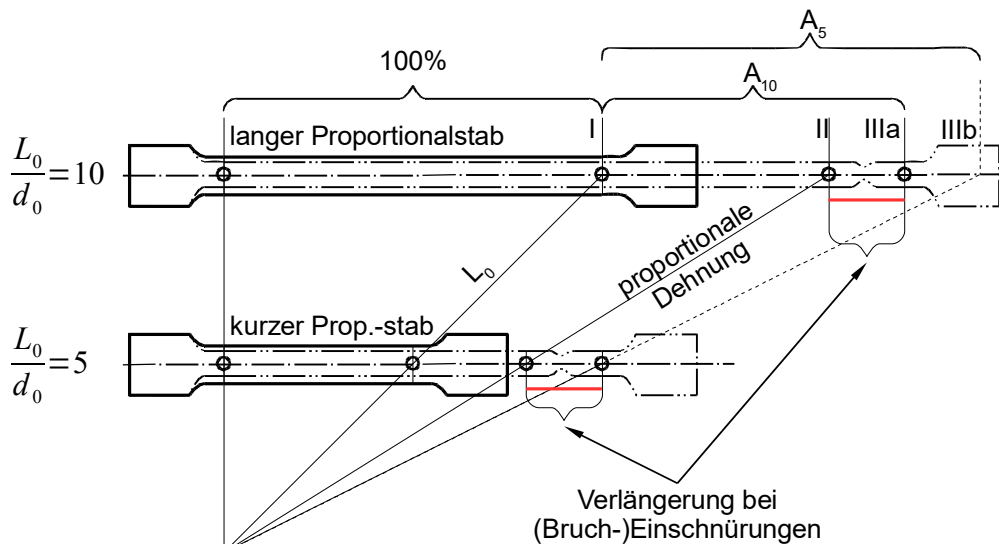
0050 Universalprüfmaschine
0075 genormter Prüfstab mit Gewindeköpfe
0100 genormte Geschwindigkeit, Dehnung, Schleppzeiger für F_m
0147 Einschnürung

0160 $R_m = F_m / S_0$
0170 Spannungs-Dehnungs-Diagramm
0185 R_{eH} , R_{eL} , R_m
0199 Diagrammschreiber, Kraftanzeige
0234 ohne ausgeprägte Streckgrenze, $R_{p0.2}$, F_m und ϵ -Anzeige; mehrmaliges Be- und Entlasten mit steigender Kraft zur Ermittlung von $R_{p0.2}$
0330 Zeichnerische Ermittlung
0340 Bruchdehnung messen
0376 Vergleich St-60 und St-37 im Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Kraftanzeige

Bruchdehnung $A_5 \leftrightarrow A_{10}$

A_5 , $A_{5,65}$ = Bruchdehnung am kurzen Prop.-Stab
 A_{10} , $A_{11,3}$ = Bruchdehnung am langen Prop.-Stab
 A_5 , A_{10} : zylindrische Probe
 $A_{5,65}$, $A_{11,3}$: Flachprobe

[Schwab 2013] S.146: „Der kurze Proportionalstab ist Standard... Früher hat man den [langen Proportionalstab] gerne angewendet, weil die Längenmesstechnik noch nicht so ausgefeilt war. Heute findet man ihn eher selten, weil er von der Herstellung her teurer ist.“
[Schwab 2013] S.155f: „Statt A_5 wird seit einiger Zeit gerne auch nur A oder $A_{5,65}$ verwendet, statt A_{10} auch $A_{11,3}$. Das hängt mit den Faktoren 5,65 und 11,3 zusammen, ..., die auch bei ... Proben und anderen Querschnittsformen sinnvoll sind.“



1) Unterschied langer / kurzer Proportionalstab?

Phase I: unbelastete Zugproben aus gleichem Werkstoff

2) Verhalten im elastischen Bereich?

Phase II: Proben werden dünner und länger, Dehnung ist bei gleicher Kraft bei den Proben proportional gleich

3) Verhalten bei Einschnürung?

Phase III: Dehnung findet fast (weglassen) nur noch im Bereich der Einschnürung statt, die Längenänderung ist bei beiden Proben gleich → die Dehnung ist bei gleicher Kraft in einer längeren Probe proportional geringer.

4) Bruchdehnung?

Nach dem Bruch werden die Bruchstücke gegeneinander gedrückt und die Bruchdehnung gemessen.

A_g = Gleichmaßdehnung

Zusammenhang zwischen A_5 , A_{10} und A_g

Die Bruchdehnung $A_{5/10}$ [%] setzt sich zusammen aus der Gleichmaßdehnung A_g [%], die bei beiden Proben gleich ist, und der Längenänderung x [mm] bei der Bruchdehnung, bezogen auf die ursprüngliche Länge L_5 bzw. L_{10} [mm]. Bei gleichem Querschnitt gilt: $L_{10} = 2 \cdot L_5$

$$A_5 = A_g + \frac{x}{L_5} \Rightarrow \frac{x}{L_5} = A_5 - A_g$$

$$A_{10} = A_g + \frac{x}{L_{10}} = A_g + \frac{x}{2 \cdot L_5} \Rightarrow \frac{x}{L_5} = 2 \cdot (A_{10} - A_g)$$

$$A_5 - A_g = \frac{x}{L_5} = 2 \cdot A_{10} - 2 \cdot A_g \Rightarrow$$

$$A_g = 2 \cdot A_{10} - A_5$$

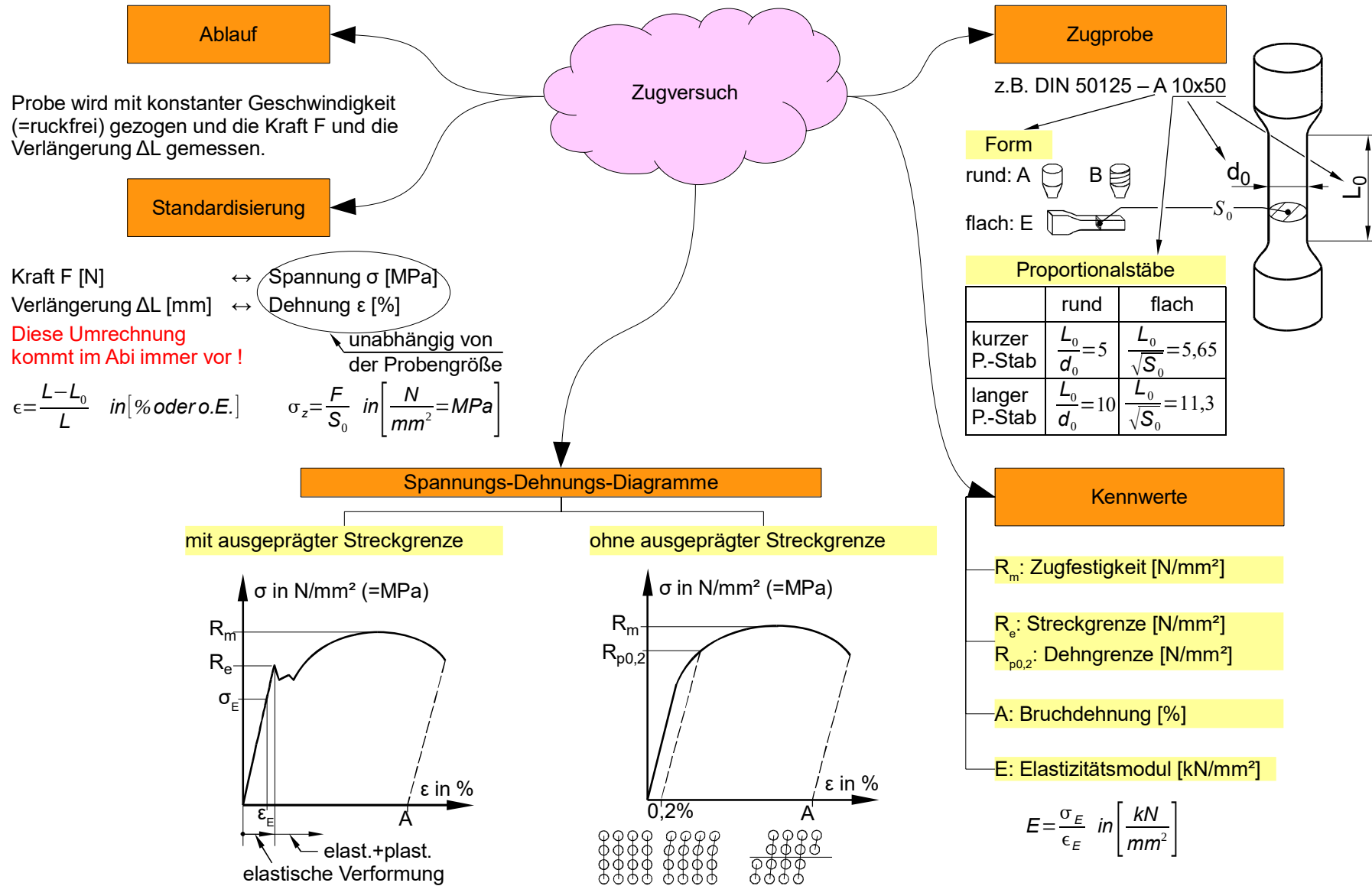
[Bargel/Schulze 2005] S.99: Nennt die Gleichung „hinreichend genau“.

[Schwab 2013] S.149, Sinngemäß: „Es wurde genau untersucht und festgestellt, dass das Volumen einer Probe immer konstant bleibt.“ [Bargel/Schulze 2005] S.99: „Die mit der Längenänderung verbundene Verminderung des Querschnitts ist ... überwiegend darauf zurückzuführen, dass das Volumen annähernd konstant bleiben muss.“
Meine Vermutung: Es handelt sich wohl um die Frage, wie genau man es nimmt.

[Schwab 2013] S.149, Sinngemäß: „Bis R_m wird die Probe zwar länger und dünner, aber sie bleibt zylindrisch. Ursache ist eine Art innere Regelung durch Kaltverfestigung: Dort, wo die Probe etwas stärker gedehnt wird, steigt die Festigkeit, deshalb findet die weitere Dehnung zunächst an anderen Stellen statt. Die innere Regelung funktioniert nur bis zur so genannten Gleichmaßdehnung A_g , die laut SDD (S.148) und Text bei R_m auftritt. Gemessen wird sie wie A_5 und A_{10} abzüglich des elastischen Anteil.“ [Schwab 2013] S.155: „Die Gleichmaßdehnung ... ist ein Kennwert, der in der Umformtechnik sehr wichtig ist, vor allem, wenn es um Ziehen, Biegen oder Strecken geht. Die Gleichmaßdehnung wird immer im Höchstlastpunkt des Zugversuches erreicht.“ [Bargel/Schulze 2005] S.99: „In der Regel sinkt bei Einschnürung der Probe die übertragene Prüfkraft.“

Meine Vermutung: Auch hier geht es wohl nur um die Genauigkeit. Für mich klingt es jedenfalls seltsam, dass die Bruchdehnung genau im Maximum des Diagramms ohne Knick beginnen soll.

Zugversuch im Mindmap





Eindringhärteprüfung

Härte ist der Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen Körpers entgegen setzt. Härte wird als plastische Verformung messbar und kann mit Härtevergleichszahlen angegeben werden.

Eindringkörper

Form	Kugel	Kegel / Pyramide
Werkstoff	aus HM	aus Diamant
Ausführung	verschiedene Ø	eine Größe
Prüfkraft	abhängig von KugelØ und Härte	beliebig wählbar
Messgröße	Ø (Fläche)	Fläche oder Eindringtiefe
Anwendung	für inhomogene grobe Gefüge geeignet	

Vergleich der Verfahren

Prüfkörper

Eselsbrücke: Vergleiche Prüfkörper und Anfangsbuchstaben!

Messgröße

Typische Härtewerte

[EuroTabM]: Vergleich der Härtewerte

Ermittlung des Härtewertes

Herleiten!

In der Praxis aus Tabellen.
Für Schüler kg statt kp.

Kennzeichnung

Zusammenhänge

Umrechnungsformel sind nicht bekannt, Inhaltsweiser Vergleich nur mit Tabellen

Anwendung

Prüfbedingungen

Prüfbedingungen aus TabB für GG, 1mm dick, ca.200HB

Brinell (HB, HBW)



Hartmetall (HBW)
~~Stahl (HBS)~~

Stahlkugeln als Prüfkörper sind mit DIN EN ISO 6506-1:2005 nicht mehr zugelassen. Die Bezeichnung HBW ist immer noch üblich.

2 x Durchmesser optisch
2 Messungen senkrecht zueinander erhöhen die Genauigkeit

100 .. 650

$$HBW = \frac{0,102 \cdot F}{\text{Eindruckoberfläche}}$$

Faktor 0,102 = 1/9,81 wurde mit der Umstellung von Kilopond auf Newton eingeführt.

Das Ergebnis entspricht etwa der durchschnittlichen Flächenpressung.

229HBW 2,5/187/30

Härtewert Verfahren KugelØ/Kraft [kp]/Einwirkzeit

$R_m \approx 3,4 \times HBW$

Der Faktor hängt vom Streckgrenzenverhältnis X und der Zugfestigkeit des Stahles ab; z.B. für zerstörungsfreie Ermittlung von R_m (ungefähr).

X muss größer >0,5 sein, unlegierte Stähle

- besonders für grobes od. inhomogenes Gefüge
- Große Kugel trifft sicher viele Kristalle und bildet mechanisch einen Mittelwert.
- bis mittelharte Werkstoffe
- begrenzt durch die Festigkeit der Kugel.
- für Ermittlung von R_m
- nicht für dünne Schichten, da es sie ins Grundmaterial drücken würde
- geringe Beschädigung der Oberfläche
- Belastungsgrad: $\text{EindruckØ} \approx 0,24 \cdot 0,6D$
 - zu klein: unscharfe Ränder
 - zu groß: keine Änderung des EindruckØ

AM Zahnrad, Nockenwelle, Wälzlager o.ä.

Ein: FO Asterix und die Normannen

1) Welche Werkstoffeigenschaft wird bei diesem veralteten Werkstoffprüfverfahren getestet?

siehe [EuroTabM] „Härteprüfung, Brinell, Vickers, Rockwell“; Härte = Eindringwiderstand

2) Aus der Form des Eindringkörpers kann man auf viele Eigenschaften des Prüfverfahren schließen, deshalb vorab einen Vergleich.

Kegel haben größere Kerbwirkung

Kugeln aus Diamant sind nicht sinnvoll / (möglich ?)

Kugeln haben bei geringer Eindringtiefe unscharfe Ränder, bei großer Eindringtiefe kaum differenzierte Messwerte, sodass mehrere Durchmesser erforderlich sind.

Die Kraft soll so klein wie möglich sein, damit das Werkstück nicht beschädigt wird, andererseits sind kleine Eindringtiefen nur schwer zu messen.

Eindringtiefen können schneller gemessen werden, Eindruckflächen genauer.

Statt der Fläche wird die Diagonale oder der Durchmesser des Eindruckes gemessen. Der Härtewert wird aus der Kraft und der Fläche bzw. der Eindringtiefe ermittelt.

Johan August Brinell (S) stellte sein Verfahren erstmals bei der Weltausstellung 1900 in Paris vor, Hugh und Stanley Rockwell (USA, 1919), Vickers (GB, 1925)

Vickers (HV)



Diamant

Vierseitige Pyramide 136° Winkel zwischen ggü liegenden Flächen.

2 x Diagonale optisch

1 .. 10000

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{\text{Eindruckoberfläche}}$$

Faktor 0,1891 enthält die Umstellung von kp auf Newton und einen Faktor aus der Formel für die Eindruckoberfläche der Pyramide.

210 HV 50/30

Wert Verfahren Kraft/Einwirkzeit

$HBW \approx 0,95 \times HV$ (bis 350?)
 $HRC \approx 0,1 HV$ (200..400HV)

- Prüfkraft frei wählbar → breiter Messbereich
- genauestes Verfahren
- glatte Oberfläche erford.
- besonders geeignet für
 - kleine Kräfte
 - dünne Schichten
 - kleine Teile
 - große Härten

für dünne Schichten, einzelne Körner, Sinter. Schichtdicke > 1,5 x Eindruckdiagonale. Kleine Eindrücke verlangen gute Oberflächen, Prüfkraft < 50N beeinflussen Ergebnis. Nicht für inhomogene grobe Gefüge und rauhen Betrieb wegen der empfindlichen Prüfkörper

Rockwell (HRB, HRC u.a.)



Stahl (HRB)

Diamant (HRC)

HRB (Ball), HRC (Cone) Kegelwinkel 120°, abgerundete Spitze R0,2. Es gibt zahlreiche andere Verfahren.

