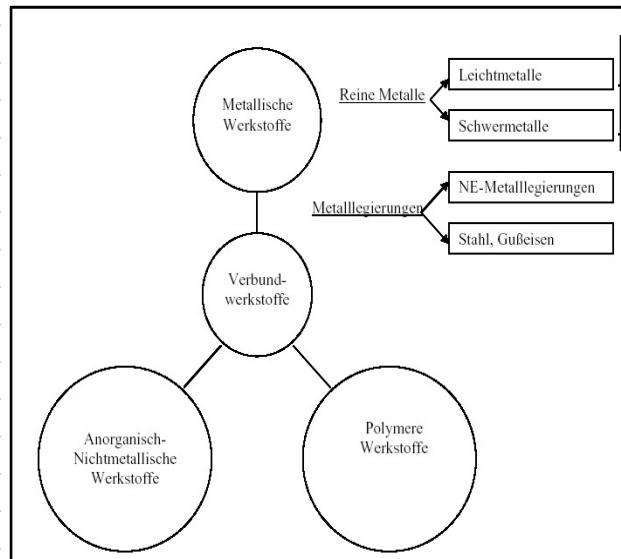


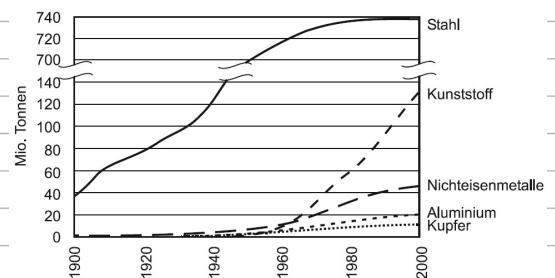
Werkstoffgruppen



$\rho < 5 \text{ g/cm}^3$, 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, Kerbschlagbiegeversuch)

Begriffe / Definitionen

elastische Formänderung

- reversibel

- Hookesche Gesetze:

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

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

- meist nur Formänderungen von < 1%

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

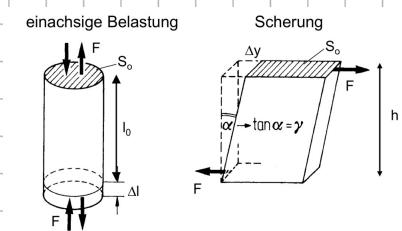
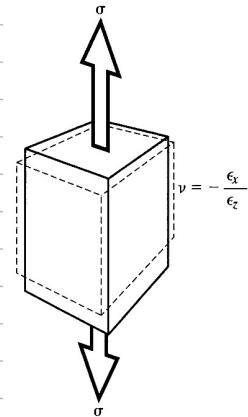
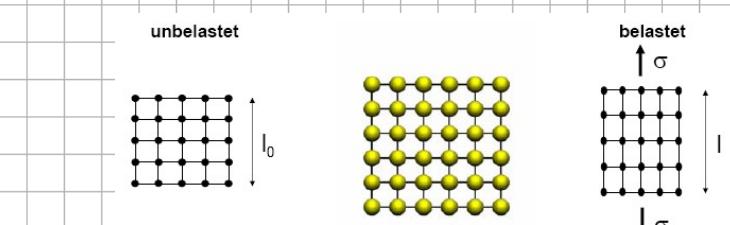
$$E = 2(1+\nu)G$$

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

hohe T_{Schmelz} \Leftrightarrow hoher E-Modul

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

$$\text{Schubspannung } \tau = \frac{F}{S_0} [\text{MPa} = \text{N/mm}^2], \quad \text{Scherung } \gamma = \tan \alpha = \frac{\Delta y}{l_0} [-]$$

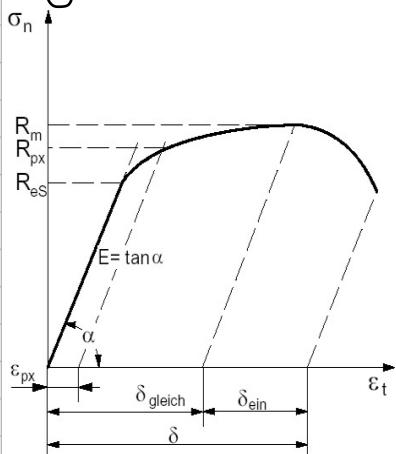


Härteprüfung (Brinell, Rockwell, Vickers):

Definition Härte: Widerstand gegen **plastische Verformung**

technische Bedeutung Härte: Verschleissfestigkeit an Oberfläche

Zugversuch:



→ Werkstoffwiderstände (WW):

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

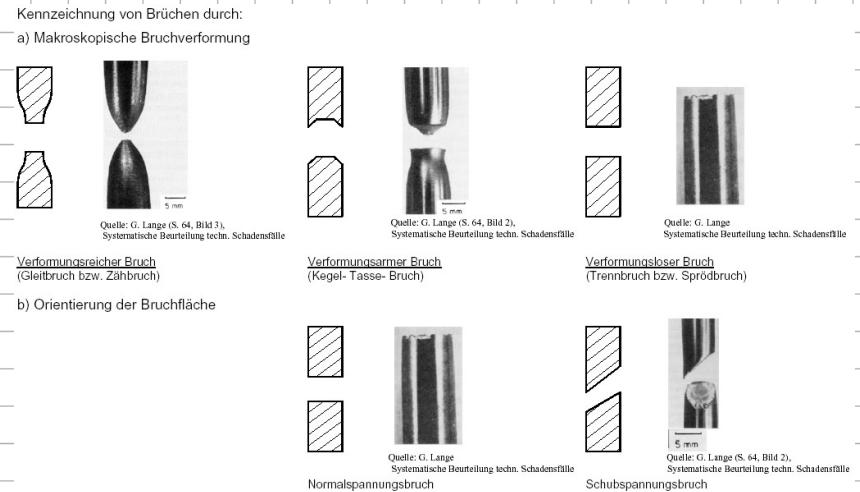
weitere Größen:

- $\delta = \epsilon_p$ des gebrochenen Stabes $= \frac{l_0 - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \text{Bruchdehnung} = \delta_{\text{gleich}} + \delta_{\text{ein}}$
- $\delta_{\text{gleich}} = \text{Gleichmaßdehnung}$
- $\delta_{\text{ein}} = \text{Einschnürdehnung}$
- $\zeta = \Delta S / S_0 \cdot 100\% = \text{Bruch einschnürung}; \quad S = \text{Querschnittsfläche}$

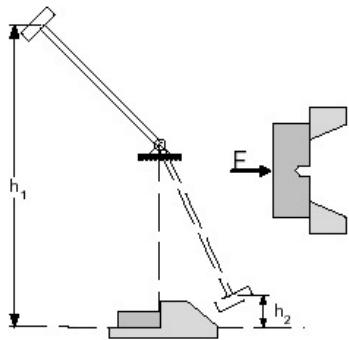


Grundtypen d. Verfestigungskurven Bruchbildungsformen

Typ	Merkmale	Beispiele
	Ohne Streckgrenzerrscheinungen	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-plastischen Dehnungsbereich (heiß: dynamische Reckalterung)	Legierungen mit hinreichend großen Konzentrationen an Interstitial- oder/und Substitutionsatomen in bestimmten Temperaturbereichen



Kerbshlagbiegeversuch:



→ Werkstoffwiderstandsgrößen:

- Kerbshlagarbeit: $W = mg(h_1 - h_2)$

- Kerbshlagzähigkeit: $\alpha_k = W/A_k \text{ [J/cm}^2\text{]}$

$$A_k$$

weitere Größen

- Auftrittgeschw.: $mgh_1 = \frac{1}{2}mv^2$

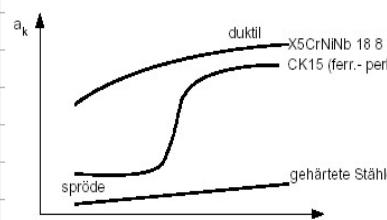
- Spröd-Duktilität-Übergangstemperatur: $T = T_{\text{ü}} \text{ wenn } \alpha_k = 20 \text{ J/cm}^2 \text{ oder}$
 $T = T_{\text{ü}}, \text{ wenn Zähbruchanteil } 50\% \text{ d. Bruchfläche}$

Zähigkeit = Duktilität = Verformbarkeit
(lat. ducere = ziehen, föhnen)

