12. Metalle und Legierungen als Werkstoffe

Vorlesung Intermetallische Phasen, Sommersemester 2026

Stefanie Gärtner (UR), Constantin Hoch (LMU), Caroline Röhr (ALU)

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe

Einleitung

Mechanische Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Weitere metallische Werkstoffe

1. Einleitung

2. Mechanische Eigenschaften

3. Aluminium-Legierungen

4. Stähle
   - Übersicht
   - Unlegierte Stähle
   - Legierte Stähle

5. Weitere metallische Werkstoffe

1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

5 Weitere metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Weitere metallische Werkstoffe

Literatur

... die 'Riedel's der Werkstoffwissenschaften/Metallographie ...

- Günter Gottstein, Sandra Korte-Kerzel: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Physikalische Grundlagen*, Springer, 2025.
- Erhard Hornbogen, Hans Warlimont, Birgit Skrotzki: *Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*, Springer 2018.
- Donald R. Askeland: *Materialwissenschaften*, Spektrum, 2010.
- Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright: *The Science and Engineering of Materials*, Cengage Learning, 2014.
- Wolfgang Weissbach u.A.: *Werkstoffe und ihre Anwendungen: Metalle, Kunststoffe und mehr*, Springer, 2018.
- Heinrich Oettel, Gaby Ketzer: *Schumann Metallografie*, Wiley-VCH, 2025.
- Jens Freudenberger, Martin Heilmaier: *Materialkunde der Nichteisenmetalle und -legierungen*, Wiley, 2020.

Zwischenbilanz: Eigenschaften/Anwendungen (bisher)

- elektrische/Wärme-Leiter: reine A2/B1-Metalle (Cu, Al, Ag, Au)
- Supraleiter: Nb_3Sn (A2–B1, Frank-Kasper-Phasen)
- Lote: B*n*–B*n*-Phasen/Eutektika mit niedrigen Schmelzpunkten
- Halbleiter (Solarzellen, Detektoren, Dioden, Transistoren etc.): reine B2-Elemente (Si, Ge), B*n*–B*n*-Phasen (III-V-HL)
- Thermoelektrika: B*n*–B*n*-Phasen (PbTe, Bi_2Te_3)
- Magnetmaterialien: (*Ln*/A1)–A2(3*d*) + (Bor)
  - weichmagnetisch: Fe/Co (A2)
  - hartmagnetisch: $SmCo_5/Sm_2Co_{17}$ (Frank-Kasper-Ph.), $Nd_2Fe_{14}B$ (Interstitiell) ↦ s. 13. Stunde, 15.7.2026
- H_2-Speicher/Hydrier-Katalysatoren: interstitielle H-haltige Phasen von Pt, FeTi bis $LaNi_5$ etc. (Laves/Frank-Kasper-Phasen) (A1 –) A2
- Hartstoffe: Interstitielle feste Lösungen: A2 + B, C, (N)
- Konstruktionswerkstoffe: Hume-Rothery/Messingartige: A2–B1

?? A–A ... ? ohne Anwendung/unbekannt ? ...

- A1–A1: Laves-Phasen oder Mischkristalle, luftempfindlich (außer Mg)
- A1–A2: kaum Verbindungen, Systeme meist einfach eutektisch
- ?? A2–A2: + A2 + Al + Mg ... und + C ⇓

Eigenschaften/Anwendungen ... (was noch fehlt)

- A2 + A2 (+ A2 + A2 + Al + Mg ... und + C
- Konstruktions-Werkstoffe: 99.95 % aller primär erzeugten Metalle/Legierungen
  - Graphik von Agenda World Economic Forum
- Stahl, Stahl, Stahl, Leichtmetall-Legierungen auf Al-, Mg- oder Ti-Basis etc.
- $\mapsto$ Werkstoffkunde (Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Bau/Architektur)
- $\mapsto$ Metallographie (nicht Metallurgie)

?? im Rahmen dieser Vorlesung:

- Bedeutung intermetallischer Phasen ??
- Bezug: Struktur/chemische Bindung $\leftrightarrow$ mechanische Eigenschaften ??

Metall	t (Welt/a)[1]
Fe	2.995.000.000
Al	70.000.000
Mn	55.600.000
Cr	37.200.000
Cu	20.000.000
Zn	12.000.000
Ti	9.500.000
Pb	4.000.000
Ni	2.200.000
Sn	290.000
Ln	29.000
Re	58

[1] 2023, nur Primär !

Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Struktur↔Eigenschafts-Bezug bei metallischen Werkstoffen

- kristallin ↦ Kristallchemie relevant
- reine, häufige, einfach herstellbare, luftstabile Metalle ↦ keine optimalen mechanischen Eigenschaften (s.u.)
  - reines Fe: spröde
  - reines Cu, Al: sehr duktil
- ↦ Legierungen mehrerer Elemente, interstitielle 'Carbide'
- starke Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Gefüge
  - Multiparameterraum durch mechanische und/oder thermische Umformprozesse
  - Versuche, Versuche, Versuche (viel Empirisches ↦ 'Ingenieur-Kunst')
  - Voraussage/Berechnung schwierig
- aber praktisch EXTREM WICHTIG
  - Normungen
- Dimensionen (+ Untersuchungsmethoden)
  - idealer Einkristall: pm (Röntgenbeugung)
  - Baufehler: pm bis nm (TEM)
  - Gefüge μm bis mm (optische Mikroskopie, Mikrogramme)
- Beispiel für ein Gefügebild einer mikrolegierten
  - Cu-Legierung

Kriterien für die Auswahl metallischer Werkstoffe

- Wirtschaftliches
  - Verfügbarkeit, Möglichkeiten und Kosten der Reduktion (Metallurgie)
  - Wiedergewinnung, 'Recycling'
- Schmelzpunkte, thermisches Verhalten (L: Phasendiagramme)
  - Schmelzverarbeitung (inkl. Gefügeeinstellung)
  - Umformen: Giessen und Schweissen (Druckgiessen, Formenguss, Sandgiessen, Kokillengruss, Stranggiessen), Erodieren, Löten
  - Anwendung
- Korrosionsfestigkeit, chemische Beständigkeit
  - häufig reine Oberflächeneigenschaft (s. Al, Mg)
  - speziell im Apparatebau (H-Versprödung etc.)
  - Toxizität, Umweltverträglichkeit
- weitere 'einfache' physikalische Eigenschaften
  - Dichte
  - Wärme- und elektrische Leitfähigkeit
  - Magnetismus
- mechanische Eigenschaften (für Umformung und Anwendung)
  - Steifigkeit, Härte, Dehnbarkeit, ...
  - 'Umformbarkeit' (Ziehen, Walzen, Pressen, Schmieden)
  - Zerspanbarkeit (Drehen, Fräsen)
- ?? Kenngrössen ??
  - technisch (aus Spannungs-Dehnung-Kurve): Zähigkeit, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung ... $\Downarrow$
  - abhängig zusätzlich von T ('Warmfestigkeit'), t ('Kriechen'), ν Frequenzen ('Dauerschwingfestigkeit') ....

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

5 Weitere metallische Werkstoffe

1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

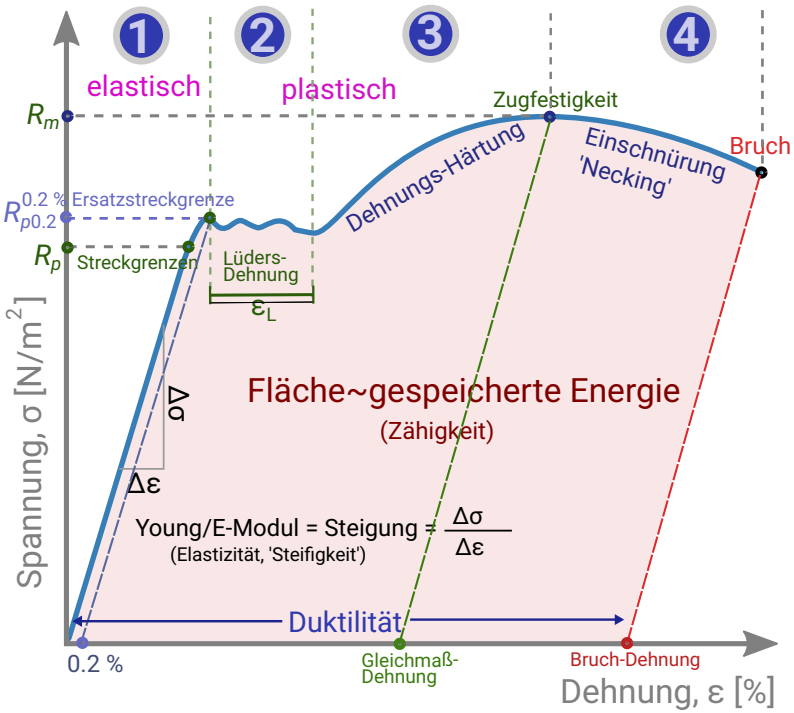
5 Weitere metallische Werkstoffe

Messung: technische Spannungs-Dehnungs-Kurve

- Zugversuch
- typische technische Spannungs-Dehnungs-Kurve für duktile Materialien ⇒
- Bereiche:
  1. HOOK-B.: elastisches Verhalten
  2. LÜDERS-B.: plastisches Verhalten
  3. Gleichmassdehnungs-B.: Dehnungs-Härtung
  4. Einschnür-B. ('Necking')
- Übergangspunkte/Steigungen ↦technische Kenngrößen für mechanische Eigenschaften

gute Erklärung

Erklär-Video



Kenngröße	Al (rein)	Stahl (1.4301)
E [GPa]	69	200
$R_{p0.2}$ [MPa]	40	190
R_m [MPa]	75-110	500-700
A (Bruch-Dehnung) [%]	25	45
HBW[2]	22-35	215

[1] 1 MPa = N/mm² = 0.001 GPa = 10 bar (1 kg/mm²); [2] BRINELL-Härte

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe

Einleitung

Mechanische Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-Legierungen

Stähle

Übersicht

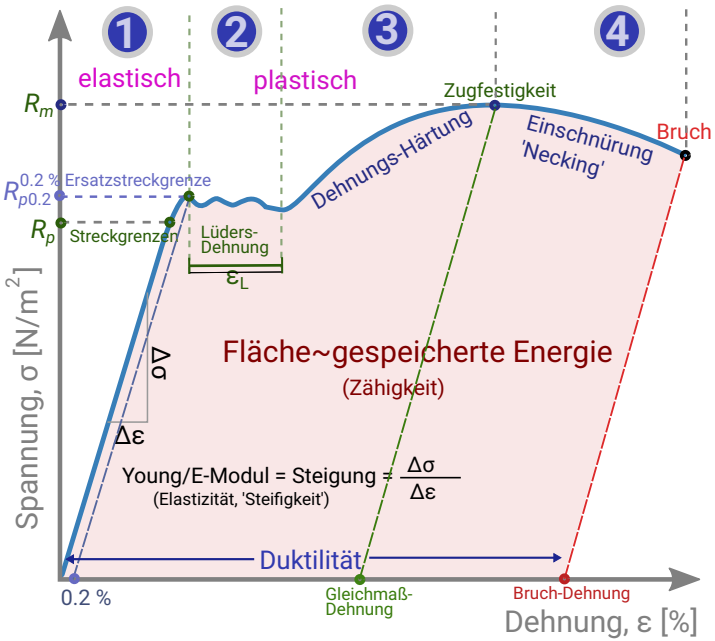
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Weitere metallische Werkstoffe

