

11. Metalle und Legierungen als Werkstoffe



Vorlesung INTERMETALLISCHE PHASEN, Sommersemester 2025
Stefanie Gärtner (UR), Constantin Hoch (LMU), Caroline Röhr (ALU)

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

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

- ▶ Günter Gottstein: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Physikalische Grundlagen*, Springer, 2014.
- ▶ Erhard Hornbogen, Hans Warlimont, Birgit Skrotzki: *Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*, Springer 2018.
- ▶ Donald R. Askeland: *Materialwissenschaften*, Spektrum, 2010.
- ▶ Wolfgang Weissbach u.A.: *Werkstoffe und ihre Anwendungen: Metalle, Kunststoffe und mehr*, Springer, 2018.
- ▶ Hermann Schumann, Heinrich Oettel: *Metallografie*, Wiley, 2005.
- ▶ 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: Nb₃Sn (**A2-B1**, HUME-ROTHERY-Phasen)
- ▶ Lote: **Bn-Bn**-Phasen/Eutektika mit niedrigen Schmelzpunkten
- ▶ Halbleiter (Solarzellen, Detektoren, Dioden, Transistoren etc.): **reine B2-Elemente** (Si, Ge), **Bn-Bn**-Phasen (III-V-HL)
- ▶ Thermoelektrika: **Bn-Bn**-Phasen (PbTe, Bi₂Te₃)
- ▶ Magnetmaterialien: (**Ln/A1**)-**A2(3d)** + (Bor)
 - ▶ weichmagnetisch: Fe/Co (A2)
 - ▶ hartmagnetisch: SmCo₅/Sm₂Co₁₇ (FRANK-KASPER-Ph.), Nd₂Fe₁₄B (Interstitiell)
- ▶ H₂-Speicher: interstitielle H-haltige Phasen von LaNi₅ 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** ↓
- ▶ was noch fehlt ... \mapsto **A2 + A2 (+ A2 + A1 + Mg ... und + C)**

Eigenschaften/Anwendungen ... (was noch fehlt)

- ▶ $A_2 + A_2$ (+ $A_2 + A_2 + Al + Mg$... 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)
- ▶ ?? für uns:
 - ▶ 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
<i>Ln</i>	29.000
Re	58

¹ 2023, nur Primär !

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
- ▶ praktisch EXTREM WICHTIG
- ▶ 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

Einleitung

Mechanische Eigenschaften

1
2
3
4

Aluminium-Legierungen

Stähle

Übersicht
Unlegierte Stähle
Legierte Stähle

Neue metallische Werkstoffe

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)
 - ▶ Härte
 - ▶ 'Umformbarkeit' (Ziehen, Walzen, Pressen, Schmieden)
 - ▶ Zerspanbarkeit (Drehen, Fräsen)
- ▶ ?? Kenngrößen ??
 - ▶ technisch (aus Spannungs-Dehnung-Kurve): Zähigkeit, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung ...
 - ▶ abhängig zusätzlich von T ('Warmfestigkeit'), t (Kriechen), ν Frequenzen ('Dauerschwingfestigkeit')

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

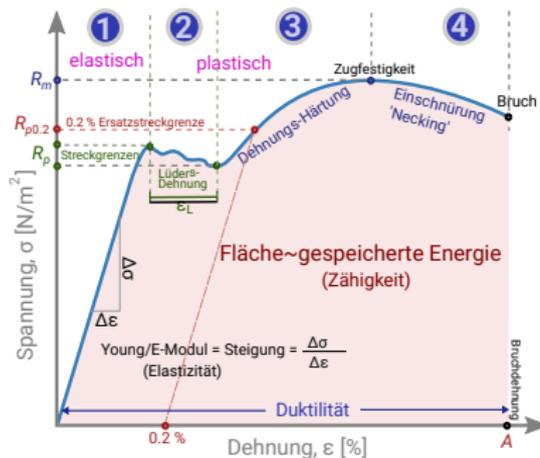
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
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 [%]	25	45
HBW ²	22-35	215

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

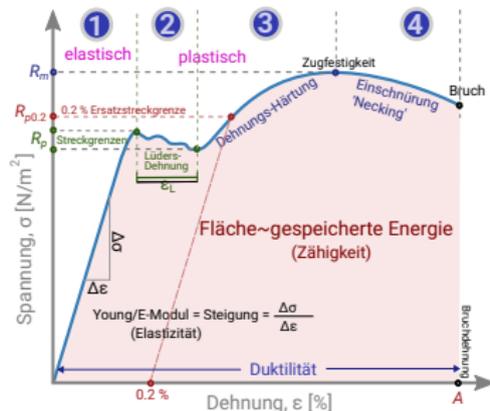
Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

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

Spannungs-Dehnungs-Kurve ①: 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)
- ▶ !!! 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