Eigenschaft, infolge Belastung plastisch zu verformen, bevor Versagen

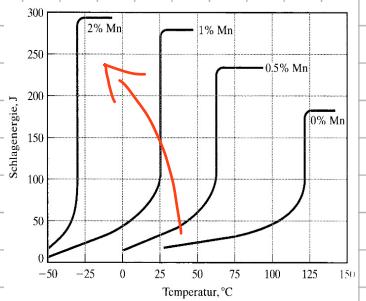
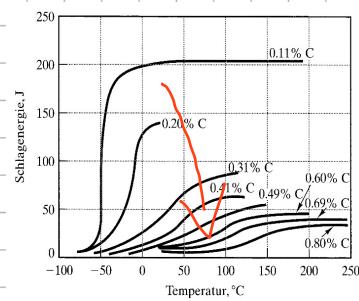
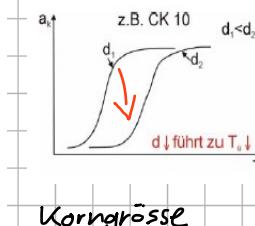
Gegenteil: Sprödigkeit: lässt sich nur gering plastisch verformen

Einflussgrößen Zähigkeit Stähle



aus: keine Tieftemperaturverträglichkeit

ferr.-perf.: Tieftemperaturverträglichkeit



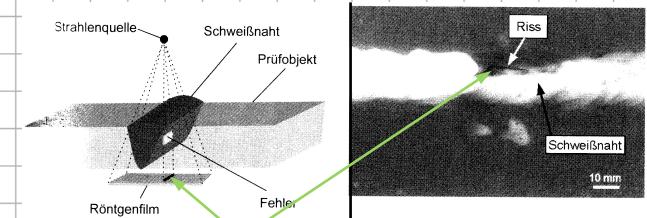
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (Sicht-, Röntgen-, Ultraschall-, Wirbelstrom-, Magnetpulver-, Farbeindringprüfung, Repliken-Methode)

(Sammarmachen!)

Röntgenprüfung

Schwarzung d. Röntgenstrahlung entsprechend Dicken- und Dichtenverhältnissen d. Prüfkörpers

→ aufwendig

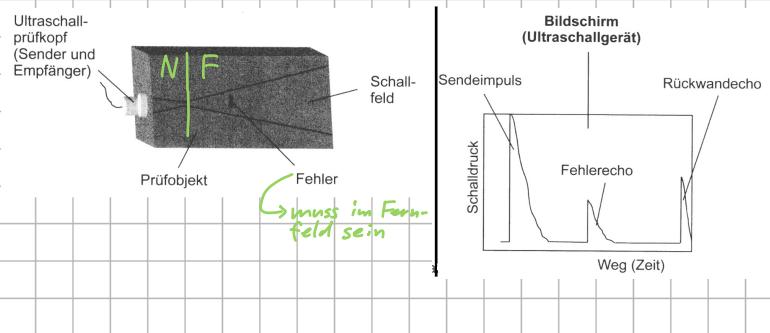


dunkel, da geringe Strahlungsschärzung

Ultraschallprüfung

Laufzeitmessung erlaubt Bestimmung d. Tiefe von Fehlstellen:

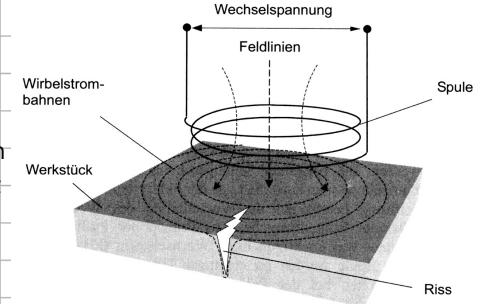
$$2x = vt$$



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

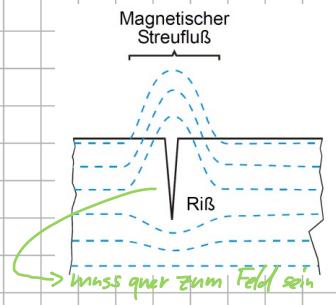


Magnetpulverprüfung

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



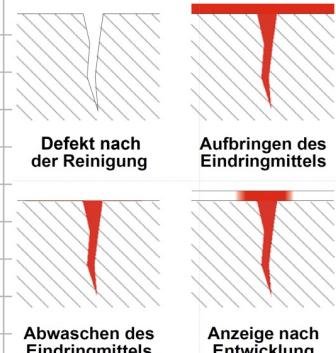
Farbeindringprüfung

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

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

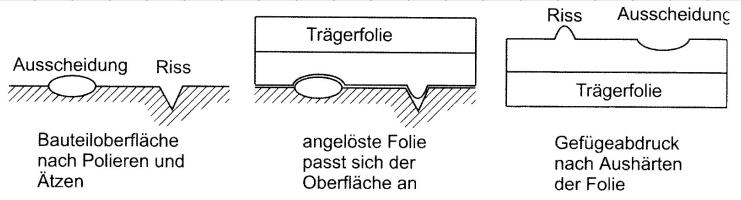
→ Voraussetzungen:

- 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



Repliken-Technik

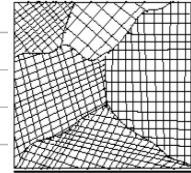
"Negativ" d. Oberfläche
hohes Auflösungsvermögen



Aufbau von Metallen

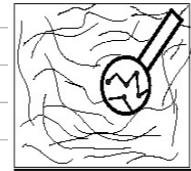
kristallin geometrisch regelmäßige Atomanordnung über mkr. (Körper) oder mkr. (Einkörner) Bereiche

- Metalle
- Keramiken
- Halbleiter



amorph geometrisch unregelmäßige Atomanordnung über mikroskopische Bereiche, submikroskopische atomare Anordnung

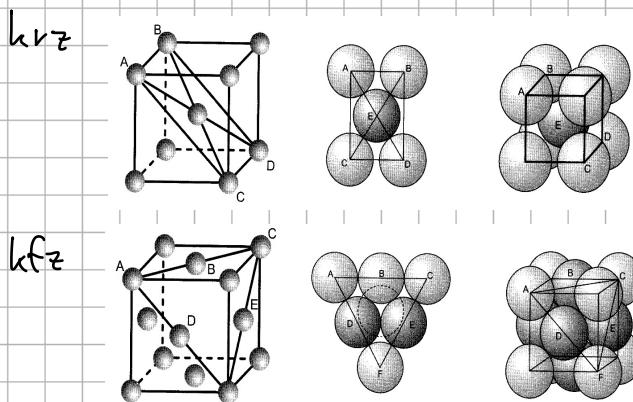
- (metallisches) Glas
- Polymerenoplastische



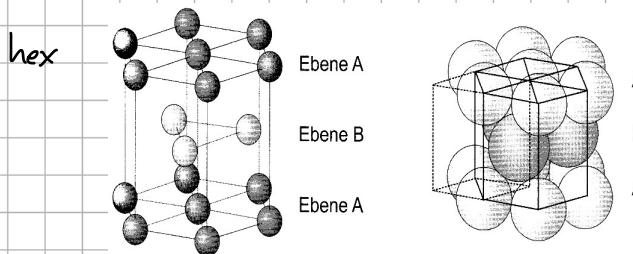
Kristallsystem: periodisch regelm. Anordnung von Atomen mit charakteristischen Symmetrieeigenschaften

Elementarzelle: kleinste Struktureinheit

Kristallstrukturen



α -Fe, δ -Fe, β -Ti, Cr, Mo, W, V



γ -Fe, Al, Cu, Ag, Au, Ni

α -Ti, Mg, Zn, Cd

Allotropie:

Änderung Atomanordnung mit Temperatur

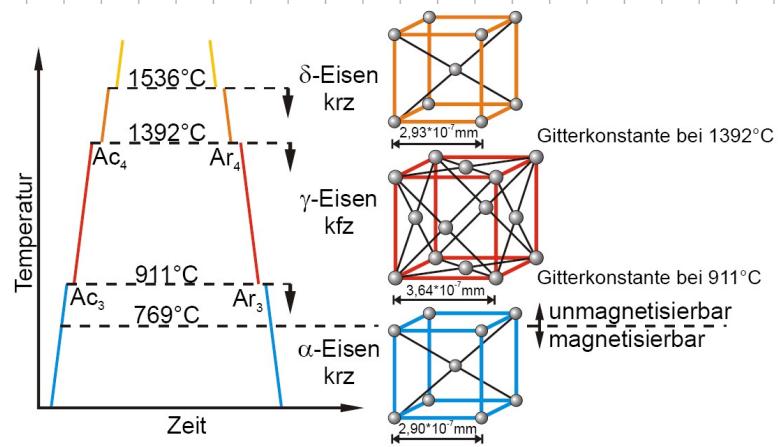
→ sprungartige Änderung von Eigenschaften:

