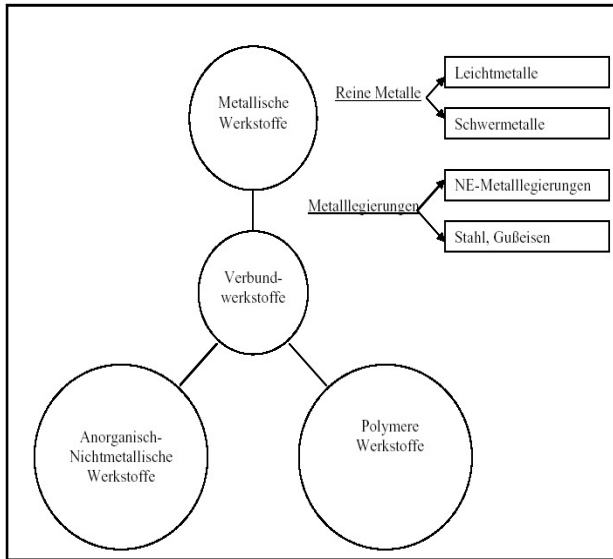
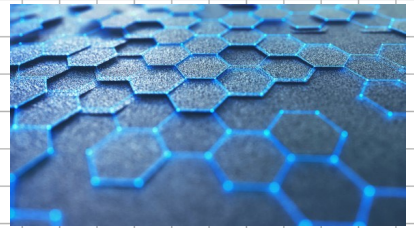


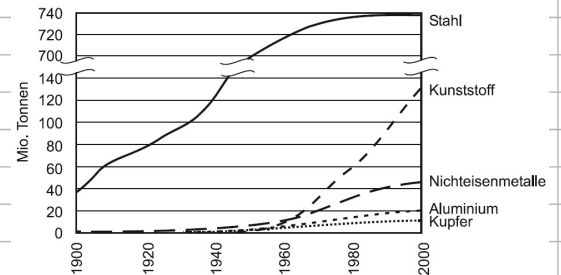
Werkstoffgruppen



$\rho < 5\text{g/cm}^3$, z.B. Mg, Al, Ti

$\rho > 5\text{g/cm}^3$, z.B. Fe, Cu, Ta

Produktion weltweit:



Metallische Werkstoffe:

- gute el. Leitfähigkeit
- gute Wärmeleitfähigkeit
- plastisch verformbar

Anorganisch-Nichtmetallische Werkstoffe (Keramiken):

- schlechte el. Leitfähigkeit
- spröde
- chemisch beständig
- hochschmelzend

Polymere Werkstoffe (Kunststoffe):

- schlechte el. Leitfähigkeit
- tieftemperaturspröde
- chemisch beständig
- nicht temperaturbeständig

Verbundwerkstoffe: Kombination aus mehreren Werkstoffgruppen

Werkstoffprüfung

Zerstörende Werkstoffprüfung (Härteprüfung, Zugversuch, Korb Schlagbiegeversuch)

Begriffe / Definitionen

elastische Formänderung

- reversibel

- Hookesche Gesetze:

$$\sigma = E \epsilon \quad E: \text{Elastizitätsmodul (T-abhängig)}$$

$$\tau = G \gamma \quad G: \text{Schubmodul (T-abhängig)}$$

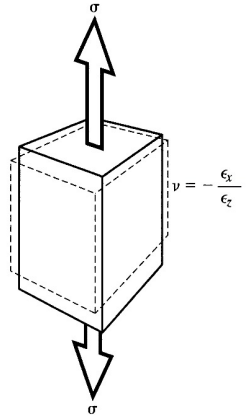
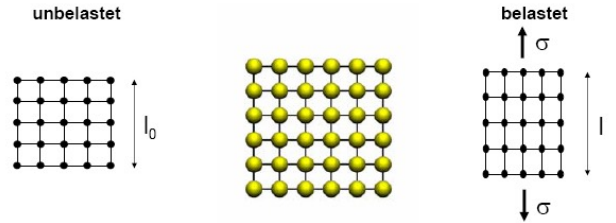
- meist nur Formänderungen von $< 1\%$

Poisson-Zahl / Querkontraktionszahl: $\nu = -\epsilon_{\text{quer}} / \epsilon_{\text{längs}}$ (kaum T-abh.)

$$E = 2(1+\nu)G$$

$$E_{\text{Stahl}} \approx 210 \text{ GPa}$$

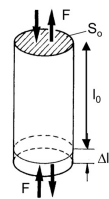
hohe $T_{\text{Schmelz}} \Leftrightarrow$ hoher E-Modul



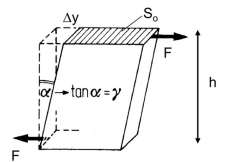
Normspannung $\sigma = \frac{F}{S_0} [\text{MPa} = \text{N/mm}^2]$, Dehnung $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} [-]$

Schubspannung $\tau = \frac{F}{S_0} [\text{MPa} = \text{N/mm}^2]$, Scherung $\gamma = \tan \alpha = \frac{\Delta y}{h} [-]$

einachsige Belastung



Scherung

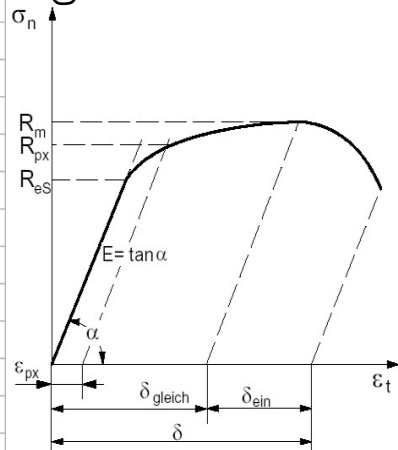


Härteprüfung (Brinell, Rockwell, Vickers):

Definition Härte: Widerstand gegen **plastische** Verformung

technische Bedeutung Härte: Verschleißfestigkeit an Oberfläche

Zugversuch:



→ Werkstoffwiderstände (WW):

- E = WW gegen elastische Verformung = Elastizitätsmodul (→ Steifigkeit)
- R_{es} = WW gegen Einsetzen makroskopischer plastischer Verformung = Streckgrenze
- R_{px} = WW gegen Überschreiten einer plastischen Verformung von $x\%$ $E_p = x\%$ Dehngrenze
- R_m = WW gegen Einsetzen von Bruch = Zugfestigkeit (→ Festigkeit)

weitere Größen:

- $\delta = E_p$ des gebrochenen Stabes $= \frac{l_b - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \text{Bruchdehnung} = \delta_{\text{gleich}} + \delta_{\text{ein}}$
- δ_{gleich} = Gleichmassdehnung
- δ_{ein} = Einschnürdehnung
- $z = \Delta S / S_0 \cdot 100\% = \text{Brucheinschnürung}$; S = Querschnittsfläche

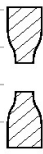


Grundtypen d. Verfestigungskurven Bruchbildungsformen

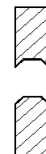
Typ	Merkmale	Beispiele
	Ohne Streckgrenzenerscheinungen	Reine kfz. Metalle (Cu, Ni, Al) Austenitische Stähle (X2CrNi18 8) Vergüteter Stahl (Ck60)
	Mit oberer und unterer Streckgrenze und inhomogenem Dehnungsbereich	Ferritisch perlitische Stähle VA- VIA- Metalle mit Zusätzen von C, N, H
	Mit ideal elastisch-plastischem Dehnungsverhalten	Viele metallische Werkstoffe bei hinreichend hohen Temperaturen
	Mit extrem reduziertem elastisch-plastischem Dehnungsbereich	Martensitisch gehärtete unlegierte Stähle, Keramiken, Gläser
	Mit unregelmäßigen Spannungsabfällen im elastisch-plastischem Dehnungsbereich (heißt: dynamische Reckalterung)	Legierungen mit hinreichend großen Konzentrationen an Interstitions- oder/und Substitutionsatomen in bestimmten Temperaturbereichen

Kennzeichnung von Brüchen durch:

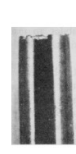
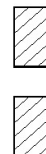
a) Makroskopische Bruchverformung



Quelle: G. Lange (S. 64, Bild 2), Systematische Beurteilung techn. Schadensfälle



Quelle: G. Lange (S. 64, Bild 2), Systematische Beurteilung techn. Schadensfälle



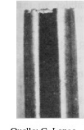
Quelle: G. Lange Systematische Beurteilung techn. Schadensfälle

Verformungsreicher Bruch (Gleitbruch bzw. Zähbruch)

Verformungsarmer Bruch (Kegel-Tasse-Bruch)

Verformungsloser Bruch (Trennbruch bzw. Spröbruch)

b) Orientierung der Bruchfläche



Normalspannungsbruch

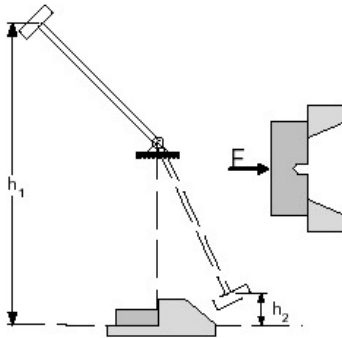


Schubspannungsbruch

Quelle: G. Lange Systematische Beurteilung techn. Schadensfälle

Quelle: G. Lange (S. 64, Bild 2), Systematische Beurteilung techn. Schadensfälle

Kerbschlagbiegeversuch:



→ Werkstoffwiderstandsgrößen:

• Kerbschlagarbeit: $W = mg(h_1 - h_2)$

• Kerbschlagzähigkeit: $\sigma_k = W/A_k \text{ [J/cm}^2\text{]}$



weitere Größen

• Auftreffgeschw.: $mg h_1 = \frac{1}{2} m v^2$

• Spröd-Duktil-Übergangstemperatur: $T = T_{Ü}$, wenn $\sigma_k = 20 \text{ J/cm}^2$ oder $T = T_{Ü}$, wenn Zähbruchanteil 50% d. Bruchfläche

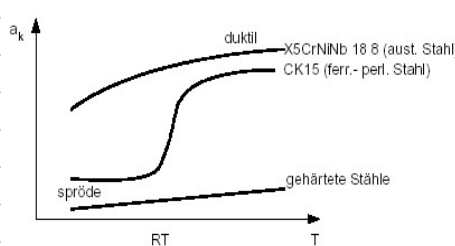
Zähigkeit = Duktilität = Verformbarkeit

(lat. ducere = ziehen, führen)

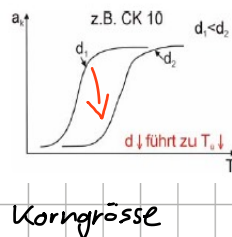
Eigenschaft, infolge Belastung plastisch zu verformen, bevor Versagen