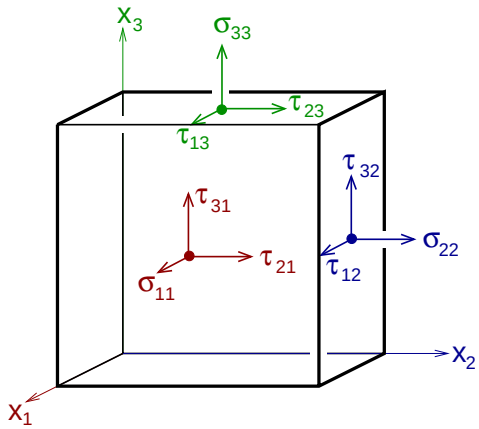
Spannungs-Dehnungs-Kurve ❶: elastisches Verhalten

- statischer Response, Gleichgewicht
- vollständig reversibel
- wichtig für Anwendungen
- 'Bindungs'-Streckungen
- Hook'sches Gesetz: $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$
- Kenngrößen:
  - Young-Modulus, E-Modul
  - R_p (Streckgrenze) bzw.
  - $R_{p0.2}$ (0.2 % Ersatzstreckgrenze)
- 'Steifigkeit'
- !!! E-Modul $\neq$ Härte !!
- primär durch Stärke der chemischen Bindung/Gitterenergie bestimmt
- durch Legierungsbildung (Substitution, Ausordnung, Domänenstruktur etc.) wenig beeinflußt



Material	E [GPa]	Material	E [GPa]
Diamant	1000		
WC, HfB	500	Os	551
Al_2O_3	380	W	406
SiO_2	94	Cr	289
Fe	207	Stahl	190-214
Ta	150	Cu	124
Al	69	Mg	40
Pb	13.8	PE	0.7

'Spannung' und 'Dehnung', genauer geschaut



- Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften in nichtisotropen (z.B. kristallinen) Materialien
- 'Spannung' (Ursache) und 'Dehnung' (Wirkung) $\mapsto$ Tensoren 2. Stufe
- für Spannung $\sigma_{i,j}$: symmetrisch, maximal 9 Werte
  - Normal-(Zug/Druck-)Komponenten: $\sigma_{i,i}$ $(i = j)$
  - Schub- oder Scher-Komponenten: $\sigma_{i,j} = \tau_{i,j}$ $(i \neq j)$
- für Dehnung $\epsilon_{k,l}$ analog
  - Kompression/Dehnung
  - Scherung; Verdrillung
- $\mapsto$ d.h. Materialparameter $\chi_{i,j,k,l}$ der elastischen mechanischen Eigenschaften (maximal 81 Werte, sog. elastische Koeffizienten) $\Downarrow$

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Wdh.: Klassifizierung physikalischer Materialeigenschaften

Ursache: Änderung äußerer Parameter/Feldgröße (Zustandsvariable[1]) ....

① Polarisations-Eigenschaften

- statischer Response, Gleichgewicht
- ∞-hoher Transport-Widerstand
- $\mapsto$ Änderung in einer Mengen/Zustandsgröße[2] (Wirkung)
- Beispiele:

direkt: $\vec{B}$-Feld ? Änderung der Magnetisierung $\vec{M}$? $\mapsto$ Magnetismus
indirekt: T-Änderung ? Änderung der Magnetisierung $\vec{M}$? $\mapsto$ pyromagnetischer Effekt

② Transport-Effekte

- dynamischer Response, Abweichung vom Gleichgewicht
- kein/geringer Transport-Widerstand
- $\mapsto$ Fluß von Teilchen, Ladungsträgern, ... usw. (Wirkung)
- Beispiele:

direkt: $\vec{E}$-Feld ? Ladungstransport ? $\mapsto$ Elektrodynamik
indirekt: $\vec{E}$-Feld ? Wärmeleitung ? $\mapsto$ PELTIER-Effekt

[1] Zustandsvariable: T, p, n, Magnetfeld $\vec{H}$, elektrische Feld $\vec{E}$, ...; [2] Zustandsgrößen: V, ρ, innere Energie U, Enthalpie H, S, F, dielektrische Polarisation $\vec{P}$, Magnetisierung $\vec{M}$, ...

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Wdh.: ① Polarisations-Eigenschaften: Prinzip

- statischer Response, hoher Transportwiderstand
- Änderung der Zustandsvariablen (Feldgröße X) $\mapsto$
- Änderung der Zustandsgröße/Materialeigenschaft (Mengengröße Y)
- allgemein:

$$\chi^{YX} = \frac{\delta Y}{\delta X} \text{ bzw. } \delta Y = \chi^{YX} \delta X$$

- Proportionalitäts'konstante' $\chi^{X,Y}$ (Suszeptibilität)
  - Material'konstante' für X/Y
    bei linearem Zusammenhang (erfüllt bei kleiner, langsamer Änderung)
    z.B. Mechanik: Spannung $\leftrightarrow$ Dehnung: HOOK'sches Gesetz
  - je nach $X/Y \mapsto$ unterschiedliche Namen
  - X/Y richtungsabhängig (Vektoren, Tensoren) $\mapsto \chi$ Tensoren höherer Stufe
- $\chi^{X,Y}$ häufig nicht 'konstant'
  - abhängig von Vorbehandlung des Materials (Hysterese) $\mapsto$ ferroische Eigenschaften
  - frequenzabhängig (komplexe Grössen), $\mapsto$ optische Eigenschaften, Elektronik

[1] Zustandsvariable: T, p, n, Magnetfeld $\vec{H}$, elektrische Feld $\vec{E}$, ...; [2] Zustandsgrößen: V, ρ, innere Energie U, Enthalpie H, S, F, dielektrische Polarisation $\vec{P}$, Magnetisierung $\vec{M}$, ...

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Wdh.: Übersicht: Polarisations-Eigenschaften[1]

.	Feldgröße X			
Mengen größe $Y \Downarrow$	Temperatur T [K]	elektrisches Feld E_i [V/m]	Magnetfeld H_i [Vs/m^2]	mechanische Spannung $\sigma_{i,j}$ [N/m^2]
Entropie S [J/m^{2}s]	Wärmekapazität $\chi^{ST} = c_p = \frac{\delta S}{\delta T} T$	elektrokalorischer Effekt $\chi_i^{SE} = \frac{\delta S}{\delta E}$	magnetokalorischer Effekt $\chi_i^{SH} = \frac{\delta S}{\delta H}$	 $\chi_{i,j}^{S\sigma} = \frac{\delta S}{\delta \sigma}$
elektrische Polarisation P_k [As/m^2]	pyroelektrischer Effekt $\chi_k^{PT} = \frac{\delta P}{\delta T}$	elektrische Suszeptibilität $\chi_{i,k}^{PE} = \frac{\delta P}{\delta E}$	magnetoelektrischer Effekt $\chi_{i,k}^{PH} = \frac{\delta P}{\delta H}$	piezoelektrischer Effekt $\chi_{i,j,k}^{P\sigma} = \frac{\delta P}{\delta \sigma}$ piezoelektrische Moduln
Magnetisierung M_k [A/m]	pyromagnetischer Effekt $\chi_k^{MT} = \frac{\delta M}{\delta T}$	elektromagnetischer Effekt $\chi_{i,k}^{ME} = \frac{\delta M}{\delta E}$	magnetische Suszeptibilität $\chi_{i,k}^{MH} = \frac{\chi}{\mu} = \frac{\delta M}{\delta H}$	piezomagnetischer Effekt $\chi_{i,j,k}^{M\sigma} = \frac{\delta P}{\delta \sigma}$ piezomagnetische Moduln
mechanische Deformation $\epsilon_{k,l}$	thermische Ausdehnung	reziproker piezoelektrischer Effekt (Elektrostriktion)	reziproker piezomagnetischer Effekt	Spannungs-Dehnungs-Verhalten
	$\chi_{k,l}^{\epsilon T} = \alpha_{k,l} = \frac{\delta \epsilon}{\delta T}$ thermischer Verzerrungstensor	$\chi_{i,k,l}^{\epsilon E} = \frac{\delta \epsilon}{\delta E}$ piezoelektrische Moduln	$\chi_{i,k,l}^{\epsilon H} = \frac{\chi}{\mu} = \frac{\delta \epsilon}{\delta H}$ piezomagnetische Moduln	$\chi_{i,j,k,l}^{\epsilon \sigma} = \frac{\delta \epsilon}{\delta \sigma}$ Elastizitäts-/ YOUNG-Moduln

[1] thermodynamische Klassifizierung phänomenologischer Material'konstanten'

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe

Einleitung

Mechanische Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-Legierungen

Stähle

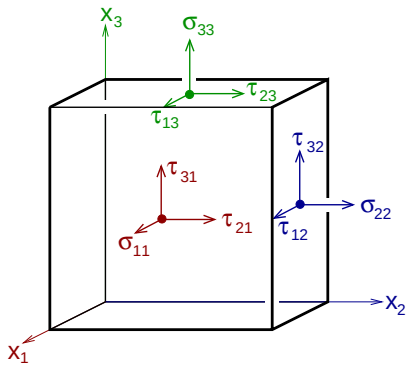
Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Weitere metallische Werkstoffe

'Spannung' und 'Dehnung', genauer geschaut



- Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften in nichtisotropen (z.B. kristallinen) Materialien
- für die Spannung $\sigma_{i,j}$: 9 Komponenten (da symmetrisch)
- für die Dehnung $\epsilon_{k,l}$ analog
  - $\mapsto$ d.h. Materialparameter $\chi_{i,j,k,l}$ der elastischen mechanischen Eigenschaften (maximal 81 Werte, elastische Koeffizienten)
  - bei hoher Symmetrie reduzierte Anzahl
  - Einzelkoeffizienten nur für wenige Metalle bekannt
  - grafische Darstellung der Tensoren χ_{ijkl} durch sog. E-Modul-Körper
    - hier für kubische Metalle
    - hier für h.c.p.-Metalle
  - Richtungsabhängigkeit nicht besonders gross
  - praktisch/technische Vereinfachung: 'Normal'-Spannung = reine Dehnung, ein gemitteltes σ_{ii}

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Spannungs-Dehnungs-Kurve ❷: plastisches Verhalten

- Zick-Zack-förmiger Kurvenverlauf
- kein Gleichgewicht
- nicht reversibel
- Transporteffekte
- t-Abhängigkeit
- LÜDERS-Dehnung: plastischer Dehnungsanteil, der durch Versetzungsbewegung durch den Werkstoff bei konstanten Belastung entsteht
- in Cu+Al-Legierungen, bei niedrig- oder untereutektoidisch legierten Stählen optisch erkennbar: LÜDERS-Bänder
- mikroskopisch: Wanderung von Linienfehlern (1D) im Kristall ⇓

