

Inhaltsverzeichnis

1	Charakterisierung der wichtigsten Eigenschaften der Werkstoffe	5
1.1	Festigkeit	5
1.2	Verformung	5
1.3	Spannungs-Dehnungslinien	6
1.4	Der Zugversuch an Baustählen nach DIN EN 10002	7
1.5	Wahre Spannung - Wahre Dehnung	8
1.6	Verformungsenergie und Arbeitsvermögen	9
1.7	Kriechen, Relaxation und Zeitstandverhalten	10
1.8	Ermüdung	11
1.9	Oberflächenhärte	12
1.10	Kerbschlagzähigkeit	13
2	Baupraktische Eigenschaften von Werkstoffen	15
2.1	Dichte	15
2.2	Volumenstabilität	15
2.3	Wärmedehnung	15
2.4	Transportphänomene	16
2.4.1	Diffusion	16
2.4.2	Permeation	19
2.4.3	Wärmeleitung	19
2.5	Schall	21
3	Das Verhalten der Werkstoffe bei chemischen und physikalischen Einwirkungen	22
3.1	Korrosion	22
3.2	Feuerwiderstand	22
4	Abgeleitete Werkstoffeigenschaften	23
4.1	Oberfläche, Aussehen und Formbarkeit	23
4.2	Werkstoffauswahl, Tragvermögen, Dauerhaftigkeit, Kosten	23
5	Die Makrostruktur der Werkstoffe	24
5.1	Homogenität und Isotropie	24
5.2	Phasen und Körner	24
5.3	Porosität	24
5.4	Klassifizierung und Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von der Grobstruktur	25
5.5	Plastische Verformungen	25
5.5.1	Definitionen	25
5.5.2	Bedeutung der plastischen Verformbarkeit eines Werkstoffs	25
5.6	Mechanismen der plastischen Verformung von Metallen	26
5.7	Theoretische Schubfestigkeit	27
5.8	Plastische Verformung als Folge von Versetzungsbewegungen	28
5.8.1	Versetzungsarten	28
5.8.2	Verformungsvorgang durch Versetzungsbewegungen	29
5.8.3	Eigenschaften der Versetzungen	29
5.8.4	Zusammenfassung und Folgerungen	31
5.9	Gleitsysteme	32
5.10	Kritische Schubspannung	33
5.11	Plastizität von Einkristallen	35
5.12	Plastizität von Vielkristallen	36

5.13	Spannungs- Dehnungsverhalten von Stahl	36
5.14	Einflüsse auf die plastische Verformbarkeit	37
5.14.1	Strukturparameter	37
5.14.2	Äußere Einflüsse	37
5.15	Kriechen und Relaxation	38
5.15.1	Ursachen	38
5.15.2	Einflüsse auf das Kriechen	39
6	Die Mikrostruktur der Werkstoffe	40
6.1	Energieniveau, Ordnung und Unordnung, Aggregatzustände	40
6.1.1	kristalline und amorphe Werkstoffe	40
6.1.2	Sole und Gele	41
6.1.3	Aus der Mikrostruktur ableitbare charakteristische Werkstoffeigenschaften	41
6.2	Grundbausteine der Werkstoffe	42
6.3	Bindungsarten	42
6.3.1	Ionenbindung	45
6.3.2	Metallbindung	46
6.3.3	Kovalente Bindung (Atombindung oder homöopolare Bindung)	46
6.3.4	Dipolbindung	47
6.3.5	Van–der–Waals`sche Bindung	47
6.3.6	Gemischte Bindungen	48
6.3.7	Bindungsenergie und Atomabstand	48
6.4	Charakteristische Werkstoffeigenschaften als Folge von Bindungsart und Bindungsenergie	49
6.4.1	Festigkeit	49
6.4.2	Duktilität und Sprödigkeit	49
6.4.3	Elastizitätsmodul	50
6.4.4	Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit	50
6.4.5	Siedepunkt und Temperaturdehnung	51
6.5	Aufbau und Eigenschaften kristalliner Werkstoffe	52
6.5.1	Die Kugelpackungen	52
6.5.2	Wichtige Kristallstrukturen	53
6.5.3	Begriffe und Kenngrößen von Kristallen	55
6.5.4	Charakteristische Werkstoffeigenschaften als Folge der Kristallstruktur der Werkstoffe	56
6.6	Amorphe Werkstoffe - Stoffe aus langen Kettenmolekülen	56
6.6.1	Kettenpolymere - Thermoplaste	56
6.6.2	Elastomere	57
6.6.3	Dreidimensionale Netzwerke - Duroplaste	57
6.6.4	Charakteristische Werkstoffeigenschaften als Folge des Vernetzungsgrads	57
6.7	Sole und Gele	58
6.7.1	Oberflächenspannung - Oberflächenenergie	58
6.7.2	Die Struktur von Solen und Gelen	59
7	Herstellung und Formgebung von Werkstoffen	60
7.1	Mischen von Werkstoffkomponenten	60
7.2	Phasendiagramme	60
7.2.1	Mischung von zwei Komponenten mit voller Löslichkeit	60
7.2.2	Mischung von zwei Komponenten mit beschränkter Löslichkeit	59
7.2.3	Mischung von zwei Komponenten, die ineinander unlöslich sind	64
7.2.4	Die Entstehung des Metallgefüges	65
7.2.5	Weitere Begriffe	65
7.3	Stahl und Gußeisen	65
7.3.1	Struktur des reinen Eisens	66
7.3.2	Grundstrukturen des Eisen-Kohlenstoff-Systems (Fe-C-System)	66

7.4	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	67
7.4.1	Stähle bei Raumtemperatur	67
7.4.2	Gußeisen bei Raumtemperatur (2,1 % < C < 4,3 %)	67
7.4.3	Bedeutung des C-Gehalts für die mechanischen Eigenschaften der Stähle	68
7.5	Formgebung und Wärmebehandlung	69
7.5.1	Formgebung durch Schmelzen und Erstarren	69
7.5.2	Formgebung durch Kalt- oder Warmverformung	70
7.5.3	Nachbehandlung	71
7.6	Diffusionsvorgänge - Sintern	72
7.7	Temperaturabhängige Prozesse	72
7.7.1	Arrheniusgleichung	72
7.7.2	Aktivierungsenergie	73
8	Die wichtigsten Metalle im Bauwesen	75
8.1	Der Stahl	75
8.1.1	Ausgangsstoffe	75
8.1.2	Einteilung der Stähle	75
8.1.3	Bezeichnungssysteme	76
8.1.4	Stähle für den Stahlbau	78
8.1.5	Betonstähle (DIN 488, DIN ENV 10080)	79
8.1.6	Spannstähle	80
8.1.7	Eigenschaften der Stähle für das Bauwesen	81
8.2	Das Gußeisen	82
8.2.1	Klassifizierung des Gußeisens	82
8.2.2	Eigenschaften von Gußeisen	82
8.3	Das Aluminium	83
8.3.1	Ausgangsstoffe	83
8.3.2	Klassifizierung und Bezeichnungen	83
8.3.3	Eigenschaften	84
9	Festigkeit und Bruch	85
9.1	Zielsetzung und Definitionen	85
9.2	Theoretische Zugfestigkeit	86
9.3	Kerben	87
9.4	Zäher Bruch	88
9.5	Der spröde Bruch - Bruchmechanik	88
9.5.1	Einführung	88
9.5.2	Grundbeziehungen nach Griffith	89
9.5.3	Erweiterte Form nach Irwin	89
9.5.4	Einflüsse auf die Bruchzähigkeit K_{Ic}	93
9.6	Verhalten bei wiederholter Belastung	94
9.6.1	Definitionen	94
9.6.2	Wichtige Einflußparameter	94
9.6.3	Darstellung des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen	95
9.6.4	Abschätzung des Ermüdungsverhaltens von Bauwerken	97
9.6.5	Bruchvorgang bei Ermüdungsbeanspruchung	98
9.7	Bruchverhalten bei mehrachsiger Beanspruchung	98
9.7.1	Der Mohrsche Spannungskreis	98
9.7.2	Mohrsche Spannungskreise für verschiedene Spannungszustände	99
9.7.3	Bruch- und Fließbedingungen (Vergleichsspannungshypothesen)	101
10	Verfestigung von Metallen	105
10.1	Grundprinzip	105
10.2	Kaltverformung	105

10.3	Legierungshärten	106
10.4	Ausscheidungshärten	106
10.5	Umwandlungshärten	108
10.5.1	Martensitische Zustände	108
10.5.2	Zwischenstufenzustände	110
10.6	Verfestigung von Stählen	111
10.6.1	Glühen	111
10.6.2	Härten	112
10.6.3	Vergüten	112
10.6.4	Legieren	113
11	Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen	115
11.1	Allgemeines	115
11.2	Elektrochemische Vorgänge	115
11.2.1	Warum korrodieren Metalle?	115
11.2.2	Korrosionsformen	116
11.2.3	Geschwindigkeit des Korrosionsablaufs	117
11.2.4	Korrosionstypen	118
11.3	Korrosionsschutz	120
11.3.1	Korrosionsfördernde Bedingungen	120
11.3.2	Konstruktive Maßnahmen	120
11.3.3	Passivierung	120
11.3.4	Werkstoffauswahl	121
11.3.5	Inhibitoren	121
11.3.6	Elektrochemische Verfahren	122
11.3.7	Fremdmetallüberzüge	122
11.3.8	Anstriche	122
11.3.9	Kunststoffüberzüge	122
12	Verbindungsmitel	123
12.1	Verbindungsarten	123
12.2	Chemisch-physikalische Grundlagen	123
12.2.1	Verbindungen ohne Verwendung eines Zusatzstoffs	123
12.2.2	Verbindungen bei Verwendung eines Zusatzwerkstoffs mit hohem Schmelzpunkt	123
12.2.3	Verbindungen bei Verwendung eines Zusatzwerkstoffs mit niedrigem Schmelzpunkt	123
12.2.4	Klebeverbindungen	123
12.2.5	Einflüsse auf die Festigkeit von Klebeverbindungen	126
12.3	Schweißverbindungen	127
12.3.1	Allgemeines	127
12.3.2	Technische Schweißverfahren (siehe DIN 1910)	127
12.3.3	Folgeerscheinungen des Schweißens	128
12.3.4	Die Schweißbarkeit von Stählen	128

1 Charakterisierung der wichtigsten Eigenschaften der Werkstoffe

1.1 Festigkeit

Die Festigkeit eines Werkstoffs ist die von ihm aufnehmbare maximale Spannung:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad [\sigma] = \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Festigkeit:

$$\beta = \frac{F_u}{A}, \quad [\beta] = \frac{N}{\text{mm}^2}$$

F Kraft, [F] = N

F_u größte aufnehmbare Kraft (u = ultimate), [F_u] = N

A Querschnittsfläche [A] = mm²

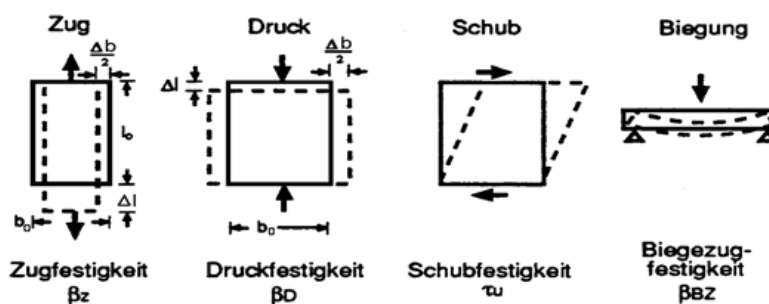


Bild 1. Arten der Festigkeit in Abhängigkeit von der Art der Beanspruchung

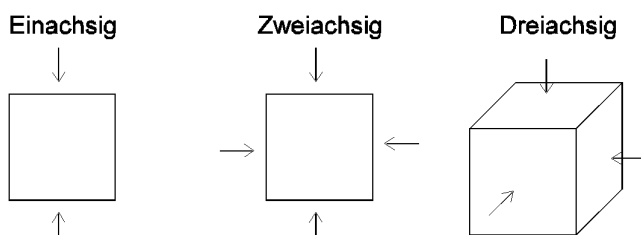


Bild 2. Festigkeit, abhängig vom Spannungszustand

Festigkeit, abhängig von der **Art der Lastaufbringung**:

- stetig steigende Last
- konstante Dauerlast
- wiederholte Beanspruchung

Wichtigste Einflussparameter auf die Festigkeit sind:

Zusammensetzung, Bindungsart, Struktur, Porosität, Temperatur des Werkstoffs.

1.2 Verformung

Dehnung:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Querdehnung:

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta b}{b_0}$$

Poissonsche Zahl (Querdehnrzahl):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon} \quad 0 \leq \nu \leq 0,5 \quad (\text{z.B. Beton: } \nu = 0,2; \text{ Stahl: } \nu = 0,3)$$

Δl Längenänderung in Lastrichtung
 l_0 Messlänge vor der Belastung
 Δb Längenänderung quer zur Lastrichtung
 b_0 Probenbreite

elastische Verformung: reversibel
 plastische Verformung: irreversibel
 viskose Verformung: irreversibel - zeitabhängig

1.3 Spannungs-Dehnungslinien

linear-elastisch

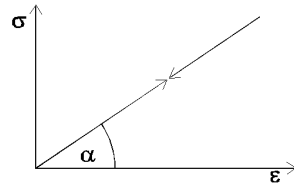


Bild 3. Linear-elastische Spannungs-Dehnungslinie

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Hookesches Gesetz}$$

$$E = \tan \alpha$$

nicht-linear-elastisch

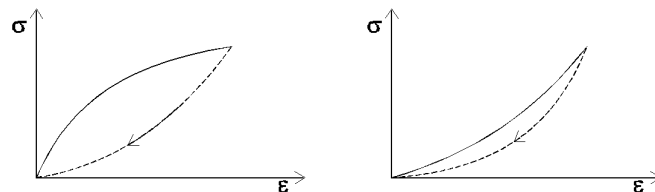


Bild 4. Nicht-linear-elastische Spannungs-Dehnungslinien

$$\sigma = E(\sigma) \cdot \varepsilon$$

elastisch-plastisch

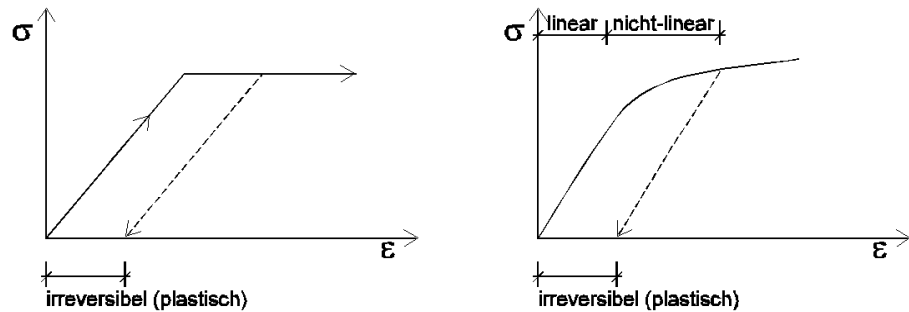


Bild 5. Elastisch-plastische Spannungs-Dehnungslinien

Elastizität ist die Eigenschaft eines Werkstoffs, nach Verformung infolge Belastung in seine Ausgangsform zurückzukehren. Die Verformungen sind reversibel.

Plastizität ist die Eigenschaft eines Werkstoffs, nach der Entlastung die Form beizubehalten, die ihm durch eine äußere Kraft aufgezwungen wurde. Die Verformungen sind bleibend - irreversibel.

Sprödigkeit: Ein Werkstoff wird als spröde bezeichnet, wenn bei einer Belastung der Bruch plötzlich eintritt und sich nicht durch große Verformungen angekündigt hat.

Zähigkeit (Duktilität): Ein Werkstoff ist zäh (duktil), wenn vor dem Bruch große plastische Verformungen auftreten.