Gegenteil: Sprödigkeit: lässt sich nur gering plastisch verformen

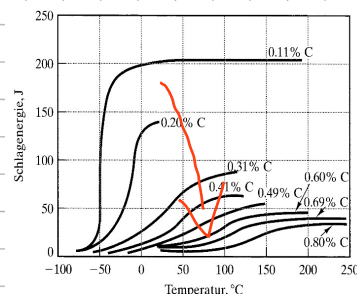
Einflussgrößen Zähigkeit Stähle



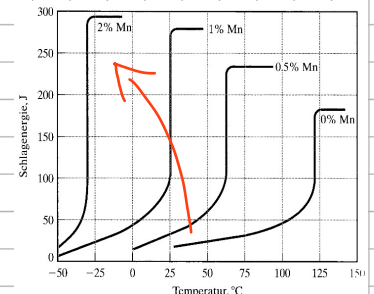
aust: keine Tieftemperaturversprödung
ferr./perl: Tieftemperaturversprödung



Korngröße



C-Gehalt



Mn-Gehalt

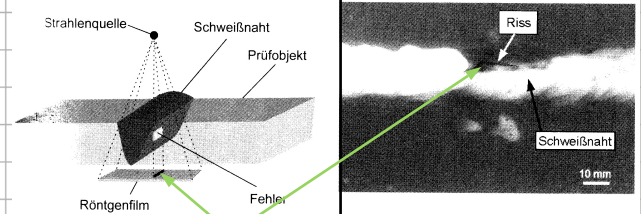
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (Sicht-, Röntgen-, Ultraschall-, Wirbelstrom-, Magnetpulver-, Farbindringprüfung, Replika-Methode)

Grüner machen!

Röntgenprüfung

Schwächung d. Röntgenstrahlung entsprechend Dicken- und Dichteverhältnissen d. Prüfkörpers

→ aufwendig

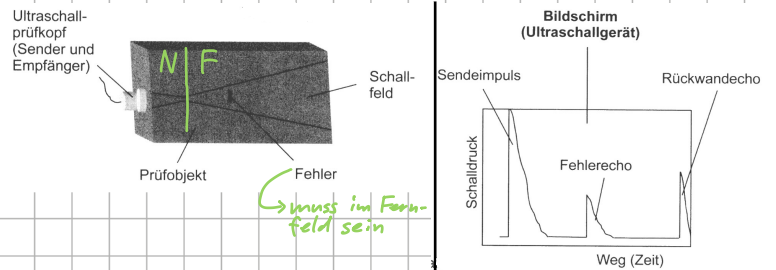


dunkel, da geringe Strahlungsschwächung

Ultraschallprüfung

Laufzeitmessung erlaubt Bestimmung d. Tiefe von Fehlstellen:

$$2x = vt$$

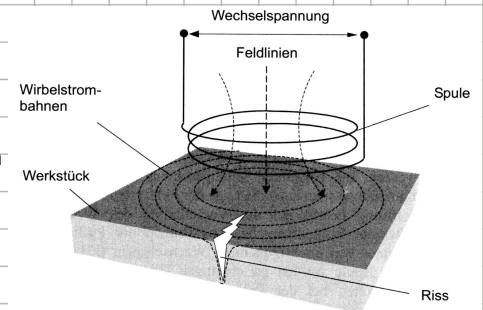


→ muss im Fehlerfeld sein

Wirbelstromprüfung

- durch Spule wird wechselndes Magnetfeld erzeugt → induziert im zu untersuchenden Material Wirbelströme → erzeugen wiederum Magnetfeld
- Messung von Amplitude und Phasenverschiebung dieses Magnetfeldes mittels Sensoren
- meisten Verunreinigungen/Beschädigung: haben andere el. Leitfähigkeit / Permeabilität als Werkstück → diese Parameter bestimmen Messsignal

→ geringe Eindringtiefe, nur el. leitende Werkstoffe

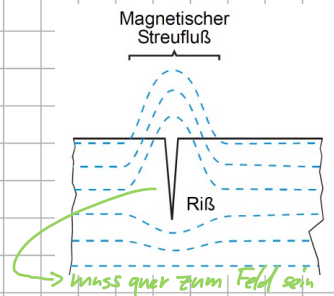


Magnetpulverprüfung

oberflächennahe Fehler streuen Magnetfeld
→ Streufeld führt zu sichtbarer Anhäufung von Magnetpulver (Eisenoxid)

→ nur ferromagn. Werkstoffe:

- Stähle (ferritische/martensitische), ausser austenitische
- Gusseisen (GJL/GJS/GJV) & Stahlgüsse, ausser austenitische



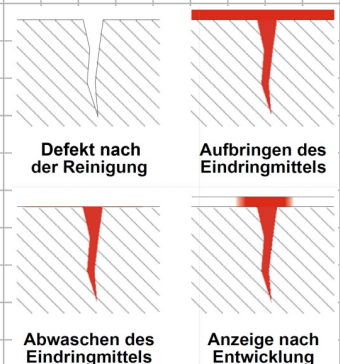
Farbindringprüfung

alle Werkstoffe, also Metalle, Keramiken, Polymere, ausser poröse Materialien

besondere Bedeutung bei der Prüfung nicht magnetisierbarer Werkstoffe → hervorragende Ergänzung zu Magnetpulverprüfung

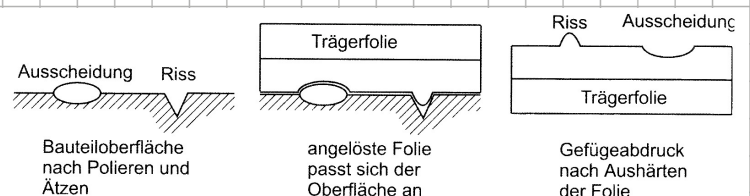
→ Voraussetzungen:

- Defekt muss an Oberfläche geöffnet sein, sonst kann kein Mittel eindringen
- Eindringmittel muss gutes Kriechvermögen haben (für Kapillarwirkung)
- Werkstoff muss mit angewandten Mitteln verträglich sein, sonst ist Verfahren nicht zerstörungsfrei



Replika-Technik

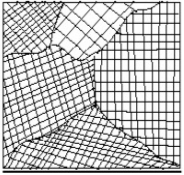
"Negativ" d. Oberfläche
hohes Auflösungsvermögen



Aufbau von Metallen

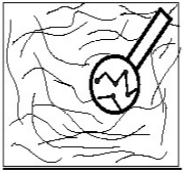
krystallin geometrisch regelmäßige Atomanordnung über mikr. (Körner) oder makr. (Einkörner) Bereiche

- Metalle
- Keramiken
- Halbleiter



amorph geometrisch unregelmäßige Atomanordnung über mikroskopische Bereiche, submikr. geordnete Atomanordnung

- (metallische) Gläser
- Polymerwerkstoffe

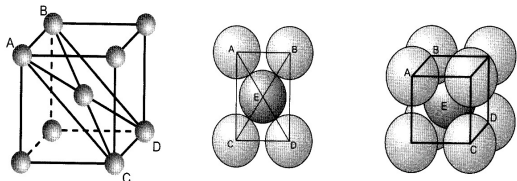


Kristallsystem: periodisch regelm. Anordnung von Atomen mit charakteristischen Symmetrieeigenschaften

Elementarzelle: kleinste Struktureinheit

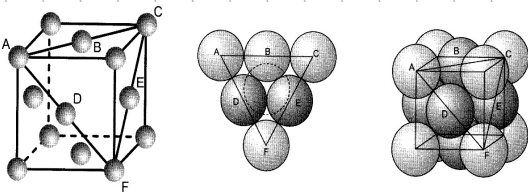
Kristallstrukturen

krz



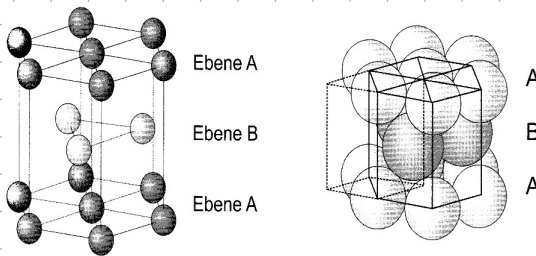
α -Fe, δ -Fe, β -Ti, Cr, Mo, W, V

kfz



γ -Fe, Al, Cu, Ag, Au, Ni

hex



α -Ti, Mg, Zn, Cd

Allotropie:

Änderung Atomanordnung mit Temperatur

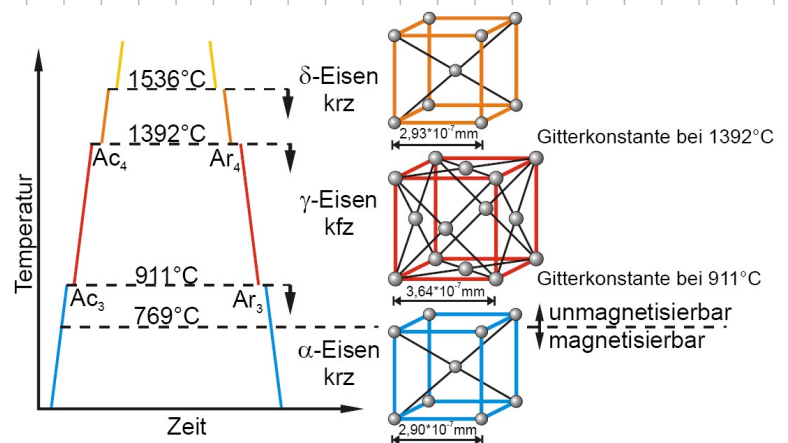
→ sprunghafte Änderung von Eigenschaften:

- spezifisches Volumen
- el. Leitfähigkeit
- Wärmeausdehnungskoeffizient α

$$\epsilon_{th} = \alpha \cdot \Delta T \quad [\alpha] = K^{-1}$$

Fe, Ti, Co, Mn, Sn

Allotropie d. Eisens



Gleitebene (GE):

Gitterebene mit grösster Belegungsdichte an Atomen

Gleitrichtung (GR):

Gitterrichtung mit grösster Belegungsdichte an Atomen

Gleitsystem (GS):

Gleitebenen • Gleitrichtungen

$$\text{kfz} : 6 \cdot 2 = 12$$

$$\text{kfz} : 4 \cdot 3 = 12$$

$$\text{hex} : 1 \cdot 3 = 3$$

Phase:

Bereich (kristallografisch) einheitlicher Struktur und chemisch homogen

Isotropie:

alle Richtungen gleich

Gitterfehler

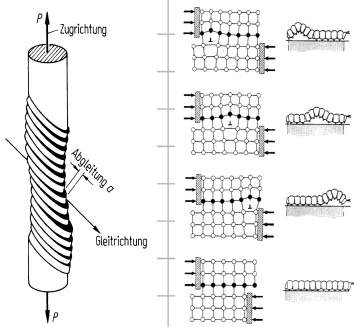
0-dim: Leerstellen, Zwischengitteratome, Substitutionsatome

1-dim: Versetzungen

2-dim: Stapelfehler, Zwillingsgrenzen, Klein- & Grosswinkelkorngrenzen, Grenzflächen

3-dim: Hohlräume, Poren, Ausscheidungen, Einschlüsse, Lunker

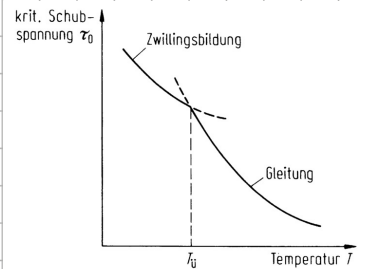
plastische Verformung durch Versetzungsgleiten oder Zwillingsbildung



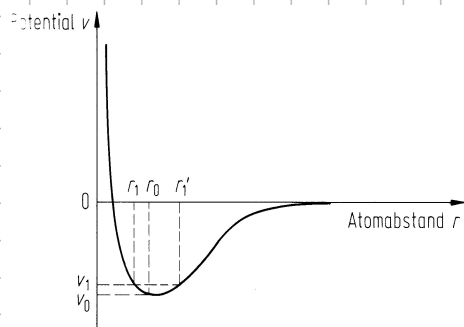
GE $\downarrow$ (z.B. hex) $\Rightarrow$ häufig Zwillingsbildung

$T \uparrow / v \downarrow \Rightarrow$ Versetzungsgleiten

$T \downarrow / v \uparrow \Rightarrow$ Umklappen Gitter in neue Orientierung
 $\hookrightarrow$ Zwillingsbildung



thermische Ausdehnung von Festkörpern

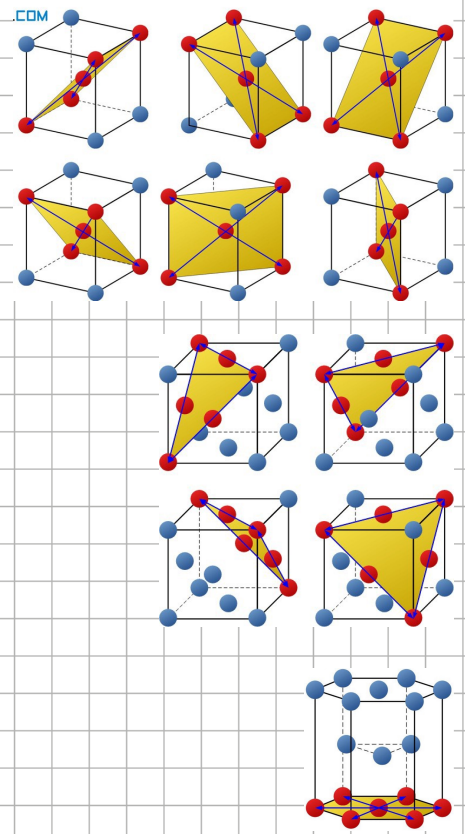


asymmetrisches Potential der atomaren Bindungen (Summe aus anziehenden und abstossenden Kräften):

steigt bei Kompression stärker als bei Dilatation

$\Rightarrow$ Schwingungsmittelpunkt verschiebt sich mit zunehmender Energie zu grösseren Atomabständen

$\Rightarrow$ thermische Ausdehnung

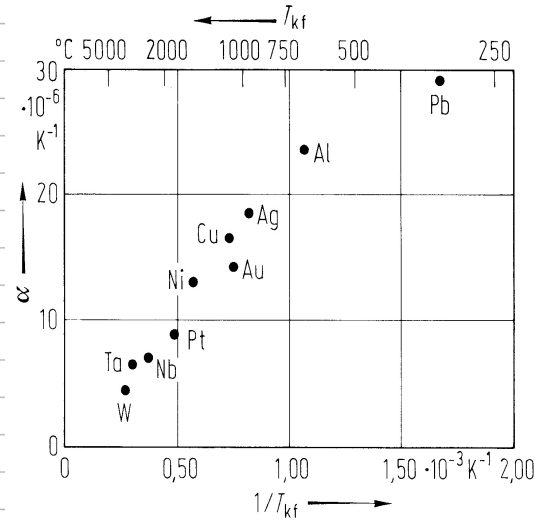


In einem Festkörper schwingt jedes einzelne Atom um einen Gleichgewichtspunkt. Würde es sich dabei um harmonische Schwingungen handeln, so müsste die Entfernung zwischen den Atomen im Mittel gleich dem Gleichgewichtsabstand bleiben, weil die Atome in gleichem Maße in Richtung eines Nachbaratoms als auch in die entgegengesetzte Richtung schwingen. Deshalb kann die Wärmeausdehnung nicht mit der Näherung des harmonischen Potenzials beschrieben werden, sondern es muss berücksichtigt werden, dass die potenzielle Energie stärker steigt, wenn sich zwei Atome einander nähern, als wenn sie sich voneinander entfernen. Durch die steilere Potentialkurve ist bei der Schwingung die Auslenkung in Richtung eines näheren Nachbaratoms kleiner und gleichzeitig die rücktreibende Kraft größer als bei der Schwingung weg vom Nachbaratom (bzw. in Richtung eines weiter entfernten Atoms); dadurch verbringt das Atom weniger Zeit in der Nähe des Nachbaratoms, die Abstände zwischen den Atomen sind im Mittel größer als der Gleichgewichtsabstand. Falls die Schwingungen mit geringen Energien stattfinden, ist das Potenzial noch relativ symmetrisch, je höher die Energien werden, desto weiter schwingen die Atome in den asymmetrischen Bereich des Potenzials und vergrößern so ihren Schwingungsraum. Höhere Energien sind bei höheren Temperaturen vorhanden, deshalb kommt es bei Erwärmung zur Ausdehnung von Stoffen. Eine quantitative Beschreibung erfolgt mit Hilfe des Grüneisen-Parameters.

$$\Delta L \approx L_0 \alpha \Delta T$$

$$L \approx L_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

α : thermischer Längenausdehnungskoeffizient



T_{kf} = Schmelztemperatur

$T_{kf} \uparrow \Rightarrow \alpha \downarrow$

→ Dehnungsänderung einplanen bei Temperaturwechseln!

Werkstoffkennwerte reiner Metalle

Element		T _m	,5T _m	r _o	a _o	Gitter	ρ	E	v	R _{p0,2}	R _m
Aluminium	Al	933	194	143	405	kfz	2,70	70	0,34	41,2	127
Beryllium	Be	1560	507	113	229	hdp	1,85	305	0,05	270	503
Blei	Pb	600	27	174	495	kfz	11,34	16	0,44	7,5	15
Cadmium	Cd	594	24	152	298	hdp	8,64	50	0,30	9,8	63
Chrom	Cr	2163	809	128	288	krz	7,14	279	0,21		172
Eisen	Fe	1809	632	127	287	krz*	7,87	211	0,29	123	412
Gold	Au	1336	395	144	408	kfz	19,32	78	0,44	35	137
Indium	In	429	78	157	460	tet	7,32	11			2
Iridium	Ir	2727	1091	135	384	kfz	22,65	528	0,26		
Kalium	K	337	-105	236	532	krz	0,86	4	0,35		
Kobalt	Co	1765	610	126	251	hdp*	8,89	206	0,31		130
Kupfer	Cu	1356	405	128	362	kfz	8,93	130	0,34	69	235
Lithium	Li	453	-47	157	351	krz	0,53	12			115
Magnesium	Mg	923	189	160	321	hdp	1,74	44	0,29		176
Mangan	Mn	1517	486	130	890	kub*	7,44	198	0,24		706
Molybdän	Mo	2888	1171	140	315	krz	10,28	325	0,30	438	638
Natrium	Na	371	-88	192	429	krz	0,97	9	0,32		
Nickel	Ni	1728	591	124	352	kfz	8,91	202	0,31	78	392
Niob	Nb	2740	1097	147	330	krz	8,58	104	0,38	491	
Osmium	Os	3303	1389	134	274	hdp	22,61	559	0,25		
Platin	Pt	2062	758	138	392	kfz	21,45	170	0,39		147
Quecksilber	Hg	234	-161	155	301	rhombo	13,50				
Silber	Ag	1234	344	144	409	kfz	10,50	83	0,37	29,4	177
Tantal	Ta	3269	1362	146	330	krz	16,67	185	0,35	271	
Titan	Ti	1948	701	145	295	hdp*	4,51	116	0,32	147	316
Uran	U	1403	565	153	588	orthor	18,7	120	0,23	255	412
Vanadium	V	2175	815	136	303	krz	6,09	127	0,36	368	343
Wismut	Bi	544	-1	182	474	rho	9,80	32	0,33		13
Wolfram	W	3683	1569	141	317	krz	19,26	411	0,28	750	1000
Zink	Zn	693	74	137	267	hdp	7,14	105	0,29		118
Zinn	Sn	505	-21	158	583	tet*	7,29	54	0,33		12
Zirkon	Zr	2125	790	160	323	hdp	6,51	96	0,33	118	275
*: Gitterumwandlung oberhalb Raumtemperatur											

*: Gitterumwandlung oberhalb Raumtemperatur

- T_m : Schmelzpunkt in K
- $0,5T_m$: halbe Schmelztemperatur in °C
- r_o : Atomradius in pm
- a_o : Gitterkonstante in pm
- ρ : Dichte in g/cm³
- E: Elastizitätsmodul in GPa
- ν : Querkontraktionszahl
- $R_{p0,2}$: Streckgrenze in MPa
- R_m : Zugfestigkeit in MPa

Legierungsbildung

- Ziele, z.B.:
- Festigkeit $\uparrow$
 - Korrosionswiderstand $\uparrow$
 - Verschleisswiderstand $\uparrow$

Phase Bereich (kristallografisch) einheitliche Struktur und chemisch homogen

Zustandsdiagramm $\rightarrow$ Mikrostruktur bei gegebener T und Zusammensetzung

homogen/heterogen: 1 Phase / mehrere Phasen

vollst. Unlöslichkeit: Gemisch d. reinen Kristalle d. Komponente liegt vor (2 Phasen)

vollst. Löslichkeit: Atome beider Komp. kristallisieren in gleiches Kristallgitter (Mischkristall)