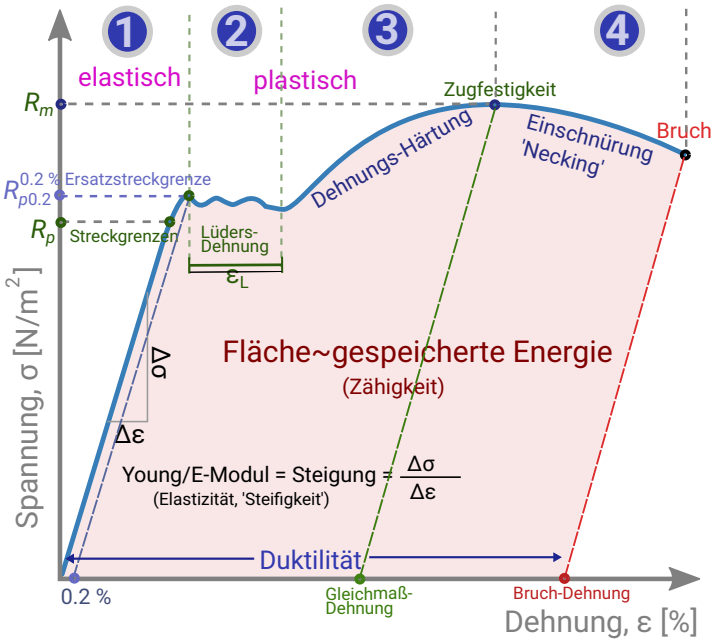
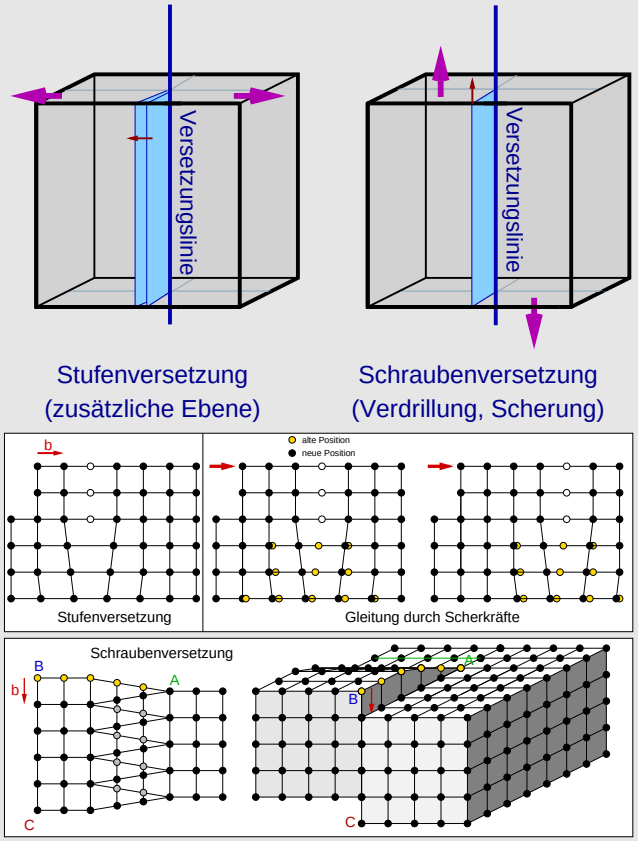


Tabelle: $R_{p0.2}$-Streckgrenzen

Wdh.: 1-dimensionale Baufehler (Linienfehler): Übersicht

- bestimmen i.A. bei Metallen/Legierungen die mechanischen Eigenschaften
- Scherungen wichtiger (σ/τ_{ij} kleiner) als reine Steckung σ_{ii}
- Ordnung im Kristall entlang einer Linie (Versetzungslinie) gestört
- zwei verschiedene Typen:
  - ① Stufen-Versetzung
  - ② Schrauben-Versetzung
- charakterisiert durch BURGERS-Vektor $\vec{b}$
  - Weg um Fehlordnung herum
  - $\vec{b}$ schließt diesen Pfad
- Energie von Linienfehlern $\propto |\vec{b}|^2$



① Stufenversetzung	② Schraubenversetzung
$\vec{b} \perp \vec{s}$ (90°-Versetzung)	$\vec{b} \parallel \vec{s}$ (0°-Versetzung)
$\vec{r} \parallel \vec{b}$, $\vec{r} \perp \vec{s}$	$\vec{r} \perp \vec{b}$, $\vec{r} \perp \vec{s}$
an Gleitebene gebunden	nicht an Gleitebene gebunden (Quergleitung)
wichtig bei Metallen	wichtig bei Halbleitern

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe

Einleitung

Mechanische Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-Legierungen

Stähle

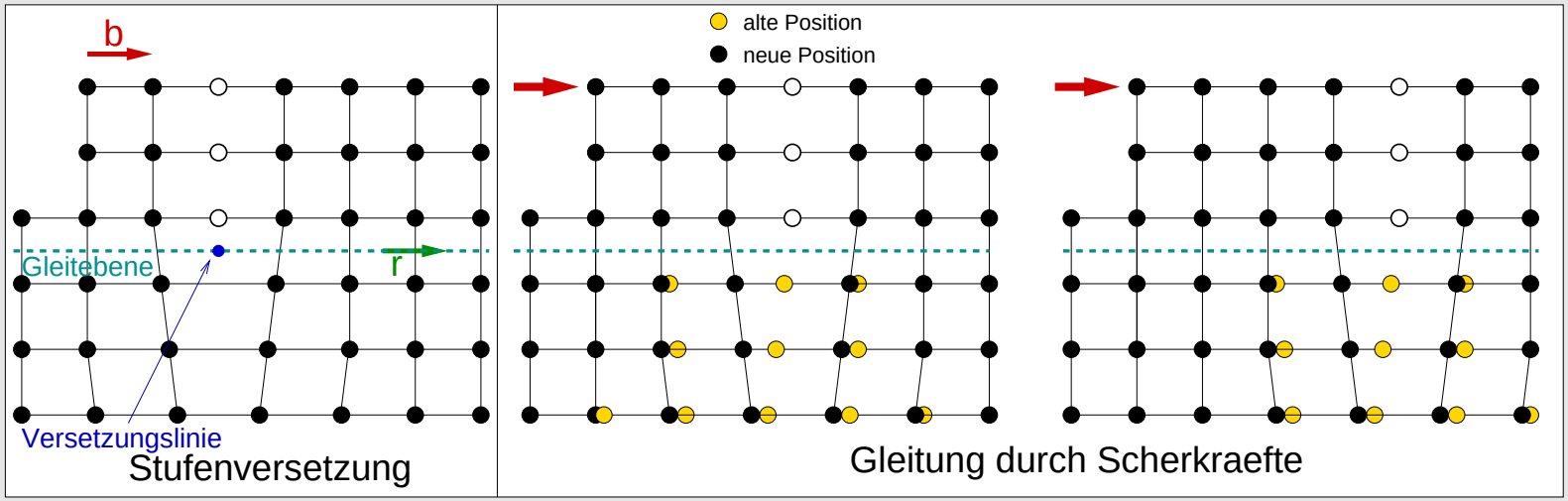
Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Weitere metallische Werkstoffe

Wdh.: ① Stufen-Versetzung



- Prinzip
  - Idealkristall auseinanderschneiden (Schnitt-Ende = Versetzungslinie s)
  - Aufspreizen und Atomebene (Fläche) einschieben
  - Versetzungslinie $\vec{s}$ •: Kante der eingeschobenen Atomebene
  - $\vec{b} \perp$ Versetzungslinie $\vec{s}$
- Bedeutung $\mapsto$ für mechanische Eigenschaften
  - Scherkrafteinwirkung $\mapsto$ Gleitung stark erleichtert
  - Abgleiten einer kompletten Fläche (↗animated-gif)
  - Gleitebene $\parallel \vec{b}$
  - wichtig damit: Zahl und Art der sog. 'Gleitsysteme'
  - günstig: hexagonal dichtest gepackte Ebenen
  - Einfluß des Strukturtyps auf die mechanischen Eigenschaften $\Downarrow$

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Strukturtyp ↔ mechanische Eigenschaften (f. Metalle)

- Tabelle kritischer Schub/Scher-Spannungen $\tau_{\max}$
  bei statistischer Kornverteilung: $3\tau_{\max} = R_p$ (obere Streckgrenze)

	b.c.c.	f.c.c.	h.c.p.
$\tau_{\max}$ [N/mm^2]*	35 - 70	0.35 - 2.0	0.35 - 0.70 ($\frac{c}{a} > 1.633$)
Gleitebene	{110}, {112}, {123}	{111}	{0001}
Gleitrichtungen	$[\bar{1}11]$, $[11\bar{1}]$ (2×)	$[1\bar{1}0]$	$[11\bar{2}0]$
Anzahl Gleitsysteme	(48)	12 (4×3 R.)	3
Gesamteigenschaft	fest	duktil	duktil ($\frac{c}{a}$ >1.633) bis fest
Beispiel	α-Fe	Cu	Zn, Mg, (Ti, Zr)
exp. Werte [N/mm^2]	α-Fe: 10	Al: 0.78	Mg (c/a=1.600): 0.39
		Ni: 2	Ti (c/a=1.587): 13.7

- theoretische Werte/ohne Baufehler: 1000-3000 N/mm^2
- reale Werte: 1-30 N/mm^2
- Tendenzen nach Strukturtyp:

b.c.c. fest (hohe kritische Scherspannung da keine dichtesten Schichten)
f.c.c. meist sehr duktil (viele Gleitsysteme, geringe kritische Scherspannung)
h.c.p. meist spröde (wenige Gleitsysteme), abhängig vom c/a-Verhältnis

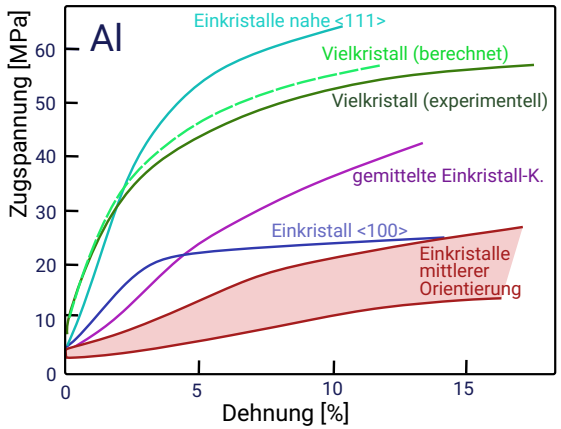
*1 N/mm^2 = 1 MPa = 0.001 GPa

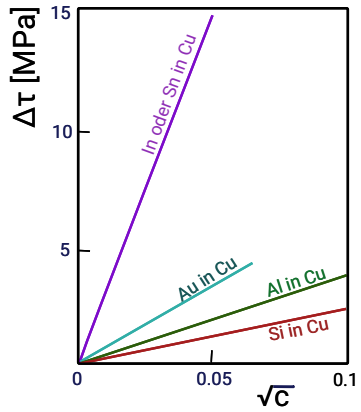
Auswirkungen dieser Versetzungen bei Metallen/Legierungen