Wichtigste Einflussparameter für das Festigkeits- und Verformungsverhalten:

- Zusammensetzung
- Bindungsart
- Struktur
- Porosität
- Temperatur

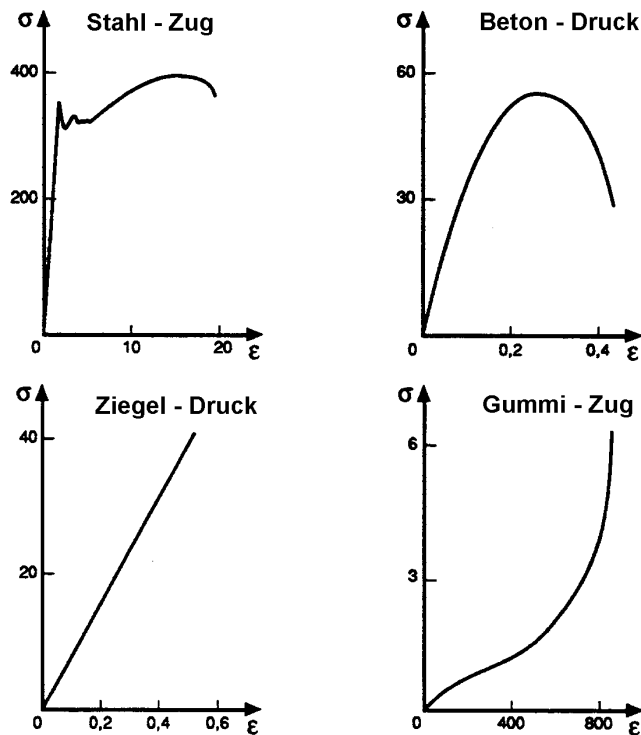


Bild 6. Spannungs-Dehnungs-Verhalten verschiedener Werkstoffe (σ in Nmm^{-2} , ϵ in %)

Tab. 1. Festigkeiten und E-Moduln einiger Werkstoffe

Werkstoff	β_d in N/mm^2	β_z in N/mm^2	E-Modul in N/mm^2
Stahl	200 bis 2000	200 bis 2000	$2,1 \cdot 10^5$
Beton	5 bis 100	1,0 bis 7,5	$(1 \text{ bis } 5) \cdot 10^4$
Ziegel	5 bis 100	0,5 bis 10,0	$(5 \text{ bis } 30) \cdot 10^3$
Aluminium	50 bis 250	50 bis 250	$7,2 \cdot 10^4$
Gips	5 bis 40	0,1 bis 4,0	$(1 \text{ bis } 10) \cdot 10^3$
Plexiglas	50 bis 150	40 bis 120	$(3 \text{ bis } 4) \cdot 10^3$

1.4 Der Zugversuch an Baustählen nach DIN EN 10002

Versuchsdurchführung an sogenannten Proportionalstäben:

- kurzer Proportionalstab, $\frac{l_0}{d_0} = 5$
- langer Proportionalstab, $\frac{l_0}{d_0} = 10$

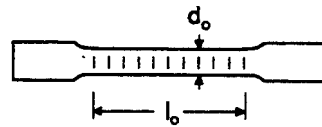
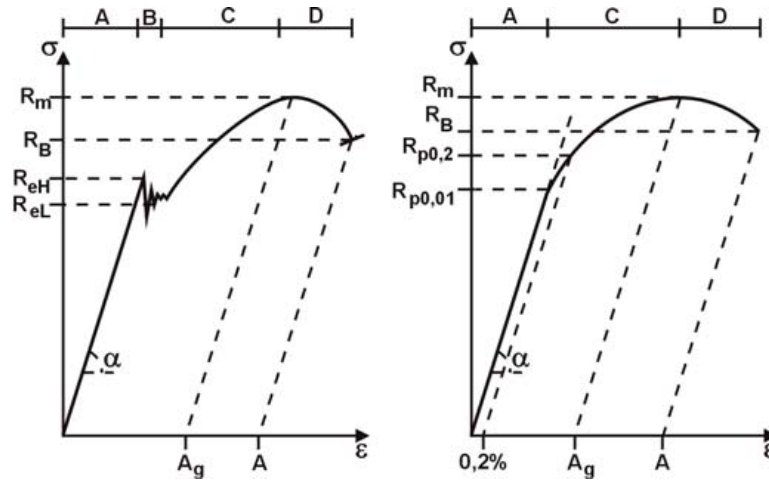


Bild 7. Proportionalstab



warmverformte, naturharte Stähle
ausgeprägte Streckgrenze

kaltverformte Stähle
keine ausgeprägte Streckgrenze

Bild 8. Warmverformter, naturharter bzw. kaltverformter Stahl

Elastische Verformung (A), Fließen (B), Verfestigung (C), Einschnürung (D)

Kennwerte des Spannungs-Dehnungs-Diagramms:

- R_m Zugfestigkeit - Spannung bei Höchstlast
- R_B technische Bruchspannung
- R_{eH} obere Streckgrenze
- R_{eL} untere Streckgrenze
- $R_{p0,01}$ technische Elastizitätsgrenze, Spannung bei der nach Entlastung eine bleibende Dehnung von 0,01% auftritt
- $R_{p0,2}$ 0,2-Dehngrenze entsprechend einer bleibenden Dehnung von 0,2 %
- A_g Gleichmaßdehnung, bleibende Dehnung außerhalb des Einschnürbereichs
- A Bruchdehnung

Brucheinschnürung:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100\%$$

- S_0 Anfangsquerschnitt
- S_u kleinster Probenquerschnitt nach dem Bruch

1.5 Wahre Spannung - Wahre Dehnung

Bei der technischen Spannung oder Dehnung werden Kraft und Längenänderung auf die Ausgangsfläche A_0 bzw. Ausgangslänge l_0 bezogen:

Wahre Spannung: $\sigma = \frac{F}{A_i}$

Wahre Dehnung: $\varepsilon_w = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l}$

Bestimmung von A_i aus der Annahme einer Volumenkonstanz der Probe:

$$A_0 \cdot l_0 = A_i \cdot l_i \quad \text{mit}$$

$$l_i = l_0 + \Delta l$$

Daraus folgt für A_i und σ_w :

$$A_i = A_0 \frac{l_0}{l_0 + \Delta l} = \frac{A_0}{1 + \varepsilon}$$

$$\sigma_w = \frac{F}{A_0} \cdot (1 + \varepsilon) = \sigma \cdot (1 + \varepsilon)$$

Interpretation der wahren Dehnung:

$$\varepsilon_w = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon)$$

1.6 Verformungsenergie und Arbeitsvermögen

Die **Verformungsenergie** ist die zur Verformung eines Werkstoffs aufzuwendende Energie. Das **Arbeitsvermögen** ist die maximal aufnehmbare Verformungsenergie, bezogen auf das verformte Volumen. Das spezifische Arbeitsvermögen entspricht der Fläche unter dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Das Arbeitsvermögen ist ein Maß für die zum Bruch eines Werkstoffs erforderliche Energie.

Für einen linear-elastischen Werkstoff gilt:

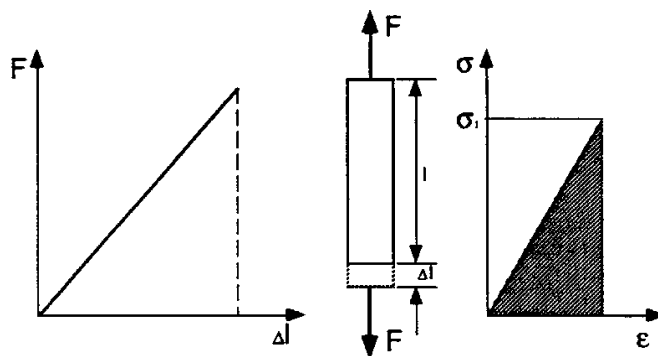


Bild 9. Linear-elastischer Werkstoff

Die in einem Zugversuch geleistete Arbeit ist:

$$W = \int_0^{\Delta l} F \cdot dl$$

Mit $\Delta l = \varepsilon \cdot l$ und $F = \sigma \cdot A$

$$W = W_s = A \cdot l \cdot \int_0^{\varepsilon} \sigma \cdot d\varepsilon$$

Bei linear-elastischem Werkstoffverhalten gilt

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$W_s = A \cdot l \cdot \int_0^{\sigma_1} \sigma \cdot \frac{1}{E} \cdot d\sigma$$

bzw.
$$W_s = V \cdot \left(\frac{\sigma_1^2}{2 \cdot E} \right)$$

Die Verformungsenergie pro Volumeneinheit ist dann:

$$w = \frac{\sigma_1^2}{2 \cdot E}$$

Für einen elastisch-plastischen Werkstoff gilt:

$$W_{el} = \frac{\sigma_s^2}{2 \cdot E}$$

und
$$W_{pl} = \left(\varepsilon_u - \frac{\sigma_s}{E} \right) \cdot \sigma_s$$

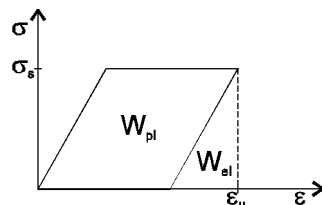
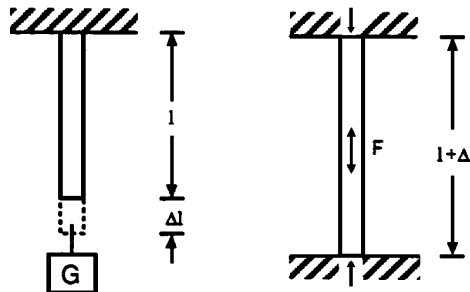


Bild 10. Elastisch-plastischer Werkstoff

1.7 Kriechen, Relaxation und Zeitstandverhalten



Kriechen : $G = \text{konst.}$

$\sigma = \text{konst.}$

$$\varepsilon(t) = \sigma / E$$

Relaxation : $l + \Delta l = \text{konst.}$

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon$$

Bild 11. Kriechen und Relaxation

- | | |
|-----------------------|--|
| Kriechen: | Zeitabhängige Verformung bei konstanter Spannung |
| Relaxation: | zeitabhängiger Spannungsabfall bei konstanter Länge |
| Kriechgrenze: | Spannung, unterhalb derer bei Dauerlast keine messbaren zeitabhängigen Verformungen eintreten |
| Zeitstandfestigkeit: | Maximale Spannung, die ein Werkstoff während eines festgelegten Zeitraums ohne Bruch ertragen kann |
| Dauerstandfestigkeit: | Maximale Spannung, die ein Werkstoff während eines unendlich langen Zeitraums ohne Bruch ertragen kann |

Die wichtigsten Parameter des Zeitstandverhaltens sind:

- Werkstoffstruktur
- Belastungsdauer
- Spannung
- Temperatur

Die Kriechigenschaften eines Werkstoffs werden beschrieben durch:

Kriechzahl: $\varphi = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{el}}$

Kriechmodul: $E_k = \frac{\sigma}{\varepsilon_{el} + \varepsilon_k} = \frac{E}{1 + \varphi}$

- ε_k Kriechdehnung
- ε_{el} Elastische Dehnung
- σ Spannung
- E Elastizitätsmodul

1.8 Ermüdung

Wiederholte Be- und Entlastungen eines Werkstoffs können zu einer allmählichen Zerstörung führen. Man bezeichnet den Vorgang als Ermüdung.

Die wichtigsten Parameter sind:

- mittlere Spannung σ_m
- Spannungsamplitude σ_a

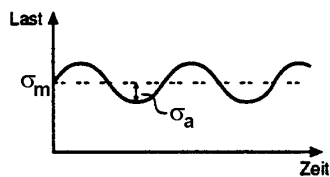


Bild 12. Ermüdung

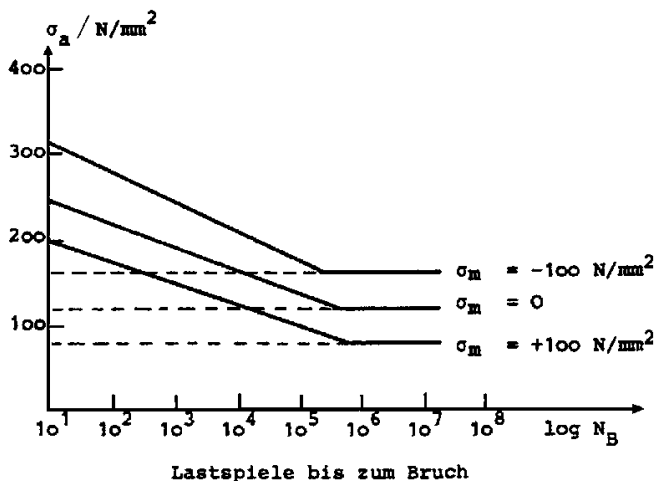


Bild 13. Ermüdungsverhalten eines S 235 J0 (unberuhigt vergossener Stahl mit einer Zugfestigkeit von etwa 370 N/mm²)

1.9 Oberflächenhärte

Härte ist der Widerstand eines Werkstoffs gegen das Eindringen eines anderen härteren Werkstoffs.

Die Härte kann mit verschiedenen Verfahren geprüft werden und steht oft im Zusammenhang mit der Festigkeit eines Materials.

Beispiel: Brinellhärte

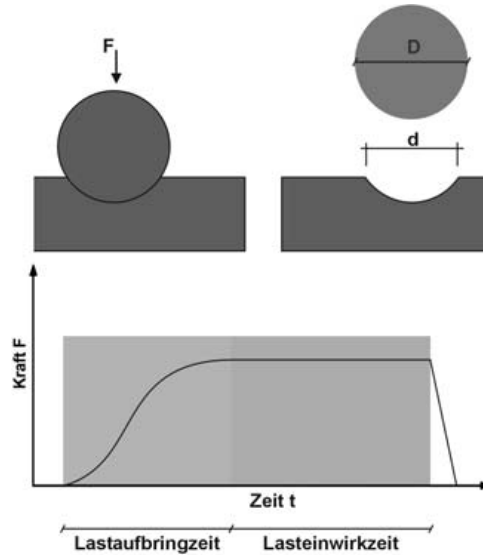


Bild 14. Versuchsaufbau für die Bestimmung der Brinellhärte

$$HB = \frac{F}{O} = \frac{0,102 \cdot F}{0,5 \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

- HB Brinellhärte
 F Prüfkraft in N
 O Oberfläche des Eindrucks in mm^2
 D Kugeldurchmesser in mm
 d Durchmesser des Eindrucks in der Werkstoffoberfläche nach der Entlastung in mm

Der Faktor 0,102 ergibt sich aus der Umrechnung in SI-Einheiten ($1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N}$).

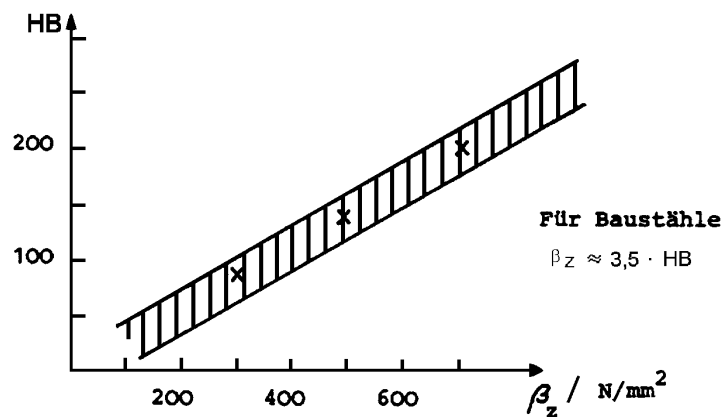


Bild 15. Zusammenhang zwischen Brinellhärte und Zugfestigkeit bei Baustählen

1.10 Kerbschlagzähigkeit

Die Kerbschlagzähigkeit ist ein Maß für den Widerstand eines Werkstoffs gegen Schlagbeanspruchung. Die Kerbschlagzähigkeit wird im Kerbschlagbiegeversuch ermittelt.

Eine gekerbte Probe wird durch einen Fallhammer zerschlagen. Die vom Hammer geleistete Arbeit bezogen auf die Restfläche an der Kerbe ist als Kerbschlagzähigkeit definiert.

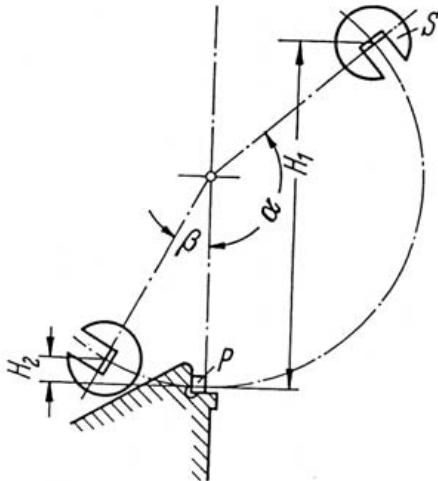


Bild 16. Kerbschlagversuch – Versuchsaufbau

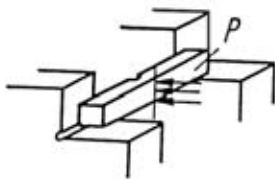


Bild 17. Kerbschlagversuch - Probengeometrie

Die Kerbschlagzähigkeit ist:

$$a_k = \frac{\text{Kerbschlagarbeit } A}{\text{Prüfquerschnitt } S} = \frac{G \cdot (h_1 - h_2)}{d_k \cdot b}, \quad [a_k] = \frac{J}{\text{cm}^2}$$

G	Gewichtskraft des Schlaghammers, [G] = N
h_1	Fallhöhe des Schlaghammers, [h_1] = m
h_2	Steighöhe des Schlaghammers, [h_2] = m
d_k	Probendicke im Kerbgrund, [d_k] = cm
b	Probenbreite, [b] = cm

Die wichtigsten Parameter der Kerbschlagzähigkeit sind die Werkstoffstruktur und die Temperatur.

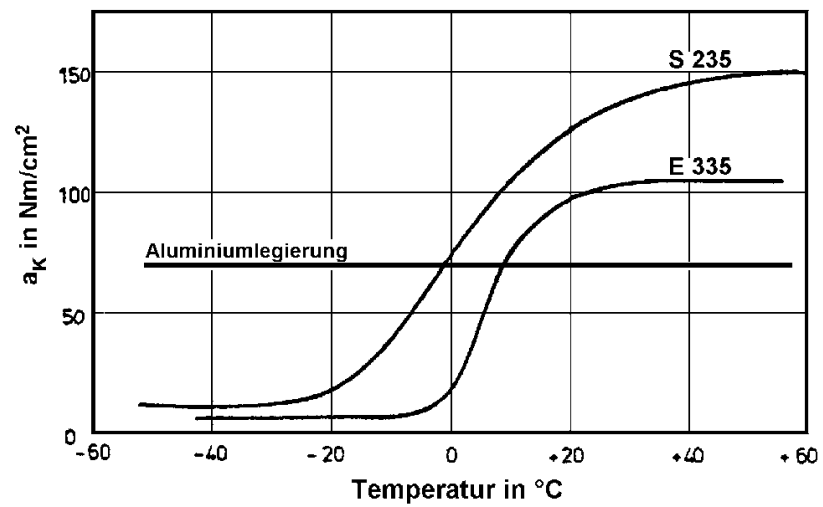


Bild 18. Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

2 Baupraktische Eigenschaften von Werkstoffen

2.1 Dichte

Die Dichte eines Werkstoffs beeinflusst nicht nur sein Gewicht, sondern ebenso seine mechanischen und andere seiner physikalischen Eigenschaften.

Erwünscht sind im allgemeinen eine hohe Festigkeit bei niedriger Dichte. Ein Gegenbeispiel ist Schwerbeton, bei dem hohe Festigkeit und hohe Dichte gefordert werden.