Eindringtiefe mit Messuhr

HRC 20 .. 70

$$HRC = 100 - \frac{h}{0,002mm}$$

Bleibende Eindringtiefe $h = 0 \dots 0,2$ mm ergibt theoretisch $HRC = 100 \dots 0$, aber an den Grenzen des Messbereiches sind viele Messverfahren ungenau

56 HRC

Wert Verfahren

Zahlreiche Verfahren für andere Probleme

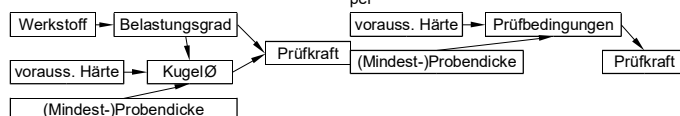
HR allgemein:

- schnell
- einfach durchführbar,
- Oberfläche muss nicht angeschliffen sein

In der Serie automatisierbar oder durch Hilfskräfte

HRC:

- nur für gehärteten Stahl
- Mindestdicke beachten



zahlreiche Verfahren mit Prüfvorkraft

Sonstiges

Vorgehensweise bei Brinell und Vickers: Prüfkraft aufbringen, mindestens 15s einwirken, Durchmesser oder Diagonale optisch ausmessen. Messfehler darf nur 0,5% des Durchmessers betragen, damit der Fehler bei der Härte nur 1% beträgt.

Prüfvorkraft aufbringen, Messuhr nullen, Prüfkraft je nach Typ, entlasten auf Prüfvorkraft wegen elastischer Verformung, Messwert ablesen

andere Verfahren

Mohs 1811: (Diamant Härte 10) Vergleichsverfahren durch Ritzen für Mineralien

Knoop: ähnlich Vickers

Poldi: Stahlkugel zwischen Prüfling und Vergleichsplatte, Prüfkraft mit Hammerschlag

Shore: Rückprallhöhe einer Stahlkugel ist Maß für die Härte, da die verlorene Energie in plastische Umformung umgesetzt wurde.

Universalhärte nimmt auch den Prüfkraftverlauf auf. Einsatzbereich ?

Martenshärte, früher Universalhärte

Video Härteprüfung

Zeigt die Verfahren nacheinander in den Schritten: Anwendung bei; Prüfkörper, Wahl der Prüfkraft, Durchführung, Messung, Ermittlung des Messwertes in Film und Schema.

0433 Definition der Härte

0450 Härte nach Brinell

0563 Härte nach Vickers

0666 Härte nach Rockwell



Vertiefung

Vergleich der Prüfkkräfte zwischen HB und HV z.B. bei Stahlblech 1,2mm dick, S185 ergibt sich in beiden Fällen $F=294,2\text{N}$

Werkstoff_TA_Haertepruefung.odt
Seitenumbruch



sonstige Werkstoffprüfungen

Martenshärte HM

Kerbschlagbiegeversuch

krz-Metalle verspröden bei unterschiedli. Temperaturen, bei den üblichen unlegierten Stählen liegen sie um RT. Bei kfz-Metallen, z.B. austenitischen Stählen, tritt die Versprödung nicht auf, sie sind für Tieftemperaturanwendungen geeignet.

Vertiefung

Nicht im Lehrplan, nicht unterrichten

1) Sonstige Werkstoffprüfverfahren

Früher: Universalhärte

[Schwab 2013] S.179ff: Im Zugversuch von S235 steigen die Festigkeitswerte mit sinkenden Temperaturen, die Streckgrenze stärker als die Zugfestigkeit; bei -160° liegt Re über Rm → S235 hat zwar eine höhere Festigkeit, bricht aber spröde. Durch schnelle Belastung und Kerben kann der Effekt auch bei RT auftreten, dadurch wird der Werkstoff gefährlich. Allerdings sind gekerbte Proben und Schnellzerreißmaschinen teuer; alternativ und billiger ist der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy. Weitere Details ebenda.

2)

Werkstoff_TA_Haerteproofung.odt

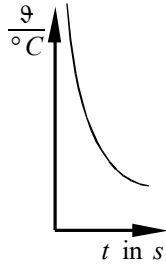
Seitenumbruch



LPE07 Werkstoffkunde

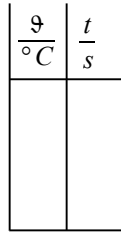
Abkühlungskurven

erwartet

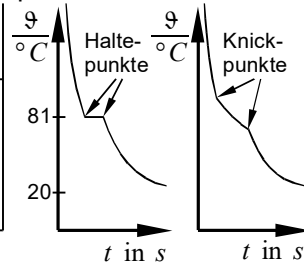


ohne Kristallisationsvorgänge

Naphthalin



Haltepunkte
typisch für
reine Metalle

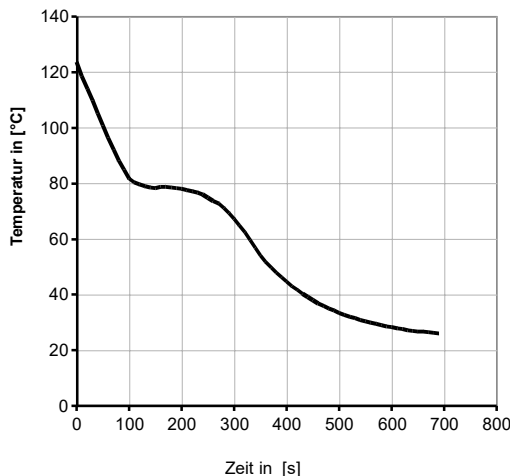


Knickpunkte
typisch für
legierte Metalle



Abkühlungskurven bilden Kristallisationsvorgänge ab und werden zur Untersuchung von Legierungen verwendet.

Abkühlungskurve von Naphthalin (ca. $0,5\text{cm}^3$)



andere untersuchbare Eigenschaften

Sind leicht zu messen und geben Hinweise auf Kristallisationsvorgänge:

- Wärmeausdehnung (Dilatometerkurve)
- Magnetisierbarkeit
- elektr. Widerstand

Vertiefungsfragen

1) Welchen Zweck hat die Beregnung von Obstblüten bei Frost? Wie funktioniert der Frostschutz?

FO Beregnung von Obstblüten bei Frost

- Bei Frost während einer Obstblüte, z.B. Markgräflerland 04/1997 und 03/2006, kann man die Blüten/Früchte mit Wasser beregnen. Solange Wasser gefriert, gibt es Kristallisationsenergie ab und verhindert, dass die Temperatur unter 0°C sinkt und Blüten erfrieren. Das Verfahren funktioniert, solange flüssiges Wasser nachkommt und die Äste nicht brechen.

2) Welche Temperatur hat ein Whisky on the Rocks?

- Solange Eis darin ist, hat der Whisky theoretisch 0°C . Praktisch wird dies nicht erreicht, weil sich in einem Trinkglas gewöhnlich kein thermodynamisches Gleichgewicht einstellt.

Wichtiger Hinweis: Guten Whisky trinkt man nicht mit Eis, schlechten überhaupt nicht.

3) Warum friert man mit nasser Haut?

- Wasser auf der Haut wirkt bei Wind besonders kalt, weil Wind die Verdunstung des Wassers fördert und die notwendige Wärme für den Phasenübergang aus der Umgebung (=Haut) entzogen wird.

Sonstiges

- DIN 1304:1994 enthält für Temperaturangaben in K (Kelvin) die Großbuchstaben T und Θ (%THETA) und für Temperaturangaben in $^{\circ}\text{C}$ die Kleinbuchstaben t und θ (%theta) [Klein 2008] S.947. In Abi-Aufgaben wurde bisher T [K] und ϑ [$^{\circ}\text{C}$] (%varthetaeta) verwendet und damit Verwechslungen mit der Zeit t und zwischen den anderen Schreibweisen von Theta vermieden.

AM Reagenzglas mit Halter, Brenner, Thermometer, 1cm^3 Naphthalin im Reagenzglas

Abkühlungskurve: → [EuroTabM] „Schmelzwärme“, → ab [EuroTabM46] „Abkühlungskurve“

1) Geruchssprobe Naphthalin: Was ist das?

Naphthalin: 2 verbundene Benzolringe, Aromat mit charakteristischem Geruch, früher als Mottenkugeln verwendet, Smp. 81°C , weiße Schuppen, wird aus Steinkohlenteer gewonnen und zur Herstellung von Farbstoffen genutzt.

FO Beschreibung von Naphthalin [Merck 1920], [Christen 1974]

2) Mit dem Naphthalin möchte ich eine Abkühlungskurve aufnehmen (= erhitzen, abkühlen lassen, zeitl. Temperaturverlauf aufzeichnen).

3) Wie sieht die Abkühlungskurve voraussichtlich qualitativ aus?

Sie verläuft asymptotisch zur Umgebungstemperatur (Bild links), weil die Abkühlungsgeschwindigkeit hauptsächlich von $\Delta\vartheta$ abhängt, alle anderen Faktoren wie Oberfläche usw. sind vernachlässigbar oder konstant.

4) Abkühlungskurve als Wertepaare aufnehmen und in ein Diagramm zeichnen (Bild mit Haltepunkten).

1 Schüler erhitzt das Naphthalin im Reagenzglas (mit Thermometer auf $100..200^{\circ}\text{C}$)

1 Zeitnehmer gibt alle 10s ein Signal

1 Leser liest beim Signal die Temperatur ab

1 Schreiber notiert die Werte an der Tafel

1 weiterer Schreiber erstellt parallel die Abkühlungskurve auf FO

5) Beschreiben Sie den Verlauf. Zusammenhang zu Beobachtung?

Temperaturabfall wird unterbrochen beim Erstarren, Temperatur steigt sogar kurzzeitig wieder an (waagerechte Haltelinien ist idealisiert). Real kann die Schmelze unterkühlen, sodass bei einsetzender Erstarrung die Temperatur wieder ansteigt [Domke 1977] S.26.

6) Welche Ursache hat die Unstetigkeit (Haltepunkt)?

Die Wärmeabgabe wird nicht unterbrochen, sondern zeitweilig von innen her ausgeglichen. Ursache sind Kristallisationsvorgänge im Gefüge, hier das Erstarren. Dabei geben Atome beim Übergang vom festen in den flüssigen Zustand einen Teil ihrer Bewegungsenergie als Kristallisationswärme ab. Andere Beispiele sind Sieden, Schmelzen, Änderung der Gitterstruktur, Änderung magnetischer Eigenschaften usw.

7) Anwendung?

Anhand solcher Abkühlungskurven kann man Umwandlungen im Kristallgefüge erkennen. Bei reinen Metallen und eutektischen Legierungen reicht die frei werdende Wärme für Haltepunkte aus, bei sonstigen Legierungen wird die Abkühlung oft nur verlangsamt, es kommt zu Knickpunkten (Bild 3).

Welche Umwandlung im Kristallgefüge stattfindet, muss anderweitig festgestellt werden.

Naphthalin ersetzen durch niedrigschmelzende Metalllegierung

Z.B. Roses Metall ($1\text{Pb} + 1\text{Sn} + 2\text{Bi} \rightarrow$ Smp 98°C), Woodsches Metall ($1\text{Pb} + 0,5\text{Sn} + 0,5\text{Cd} + 2\text{Bi} \rightarrow$ Smp 75°C), Fieldsches Metall ($3\text{In} + 2\text{Sn} + 1\text{Bi} \rightarrow 62^{\circ}\text{C}$), Galinstan (Ga, In, Sn $\rightarrow$ Smp $< 11^{\circ}\text{C}$)

Dilatation kann man mit Blumenbindendraht und einem Netzgerät zeigen. Einige Ampere bringen den quer gespannten Draht zum Glühen und Durchhängen; Nach dem Abschalten sieht man beim Zusammenziehen eine plötzliche Verlängerung → Austenit wandelt sich in Ferrit um.

4) Endlich ruft die neue Flamme an: Er/Sie käme in 30 Minuten, der Schampus möge kalt sein! Schampus ist da, aber warm. Wie bekommt man ihn am schnellsten kalt (Idealtemperatur ca. 10°C)?

- Kühlfach: Nur nicht vergessen, wenn die Begrüßung länger dauert!
- Fließend kalt Wasser: Sehr schnell wirksam, aber nicht sehr kalt.
- Profitrick: In Eis legen und 3 Esslöffel Salz darüber geben! Salz taut das Eis und entzieht der Umgebung, darunter der Schampusflasche, die Schmelzwärme.
- Das Legierungssystem $\text{H}_2\text{O} - \text{NaCl}$ hat sein Eutektikum bei $-21,3^{\circ}\text{C}$ und 23,4 Gew.-% NaCl.
- Weitere Kältemischungen → [Bernoulli 1888] S.329

Versuch: Flaschen Mineralwasser kühlen, anschließend Temperatur prüfen

5) 1kg Eis soll mit 1kg warmen Wasser geschmolzen werden. Welche Temperatur muss das warme Wasser mindestens haben?

- [EuroTabM] „Wärmekapazität“: Die spez. Schmelzwärme von Eis beträgt $q = 332\text{ kJ/kg}$ und die spezifische Wärmekapazität von Wasser $c = 4,18\text{ kJ/kgK}$. Man muss 1kg flüssiges Wasser also auf 80°C erwärmen, damit es $Q = 4,18\text{ kJ/kg} \cdot 80\text{K} = 334\text{ kJ}$ abgeben kann, bevor es selbst 0°C erreicht und zu erstarren beginnt.
- Mit der veralteten Einheit kcal (Kilokalorie) war die Rechnung einfacher: 1 kcal entsprach der Wärmemenge, mit der man ein kg Wasser um 1°C erwärmen kann, und die Schmelzwärme von Eis war mit 80 kcal/kg angegeben [Dubbel 11 I] S.740. Nach [Wolke 1997] S.220.

Abkühlungsgeschwindigkeit beeinflusst Kristallisation.

Umwandlungstemperaturen verschieben sich bei schneller Abkühlung in Richtung tiefer Temperaturen, bzw. bei schneller Erwärmung in Richtung hoher Temperaturen (Hysterese). Kristallisationsvorgänge können auch durch die Dilatation (Längenänderung) oder Magnetisierbarkeit ermittelt werden.



Zustandsschaubilder (erstellen)

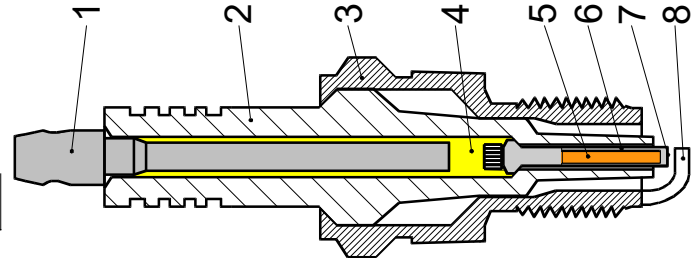
AM Zündkerze

1) Ein: Zweck, Funktion, Belastung der Elektrode?

In Ottomotoren zünden Zündkerzen das Kraftstoff-Luftgemisch durch Funkenüberschlag infolge Hochspannung 50/s bei 6000/min. Die Elektroden benötigen niedrige Ionisationsenergie (nötige Arbeit für den Austritt von Elektronen aus dem Material) oder kleine ϕ (erfordert hohen Smp), Beständigkeit gegen Temperatur (Verbrennungstemperatur bis 3000°C, Zündspannung 40kV), Oxidation und Abgasbestandteile, hoher Siedepunkt (verringert Funken-erosion), elektr. Leitfähigkeit (untergeordnet, Kabel haben 10x höheren Widerstand), Wärme-wert zu kalte Kerzen (<400°C) verrußen, zu heiße Kerzen (>900°C) fördern Selbstzündung) usw.

Werte prüfen	Wärmeleitfähigkeit W / (m K)	elektr. Leitfähigkeit m/(Qmm²) = 10⁹ A/(Vm)	Schmelzpunkt °C	Siedepunkt °C	1. Ionisierungsenergie kJ/mol Austrittsarbeit eV
Kupfer	384	56	1084	2590	745,5 4,65
Nickel	91	13,9	1455	2913	737 5,15
Barium	18	2,94	727	2143	502,9 2,7
Platin	72	10	1768	3825/4400	870 5,65
Silber	407	66,5	961	2162	731 4,26
Iridium	150/59	19,7/18,8	2466	4428	880 kA
Yttrium	17,7	1,66	1526	3336	600 kA

FO Aufbau einer Zündkerze



1) Anschlussbolzen 2) Al₂O₃-Keramik als Isolator, 3) Gehäuse, 4) elektr. leitendes Glas, 5-7) Mittelelektrode, 5) Kern aus Cu, 6) Hülle aus Ni, 7) ev. Beschichtung mit Platin o.ä., 8) Masseelektrode. Funke springt von der Mittelelektrode (bis -30kV) zur Masseelektrode.

Zur Menge der Legierungen: Schon für das (bloß ternäre) Systemes Ga – In – Sn, das z.B. in Fieberthermometern als Hg-Ersatz verwendet wird, findet man in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben über niedrigsten Smp. [<http://de.wikipedia.org/wiki/Galinstan>] (02/2011)]

2) Wie stellt man die Eigenschaften von Metallen fest?

Zugversuch, Härteprüfung und 1000 andere.

3) Welche Möglichkeiten hat man, wenn die Eigenschaften der reinen Metalle nicht ausreichen? Legieren.