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

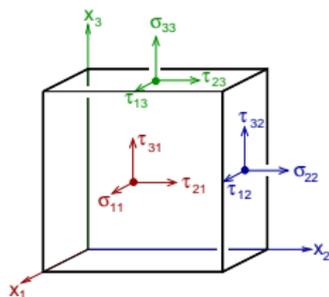
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

'Spannung' und 'Dehnung', genauer geschaut

- ▶ Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften in nichtisotropen (z.B. kristallinen) Materialien
- ▶ 'Spannung' (Ursache) und 'Dehnung' (Wirkung)
↳ 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
- ▶ ↳ d.h. Materialparameter $\chi_{i,j,k,l}$ der elastischen mechanischen Eigenschaften (maximal 81 Werte, sog. elastische Koeffizienten) ↓



Wdh.: Klassifizierung physikalischer Materialeigenschaften

Ursache: Änderung äußerer Parameter/Feldgröße (Zustandsvariable¹)

① Polarisations-Eigenschaften

- ▶ statischer Response, Gleichgewicht
- ▶ ∞ -hoher Transport-Widerstand
- ▶ \mapsto Änderung in einer Mengen/Zustandsgröße² (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

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

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 χ 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

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

Wdh.: Übersicht: Polarisations-Eigenschaften¹

	Feldgröße X			
Mengen größe Y ↓	Temperatur	elektrisches Feld	Magnetfeld	mechanische Spannung
	T [K]	E_i [V/m]	H_i [Vs/m ²]	$\sigma_{i,j}$ [N/m ²]
Entropie S [J/m ² s]	Wärmekapazität $\chi^{ST} = c_p = \frac{\delta S}{\delta T} T$	elektrokalo- rischer Effekt $\chi_i^{SE} = \frac{\delta S}{\delta E}$	magnetokalo- rischer Effekt $\chi_i^{SH} = \frac{\delta S}{\delta H}$	$\chi_{i,j}^{S\sigma} = \frac{\delta S}{\delta \sigma}$
elektrische Pola- risation P_k [As/m ²]	pyroelektrischer Effekt $\chi_k^{PT} = \frac{\delta P}{\delta T}$	elektrische Suszepti- bilität $\chi_{i,k}^{PE} = \frac{\delta P}{\delta E}$	magnetoelektri- scher 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
Magneti- sierung 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 Sus- zeptibilität $\chi_{i,k}^{MH} = \frac{\chi}{\mu} = \frac{\delta M}{\delta H}$	piezomagne- tischer Effekt $\chi_{i,j,k}^{M\sigma} = \frac{\delta P}{\delta \sigma}$ piezomagneti- sche Moduln
mecha- nische Deforma- tion $\epsilon_{k,l}$	thermische Aus- dehnung $\chi_{k,l}^{\epsilon T} = \alpha_{k,l} = \frac{\delta \epsilon}{\delta T}$	reziproker piezo- elektrischer Effekt (Elektrostriktion) $\chi_{i,k,l}^{\epsilon E} = \frac{\delta \epsilon}{\delta E}$	reziproker piezo- magnetischer Effekt $\chi_{i,k,l}^{\epsilon H} = \frac{\chi}{\mu} = \frac{\delta \epsilon}{\delta H}$	Spannungs- Dehnungs- Verhalten $\chi_{i,j,k,l}^{\epsilon \sigma} = \frac{\delta \epsilon}{\delta \sigma}$ Elastizitäts-/ YOUNG-Moduln

11. Metalle/
Legierungen
als Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

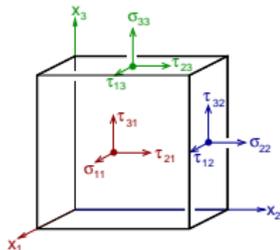
Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

¹ thermodynamische Klassifizierung phänomenologischer Material'konstanten'

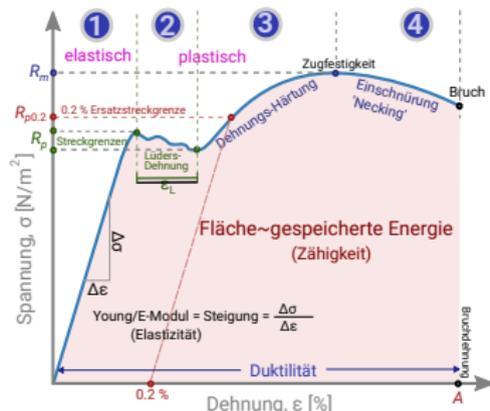
'Spannung' und 'Dehnung', genauer geschaut