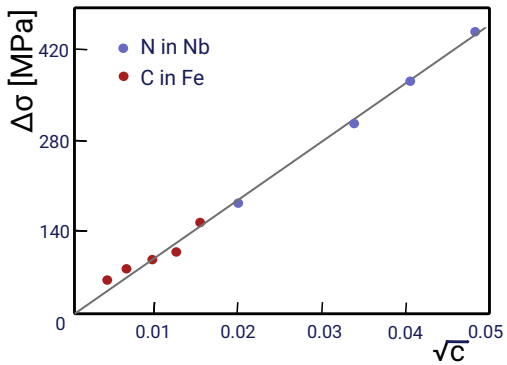
- typische Versetzungsdichten für Metalle (in Gesamtlänge/Volumen)
  - $10^2 - 10^8$ cm^{-2} ($\mapsto$ bis 1000 km/1 cm^3)
  - nach starker Deformation bis 10^{14} cm^{-2}
- Verschiebungs-Spannung
  - wächst quadratisch mit $|\vec{b}|$
  - fällt mit steigendem Netzebenenabstand der Gleitebene
- Richtungsabhängigkeit sehr deutlich, s. schematische S/D-Diagramme orientierter Al-Einkristalle/Vielkristalle $\Rightarrow$
- 'Härtung' durch Fremdatome (0D) $\Rightarrow$
  - Fremdatome erschweren Wanderung des Defektes
  - τ_{max}/R_p steigt $\propto \sqrt{c}$

a) Substitutions-Härtung (Messing)

b) Interstielle Härtung (C in Fe/N in Nb)

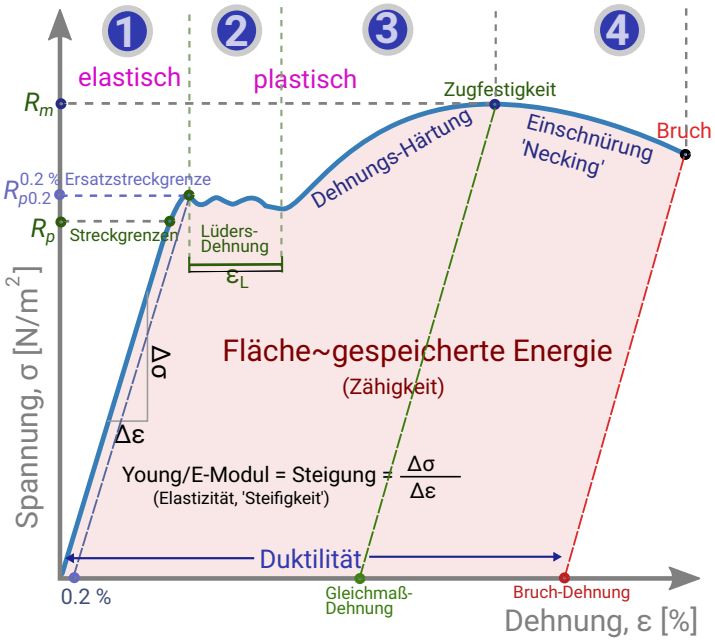






Spannungs-Dehnungs-Kurve ❸: Dehnungshärtung

- S/D-Kurve steigt wieder
- Wanderungen der Defekte an Korngrenzen abgeschlossen
- Konzentration der Defekte an Korngrenzen
- Kenngröße R_m: Zugfestigkeit
- abschätzbar aus (einfacher messbarer) Härte
- Umrechnungstabellen Härte(n) $\leftrightarrow$ Zugfestigkeit (z.B. für Stähle)[1]
- entscheidend für Umformungen
- sehr stark vom Gefüge (2D/3D-Fehler) abhängig



Material	Zugfestigkeit R_m [N/mm^2]	Brinellhärte [HB]
Magnesium	160-196	40
Aluminium Al99.5	75–110	22–35
Dural AlCu4Mg1	420–500	115–135
Stahl, unlegiert (S355)	510	120–140
Chrom-Nickel-Stahl	500–750	130–190
54SiCr6 (Federstahl)	1450–1750	230–280

[1] nach DIN 50150

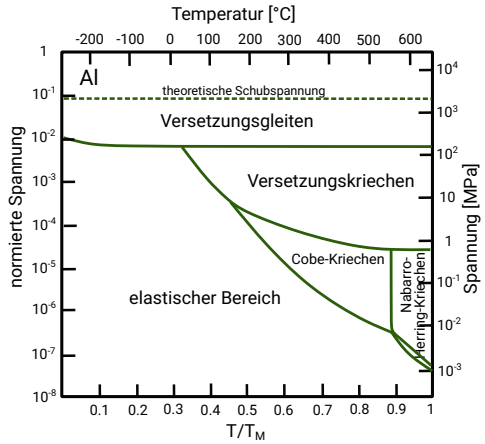
Härte, Zugfestigkeit, Transportmechanismen

Härte-Skalen

- Mohs-Härte: 'Wer ritzt wen' ? (1-10)
- Vermessung der Eindruckbreiten genormter Diamant-Prüfkörper
  - Vickers [HV]: Pyramide
  - Brinell [HB]: Kugel (HB = 0.95 × HV)
  - Knoop
- Vermessung der Eindrucktiefe genormter Prüfkörper
  - Rockwell B oder C (Kegel) [HCR]
  - Shore A

Mechanismen: Gleiten und Kriechen

T-Abhängigkeit der Transport-Mechanismen (für Al)

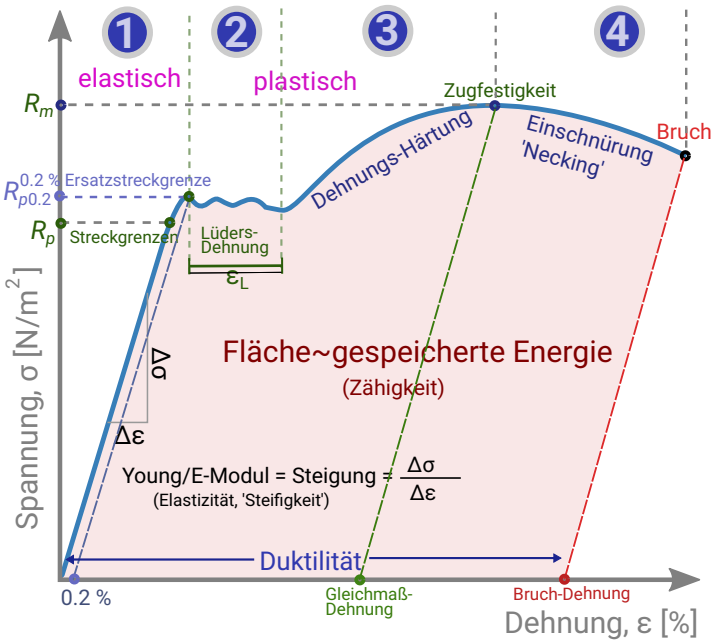


Dimension des Hindernisses für Versetzungsgleiten (niedrige T) oder Kriechen (hohe T)

- 0D Legierungshärtung/Mischkristall-verfestigung oder Härtung durch interstitielle Atome
- 1D Versetzungshärtung
- 2D Korngrenzen- und Feinkornhärtung
- 3D grobe Zwei- oder Mehrphasigkeit, Cluster, Poren (Ausscheidungs-, Verbundwerkstoffhärtung)

Spannungs-Dehnungs-Kurve ❹: Einschnürung/'Necking'

- S/D-Kurve fällt wieder
- massive Materialdeformation ↦ Einschnürung des Prüfkörpers
- Kenngröße für Materialversagen: Bruch-Dehnung [%]



Material	Dichte ρ [g/cm^3]	E-Modul [N/mm^2]	Zugfestigkeit R_m [N/mm^2]	Brinellhärte [HB]	Bruchdehnung [%]
Magnesium	1.74	44 000	160-196	40	
Aluminium Al99.5	2.7	70 000	75–110	22–35	20-35
Dural AlCu4Mg1	2.75–2.87	73 000	420–500	115–135	8-10
Unlegierter Stahl (S355)	7.9	200 000	510	120–140	19
Chrom-Nickel-Stahl	7.9	200 000	500–750	130–190	40
54SiCr6 (Federstahl)	7.46	210 000	1450–1750	230–280	6

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

5 Weitere metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4

Aluminium-Legierungen

Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle

Weitere metallische Werkstoffe

Al und Al-Legierungen: Verwendung, Vor/Nachteile

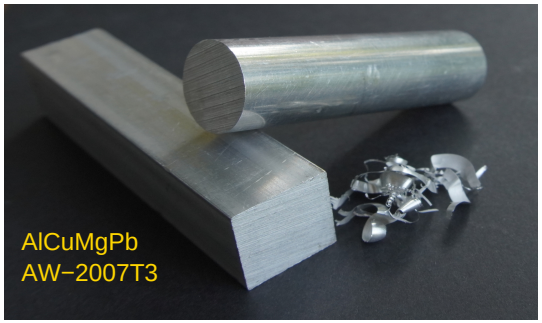
- reines Aluminium
  - ✔ leicht ($\rho = 2.7$ g/cm^3)
  - ✔ korrosionsfest (durch epitaktische Oxid-Deckschicht)
  - ✔ gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit
  - ✔ anodisch oxidierbar
  - ✗ niedrige Festigkeit und Steifigkeit
  - ✗ hohe Wärmeausdehnung
  - ✗ Löten und Schweissen nur mit Flussmitteln
  - ✗ in Basen und nichtoxidierenden Säuren löslich
  - ✗ niedriger Schmelzpunkt (660 °C)
- Al-Legierungen (Legierungselemente/LE: Mg, Cu, Si, Mn, Zn, Pb)
  - ✔ höhere Härte und Festigkeit
    - bei niedrigeren LE-Anteilen: Substitutionshärtung (kleine T: Ausscheidungen an Korngrenzen)
    - bei bei höheren LE-Anteilen: Ausscheidungshärtung, intermetallische Phasen (s.u.)
  - ✗ LE-Anteile begrenzt durch Oxid-Deckschicht
  - ✗ Umformbarkeit verringert (Knetlegierungen nur mit niedrigen Konzentrationen)

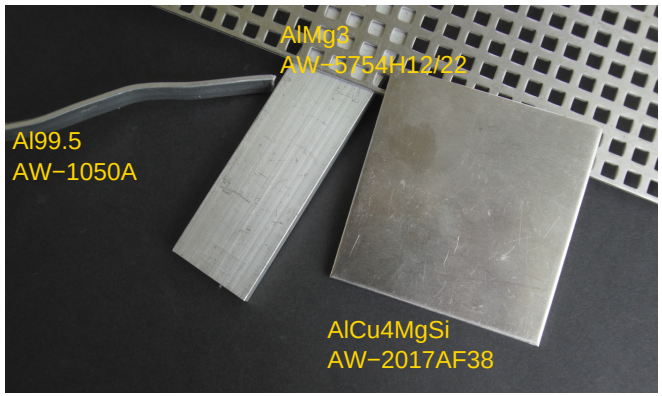
12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Al und Al-Legierungen: Daten und Sammlungsstücke*