Wichtigste Einflussparameter:

- Chemische Zusammensetzung
- Atom- bzw. Molekulargewicht
- Porosität

2.2 Volumenstabilität

Schwinden und Quellen

Volumenabnahme (Schwinden) bzw. -zunahme (Quellen) eines Werkstoffs bei konstanter Temperatur als Folge von Wasserverlust bzw. -aufnahme ohne Einwirkung äußerer Spannungen.

Besondere Berücksichtigung findet das Schwinden beim Beton.

Wichtigste Einflussparameter:

- Zusammensetzung
- Porosität und Porenstruktur
- Umweltbedingungen

Schrumpfen und Treiben

Volumenabnahme (Schrumpfen) bzw. -zunahme (Treiben) eines Werkstoffs bei konstanter Temperatur ohne Einwirkung äußerer Spannungen als Folge chemischer Reaktionen.

Besonders ausgeprägt ist das Schrumpfen beim Beton und bei der Aushärtungsreaktion von Kunststoffen.

2.3 Wärmedehnung

Ein Werkstoff dehnt sich bei Temperaturerhöhung aus. Diese Ausdehnung eines festen Stoffs wird durch den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T beschrieben.

Es gilt: $l(T) = l_0 \cdot (1 + \alpha_T \cdot \Delta T)$

$$\Delta T = T - T_0$$

l_0 Länge bei der Temperatur $T = T_0$

$l(T)$ Länge bei der Temperatur T

Tab. 2. Wärmeausdehnungskoeffizienten einiger Werkstoffe

Werkstoff	Wärmeausdehnungskoeffizient α_T in $10^{-6}K^{-1}$	
Stahl	10	bis 16
Beton	6	bis 12
Glas	3	bis 10
Aluminium	23	bis 24

Wichtigste Einflussparameter:

- Zusammensetzung
- Werkstoffstruktur (Bindungsenergie)

Um die Wärmedehnung von Gasen und Flüssigkeiten zu beschreiben, wird analog zum linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten ein Volumenausdehnungskoeffizient γ_T benutzt:

$$V(T) = V_0 \cdot (1 + \gamma_T \cdot \Delta T)$$

Es gilt: $\gamma_T = 3 \cdot \alpha_T$

2.4 Transportphänomene

Wärmeleitung, Diffusion und Permeation lassen sich als Transportphänomene zusammenfassen. Bei allen drei Phänomenen löst die räumliche Inhomogenität einer Größe den Transport einer anderen Größe aus.

Bei der Wärmeleitung führt ein Temperaturgefälle zum Strömen von Wärmeenergie. Bei der Diffusion erzeugt ein Konzentrationsgefälle einen Massenstrom, während bei der Permeation ein Druckgefälle einen Volumenstrom erzeugt.

Die drei Transportphänomene Wärmeleitung, Diffusion und Permeation lassen sich mathematisch quantitativ beschreiben.

Der Aufbau der Gleichung ist in allen Fällen derselbe:

$$\vec{j} = -C \cdot \vec{\nabla} \cdot \varphi$$

\vec{j} Stromdichte, ein Vektor (gerichtete Größe)
 C Leitfähigkeit, als Maß einem speziellen Transportphänomen zugeordnet (Konstante)

$\vec{\nabla}$ Nabla-Operator (Rechenvorschrift zur Bildung der ersten Ableitung in allen drei Raumrichtungen,

$$\vec{\nabla} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix}$$

bzw. Gradientenbildung, wenn Nabla auf skalare Größen angewandt wird. Das trifft bei den genannten Transportphänomenen zu.)

φ räumlich veränderliche, physikalische, skalare Größe, z.B. Temperaturverteilung $T = T(x, y, z)$

Tab. 3. Bedeutung mathematischer Größen für Wärmeleitung, Diffusion und Permeation

Größe	Wärmeleitung	Diffusion	Permeation
\vec{j}	Temperaturstromdichte \vec{j}_T	Teilchenstromdichte \vec{j}_D	Volumenstromdichte \vec{j}_V
φ	Temperatur T	Konzentration c	Druck p
C	Temperaturleitfähigkeit $\frac{\lambda}{c \cdot \rho}$	Diffusionskoeffizient D	Permeationskoeffizient / Viskosität $\frac{K}{\eta}$

Achtung! Es gibt nicht genügend verschiedene Formelzeichen. Gleiche Zeichen haben bei der Beschreibung verschiedener Phänomene unterschiedliche Bedeutung (z.B. c: Wärmekapazität bei der Wärmeleitung, bzw. c: Konzentration bei der Diffusion).

2.4.1 Diffusion

Alle Teilchen sind bestrebt, sich gleichmäßig im Raum zu verteilen (Entropie). Sofern Konzentrationsunterschiede bestehen, lösen diese einen Teil

chenstrom aus, der die Unterschiede auszugleichen versucht. Dieser Prozess wird als **Diffusion** bezeichnet.

Vergleiche hier die für Bauwerke wichtige **Wasserdampfdiffusion durch eine Außenwand**.

Die Diffusionsgleichung lautet:

$$\vec{j}_D = -D \cdot \vec{\nabla} \cdot c$$

Existiert ein Konzentrationsgefälle beispielsweise ausschließlich senkrecht zur y-z-Ebene, so vereinfacht sich die allgemeine Diffusionsgleichung zu:

$$\vec{j}_D = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

Die Richtung der x-Achse fällt mit der Richtung des Konzentrationsgefälles zusammen.

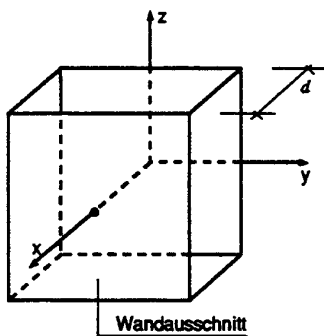


Bild 19. Wandausschnitt mit dreidimensionalem Koordinatensystem

Bleiben die Konzentrationen (c_1 und c_2 im folgenden Bild) konstant, so stellt sich nach einer gewissen Zeit über den Querschnitt ein stationärer Zustand ein. Es gilt dann:

$$j_D = -D \cdot \frac{c_2 - c_1}{d}$$

1. Ficksches Gesetz

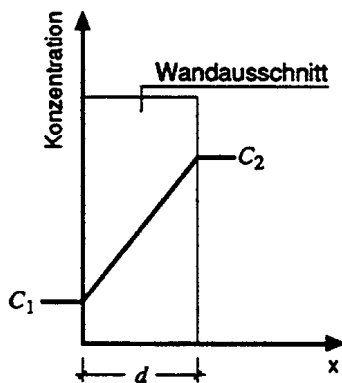


Bild 20. Eindimensionaler Konzentrationsverlauf in einer Wand

j_D Diffusionsstromdichte:
Diffusionsstrom, der z.B. durch die Anzahl n der Teilchen bzw. durch die Gesamtmasse (Anzahl n -Teilchenmasse m_t) der Teilchen, die pro Zeiteinheit durch eine Fläche A hindurchdiffundieren, angegeben werden kann:

$$j_{Dn} = \frac{1}{A} \cdot \frac{n}{t}, [j_{Dn}] = \frac{1}{m^2 \cdot s} \quad \text{oder}$$

$$j_{Dm} = \frac{1}{A} \cdot \frac{n \cdot m_t}{t}, [j_{Dm}] = \frac{\text{kg}}{m^2 \cdot s}$$

D Diffusionskoeffizient:
Materialeigenschaft, Maß für die Beweglichkeit von diffundierenden Teilchen in einem Stoff (Leitfähigkeit).
 $[D] = m^2/s$

$c_2 - c_1$ Konzentrationsunterschied:
Die Konzentration kann z.B. durch die Anzahl n bzw. durch die Gesamtmasse (Anzahl n -Teilchenmasse m_t) der diffundierenden Teilchen pro Volumen des Stoffes, durch den sie hindurchdiffundieren, angegeben werden:

$$c_n = \frac{n}{V}, [c_n] = \frac{1}{m^3} \quad \text{oder}$$

$$c_m = \frac{n \cdot m_t}{V}, [c_m] = \frac{\text{kg}}{m^3}$$

Eine weitere gebräuchliche Größe zur Beschreibung von Diffusionsvorgängen ist die **Diffusionswiderstandszahl μ** :
Sie gibt an, um wie viel der Diffusionsdurchlasswiderstand des Baustoffs größer ist, als der einer gleichdicken ruhenden Luftschicht gleicher Temperatur.

$$\mu = \frac{j_{\text{Luft}}}{j_{\text{Stoff}}}$$

Da $(c_2 - c_1) = \text{const.}$ und $d = \text{const.}$

$$\mu = \frac{D_{\text{Luft}}}{D_{\text{Stoff}}}$$

Wichtigste Einflussparameter für μ sind:

- Zusammensetzung
- Porosität
- Temperatur
- Konzentrationsgefälle

Die Größenordnung einiger Zahlenwerte für μ (für Wasserdampfdiffusion) sind in der folgenden Tabelle angegeben:

Tab. 4. Diffusionswiderstandszahl μ einiger Materialien für Wasserdampfdiffusion

Werkstoff	Diffusionswiderstandszahl μ
Kalkzementmörtel (Außenputz)	25
Normalbeton	100
Bituminöse Dichtungsbahn	2000
Polyethylen	100000
Stahl	∞

2.4.2 Permeation

Existiert ein Druckgefälle zwischen verschiedenen Gebieten, kommt es zu einem Teilchentransport, der dieses Druckgefälle auszugleichen versucht. Der Prozess wird als Permeation bezeichnet.

Ein Beispiel ist das Eindringen von drückendem Grundwasser in eine Betonwand.

Die allgemeine Permeationsgleichung lautet:

$$\vec{j}_V = -\frac{K}{\eta} \cdot \vec{\nabla} \cdot p$$

Die Permeationsgleichung vereinfacht sich im eindimensionalen stationären Fall zu:

$$j_V = -\frac{K}{\eta} \cdot \frac{p_2 - p_1}{d}$$

- \vec{j}_V Volumenstromdichte, $[\vec{j}_V] = \frac{m}{s}$
- K Permeationskoeffizient, $[K] = m^2$
- η Viskosität, $[\eta] = \frac{N \cdot s}{m^2}$
- p Druck, $[p] = \frac{N}{m^2}$

Wichtigste Parameter:

- Zusammensetzung
- Porosität
- Temperatur

2.4.3 Wärmeleitung

Ein Temperaturgefälle führt in einer Materie zu einem Wärmestrom, der den Temperaturunterschied ausgleicht.

Im eindimensionalen stationären Fall nimmt die Wärmeleitungsgleichung folgende Form an:

$$j_T = -\frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{T_2 - T_1}{d}, \quad j_T = \frac{j_w}{\rho \cdot c},$$

oder
$$j_w = -\lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{d}, \quad j_w = \frac{Q}{A \cdot t}$$

- $T_2 - T_1$ Temperaturdifferenz, $[T_2 - T_1] = K$
- λ Wärmeleitfähigkeit, $[\lambda] = \frac{W}{m \cdot K}$
- $\frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ Temperaturleitfähigkeit, $\left[\frac{\lambda}{\rho \cdot c} \right] = \frac{m^2}{s}$
- c spez. Wärmekapazität, $[c] = \frac{W \cdot s}{kg \cdot K}$
- j_T Temperaturstromdichte, $[j_T] = \frac{K \cdot m}{s}$
- j_w Wärmestromdichte, $[j_w] = \frac{W}{m^2}$
- Q Wärmemenge, $[Q] = J = W \cdot s$

Die Wärmeleitfähigkeit ist umgekehrt proportional zum Wärmedämmvermögen eines Werkstoffs. Eine geringe Wärmeleitfähigkeit bedeutet eine große Wärmedämmung.

Tab. 5. Wärmeleitfähigkeit λ einiger Werkstoffe

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit λ in $\frac{W}{m \cdot K}$
Luft	0,025
Polystyrol-Hartschaum	0,04
Holz	0,15
Bitumen	0,17
Wasser	0,59
Ziegelmauerwerk	0,75
Glas	0,8
Normalbeton	2,1
Eis	2,2
Stahl	60
Aluminium	200
Kupfer	380

Bei der Wärmeleitung wird die Wärme durch die freien Elektronen (Metalle), Gitterschwingungen (Kristalle) und Molekülstöße (amorphe Festkörper, Flüssigkeiten, Gase) transportiert.

Wie aus der Tabelle für die Wärmeleitfähigkeit λ zu sehen ist, transportieren freie Elektronen die Wärme besonders gut, d.h., Metalle haben eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Es folgen kristalline Festkörper. Bei amorphen Festkörpern entscheiden der Grad der Vernetzung, die Dichte und die Festigkeit über die Höhe der Wärmeleitfähigkeit. Flüssigkeiten und insbesondere Gase haben eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit, weil bei ihnen die Wärme aufgrund fehlender weitreichender Ordnung nur durch zufällige Molekülstöße übertragen wird.

Es gibt drei Arten der Wärmeübertragung:

- Leitung (Konduktion)
- Materietransport (Konvektion)
- Strahlung (Radiation)

Um eine gute Wärmedämmung zu erreichen, müssen möglichst alle drei Wärmetransportmechanismen unterbunden werden.

Zur Vermeidung von Energieverlusten durch Konvektionsströmungen muss eine Belüftung, soweit andere Aspekte (z.B. Anreicherung von Tauwasser) dies zulassen, vermieden werden. In Dämmschichten müssen Luftströmungen verhindert werden.

Durch die Wahl von Dämmstoffen mit möglichst geringer Leitfähigkeit und möglichst großer Dicke werden Wärmeleitungsverluste gering gehalten.

Um Wärmeabstrahlung zu vermeiden, werden Stoffe verwendet, die die elektromagnetischen Strahlen im infraroten Bereich reflektieren (z.B. Aluminiumfolie).

2.5 Schall

Schall ist eine elastische Welle in Form räumlich und zeitlich periodischen Dichteschwankung in der Materie.

In Festkörpern breitet sich der Schall sowohl longitudinal (Schwingung der Teilchen in Ausbreitungsrichtung der Schallwelle) als auch transversal (Schwingung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung) aus. In Gasen und Flüssigkeiten kann der Schall sich nur longitudinal ausbreiten.

Schallabsorption

Wenn sich der Schall in einem homogenen Medium ausbreitet, nimmt seine Intensität in Wegrichtung ab. Die Abnahme der Intensität ist proportional zur Intensität I selbst:

$$\frac{dI}{dx} \sim I$$

also ist $\frac{dI}{dx} = -\beta \cdot I$.

Durch Integration folgt:

$$I = I_0 \cdot e^{-\beta x}, \quad I_0 = I_{(x=0)}$$

β wird als Absorptionskoeffizient bezeichnet und ist vom Material und von der Wellenlänge des Schalls abhängig.

Trifft eine Schallwelle auf die Grenzfläche zweier bezüglich ihres Wellenwiderstands $\rho \cdot c$ (ρ : Dichte, c : Schallgeschwindigkeit) unterschiedlicher Materialien, wird die Intensität teilweise reflektiert. Sind die Wellenwiderstände $\rho \cdot c$ etwa gleich groß, wird die Welle nur in geringem Maße reflektiert. Ist der Unterschied der Wellenwiderstände hingegen groß, wird ein großer Teil der Intensität reflektiert und zwar in beide Richtungen.

Schallschluckung heißt die Vernichtung von Schall durch absorbierende Stoffe. Als Schallschluckgrad wird beim Auftreffen von Schall auf eine Wand das Verhältnis von nicht reflektiertem zu auftreffendem Schall bezeichnet. Es werden poröse Materialien verwendet, weil es auf ihren Oberflächen zu mehrfachen Reflektionen kommt. Die Schallwelle wird eingefangen. Der Schallschluckgrad ist stark frequenzabhängig. So ist z.B. die Schallabsorption poröser Stoffe bei niedrigen Frequenzen gering, nimmt dann in einem bestimmten Frequenzbereich stark zu und erreicht schließlich bei hohen Frequenzen den optimalen Schallschluckgrad 1.

3 Das Verhalten der Werkstoffe bei chemischen und physikalischen Einwirkungen

3.1 Korrosion

Zerstörung eines Werkstoffs durch einen äußeren, nichtmechanischen Angriff, z.B. chemisch, elektro-chemisch, physikalisch (z.B. Frost), biologisch.

Beispiele:

bei Metallen: Elektrolytische Korrosion, Spannungsrisskorrosion
bei Beton: Zerstörung durch treibenden (Frost, Sulfate) und lösenden Angriff (Säuren)

bei Kunststoffen: Veränderung von Eigenschaften durch Alterung z.B. Einwirkung ultravioletter Strahlung

bei Holz: Zerstörung durch Bakterien, Pilze

3.2 Feuerwiderstand

Der Feuerwiderstand eines Werkstoffs hängt ab von seinem Brandverhalten, seiner Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Wärmedehnung und Festigkeit. Einteilung der Werkstoffe in Klassen der Brenn- bzw. Entflammbarkeit:

- A 1 Nicht brennbar
z.B. Mörtel, Beton, Glas, Stahl
- A 2 Nicht brennbar, aber teilweise Zerstörung durch Feuereinwirkung, Feuer wird nicht weitergeleitet
z.B. Gipskartonplatten
- B 1 schwer entflammbar
z.B. Holzwolle
- B 2 normal entflammbar
z.B. Holz, Holzwerkstoffe, $d > 2$ mm
- B 3 leicht entflammbar
z.B. Holz, Holzwerkstoffe, $d \leq 2$ mm

Feuerfeste Stoffe : Schmelzpunkt $T > 1520$ °C

Hochfeuerfeste Stoffe : Schmelzpunkt $T > 1830$ °C

Einteilung der Bauteile in Feuerwiderstandsklassen F 30 bis F 180 (siehe Vorlesungen „Konstruktiver Ingenieurbau“).