- ▶ 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}



Spannungs-Dehnungs-Kurve ②: plastisches Verhalten

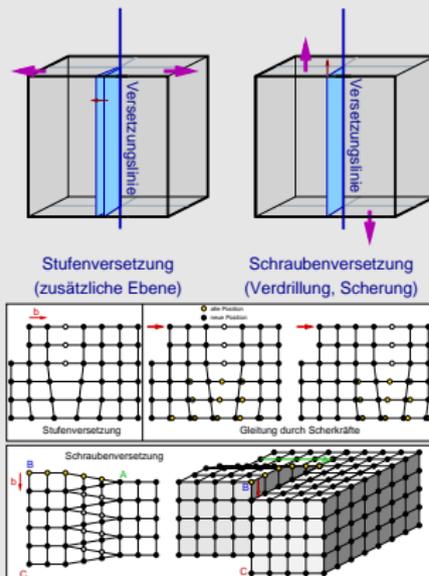
- ▶ Zick-Zack-förmiger Kurvenverlauf
- ▶ kein Gleichgewicht
- ▶ nicht reversibel
- ▶ Transporteefekte
- ▶ t -Abhängigkeit
- ▶ LÜDERS-Dehnung: plastischer Dehnungsanteil, der durch Versetzungsbewegung durch den Werkstoff bei konstanten Belastung entsteht
- ▶ in Cu+Al-Legierungen, bei niedrig- oder untereutektoidisch 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 Streckung 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 $\propto |\vec{b}|^2$



Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

① Stufenversetzung

$\vec{b} \perp \vec{s}$ (90°-Versetzung)

$\vec{r} \parallel \vec{b}$, $\vec{r} \perp \vec{s}$

an Gleitebene gebunden

wichtig bei Metallen

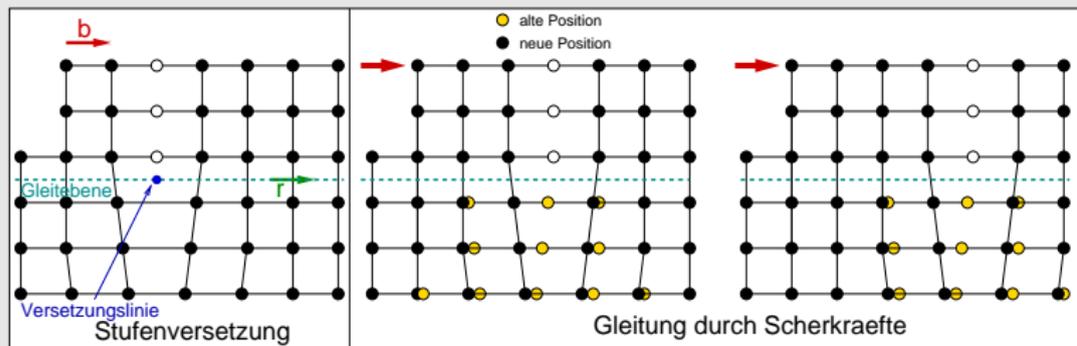
② Schraubenversetzung

$\vec{b} \parallel \vec{s}$ (0°-Versetzung)

$\vec{r} \perp \vec{b}$, $\vec{r} \perp \vec{s}$

nicht an Gleitebene gebunden (Quergleitung)

wichtig bei Halbleitern



▶ 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

- ▶ Scherkräfteinwirkung \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

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

Strukturtyp \leftrightarrow mechanische Eigenschaften (f. Metalle)

► Tabelle kritischer Schub/Scher-Spannungen τ_{\max}

bei statistischer Kornverteilung: $3\tau_{\max} = R_p$ (obere Streckgrenze)

	b.c.c.	f.c.c.	h.c.p.
τ_{\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 \times)	[1 $\bar{1}0$]	[11 $\bar{2}0$]
Anzahl Gleitsysteme	(48)	12 (4 \times 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 Ni: 2	Mg ($c/a=1.600$): 0.39 Ti ($c/a=1.587$): 13.7

► theoretische Werte/ohne Baufehler: 1000-3000 N/mm²

► reale Werte: 1-30 N/mm²

► Tendenzen nach Strukturtyp:

b.c.c. fest (hohe kritische Scherspannung da keine dichtesten Schichten)

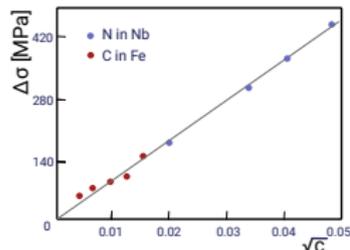
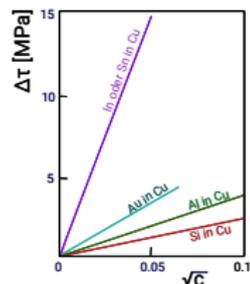
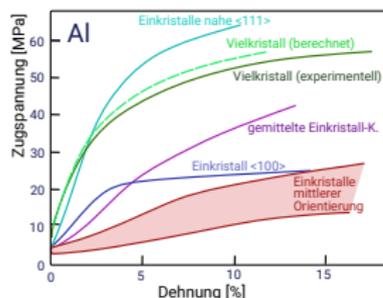
f.c.c. meist sehr duktil (viele Gleitsysteme, geringe kritische Scherspannung)