- spezifisches Volumen
- el. Leitfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit

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

Fe, Ti, Co, Mn, Sn

Allotropie d. Eisens



Gleitebene (GE):

Gitterebene mit grösster Belegungsdichte an Atomen

Gleitrichtung (GR):

Gitterrichtung mit grösster Belegungsdichte an Atomen

Gletsystem (GS):

Gleitebenen • Gleitrichtungen

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

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

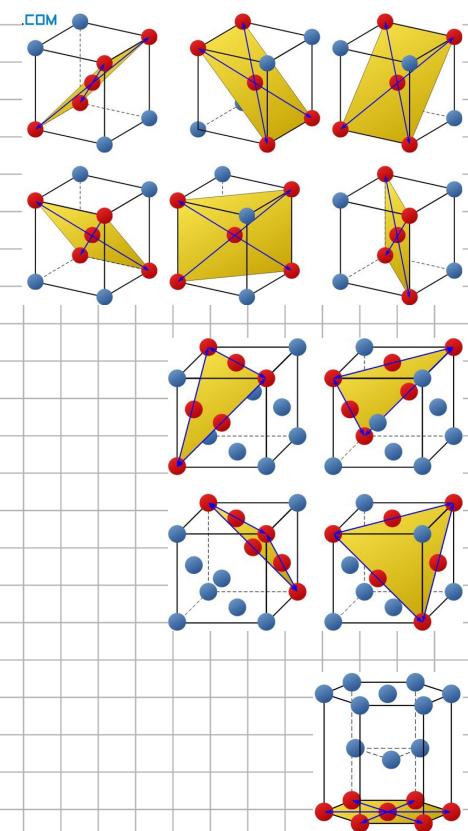
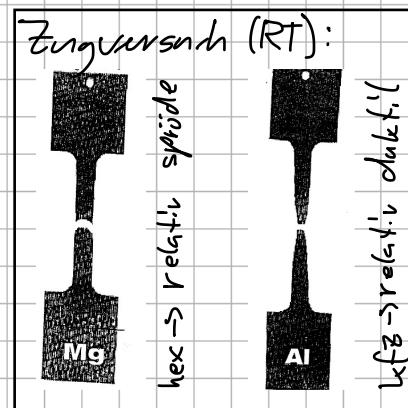
$$\text{hex: } 1 \cdot 3 = 3$$

Phase:

Bereich (Kristallographisch) einheitlicher Struktur und chemisch homogen

Isotropie:

alle Richtungen gleich



Gitterfehler

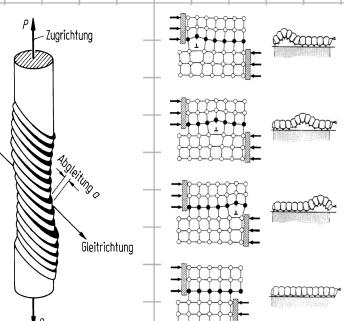
0-dim: Leerstellen, Zwischenatome, Substitutionsatome

1-dim: Versetzungen

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

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

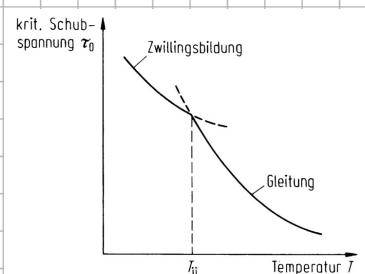
plastische Verformung durch Versetzunggleiten oder Zwillingsbildung



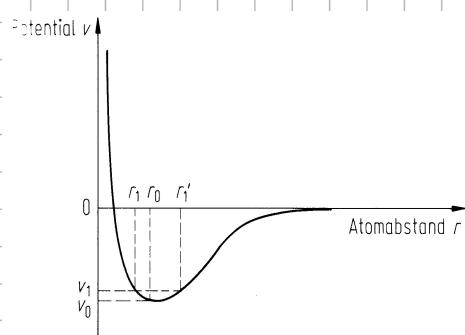
GE \downarrow (zB hex) \Rightarrow häufig Zwillingsbildung

T \uparrow / V \downarrow \Rightarrow Versetzungsgleiten

T \downarrow / V T \Rightarrow Umklappen Gitter in neue Orientierung
 \hookrightarrow Zwillingsbildung



thermische Ausdehnung von Festkörpern



asymmetrisches Potential der dominanten Bindungen (Summe aus anziehenden und abstoßenden Kräften):

steigt bei Kompression stärker als bei Dilatation

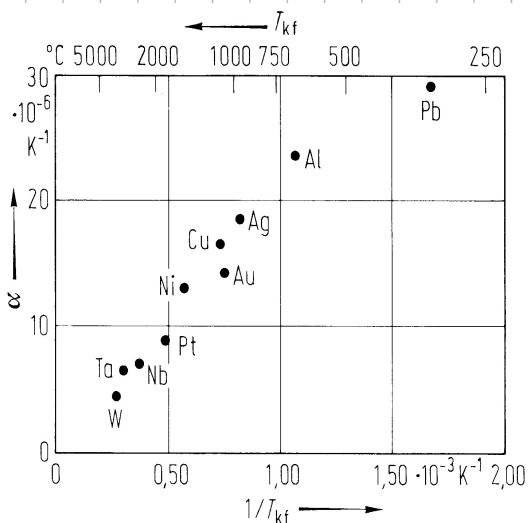
\Rightarrow Schwingungsmittelpunkt verschiebt sich mit umherschweifender Energie zu grösseren Atomabständen

\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 potentielle 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

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

→ Dehnungsdifferenz einplanen
bei Temperaturniederschlag!

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
Beryllium	Be	1560	507	113	229	hdP	1,85	305	0,05	270
Blei	Pb	600	27	174	495	kfz	11,34	16	0,44	7,5
Cadmium	Cd	594	24	152	298	hdP	8,64	50	0,30	9,8
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
Gold	Au	1336	395	144	408	kdP	19,32	78	0,44	35
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
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
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
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	kdP	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
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
Uran	U	1403	565	153	588	orthor	18,7	120	0,23	255
Vanadium	V	2175	815	136	303	krz	6,09	127	0,36	368
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
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

*: 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
 v : Querkontraktionszahl
 $R_{p0,2}$: Streckgrenze in MPa
 R_m : Zugfestigkeit in MPa

Legierungsbildung

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

Phase Bereich (kristallographisch) 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. Komponenten liegt vor (2 Phasen)

vollst. Löslichkeit: Atome beider Komps kristallisieren in gleichen Kristallgitter (Mischkristall)

Substitutionstrichter (z.B.: $\alpha\text{-Fe-(Cr, \gamma\text{-Fe-Ni)}$)

vollkommenen Löslichkeit nur, wenn

- gleicher Gittertyp
- etwa gleich große Atome
- chemische Ähnlichkeit

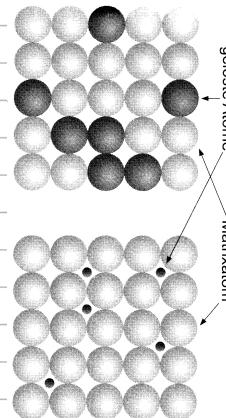
meistens: begrenzte Löslichkeit

Anordnung d. Fremdatome meist unregelmäßig

Einschlusshärtkristall (z.B.: Stahl)

Atome auf Zwischengittern d. Matrixgitters

Einschlüsse nur wenn Atome sehr viel kleiner als Wirtsgitteratome

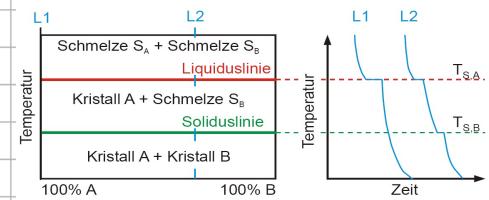


Liquiduslinie trennt (l) von Erstarrungsbereich

Soliduslinie trennt Erstarrungsbereich von (s)

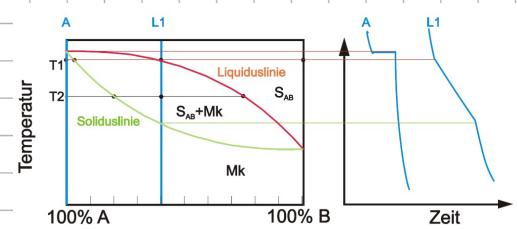
Zustandsdiagramm vollst. unl.