Material (Datenblatt)	EN AW Kennung	Werkstoff-Nummer	Legierungs-Elemente in Gew.-%			
			Mg	Cu	Si	weitere LE
Al99.5	AW-1050A	3.0255	-	-	-	-
AlCuMgPb	AW-2007T3EN	3.1645	0.4-1.8	3.3-4.5	-	0.8-1.5 Pb; 0.4-1 Mn
AlCu4MgSi	AW-2017AF38-40	3.1325	0.4-1.0	3.5-4.5	0.2-0.8	
AlCu4Mg1(A)	AW-2024[1]	3.1355	1.2-1.8	3.8-4.9	0.5	0.3-0.9 Mg
AlMg3	AW-5754H12/22	3.3535	2.6-3.6	-	0.4	0.5 Mn; 0.4 Fe
AlMgSi0.5F25	AW-6060[2]	3.3206	0.6	-	0.5	
Mg-Druckguss	AZ91D[3]		90			8.3-9.7 Al

Ausscheidung von: [1] $CuAl_2$ und $MgCuAl_2$; [2] Mg_2Si; [3] $Mg_{17}Al_{12}$

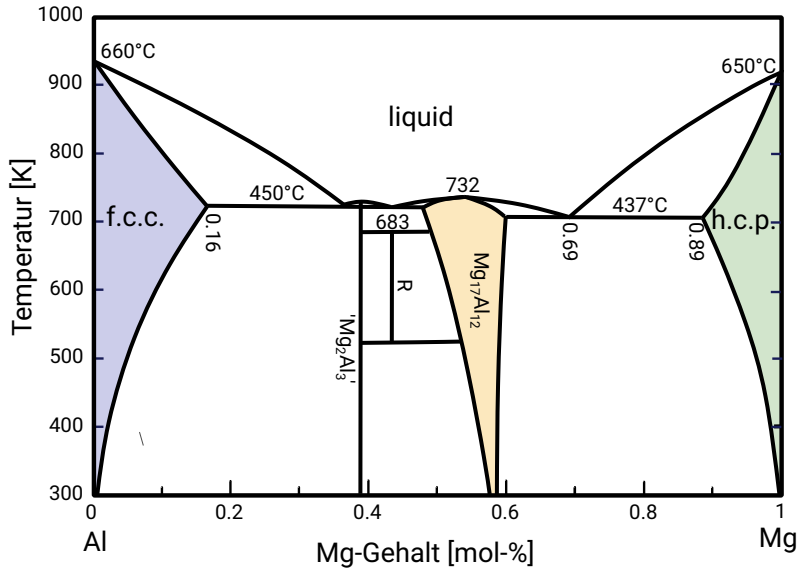




*Dank an die Metall-Werkstatt des Chemischen Laboratoriums FR!

LE Mg (+Si+Cu); Phasendiagramm Al–Mg

- Mischkristalle Al:Mg und Mg:Al nur bei höheren T und kleinen c (bis ca. 15 %) $\mapsto$ Bereiche für Substitutionshärtung
- bei höheren c/niedrigeren T $\mapsto$ Ausscheidungshärtung durch intermetallische Phasen:
  - Al-seitig: 'Mg_2Al_3' (!!) $\Downarrow$ I
  - Mg-seitig: $Mg_{17}Al_{12}$ (α-Mn) $\Downarrow$ II



Phasendiagramm Al–Mg

- weitere wichtige zusätzliche LE und entsprechende intermetallische Phasen

  +Si $\mapsto$ Mg_2Si (Zintl!; CaF_2 = anti-Li_2O-Typ)

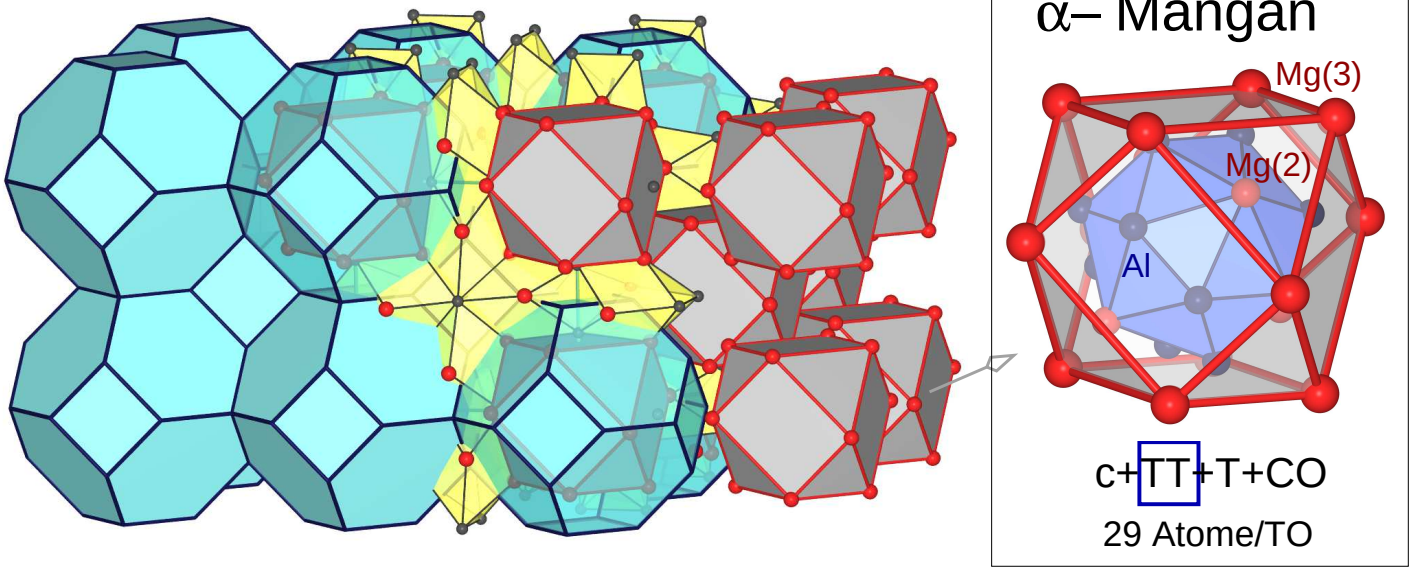
  +Cu $\mapsto$ $CuAl_2$ (eigener Typ, relativ häufig) $\Downarrow$ III

  +Si+Cu $\mapsto$ $MgCuAl_2$ (dito) $\Downarrow$ IV

- Al in der Gefügedatenbank (Fa. Schmitz)

Kristallstruktur I: $Mg_{17}Al_{12}$

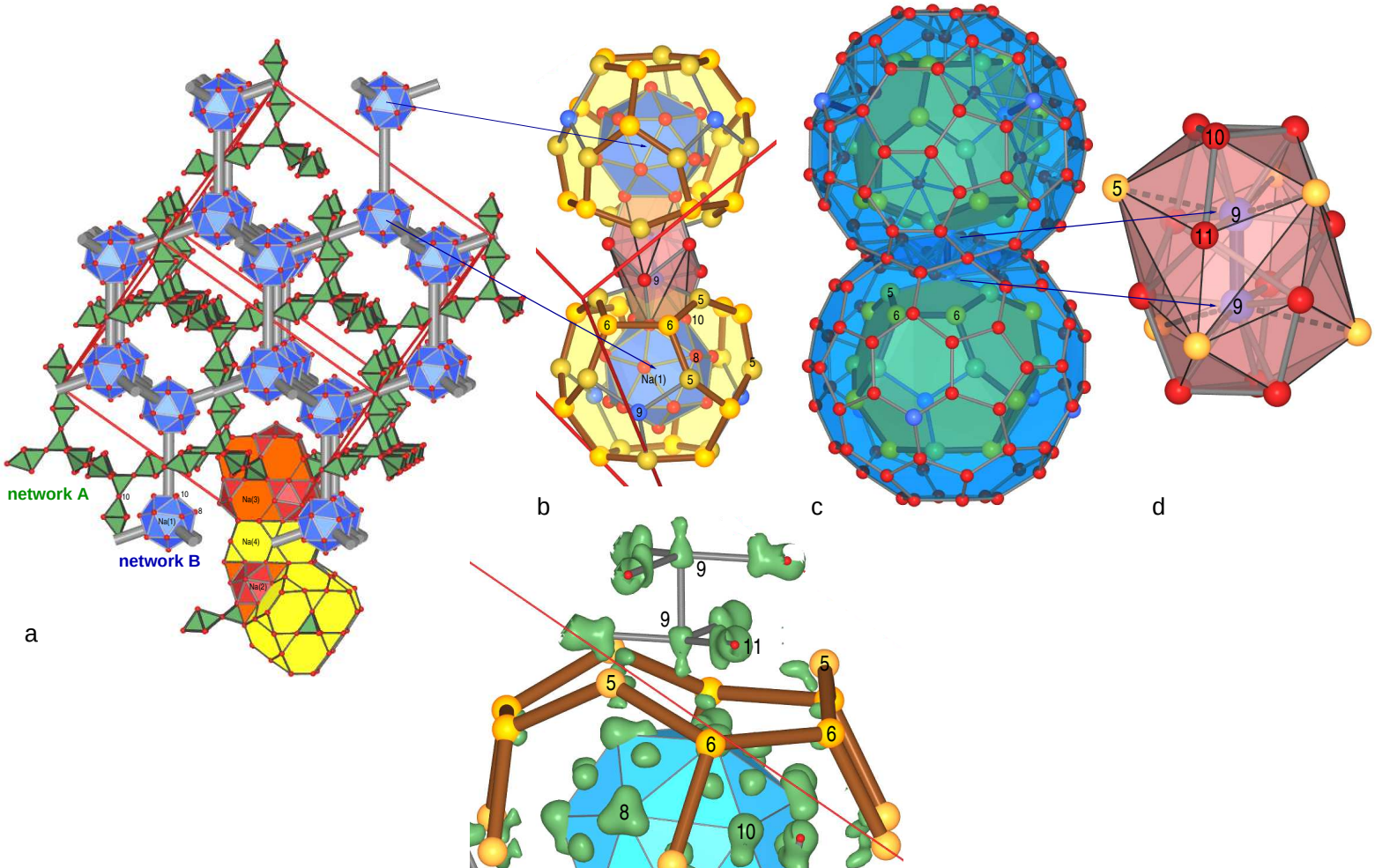
- vgl. α-Mangan (1. Stunde, Wdh.)
- A12, RG $I\bar{4}3m$, $cI58$ Atome/EZ, Z=2
- 4 Atom-Lagen: Mg(1) 2a: 0,0,0; Mg(2) 8c: x,x,x; Al/Mg(3) 24g: x,x,z
- Beschreibung: TO-Parkettierung; innerhalb der Polyeder:
  c [Mg(1)] + TT [Al] + T [Mg(2)] + CO [Mg(3)] = 1 + 12 + 4 + 12 = 29



Kristallstrukturen II: 'Mg_2Al_3'