h.c.p. meist spröde (wenige Gleitsysteme), abhängig vom c/a -Verhältnis

*1 N/mm² = 1 MPa = 0.001 GPa

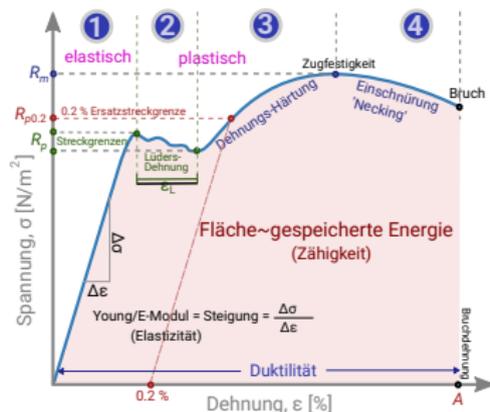
Auswirkungen dieser Versetzungen bei Metalle/Legierungen

- ▶ typische **Versetzungsdichten** für Metalle (in Gesamtlänge/Volumen)
 - ▶ $10^2 - 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (\rightarrow bis $1000 \text{ km}/1 \text{ cm}^3$)
 - ▶ 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 (OD) \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 ③: 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) ↔ 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 A199.5	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

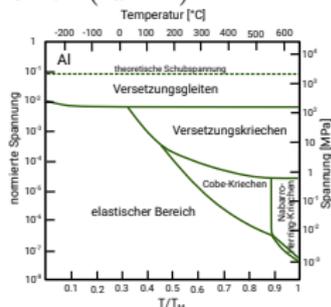
¹nach DIN 50150

Härte-Skalen

- ▶ MOHS-Härte: 'Wer ritzt wen' ?
(1-10)
- ▶ Vermessung der Eindrucksbreiten
genormter Diamant-Prüfkörper
 - ▶ Vickers [HV]: Pyramide
 - ▶ Brinell [HB]: Kugel
($HB = 0.95 \times HV$)
 - ▶ Knoop
- ▶ Vermessung der Eindruckstiefe
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)

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

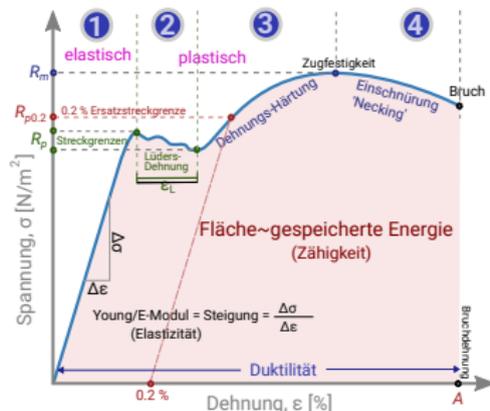
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

Spannungs-Dehnungs-Kurve ④: Einschnürung/'Necking'

- ▶ S/D-Kurve fällt wieder
- ▶ massive Materialdeformation \rightarrow Einschnürung des Prüfkörpers
- ▶ Kenngröße für Materialversagen: Bruchdehnung A [%]



Material	Dichte ρ [g/cm ³]	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Brinell- härte [HB]	Bruch- dehnung [%]
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

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

▶ reines Aluminium

- ✓ leicht ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$)
- ✓ korrosionsfest (durch epitaktische Oxid-Deckschicht)
- ✓ gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit
- ✓ anodisch oxidierbar
- ✗ niedrige Festkeit und Steifigkeit
- ✗ hohe Wärmeausdehnung
- ✗ Löten und Schweißen nur mit Flussmitteln
- ✗ in Basen und nichtoxidierenden Säuren löslich
- ✗ niedriger Schmelzpunkt ($660 \text{ }^\circ\text{C}$)

▶ 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)

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

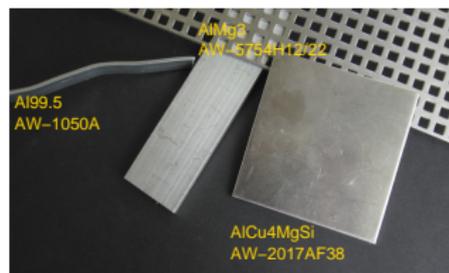
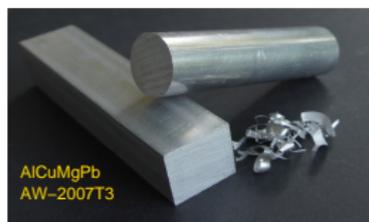
Neue
metallische
Werkstoffe

Al und Al-Legierungen: Daten und Sammlungsstücke*

11. Metalle/
Legierungen
als Werkstoffe

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 Si	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 CuAl₂ und MgCuAl₂; ² Mg₂Si; ³ Mg₁₇Al₁₂



Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

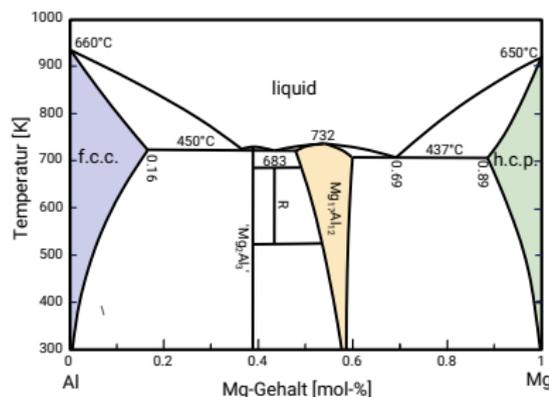
Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

*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: 'Mg₂Al₃' (!!) \downarrow I
 - ▶ Mg-seitig: Mg₁₇Al₁₂ (α -Mn) \downarrow II
- ▶ weitere wichtige zusätzliche LE und entsprechende intermetallische Phasen
 - +Si \mapsto Mg₂Si (ZINTL!; CaF₂ = anti-Li₂O-Typ)
 - +Cu \mapsto CuAl₂ (eigener Typ, relativ häufig) \downarrow III
 - +Si+Cu \mapsto MgCuAl₂ (dito) \downarrow IV
- ▶ Al in der Gefügedatenbank (Fa. Schmitz)



Phasendiagramm Al-Mg

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1
2
3
4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

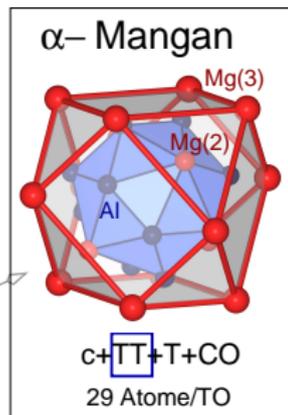
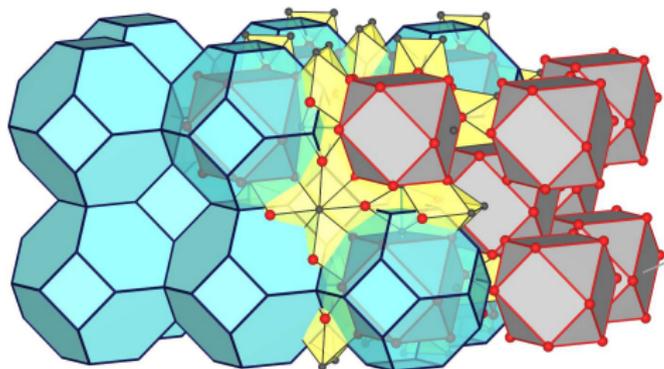
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

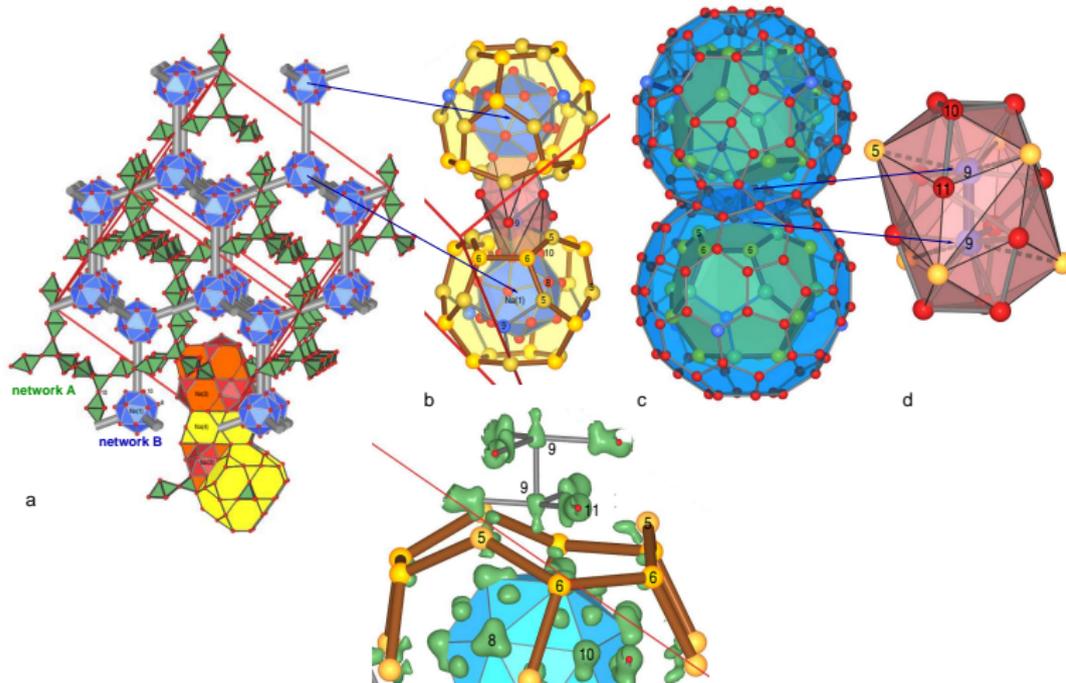
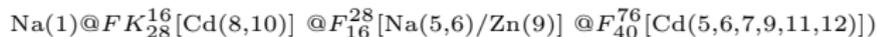
Kristallstruktur I: $Mg_{17}Al_{12}$