Legierung kommt von lat. ligare = binden, vereinigen

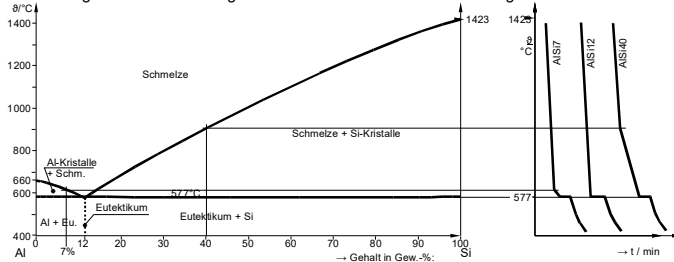
4) Wie findet man die richtige Legierung heraus?

Ebenfalls durch Werkstoffprüfung. Es kann aber nicht jede denkbare Legierung bei allen möglichen Temperaturen, Wärmebehandlungszuständen, Walzzuständen, Belastungen usw. untersucht werden, da es zu viele gibt.

5) Bei der Lösung des Problems helfen Abkühlungskurven!

Mit Abkühlungskurven (Dilatationskurven ...) kann man Zustandsdiagramme erstellen und muss dann nur jede Phase näher untersuchen, um erfolgversprechenden Eigenschaften auf die Spur zu kommen.

Entwicklung eines Zustandsdiagramms aus einer Schar von Abkühlungskurven



Ab-schätzung der Anzahl der möglichen Kombinationen von Legierungen

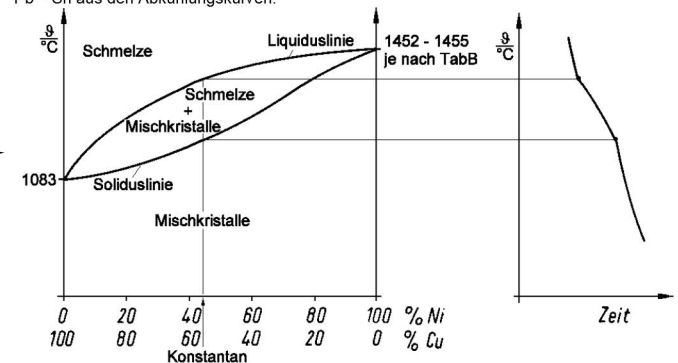
beteiligte Elemente	Bezeichnung des Legierungssystems	Anz. der Systeme bei 50 relevanten Elementen	Anzahl der mögl. Legierungen je System bei 1% Abstufung
1	reines Metall	50 ¹ =	50
2	binäre Legierung	50 ² =	2'500
3	ternäre Legierung	50 ³ =	125'000
4	quaternäre Legierung	50 ⁴ =	6'250'000
5	quinäre Legierung	50 ⁵ =	312'500'000
6	senäre Legierung	50 ⁶ =	15'625'000'000

Quaternär kommt nicht vom lat. quartus = der Vierte (vgl. Quartett), sondern von quaterni = je vier; vgl. auch quater bzw. quattuor = viermal [Stowasser 1971].

AB Zweistofflegierungen

1) Entwicklung von Zustandsdiagrammen aus Abkühlungskurven auf dem Arbeitsblatt

Zeichnen sie die (vereinfachten) Zustandsdiagramme der Zweistoff-Legierungen Cu – Ni und Pb – Sn aus den Abkühlungskurven.



Zweck

Zustandsschaubilder von Legierungen stellen, abhängig von Zusammensetzung und Temperatur, die Bereiche ähnlicher Eigenschaften in Phasen dar.

Ermittlung der Phasen

Legierungen kühlen langsam aus der Schmelze ab, dabei werden einfach messbare Eigenschaften beobachtet, z.B.

- Temperaturverlauf (Abkühlungskurve)
- Länge (Dilatometerkurve)
- Magnetisierbarkeit

Sprunghafte Änderungen dieser Eigenschaften deuten auf Vorgänge im Kristallgefüge hin und werden im Zustandsschaubild als Phasengrenzen dargestellt.

FO Abkühlungs- und Dilatometerkurve von Fe

FO Beregnungsanlage

1) Beschreiben Sie den physikalischen Vorgang des Erstarrens.

Zitrusbauer beregnen ihre Bäume bei Frost

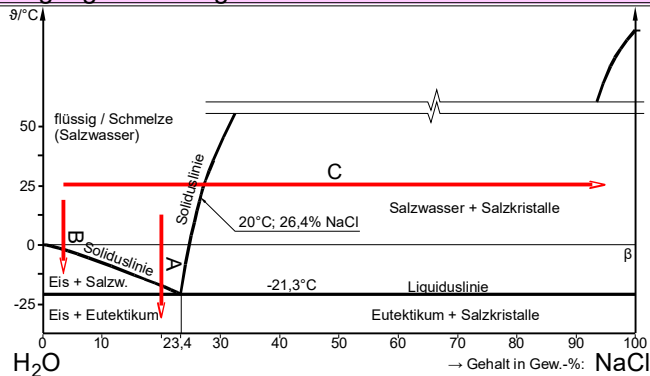
Sobald Atome die Schmelztemperatur erreicht haben und einen günstigen Platz gefunden haben, binden sie sich in die feste Struktur ein. Dabei geben sie Bewegungsenergie als Kristallisationswärme ab (beim Schmelzen umgekehrt). Durch weiteren Entzug von Wärme findet kein Temperaturabfall statt, sondern weitere Atome erstarren, bis der Phasenübergang vollständig vollzogen ist. Durch das Halten der Temperatur beim Phasenübergang haben Atome Zeit, ihre Gitterplätze zu suchen.

Bei reinen Metallen reicht die freiwerdende Wärme für Haltepunkte aus, bei Legierungen wird die Abkühlung nur verlangsamt, es kommt zu Knickpunkten (Bild 3).

siehe sachlogische Analyse



Vorgänge im Gefüge beim Abkühlen



→ [EuroTabM] „Zustandsdiagramme“ (ab 46. Auflage)

FO Legierungssystem Wasser-Salz

- 1) Ein: Welches System? Bedeutung der Linien und Felder (Phasen)
Fest und flüssig sind bekannt, Liquidus- und Soliduslinie vorgeben. Beide Begriffe stammen aus dem Lateinischen, vgl: liquide sein, Likör, solides Metall (=rein), Sold (= reines Metall), Soldat, Söldner (wurden mit reinem Metall bezahlt).
- 2) Was passiert zwischen Solidus- und Liquiduslinie? Nennen Sie praktische Beispiele mit Salzwasser und erklären das Zustandsschaubild.
A: Auftausalz: Glatteisbildung kann theoretisch bis -23,4°C verzögert werden. In der Praxis wirkt es nur bis etwa -15°C wegen des ungenauen Mischungsverhältnisses. Mehr Streuen verbessert die Wirkung nicht.
B: Meerwasser (ca. 3,5% NaCl) kühlt in einer Strömung zum Nordpol ab: Nach Unterschreiten der Soliduslinie kristallisiert Eis heraus → Eiskristalle, -Schollen oder -Berge bestehen aus Süßwasser. Im verbleibenden Salzwasser steigt (theoretisch) der Salzgehalt. In der Praxis haben kalte Meere einen unterdurchschnittlichen Salzgehalt, weil warme Meere mehr Wasser durch Verdunstung verlieren.

FO Eisberge

- C: Meersalzgewinnung in Salzgärten: Meerwasser wird der Verdunstung durch Sonneneinstrahlung und Wind ausgesetzt, sodass seine Salzkonzentration steigt. Nach Überschreiten der Löslichkeitsgrenze (Soliduslinie) kristallisiert Salz.

FO Meersalzgewinnung in Salzgärten

- 1) Übertragen Sie Beschriftung sinngemäß von H₂O-NaCl auf Pb-Sn.

AB Zweistofflegierungen 1

Bislang ohne Eutektikum.

- 2) Vorgänge beim Abkühlen von PbSn25 aus der Schmelze?

AB Zweistofflegierungen 2

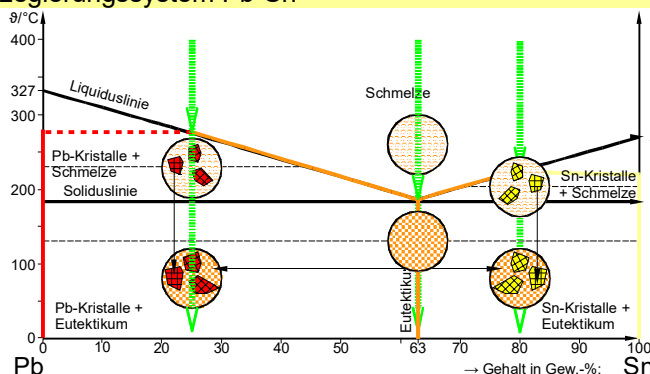
- Bis zu Liquiduslinie finden keine Kristallisationsvorgänge statt.
 - Oberhalb der Liquiduslinie ist PbSn25 (senkrechte breite Linie) flüssig.
 - Unter der Liquiduslinie kristallisiert reines Blei aus der Schmelze, deren Zinn-Gehalt dadurch steigt. Dabei wird Kristallisationsenergie frei, die die Abkühlung verlangsamt. Das System trennt sich also in zwei Phasen (Pb-Kristalle und Schmelze), die beim weiteren Abkühlen nicht mehr zueinander finden werden. Die temperaturabhängige Zusammensetzung der Phasen kann unter dem Schnittpunkt zwischen Temperatur und Phasengrenze abgelesen werden. Bei 250°C enthalten die Bleikristalle 0% Zinn (idealisiert) und die Schmelze ca. 33% Zinn (siehe Diagramm). Mit weiterem Abkühlen wachsen die Bleikristalle oder werden mehr.
 - Mit Erreichen der Soliduslinie ist das Wachstum der großen Bleikristalle abgeschlossen, und die Schmelze hat die eutektische Legierung erreicht. Mit Unterschreiten der Soliduslinie erstarrt die Restschmelze zum Eutektikum. Da die Bestandteile Pb und Sn immer noch nicht in gemeinsamen Kristallen kristallisieren 'wollen', bildet sich ein Gemisch aus Pb-Kristallen und Sn-Kristallen. Da die verfügbare Zeit relativ kurz ist, haben die Körner keine Zeit zu wachsen. Das Gefüge besteht also aus großen Bleikristallen, die in Eutektikum eingebettet sind. Das Eutektikum wiederum besteht aus einem feinkörnigen Gemisch von Kristallen, die entweder aus Pb oder aus Sn bestehen (idealisiert, tatsächlich kann jedes Element ein paar Prozent des anderen lösen.)
- 3) Vorgänge beim Abkühlen von PbSn80 aus der Schmelze?
 - 4) Vorgänge beim Abkühlen von PbSn63 aus der Schmelze?

Kristallgemisch

Voraussetzung:

– Vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand

Legierungssystem Pb-Sn



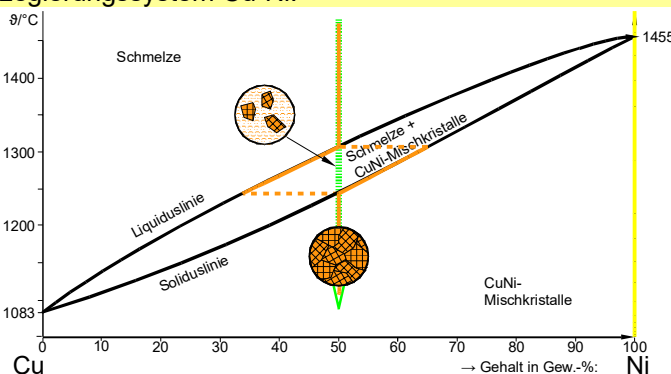
Eselsbrücke: Das K von Kristallgemisch liegt im Bild

Mischkristall

Voraussetzung:

– Vollkommene Löslichkeit im festen Zustand durch Ähnlichkeit in Atomgröße, Gitterkonstante und Gittertyp

Legierungssystem Cu-Ni:



Vertiefung

- 1) Warum verwendet man zum Löten L-PbSn60 und zum Glätten ausgebeulten Karosserien als „Schwemmzinn“ z.B. L-PbSn25Sb?
– Dies hängt mit den Verarbeitungstechniken zusammen: L-PbSn25Sb ist in weitem Temperaturbereich teigig und damit besser zu modellieren, L-PbSn60 schmilzt bei niedriger Temperatur vollständig und fließt dadurch besser.

Werkstoff_TA_Zustandsschaubilder-Vorgaenge.odt

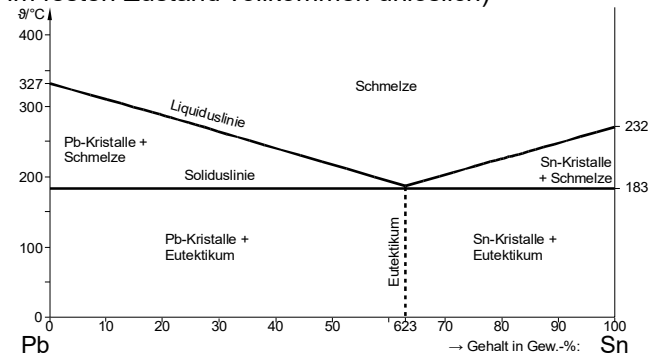


Zustandsschaubilder (Beispiele)

Kristallgemische (eutektische Systeme)

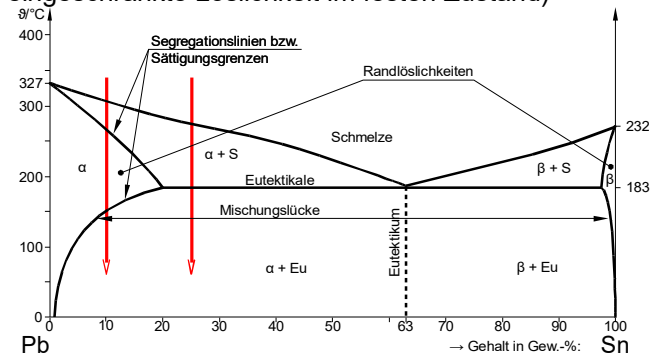
Pb – Sn (idealisiert)

im festen Zustand vollkommen unlöslich



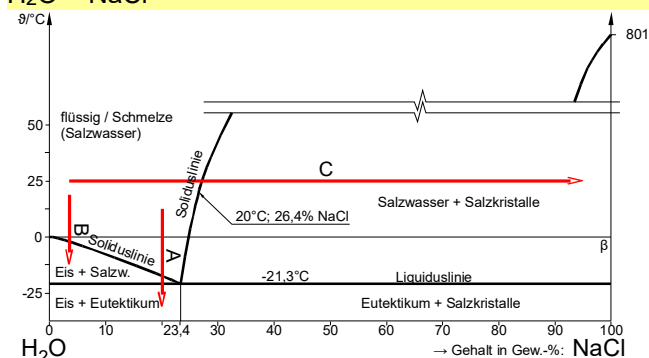
Pb – Sn (real: mit Randlöslichkeit)

eingeschränkte Löslichkeit im festen Zustand



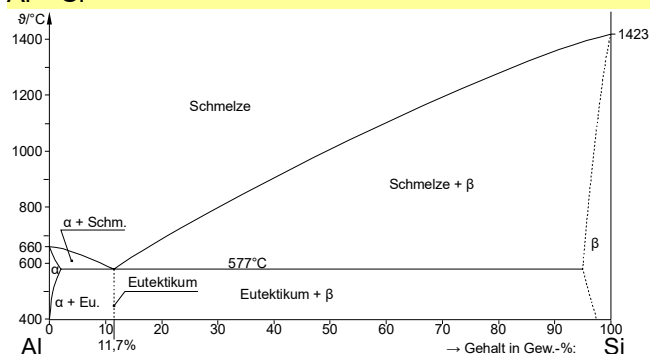
α : Pb, darin gelöst max. 20% Sn. β : Sn, darin gelöst max. 2% Pb
Anwendung: Klempnerlot PbSn25, Sickerlot PbSn63 zum Lötten.
Das Eutektikum liegt bei 63,2 Gew.-% Sn. Das entspricht PbSn3 (chemisch) → Gegenprobe mit den Atommassen: $63,2\% = (3 \times 118,71) / (207,2 + 3 \times 118,71)$

H₂O – NaCl



Eutektikum bei -21,3°C und 23,4 Gew.-% NaCl. NaCl: Schmelzpunkt 801°C; Siedepunkt 801°C. 26,4% NaCl ist die Löslichkeit bei 20°C und entspricht 359g NaCl pro 1 l Wasser.
Anwendung: Auftausalz (A), Meerwasser bei Frost (B), Meerwasser in Salzgärten (C)
H₂O – KCl: eutektischer Punkt bei 19,5 Gew.-% K und -10,7°C [Sattler 2007] S.69.
A+B: Abkühlung bei verschiedenen Salzkonzentrationen; z.B. Auftausalz
C: Verdunstung von Wasser, z.B. bei der Meersalzproduktion
D: Wenn man Wasser in Salz auflöst, kühlt es ab

Al – Si



α : Al, darin gelöst max. 1,59% Si. Eutektikum bei 11,7%. β : Si, darin gelöst max. 2% Al
Anwendung: AlSi12 ist eine typische Gusslegierung und wird z.B. für Motorblöcke, Kolben usw. verwendet. Si senkt den Schmelzpunkt und erhöht die Festigkeit, Si-Kristalle (β) und machen die Legierung verschleißfester.