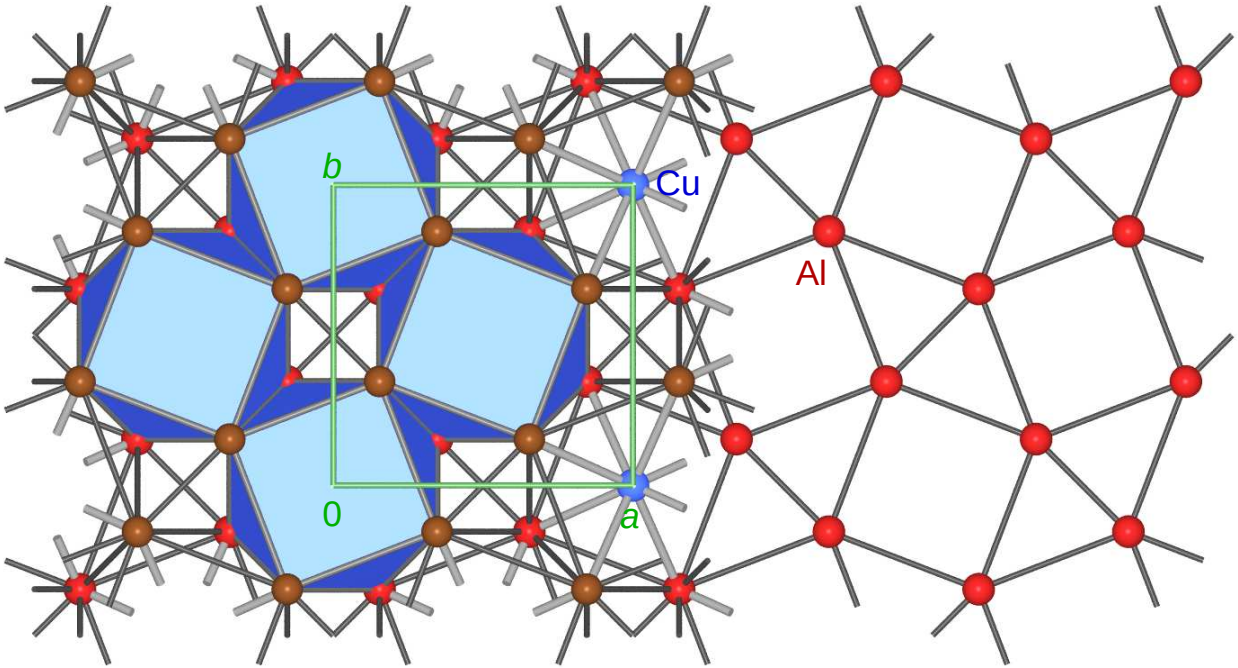
- CMA/Samson-Phase (isotyp zu '$NaCd_2$', s. 1. Stunde)
- β: kubisch, RG $Fd\bar{3}m$, $cF1192$; $a = 2824.2$ pm, $Mg_{46.5}Al_{53.6}$
- (wegen Fehlordnung z.T. auch als $cF1832$ '$Mg_{28}Al_{45}$' bezeichnet)
- β': trigonal R, $R3m$, $hR879$; $Mg_{36.9}Al_{63.1}$ (TT-Form, Untergruppe!)
- Teil-Strukturbeschreibung durch 'Cluster'/'Schalen'-Ansatz

$$Na(1)@FK_{28}^{16}[Cd(8,10)]\ @F_{16}^{28}[Na(5,6)/Zn(9)]\ @F_{40}^{76}[Cd(5,6,7,9,11,12)])$$



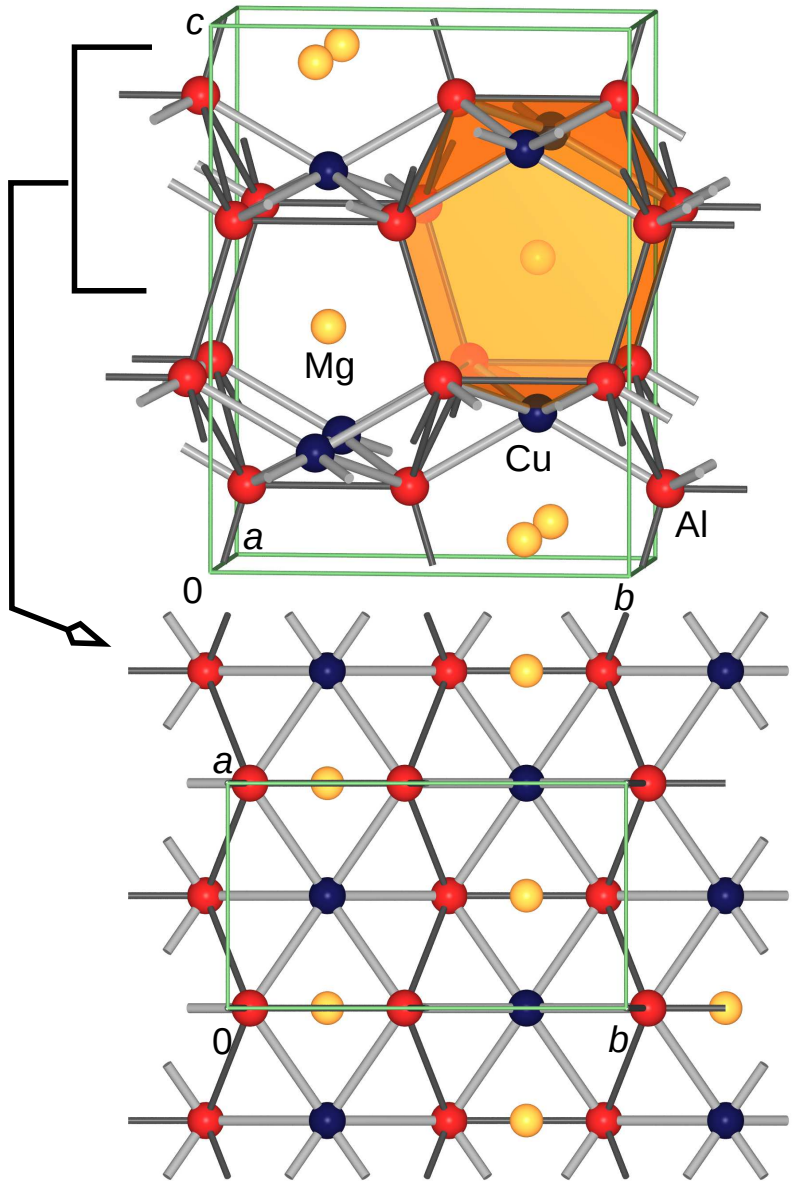
Kristallstrukturen III: $CuAl_2$

- eigener, aber relativ häufiger Strukturtyp
- tetragonal, RG $I4/mcm$, $tI6$
- Al: ebene $3^2.4.3.4.$-Netze
- Cu: CN = 8 × Al (quadratische Antiprismen)
- Bänder aus Al_4-Tetraedersternen



Kristallstrukturen IV: $MgCuAl_2$ (S-Phase)

- eigener Strukturtyp, ebenfalls relativ häufig
- orthorhombisch, RG *Cmcm*
- Mg: CN = 13 + 2
- Cu+Al: stark gewellte 3^6-Netze



Kristallstruktur der S-Phase $MgCuAl_2$

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

5 Weitere metallische Werkstoffe

1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

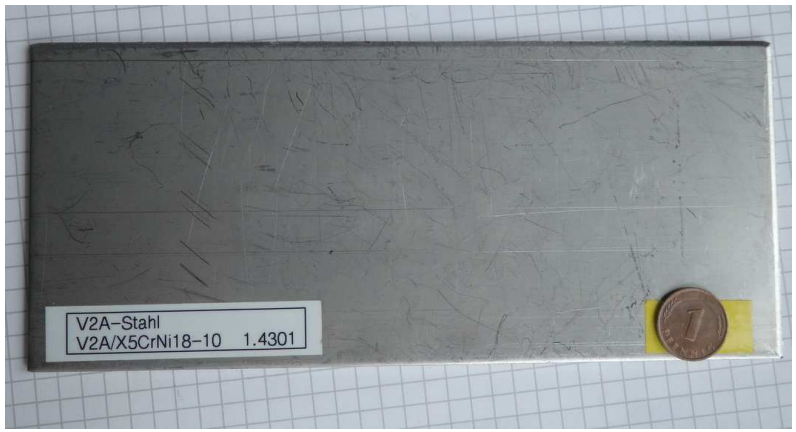
4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

5 Weitere metallische Werkstoffe

Stähle: Einteilung, Werkstoffbezeichnungen (DIN EN 10027-1)

- 1. Hauptgruppe: unlegiert
  Grenzwerte an Nicht-Fe-Elementen per DIN EN 10020 festgelegt
  Bezeichnung mit Hinweis auf Verwendung und Eigenschaften, z.B.
  - S: Stahlbau
  - P: Druckbehälterbau
  - L: Rohrleitungsbau
  - E: Maschinenbaustähle

  mit Angabe von Eigenschaften
  - z.B. Baustahl: S235JR (235 = Mindeststreckgrene in N/mm^2)
  - Gefügebilder (Fa. Schmitz, 1.0038)
- 2. Hauptgruppe: legiert, nichtrostend
  - < 1.2 % C, 10.5 % Cr + mehr oder weniger andere Elemente
  - weitere Einteilung nach Ni-Gehalt (Grenzwert: 2.5 % Ni)
  - Bezeichnung inkl. chem. Zusammensetzung
    - Cnn: unlegiert mit Mn $< 1\%$ nn = C-Gehalt * 100
    - Xnn: legiert mit Mn $> 1\%$:
    - weitere Elemente, mit genormten Faktoren multipliziert
      z.B. Cr: $\times 4$, Mo $\times 10$ - z.B. X10CrMo9-10



1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

5 Weitere metallische Werkstoffe

Erläuterungen, anhand des Phasendiagramms Fe–C

- Fe + Kohlenstoff (C) $\mapsto$ Phasendiagramm Fe–C PD Fe–C
  - rote gestrichelte Kurven: thermodynamisch stabil
  - schwarz (praktisch/kinetische) Phasengrenzen
- reines Fe: Martensit-Umwandlung PU Martensit/Austenit
- C-Gehalte der Fe-Formen
- reine Phasen, inkl. metastabilem (!) Zementit, Fe_3C EK Phasen
- Phasengemische: Perlit im REM und Ledeburit
- vier Bereiche, getrennt durch PD Fe–C
  Ferrit – Eutektoid (Perlit) – Eutektikum (Ledeburit) – Zementit (Fe_3C)

  1+2: Stähle: hohe Schmelzpunkte, < 1.7 Gew.-% C (25 Atom-% Fe_3C)

  1: < 0.8 % C, untereutektoid/unterperlitisch, Gefüge aus Ferrit (α-Fe) und Perlit

  2: 0.8-2.0 % C: übereutektoid/überperlitisch, Gefüge aus Perlit und Sekundär-Zementit