- ▶ 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:
 $c [Mg(1)] + TT [Al] + T [Mg(2)] + CO [Mg(3)] = 1 + 12 + 4 + 12 = 29$



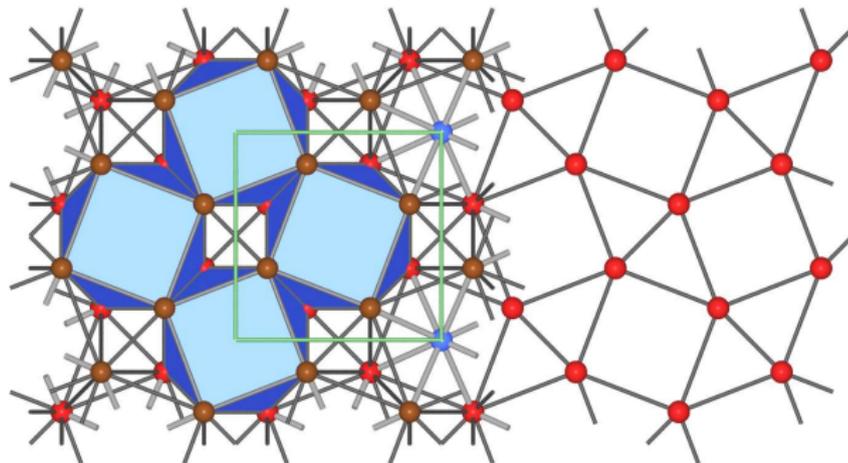
Kristallstrukturen II: 'Mg₂Al₃'

- ▶ CMA/SAMSON-Phase (isotyp zu 'NaCd₂', 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 $cF1832$ 'Mg₂₈Al₄₅' bezeichnet)
- ▶ β': trigonal R , $R3m$, $hR879$; Mg_{36.9}Al_{63.1} (TT-Form, Untergruppe!)
- ▶ Teil-Strukturbeschreibung durch 'Cluster'/'Schalen'-Ansatz



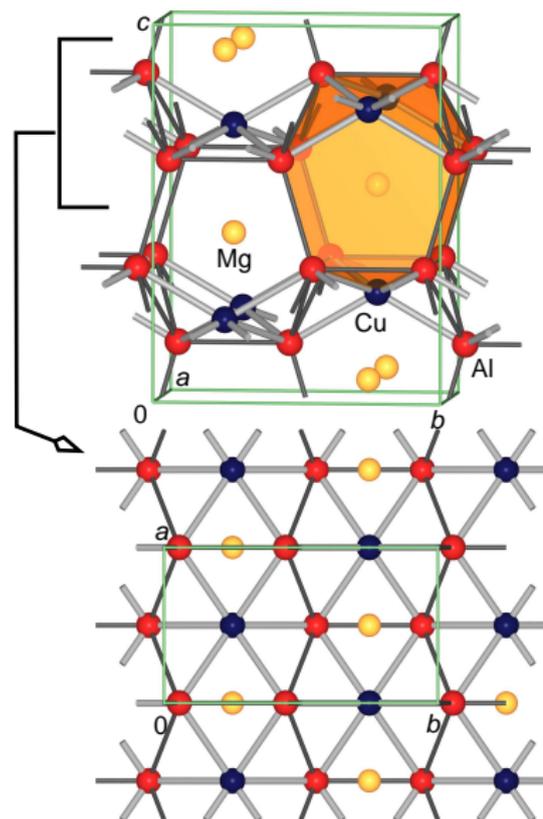
Kristallstrukturen III: CuAl_2

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



Kristallstrukturen IV: MgCuAl₂ (S-Phase)

- ▶ eigener Strukturtyp, ebenfalls relativ häufig
- ▶ orthorhombisch, RG *Cmcm*
- ▶ Mg: CN = 13 + 2
- ▶ Cu+Al: stark gewellte 3⁶-Netze



Kristallstruktur der S-Phase MgCuAl₂

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ **Stähle**

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
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 = Mindeststreckgrenze in N/mm²)

▶ 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

- C_{nn}: unlegiert mit Mn < 1% $nn = C\text{-Gehalt} \cdot 100$

- X_{nn}: 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 Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