4 Abgeleitete Werkstoffeigenschaften

4.1 Oberfläche, Aussehen und Formbarkeit

Oberfläche und Aussehen eines Werkstoffs können aus architektonischen oder technischen Gründen von Wichtigkeit sein, z.B. die Rauheit bei Straßenbelägen. Von der Verformbarkeit eines Baustoffs hängen unter anderem die Gestaltungsmöglichkeiten für ein Bauwerk ab.

4.2 Werkstoffauswahl, Tragvermögen, Dauerhaftigkeit, Kosten

Bei der Werkstoffauswahl ist neben anderen Kriterien auch das Verhältnis von Kosten zu Tragvermögen und Dauerhaftigkeit zu berücksichtigen. Der für ein Bauwerk günstigste Werkstoff kann in folgenden vier Schritten ausgewählt werden:

1. Definition von Konstruktionsart und Umweltbedingungen
2. Definition der sich aus 1. ergebenden Anforderungen an den Werkstoff
3. Vergleich der Anforderungen mit den tatsächlichen Eigenschaften verschiedener Werkstoffe
4. Auswahl desjenigen Werkstoffs, der zur optimalen Lösung führt

Zu Punkt 1:

Einige der hier zu berücksichtigenden Gesichtspunkte sind:

- Nutzung des Bauwerks
- Statisches System, das auch werkstoffabhängig gewählt werden kann
- Wahl der Abmessungen
- Art der zu erwartenden Belastung (ruhend, einmalig oder dynamisch, wiederholend)
- Geforderte Lebensdauer und akzeptiertes Versagensrisiko
- Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, aggressive Medien)
- Geographische Lage
- Verkehrslage und Zugänglichkeit
- Wirtschaftlicher und technologischer Entwicklungsstand des Gebiets, in dem das Bauwerk zu erstellen ist

Zu Punkt 2:

Die Anforderungen an den Werkstoff sind zu definieren in Bezug auf:

- Festigkeit bei der gegebenen Beanspruchungsart
- Steifigkeit (Elastizitätsmodul, Kriechen)
- Duktilität
- Gewicht
- Bearbeitbarkeit und Formbarkeit
- Alterung
- Widerstand gegen korrodierende Medien bei gegebenen Umweltbedingungen
- Formbeständigkeit
- Wärmeleit- und Wärmedämmeigenschaften
- Schalldämmung
- Dichtigkeit
- Vorhandene und zusätzliche Rohstoffreserven
- Besondere Anforderungen, wie Oberflächenbeschaffenheit, Aussehen, Farbe

Zu den Punkten 3 und 4:

Diese Schritte stellen einen Optimierungsprozess dar und führen zu einem Kompromiss.

Eine optimale Lösung kann nur mit Hilfe einer Systemanalyse gefunden werden, die gleichzeitig Anforderungen, geforderte Lebensdauer und Kosten für die Erstellung und Erhaltung berücksichtigt.

5 Die Makrostruktur der Werkstoffe

Bedeutung: Die Makrostruktur, auch Gefüge genannt, vieler Werkstoffe kann durch Wahl verschiedener Komponenten oder Herstellungsverfahren beeinflusst werden. Eine gezielte Veränderung der Grobstruktur ist daher eine der wirksamsten Methoden, Werkstoffe zu optimieren.

5.1 Homogenität und Isotropie

Ein Werkstoff, der in seinem Aufbau gleichmäßig ist, wird als homogen bezeichnet.

Ein Werkstoff, der aus verschiedenen, in Struktur und Zusammensetzung unterschiedlichen Bereichen besteht, wird als heterogen bezeichnet.

Ein Werkstoff, der in verschiedenen Richtungen die gleichen Eigenschaften besitzt, ist isotrop.

Ein Werkstoff mit unterschiedlichen Eigenschaften in verschiedenen Richtungen ist anisotrop.

5.2 Phasen und Körner

Die meisten Werkstoffe bestehen aus verschiedenen Komponenten.

Sind die Komponenten nicht völlig ineinander löslich, so entstehen innerhalb des Werkstoffs Bereiche mit unterschiedlicher Zusammensetzung und/oder Mikrostruktur. Diese Bereiche werden als Phasen bezeichnet.

Eine Phase ist ein räumlich abgegrenztes Gebiet eines Stoffes mit gleichen physikalischen Eigenschaften. Der Begriff unterscheidet die Aggregatzustände der Materie (fest, flüssig, gasförmig) sowie die verschiedenen Modifikationen eines Stoffes (z.B. α - oder γ -Eisen) bei Umwandlungen im festen Zustand.

Am Übergang von einer zu einer anderen Phase befindet sich eine Phasengrenze. Dies sind Grenzen zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Kristallstruktur, sowie die Oberfläche eines Werkstoffs (z.B. Festkörper/Gas).

Innerhalb einer Phase können die Kristallgitter in verschiedenen Bereichen verschieden orientiert sein. Bereiche gleicher Kristallorientierung werden als Körner definiert. Den Übergang zwischen benachbarten Körnern nennt man Korngrenze.

Beispiele mehrphasiger Werkstoffe:

- Beton
- Ziegel
- Natursteine
- Holz
- viele Metallegierungen

Solche Systeme besitzen meist eine kontinuierliche Phase (Matrix), in die eine nicht kontinuierliche Phase eingelagert ist (Füller).

5.3 Porosität

Porosität ist der Gehalt eines Werkstoffs an Hohlräumen.

Unterschieden wird zwischen offenen und geschlossenen Poren:

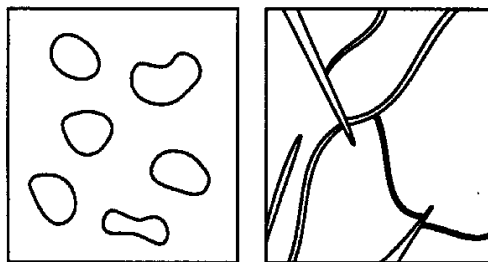


Bild 21. Geschlossene und offene Poren

Porosität:

$$p = \frac{\text{Porenvolumen}}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{V_p}{V}$$

Die Porosität lässt sich über die Roh - ρ_R und Reindichte ρ ermitteln:

$$p = \frac{\rho - \rho_R}{\rho}$$

Die Porosität eines Werkstoffs beeinflusst u.a. die folgenden Eigenschaften:

- Rohdichte
- Festigkeit
- E-Modul
- Diffusionswiderstand
- Wärmeleitfähigkeit
- Volumenstabilität
- Wärmedehnung

5.4 Klassifizierung und Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit der Makrostruktur

Einphasige Stoffe:

- Elemente z.B. Fe, Cu, Na u.s.w.
- einige Metalllegierungen z.B. Cu-Ni, Fe-Ni, Ti-Zr
- die meisten Kunststoffe z.B. PVC

Mehrphasige Stoffe:

- die meisten Metalllegierungen z.B. Stahl, Gusseisen.
- Verbundwerkstoffe z.B. Stahlbeton, Mauerwerk, faserbewehrte Kunststoffe, Beton, Asphalt, Ziegel, Holz.

Werkstoffe mit natürlicher Porosität:

- Gesteine z.B. Tuff, Bims
- Holz z.B. Eiche, Fichte

Werkstoffe mit künstlicher Porosität:

- Künstliche Steine z.B. Porenbeton, Leichtziegel
- geschäumte Kunststoffe z.B. PUR

5.5 Plastische Verformungen

5.5.1 Definitionen

Plastische Verformung: bleibende, spannungsabhängige Verformung

Viskose Verformung und Fließen: bleibende, spannungs- und zeitabhängige Verformung

Kriechen: spannungs- und zeitabhängige Verformung, die teilweise reversibel sein kann

5.5.2 Bedeutung der plastischen Verformbarkeit eines Werkstoffs

Plastische Verformbarkeit eines Werkstoffs bei hohen Spannungen ist in der Baupraxis oftmals eine erwünschte Werkstoffeigenschaft:

1. Plastische Verformbarkeit ist Voraussetzung für die Formgebung eines Werkstücks durch Ziehen, Strecken, Walzen etc.
2. Plastisch verformbare Werkstoffe kündigen einen bevorstehenden Bruch bei Überbelastung durch große Verformungen, z.B. Durchbiegungen, an.
3. Die aufnehmbare Verformungsenergie eines Querschnitts aus einem plastisch verformbaren Werkstoff ist größer als die eines Querschnitts mit linear-elastischem Werkstoffverhalten bei gleicher Spannung.

4. In statisch unbestimmten Tragsystemen treten bei Verwendung plastisch verformbarer Werkstoffe Momentenumlagerungen (Ausbildung von Fließgelenken) auf, die zu einem Abbau von Spannungsspitzen und zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit des Gesamtsystems führen.
5. Plastisch verformbare Werkstoffe sind weniger kerbempfindlich als spröde Werkstoffe, weil die plastische Verformbarkeit zu einem Abbau örtlicher Spannungsspitzen führt.

Beachte: Ein Werkstoff kann sich unter bestimmten Bedingungen plastisch verhalten, bei geänderten Bedingungen jedoch spröde. Die plastische Verformbarkeit eines Werkstoffs kann verringert werden durch z.B.:

- mehrachsige Beanspruchung
- hohe Dehngeschwindigkeit
- tiefe Temperaturen

5.6 Mechanismen der plastischen Verformung von Metallen

1. Verschiebung bzw. Gleitungen entlang bestimmter charakteristischer Kristallebenen, die vorzugsweise dichtest gepackt sind

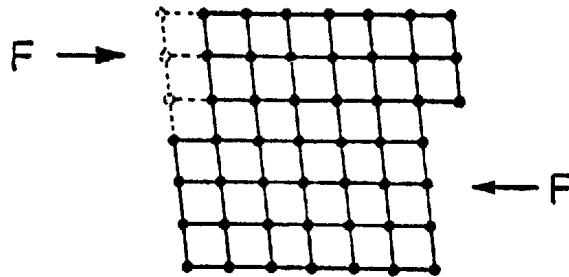


Bild 22. Verschiebung entlang Kristallebenen

2. Zwillingsbildung, d.h. Umklappen eines Teils eines Kristallgitters um eine Spiegelebene

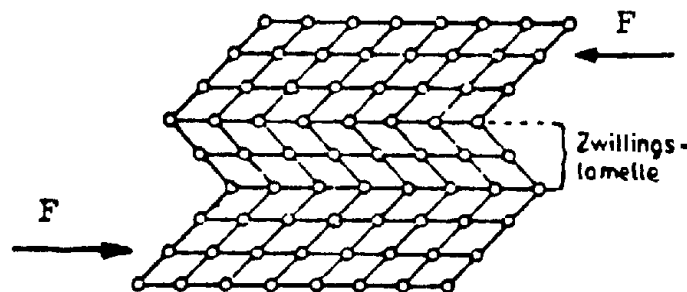


Bild 23. Zwillingsbildung

3. Korngrenzenverschiebungen

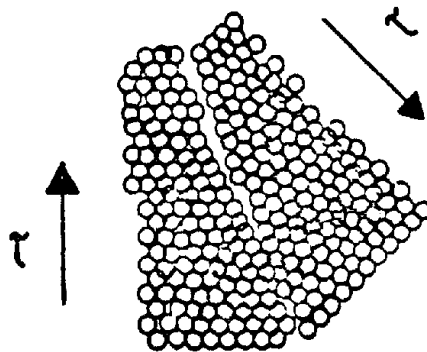
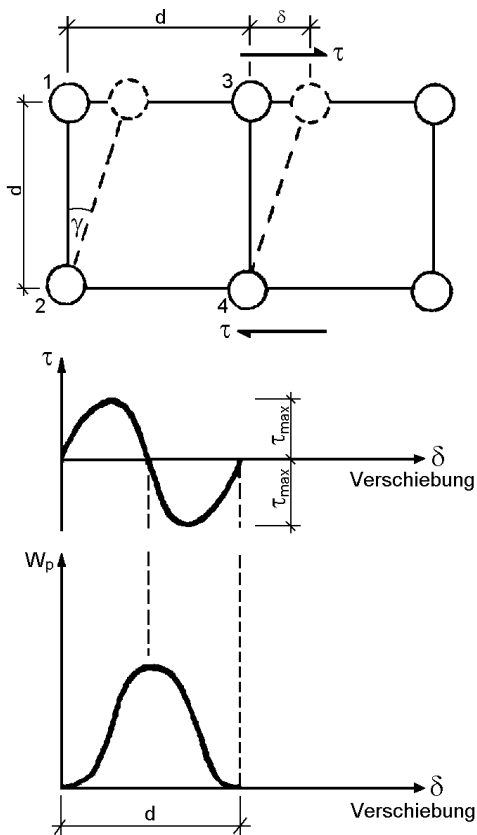


Bild 24. Korngrenzenverschiebung

5.7 Theoretische Schubfestigkeit

Fragestellung: Welche Kräfte sind erforderlich, um zwei Atomebenen gegeneinander zu verschieben



Eine Reihe von Atomen wird durch eine Schubspannung τ gegenüber einer anderen Reihe von Atomen nach rechts verschoben. Die zur Verschiebung erforderliche Schubspannung τ steigt zunächst mit wachsender Verschiebung δ .

Liegt das Atom 1 genau zwischen den Atomen 2 und 4, stellt sich ein labiler Zustand ein. Die Schubspannung zur Aufrechterhaltung dieser Lage ist daher 0, die potentielle Energie W_p erreicht ein Maximum.

Bild 25. Theoretische Schubfestigkeit

Die Größe der höchsten zum Verschieben erforderlichen Schubspannung τ_{max} kann wie folgt bestimmt werden:

$$\tau = \tau_{max} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \delta}{d}\right)$$

$$\tau = G \cdot \gamma$$

G: Schubmodul, $[G] = \text{N/mm}^2$

γ : Verzerrung, $[\gamma] = 1$

Für kleine Winkel gilt:

$$\gamma \approx \tan \gamma \approx \frac{\delta}{d} \quad \text{und} \quad \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \delta}{d}\right) \approx \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \delta}{d}\right) \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta}{d}$$

$$G \cdot \gamma \approx G \cdot \frac{\delta}{d} = \tau_{max} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \delta}{d}$$

$$\tau_{max} \approx \frac{G}{2 \cdot \pi}$$

mit $\nu = 0,25$ folgt: $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \approx \frac{E}{2,5}$

E: Elastizitätsmodul, $[E] = \text{N/mm}^2$

ν : Querdehnzahl, $[\nu] = 1$

und $\tau_{max} \approx \frac{E}{15}$

Für Stahl ist

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \text{ und } \tau_{\max} \approx 14\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{mit } \sigma_{\max} = 2 \cdot \tau_{\max} = 28\,000 \text{ N/mm}^2$$

(siehe Abschn. 9.7.2).

σ_{\max} ist die theoretische Zugfestigkeit.

5.8 Plastische Verformung als Folge von Versetzungsbewegungen

5.8.1 Versetzungsarten

Unterscheidung zwischen:

1. Stufenversetzung
2. Schraubenversetzung
3. Gemischter Versetzung

Betrag und Richtung der Verzerrung des Kristallgitters, die zu einer Versetzung führten, werden durch den Burgersvektor beschrieben.

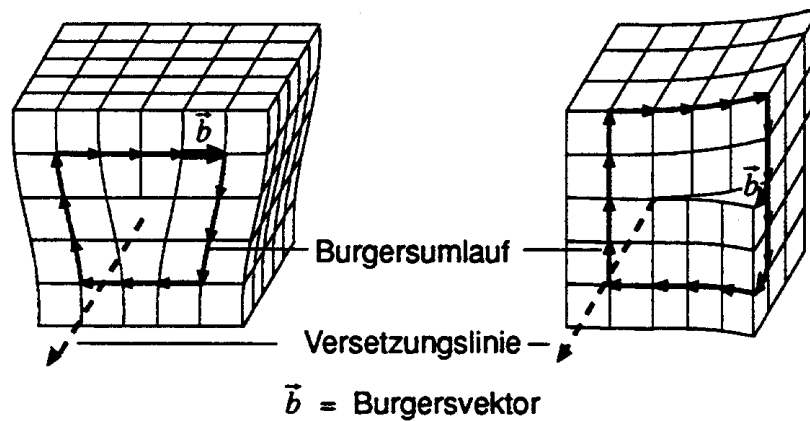


Bild 26. Stufen- und Schraubenversetzung

Stufenversetzung:

Versetzungslinie steht senkrecht zu \vec{b} .

Schraubenversetzung:

Versetzungslinie ist parallel zu \vec{b} .

Gemischte Versetzung:

Winkel zwischen Versetzungslinie und \vec{b} zwischen 0° und 90° .

5.8.2 Verformungsvorgang durch Versetzungsbewegungen

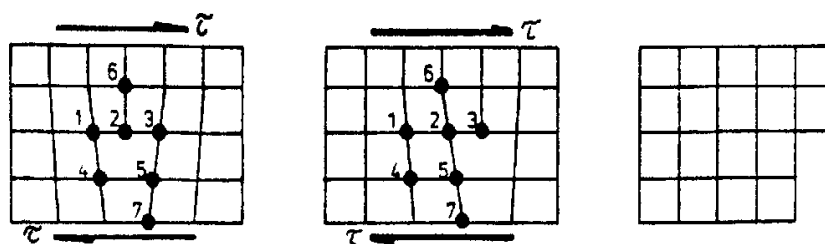


Bild 27. Vorgang der Stufenversetzung

1. Als Folge einer Schubspannung τ wird die Bindung zwischen Atom 5 und Atom 3 gelöst. Es entsteht zwischen Atom 5 und Atom 2 eine neue Bindung. Die Atome 6-2-5-7 bilden eine durchgehende Kristallebene. Die Atome verändern dabei leicht ihre Lage.
2. Die Stufenversetzung ist um einen Gitterparameter nach rechts gerückt.
3. Der Vorgang wiederholt sich, bis die Versetzung aus dem Kristallgitter gewandert ist. Es entsteht eine Gleitstufe. Gleitstufe = plastische Verformung = Betrag des Burgersvektors. Das verbleibende Kristallgitter ist fehlerfrei.