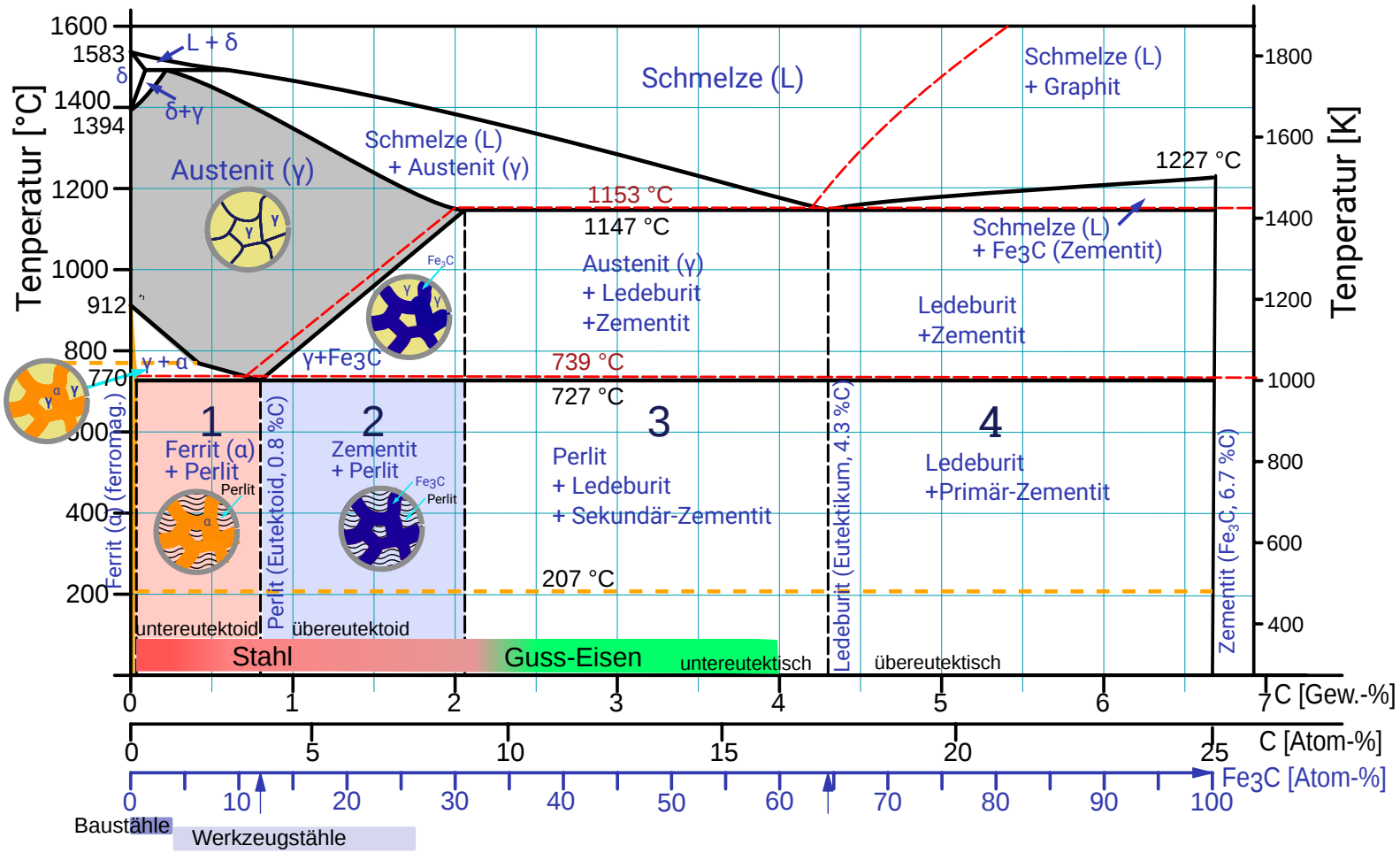
  3+4: weisses Eisen/Gusseisen: niedrigerer Schmelzpunkt

  3: 2.0-4.4 %C: untereutektisch: Gefüge aus Perlit und Sekundärzementit in Ledeburit, nur Guss-Eisen

  4: 4.3-6.67 %C: übereutektisch: Primärzementit in Ledeburit, ohne technische Anwendung
- C-Gehalt und technologische Eigenschaften Technisches

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Fe–C Diagramm

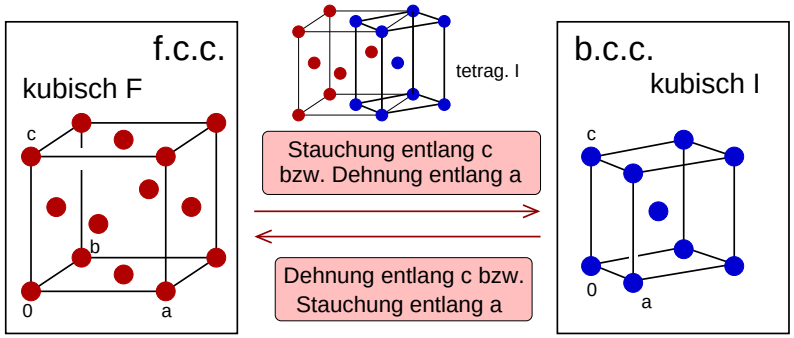


Fe–C erläutert

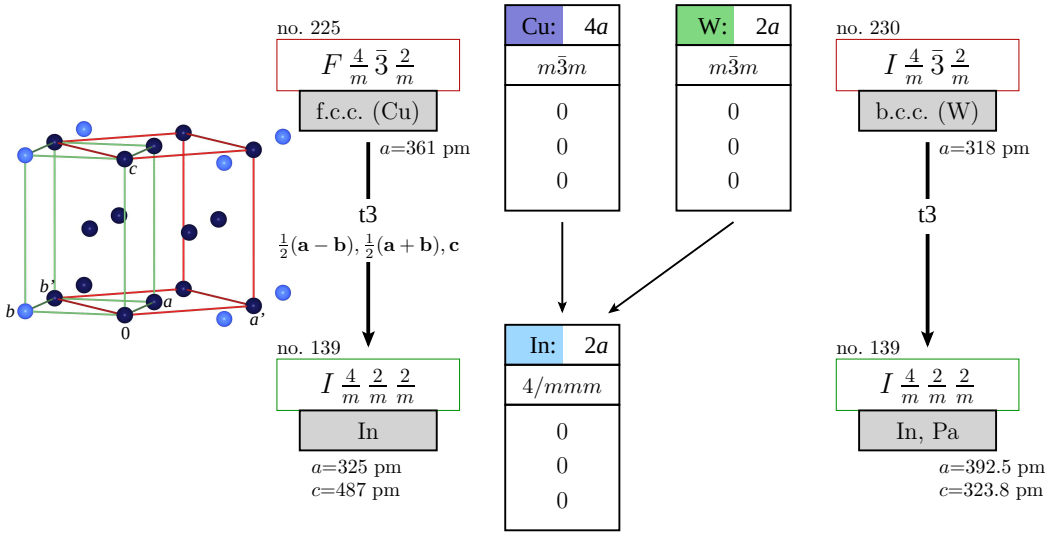
Martensit–Austenit-Phasenumwandlung

- Martensit–Austenit als Namensgeber, auch für andere displazive Phasenumwandlungen/Scherungen
- bei Fe und Stählen:

f.c.c.-Fe (γ, Austenit, HT) $\Leftrightarrow$ b.c.c.-Fe (α, Martensit, LT)



- kristallographische Gruppe-Untergruppe-Bezüge dazu



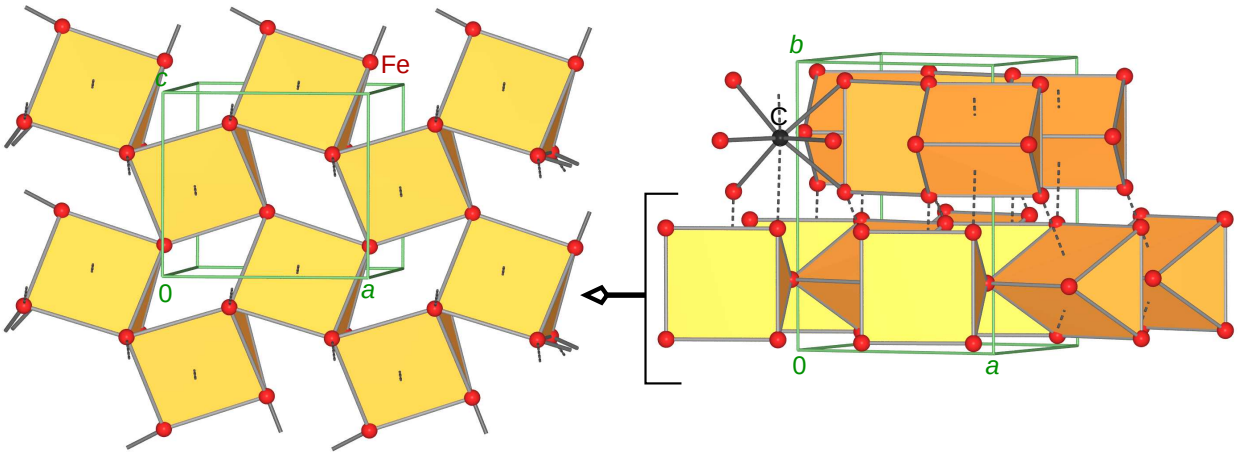
Fe–C erläutert

s.a. Erklär-Video und VRML2-Datei

reine, einkristalline Phasen im Fe–C Diagramm

Eigenschaft	Ferrit	Austenit	Zementit	Graphit
Phase	α-Fe	γ-Fe	Fe_3C	C
Struktur	b.c.c.	f.c.c.	*Pnma* ⇓	hexagonal
Härte	weich, 60 HV	unleg. nur >723°C	hart, 800 HV	sehr weich
Umformbarkeit	ausreichend	sehr hoch	keine (spröde)	keine
Sonstige	ferromagnetisch	paramagnetisch		Schmierstoff

Kristalline Phasen in Fe–C-Legierungen



Struktur von Fe_3C (s. 9. Stunde)

Fe–C erläutert

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

Einfluss des C-Gehaltes auf technologische Eigenschaften

- Giessen
  - ausreichend niedriger M_P erst bei C $> 3\%$
  - niedriges Schwindmaß (bei 1.0-1.5 %)
  - hohes Schwindmaß (bei 1.5-2 %)
  - Stahlguss: (<1.2 %) wegen Ausscheidung von γ-MK nicht dünnwandig vergießbar
- Warm-Umformung
  - C-arm bei hohen T leichter umformbar
  - Umform-T im Austenitgebiet unterhalb der Solidus-Linie,
  - Gefüge homogen austenitisch, bei höheren C-Gehalten zweiphasig durch Sekundärzementit
- Kalt-Umformen
- Spanen
  - Schnittkraft und Schneidverschleiss steigen mit Zementit-Gehalt, bei kugeligem Zementit aber vermindert,
  - Graphit (Gusseisen-Sorten) erleichtert Spanen durch Schmierwirkung
- Schweissen
  - Stähle mit hohem C-Gehalt und kleiner Bruchdehnung rissgefährdet
- Härten, Vergüten
  - >0.2 %: Härtesteigerung durch Abschrecken möglich, steigt bis 0.8 % C, dann konstant