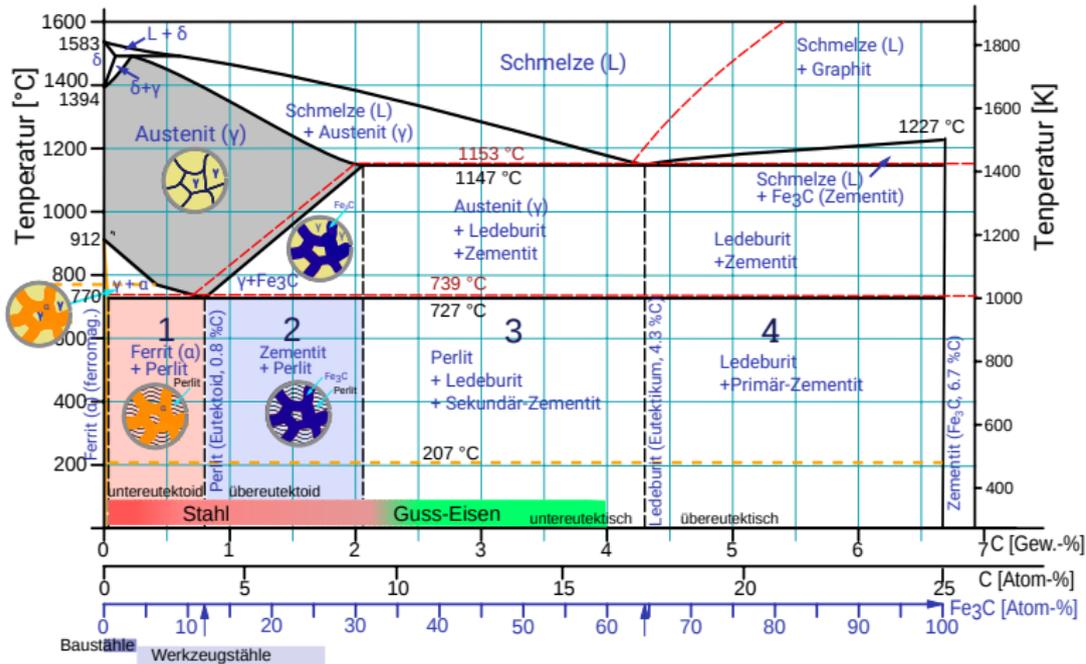
Legierte Stähle

Neue
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**

Fe-C Diagramm



Fe-C erläutert

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

- 1
- 2
- 3
- 4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

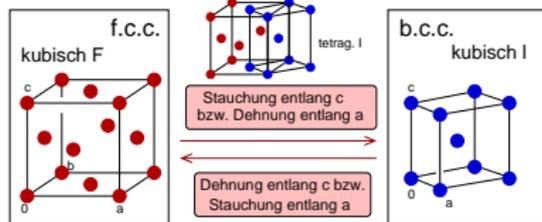
Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

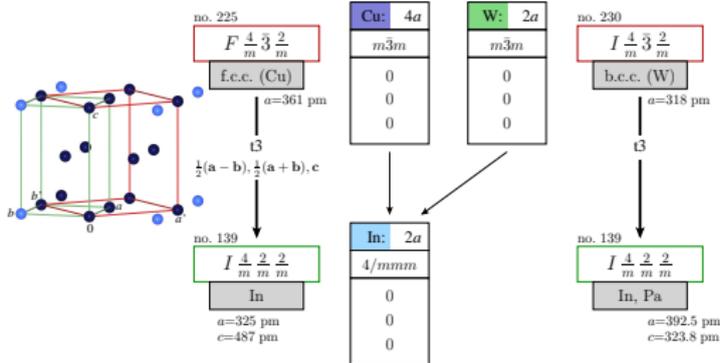
Martensit–Austenit-Phasenumwandlung

- ▶ 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

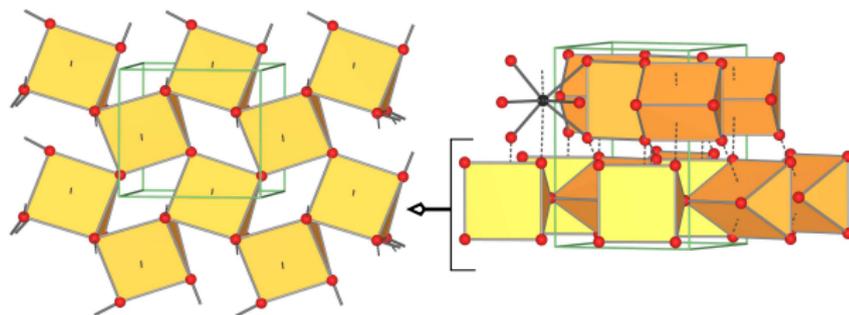


Fe–C erläutert

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.	$Pnma \downarrow$	hexagonal
Härte	weich, 60 HV	unleg. nur $>723^\circ\text{C}$	hart, 800 HV	sehr weich
Umformbarkeit	ausreichend	sehr hoch	keine, spröde	keine, spröde
Sonstige	ferromagnetisch	paramagnetisch		Schmierstoff