Substitutionsmischkristall (z.B. α -Fe-Cr, γ -Fe-Ni)

vollkommene Löslichkeit nur, wenn

- gleicher Gittertyp
- etwa gleich große Atome
- chemische Ähnlichkeit

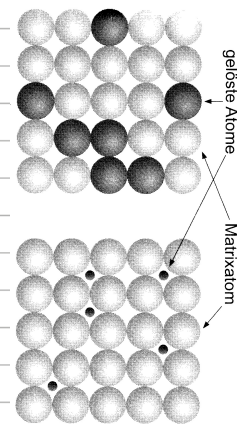
meistens: beschränkte Löslichkeit

Anordnung d. Fremdatome meist unregelmässig

Einlagerungsmischkristall (z.B. Stahl)

Atome auf Zwischengittern d. Matrixgitters

Einlagerung nur wenn Atome sehr viel kleiner als Wirtsgitteratome

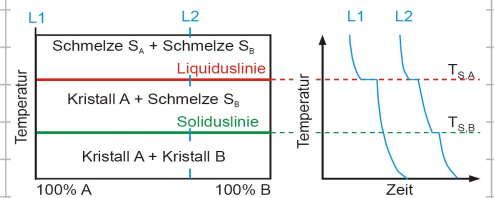


Liquiduslinie trennt (L) von Erstarrungsbereich

Soliduslinie trennt Erstarrungsbereich von (S)

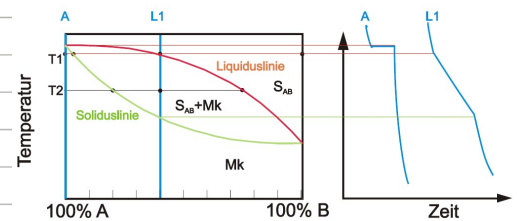
Zustandsdiagramm vollst. Unl.

- Umwandlungstemperaturen für alle c gleich
- 2 Phasen
- (L): Schichtung nach Dichte
- (S): auch vollkommene Trennung



Zustandsdiagramm vollst. L.

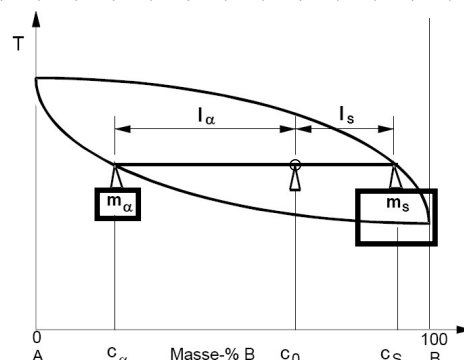
- Linsen-/Zigarrendiagramm
- Haltepunkte: T_S d. reinen Komponenten
- Kritikpunkte: Start & Ende d. Erstarrungsbereich d. Legierung



Hebelgesetze

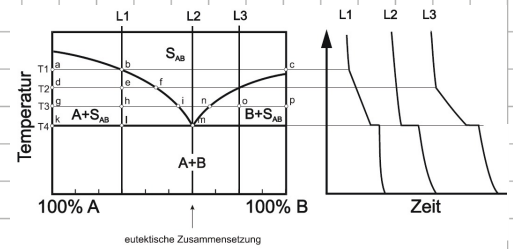
1. $m = m_\alpha + m_s$
 2. $m_\alpha c_\alpha + m_s c_s = m c_0$
- 1 in 2 $\Rightarrow m_\alpha c_\alpha + m_s c_s = (m_\alpha + m_s) c_0$
- $$m_\alpha (c_\alpha - c_0) + m_s (c_s - c_0) = 0$$

$$\frac{m_\alpha}{m_s} = \frac{c_0 - c_s}{c_\alpha - c_0} = \frac{c_s - c_0}{c_0 - c_\alpha} = \frac{l_s}{l_\alpha} \Rightarrow m_\alpha \cdot l_\alpha = m_s \cdot l_s$$

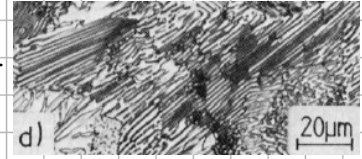


vollst. L. in (L), vollst. unl. in (S)

- zunehmende A- resp B- Gehalte sinkt T_S
→ wechselseitige Behinderung d. Kristallisation durch Atome d. anderen Komponente
- **Eutektikum**: niedrigst schmelzender Gefügeanteil
- eutekt. Punkt: Schnittpunkt Solidus- und Liquiduslinie

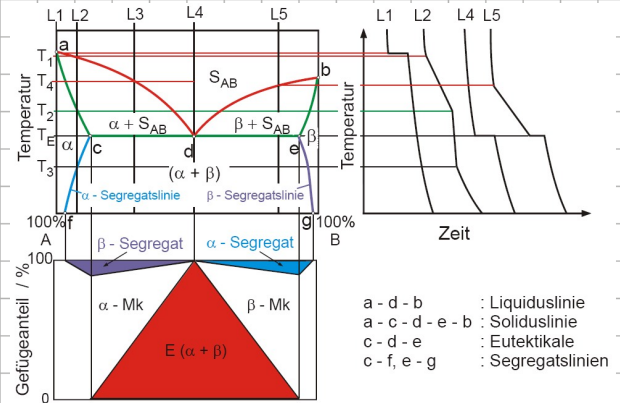


eutektisches Gefüge: feinkristallin, oft schicht- oder lamellenartige Struktur, dendritisches Gefüge (Nadeln)



vollst. L. in (L), teils L. in (S) (begrenzte Randlöslichkeit)

- techn. häufigster Fall
- Eutektikum: Mischung von 2 Mischkristallarten
- α -MK: B-Atome in A-Kristall, β -MK: A-At. in B-Kr.
- Löslichkeit sinkt mit T, wegen Platzmangel für Fremdatome
→ übersch. Atome scheiden sich aus festem Mischkristall aus
= Segregatbildung



Mehrstoffsysteme

- thermodynamische Modellierungsprogramme: z.B. Thermo-Calc®
- Berechnung d. Zustandsdiagramme
- thermodyn. Datenbank für prakt. alle Elemente
- Vorhersage d. Art d. Phasen und Zusammensetzung

Metallische Werkstoffe

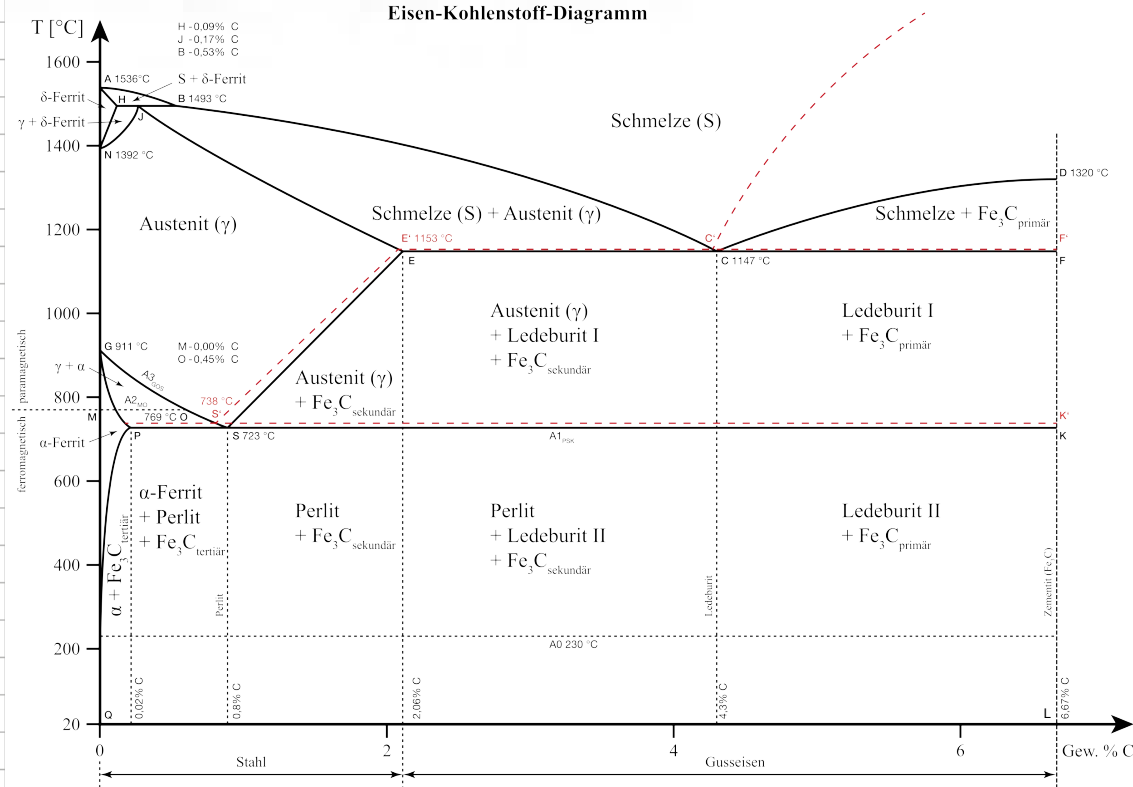
Leichtmetall: $\rho < 5 \text{ g/cm}^3$
Schwermetall: $\rho > 5 \text{ g/cm}^3$

Stähle

Legierung aus Fe + $< 2\% \text{ C}$ & $< 1\% \text{ Mn}$ ($\geq 2\% \text{ C} \rightarrow \text{Gusseisen}$)
 $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$

Vorteile: günstig, energiesparende Herstellung, gut recyclebar, hohe Steifigkeit ($E = 210 \text{ GPa}$), gute Schweißbarkeit (v.a. unlegierte Stähle), viele Stähle härtbar

Zustandsdiagramm ($\rightarrow$ Gleichgewichtszustand / langsame Abkühlung)



ACD-Linie = Liquiduslinie
Unterhalb der Liquiduslinie beginnt die Erstarrung der Schmelze.
Unterhalb der AC-Linie entstehen Eisenmischkristalle (γ -Mischkristalle + δ -Mischkristalle)
Unterhalb der CD-Linie bildet sich Zementit (Fe_3C).

AECF-Linie = Soliduslinie
Unterhalb der Soliduslinie ist die Erstarrung vollständig abgeschlossen.
Die Erstarrungstemperatur ist vom Kohlenstoffgehalt abhängig.