- Umwandlungstemperaturen für alle C gleich
- 2 Phasen
(l): Schichtung nach Dichte
(s): auch vollkommene Trennung



Zustandsdiagramm vollst. l.

- Linsen-/Zigarrendiagramm
- Haltepunkte: Ts d. reinen Komponenten
- Kriechpunkte: Start & Ende d. Erstarrungsbereich d. Legierung



Hebelgesetz

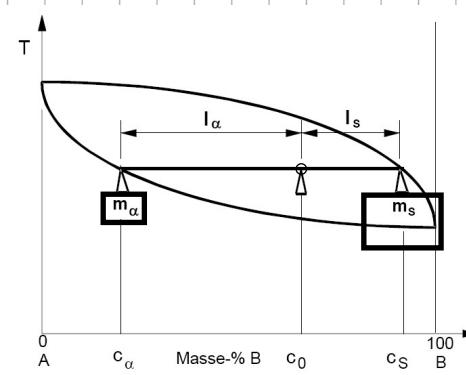
$$1. \quad m = m_\alpha + m_s$$

$$2. \quad m_\alpha c_\alpha + m_s c_s = m c_0$$

$$1 \text{ in } 2 \Rightarrow m_\alpha c_\alpha + m_s c_s = (m_\alpha + m_s) c_0$$

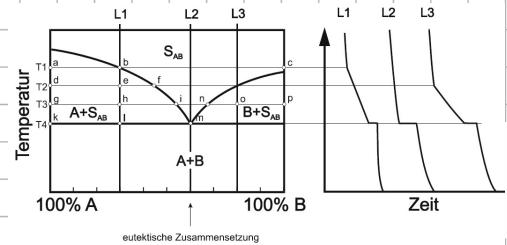
$$m_\alpha (c_\alpha - c_0) + m_s (c_s - c_0) = 0$$

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

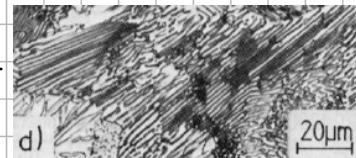


vollst. L. in (l), vollst. unl. in (s)

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

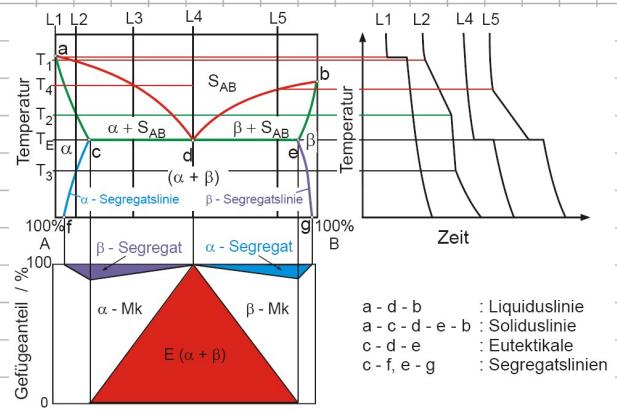


eutektisches Gefüge: feinkristallin, oft eicht- oder lamellenartige Struktur, dendritisches Gefüge (Nadeln)



vollst. L. in (l), teilk. L. in (s) (begrenzte Randlöslichkeit)

- techn. häufigste FG/1
- Eutektikum: Mischung von ≥ Mischkristalllagen
- α -MK: B-Atome in A-Kristall, β -MK: A-Atome in B-Kr.
- Löslichkeit sinkt mit T, wegen Platzengel für Fremdatome
→ übersch. Atome scheiden sich aus festem Mischkristall aus
= Segregationsbildung



Mehrstoffsysteme

→ thermodynamische Modellierungsprogramme: z.B. Thermo-Calc®

- Berechnung d. Zustandsdiagramme
- thermodyn. Datenbank für prakt. sich alle Elemente
- Vorhersage d. Art d. Phasen und Zusammensetzung

Metallische Werkstoffe

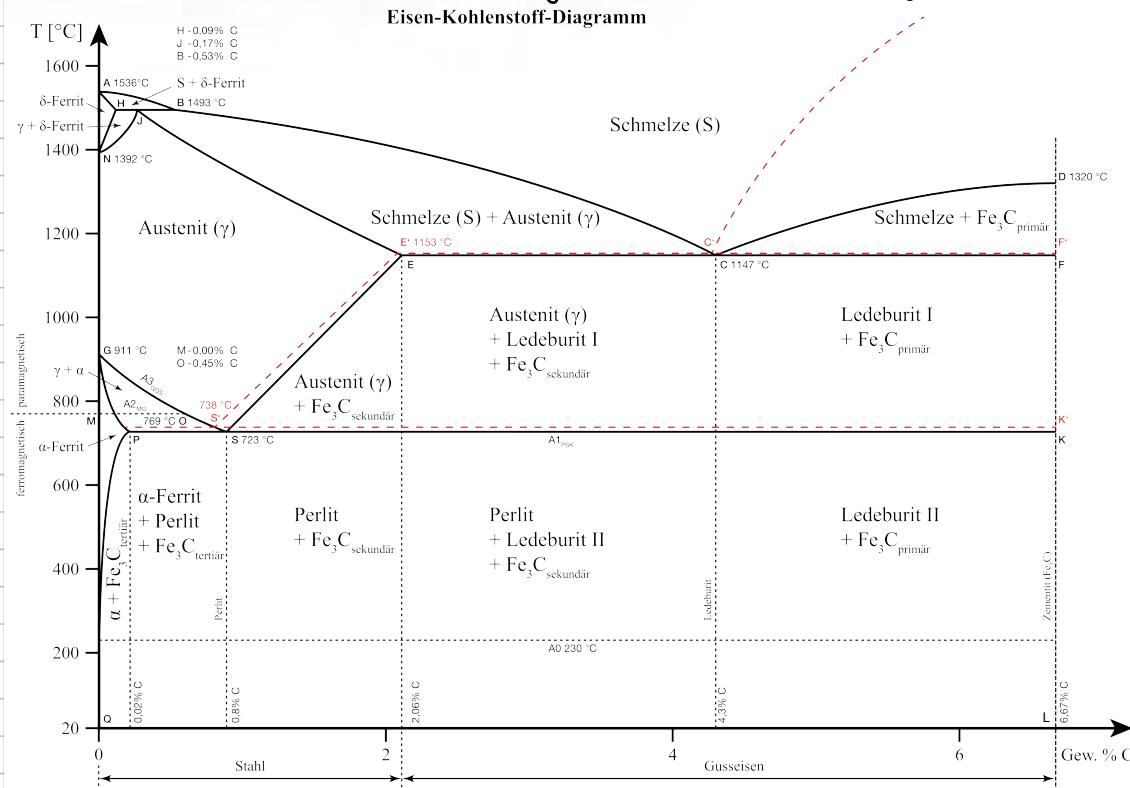
Leichtmetall: $\rho < 5 \text{ g/cm}^3$
Schwermetall: $\rho > 5 \text{ g/cm}^3$

Stähle

Legierung aus Fe + <2% C & <1% Mn ($> 2\% \text{ C} \rightarrow \text{Gusseisen}$)
 $\hookrightarrow \rho = 7.9 \text{ g/cm}^3$

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

Zustandsschaubild (\rightarrow Gleichgewichtszustand / langsame Abkühlung)



Grundsysteme:

- Linsendiagramm
- eutektisches System
- peritektisches System
- Eutektoid

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).

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

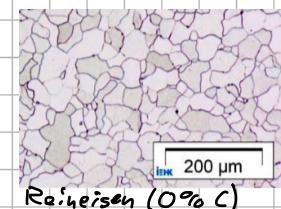
SE-Linie = Löslichkeits- Sättigungsline
Bei Kohlenstoffkonzentrationen zwischen 0,8% und 2,06% wird der zu viel gelöste Kohlenstoff bei Abkühlung in Form von Sekundärzementit (Fe_3C) ausgeschieden.

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-Diagrams, der über 6,67% Kohlenstoffgehalt hinaus geht, ist für die Werkstofftechnik nicht interessant.