Kristalline Phasen in Fe-C-Legierungen



Struktur von Fe_3C (s. 9. Stunde)

Fe-C erläutert

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
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
- ▶ Warumentformung
 - ▶ 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
- ▶ Kaltumformen
- ▶ 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

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ **Stähle**

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
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	X		X		✓	X	✓	X		X	X
Verschleissfestigkeit	✓	X		✓	✓	✓	✓	X	X		
Warmumformbarkeit	X	✓	X	X	✓	X	✓	X	✓	X	
Kaltumformbarkeit				X		X	X	X	X	X	X
Zerspanbarkeit		X		X			X	X	X	✓	✓
Warmfestigkeit	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			
Korrosionsbeständigkeit	✓				✓					X	
Härtetemperatur	✓			✓	✓		✓	✓	X		
Härtbarkeit, Vergütbarkeit	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Nitrierbarkeit	✓		✓	✓	✓		✓	X	✓		
Schweißbarkeit	X	X	✓		✓		X		X	X	X

✓: Erhöhung; X: Verminderung

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

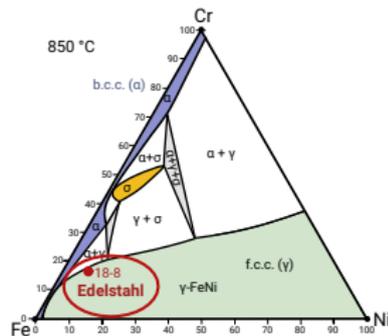
Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

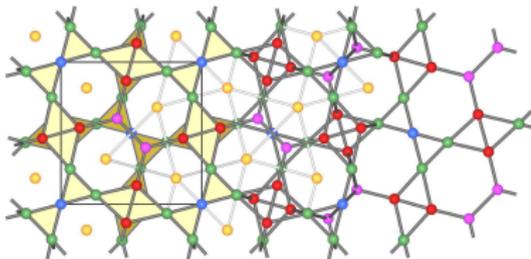
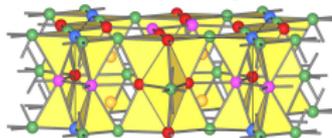
Neue
metallische
Werkstoffe

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

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



Phasendiagramm Fe-Ni-Cr



Kristallstruktur der σ -Phase

- ▶ im Phasendiagramm Fe-Ni-Cr \Rightarrow
- ▶ intermetallische Phase: $\sigma \Rightarrow$
- ▶ 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

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

Carbide der Legierungselemente

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

Ti: TiC (3200): NaCl

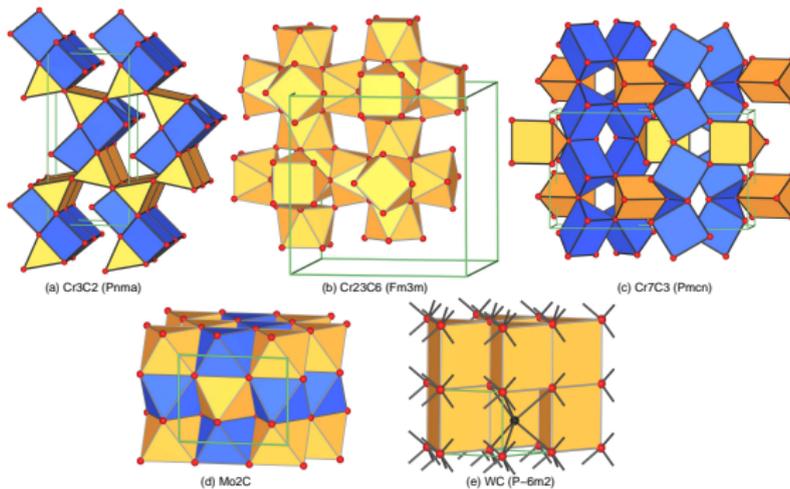
V: VC (2800): NaCl

Nb: NbC (2800): NaCl

Cr: Cr₃C₂ (2150) (a), Cr₂₃C₆ (b) und Cr₇C₃ (c)

Mo: Mo₂C (1500): Defekt-NiAs (d)

W: WC (2400): Struktur s. Kap. 10 (e)



► !! C-Gehalt beeinflusst zusätzlich Wirkung der LE stark

► !! Wirkung zweier LE \neq Summe beider Einflüsse (ternäre Carbide!)

① Einleitung

② Mechanische Eigenschaften

③ Aluminium-Legierungen

④ Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

⑤ Neue metallische Werkstoffe

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe

- ▶ Herausforderung:
 - ▶ H_2 als Reduktionsmittel !!
 - ▶ 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 nächste Woche)
 - ▶ ...

Einleitung

Mechanische
Eigenschaften

1

2

3

4

Aluminium-
Legierungen

Stähle

Übersicht

Unlegierte Stähle

Legierte Stähle

Neue
metallische
Werkstoffe