ECF-Linie = Eutektikale
Oberhalb dieser Linie existieren flüssige und feste Phasen nebeneinander. Es bilden sich γ -Mischkristalle und Zementit (Fe_3C).
Beim Durchschreiten der eutektischen Linie erstarrt die Schmelze und es entsteht ein Kristallgemisch - Ledeburit (γ -Mischkristall und Fe_3C).

PSK-Linie = Eutektoid
Die γ -Mischkristalle, die oberhalb dieser Linie noch existieren, sind unterhalb der PSK-Linie vollständig zerfallen. Hier bildet sich das eutektische Kristallgemisch, das Perlit genannt wird. Perlit besteht aus α -Mischkristalle und Fe_3C .

SE-Linie = Löslichkeits-Sättigungslinie
Bei Kohlenstoffkonzentrationen zwischen 0,8% und 2,06% wird der zu viel gelöste Kohlenstoff bei Abkühlung in Form von Sekundärzementit (Fe_3C) ausgeschieden.

GPQ-Linie
Links von der GPQ-Linie ist ein Einphasengebiet mit α -Mischkristallen (Ferrit). Kohlenstoff ist hier nur in sehr geringer Konzentration löslich.

DL-Linie
Diese Linie bildet den rechten Rand des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms. Hier liegt zu 100% Zementit (Fe_3C) vor. Am linken Rand liegt 0% Fe_3C vor. Der prozentuale Massegehalt steigt also vom linken bis zum rechten Rand des Diagramms - d.h. mit steigendem Kohlenstoffgehalt - linear an.

Der Bereich des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms, der über 6,67% Kohlenstoffgehalt hinaus geht, ist für die Werkstofftechnik nicht interessant.

Grundsysteme:

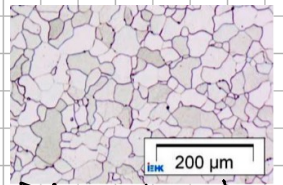
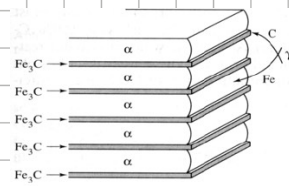
- Linsendiagramm
- eutektisches System
- peritektisches System
- Eutektoid

Ferritische Stähle

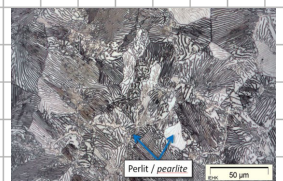
- α -MK, kurz, einphasig
- geringe C-Löslichkeit: max 0.02% (bei 723°C)
- Steilabfall d. Kernschlagzähigkeit $\rightarrow$ Sprödbrech bei tiefen T ($\rightarrow$ Titanic)
- ferromagnetisch
- Gleichgewichtszustand

Perlitische Stähle

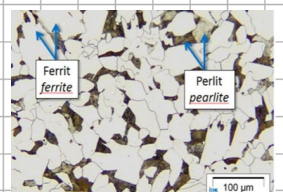
- zweiphasig, lamellar
- eutektische Umwandlung bei $0.8\% \text{ C} / 723^\circ\text{C}$
Austenit $\rightarrow$ Perlit = α -MK (Ferrit) + Fe_3C (Zementit)
- ferromagnetisch
- Gleichgewichtszustand



Reineisen (0% C)



unlegierter Stahl (0.8% C)



unlegierter Stahl (0.2% C)

Unter-eutektoider Stahl, über-eutektoider Stahl

- zweiphasig
- Ferrit + Perlit
- $0\% < \text{Gew.}\% \text{ C} < 0.8\%$
- zweiphasig
- Perlit + Kerngrenzenzementit
- $0.8\% < \text{Gew.}\% \text{ C} < 2.06\%$

Austenitische Stähle

- γ -MK, kfz, einphasig
- Umwandlungsfrei zu RT und TS (durch Wirkung Legierungselemente)
- hohe C-Löslichkeit
- gut kaltverformbar (12GS)
- hohe Duktilität, kein Stabilitätsfall d. Karbidgehaltigkeit bei tiefen T
- schlechte Temperaturwechselbeständigkeit, höhere therm. Ausd. als Ferrit
- nicht ferromagnetisch
- gleichgewichtsnah

Zwillingsgrenzen
(typisch)



X3CrNiCu18-9-4

feinmolekulare
Struktur



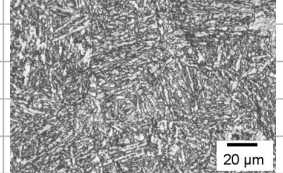
unlegierter Stahl (0.6% C)

Martensitische Stähle

- verzerrter α -MK, verzerrtes kfz-Gitter = kfz, einphasig
- $>0.2\% C$ und schnelle Abkühlung aus Austenitgebiet
- mit C übersättigt, C bleibt zwangsgelöst
- enorme Härte/Festigkeit
- ferromagnetisch
- Härtegefüge, nicht gleichgewichtsnah

Bainit

- zweiphasig: Ferrit + Zementit
- unterscheidet sich von Perlit in Form, Grösse und Verteilung d. Phasen
- bildet sich bei T & v, die zwischen denen für die Perlit- bzw. Martensitbildung liegen
- Härtegefüge, nicht gleichgewichtsnah



0.25% C, 3.6% Ni

Ledeburit

- Phasengemisch: Zementit mit anisotropisierten Sekundärzementit und Perlit
- 2.06-6.67% C
- Eutektikum des Eisen-Eisencarbon-Systems
- gleichgewichtsnah



unlegiertes Gusseisen (4.3% C)

Rosten: rostbeständig, falls $>12\% Cr$ homogen verteilt

- Achtung Glühverfärbung: $Cr_{23}C_6$ -Ausscheidung an Korngrenzen
- $\rightarrow$ interkorrosive Korrosion

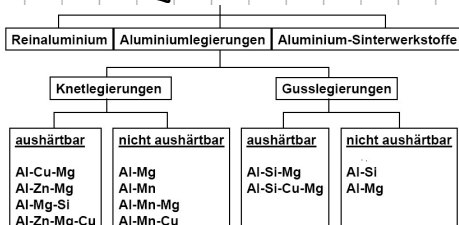
Aluminium und Aluminiumlegierungen

in Natur als Al_2O_3 chemisch sehr stabil
 $\rightarrow$ hoher Energieaufwand zur Reduktion

reines Al

- $\rho = 2.7 g/cm^3$ (Leichtmetall)
- $T_s = 660^\circ C$
- kfz
- $E = 70 GPa$
- gute Korrosionsbeständigkeit durch Oxidschicht

Einteilung Aluminiumwerkstoffe



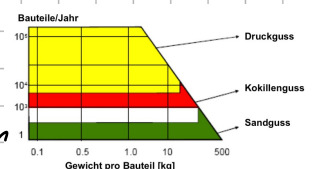
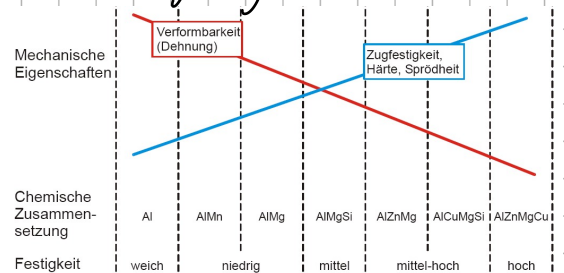
aus(scheidungs-)härten:
bildet Ausscheidungen (= 2. Phase) zur Steigerung
der Festigkeit

Gusslegierungen

Zusammensetzung nahe Eutektikum
 $\rightarrow$ tiefe $T_s \rightarrow$ gutes Flussverhalten

enthalten höhere Gehalte an Legierungselementen
als Knetlegierungen: v.a. Si & Mg

Einfluss Legierungselemente

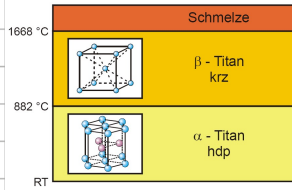


Titan und Titanlegierungen

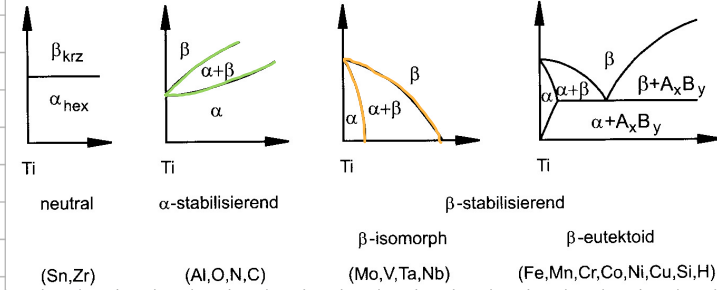
in Natur als TiO_2 und $FeTiO_3$

reines Ti

- $\rho = 4.54 \text{ g/cm}^3$
- $T_s = 1668^\circ\text{C} \rightarrow$ nicht gut giesbar (i.d.R. umgeformt)
- allotrop
- $E = 115 \text{ GPa}$
- gute Korrosionsbeständigkeit durch Oxidschicht



Einfluss Legierungselemente auf Umwandlungstemp.

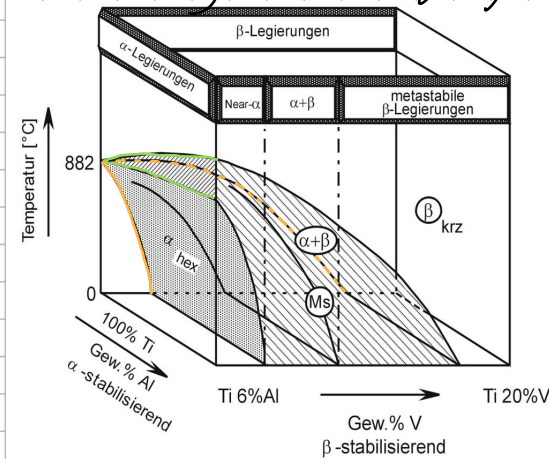


β-isomorph: hohe Löslichkeit $\rightarrow$ können ohne Änderung der Kristallstruktur eingesetzt werden

β-eutektoid: tiefe Löslichkeit $\rightarrow$ bilden intermetallische Verbindungen A_xB_y

durch Legierungselemente zweiphasiges Gefüge möglich (bimodal, $\alpha+\beta$)

Klassifizierung von Ti-Legierungen



α-Leg.: nur α-stab. Elemente

Near α-Leg: geringe Anteile β-stab. Elemente

($\alpha+\beta$)-Leg: 2-phasisig, bimodal

metast. β-L: 2-phasisig, hoher Anteil β-stab. Elemente

β-Leg.: einphasig

Eigenschaften von Ti-Legierungen

Eigenschaften von α -, ($\alpha+\beta$)- und β -Ti-Legierungen.