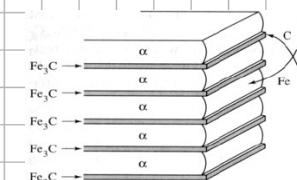
Ferritische Stähle

- α -MK, kurz, einkristallig
- geringe C-Löslichkeit: max 0.02% (bei 723 °C)
- Steilabfall d. Kurbelzugfestigkeit \rightarrow Sprödbruch bei f. h. T (\rightarrow Titanic)
- ferromagnetisch
- gleichgewichtnah



Perlitische Stähle

- zweiphasig, lamellar
- eutektoidie Umwandlung bei 0.8% C / 723 °C
 $\text{Austenit} \rightarrow \text{Perlit} = \alpha\text{-MK (Ferrit)} + \text{Fe}_3\text{C (Zementit)}$
- ferromagnetisch
- gleichgewichtnah

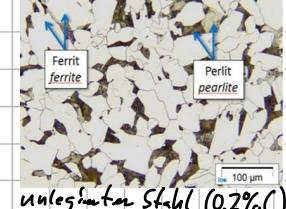


Unterentkohalter Stahl

- zweiphasig
- Ferrit + Perlit
- 0% < Gew.-% C < 0.8%

überentkohalter Stahl

- zweiphasig
- Perlit + Kerngrenzenzementit
- 0.8% < Gew.-% C < 2.06%



Austenitische Stähle

- γ -MK, kfz, einphasig
- unverdunstbar zu RT und Ts (durch Wirkung kugeligeremente)
- hohe C-Löslichkeit
- gut kaltverformbar (12 GS)
- hohe Duktilität, kein Steinbruch d. Karbaldiagnostizität bei tiefer T
- schlechte Temperaturverarbeitbarkeit, höhere therm. Ausl. als Ferrit
- nicht ferritisch
- gleichgewichtnah

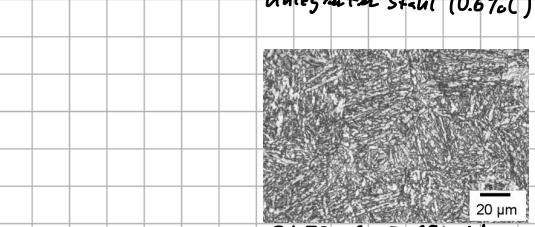
Zwillingseprenzen
(Typisch V)



Martensitische Stähle

- verzerrter α -MK, verzerrtes kfz-Gitter = kfz, einphasig
- > 0.7% C und schnelle Abkühlung aus Ausdehnungsbereich
- mit C übersättigt, C bleibt zwangsgelöst
- enorme Härte / Festigkeit
- ferromagnetisch
- Härtungsgefüge, nicht gleichgewichtnah

feindispers
Struktur



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
- Härtungsgefüge, nicht gleichgewichtnah

Lederbaurit

- Phasengemisch: Zementit mit antikristallisierten Schuhlärzementit und Perlit
- 2.06 - 6.67% C
- Entstehung des Eisen-Eisencarbid-Systems
- gleichgewichtnah

Rostsch:rostbeständig, falls > 12% Cr homogen verteilt

\rightarrow Achtung Gleichheit! Cr_{23}C_6 -Ausscheidung an Korngrenzen

\rightarrow interkorist. Korrosion

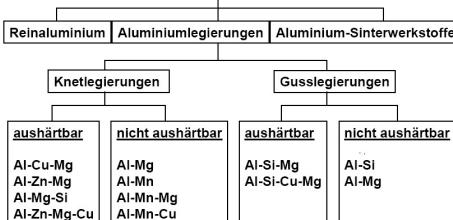
Aluminium und Aluminiumlegierungen

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

reines Al

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

Einteilung Aluminiumwerkstoffe



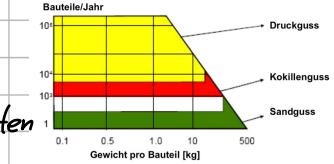
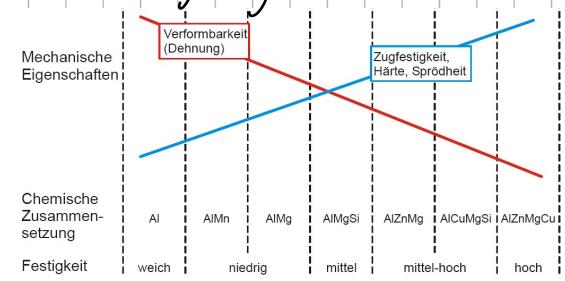
aus(scheidungs-)härtbar:
bildet Ausscheidungen (= 2. Phase) zur Steigerung der Festigkeit

Gusslegierungen:

Zusammensetzung nahe Entsalzung
 \rightarrow tiefe $T_s \rightarrow$ gutes Fließvermögen

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

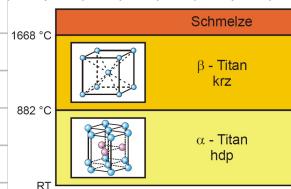
$$\rho = 4.5 \text{ g/cm}^3$$

$T_s = 1668^\circ\text{C} \rightarrow$ nicht gut gießbar (i.d.R umgeformt)

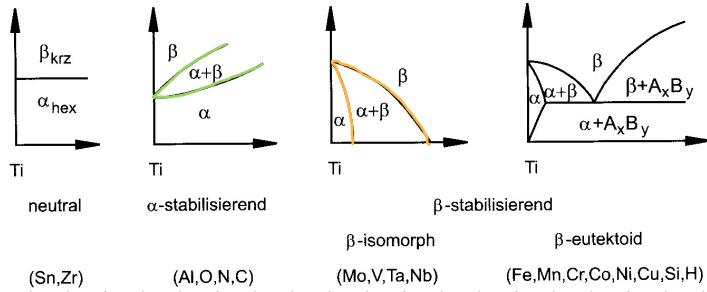
- allotrop

$$E = 115 \text{ GPa}$$

- gute Korrosionsbeständigkeit durch Oxidschicht



Einfluss Legierungselemente auf Umwandlungstemperatur

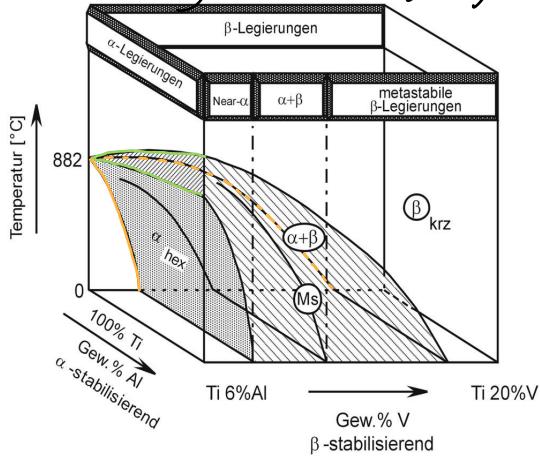


β -isomorph: hohe Löslichkeit \rightarrow können ohne Änderung der Kristallstruktur eingesetzt werden

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

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

Klassifizierung von Ti-Legierungen



α -Leg.: nur α -stab. Elemente

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

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

metast. β -L: 2-phasig, 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

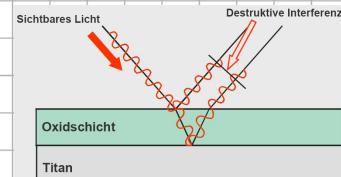
metast. β : - anhärtbar
- teilw. $R_{es} > 1400 \text{ MPa}$
- krz \rightarrow gut umformbar (auch bei RT)
- höhere Dichte als α / $\alpha+\beta$

Anodisieren

elektrochemisches Waschen d. Oxidschicht bis zur definierten Dicke
Dicke = f(Elektrolyt, Temperatur, Spannung)

Farbe abhängig von Dicke

6 Farben möglich



Magnesium und Magnesiumlegierungen

in Natur als $\text{CaMg}(\text{O}_3)_2$, MgO_3 , $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Gewinnung durch Schmelzflussolektrolyse

reines Mg

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

Mg-Legierungen

Gusslegierungen

- Druckguss
- Squeeze casting
- Thixocasting
- Sandguss
- Kokillenguss

Knetlegierungen

- Strangpressen
- Walzen
- Tiefziehen
- Schmieden

Gusslegierungen

- gute Schwingungs- und Geräuschdämpfung
- gute Abschirmung el.-magn. Strahlung

Knetlegierungen

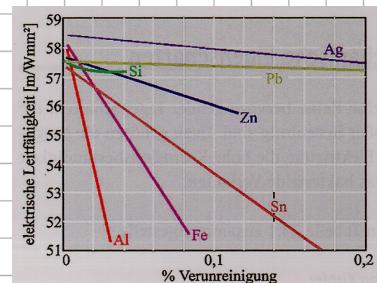
- halp \rightarrow schlechte Kaltumformbarkeit
- $T_s > 225^\circ\text{C} \rightarrow$ Aktivierung weiterer GS \rightarrow gute Umformbarkeit