In einem fehlerfreien Kristall werden beim Gleiten zweier Ebenen alle Atome gleichzeitig gegeneinander verschoben. Beim Gleiten von Ebenen eines durch eine Stufenversetzung gestörten Systems wird nacheinander jeweils nur eine Reihe von Atomen verschoben, so dass die zum Gleiten erforderliche Schubspannung in Systemen mit Versetzungen kleiner ist als in fehlerfreien Kristallen.

5.8.3 Eigenschaften der Versetzungen

I. Versetzungen erzeugen ein Spannungsfeld

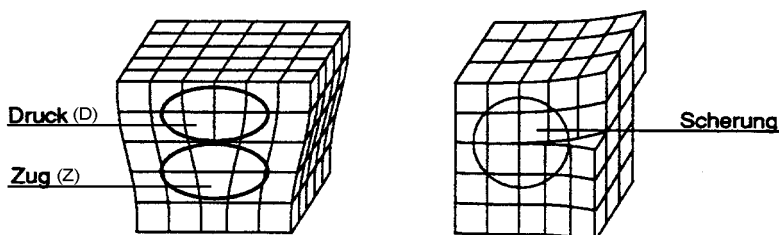


Bild 28. Stufen- und Schraubenversetzung

Die potentielle Energie im Kristall ist daher in der Nähe einer Versetzung erhöht. Vor allem bei erhöhter Temperatur reduziert sich durch Diffusion die Versetzungsdichte.

II. Versetzungen beeinflussen sich gegenseitig

Gleiche Ebenen

- Gleiche Versetzungen $\begin{matrix} \text{P} & \text{P} \\ \text{Z} & \text{Z} \end{matrix}$ stoßen sich ab
- Ungleiche Versetzungen $\begin{matrix} \text{P} & \text{Z} \\ \text{Z} & \text{P} \end{matrix}$ ziehen sich an und heben sich auf

Benachbarte Ebenen

gleiche Versetzungen

Stoßen sich ab oder ziehen sich an,
je nach Abstand

ungleiche Versetzungen

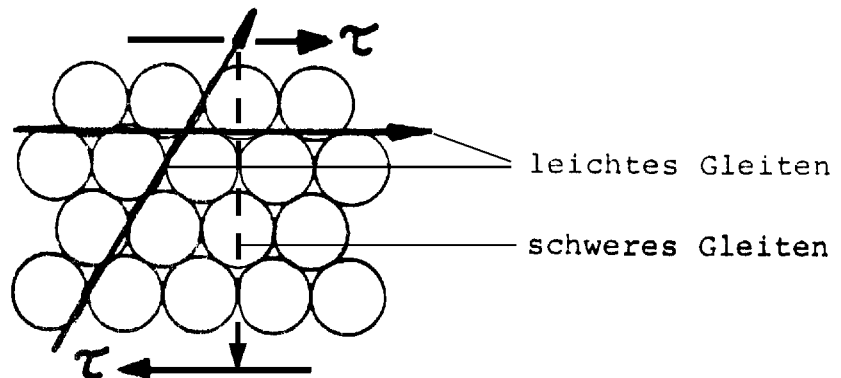
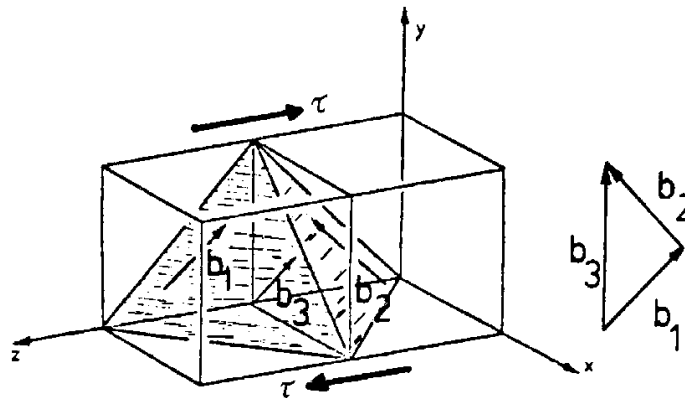
Ziehen sich an und heben sich auf,
Bildung einer Leerstelle**III. Versetzungen sind in dichtest gepackten Ebenen und Richtungen am leichtesten beweglich**

Bild 29. Versetzungen in dichtest gepackten Ebenen

IV. Versetzungen können schwer beweglich oder unbeweglich werden

Trifft eine Versetzung auf ein Hindernis, z.B. ein Fremdatom oder Einlagerungsatom, so kann sie dadurch in ihrer Beweglichkeit behindert werden. Sie wird erst nach einer Spannungs- oder Temperaturerhöhung wieder beweglich. Versetzungen werden unbeweglich, wenn sie auf eine Korngrenze treffen.

Zwei bewegliche Versetzungen \vec{b}_1 und \vec{b}_2 , die in verschiedenen Ebenen aufeinander zulaufen, können unbeweglich werden, wenn die resultierende Versetzung \vec{b}_3 in einer wenig dicht gepackten Ebene oder ungünstig zur angreifenden Schubspannung τ liegt.

Bild 30. Entstehung einer unbeweglichen Versetzung \vec{b}_3 aus zwei beweglichen Versetzungen \vec{b}_2 und \vec{b}_1 in einem kfz-Gitter.

V. Versetzungen können sich vermehren (*Frank-Read-Quelle*)

Ablauf 1 bis 6 siehe Bild 31

1. Die Versetzungslinie einer Stufenversetzung trifft auf ein Hindernis, z.B. ein Paar von Fremd- oder Einlagerungsatomen.
2. Die Versetzung wird aufgehalten. Die Versetzungslinie beginnt sich auszubauchen.
3. Mit steigender Spannung bleibt die Versetzungslinie an den Fremdatomen verankert, baucht sich weiter aus und beginnt, die Störstelle zu umlaufen.
4. Die Fronten der Versetzungslinie nähern sich.
5. Es entstehen zwei Schraubenversetzungen mit entgegengesetztem Drehsinn, die sich aufheben.
6. Eine gemischte Versetzung umschließt die Fremdatome, und eine neue Stufenversetzung zwischen den beiden Fehlstellen hat sich gebildet.

Der Vorgang wiederholt sich.

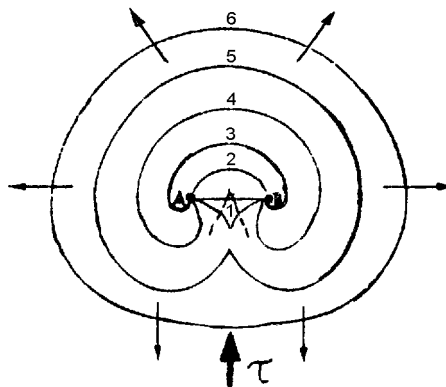


Bild 31. Vermehrung von Versetzungen - Frank-Read-Quelle

Mit steigender plastischer Verformung nimmt die Anzahl der Versetzungen zu:

Tab. 6. Versetzungsdichten von Kristallen

	Versetzungsdichte in Linien / cm ³
Wärmebehandelte Einkristalle	100 – 103
Wärmebehandelte Vielkristalle	100 – 108
Nach plastischer Verformung	1000 – 1012

5.8.4 Zusammenfassung und Folgerungen

1. Versetzungen erlauben plastische Verformungen bei Spannungen, die wesentlich kleiner als die theoretische Schubfestigkeit des Werkstoffs sind, indem sie ein Kristallgitter mit hoher Geschwindigkeit durchlaufen und dadurch Gleitungen verursachen.
2. Versetzungen bewegen sich vorzugsweise auf bestimmten Ebenen und in bestimmten Richtungen, die strukturabhängig sind.
3. Da Versetzungen von einem Spannungsfeld umgeben sind und eine Erhöhung des Energieniveaus zur Folge haben, können sie durch eine Temperaturbehandlung des Werkstoffs aufgelöst werden.
4. Die Beweglichkeit von Versetzungen und damit die plastische Verformbarkeit des Werkstoffs können durch Fremdatome (Punktfehler), andere Versetzungen oder Korngrenzen reduziert werden.
5. Die Versetzungsdichte kann durch vorangegangene plastische Verformungen erhöht werden, so dass eine weitere plastische Verformbarkeit abnimmt.

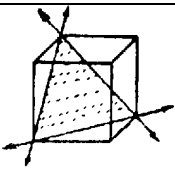
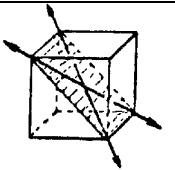
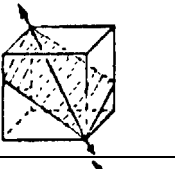
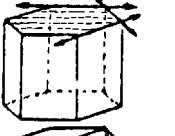
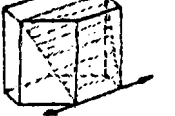
5.9 Gleitsysteme

Gleitvorgänge treten in bestimmten Gleitebenen und Gleitrichtungen auf. Dies sind meist die dichtest gepackten Ebenen und Richtungen.

Die Kombination von Gleitebene und Gleitrichtung wird als Gleitsystem bezeichnet.

Die Anzahl der Gleitsysteme hängt von der Kristallstruktur (s. Abschn. 6.5.2) eines Werkstoffs ab.

Tab. 7. Beispiele einiger Gleitsysteme

Struktur	Werkstoffe	Anzahl der Gleitsysteme
kfz	Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ -Fe	$4 \times 3 = 12$ 
krz	α -Fe, W, Mo, δ -Fe, K	$6 \times 2 = 12$ 
		$24 \times 1 = 24$ 
hdp	Zn, Mg, Ti	$1 \times 3 = 3$ 
		$6 \times 1 = 6$ 

5.10 Kritische Schubspannung

Da Gleitvorgänge nur in bestimmten Ebenen ablaufen können, ist die Orientierung einer Gleitebene zur äußeren Beanspruchung bzw. die in Gleitrichtung auf die Gleitebene wirkende Schubspannung für den Gleitvorgang maßgebend.

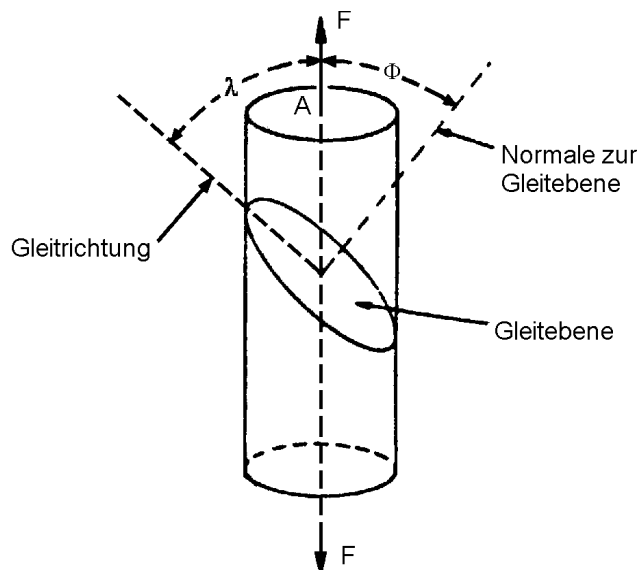


Bild 32. Winkelbeziehungen zwischen Hauptspannungsrichtung und Gleitsystem in einer Einkristallzugprobe

Querschnitt der Probe:

$$A$$

Fläche der Gleitebene:

$$A' = \frac{A}{\cos \Phi}$$

Komponente der Kraft F in Gleitrichtung:

$$F' = F \cdot \cos \lambda$$

In der Gleitrichtung wirkende Schubspannung τ :

$$\tau = \frac{F'}{A'} = \frac{F}{A} \cdot \cos \lambda \cdot \cos \Phi$$

$$\tau = \sigma \cdot \cos \lambda \cdot \cos \Phi$$

Die kritische Schubspannung τ_{cr} ist die auf die Gleitebene und die Gleitrichtung bezogene Schubspannung, die zum Gleiten führt. Sie ist eine Materialkonstante, d.h. eine Werkstoffeigenschaft, die vor allem bei krz-Kristallen (siehe Abschn. 6.5.1) von der Temperatur abhängt.

Gleiten setzt ein, wenn $\tau = \tau_{cr}$. Für den Fall, dass die Winkel von Gleitebene und Gleitrichtung zur äußeren Beanspruchungsrichtung $\lambda = \Phi = 45^\circ$ sind, ist das Produkt $\cos \lambda \cdot \cos \Phi$ (Schmid-Faktor) maximal und Gleiten setzt ein, wenn $\tau = \tau_{cr} = 0,5 \cdot \sigma$, wobei $\sigma = \frac{F}{A}$ ist.

Bei Winkeln kleiner oder größer 45° ist zum Erreichen von τ_{cr} eine größere Spannung σ notwendig.

Folgerungen:

1. In einem Einkristall können Gleiten bzw. plastische Verformung nur dann auftreten, wenn das Gleitsystem gegenüber der äußeren Spannung gleitungsunterstützend orientiert ist.
In Vielkristallen werden zunächst die Gleitsysteme aktiviert, die im Winkel von 45° zur äußeren Beanspruchungsrichtung liegen.

2. Liegen viele Gleitsysteme vor, so ist Gleiten schon bei niedrigen Spannungen wahrscheinlich.
3. Mit steigender Spannung werden immer mehr Gleitsysteme aktiviert.
4. Je mehr Gleitsysteme gleichzeitig aktiviert werden, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Gleitsysteme durch gegenseitige Beeinflussung unbeweglich werden.

Tab. 8. Typische Werte der kritischen Schubspannung von Einkristallen

Werkstoff	Struktur	Kritische Schubspannung τ_{cr} in N/mm ²		
		bei -20°C	bei +20°C	bei ~300°C
Kupfer	Kfz	1,2	1,0	1,0
Aluminium	Kfz	1,5	1,5	1,4
Magnesium	Hdp	1,2	0,8	0,8
α -Eisen	Krz	45,0	35,0	18,0

5.11 Plastizität von Einkristallen

Der Gleitvorgang eines Einkristalls mit einer kfz-Struktur kann in drei Bereiche unterteilt werden:

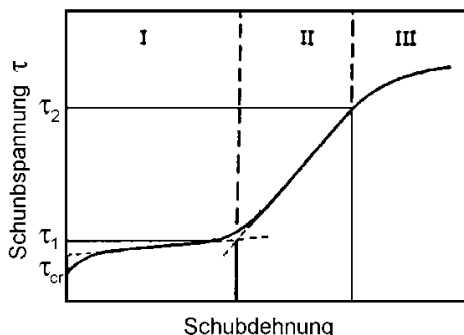


Bild 33. Gleitvorgang eines Einkristalls mit kfz-Struktur

Bereich I

Beginn des Gleitens nach Überschreiten der kritischen Schubspannung τ_{cr} , große Verformungen bei nur langsam steigender Schubspannung.

Bereich II

Nach Erreichen der Schubspannung τ_1 gegenseitige Behinderung der Versetzungen und Vermehrung der Versetzungen. Die zum Gleiten erforderliche Spannung steigt kontinuierlich an.

Bereich III

Nach Erreichen einer Grenzschubspannung τ_2 werden blockierte Versetzungen wieder beweglich.

Bei Einkristallen mit hdp-Struktur (siehe Abschn. 6.5.1) tritt keine oder nur eine geringe Verfestigung auf, da die geringe Anzahl der Gleitsysteme nur zu einer schwachen gegenseitigen Beeinflussung von Versetzungen führt.

Einkristalle mit einer krz-Struktur (siehe Abschn. 6.5.1) besitzen keine dichtest gepackten Ebenen, so dass das Gleiten erst bei hohen kritischen Schubspannungen beginnt. Wegen der großen Anzahl an Gleitsystemen ist schon bei Beginn des Gleitens eine gegenseitige Beeinflussung von Gleitsystemen zu erwarten, so dass der Bereich I völlig entfällt.

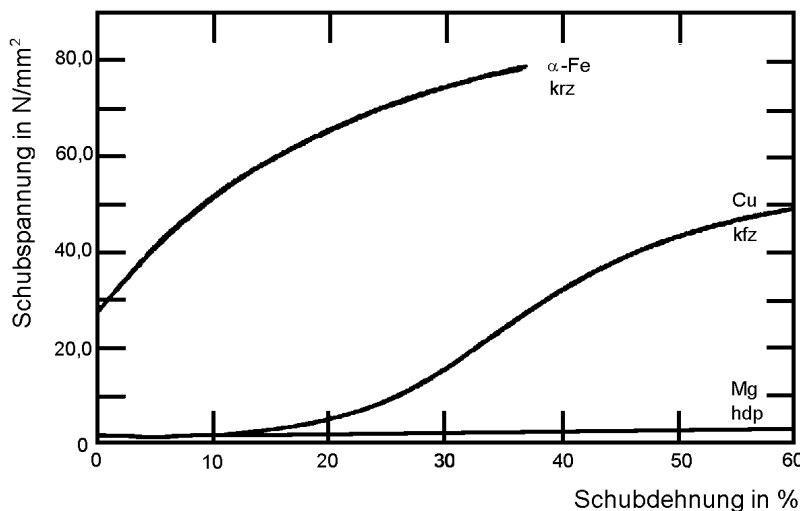


Bild 34. Gleitvorgänge der Einkristalle krz, kfz und hdp im Vergleich

5.12 Plastizität von Vielkristallen

Reale Werkstoffe (Baustoffe) setzen sich aus vielen unterschiedlich orientierten Körnern zusammen. Die für den Einkristall abgeleiteten Zusammenhänge haben noch Gültigkeit. Zusätzlich ist jedoch der Einfluss der Kornorientierung und der Korngrenzen zu berücksichtigen.