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe

1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

5 Weitere metallische Werkstoffe

häufige Legierungselemente in Stählen

- Stahl: 0.4-1.7 Gew.-% C
- qualitätsmindernde Fe-Begleiter: P, S, O, N, H (gering!!)
- Gesamtgehalte an LE < 5 % (> 5%: hochlegierte Stähle)
- Mischkristallverfestigung durch LE, in Ferrit bzw. Austenit löslich
- LE, die Austenit-Gebiet erweitern: Mn, Ni, Co ('Austenit'-Bildner)
  - homogenes Gefüge aus γ-Mischkristall (f.c.c.)
  - niedrige Dehngrenze, stark umformbar
  - zäh, auch bei tiefen Temperaturen
  - nicht ferromagnetisch
  - umwandlungsfrei, d.h. kein Härten und Vergüten möglich
  - Beispiel: Edelstahl V2A (1.4301; X5CrNi18-10) (s.u.)
- LE, die das Austenit-Gebiet verkleinern: Ti, V, Cr, Mo, Si, Al ('Ferrit'-Stabilisatoren)
  - b.c.c. ('Austenit'-Zerfall $\mapsto$ Perlitbildung)
  - z.B. Fe-Cr-System: > 13 % Cr: ferritische Stähle
  - ferromagnetisch
- sehr sehr komplex durch zusätzliche Ausscheidung ...
  1. ... intermetallischer Phasen Interm. Phasen
  2. ... binärer, ternärer Fe/LE-Carbide Carbide

technologische Wirkung häufiger Legierungselemente

Eigenschaft	Legierungselement										
	Cr	Ni	Al	W	V	Co	Mo	Si	Mn	S	P
Zugfestigkeit	✔	✔		✔	✔	✔	✔	✔	✔		✔
Streckgrenze	✔	✔		✔	✔	✔	✔	✔	✔		✔
Kerbschlagzähigkeit	✗		✗		✔	✗	✔	✗		✗	✗
Verschleissfestigkeit	✔	✗		✔	✔	✔	✔	✗	✗		
Warmumformbarkeit	✗	✔	✗	✗	✔	✗	✔	✗	✔	✗	
Kaltumformbarkeit				✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗
Zerspanbarkeit		✗		✗			✗	✗	✗	✔	✔
Warmfestigkeit	✔	✔		✔	✔	✔	✔	✔			
Korrosionsbeständigkeit	✔				✔					✗	
Härtetemperatur	✔			✔	✔		✔	✔	✗		
Härtbarkeit, Vergütbarkeit	✔	✔		✔	✔	✔	✔	✔	✔		
Nitrierbarkeit	✔		✔	✔	✔		✔	✗	✔		
Schweißbarkeit	✗	✗	✔		✔		✗		✗	✗	✗

✔: Erhöhung; ✗: Verminderung

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe

Einleitung

Mechanische Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-Legierungen

Stähle

Übersicht

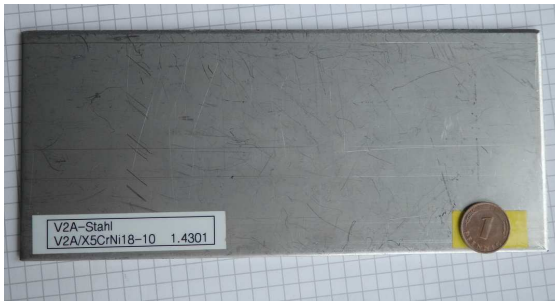
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

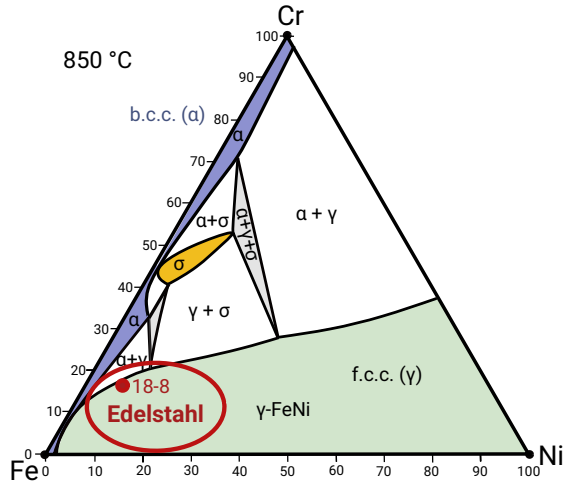
Weitere metallische Werkstoffe

Intermetallische Phasen; Beispiel: Cr/Ni-Stähle (z.B. V2A)

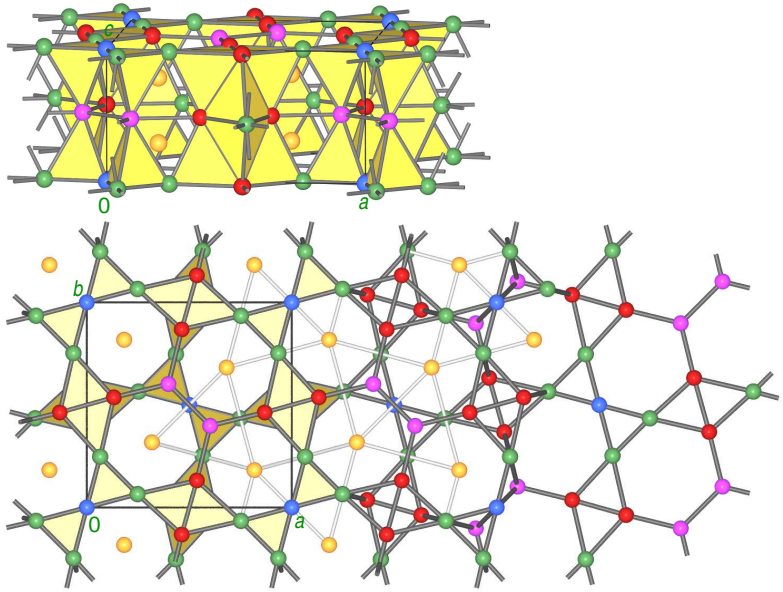
- 'V2A'; X5CrNi18-10 (1.4301): 0.5 % C; 18 % Cr und 10 % Ni



- im Phasendiagramm Fe–Ni–Cr ⇒
- intermetallische Phase: σ ⇒
- Edelstähle nach Primärphase
  - austenitisch: Nr. 1.4301 - 1.4541, alle f.c.c.
  - ferritisch: b.c.c.; 10-12 % Cr, kein Ni, aber Ti-haltig, wenig C (z.B. X2CrTi12, 1.4512)
- weitere Infos/Links
  - Gefügebilder (Fa. Schmitz)
  - Fa. Thyssen-Krupp
  - Fa. Struers
  - www.stahlportal.com



Phasendiagramm Fe–Ni–Cr

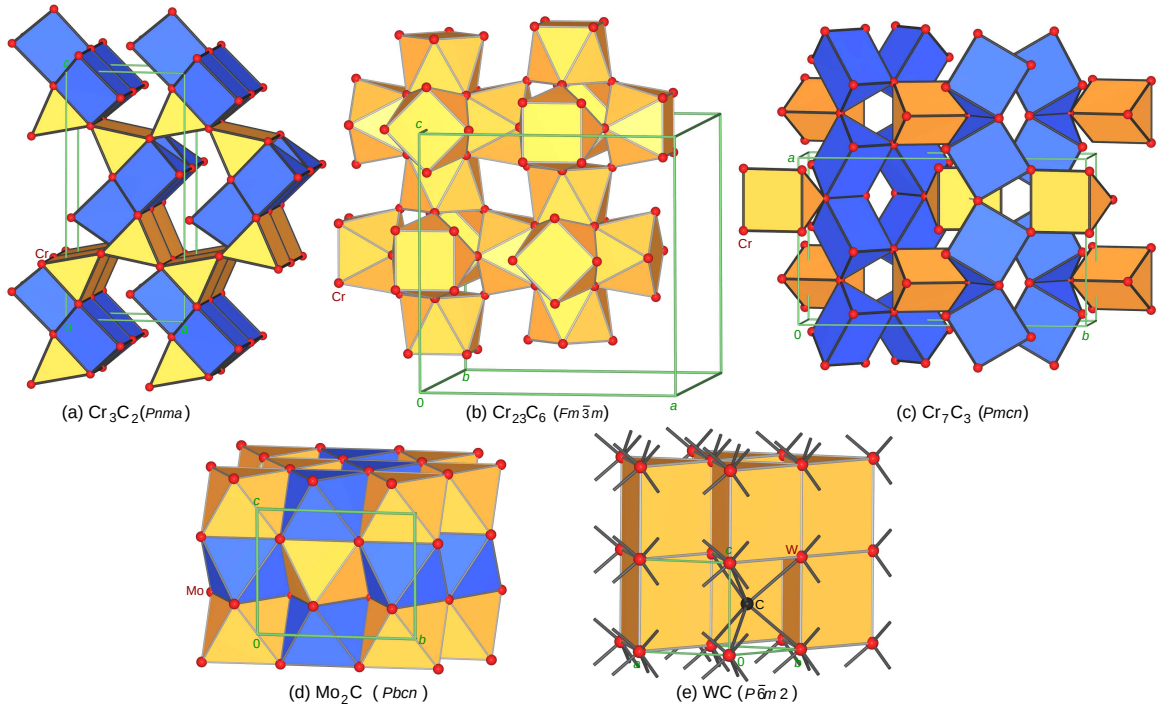


Kristallstruktur der σ-Phase

Carbide der Legierungselemente

- LE und ihre Carbide [(Härte/HV): Strukturtyp/Abb.]:

  Ti: TiC (3200): NaCl
  V: VC (2800): NaCl
  Nb: NbC (2800): NaCl
  Cr: Cr_3C_2 (2150) (a), $Cr_{23}C_6$ (b) und Cr_7C_3 (c)
  Mo: Mo_2C (1500): Defekt-NiAs (d)
  W: WC (2400): Struktur s. Kap. 10 (e)



- !! C-Gehalt beeinflusst zusätzlich Wirkung der LE stark
- !! Wirkung zweier LE ≠ Summe beider Einflüsse (ternäre Carbide!)

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe

Einleitung

Mechanische Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Weitere metallische Werkstoffe

1 Einleitung

2 Mechanische Eigenschaften

3 Aluminium-Legierungen

4 Stähle
- Übersicht
- Unlegierte Stähle
- Legierte Stähle

5 Weitere metallische Werkstoffe

Weitere metallische Werkstoffe; Neuere Entwicklungen

- Herausforderung:
  - H_2 als Reduktionsmittel !! (s. 'Stahl', PDF, AC-III, WS 2025)
  - Wiedergewinnung/Recycling
- Materialien
  - in-situ Verbundwerkstoffe (COTAC HT-Werkstoffe für Turbinen)
  - Li-haltige Leichtmetall-Legierungen
  - Superelastische Materialien (z.B. Medizintechnik)
    - Shape Memory Alloys, wie z.B. NiTiNOL
  - High-Entropy Alloys (s. 11. Stunde letzte Woche)
  - Magnetmaterialien
    - z.B. *Ln*-Legierungen (13. Stunde, 15.7.2026)

12. Metalle/ Legierungen als Werkstoffe
Einleitung
Mechanische Eigenschaften
1
2
3
4
Aluminium-Legierungen
Stähle
Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle
Weitere metallische Werkstoffe