Kupfer und Kupferlegierungen

in Natur als Sulfide und Oxide

reines Cu

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



Kupferlegierungen

Messing: CuZn10 (10 Gew.-% Zn in)

Bronze: CuSn6 (6 Gew.-% Zn in)

Rotguss: CuSn5Zn5Pb5-C ("C" = Guss (engl. cast))

Formgedächtnislegierungen (FGL, SMA (shape memory alloy))

Formgedächtnisseigenschaften

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 temperaturinduzierte Gefügeumwandlungen

Voraussetzung:

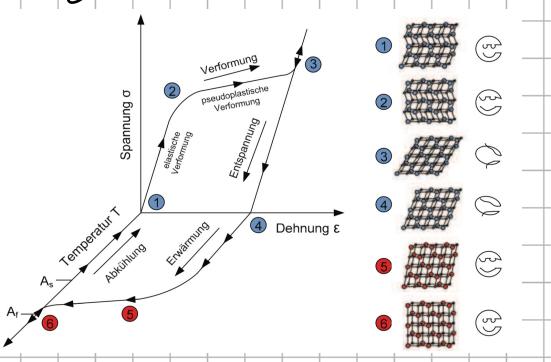
martensitische Umwandlung: (nichts mit Stahl zu tun, andere Gitterstruktur)

Mischkristalle von Elementen mit alltäglicher Umwandlung: Ti, Mn, Fe, Co, Sn

Deformationsmechanismen

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

Einwegeffekt

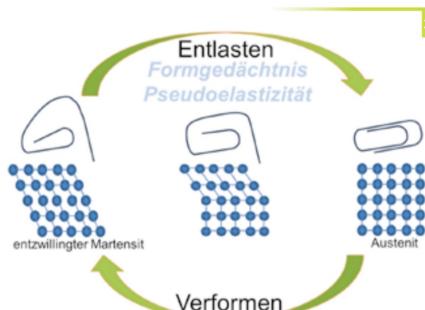
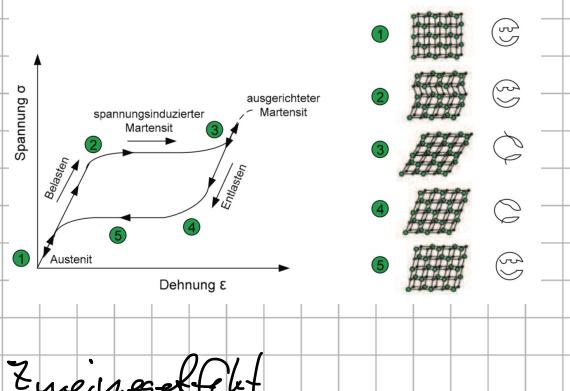


Einwegeffekt {

- Martensit
- reversibel verformt
- erwärmte
- abgekühlt

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

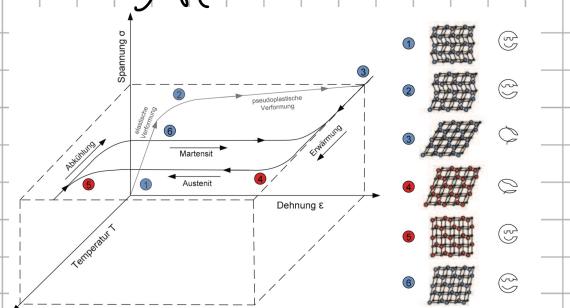
Pseudoelastizität



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

Hysteresis: Rückverformung in Austenit auf gleichem Spannungsniveau

Zweiwegeeffekt



Zweiwegeeffekt {

- Martensit
- stark verformt mit irreversiblem Anteil
- erwärmte
- abgekühlt

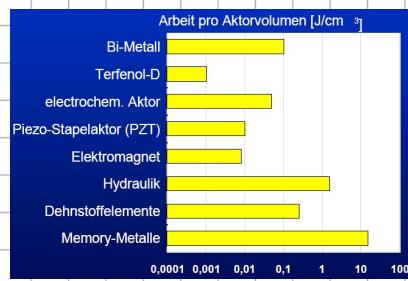
Formänderung allein durch ST

Formgedächtnislegionen als Aktuatoren

thermische Aktuatoren, Bewegung durch ΔT

durch Strom kann man FGL erwärmen und somit ausdehnen
⇒ kann Arbeit verrichten

hohes volumenspezifisches Arbeitsvermögen:
10x grösser als Hydraulik



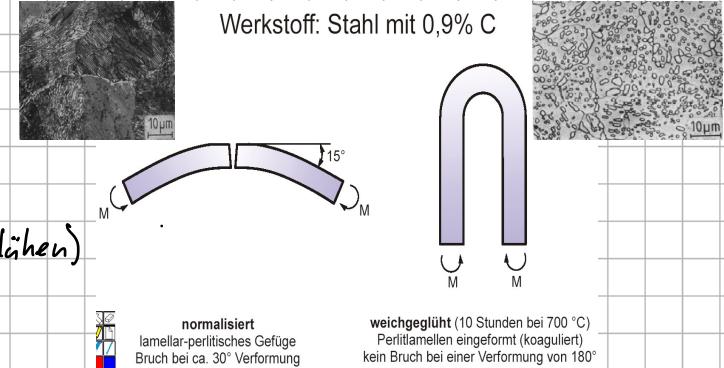
Wärmebehandlungen

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 langsamem Abkühlen
- Eigenspannungen reduziert (mehr als bei Spannungsarmglühen)
- Stahl: Gefüge ändert s.d. zu Perlit

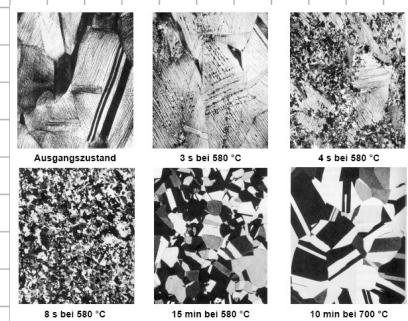


Normalglühen

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

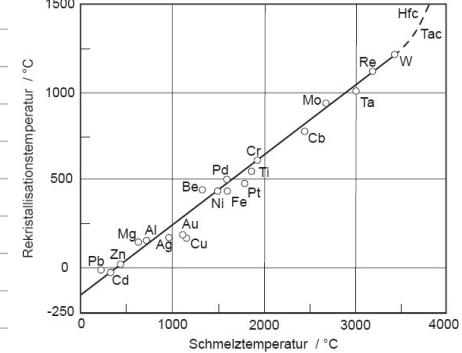
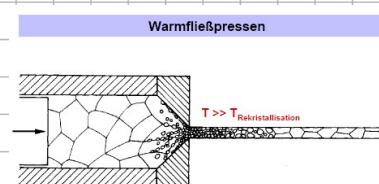
Spannungsarmglühen

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



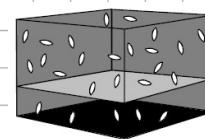
Rekristallisation

- Ziel: Verformbarkeit erhöhen, Kaltverfestigung aufheben
- Voraussetzung: Kaltumformung
- Entstehung eines neuen Gefüges: neue, versetzungsfreie Körner
- Wachstum auf Kosten d. Nachbarkörper
- Korngröße = f (Verformungsgrad, Zeit, Temperatur)
 - \rightarrow Rekristallisationsdiagramm (für jeden Werkstoff anders)
- $T_{Rek} \approx 0.4T_S$
- dynamische Rek.: während Umformung
- Eigenspannungen weg