Zahlreiche Zustandsdiagramme: → [Fenchel 1911]

Zustandschaubild Al₂O₃ – Kryolith

1) Warum haben Pb100 bzw. Sn100 keine Knick- und Haltepunkte auf der Soliduslinie (183°C-Linie, Eutektikale)?

Reine Metalle haben keinen Schmelzbereich, sondern erstarren bei einem Schmelzpunkt. Im realen Phasendiagramm äußert sich dies, indem Liquidus- und Soliduslinie in Richtung der reinen Metalle aufeinander zulaufen. Dadurch öffnen sich die Phasen α und β (→ Pb-Sn real), die zeigen, dass ein Metallgitter in mehr (→ Tonerde-Kryolith) oder weniger (→ Pb – Bi) geringem Umfang Atome eines anderen Metalls aufnehmen kann. Man spricht von begrenzter Löslichkeit im festen Zustand bzw. von Randlöslichkeit.

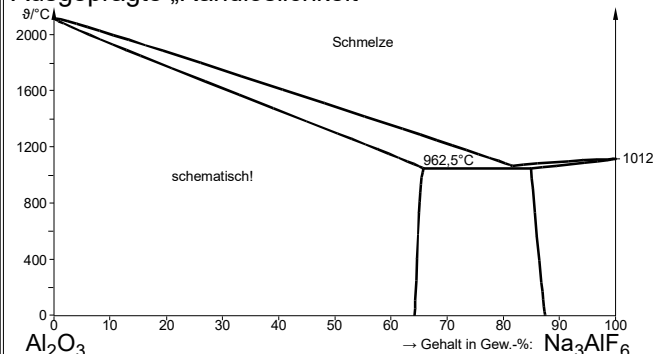
FO reales Zustandschaubild Pb-Sn

2) Beschreiben Sie die realen Vorgänge beim Abkühlen von PbSn10 und PbSn30 aus der Schmelze.

A: Zwischen Liquidus- und Soliduslinie kristallisieren α -Kristalle (= Pb-Gitter mit gelöstem Sn). Mit fallender Temperatur steigt die Löslichkeit von Sn in den α -Kristallen, d.h. die α -Kristalle kristallisieren mit höherem Sn-Anteil. Bei langsamer Abkühlung gleichen sich auch in den bestehenden Kristallen die Konzentrationen durch Diffusion aus. Mit Erreichen der Soliduslinie besteht das Gefüge aus α -Kristallen mit 10% Sn. Unterhalb 183°C nimmt die Löslichkeit von Sn in Pb wieder ab. Bei etwa 150°C beträgt die Löslichkeit nur noch 10%, darunter scheiden die α -Kristalle (Primärkristalle) Sn aus, das sich an den Korngrenzen anreichert (Sekundärkristalle).
B: Knapp unter der 183°C-Linie besteht das Gefüge aus in Eutektikum eingebetteten α -Kristallen. Bei weiterer Abkühlung scheiden die α -Kristalle Korngrenzen-Zinn aus.

Tonerde Al₂O₃ – Kryolith Na₃AlF₆

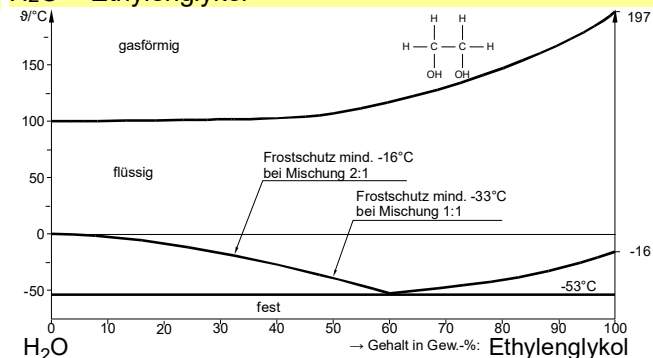
Ausgeprägte „Randlöslichkeit“



Eutektikum bei 935°C und 18,5 Gew.-% Tonerde. Schmelzpunkte: Tonerde 2060°C; Kryolith 980°C. Das reale Zustandschaubild hat extrem breite Randlöslichkeiten [Domke 1977] S.192.

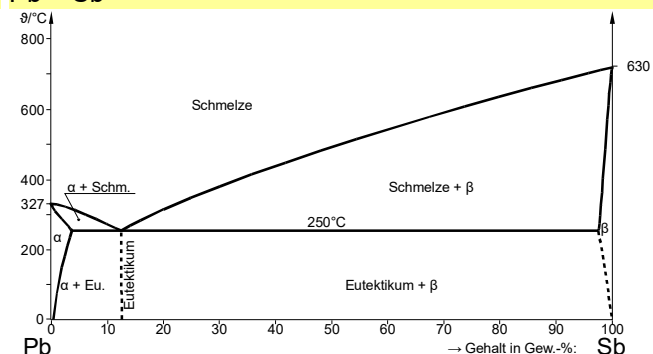
Anwendung: Herabsetzung des Smp. von Tonerde bei der Elektrolyse von Al.

H₂O – Ethylenglykol



Eutektikum bei ca. -54°C und 60 Vol.-% Glykol.
Ethylenglykol Smp -16°C, Flammpunkt 111°C, Zündtemperatur 410°C, min. letale Dosis ca. 100ml, Dichte 1,11kg/dm³ [Wikipedia]; spez. Wärmekapazität 2,0 kJ/(kgK) [HJTabKfz]
Anwendung: Frostschutzmittel schützt auch zwischen Solidus- und Liquiduslinie, da die Mischung in dieser Phase nicht vollkommen fest wird, sich bewegen und deshalb keinen großen Gefrierdruck aufbauen kann.

Pb – Sb



α : Pb, darin gelöst max. 3% Sb. Eutektikum bei 11% (stark abhängig von Verunreinigungen)
 β : Sb, darin gelöst max. 2% Pb. (Warum ist die Segregationslinie gestrichelt ([Bargel/Schulze 2005] S.307; [Domke 1977] S238)?
Anwendung: Hartblei (Sb bis 5%), Kabelmantele



Pb – Bi (fehlt)

Cd – Bi (fehlt)

→ [EuroTabM] „Zustandsschaubilder“ (ab 46. Auflage)

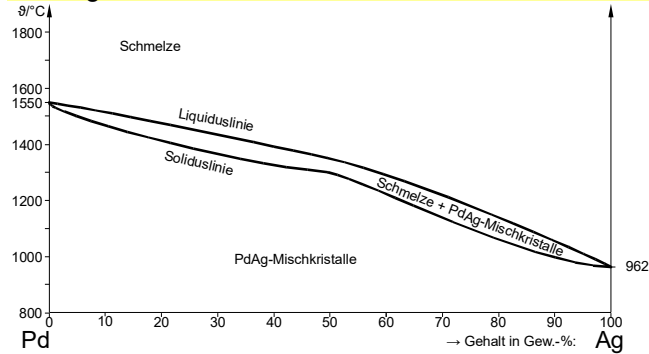
Cd-Bi-Legierungen werden für Schmelzsicherungen eingesetzt.

Pb – Ag (fehlt)

[Fenchel 1911] S.76: Zustandsschaubild Pb – Ag; Smp. Pb 327°C, Smp Ag 961°C, Eutektikum bei 2 Masse-% Ag und 305°C. „Infolgedessen lässt sich eine silberhaltige Bleilegierung durch Ausschmelzen des Eutektikums veredeln.“; Im übereutektischen PbAg kristallisiert zuerst Silber. Untereutektisch kann man → Kupellation verwenden.

Mischkristalle

Pd – Ag



[Fenchel 1911] S.77

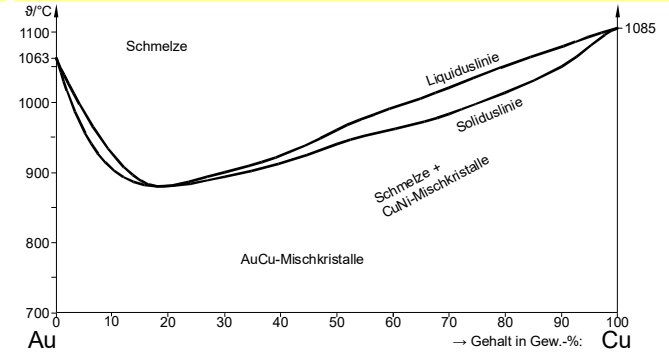
Ag – Cu (fehlt)

Eutektikum bei 779°C und 72 Gew.-% Ag ([Fenchel 1911] S.50, gibt Atom-% an). <http://www.mple.de/index.php?id=2380>: „Das binäre Phasenzustandsdiagramm Cu-Ag besteht aus einem einfach eutektischen System mit Randlöslichkeiten auf beiden Seiten im festem Zustand... Die eutektische Temperatur liegt bei 779°C bei einem Cu-Gehalt von 28 Gew.%. So beträgt die max. Randlöslichkeit von Cu in Ag bei 779°C 8,9 Gew. % (14,22 at %), bei 100°C jedoch nur noch 0,2 Gew. % (0,34 at %). Die maximale Löslichkeit von Ag in Cu beträgt bei 779°C schwankt je nach Autor zw. 7 Gew. % (4,25 at %) und 10 Gew. % (6,14 at %). Die Löslichkeit sinkt ab einer Temperatur kleiner 300°C unter 0,25 Gew. % (0,12 at %).“

Al – Zn (fehlt)

[Fenchel 1911] S.109

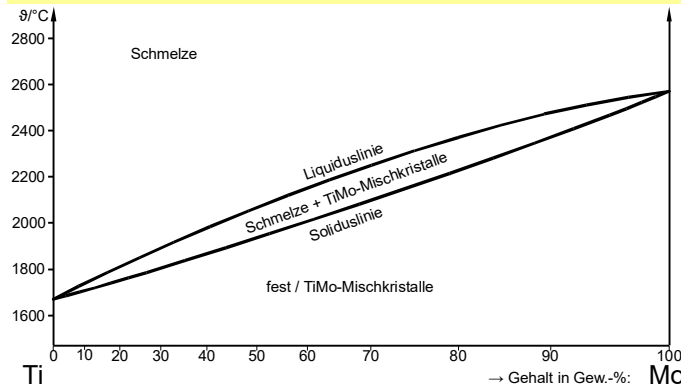
Au – Cu



[Fenchel 1911] S.50, ähnlich Mn-Cu [Fenchel 1911] S.58, Das Zustandsschaubild sieht ziemlich deformiert aus, ist aber ein Mischkristall.

Begründung für das Schmelztemperaturminimum unterhalb derer der reinen Metalle?

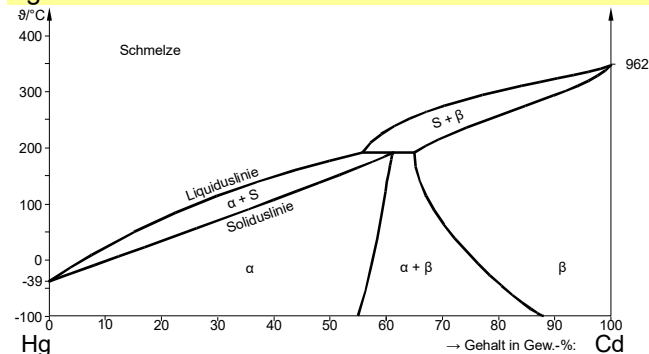
Ti – Mo



Die Zusammensetzung ist linear für Mol-% skaliert, deshalb erscheinen Gew.-% verzerrt.

Peritektische Systeme

Hg – Cd



[Fenchel 1911] S.127

Im EKD gibt es ein peritektisches Teilsystem um den Punkt A herum.

Au – Ag (fehlt)

Elektron (grch.) = natürlich vorkommende Au-Ag-Legierungen oder Bernstein. [Fenchel 1911] S.71: Zustandsschaubild Au - Ag Unter Krösus (~590-541 v.u.Z.) entstanden in Lydien (um das heutige Izmir, Türkei) Verfahren, den Silbergehalt von Gold einzustellen. Daraus wurden erstmalig Münzen erstellt, die im Mittelmeerraum sehr begehrt waren. Den Gehalt von Au-Ag-Legierungen bestimmt man bis heute durch Farbvergleich von Strichen auf (=Lydischer Stein).

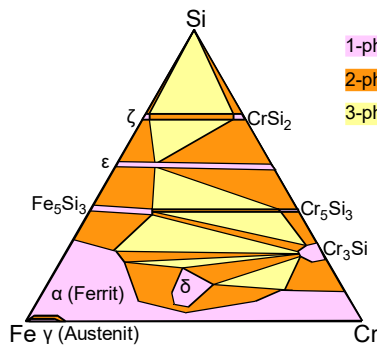
Nicht im Lehrplan

Beschreibung siehe [Bargel/Schulze 2005], [Domke 1977]

Nicht im Lehrplan

Gibbs'sches Dreieck:

visualisiert Legierungsanteile in Dreistoffsystemen



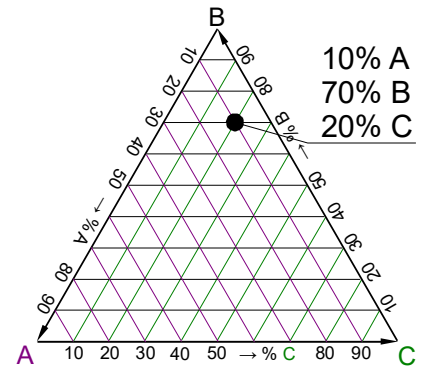
1-phasig

2-phasig

3-phasig

Nach: [SdW] 11/1995

Die Zusammensetzung mehrphasiger Gebiete kann an den Phasengrenzen abgelesen werden.



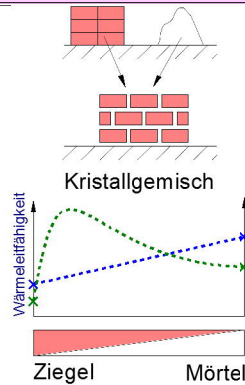
quartärnere .. Phasendiagramme

- Natriumborosilikat; Quelle: [http://de.wikipedia.org/wiki/Por%³C3%B6ses_Glas](http://de.wikipedia.org/wiki/Por%C3%B6ses_Glas); Anwendung: Glas
- Liquidustemperaturen des Systemes Pb-Sn-Bi, [Fenchel 1911] S.167
- ternäres System Au – Ag – Cu
- Dreistoffsystem Quarz – Tonerde – Feldspat: [Hütte 29] D21
- Googeln: „ternäres Phasendiagramm“



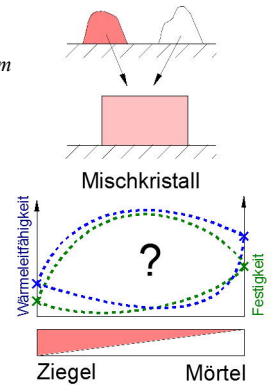
Eigenschaften von Legierungen

- Gegeben sei eine Mauer (→ Kristallgemisch) aus Ziegeln (niedriger Wärmeleitwert) und Mörtel (hoher W). Wie groß wird der Wärmeleitwert sein abhängig vom Mischungsverhältnis Ziegel – Mörtel? Wärmeleitwert wird sich etwa linear mit dem Mischungsverhältnis ändern.
- Wie wird sich die Festigkeit verändern? Eine Ziegelmauer ohne Mörtel hat eine geringe Festigkeit, Mörtel ohne Ziegel hält auch nicht viel, der Höchstwert der Festigkeit liegt dazwischen.



nach [Bargel/Schulze 2005] S50ff

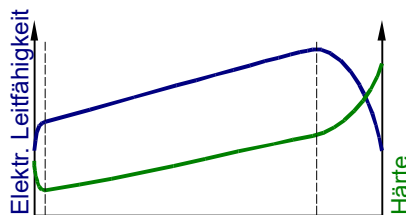
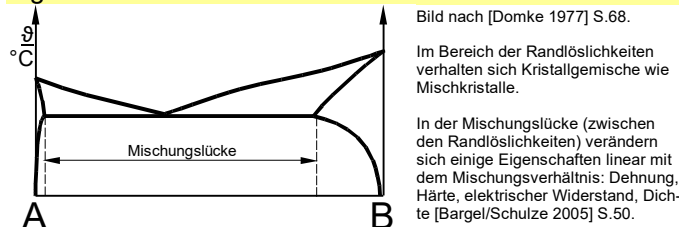
- Man könnte die Ziegel auch zermahlen und mit Mörtel mischen (→ Mischkristall). Wie würden sich die Eigenschaften abhängig vom Mischungsverhältnis Ziegel – Mörtel verändern? Das ist so nicht vorhersehbar, weil sich die Struktur des Materials grundsätzlich ändert..