Korngrenzen halten die Versetzungsbewegung auf. Die Streckgrenze metallischer Werkstoffe steigt daher mit sinkendem Korndurchmesser (Hall-Petch-Beziehung):

$$\beta_s = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad \text{Hall-Petch-Gleichung}$$

σ_0 Streckgrenze des Einkristalls bei günstiger Orientierung

d mittlerer Korndurchmesser

k temperaturabhängiger Beiwert (Korngrenzenwiderstand);
für Stahl: $k = 25 \text{ kN mm}^{-3/2}$

Die Festigkeitssteigerung infolge Verringerung des Korndurchmessers wird z.B. bei Feinkornstählen ausgenutzt. Mit der Hall-Petch-Beziehung lässt sich der Festigkeitsverlust durch Grobkornbildung (z.B. nach Schweißung) begründen.

Die Kornstruktur eines Werkstoffs führt dazu, dass auch bei Vielkristallen mit kfz-Struktur die Unterteilung eines Gleitvorgangs in die Bereiche I, II und III verwischt wird:

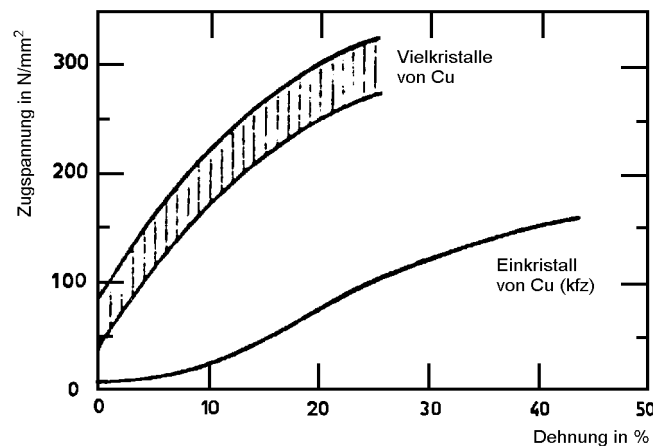


Bild 35. Vergleich des Zugspannungs-Dehnungsverhaltens von Ein- und Vielkristallen

5.13 Spannungs-Dehnungsverhalten von Stahl

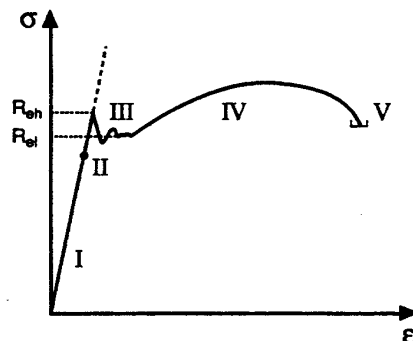


Bild 36. Spannungs-Dehnungsverhalten von Stahl mit ausgeprägter Streckgrenze

Bereich I: Elastisches Verhalten

Bereich II: Abweichung von der Linearität, Beginn plastischer Verformungen; τ_{cr}

Bereich III: Streckgrenze und Fließen

Zu III:

Stähle mit niedrigem C-Gehalt **ohne vorausgegangene Kaltverformung** besitzen eine ausgeprägte Streckgrenze, d.h., bei konstanter Fließspannung nehmen die Dehnungen zu. Dieser Vorgang ist dem Bereich I bei der plastischen Verformung eines Einkristalls zwar ähnlich, aber nicht mit ihm identisch.

1. Der Kohlenstoff des Stahls lagert sich häufig an einer Versetzung an. Erreicht die Spannung die obere Streckgrenze R_{eh} , so werden einige Versetzungen von den Kohlenstoffatomen losgerissen. Das ist der Beginn des Fließens. Weiteres Fließen ist auch bei einer niedrigeren Spannung möglich, so dass die Spannung auf die untere Streckgrenze abfällt. Der Fließvorgang ist zunächst nur auf einen kleinen Bereich der Probe beschränkt.
2. Das örtliche Fließen verursacht Zwängungen, die zu einer Vergrößerung der fließenden Zone führen.
3. Der Fließbereich erweitert sich, bis in der ganzen Probe plastische Verformungen auftreten. Der Vorgang wird durch die Entwicklung der sog. **Fließ- oder Lüderslinien** sichtbar.
4. Nach Abschluss des Fließvorgangs ist die plastische Verformbarkeit des Werkstoffs zunächst erschöpft.

Bei Stählen mit hoher Versetzungsdichte, z.B. als **Folge einer vorangegangenen Kaltverformung**, ist ein freies Gleiten nicht mehr möglich. Plastische Verformungen entwickeln sich jetzt nur allmählich, so dass der Werkstoff **keine** ausgeprägte Streckgrenze hat.

Bereich IV: Verfestigung durch Vervielfältigung von Versetzungen und Blockieren von Versetzungen.

Bereich V: Versagen durch Bruch

5.14 Einflüsse auf die plastische Verformbarkeit

Durch die verminderte Beweglichkeit von Versetzungen reduziert sich die plastische Verformbarkeit.

5.14.1 Strukturparameter

Beeinflussung der Versetzungsbeweglichkeit durch:

- Fremdatome
- zusätzliche Phasen
- Korngrenzen
- Versetzungen (Kaltverformung)

5.14.2 Äußere Einflüsse

Temperatur und Dehngeschwindigkeit

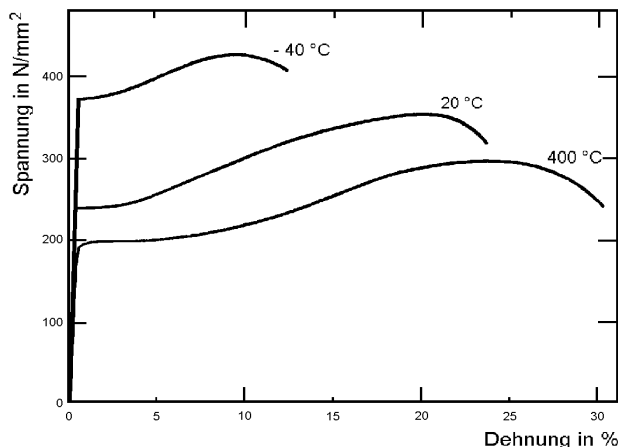


Bild 37. σ - ϵ -Diagramm eines S 235 JO bei verschiedenen Temperaturen

Temperaturerhöhung fördert vor allem bei krz-Werkstoffen die plastische Verformbarkeit (siehe auch Abschn. 1.10).

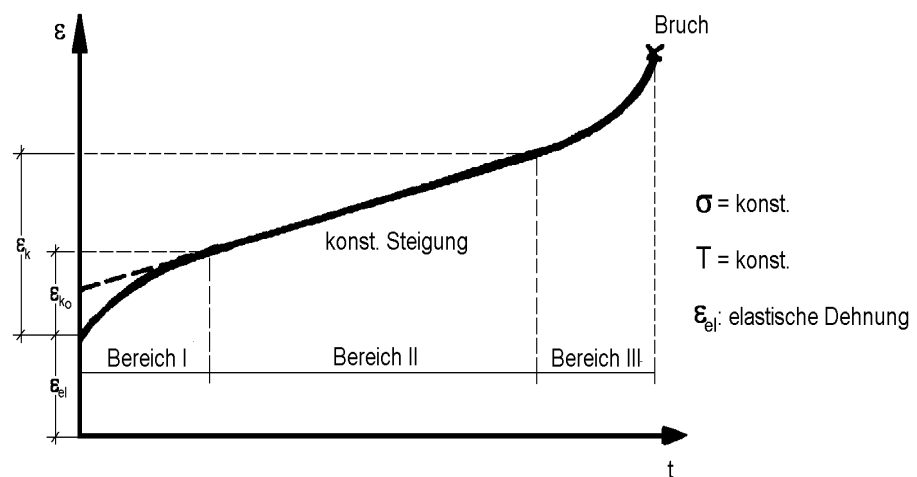
Erhöhte Dehngeschwindigkeit reduziert plastische Verformbarkeit. Das trifft vor allem dann zu, wenn zeitabhängige Diffusionsvorgänge die Verformbarkeit eines Werkstoffs beeinflussen.

Mehrachsige Beanspruchung führt bei gleichem Vorzeichen der Spannungen zu einer Verminderung der plastischen Verformbarkeit, weil dadurch die kritische Schubspannung erst bei einer höheren äußeren Beanspruchung erreicht wird (siehe auch Abschn. 9.6).

Energiereiche, radioaktive Strahlen können zu einer Störung des Kristallgitters führen. Die so entstehenden Fehlstellen im Kristallgitter schränken bei manchen Werkstoffen die Beweglichkeit von Versetzungen soweit ein, dass eine plastische Verformbarkeit des Werkstoffs nur noch in beschränktem Umfang möglich ist.

5.15 Kriechen und Relaxation

5.15.1 Ursachen



Bereich	I	II	III
Bezeichnung	Primärkriechen	Sekundärkriechen	Tertiärkriechen
Kriechgeschwindigkeit	Nimmt mit der Zeit ab	Konstant	nimmt mit der Zeit zu, bis zum Bruch der Probe
	Verfestigung > Entfestigung	Verfestigung = Entfestigung	Verfestigung < Entfestigung

Bild 38. Kriechen und Relaxation

Ähnlich wie bei der spannungsabhängigen plastischen Verformung sind Kriechen und Relaxation auf Gleiten von Kristallebenen bzw. auf Versetzungsbewegungen zurückzuführen. Es tritt ein Wechselspiel ein zwischen Verfestigung (Reduktion der Beweglichkeit von Versetzungen) und Entfestigung (Auslösen von Versetzungsbewegungen).

5.15.2 Einflüsse auf das Kriechen

Alle Parameter, die die plastische Verformbarkeit der Metalle beeinflussen, wirken sich in gleicher Weise auf die Kriecheigenschaften aus.

Einfluss der Temperatur

Mit steigender Temperatur nimmt die Kriechgeschwindigkeit zu, da die Beweglichkeit der Versetzungen steigt. Liegt die Temperatur über der Rekristallisationstemperatur, so führen Rekristallisation und Kornwachstum zur Verringerung der Versetzungsdichte und damit zu einem erhöhten Kriechen, vor allem bei kaltverfestigten Werkstoffen.

Die Spannungsabhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_k$ wird durch das sog. Norton'sche Potenzgesetz beschrieben:

$$\dot{\epsilon}_k = \frac{d\epsilon_k}{dt} = A(T) \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n$$

- ϵ_k Kriechverformung
- $A(T)$ Struktureinfluss (temperaturabhängig)
- n Norton'scher Spannungsexponent (für viele Werkstoffe $n = 3 \dots 6$)

Die Temperaturabhängigkeit der stationären Kriechrate (**Sekundärkriechen**) lässt sich häufig mit der Arrhenius-Gleichung beschreiben (siehe auch Abschn. 7.7):

$$\epsilon_k = \epsilon_{k0} + A(T) \sigma^n e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Q Aktivierungsenergie für das Kriechen pro Mol, $[Q] = \frac{J}{mol}$

R Gaskonstante, $[R] = \frac{J}{K \cdot mol}$

T Temperatur, $[T] = K$

Beachte:

1. Die Aktivierungsenergie für das Kriechen kann mit steigender Spannung abfallen.
2. Für die meisten Baustähle sind die Kriechverformungen bei Raumtemperatur vernachlässigbar klein.
3. Spannstähle können kriechanfällig sein. Das führt zu einem Abfall der Spannung in einem Relaxationsversuch vor allem bei Spannungen in der Nähe der Streckgrenze.

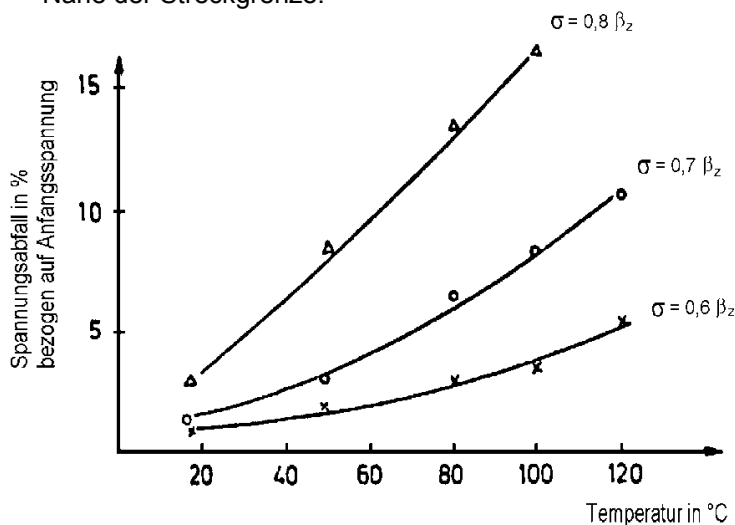


Bild 39. Relaxation von Stahl in Abhängigkeit der Temperatur

6 Die Mikrostruktur der Werkstoffe

6.1 Energieniveau, Ordnung und Unordnung, Aggregatzustände

Grundbausteine der Werkstoffe sind Atome und/oder Moleküle. Sie versuchen sich innerhalb des Werkstoffs so anzuordnen, dass ihre Energie minimal wird.

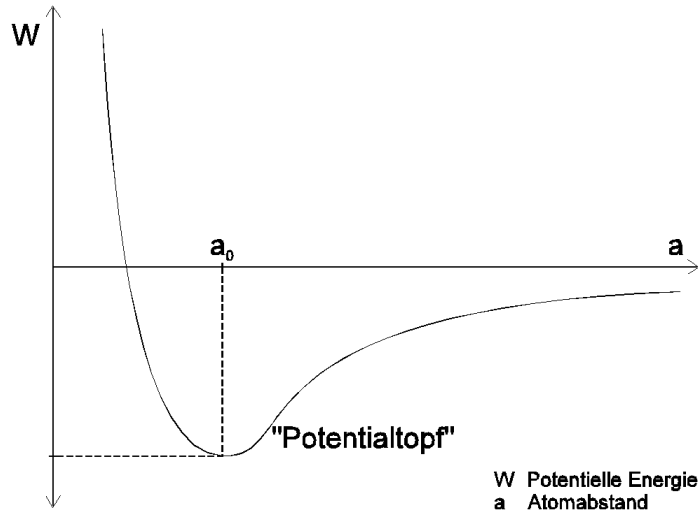


Bild 40. Energetischer Zustand eines Atoms in Abhängigkeit vom Atomabstand im Kristallgitter

Damit in einem homogenen Werkstoff das Energieniveau möglichst niedrig und überall gleich ist, strebt der Werkstoff in seinem Aufbau eine bestimmte Ordnung an.

Der Ausbildung einer Ordnungsstruktur wirkt die Wärmeenergie entgegen. Die Temperatur eines Werkstoffs ist proportional zur mittleren kinetischen Energie der Teilchen, aus denen er besteht.

Mit zunehmender Temperatur haben immer mehr Teilchen genügend kinetische Energie, um dem "Potentialtopf" zu entfliehen. Die Ordnung nimmt ab. Ab einer bestimmten Temperatur, dem Schmelzpunkt, geht der Festkörper in den flüssigen Zustand über, in dem die Teilchen nicht mehr an feste Plätze gebunden sind, aber noch so stark miteinander wechselwirken, so dass sie einen Verband bilden. Steigt die Temperatur weiter, wird die kinetische Energie so groß, dass die Teilchen in den gasförmigen Zustand übergehen. Die Wechselwirkung zwischen den Teilchen ist zu klein, verglichen mit ihrer Bewegungsenergie, um sie aneinander zu binden.

Die verschiedenen Zustände (fest, flüssig, gasförmig) werden als **Aggregatzustände** bezeichnet. Es gibt weitere Aggregatzustände, z.B. den Plasmazustand (Atomkern ohne gebundene Elektronen und Elektronengas), die jedoch erst in Temperaturbereichen $T > 5000^\circ \text{C}$ auftreten und außerhalb unseres Betrachtungsbereichs liegen (z.B. Fusionsreaktionen).

6.1.1 Kristalline und amorphe Werkstoffe

Bei den festen Körpern unterscheiden wir zwischen kristallinen und nicht-kristallinen (amorphen) Werkstoffen.

Kristalline Werkstoffe

Dreidimensionale Anordnungen von Atomen oder Molekülen in einem regelmäßig geordneten System bilden ein Raumgitter. Die Netzpunkte eines Raumgitters geben die Lage eines Atoms oder Moleküls an. Das Gitter heißt primitiv, wenn es keine Elementarzelle mit kleinerem Volumen gibt.

Beispiele kristalliner Werkstoffe:

- alle Metalle
- viele Nichtmetalle, z.B. keramische Werkstoffe
- einige Kunststoffe

Amorphe Werkstoffe

Amorphe Werkstoffe können als erstarrte Flüssigkeiten betrachtet werden. Sie bestehen aus einer Aneinanderreihung von Atomen und Molekülen ohne ausgeprägte Ordnung. Amorphe Werkstoffe können jedoch aus Einzelkomponenten zusammengesetzt sein, die in sich geordnet sind.

Beispiele amorpher Werkstoffe:

- Gläser
- viele Kunststoffe
- einige Elementarstoffe bei plötzlicher Abkühlung

Man beachte:

Die Werkstoffe streben einen kristallinen Zustand an, da wegen der höheren Ordnung die potentielle Energie kleiner ist als im ungeordneten, amorphen Zustand.

6.1.2 Sole und Gele

Sole und Gele sind Kolloide, die den nicht kristallinen Werkstoffen zugeordnet werden. Sie bestehen aus sehr kleinen Teilchen, die in einer Flüssigkeit gleichmäßig verteilt sind.