Ausscheidungshärtung

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



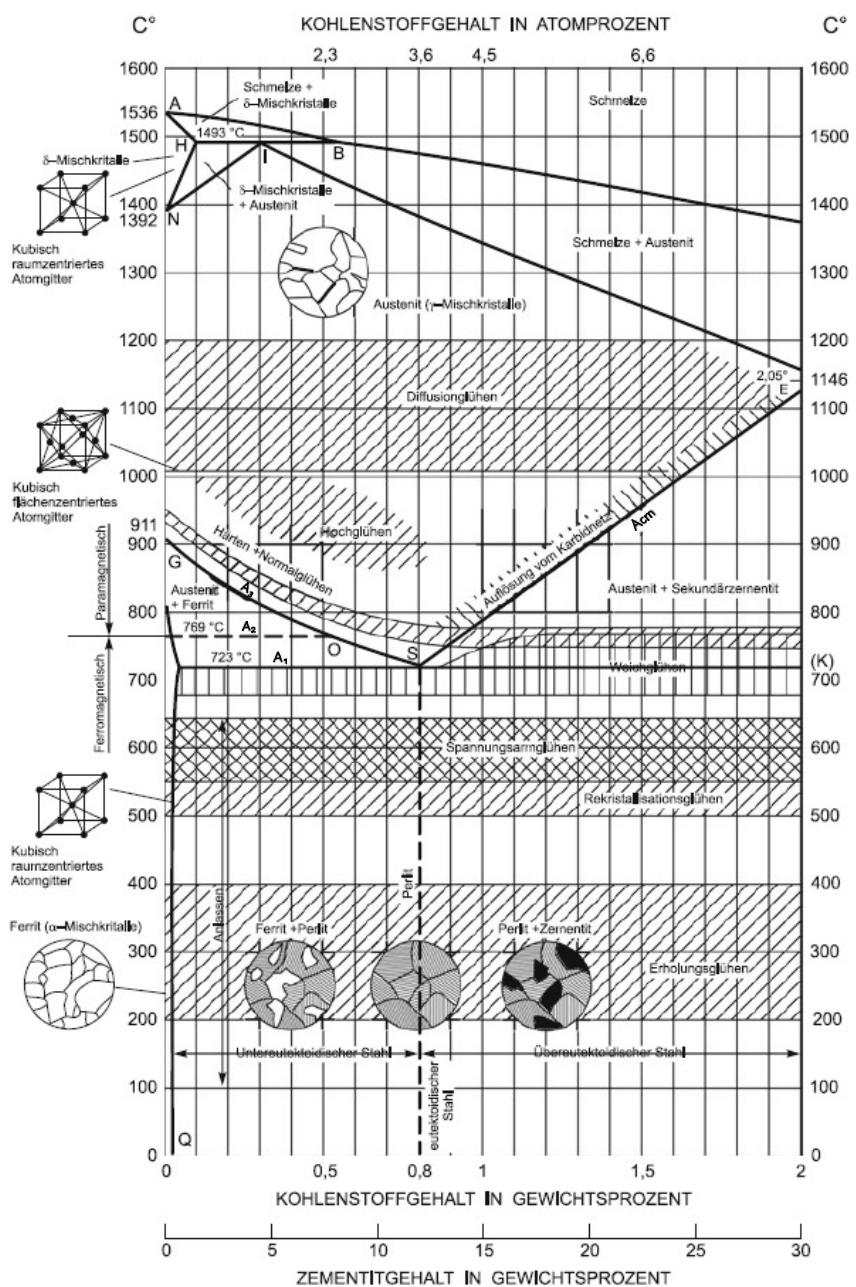
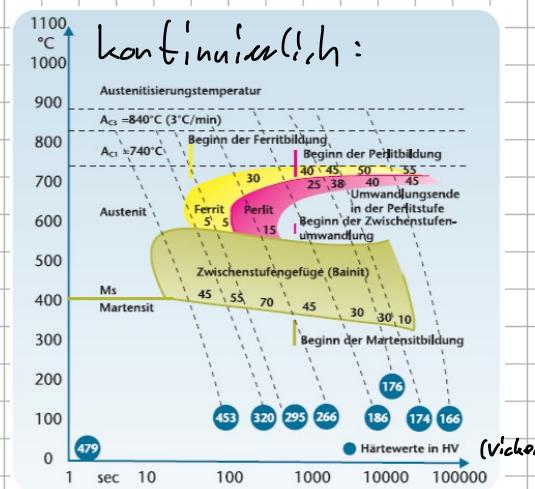
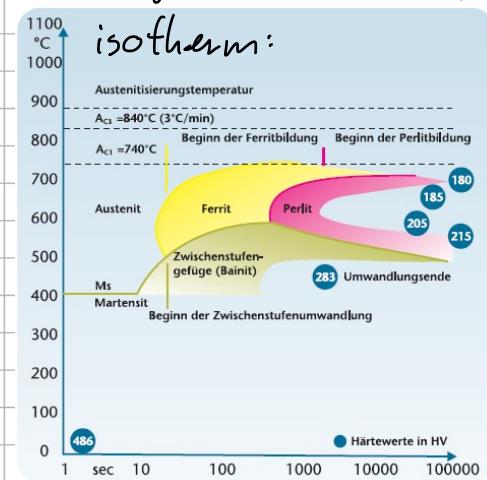
Wärmebehandlung von Stählen

Fe - C - Diagramm

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

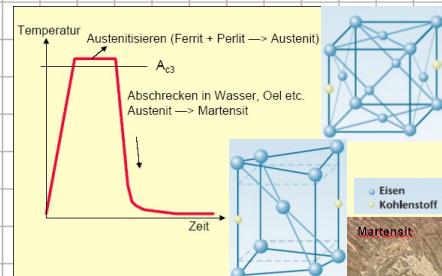
ZTU-Diagramm

- zeitabhängige Vorgänge
- Einfluss Legierungselemente → für jeden Stahl spezifisch
 - verschoben nach rechts & unten
 - durch tiefeere v. weniger Härtespannungen
 - je grösseranteil, desto höher Legierungsanteil

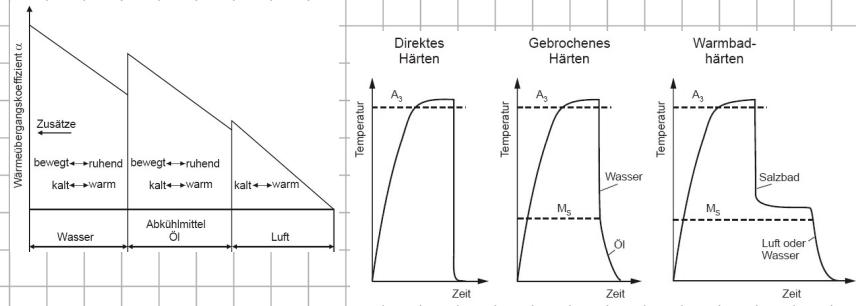


Härteln

- Ziele: harte, verschleissfest. Oberfläche
 - Erhöhung Streckgrenze & Festigkeit
- Voraussetzung = mind 0.2-0.3% C bei unlegierten Stählen
- grosseanteile aus unlegiertem Stahl praktisch nicht durchhärtbar (ent. unzureich.)
- Abfolge:
 - Austenitisieren: Erhitzen und Halten auf Härtetemp ($> A_3$)
 - Abschrecken



- Umwandlung Austenit $\xrightarrow{\text{Kf}}$ in Martensit $\xrightarrow{\text{Kv}}$ (tetragonal-rhomboedrisch): Verzerrt → hart
- Abkühlmedium, Bewegung, T bestimmen V:
- V bestimmt Härte



Umwandlungshärteln

- schnelle Abkühlung, um Ferrit- und Perlitzbildung zu verhindern
- unter M_S : langsames Abkühlen:
 - Ausgleich thermischer Spannungen
 - Umwandlung über gesamten Querschnitt

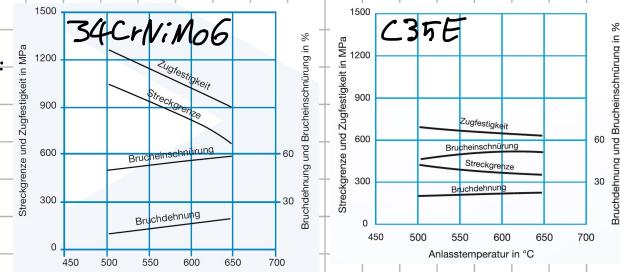
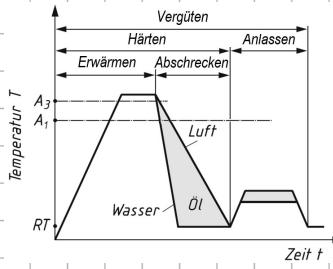
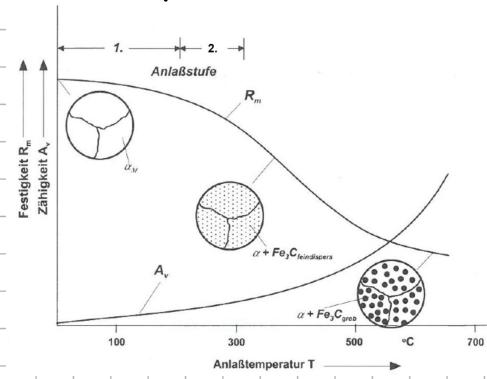
Vergüten = Härteln + Anlassen