Kristallgemische

- Legierung verändert nicht die Eigenschaften der Körner, sondern ihre Häufigkeit
 - Eigenschaften tendieren zum linearen Übergang
 - Extremwerte sind nicht zu erwarten

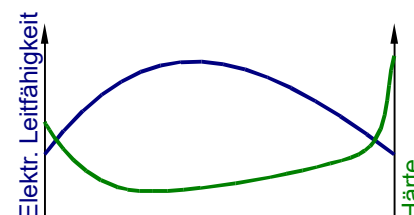
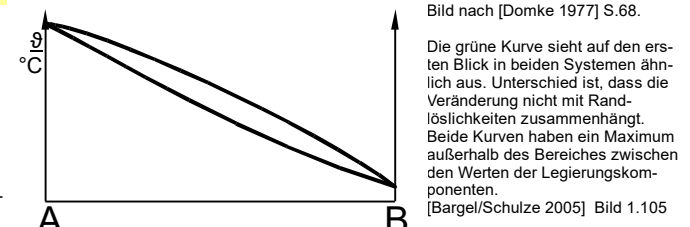
Eigenschaften



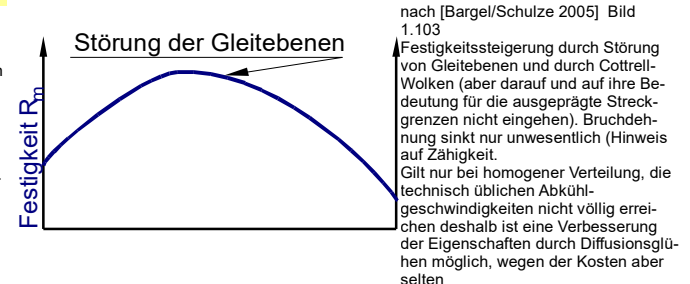
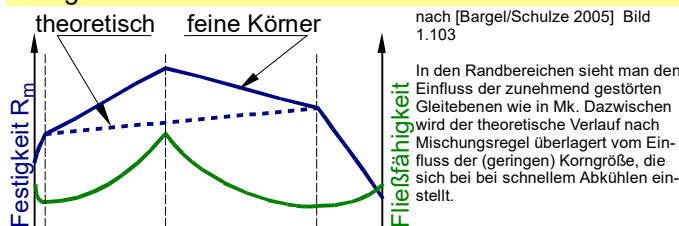
[Bargel/Schulze 2005] Bild S279ff

Mischkristalle

- Legierung verändert jedes Korn durch Gitterstörungen
 - Eigenschaften von MK können erheblich von denen der Komponenten abweichen
 - wichtig bei der Suche nach neuen Eigenschaften



Festigkeit



Gusslegierung

Eutektikum = sehr feines Kristallgemisch, z.B. aus Pb-Kristallen und Sn-Kristallen
→ hohe Festigkeit (durch die feinen Körner)

[Schwab 2013] S.45: „Erst bei hohen Temperaturen stellen Korngrenzen Schwachpunkte dar, weil dann ein Korn am anderen abgleiten kann, so wie Menschen auf Glatteis.“

- niedriger Schmelzpunkt (im Vgl. mit Reinetallen)
- dünnflüssig bis zum Erstarren (fließt in jede Ecke)
- Im Kristallgemisch brechen die härteren Körner den Span → gut zerspanbar

Knetlegierung

→ TabB „Knetlegierungen, Gusslegierungen“

- Alle Kristalle haben die gleiche Zusammensetzung
- Umformarbeit verteilt sich gleichmäßig auf alle Kristalle
- Dadurch ist eine große Umformung möglich
- gut umformbar

Das homogene Mischkristall-Gefüge bewirkt unerwünscht lange Späne → schlecht zerspanbar

Hinweis: lange Späne können sich um das Drehteil wickeln und den Fertigungsprozess stören.

Beispiel: Damaszenerklingen wie aus Wootz-Barren nachzubauen gelingt ab etwa 0,003% V [SdW] 10/2001

FO Eigenschaften CuNi, CuZn

FO Zustandsschaubild Pb-Sn, Al-Si, ..

FO Zustandsschaubild Cu-Ni

FO Zustandsschaubild Cu-Zn (Messing)

Vorgänge auf atomarer Ebene gehorchen thermodynamischen Gesetzen und sind berechenbar. Seit etwa 2000 gibt es Programme, die Phasendiagramme von Mehrstofflegierungen berechnen können.

Werkstoff_TA_Legierungen-Eigenschaften.odt

Einfluss von Verunreinigungen

[Domke 1977] Bild 96, [Bargel/Schulze 2005] Bild S 272

Vertiefung

Messing: [Domke 1977] Bild 100f, [Bargel/Schulze 2005] Bild S276
Bronze Bild 102, [Bargel/Schulze 2005] Bild S278

Mehrstofflegierungen sind noch lange nicht erforscht, da es zu viele Kombinationen von Legierungen (Wärmebehandlungsverfahren usw.) gibt. Werkstofftechnik beeinflusst die Umsetzung vieler Konstruktionssideen wesentlich (z.B. Hydrostößel, Al im Motorenbau, Schneidkeramik) und ist wesentlich für die Techniksprung der letzten 20 Jahre verantwortlich (der weniger bekannt ist als der Sprung in der Computertechnik). Werkstofftechnik ist z.Zt. eines der Gebiete, auf dem man Spitzenforschung betreiben kann ohne Deutschland zu verlassen.



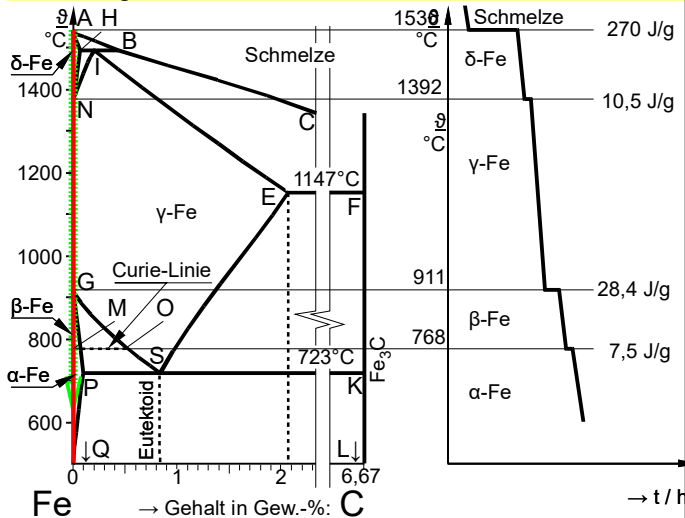


Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Eisen-Kohlenstoffdiagramm

Legierungssystem Fe-C

Abkühlung Reineisen



1) Nur Ableseübungen zum Gewöhnen an die Begriffe Austenit & Co. Erklärung später.

Quelle: [Seidel/Hahn 2010]

2) Parallel Regeln zum Lesen von Phasendiagrammen festhalten → beim Gesetz der abgewandten Hebelarme wiederverwerten.

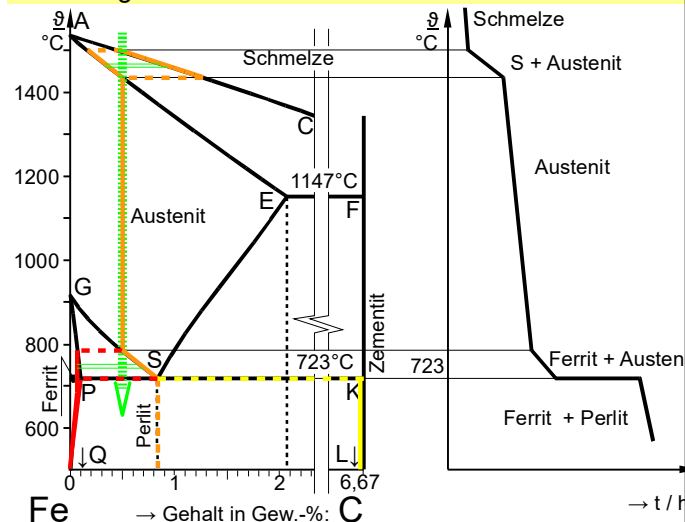
- In Mischphasen zieht man eine Waagerechte bis zu den nächsten Phasengrenzen und liest dort ab, aus welchem Phasen die Mischung besteht.
- Wenn Mischphasen ihre Löslichkeitsgrenze erreichen, scheiden sie die unlöslichen Anteile aus, im festen Zustand an die Korngrenzen.

Temperaturen und Kristallisationsenergien aus [Domke 1977]. Laut [Seidel/Hahn 2010] S.92 gibt es eine Hysterese mit 898°C für die Umwandlung $\gamma \rightarrow \beta$, und 911°C für $\beta \rightarrow \gamma$.

Metalle mit mehreren Kristallisationsformen nennt man polymorph. Die einzelnen Formen werden mit griechischen Buchstaben α , β , γ ... bezeichnet, beginnend mit den niedrigen Temperaturen.

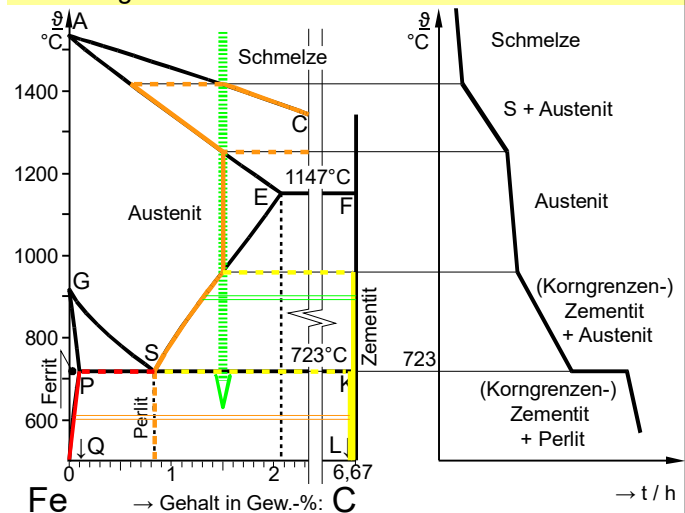
- Über 1536°C (Punkt A) ist Eisen flüssig.
- Bei 1536°C (A) kristallisiert die Schmelze zu δ -Fe. Da sich das ganze Material 'gleichzeitig' umwandelt, zeigt die Abkühlungskurve einen Haltepunkt.
- Bei 1392°C (N) wandelt sich das δ -Fe zu γ -Fe (Haltepunkt).
- Bei 911°C (G) wandelt sich γ -Fe zu β -Fe (Haltepunkt).
- Bei 768°C (M) wandelt sich β -Fe zu α -Fe (Haltepunkt). α -Fe und β -Fe unterscheiden sich nur dadurch, dass β -Fe nicht magnetisch ist. Wenn es auf diese Eigenschaft nicht ankommt, bezeichnet man beide Formen mit α -Fe bzw. Ferrit. Die Linie, an der sich α -Fe und β -Fe ineinander umwandeln, ist die sogenannte Curie-Linie. Sie verläuft bei etwa 768°C und dann knapp unterhalb der Linie G-S-K.
- Die Energien, die bei den Kristallisationsvorgängen freiwerden, kann man nicht aus dem Zustandsdiagramm ablesen.
- Der Bereich um den Gipfel B-H-I-N wird in EKD für Techniker meistens weggelassen, weil er keine praktische Bedeutung hat. Hier max. 1x zeigen, dann nicht wieder.

Abkühlung von C50



- Über der A-C – Linie ist C50 vollständig geschmolzen und Fe und C gleichmäßig verteilt (vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand).
- Im Feld A-C-E sind mehrere Phasen gemischt. Welche Phasen in einem Phasenmischgebiet beteiligt sind, verrät eine waagerechte Linie (im Bild grün und doppelt) bis zu den nächsten Phasengrenzen, in dem Fall Austenit und Schmelze. D.h., unter der Linie A-C kristallisiert die Schmelze allmählich (Knickpunkte) zu Austenit, bis sie mit Erreichen der Linie A-E vollständig erstarrt ist.
- Im Zustandsdiagramm kann man ablesen, dass Austenit max. 2,06% C aufnehmen kann. Fe und C bilden also ein homogenes Gefüge (Mischkristall).
- Unter der Linie G-S wandeln sich Teile von Austenit allmählich (Knickpunkte), aber nicht vollständig, in Ferrit um. An der linken Phasengrenze (rote Linie) dieses Mischgebietes kann man ablesen, dass Ferrit nur wenig C enthält. An der rechten Phasengrenze (orange) erkennt man, dass im Austenit der C-Anteil mit sinkender Temperatur bis 0,83% steigt.
- Vorgänge an und unter der P-S-K – Linie (723°C) siehe C150.

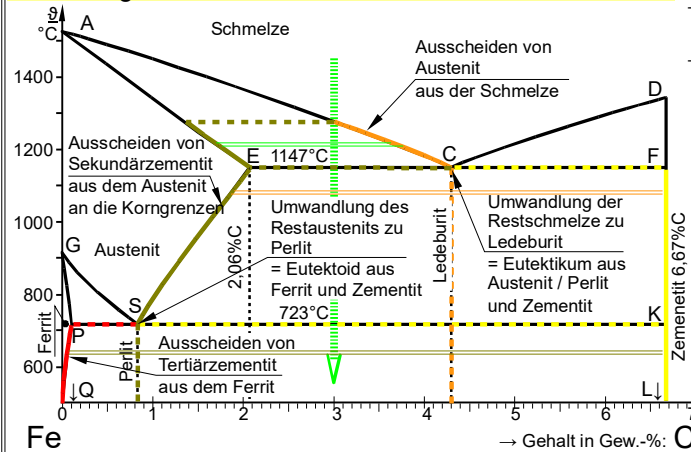
Abkühlung von C150



- Zustand der Schmelze und ihre Umwandlung in Austenit siehe C50.
- Das Feld S-E-F-K ist wieder ein Phasenmischgebiet, diesmal aus Austenit und Zementit, wie die waagerechte Linie (im Bild grün und doppelt) bis zu den nächsten Phasengrenzen verrät. Das bedeutet, dass die Linie S-E die Löslichkeitsgrenze für Kohlenstoff im Austenit beschreibt und Austenit mit Unterschreiten dieser Linie Kohlenstoff ausscheidet, und zwar in Form von (Sekundär-)Zementit Fe_3C . Der Zementit lagert sich an den Korngrenzen an, deshalb heißt es auch Korngrenzenzementit. Der Austenit verliert dabei Kohlenstoff.
- An der P-S-K – Linie (723°C) wandelt sich der restliche Austenit, das jetzt 0,83% C enthält, zu Perlit um. Perlit ist ein Mischgefüge aus Ferrit und Zementit, wie wiederum die waagerechte Linie (im Bild doppelt orange) verrät. Die Vorgänge entsprechen einem Eutektikum, aber da es nicht aus einer flüssigen Phase entsteht, nennt man es Eutektoid. Die Umwandlung verläuft 'gleichzeitig' und deshalb die Abkühlungskurve als Haltepunkt.
- Beim weiteren Abkühlen unter der Linie P-S-K sinkt die Löslichkeit von C in Ferrit entlang der Linie P-Q von 0,02% auf 10⁻⁵%. D.h., der Ferrit (im Perlit) scheidet Kohlenstoff in Form von Zementit an die Korngrenzen des Ferrits aus (Tertiärzementit).



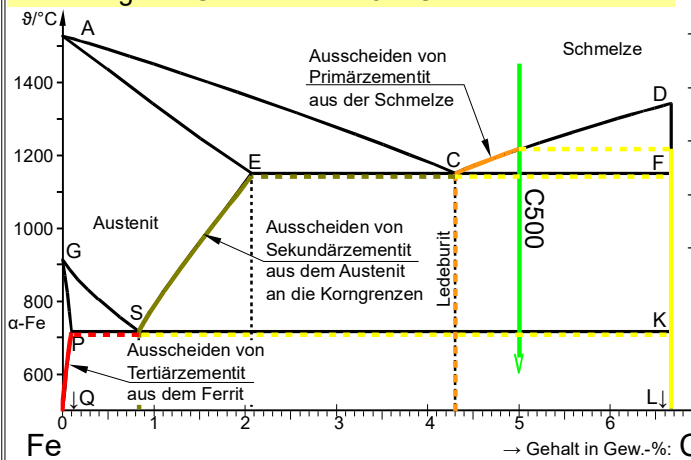
Abkühlung von Gusseisen mit 3% C



Vorgänge über 2,06% C stehen nicht Lehrplan

- Die A-C – Linie ist die Löslichkeitsgrenze für Austenit in der Schmelze und mit ihrem Unterschreiten scheidet die Schmelze Austenitkristalle aus. Die Restschmelze reichert sich mit Kohlenstoff C bis zu 4,3%C.
- Weitere Vorgänge siehe Gusseisen mit 5% Kohlenstoff.