Teilchengröße: $\varnothing < 10^{-4}$ mm

Die Teilchen selbst können kristallin oder amorph sein.

Sol: Weiches System ohne Vernetzung der Partikel.

Beispiel: Bitumen

Gel: Starres System mit vernetzten Partikeln.

Beispiel: Zementstein

6.1.3 Aus der Mikrostruktur ableitbare charakteristische Werkstoffeigenschaften

Kristalline Werkstoffe:

- definierter Schmelzpunkt
- meist undurchsichtig
- oft spaltbar
- je nach Bindungsart durch Gleitungen plastisch verformbar

Nicht kristalline Werkstoffe:

- allmähliche Erweichung statt Schmelzpunkt
- deutliche Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften

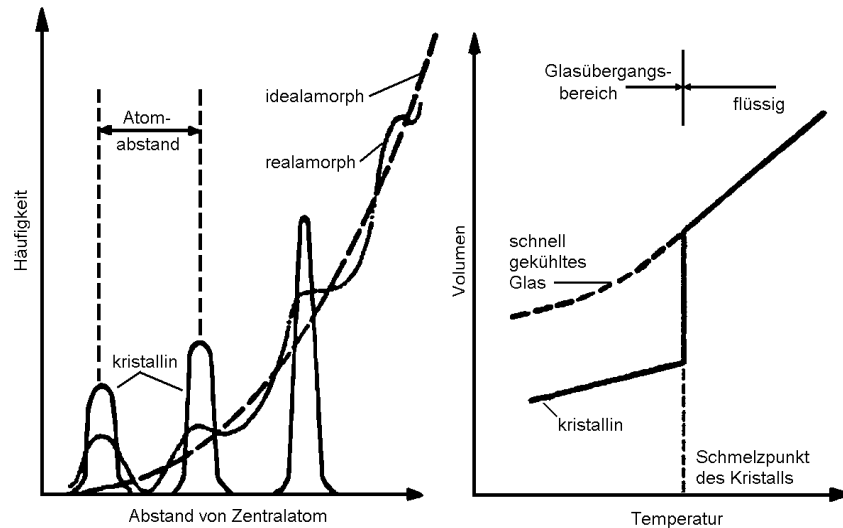


Bild 41. Verteilung der Bausteine und Eigenschaften von kristallinen und amorphen Werkstoffen

6.2 Grundbausteine der Werkstoffe

Werkstoffe bestehen aus

Atomen	Beispiel: Elemente
Molekülen	Beispiel: Silikatkristalle
Molekülketten	Beispiel: Kunststoffe
Partikel kolloidalen Größe	Beispiel: Gele

6.3 Bindungsarten

Periodensystem der Elemente

Das Periodensystem der Elemente ist am Ende des Skriptums abgedruckt. Zwischen Periodensystem und Atombau bestehen zwei wichtige Beziehungen:

- Nummer der Periode = Nummer der äußeren Elektronenschale = Anzahl der Elektronenschalen
Die Atome aller Elemente einer Periode haben die gleiche Anzahl von Elektronenschalen.
- Nummer der Hauptgruppe = Anzahl der Valenzelektronen
Die Atome aller Elemente einer Gruppe haben die gleiche Anzahl von Elektronen in der äußeren Schale.

Die Stellung eines Elements im Periodensystem gibt Auskunft über eine Vielzahl physikalischer und chemischer Eigenschaften des Stoffs.

Allgemein gilt:

Der Atomradius nimmt mit der Hauptgruppennummer ab und mit der Periodennummer zu.

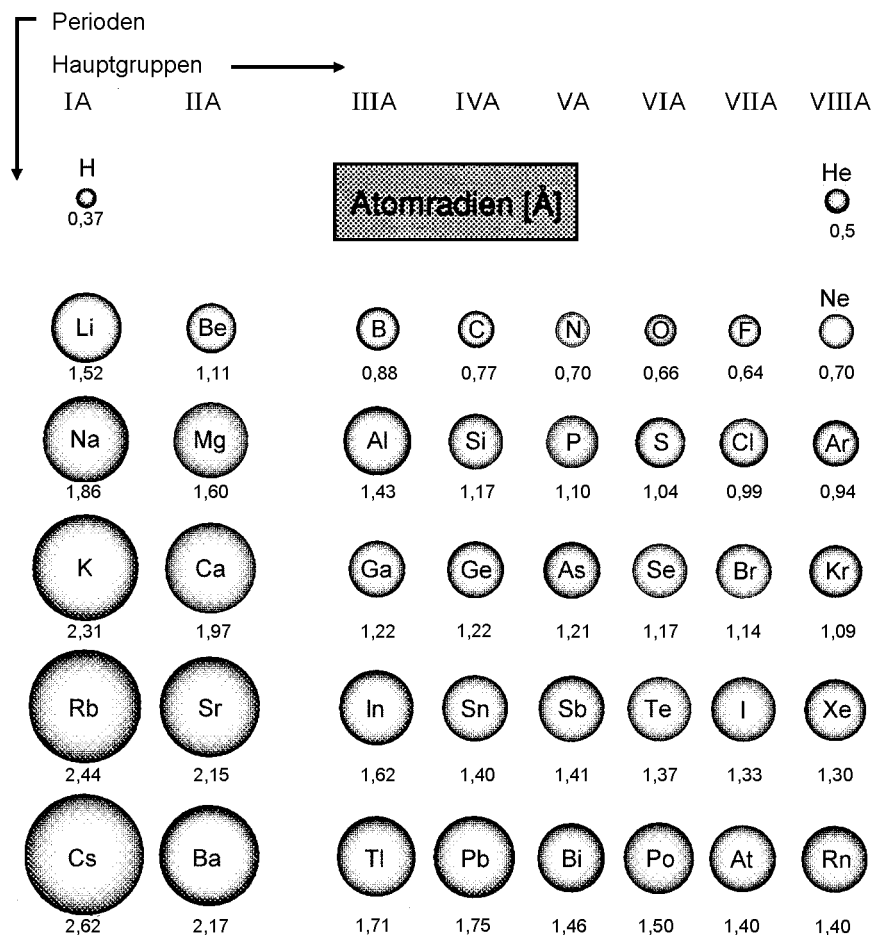


Bild 42. Verteilung der Atomradien im PSE

Der Grund für die Abnahme des Atomradius mit der Hauptgruppennummer ist die Zunahme der Kernladungszahl, ohne dass die Anzahl der Elektronen in den inneren Schalen, die die Kernladung abschirmen, steigt.

Die äußeren Elektronen spüren die anziehende Kernladung um so stärker, je weiter rechts sie im Periodensystem der Elemente stehen.

Die Zunahme der Atomradien mit der Periodennummer ist eine Folge der Zunahme der Anzahl abgeschlossener Elektronenhüllen.

Mit der gleichen Begründung lässt sich auch der Zusammenhang der Größe der ersten Ionisierungsenergie, d.h. der Energie, die zum Entfernen des ersten Elektrons aus dem Atom erforderlich ist, mit der Stellung im Periodensystem erklären, s. Bild 43.

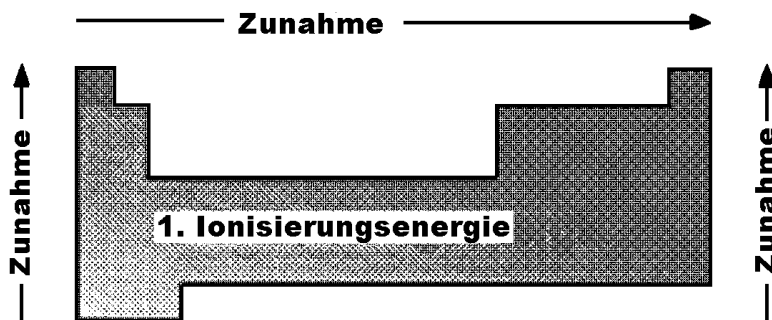


Bild 43. Verteilung der Ionisierungsenergie im PSE

Die Abschirmung der positiven Kernladung nimmt im Periodensystem von links nach rechts ab. Ausnahmen bilden die 3. und die 6. Hauptgruppe aufgrund des Aufbaus ihrer äußeren Hülle.

Umgekehrt verhält es sich mit der Elektronenaffinität, der Energie, die notwendig ist, um einem isolierten Atom ein Elektron hinzuzufügen, s. Bild 44. Auch hier gibt es Ausnahmen (z.B. zweite Hauptgruppe).

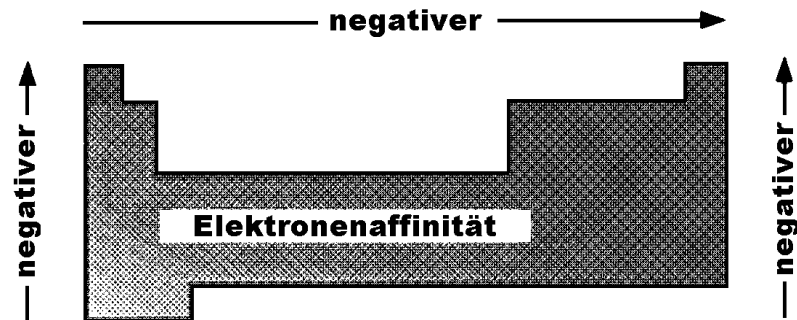


Bild 44. Verteilung der Elektronenaffinität im PSE

Gehen verschiedene Elemente chemische Verbindungen ein, so ziehen sie die Bindungselektronen verschieden stark an. Ein relatives Maß dafür, wie stark ein Element in Verbindungen, die an der Bindung beteiligten Elektronen anziehen vermag, ist die Elektronegativität.

Wie schon bei den anderen Größen, gibt es auch hier analoge Tendenzen bezüglich der Stellung im Periodensystem.

Je geringer die Elektronegativität ist, desto stärker neigen die Elemente dazu, Metallbindungen zu bilden, s. Bild 45.

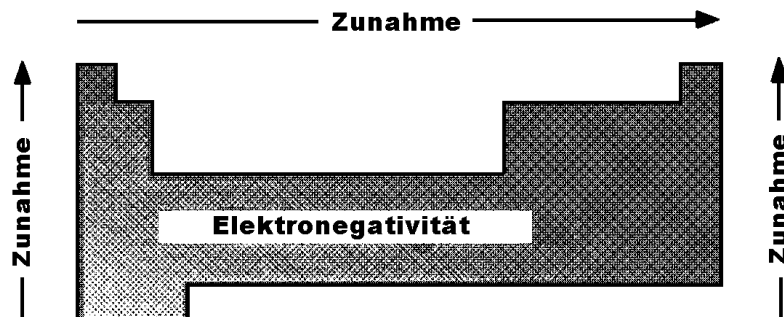


Bild 45. Verteilung der Elektronegativität im PSE

Die links im Periodensystem stehenden Elemente (mit Ausnahme des Wasserstoffs) mit einer Elektronegativität $\leq 1,8$ bezeichnet man als elektropositiv. Das sind die Metalle.

Elemente mit einer Elektronegativität $\geq 2,1$ sind elektronegativ und bilden die Nichtmetalle. Dazwischen liegen die Halbmetalle, die sowohl in metallischer als auch in nichtmetallischer Modifikation auftreten, s. Bild 46.

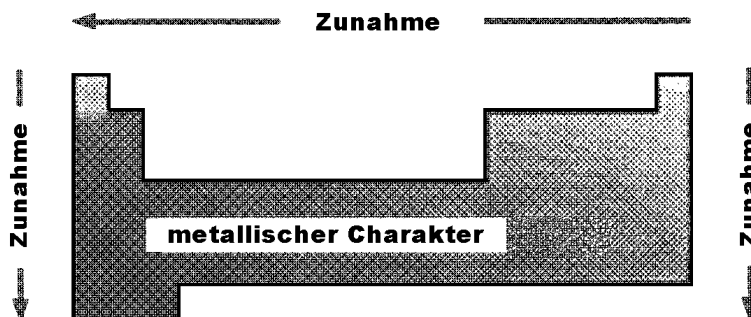


Bild 46. Verteilung des metallischen Charakters im PSE

Die Grundbausteine der Werkstoffe (Abschn. 6.2) sind je nach ihrer Art und ihren Eigenschaften verschieden miteinander gebunden. Die Bindungsart, die in einem Werkstoff vorherrscht, bestimmt z.B.:

- Festigkeit
- Elastizitätsmodul
- plastische Verformbarkeit
- Temperaturdehnung
- thermische und elektrische Leitfähigkeit
- Siede- und Schmelzpunkt

Grundregeln:

1. Die Bindungsart zwischen Atomen wird vor allem durch die Eigenschaften (Füllgrad) der äußeren Elektronenschalen bestimmt.
2. Die Atome gehen ohne äußeren Zwang nur solche Bindungen ein, die zu einer Verringerung ihrer potentiellen Energie führen.
3. Die Atome streben durch Verbindungen den Zustand einer Edelgaskonfiguration, d.h. eine vollständig gefüllte äußere Elektronenschale an.

Dies kann geschehen durch:

- a) Abgabe von Elektronen
- b) Aufnahme von Elektronen
- c) Bildung von Elektronenpaaren

Daraus ergeben sich die folgenden verschiedenen Bindungsarten:

6.3.1 Ionenbindung

Bindung zwischen Metall und Nichtmetall

Das Metallatom gibt Valenzelektronen ab, um eine Edelgaskonfiguration zu erlangen. Es wird zu einem positiven Ion (Kation). Das Nichtmetallatom nimmt Elektronen auf und gelangt ebenso zu einer Edelgaskonfiguration. Es wird zu einem negativen Ion (Anion). An die Stelle eines Nichtmetallions kann ein Molekülion treten.

Die so entstandenen Ionen ziehen einander wie entgegengesetzt geladene Kugeln elektrostatisch an.

Beispiel: NaCl (Kochsalz)

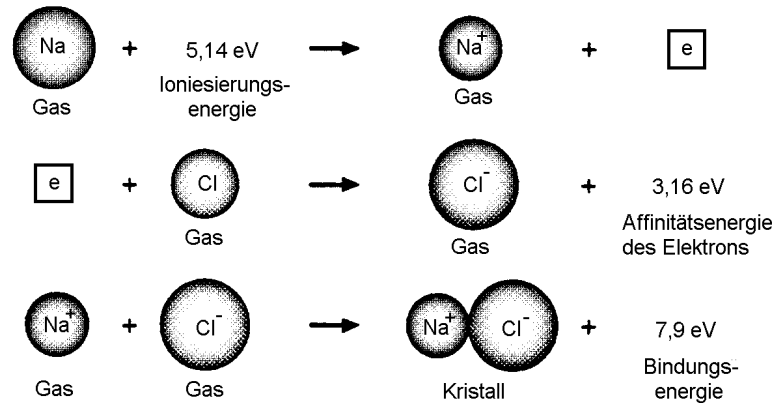


Bild 47. Energiebetrachtung am Beispiel der NaCl-Bindung

Die Ionenbindung ist fest und nicht orientiert. Die entstehenden Stoffe sind wasserlöslich (Salze). Sie sind in Lösung elektrisch leitfähig.

6.3.2 Metallbindung

Metallische Bindungen bilden ein Kristallgitter. Der Zusammenhalt des Gitterverbandes positiver Ionen ist durch bewegliche Elektronen gegeben. Normalerweise sind ein bis zwei Elektronen pro Atom beweglich. Metalle zeichnen sich durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit aus. Die Valenzelektronen der Atome werden zu den Leitungselektronen des Metalls.

Die Bindung ist weniger fest als die Ionenbindung und ebenfalls nicht orientiert. Metalle haben das Bestreben, in relativ dicht gepackten Strukturen (krz, kfz, hdp, siehe Abschn. 6.5.2) zu kristallisieren. Durch den Gitterverband sind die metallischen Bindungen duktil. In das Gitter können Fremdatome eingebaut werden (Legierbarkeit).

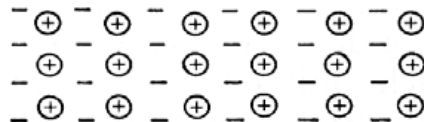


Bild 48 . Schematische Darstellung der metallischen Bindung

6.3.3 Kovalente Bindung (Atombindung oder homöopolare Bindung)

Die kovalente Bindung ist die klassische Elektronenpaarbindung. Sie spielt für viele chemische Reaktionen, besonders in der organischen Chemie, die entscheidende Rolle. Beteiligt sind Nichtmetalle, die Elektronen gemeinsam nutzen, um der Edelgaskonfiguration nahe zu kommen. Dabei bleiben die Bindungselektronen an ihre Atome gebunden. Die kovalente Bindung ist gerichtet (orientiert). So kristallisiert z.B. Silizium in der Diamantstruktur, bei der die Bindungen zu den vier nächsten Nachbarn Tetraederwinkel von $109,5^\circ$ miteinander einschließen. Die in der Diamantstruktur angeordneten Kugeln füllen nur 34 Prozent des verfügbaren Raums, gegenüber 74 Prozent im Fall einer dichtest gepackten Struktur (kfz, hdp, siehe Abschn. 6.5.2).

Eine solche Bindung erlaubt nur vier nächste Nachbarn, eine dichtest gepackte Struktur hingegen zwölf (siehe Abschn. 6.5.1). Das ist die Ursache für die relativ geringe Dichte kovalenter Kristalle verglichen mit den Metallen.

Eine echte kovalente Bindung tritt nur zwischen Nichtmetallelementen einer Art auf. Handelt es sich um verschiedene Elemente in der Bindung, so hat diese einen partiell ionischen Charakter, denn die Bindungselektronen werden stärker zu dem Bindungspartner mit der größeren Elektronegativität hinübergezogen. Zwischen den beiden Grenzfällen der ionischen und der kovalenten Bindung in den Kristallen gibt es einen kontinuierlichen Übergang.