- Ziel: Kombination d. gewünschten versch. Eigenschaften:
 - Härte
 - Zähigkeit
 } oft Balance erweckt

- Anlassen → C-Atome diffundieren → Gitter entspannt sich
 - bei ausreichend hoher Anlassestemperatur wandeln sich die vom C befreiten Gitterfehlstellen in Ferrit um
 - überschüssiges C wird als Carbide ausgeschieden

- Vergütungszyklus zeigt für bestimmte Härte benötigte Anlassestemperatur:
 - für jeden Stahl spezifisch
 - bei unlegierten Stählen ist Bereich der erreichbaren mechanischen Größen kleiner

Anlassstufen:



ca. 250°C (1. S.):

weiterhin Martensit, allerdings Gitter leicht entspannt

ca. 250°C - 400°C (2. S.):

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

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

ca. 400°C - 600°C:

Vergroßerung Zementit, Abbau innerer Gitterfehler

ca. 600°C - 700°C:

vollständige Rekristallisation des Ferrits → Metallform geht verloren

Wärmebehandlung d. Stahl-Oberfläche

Ziel: unterschiedliches Gefüge an Oberfläche und im Kern

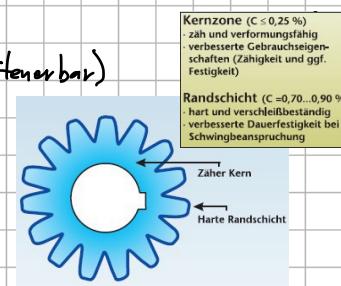
Methoden:

- $T > A_3$ nur im Randbereich

- Induktionshärteten: Wirkstrom + Wasserdusche → Verschleissschutz
- Flammenhärteten, Laserhärteten (unkontrolliert, primitiv → heikel)

- Einsatzhärteten (für Einsatzstähle mit < 0,2% C):

- Eindiffusion von C an Oberfläche oberhalb A_3 (Aufkohltiefe steuerbar)
- Abschrecken → Martensit am Rand, Ferrit/Ferrit im Inneren



Kunststoffe

Molekülkette durch chem. Reaktion vieler Monomere

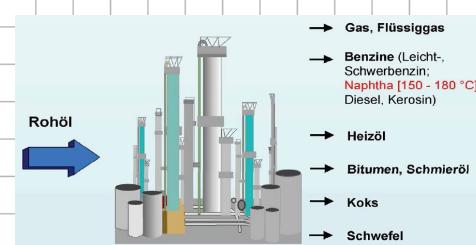
Polymerisationsgrad n = Anzahl d. Monomere in Molekülkette = $10^2 - 10^5$
wichtigste Elemente: C & H, auch O, N, S

Herstellung

Erdölverarbeitung in Raffinerie

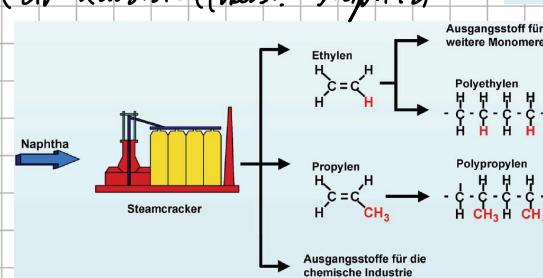
→ Destillation

→ 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...)

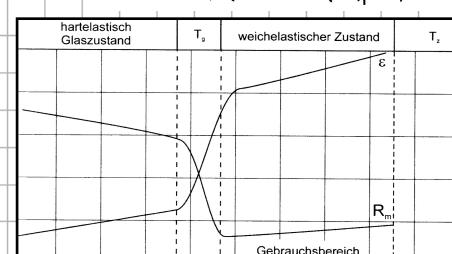
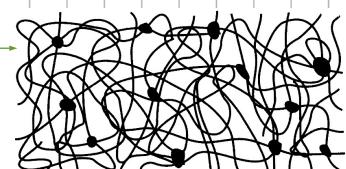
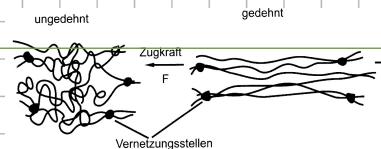
Polyaddition: Bildung von Makromolekülen durch Reaktion zweier Partner oder Um-lagerung von Atomen(-gruppen) im Molekül ohne Abspaltung von Nebenprodukten

Eigenschaften

- gute chem. Beständigkeit (bei RT)
- niedrige Dichte: $0.9 - 2.7 \text{ g/cm}^3$
- niedriger Elastizitätsmodul
- geringe Wärmeleitfähigkeit (heiss frei; beweglicher e⁻)
- hohes Dämpfungskonzept
- geringe el. Leitfähigkeit (Isolator, heiss frei; beweglicher e⁻)
- Sprödigkeit bei hoher T und geringe Festigkeit bei hohem T
- T_m-Bereich, da abhängig von Kettenlänge, Moleküle unterschiedliche Kettenlängen

Elastomere (auch: Gummi)

- schwer chemisch verarbeitet
- weich, stark verformbar
- geringer E-Modul
- Vernetzung = Vulkanisation, z.B. mit Schwefel(-verbündeten), Metallketten, energiereicher Strahlung
- nicht schmelzbar, nicht löslich, quellbar, nicht schneidbar
- reversibel-elastische Verformung: Verdrehte Kettenmoleküle entwinden sich
- UV macht Bindungen kaputt, hat oft UV-Schutz dabei

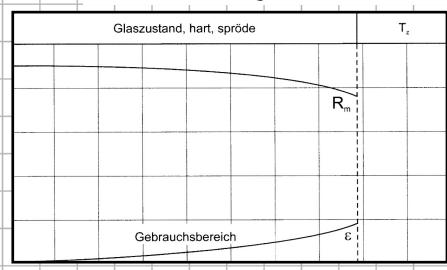
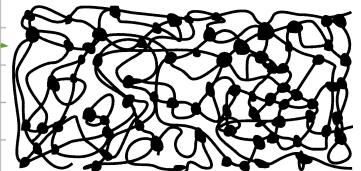


Glasübergangstemperatur (auch: Erweichungstemperatur)

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

Duroplasten (auch: Duroplaste oder Kunstharze)

- stark chemisch unvernetzt (kovalente und Ionenbindung)
- geringe Erweichbarkeit
- harter Festkörper
- nicht schmelzbar, nicht löslich, kann quellen, nicht schweißbar
- i. a. bis über 80% Füll- & Verstärkungsmstoffe



Verarbeitung

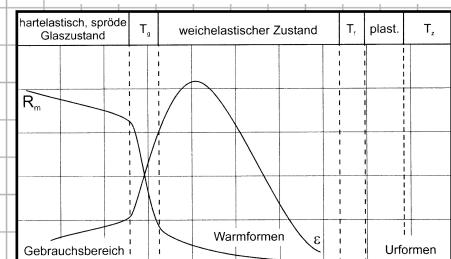
- Verformung durch viskoses Fließen nicht möglich
 → entweder Formgebung im unvernetzten Zustand
 - Vernetzung durch Druck, Temperatur, UV, Reaktionshitze
 → daher spanabhebend bearbeiten

Thermoplaste (auch: Plastomere)

- Moleküle unvernetzt
- schmelzbar (beliebig oft: $T_m < T_g$), löslich, quellbar (kann Flüssigkeit aufnehmen), schweißbar
- gut verarbeitbar (Spritzguss, Extrusion, Tiefziehen, Schneiden, Upleben)



Struktur amorpher Thermoplaste
(ungeordnete Makromoleküle)

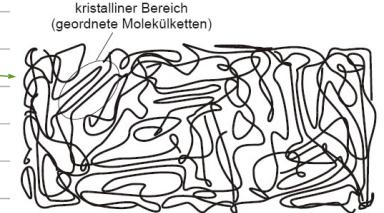


amorphe Thermoplaste

- Molekülketten völlig ungeordnet
- häufig durchsichtig
- Gebrauchsreich unter T_g (typischerweise: $T_g \geq 80^\circ\text{C}$)
 → hantelstabil, spröd

teilkristalline Thermoplaste

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



Struktur teilkristalliner Thermoplaste
(amorphe und kristalline Bereiche)