Abkühlung von Gusseisen mit 5% C



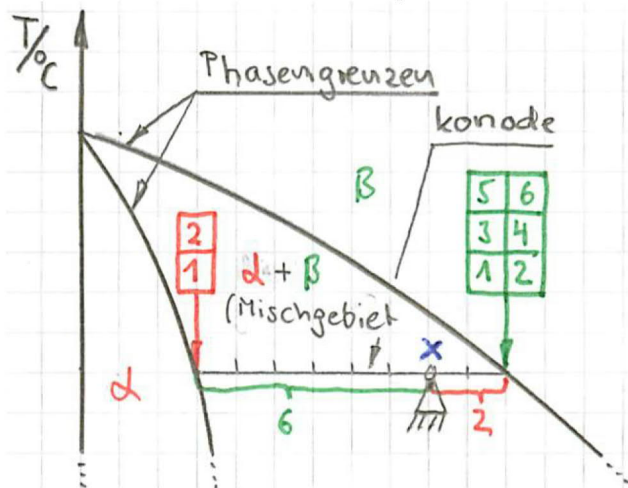
- Die C-D – Linie ist die Löslichkeitsgrenze für Zementit in der Schmelze und mit ihrem Unterschreiten scheidet die Schmelze Zementitkristalle (= Primärzementit) aus. Die Restschmelze verliert C bis es nur noch 4,3%C enthält.
- An der E-C-F – Linie wandelt sich die Restschmelze zum Eutektikum des Fe-Fe₃C – Systemes um. Man nennt es Ledeburit und es besteht aus Austenit und Zementit (orange doppelte waagerechte Linie).
- Die S-E – Linie ist die Löslichkeitsgrenze für Kohlenstoff im Austenit. Mit ihrem Unterschreiten scheidet der Austenit (im Ledeburit) Kohlenstoff in Form von Zementitkristallen (= Sekundärzementit) aus. Der restliche Austenit wird ärmer an C bis zu 0,83%C.
- An der P-S-K – Linie (723°C) wandelt sich der restliche Austenit (im Ledeburit) zu Perlit um. Perlit ist ein Kristallgemisch aus Ferrit und Zementit (braune doppelte waagerechte Linie).
- Die P-Q – Linie ist die Löslichkeitsgrenze für Kohlenstoff im Ferrit. Mit ihrem Unterschreiten scheidet der Ferrit (im Perlit im Ledeburit) Kohlenstoff in Form von Zementitkristallen (= Tertiärzementit) aus.
- Die Bezeichnungen Primär-, Sekundär- und Tertiärzementit beziehen sich also auf die Entstehungsphase des Zementits, nicht auf unterschiedliche Formen von Zementit.

Werkstoff_TA_EKD-lesen.odt

Gesetz der abgewandten Hebelarme

Analogie zu einer Waage

Ausschnitt aus einem Zustandsdiagramm:

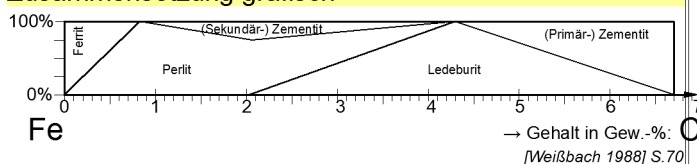


Zusammensetzung im Punkt x: 75% β + 25% α

$$\alpha: \frac{2}{6+2} = 25\% \quad \beta: \frac{6}{6+2} = 75\%$$

[Seidel/Hahn 2010] S.83

Zusammensetzung grafisch



Werkstoff_TA_Hebel.odt

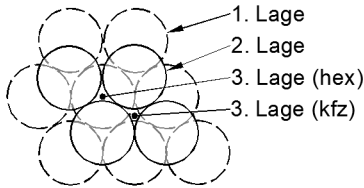
Eine Konode ist die waagerechte Linie in einem Phasenmischgebiet eines Zustandsdiagramms, die die beiden gemischten Phasen verbindet. Aus den Schnittpunkten der Konode mit den nächsten Phasengrenzen erkennt man die Zusammensetzung der beteiligten Phasen, aus der Länge der beiden Arme der Konode kann man die Anteile der Phasen berechnen.

Bildlich kann man sich den Zusammenhang der abgewandten Hebelarme als Waage vorstellen

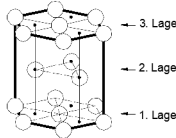
- Konode als Waagbalken
- x als Drehpunkt
- α und β als Gewichte im Gleichgewicht



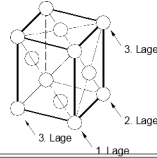
Gittertypen



über die
1. Lage
→
hex



über die Lücken der 1. Lage → kfcz



Zeitbedarf: 2+1h (ohne / mit Dilatometerversuch)

- 1) Wdhg Isotropie, metallisches Streben nach einfachen Gittern
- 2) Eine Kiste voll Tischtennisbälle, vorsichtig rütteln, Anordnung? kubisch-primitiv (nicht zeichnen), krz, kfcz / hex
- 3) günstigere Anordnung? hex

AM krz-Raumgitter in 4 Ebenen aus Tischtennisbällen (siehe rechts)

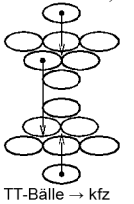
kfcz und hex unterscheiden sich nur durch eine kleine Verschiebung in der 3. Ebene. Darstellung: [Tipler 1995] S.1338

4) Verschiebung der 3. Lage in die andere Lücke = kfcz

Einarbeiten: [GrundwissenIng8] S.1004

FO hex und kfcz Gitter in dichtester Packung, FO Gittertypen

hex-Raumgitter bei: Be, Cd, α-Co, Mg, α-Ti, Zn, α-Zr; Re (für Gasturbinen) kfcz-Raumgitter bei: Al, Pb, γ-Fe, Au, β-Co, Cu, Ni, Pt, Ag; krz-Raumgitter bei: Cr, α-Fe, Mo, Nb, Ta, V, W, β-Ti, β-Zr [SdV] 08/2008 S.70: „Atome haben eine Art energetische Pufferzone, eine Kugel mit dem sogenannten Van-der-Waals-Radius, sodass es häufig sinnvoll ist, Packungen von Kugeln mit diesen Radien als Modelle von Kristallstrukturen zu betrachten“ β

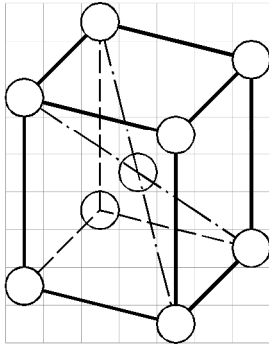


TT-Bälle → kfcz

Gittertypen (Elementarzelle)

kubisch-raumzentriert (krz), z.B. α-Fe

B.C.C. (body centre cubic), vgl: Atomium in Brüssel



0,286nm

$$8 \cdot \frac{1}{8} + 1 \cdot 1 = 2$$

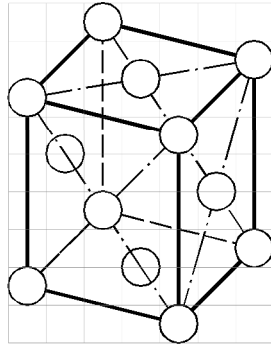
$$\frac{2}{(0,286 \text{ nm})^3} = 85,5 \frac{\text{Atome}}{\text{nm}^3}$$

nicht dichtest gepackt

$$\frac{55,847 \text{ g} \cdot 85,5 \frac{\text{Atome}}{\text{nm}^3}}{6,02204 \cdot 10^{23} \text{ A} \cdot \text{nm}^3} = 7,9 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

kubisch-flächenzentriert (kfcz), z.B. γ-Fe

F.C.C. (face centre cubic)



0,356nm

$$8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4$$

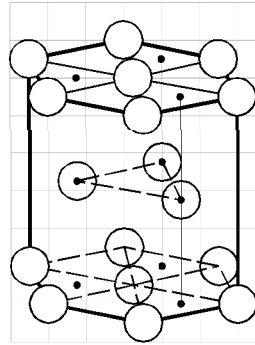
$$\frac{4}{(0,356 \text{ nm})^3} = 88,6 \frac{\text{Atome}}{\text{nm}^3}$$

dichteste Packung

$$\frac{55,847 \text{ g} \cdot 88,6 \frac{\text{Atome}}{\text{nm}^3}}{6,02204 \cdot 10^{23} \text{ A} \cdot \text{nm}^3} = 8,2 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

hexagonal (hex)

tritt nicht bei Eisen auf



Gitterkonstanten (Fe)

Gitterkonstante = Kantenlänge des Würfels

Anzahl der Atome je Elementarzelle

Atomdichte

Hinweis: Berechnung per Dreisatz oder Formel so, dass die Einheiten richtig aufgehen.

Dichte (theoretisch)
praktisch 7,87kg/dm³

A. = Atome

Begriffe Austenit und Ferrit (von den Ablesungen bekannt) nicht vorgeben, sondern nach dem Dilatometerversuch (s.u.) zuordnen lassen.

→ [EuroTabM] „Kristallgitter“ (ab 46.Aufl.)

5) Wir betrachten nur die Gitter, die bei Eisen auftreten, deshalb wird hex nicht weiter verfolgt (waagrechte Linie).

animierte 3D-Darstellungen erstellen

Atomdurchmesser Fe ca. 250 nm
[Hering 1992] S.637: Übersicht über Gittertypen und Gitterkonstanten, nur krz, kfcz, hex sind für Metalle wesentlich.

- 1) Gitterkonstante vorgeben
- 2) Welches Gitter hat größte Dichte?

Die Randatome werden von mehreren Elementarzellen beansprucht. Wie viele Anteilanteile an Atomen hat eine Elementarzelle?

Wdhg: kfcz und hex unterscheiden sich nur um eine Verschiebung in der 3. Lage (s.o.), die die Dichte nicht beeinflusst → hex ist auch dichtest gepackt. Deshalb wird hex auch hdp genannt (hdp = hexagonal dichtest gepackt).

[EuroTabM] „Dichte“, „Periodisches System“
Atommasse Fe=55,847g/6,02204x10²³ Teilchen
nm=10⁻⁹m=10⁻⁸dm

Fehlerquellen: Gitterfehler, Gitterkonstante ist temperaturabhängig, Rundungsfehler?

FO Abkühlungs- und Dilatometerkurve von Eisen

Bezeichnungen α-, β-, γ- und δ-Fe folgen der Abkühlungskurve von unten nach oben. β-Fe ist wie α-Fe, aber unmagnetisch (oberhalb der Curielinie = 768°C für reines Fe, sonst ca 719°C). δ-Fe ist ein kleiner Zipfel beim Punkt A im EKD.

Eigenschaften der Gittertypen

Ferrit (α-Eisen, krz)

Austenit (γ-Eisen, kfcz)

max. 0,2%

max. 2,06%
(Grenze für Stahl)

4
8

4
12

gut umformbar

sehr gut umformbar

weich, nicht sehr fest, zäh, magnetisch, korrosionsanfällig, versprödet bei tiefen Temperaturen

weich, sehr zäh, unmagnetisch, korrosionsbeständig (z.B. CrNi-Legierungen), geeignet für Tieftemperaturanwendungen

Gitterfehler siehe [Hering 1992] S.640
Versprödung → [Schwab 2013] S.185ff

Vertiefung

Raumerfüllungsgrad: Wie viele Prozent des Raumes wären ausgefüllt (kfcz / krz), wenn die Atome Kugeln wären, die sich berühren?

FO Glühfarben

Vers: Vereinfachter Dilatationsversuch

Frei hängenden Stahldraht (Blumenbindendraht ca. 30..50cm) durch Strom bis 900°C erhitzen (12V, ca. 15A, Glühfarben siehe TabB) und Strom abschalten: Der Draht zieht sich zusammen. Beim Übergang von Austenit zu Ferrit sackt er nochmals kurz durch (Verlängerung wegen der geringeren Dichte von Ferrit). Manchmal kann man auch ein kurzes Aufglühen sehen, wenn die Kristallisationsenergie frei wird? Dilatation (Ausdehnung) ist ein weiterer Hinweis auf Kristallisationsvorgänge.

- 1) Beobachten und erklären Sie die Vorgänge
- 2) Ordnen Sie kfcz und krz den Bezeichnungen Austenit und Ferrit zu.

Eintrag im AB Stahlecke

Der (!) Ferrit, der (!) Austenit

Lösungsvermögen für C

aus EKD entnehmen, Erklärung an der Elementarzelle. Ca jede 3. kann C aufnehmen.

Gleitebenen,
Gleitmöglichkeiten

oben im TA Gittertyp einzeichnen
FO Gleitebenen

Verformbarkeit

Sonstiges

Legierungen mit hohem Cr- oder Ni-Anteil (Nirosta) haben ein austenitisches Gitter und sind unmagnetisch und korrosionsbeständig (z.B. Schiffbau, Lebensmitteltechnik)

Sonstiges

Cementite has an orthorhombic lattice with approximate parameters 0.45165, 0.50837 and 0.67297 nm (http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Lattices/cementite.html). Die Darstellung von Zementit in [Greven 2004] ist falsch.

Unterschied zw. Ingenieur und Mathematiker :-)

Dass hdp und kfcz die dichtesten Packungen seien, vermuten Mathematiker bereits seit 1611 (Kepler'sche Vermutung), bewiesen wurde es aber erst 1998 [Stewart 2003].



Fe-Fe₃C-Diagramm (metastabiles Eisen-Kohlenstoff-Diagramm)

Gefügearten

(Der) Zementit (6,67% C)

Im metastabilen EKD (Fe-Fe₃C-Diagramm) scheidet sich Kohlenstoff als Eisenkarbid Fe₃C, 6,67% C aus: sehr hart + spröde, nicht umformbar, sehr fest.

FO Zementitkristall

(Der) Grafit

(100% C) weich, wenig verformbar, schmierend

übereutektische Legierungen

(4,3 .. 6,67% C)

Kristallgemisch aus (Tertiär-)Zementit und Ledeburit

(Der) Ledeburit

(4,3% C)

Eutektikum des Fe-Fe₃C-Systems; feinkörniges Kristallgemisch aus Austenit (Perlit) und Zementit

untereutektische Legierungen

(2,06 .. 4,3% C)

aus Ledeburit, Austenit und Sekundärzementit

übereutektoide Legierungen

(0,8 .. 2,06% C)

scheiden Sekundär-, Schalen- oder Korngrenzenzementit unter der Linie E-S aus dem Austenit aus.

Dieser Vorgang ist durch die gestrichelte Linie bei 2,06% C angedeutet. Die Anteile und Zusammensetzung von Austenit und C berechnet man aber über die Volllinien E-S und F-K

(Der) Perlit

(0,83% C)

Kristallgemisch aus meist lamellarem Ferrit und Zementit; Eutektoid des Austenits; mittelhart.

(Der) Ferrit

eine Form von Eisen, kann kaum C lösen (max. 0,02%).

(Der) Austenit

Mischkristall aus Fe und C, kann bis 2,06% C lösen

Curie-Linie

Magnetismus nach dem Ising-Modell

Jedes Atom ist durch den Spin seiner kreisenden Elektronen ein Elementarmagnet. Weiß'sche Bezirke oder Domänen sind Gebiete gleichgerichteter E-Magnete mit niedrigerer Gesamtenergie und höherer Wahrscheinlichkeit. Die Größe der Domänen sinkt mit der Temperatur (Energie ist genügend vorhanden, Domänen werden durch Bewegung gestört, Statistik → Wikipedia/Ising-Modell). Viele kleine Domänen heben sich auf, also werden Werkstoffe bei hohen Temperaturen makroskopisch unmagnetisch. Die Umwandlung erfolgt nicht allmählich, sondern plötzlich bei einer kritischen Temperatur (→ Curie-Temperatur, Phasenübergang). Ising, Smirnov u.a. lieferten die Mathematik dazu, Details → [SdW] 09/2011, S.58

Vertiefung

Ziel: quantitative Vorgänge in der Stahlecke, um das Lesen von Zustandsdiagrammen einzutüben und sich an die Begriffe (Austenit ..) zu gewöhnen, ohne sie zu erklären.

- 1) Erkläre die Zusammensetzung der Gefüge von C100, (C50) bei 1600, 1400, 1200, 1000, 800, 750, 700°C.

anhand [EuroTabM] „Eisen-Kohlenstoff-Diagramm“

- 2) Begriffe klären, Vorgehensweise mündlich, Zusammenfassung im AB AB Stahlecke

Vorgänge über 2,06% sind im Lehrplan nicht gefordert !

[Duden 2006] enthält das Stichwort „Zementit“ nicht. „Der“ Zementit: [Weißbach 1988]. Da Wärmebehandlung Fe₃C in Fe und C trennen kann, aber nicht umgekehrt, ist das EKD das stabilere System, das Fe-Fe₃C-System heißt metastabiles EKD (grch. meta: zwischen.., mit.., um.., nach..).