	α	$\alpha+\beta$	β
Dichte	+	+	-
Festigkeit	-	+	++
Duktilität	-/+	+	+/-
Bruchzähigkeit	+	-/+	+/-
Zeitstandfestigkeit	+	+/-	-
Korrosionsverhalten	++	+	+/-
Oxidationsverhalten	++	+/-	-
Schweißbarkeit	+	+/-	-
Kaltverformbarkeit	--	-	-/+

$\alpha+\beta$:

- hohe Festigkeit: $R_{p0.2} \approx 1000 \text{ MPa}$
- hohe Bruchzähigkeit: $K_{Ic} = 60-110 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
- geeignet für sicherheitsrelevante Bauteile

metast. β :

- anhärtbar
- teilw. $R_{es} > 1400 \text{ MPa}$
- krz $\rightarrow$ gut umformbar (auch bei RT)
- höhere Dichte als α / $\alpha+\beta$

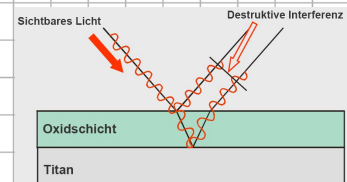
Anodisieren

elektrochemisches Wachsen d. Oxidschicht bis zu definierter Dicke

Dicke = f(Elektrolyt, Temperatur, Spannung)

Farbe abhängig von Dicke

6+ Farben möglich



Magnesium und Magnesiumlegierungen

in Natur als $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, MgCO_3 , $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Gewinnung durch Schmelzflusselektrolyse

reines Mg

- $\rho = 1.74 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ geringste Dichte aller Konstruktionsmetalle! $\rightarrow$ Leichtmetall
- $T_s = 650^\circ\text{C} \rightarrow$ exzellent gießbar
- hdp
- $E = 45 \text{ GPa}$
- geringe Korrosionsbeständigkeit $\rightarrow$ Verbesserung durch Legierung

Mg-Legierungen

Gusslegierungen

- Druckguss
- Squeeze casting
- Thixocasting
- Sandguss
- Kokillenguss

Knetlegierungen

- Strangpressen
- Walzen
- Tiefziehen
- Schmieden

Gusslegierungen

- gute Schweißungs- und Geräuschdämmung
- gute Abschirmung el.-magn. Strahlung

Knetlegierungen

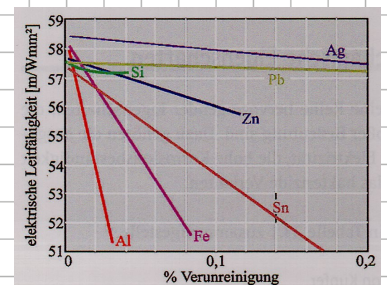
- hdp $\rightarrow$ schlechte Kaltumformbarkeit
- $T > 225^\circ\text{C} \rightarrow$ Aktivierung weiterer GS $\rightarrow$ gute Warmumformbarkeit

Kupfer und Kupferlegierungen

in Natur als Sulfide und Oxide

reines Cu

- $\rho = 8.93 \text{ g/cm}^3$
- $T_s = 1083^\circ\text{C}$
- hfa $\rightarrow$ gut umformbar
- gute Korrosionsbeständigkeit
- nach Ag höchste el. Leitfähigkeit aller Metalle
- hängt von Reinheitsgrad ab
 - $\rightarrow$ Fremdatome bilden Störstellen im Atomgitter $\Rightarrow$ Leitfähigkeit $\downarrow$
 - besonders hohe Reduktion durch in Cu gut lösliche Elemente
 - $\rightarrow$ in ET i. d. R. Reinkupfer
 - Sauerstoff vermindert Leitfähigkeit ($\rightarrow$ OF-Cu $\hat{=}$ oxygen free Cu)



Kupferlegierungen

Messing: Cu Zn 10 (10 Gew.-% Zink)

Brønse: Cu Sn 6 (6 Gew.-% Zinn)

Rotguss: Cu Sn 5 Zn 5 Pb 5 - C ("C" = Guss (engl. cast))

Formgedächtnislegierungen (FGL, sma (shape memory alloy))

Formgedächtniseigenschaften

Einweg-Effekt	Zweiweg-Effekt	Pseudoelastizität
Belasten bei Raumtemperatur ↓ Bauteil verformt sich bleibend ↓ Wärmebehandlung $T > A_s$ ↓ Bauteil nimmt ursprüngliche Gestalt an	Erwärmen ↓ Bauteil verformt sich ↓ Abkühlen ↓ Bauteil nimmt ursprüngliche Gestalt an	Belasten bei Raumtemperatur ↓ Bauteil verformt sich ↓ Entlasten ↓ Bauteil nimmt ursprüngliche Gestalt an

spannungs- und temperatur-induzierte Gefügeumwandlungen

Voraussetzung:

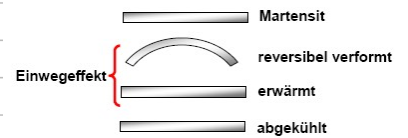
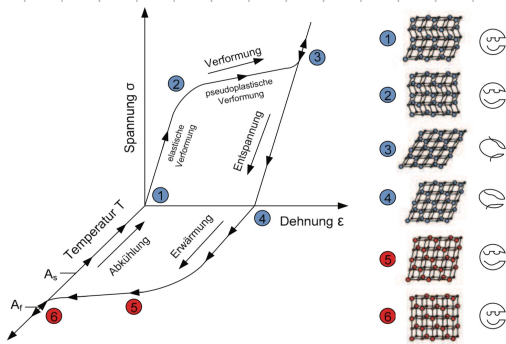
martensitische Umwandlung: (nichts mit Stahl zutun, andere Gitterstruktur)

Mischkristalle von Elementen mit allotropen Umwandlung: Ti, Ni, Fe, Co, Sn

Deformationsmechanismen

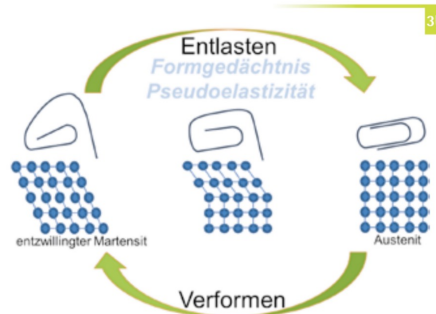
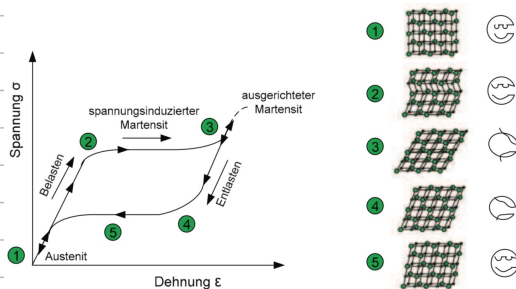
- diffusionslose Phasenumwandlung (martensitische Phasenumwandlung)
- Ausrichtung von Martensit-Zwillingen

Einwegeffekt



Spannung $\Rightarrow$ Verschieben Zwillingsgrenzen, Scherung
 $\rightarrow$ Dehnung von mehreren %

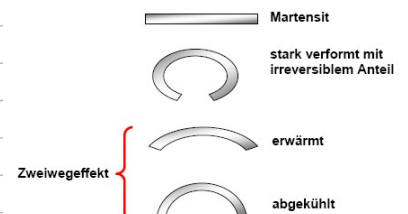
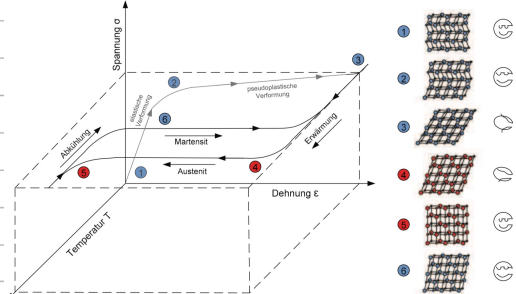
Pseudoelastizität



gummiartiges Verhalten, hohe reversible Verformung bei geringer Änderung d. Spannung

Hysteresese: Rückumwandlung in Austenit erst nach hohem Spannungsniveau

Zweiwegeffekt



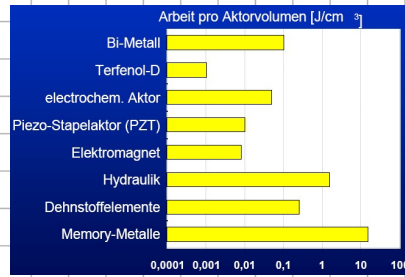
Formänderung allein durch ΔT

Formgedächtnislegierungen als Aktuatoren

thermische Aktuatoren, Bewegung durch ΔT

Durch Strom kann man FGL erwärmen und somit austenitisieren
 $\Rightarrow$ kann Arbeit verrichten

hohes volumenspezifisches Arbeitsvermögen:
10x grösser als Hydraulik



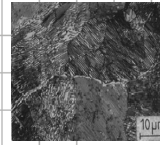
Wärmebehandlungen

Ziele

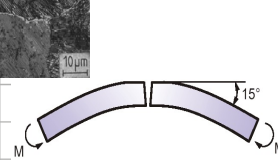
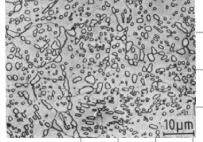
- Steigerung Härte & Festigkeit ($\rightarrow$ weniger Verschleiß) oder Herabsetzen Härte & Festigkeit
- Verbesserung Zähigkeit & Umformbarkeit
- Verbesserung Bearbeitbarkeit (Drehen, Fräsen, etc.)
- Bildung eines homogenen Gefüges
- Abbau von Eigenspannungen

Weichglühen

- Ziel: Vermindern der Härte, Verbessern der Bearbeitbarkeit
- reversibel
- Stahl: $T < A_1$ mit langsamen Abkühlen
- Eigenspannungen reduziert (mehr als bei Spannungserglühen)
- Stahl: Gefüge ändert sich zu Perlit



Werkstoff: Stahl mit 0,9% C



normalisiert
lamellar-perlitisches Gefüge
Bruch bei ca. 30° Verformung



weichgeglüht (10 Stunden bei 700 °C)
Perlitlamellen eingeformt (koagulierte)
kein Bruch bei einer Verformung von 180°

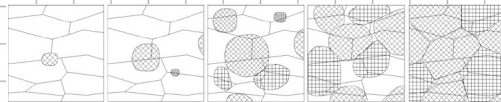
Normalglühen

- Ziel: gleichmässiges, normales (im Sinne des EKD) Gefüge
- Stahl: $T > A_3$, überaufgeteilt $\rightarrow T > A_1$