Fe₃C besteht aus (1x12):(3x56) = 12:168 Atommassen. 12/(168+12)=6,67 Masse-% C.

- 3) Wdh.: Umformbarkeit ist wesentlich für den Nutzen von Metallen → reines Zementit ist wegen seiner Härte praktisch nicht nutzbar.

Zementit entsteht im metastabilen EKD immer, wenn Phasen mit gelöstem Kohlenstoff seine Löslichkeitsgrenze unterschreiten:

- Primärzementit kristallisiert in übereutektischer Schmelze, wenn die Linie C – D unterschritten wird. Dadurch wird es auch Teil des Ledeburit.
- Sekundär- bzw. Korngrenzen- bzw. Schalenzementit scheidet an den Korngrenzen von übereutektoidem Austenit aus, wenn die Linie S – E unterschritten wird. Dadurch wird es auch Teil des Perlits.
- Tertiärzementit scheidet aus Ferrit aus, vermutlich an den Korngrenzen, wenn die Linie Q – P unterschritten wird. (Q liegt bei 0% C und 0°C, P bei 0,02% C und 723°C).

[Duden 2006] bevorzugt die Schreibweise Grafit.

Da die wenigen C-Atome Zeit benötigen, Keime zu bilden und zu vergrößern, scheidet Grafit nur bei sehr langsamer Abkühlung aus (wird durch Si gefördert), ansonsten bildet sich Zementit.

Schüler entwickeln lassen: Zwischen 4,3 und 6,67% C verhält sich die Legierung wie ein Kristallgemisch. Eisenkarbid-Kristalle = (Tertiär-)Zementit scheiden aus, die Schmelze strebt zum Eutektikum.

[Duden 2006] enthält das Stichwort „Ledeburit“ nicht, „der“ in Analogie zu anderen. Der Ledeburit ist durch eine gestrichelte Linie markiert. Die gestrichelte Linie bedeutet, dass Ledeburit keine eigene Phase ist, sondern nur eine Erscheinungsform anderer Phasen. Beim Abkühlen besteht es zunächst aus Zementit und Austenit. Austenit vergrößert beim weiteren Abkühlen die vorhandenen Zementitbereiche und kippt dann in Perlit um. nach Prof. Ledebur, Freiberg 1837 bis 1906.

Zementit steckt schon im Ledeburit, der Sekundärzementit scheidet aus dem Austenit aus, da Austenit mit sinkender Temperatur immer weniger C lösen kann.

Auf der Linie E - C zwischen 2,06 und 4,3% C besteht das Gefüge aus Austenit und Ledeburit. Bei weiterem Abkühlen scheidet sich aus dem Austenit C aus und bildet Zementit. Da die Ausscheidung dieses Zementits erst beginnt, nachdem sich bereits Zementit aus der Schmelze gebildet hat, nennt man ihn auch Sekundärzementit. Da er sich um die Austenitkristalle an den Korngrenzen abgelagert, heißt er auch Schalen- oder Korngrenzenzementit.

Eutektoid entspricht dem Eutektikum, geht aber nicht aus einer Schmelze, sondern aus einer festen Lösung hervor. Hier ist C im Austenit gelöst.

[Bargel/Schulze 2005] S.144: Da Perlit aus zwei verschiedenen Kristallarten besteht, sollte man richtiger von Perlitkolonien und nicht von Perlitkörnern sprechen.

Perlitbildung = Austenitzerfall. Lamellen werden durch Wärmebehandlung zu Körnern. Wenn man Perlit schleift und ätzt, wie es bei mikroskopischen Untersuchungen üblich ist, zeigt sich Zementit in hellen (! [SdW] 10/2001, Damasenerstahl) und Ferrit in dunklen Streifen. Insgesamt hat Perlit einen perlmutartigen Glanz, der ihm den Namen gab.

Löslichkeit für C aus dem EKD lesen
Andere übliche Bezeichnung ist α-Eisen.

Andere übliche Bezeichnung ist γ-Eisen.

Ültg: Austenit und Ferrit sind zwei verschiedene Kristallformen des Eisens. Bevor wir die Gittertypen unterscheiden können, müssen wir erst den Bindungsmechanismus von Metallen kennen.

- 4) Sie wollen die Gefügeumwandlung von C55 beim Abkühlen aus der Schmelze mit einer Laienspielgruppe darstellen. Darsteller sind Ihre Klassenkameraden. Schreiben Sie das Drehbuch so, dass jeder der Darsteller weiß, was er zu tun hat. Die Darsteller sind mit schwarzen und weißen Hemden markiert.



nicht unterrichten

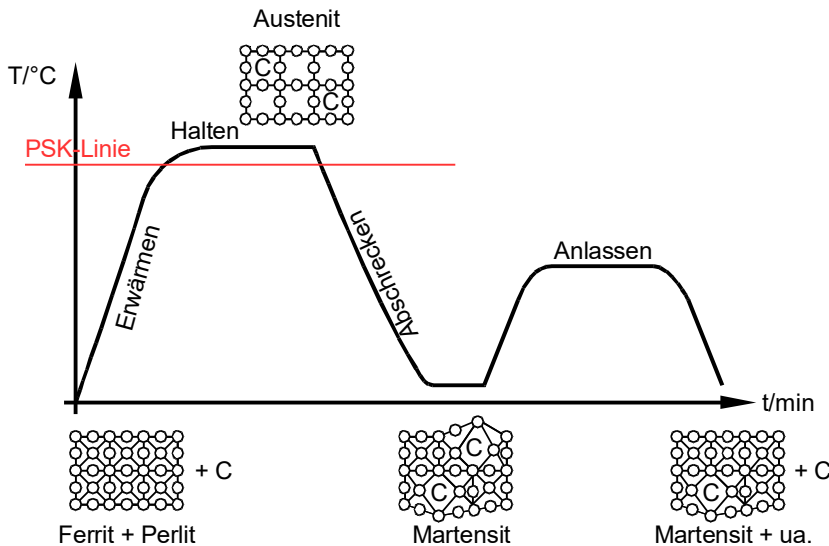
Wärmebehandlung von Stahl

Abschreckhärten, martensitisches Härten

Zweck

Verschleißfestigkeit, Härte

Vorgang



Erwärmen auf Härtetemperatur
ca. 50°C über der PSK-Linie

Das Kristallgemisch aus Ferrit / Zementit und Perlit wird über die GSK-Linie auf Härtetemperatur durchgewärmt und wandelt sich vollständig in Austenit um, der den C löst.

FO ZTU-Schaubild für kontinuierliche Abkühlung Ck45, 41Cr4 aus Weißbach S.180: für innen und außen, erreichbare Härten je nach Temperaturverlauf

ZTU-Schaubilder

für kontinuierliche Abkühlung

FO Wärmebehandlung im ZTU-Diagramm

Ck45 siehe auch Böge7 S.133, allerdings unübersichtlicher beschriftet.

[Grevén 2004] S.84; [Koch 1974] S 310.

Härterisse

Entstehen durch Wärmespannungen (unterschiedliche Wärmeausdehnung) oder durch Volumenänderung bei Gefügeänderungen.

Abschreckgeschwindigkeit

und die Eindringtiefe

sind bestimmt durch das Abschreckmittel: Wasser, kalte / warme Salzlösung, (legiertes) Härteöl oder Luft.

Möglichst milde Abschreckmittel verwenden!

Werkstoffe

C > 0,2%

Vergüten

= Härten + Hochtemperatur-Anlassen bei 500 .. 680°C
Anlasstemperatur und -zeit bestimmen die Eigenschaften (Zähigkeit <--> Festigkeit).
Martensit zerfällt zu sehr feinkörnigem Ferrit und Zementit.

Werkstoffe

un-/niedriglegierte Stähle mit 0,25 .. 0,6%C

[Schwab 2013]: S.71: „Metalle sind wechselwarme Tiere“

Ein Nockenwelle, Zahnrad, Kurvenscheibe o.ä.

1) Funktion, Belastung? Reibung, Verschleiß → Härten

Härten macht Stähle durch Wärmebehandlung hart und verschleißfest. Vorher müssen Werkstücke etwa ihre endgültige Form haben, danach können sie nur noch durch Schleifen gespant werden.

Versuch: Bindedraht biegen: Nix passiert; Draht erhitzen, abschrecken, biegen: Draht bricht.

Zum Abschreckhärten benötigt man zwei Elemente: genügend C und Abschreckgeschwindigkeit.

Beim schnellen Abkühlen sinkt die Temperatur, bei der der Austenit zu Perlit wird, weil der C nicht schnell genug diffundieren kann. Der Perlit wird feinstreifig. Bei Unterschreiten der kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit bildet sich gar kein Perlit mehr, sondern bei 400..100°C (bei unlegierten Stählen) das durch C-Atome verzerrte krz-Gitter Martensit (glashart und spröde).

Überperlitische Stähle behalten Restaustenit, der die Härte senkt. Er kann durch Tieftemperaturbehandlung noch in Martensit umgewandelt werden bzw. durch Anlassen in Perlit oder Zwischenstufengefüge umgewandelt werden.

FO Dilatometerkurve beim Erwärmen und Abschrecken Domke S121

zeigt starke Verlagerung des Umwandlungspunktes in tiefe Temperaturen beim Abschrecken (Hysteresis). Legierungselemente Cr, W, Mn, V fördern den Vorgang.

Anlassen bei 100 .. 300°C

Wandelt etwas Martensit in Zementit

Zweck: Senkt die Sprödigkeit und mindert die Gefahr der Härterisse.

Zur Minderung der Härterisse soll gehärteter Stahl 45' auf 100..150°C angelassen werden (Domke7 S.126).

Anlassfarben s. [EuroTabM] (ältere Ausgaben)

Anlassfarben entstehen durch dünne durchsichtige Oxidschichten wie bei einem Ölfilm auf Wasser ([Schwab 2013] S.271).

Anlassen soll unmittelbar nach dem Abschrecken erfolgen, da Härterisse noch Stunden später erfolgen können

Je nach Abschreckmittel und Dicke sind die Vorgänge am Rand und im Innern stark unterschiedlich.

Durchhärten bei größeren Querschnitten (Martensitbildung) ist nur bei legierten Stählen zu erreichen. Ferritbildung ist zu vermeiden (weich, kleines R₀).

Die Diagramme geben an, welche Phasen aus dem Austenit entstehen, wenn eine bestimmte Abkühlung über der Zeit erreicht wird. Verläuft die Kurve erst über Ferrit und Perlit, so bildet sich erst Ferrit aus dem Austenit, dann Perlit aus dem Restaustenit. Bainit oder Zwischenstufe ist ein Gemenge von übersättigtem Ferrit mit eingelagerten Karbiden. Im unteren Bereich der Zwischenstufe werden sie sehr fein und ergeben gute Zähigkeit bei hoher Streckgrenze. Bei legierten Stählen ist die Bainitstufe besonders ausgeprägt.

ZTU-Schaubilder für isotherme Abkühlung gelten für dünne Werkstücke, die schroff auf eine bestimmte Temperatur abgekühlt und dann dort gehalten werden.

Ültg: Warum nicht einfach immer mit Wasser abschrecken?

AM gerissene Harteile

Abschrecken führt zu Vibrationen (Böge7 S.134)?

Vermindern z.B. durch gebrochenes Härten: Abschrecken in Wasser, bis 200 .. 300°C (Perlitbildung wird schnell durchlaufen) und weiteres Abschrecken in Öl (Zwischenstufe wird langsam durchlaufen).

FO Abkühlungsgeschwindigkeit Böge S.133

Die Lage des Abschreckmaximums hängt mit der Verdampfungstemperatur zusammen. Abschreckmittel werden nach gewünschter Abschreckgeschwindigkeit gewählt.

Legierungselemente behindern die Umwandlung Austenit zu Perlit und fördern dadurch die Martensitbildung. Hochlegierte Stähle werden an Luft abgeschreckt und härten dennoch vollständig durch. Man unterscheidet Wasser-, Öl- und Luftwärter. Beim Eintauchen ins Kühlmedium müssen bestimmte Regeln beachtet werden.

Moderne Härteöfen fahren die Abkühlungskurven NC-gesteuert (z.B. bei ABB bis 300°C/s?).

EuroTabM39 S.158 „Vergütungsstähle -Wärmebehandlung“

Innere Vorgänge beim Anlassen hochlegierter Stähle: Ab ca. 400°C entkommen einige C-Atome, aus Martensit-Nadeln bilden sich Ferrit- und Zementit-Nadeln. Der Ferrit bringt Zähigkeit, ist aber sehr feinkörnig, sodass die Festigkeit höher als bei normalgeglühtem Stahl ist. Ab ca. 550°C zerfällt der Martensit vollständig. Ab ca. 700°C ballen sich Zementit-Nadeln zu Zementitkörnern, dies erhöht die Zähigkeit durch feineres und gleichmäßigeres Gefüge. Härte und Festigkeit nehmen ab. Vergütete Stähle haben bei gleicher Zugfestigkeit eine höhere Zähigkeit als normalgeglühte Stähle.

FO Vergütungsschaubild C45 Böge7 S.135

FO Vergütungsschaubilder verschiedener Stähle [EuroTabM]

Als Ausgangsgefüge sind u.U. auch Perlitvarianten (Troostit, Sorbit) oder Zwischenstufengefüge geeignet, d.h. das Abschrecken muss nicht so scharf erfolgen.

Vergütungsstähle [EuroTabM] „Vergütungsstähle“





Oberflächenhärten

für verschleißfeste Oberfläche und zähen Kern.

Ein

AM Nockenwelle, Zahnrad, AM Kurvenscheibe (nur mit FO)

z.B. für Zahnräder, Nocken und Lagerflächen von Nockenwellen, Kurvenscheiben

Abschreckhärten

C-Gehalt und Abschreckgeschwindigkeit sind nur an der Oberfläche groß genug

Nitrierhärten

Bildung sehr harter Nitride in der Randschicht

Verfahren

Einsatzhärten

Randschichthärten

z.B. Flammhärten, Induktionshärten

Werkstoffe / Vorgang

Randschicht wird

St mit C<0,2% aufkohlen und dann härten

St mit 0,3%<C<0,6% erwärmen und abschrecken

Stähle mit Cr und Al mit N₂ anreichern

Merkmale

- verschiedene Gefüge, Verzug und Risse
- Kern wird beim Aufkohlen gegläht.

+ Kern wird kaum beeinflusst

geringe Erwärmung ohne Verzug
größte erreichbare Härte bei Stahl (1200HV)

erhöht Korrosionsbeständigkeit
geringe Härtetiefe: wenige 0,1 mm gehärtete Schicht platzt leicht ab

Aufkohlen durch Diffusion: Pulveraufkohlen (z.B. in Holzkohle einbetten und unter Schutzgas glühen), flüssige Cyan-Salze (Blausäure HCN: sehr giftig), Gasaufkohlen (z.B. Leuchtgas CO + H₂: giftig und explosibel)

→ [EuroTabM] „Einsatzstähle“

Querverweis: Härteprüfverfahren

→ [EuroTabM] „Stähle für Flamm- und Induktionshärtung“

Flammhärten lässt Einhärtetiefen unter 1mm nicht zu, beim Induktionshärten Randschichten unter 0,1mm möglich.
Hohe Anlagekosten, kaum Beeinflussung des Kernes.

[Bargel/Schulze 2005] einarbeiten:

Härtbar sind alle umwandlungsfähige FeC-Legierungen, selbst GGL. Meist wird das Bauteil vorher vergütet.

→ [EuroTabM] „Nitrierstähle“

Eisennitride sind nicht hart genug, deswegen wird mit ca. 1%Al oder 1..2%Cr legiert. Nitrieren (Aufsticken) findet normalerweise bei 500..550°C über ca. 20h statt. Bei höheren Temperaturen bilden sich grobe Nitride und sprödes, zum Abplatzen neigendes Eisennitrid. Nur wenn es auf Korrosionsbeständigkeit ankommt, nitriert man bei Temperaturen bis 850°C für wenige Stunden. Nitriermittel sind NH₃ oder Ammoniak im gasdichten Ofen oder ein Zyanbad. Unter der katalytischen Wirkung des Eisens spaltet sich N ab und diffundiert atomar in den Stahl.

Nitrocarburieren

kombiniertes Verfahren Einsatz- und Nitrierhärten

z.B. die KW beim BMW M3 - Motor (2000)

Vertiefung

Video Härten

Werkstoff_TA_Stahl_Waermebehandlung.odt

Sonstige Wärmebehandlungen

Spannungsarmglühen

T=550..650°C, t= 1..2h

Rekristallisationsglühen

T=550..650°C, t= mehrere h

Weichglühen

T=680..750°C, t=mehrere h oder

Pendelglühen

um die 723°C-Linie (P-S-K)

Normalglühen

T knapp über GSK wie Härten, t=kurz

Diffusionsglühen

T=1050..1250°C, t=lange

Wärmebewegung der Atome schwächt inneren Halt des Gitters. Beim Spannungsarmglühen lösen sich innere Spannungen durch plastisches Fließen der Körner.