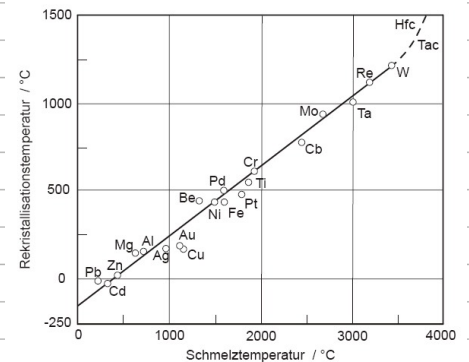
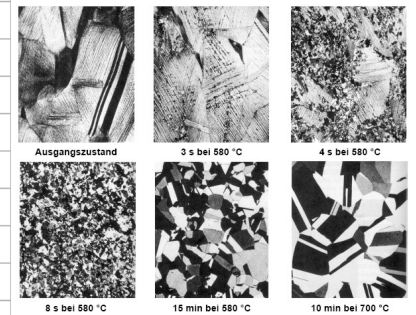
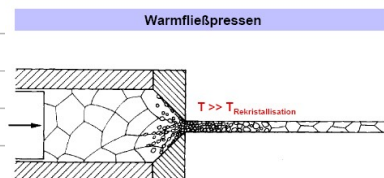
Spannungserglühen

- Ziel: Eigenspannungen reduzieren (z.B. nach Schweißen) aber nicht weich machen
- $T < T_{\text{Weichglühen}}$
- Stahl: keine Gefügeänderung (nur atomare Prozesse)

Rekristallisation

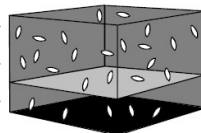


- Ziel: Verformbarkeit erhöhen, Kaltverfestigung aufheben
- Voraussetzung: Kaltumformung
- Entstehung eines neuen Gefüges: neue, versetzungsarme Körner
- Wachstum auf Kosten d. Nachbarkörner
- Korngrösse = f(Verformungsgrad, Zeit, Temperatur)
 $\rightarrow$ Rekristallisationsdiagramm (für jeden Werkstoff anders)
- $T_{\text{rekr}} \approx 0.4 T_s$
- dynamische Rekr.: während Umformung
- Eigenspannungen weg



Ausscheidungshärtung

- Ziel: Festigkeit (v.a. Streckgrenze) $\uparrow$
- Ausscheidung 2. Phase
 $\rightarrow$ Widerstand für Versetzungsbewegung



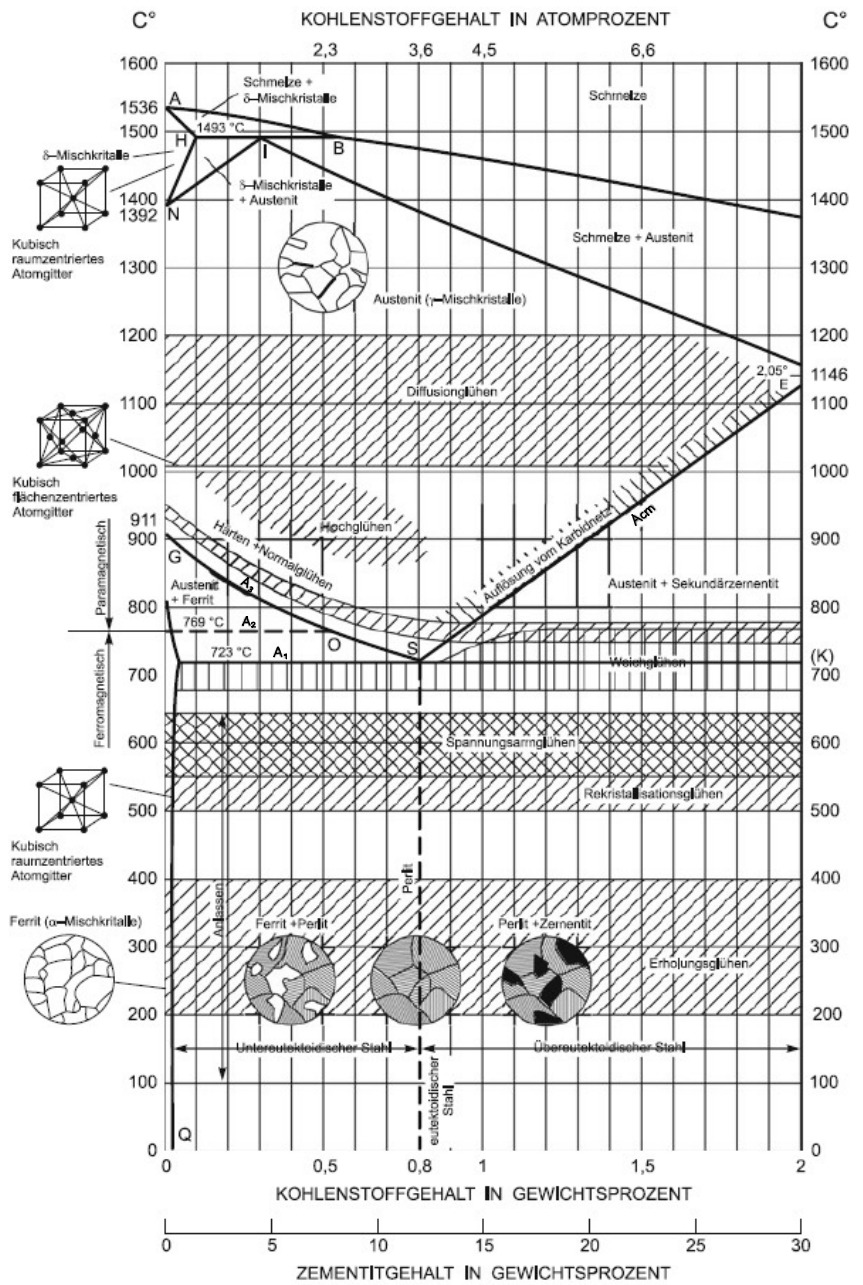
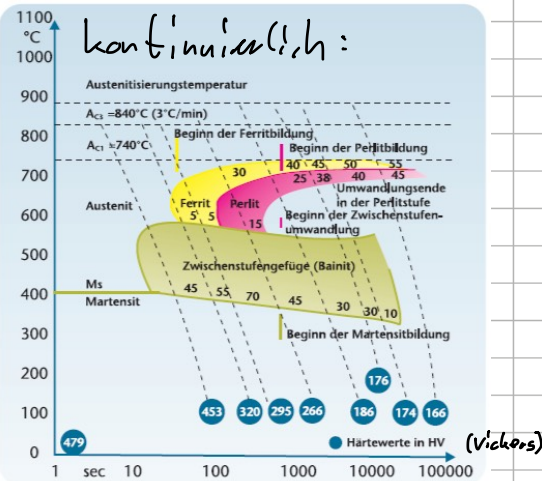
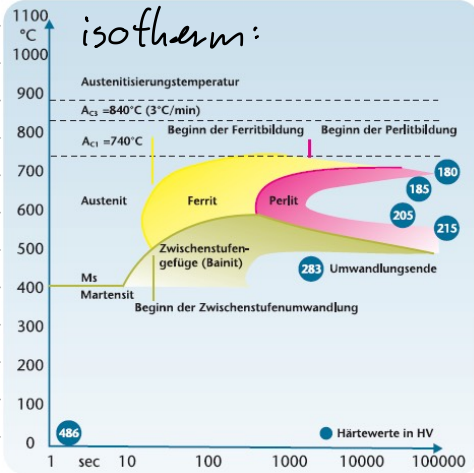
Wärmebehandlung von Stählen

Fe-C-Diagramm

- zeitunabhängig, "unendlich" (langsame Abkühlung)
- Gleichgewichtszustand

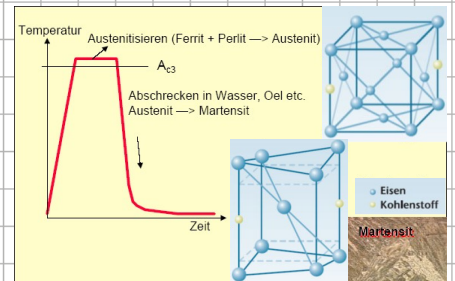
ZTU-Diagramm

- zeitabhängige Vorgänge
- Einfluss Legierungselemente $\rightarrow$ für jeden Stahl spezifisch
- $\rightarrow$ verschieben nach rechts & unten
- $\rightarrow$ durch tiefere & weniger Härtespannungen
- $\rightarrow$ je grösser Anteil, desto höher liegt uns sei



Härten

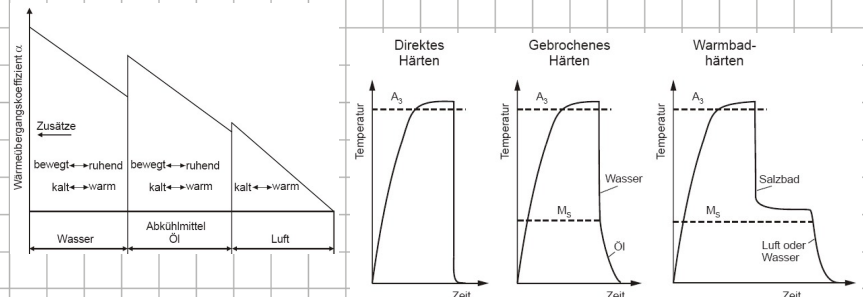
- Ziele: harte, verschleissbest. Oberfläche
- Erhöhung Streckgrenze & Festigkeit
- Voraussetzung: mind. 0.2-0.3% C bei unlegierten Stählen
- grosse Anteile aus unlegiertem Stahl praktisch nicht durchhärterbar (ent. unwirkt)
- Abfolge:
 - Austenitisieren: Erhitzen und Halten auf Härte-temp ($> A_3$)
 - Abschrecken



- Umwandlung Austenit $\rightarrow$ Martensit (t_z) (tetragonal-raumzentriert): verzerrt $\rightarrow$ hart
- Abkühlmedium, Bewegung, T bestimmen V:
- V bestimmt Härte

Umwandlungshärten

- schnelle Abkühlung, um Ferrit- und Perlitbildung zu verhindern
- unter Ms: langsames Abkühlen:
 - Ausgleich thermischen Spannungen
 - Umwandlung über gesamten Querschnitt



Vergüten = Härten + Anlassen

- Ziel: Kombination d. gewünschten mech. Eigenschaften:

- Härte
- Zähigkeit } oft Balance erwünscht

- Anlassen $\rightarrow$ C-Atome diffundieren $\rightarrow$ Gitter entspannt sich

- bei ausreichend hoher Anlasstemp wandeln sich die vom C befreiten Gitterbereiche in Ferrit um

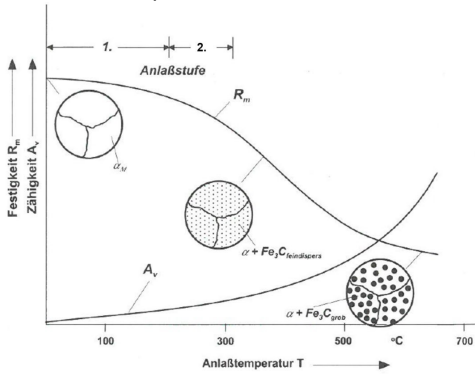
- überschüssiges C wird als Carbide ausgeschieden

- Vergütungscharakterbild zeigt für bestimmte Härte benötigte Anlasstemp.:

$\rightarrow$ für jeden Stahl spezifisch

$\rightarrow$ bei unlegierten Stählen ist Bereich der erreichbaren mechanischen Größen kleiner

- Anlassstufen:



ca. 250°C (1.):

weiterhin Martensit, allerdings Gitter leicht entspannt

ca. 250°C - 400°C (2.):

Umwandlung in Ferrit, Ausscheidung d. überschüssigen C als feindisperser Zementit

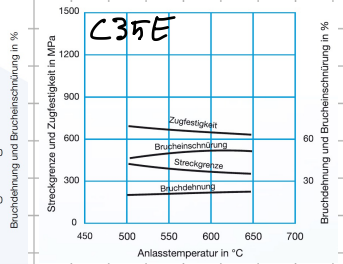
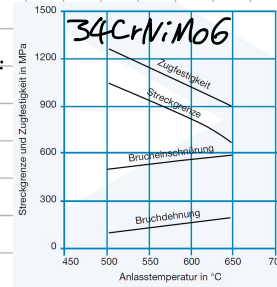
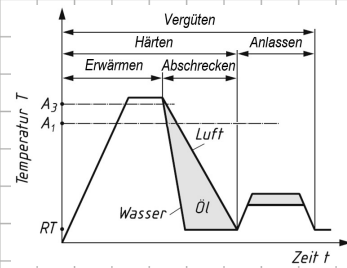
Ende 2. Anlassstufe: keine Übersättigung mehr von C, Gefüge wird von Ferrit und Zementit gebildet

ca. 400°C - 600°C:

Vergrößerung Zementit, Abbau innerer Gitterfehler

ca. 600°C - 700°C:

vollständige Rekristallisation des Ferrits $\rightarrow$ Nadelform geht verloren



Wärmebehandlung d. Stahl-Oberfläche

Ziel: unterschiedliches Gefüge an Oberfläche und im Kern

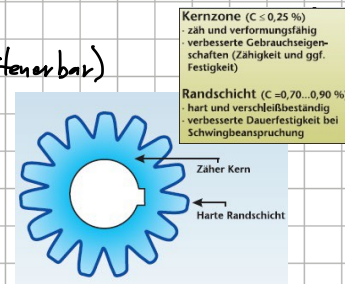
Methoden:

- $T > A_3$ nur im Randbereich

- Induktionshärten: Wirbelstrom + Wasserdusche $\rightarrow$ Verschleißschutz
- Flammschichten, Laserschichten (unkontrolliert, primitiv $\rightarrow$ heilig)

- Einsatzhärten (für Einsatzstähle mit $< 0.7\% C$):

- Eindiffusion von C an Oberfläche oberhalb A_3 (Aufkohltiefe steuerbar)
- Abschrecken $\rightarrow$ Martensit am Rand, Ferrit/Perlit im Innern



Kunststoffe

Molekülkette durch chem. Reaktion vieler Monomere

Polymerisationsgrad n = Anzahl d. Monomere in Molekülkette = $10^2 - 10^5$

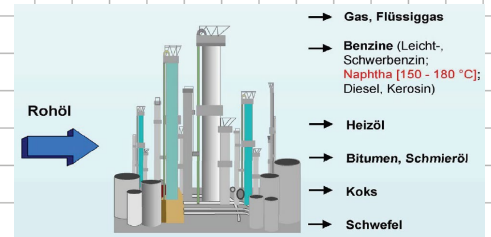
wichtigste Elemente: C & H, auch O, N, S

Herstellung

Erdölverarbeitung in Raffinerie

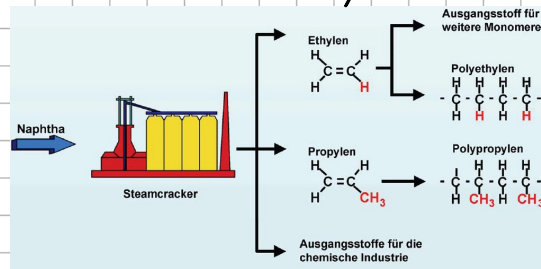
→ Destillation

→ wichtigstes Destillat für Kunststoffherst.: Naphtha



Steamcracker

→ thermischer Spaltprozess



Synthese

Polymerisation: Reagieren von Monomeren zu Polymeren unter Auflösung d. $C=C$ -Doppelbindung
→ Aufbrechen $C=C$ -Doppelbindung mit Katalysator / UV-Licht

Polykondensation: Verknüpfung gleicher oder verschiedenartiger Moleküle unter Abspaltung eines niedermolekularen Stoffes (H_2O , NH_3 , HCl , Alkohole, ...)

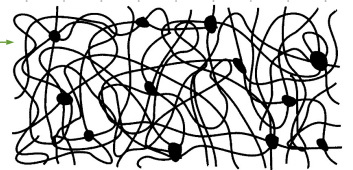
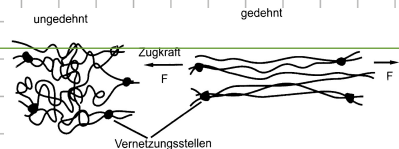
Polyaddition: Bildung von Makromolekülen durch Reaktion zweier Partner oder Umlagerung von Atomen(-gruppen) im Molekül ohne Abspaltung von Nebenprodukten

Eigenschaften

- gute chem. Beständigkeit (bei RT)
- niedrige Dichte: $0.9 - 2.2 \text{ g/cm}^3$
- niedriges Elastizitätsmodul
- geringe Wärmeleitfähigkeit (keine frei beweglichen e^-)
- hohes Dämmungsvermögen
- geringe el. Leitfähigkeit (Isolator, keine frei beweglichen e^-)
- Sprödigkeit bei tiefen T und geringe Festigkeit bei hohen T
- T_m -Bereich, da abhängig von Kettenlänge, Moleküle unterschiedliche Kettenlängen

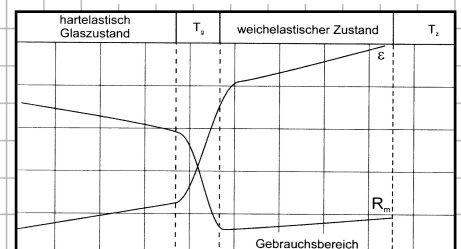
Elastomere (auch: Gummi)

- schwach chemisch vernetzt
→ weich, stark verformbar
→ geringer E-Modul
- Vernetzung = Vulkanisation, z.B. mit Schwefel(-verbindungen), Metallsalze, energiereiche Strahlung
- nicht schmelzbar, nicht löslich, quellbar, nicht schweißbar
- reversibel-elastische Verformung: vernetzte Kettenmoleküle auseinander ziehen
- UV macht Bindungen kaputt, daher oft UV-Schutz nötig



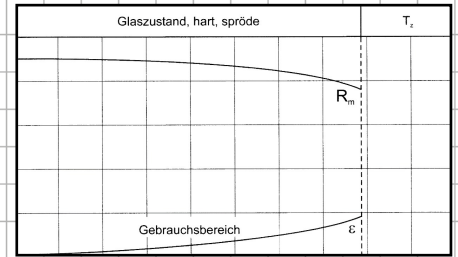
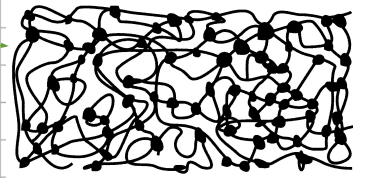
Glasübergangstemperatur (auch: Erweichungstemperatur)

Übergang von weichelastischen/flexiblen in hartelastischen/spröden Zustand für jeden Kunststoff spezifisch



Duromer (auch: Duroplaste oder Kunstharze)

- stark chemisch vernetzt (kovalente und Ionenbindungen)
 - geringe Umformbarkeit
 - harter Festkörper
- nicht schmelzbar, nicht löslich, kann quellbar, nicht schweißbar
- i.d.R. bis über 80% Füll- & Verstärkungstoffe



Verarbeitung

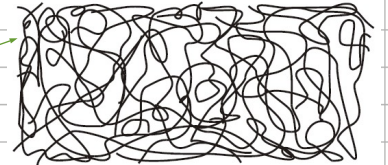
Verformung durch viskoses Fließen nicht möglich

→ entweder Formgebung im unvernetzten Zustand

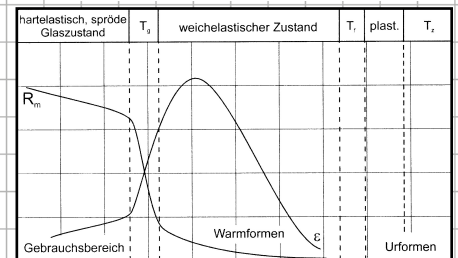
- Vernetzung durch Druck, Temperatur, UV, Reaktionsharze
- oder spanabhebend bearbeiten

Thermoplaste (auch: Plastomere)

- Moleküle unvernetzt
- schmelzbar (beliebig oft: $T_m < T_g$), löslich, quellbar (kann Flüssigkeit aufnehmen), schweißbar
- gut verarbeitbar (Spritzgossen, Extrudieren, Tiefziehen, Schweißen, Kleben)



Struktur amorpher Thermoplaste (ungeordnete Makromoleküle)



amorphe Thermoplaste

- Molekülketten völlig ungeordnet
- häufig durchsichtig
- Gebrauchsbereich unter T_g (typischerweise: $T_g \geq 80^\circ\text{C}$)
 - hartelastisch, spröde

teilkristalline Thermoplaste

- kristalline Bereiche
- opak bis undurchsichtig durch krist. Bereiche
- Einsatzbereich zw. T_g und T_m

kristalliner Bereich (geordnete Molekülketten)



Struktur teilkristalliner Thermoplaste (amorphe und kristalline Bereiche)