Bei großen Spannungen im Werkstück zerfallen die Körner (z.B. nach Kaltverformung). Aus Bruchstücken entstehen neue Körner, damit neues Gefüge (=Rekristallisation). [Schwab 2013] S.79 sinngemäß: Die Energie beim plastischen Verformen geht zu 90% in Wärme und 10% in Verformung (bei Eisen bis 30 kJ pro dm³). Diese Energie wird nur frei, wenn genügend Aktivierungsenergie und ausreichend Verformung (5%) vorhanden ist. Die Rekristallisationstemperatur beträgt bei reinen Metalle $T_{\text{Rekrist}} = 0,4 \cdot T_{\text{Schmelz}}$ und bei Legierungen $T_{\text{Rekrist}} = 0,5 \cdot T_{\text{Schmelz}}$ für Rekristallisation innerhalb 1h.

Durch Weichglühen wandelt sich der Streifenzenit zu körnigem Zementit = leichter umformbar und spanbar.

Gitter werden kurz in Austenit umgewandelt, dabei Neubildung der Körner: neues, gleichmäßiges, feines Gefüge

Atome wandern und gleichen Konzentrationsunterschiede (Seigerungen) wieder aus

Werkstoff_TA_Stahl_Waermebehandlung.odt



NE-Metalle

Einteilung

Guss- - Knetlegierung
Leicht- - Schwermetalle

Bezeichnung

Quelle: [EuroTabM], EuroTabE13

1)
2)

z.B GD - ZnAl4Cu1 F42	
Herstellung, Verwendung	chem. Zusammensetzung
GD: Druckguss	Zinklegierung mit
E: Elektrotechn. Anwendungen	4% Al 1% Cu
Eigenschaften, Behandlung	
Zugfestigkeit 420 N/mm ²	
Abk.	Eigenschaften
Ag ..	– leitende Oxidschicht
AgCd	– wirkt lichtbogenlöschend
–	–
Al	– Leitfähigkeit pro Masse ist höher als bei Cu und es ist billiger
Au ..	– oxidiert nicht
Bi	– relativ ungiftiges Schwermetall – edler als Eisen
C	Verschweißt nicht, keine Oxidschicht, selbstschmierend
Grafit	
Cd ...	– giftiges Schwermetall darf seit 2011 in der EU nicht mehr für Schmuck und zum Löten eingesetzt werden
E-Cu	– sehr hohe therm. + el. Leitfähigkeit – weich, verformbar, – korrosionsbeständig gegen Atmosphäre – Lichtbogen → schlecht leitende Oxidschicht
Hg ..	Smp –38,9°C
Mg ..	leicht, gut druckgießbar
Ni ..	– steigert Widerstand in Cu – mit Cr hochwarmfest
Pb ..	– abriebfest, korrosionsbeständig – gute therm. + el. Leitfähigkeit – sehr billiges Metall
Sn ..	–
W ..	– Smp. 3380°C – sehr hart, verschleißfest, – geringer Abbrand
Zn ...	– für Menschen giftig
Anwendung	
– Hartsilber AgCu3 → Kontakte Schütz, Relais, Bimetall	
– AgCd 5 .. 20 → Gleichstromkontaktstücke, Lichtschalter, Thermostate	
– L-Ag67Cd, L-Ag72 → Hartlot	
– Kondensatoren, Schalter	
– z.B. E-AlMgSi + Stahl, E-Al F17	
– → Freileitungen (Aluminium ummantelt tragendes Stahlseil)	
– → in der Kfz-Industrie scheitert der Ersatz von Cu für Kabel durch Al bislang an der mangelnden Flexibilität des Al und an der elektrochemischen Unverträglichkeit von Al und St	
– Kontaktwerkstoff	
– Bestandteil niedrigschmelzender Legierungen	
– Schmelzsicherung, z.B. Cd-Bi	
– chem. Verbindungen als Farbstoff	
– Bleiersatz: Schrotmunition, Lote, Kühlmittel ..	
In Automatenstählen könnte Bi als Spanbrecher Pb ersetzen, hätte aber den Nachteil, dass es aus Fe großtechnisch nicht entfernt werden kann (Beim Einblasen von Sauerstoff in Fe verbrennen nur unedlere Elemente)	
→ Kohlebürsten, Schleifstücke, Stromabnehmer, Druckkontakte	
– Farben (verliert an Bedeutung)	
– NiCd-Akku	
– Leiter	
–	
→ Rüttelzünder, Explosionsgeschützte Schalter	
vermutlich mit gekapselter Kontaktfläche	
→ dünnwandige Gehäuse	
Mg löst sich im Körper innerhalb von Tagen auf und ist gut verträglich, deshalb werden Legierungen gesucht, die zeitweilige Implantate ersetzen und nicht wieder herausgeholt werden müssen. Probleme:	
– Die Korrosion muss verlangsamt werden, z.B. durch eine Schutzschicht.	
– Auch die Legierungselemente müssen verträglich sein, z.B. K, Fl, für die keine Erfahrungen vorliegen	
– Mediziner suchen schnelle Lösungen, Ingenieure wollen die fehlende Erfahrung durch systematische, d.h. langwierige Untersuchungen ersetzen (IVDI) 9.6.2011)	
– CuNiMn: Präzisionswiderstände,	
– temperaturabh. Widerstände	
– z.B. NiCr 80 20 (Ni80Cr20), NiCr60 15 (Ni60Cr15Fe20)	
– hochbelastete Widerstände → Elektroöfen, Lötkolben	
– Bestandteil von Superlegierung für Hochtemperaturbelastete Teile in der Energietechnik	
– Münzen	
– → Pb-H ₂ SO ₄ -Akkus	
– → L-Sn50Pb: Weichlote	
– → Glühfäden	
– aus langen Monokristallen (= Wiskers)	
– als Karbid in Hartmetall	
– → Unterbrecherkontakte, Zerschacker	
– → ZnC-Batterien	



Notizen

Kupellation

auch Abtreiben, Treibarbeit oder Läuterung (Oberbegriff).
Ist ein Verfahren, um Gold und Silber von Verunreinigungen zu trennen.
Verunreinigtes Au und Ag werden mit Pb legiert, das die Verunreinigung aufnimmt. Das Ganze wird in O-reicher Atmosphäre geglüht, sodass Pb und Verunreinigung, nicht aber die Edelmetalle oxidiert werden. Die oxidierten Teile haben eine geringere Oberflächenspannung und werden von offenporiger Keramik (Kupelle) angezogen. Das Verfahren war vermutlich schon 2500 v.u.Z. bekannt und ist heute noch üblich. Man erreicht damit 99,5% Au. Beschrieben wird das Verfahren bei [Agricola 1548] S.436.

Diffusion

= thermische aktivierte Wanderung

[Schwab 2013] S.73. Geschwindigkeit eines thermisch aktivierten Vorgangs

$$v = \text{konst} \cdot e^{\frac{Q}{R \cdot T}}$$

- v = Anzahl der Vorgänge je Zeit
- Q = nötige Aktivierungsenergie [J/kg]
- R, T = Gaskonstante [J/kgK], Temperatur [K]

[Schwab 2013] S.74. Mechanismen:

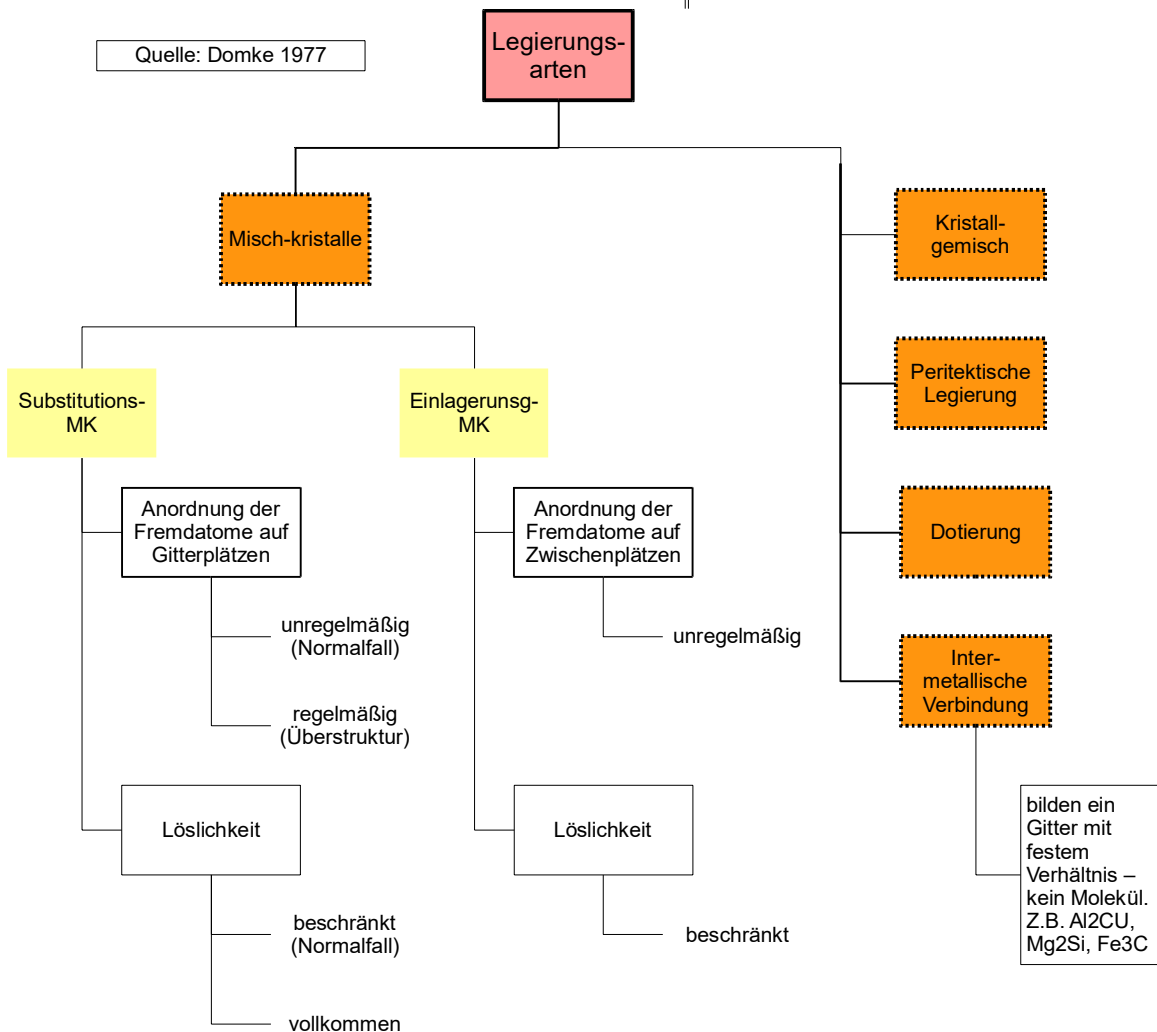
- Zwischengittermechanismus: Kleine Atome, z.B. C in Fe, bewegen sich von Zwischengitter-Lücke zu Z-Lücke
- Substitutionsatome tauschen Plätze mit den benachbarten Wirtsatomen und wandern so relativ langsam

Quartation (Scheiden durch die Quart)

Trennung von Gold und Silber durch heiße Salpetersäure. Der Name kommt daher, dass die Legierung bei frühen Verfahren nicht mehr als ein Viertel Gold enthalten durfte. Heute wird diese Methode kaum noch verwendet.

Wärmeleitfähigkeit

[Schwab 2013] S.59ff „Eine Frage des Durchkommens“, sinngemäß: Wärmeleitfähigkeit sinkt mit der Temperatur, weil sich die Atome mehr bewegen und dadurch die Elektronen mehr behindern. Bewegliche Elektronen sind wesentlich für die große Wärmeleitfähigkeit der Metalle. Demzufolge ist die Wärmeleitfähigkeit von Legierungen wegen des gestörten Gitters niedriger und sie sinkt beim Schmelzen drastisch → Die Böden hochwertiger Töpfe sind aus wärmeleitfähigem Al oder Cu, Griffe und Rand aus hochlegiertem Stahl, damit man sich die Finger nicht so leicht verbrennt.





Literaturverzeichnis

- Agricola 1548: Georg Agricola, De Re Metallica libri XII - 12 Bücher vom Berg- und Hüttenwesen, fourierverlag Wiesbaden, 2003?
- Bargel/Schulze 2005: H.-J. Bargel, G. Schulze, Werkstoffkunde, Springer Berlin, 2005
- Bernoulli 1888: Friedrich Autenheimer, Bernoulli's Vademecum des Mechanikers, J.G.Cotta Stuttgart, 1888
- Christen 1974: Hans Rudolf Christen, Chemie, Sauerländer Aarau, 1974
- Decker 2009: Decker et al., Maschinenelemente, Carl Hanser Verlag München, 2009
- Doering 1968: Ernst Doering, Technische Wärmelehre, B.G.Teubner Stuttgart, 1968
- Domke 1977: Wilhelm Domke, Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Girardet Essen, 1977
- Dubbel 11 I: A. Leitner ua., Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Berlin, 1953
- Duden 2006: -, Duden - Die deutsche Rechtschreibung, VDI-Verlag Mannheim, 2006
- EuroTabM: Ulrich Fischer ua., Tabellenbuch Metall, Europa-Lehrmittel Haan-Gruiten,
- EuroTabM46: Roland Gommeringer ua., Tabellenbuch Metall 46.Auflage, Europa-Lehrmittel Haan-Gruiten, 2014
- Fenchel 1911: Adolf Fenchel, Metallkunde, Boysen & Masch Hamburg, 1911
- Ferguson 1992: Eugene S. Ferguson, Das innere Auge - von der Kunst des Ingenieurs, Birkhäuser Basel, 1993
- Greven 2004: Emil Greven, Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für technische Berufe, Handwerk und Technik Hamburg, 2004
- GrundwissenIng14: Ekbert Hering (Hrsg.), Karl-Heinz Modler (Hrsg.), Grundwissen des Ingenieurs, Fachbuchverlag Leipzig, 2007
- GrundwissenIng8: Dr. Erna Padelt ua., Das Grundwissen des Ingenieurs 8.Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1970
- Hering 1992: Ekbert Hering ua., Physik für Ingenieure, vdi verlag Düsseldorf, 1992
- HJTabKfz: Elbl, Föll, Schäler, Tabellenbuch Fahrzeugtechnik, Holland+Josenhans, Stuttgart,,
- Hütte 29: Ahrendts ua., Hütte - die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, Springer Berlin, 1989
- Klein 2008: Dieter Alex ua., Klein Einführung in die DIN-Normen, Beuth Verlag Berlin, 2008
- Koch 1974: F.Koch, G.Pyzalla, Einführung in die Technologie, Stam Köln, 1974
- Mattheck 2003: Claus Mattheck, Warum alles kaputt geht, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003
- Merck 1920: A. Beythien ua., Merck's Warenlexikon für Handel, Industrie und Gewerbe, Gloeckner Leipzig, 1920
- Musschenbroeck 1729: Pieter van Musschenbroek, Dissertationes physicae experimentalis et geometricae de magnetete, Leyden, 1729
- Sattler 2007: Klaus Sattler, Till Adrian, Thermische Trennverfahren: Aufgaben und Auslegungsbeispiele, Wiley-VCH Weinheim, 2007
- Schwab 2013: Rainer Schwab, Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für Dummies, Wiley-VCH Weinheim, 2013
- SdW: wechselnde Autoren, Spektrum der Wissenschaft,
- Seidel/Hahn 2010: Wolfgang Seidel, Frank Hahn, Werkstofftechnik, Hanser München, 2010
- Skolaut 2014: Werner Skolaut (Hrsg.), Maschinenbau - Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium, Springer Vieweg Berlin Heidelberg, 2014
- Stewart 2003: Ian Stewart, Kopfzerbrecher - 30 mathematische Rätsel, Piper Verlag München, 2009
- Stowasser 1971: Dr. Michael Petschenig ua., Der kleine Stowasser - Lateinisch-deutsches Schulwörterbuch, Freytag Verlag München, 1971
- Tipler 1995: Paul Tipler, Physik, Spektrum Lehrbuch, 1995
- VDI: , vdi-nachrichten,
- Weißbach 1988: Wolfgang Weißbach, Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Vieweg Braunschweig, 1988
- Wolke 1997: Robert L. Wolke, Woher weiß die Seife, was der Schmutz ist?, Piper München, 2000

Erfahrungen

- Stoff durchziehen, keine mehrfachen Wiederholungen von Abläufen wie Abkühlungsvorgängen, da kaum jemand lernt, wenn er noch mit einer Wiederholung rechnet, stattdessen HA.
- KA: Keine Punkte für auswendig gelernte Phrasen, sondern nur für Zusammenhänge. Diese sind einfach, müssen aber präzise beschrieben sein. Wer in einer AlSi-Legierung Austenit einträgt, hat keine Ahnung

Anteile in Legierungen ausbauen