Die kovalente Bindung ist hochfest und orientiert. Stoffe mit kovalenter Bindung sind schwer verformbar und spröde. Es gibt keine freien Ladungsträger, woraus sich eine geringe elektrische Leitfähigkeit ergibt.

Beispiele: Diamant, Silizium, keramische Werkstoffe, einige Kunststoffe

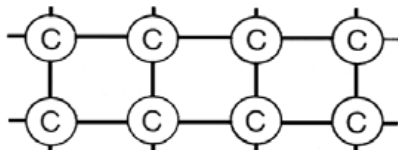


Bild 49 . Schematische Darstellung der kovalenten Bindung (am Bsp. Kohlenstoff)

6.3.4 Dipolbindung

Moleküle haben häufig eine permanent unsymmetrische Ladungsverteilung. Ein Beispiel dafür ist das H₂O-Molekül. Aufgrund der größeren Kernladung zieht das O-Atom die beiden Bindungselektronen wesentlich stärker an als es die zwei H-Atome tun.

D.h., der Sauerstoff nimmt dadurch eine negative, die beiden Wasserstoffatome eine positive Partialladung an. Das H₂O-Molekül bildet einen Dipol. Die einzelnen Dipole ziehen sich an.

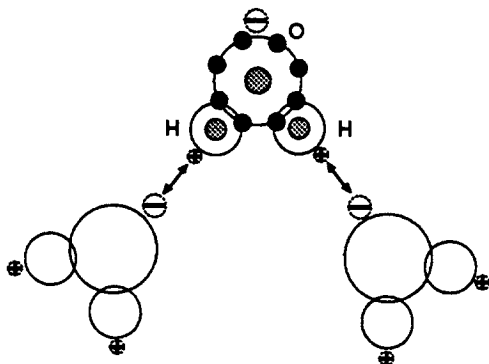


Bild 50. Dipolbindung

6.3.5 Van-der-Waals'sche Bindung

In Atomen schwingen Kern und Hülle gegeneinander, so dass der positive und der negative Ladungsschwerpunkt nur im zeitlichen Mittel, aber nicht zu jeder Zeit, zusammenfallen. Die Folge ist, dass die Atome gegenseitig ein Dipolmoment induzieren. Die daraus resultierende anziehende Dipol-Dipol-Wechselwirkung heißt nach ihrem Entdecker Van-der-Waals'sche Wechselwirkung. Es ist eine äußerst schwache Bindung. Sie bewirkt den Zusammenhalt von Teilchen kolloidaler Größe in einem Gel und bindet die Molekülketten in Thermoplasten untereinander.

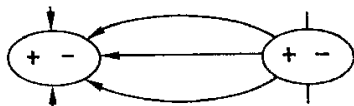


Bild 51. Schematische Darstellung der Van-der- Waals'sche Bindung

6.3.6 Gemischte Bindungen

Nur in wenigen Fällen kann eine Bindung zwischen Atomen eindeutig einer der Grundarten zugeordnet werden. Meist liegen gemischte Bindungen vor.

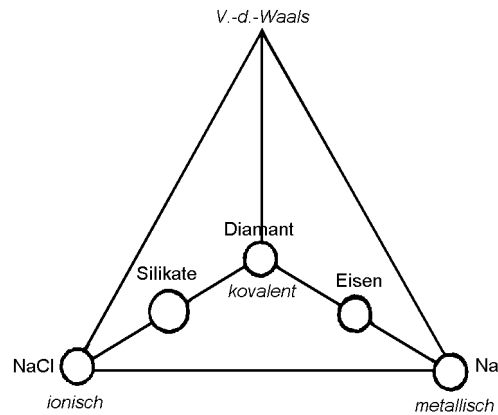


Bild 52. Bindungszustand verschiedener Stoffe

6.3.7 Bindungsenergie und Atomabstand

Die Wechselwirkungen zwischen den Elektronen und Protonen benachbarter Atome führen zu abstoßenden und anziehenden Kräften zwischen den Atomen. Die abstoßende Kraft nimmt mit wachsendem Abstand der Bindungspartner stärker ab als die anziehende. Daraus resultiert die Anziehung von Atomen untereinander. Umgekehrt ist es, wenn der Abstand sehr klein wird. Hier überwiegt die abstoßende Kraft. Der Gleichgewichtsabstand stellt sich dort ein, wo die Summe aus abstoßender und anziehender Kraft gleich Null ist.

Anziehende Kräfte:

$$F_{AN} = -\frac{k}{a^n}$$

Abstoßende Kräfte:

$$F_{AB} = \frac{l}{a^m}$$

l, k : Konstanten, die von der Bindungsart, Ordnungszahl etc. abhängen.

$$F(a) = F_{AN} + F_{AB} = -\frac{k}{a^n} + \frac{l}{a^m}$$

$n \approx 6, \quad m \approx 12, \quad$ empirisch ermittelt

Im Gleichgewichtszustand gilt:

$$F = 0, \quad a = a_0$$

wobei a_0 der Abstand zwischen den Atomen in Ruhelage ist, solange keine Energie (Wärme, äußere Kräfte) von außen zugeführt wird.

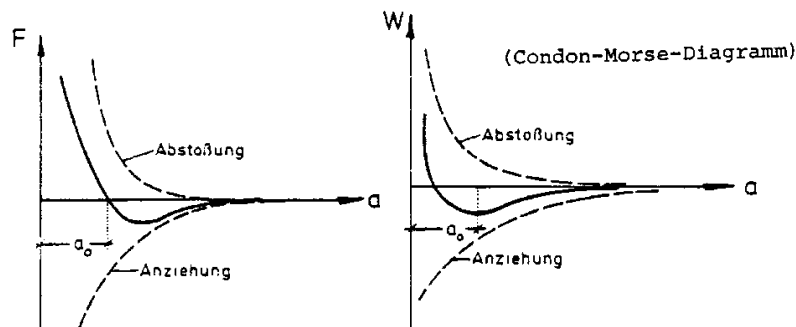


Bild 53. Kraft- und Energiebilanzen von Atomen im Kristallgitter

Um zwei Atome mit einem Abstand a völlig voneinander zu trennen ($a \rightarrow \infty$), muss Arbeit geleistet werden, die so groß wie die potentielle Energie der Verbindung $W(a)$ ist. Die Bindungsenergie ist:

$$W(a) = -\int_0^{\infty} F(a) \cdot da = -\int_0^{\infty} \left[-\frac{k}{a^n} + \frac{l}{a^m} \right] \cdot da$$

$$W(a) = -\frac{A}{a^N} + \frac{B}{a^M}$$

mit:

$$A = \frac{k}{n-1}, \quad N = n-1$$

$$B = \frac{l}{m-1}, \quad M = m-1$$

Da
$$W(a) = -\int_0^{\infty} F(a) \cdot da$$

bzw.
$$F(a) = -\frac{dW(a)}{da}$$

erreicht $W(a)$ das Minimum in der Ruhelage $a = a_0$. Zur Änderung dieses Zustands ist daher ein Maximum an äußerer Arbeit zu leisten.

6.4 Charakteristische Werkstoffeigenschaften als Folge von Bindungsart und Bindungsenergie

6.4.1 Festigkeit

Ein tiefes, stark gekrümmtes Energieminimum ist eine Voraussetzung für hohe Festigkeit.

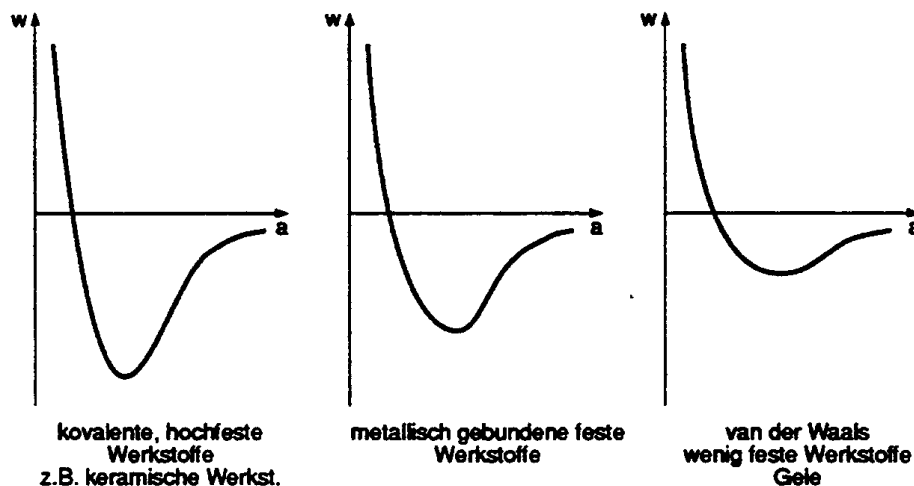


Bild 54. Energiebilanzen verschiedener kristalliner Werkstoffe

6.4.2 Duktilität und Sprödigkeit

Voraussetzung für Duktilität ist, dass die Bindungen zwischen den Atomen nicht orientiert sind:

Kovalente Bindung: spröde Werkstoffe

Metallische Bindung: duktile Werkstoffe

6.4.3 Elastizitätsmodul

Durch eine äußere Kraft werden die Atome aus ihrem Gleichgewichtsabstand a_0 gebracht.

Eine Zugkraft F verursacht eine Verlängerung des Atomabstands um einen Betrag Δa .

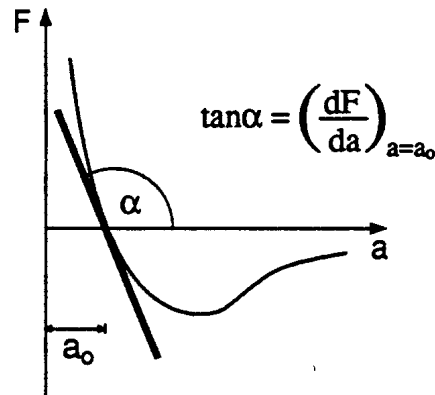


Bild 55. Ableitung des E-Moduls aus dem Kraft-Abstands-Diagramm

Da $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, ergibt sich für E

$$E = \frac{\Delta F}{A} \cdot \frac{a_0}{\Delta a} = \frac{a_0}{A} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta a}$$

Für kleine Längenänderungen ist

$$E = c \cdot \frac{dF}{da} \text{ an der Stelle } a = a_0 \text{ mit } c = \text{const.}$$

Da $W(a) = - \int_0^{\infty} F(a) \cdot da$

ist $F(a) = - \frac{dW}{da}$

und $E = c \cdot \frac{dF}{da} = c \cdot \frac{d^2W}{da^2}$ an der Stelle $a = a_0$ mit $c = \text{const.}$

Daraus folgt, dass die Steigung der Funktion $F(a)$ bei $a = a_0$ bzw. die Krümmung der Funktion $W(a)$ bei $a = a_0$ dem Elastizitätsmodul eines Werkstoffs entsprechen!

Stoffe mit stark gekrümmtem (engem), tiefliegendem Energieminimum besitzen einen hohen Elastizitätsmodul.

6.4.4 Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit

Voraussetzung: Vorhandensein freier Elektronen

Kovalente Bindung: schlecht leitfähig (Isolatoren)

Metallische Bindung: gut leitfähig

Ionenbindung: in Lösung elektrisch leitfähig

6.4.5 Siedepunkt und Temperaturdehnung

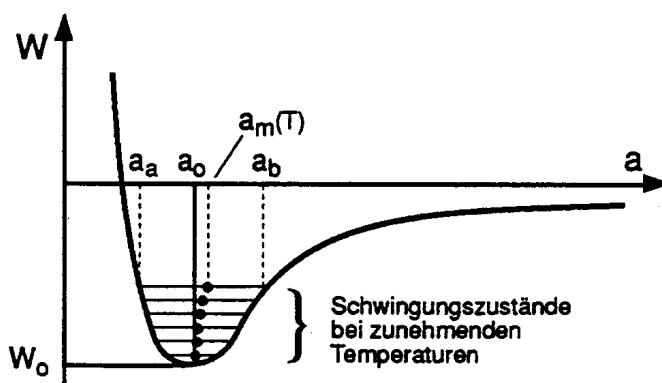


Bild 56. Thermische Ausdehnung eines Kristalls

Ein Atomabstand $a = a_0$ stellt sich nur dann ein, wenn keine äußere Energie zugeführt wird, d.h., wenn sich das Element am absoluten Nullpunkt befindet: $T = 0 \text{ K}$ (Null Kelvin).

Bei einer Temperatur über 0 K schwingen die Bindungspartner gegeneinander. Ihr Abstand schwankt zwischen a_a und a_b (siehe Bild 56).

Wird die Temperatur von 0 K langsam gesteigert, so oszillieren die Atome zwischen den Werten a_a und a_b um einen Mittelwert $a_m(T)$. Der Zuwachs $a_m(T) - a_0$ entspricht der Temperaturexpansion. Diese ist umso größer, je asymmetrischer die Funktion $W = W(a)$ ist.

Makroskopisch wird die Temperaturexpansion durch den linearen Temperaturexpansionskoeffizienten α beschrieben (siehe Abschn. 2.3).

Es gilt:

$$\frac{a_m(T) - a_0}{a_0} = \frac{l(T) - l_0}{l_0} = \alpha \cdot T$$

Wird die Temperatur bis zum Siedepunkt gesteigert, so ist der Atomabstand nach oben nicht mehr beschränkt. Die thermische Energie der Teilchen ist so groß wie ihre Bindungsenergie. Der Siedepunkt ist daher proportional zu W_0 . Jedem Bindungstyp entspricht eine bestimmte Form der Potentialkurve. Der Stoff schmilzt, wenn die relative Temperaturexpansion einen bestimmten Wert, der vom Bindungstyp abhängt, erreicht. Für jeden Stoff eines Bindungstyps (z.B. der metallischen Bindung) ist dieser Wert $\delta(T_s)$ gleich (T_s : Schmelztemperatur).

Es gilt:

$$\delta(T_s) = \alpha \cdot T_s$$

D.h. für Stoffe, die den gleichen Bindungstyp haben, ist ein Zusammenhang $\alpha \sim T_s^{-1}$ zu erwarten.

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen der Schmelztemperatur T_s und dem Temperaturexpansionskoeffizienten α für Metalle. Die Hyperbel entspricht der Theorie.

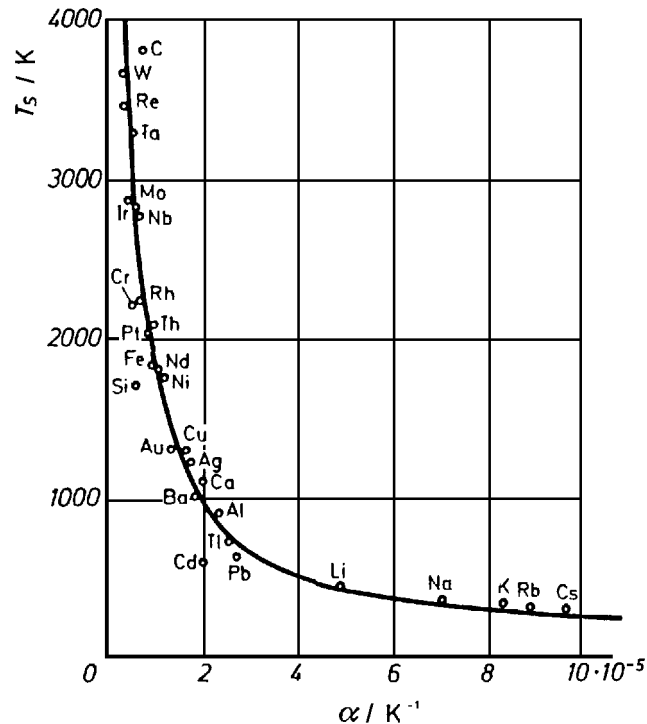


Bild 57. Zusammenhang zwischen der Schmelztemperatur T_s und dem Temperaturdehnungskoeffizienten α für Metalle

6.5 Aufbau und Eigenschaften kristalliner Werkstoffe

Grundregeln für die Anordnung von Atomen in einem Kristallgitter

Atome versuchen, sich so zu einem Raumgitter anzuordnen, dass

1. die potentielle Energie zu einem Minimum wird,
2. die Anzahl der Bindungen zwischen den Atomen zu einem Maximum wird,
3. die Bedingungen aus der Orientierung der Bindungen erfüllt sind,
4. die elektrostatische Neutralität gewahrt bleibt.

Unterschieden wird daher zwischen Raumgittern für:

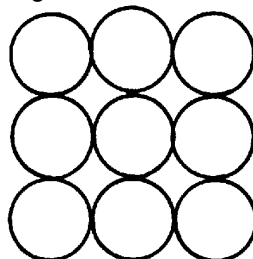
1. orientierte Bindungen
2. nicht orientierte Bindungen zwischen gleichen Atomen
3. nicht orientierte Bindungen zwischen ungleichen Atomen

6.5.1 Die Kugelpackungen

Die Atome lassen sich idealisiert durch Kugeln darstellen.

Es bestehen drei Möglichkeiten, Kugeln in einem vorgegebenen Volumen anzuordnen.

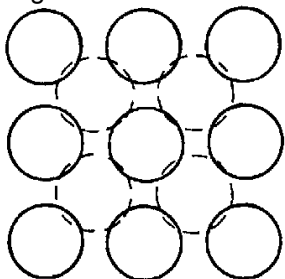
1. Möglichkeit - **kubisch primitiv**



$$\text{Füllgrad } V_{\text{fest}} / V = 0,52$$

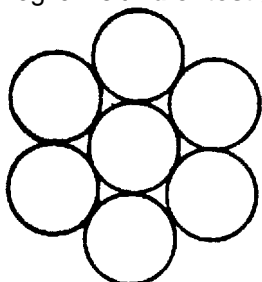
$$\text{Anzahl der Nachbarn } k = 6$$

2. Möglichkeit - **kubisch raumzentriert**

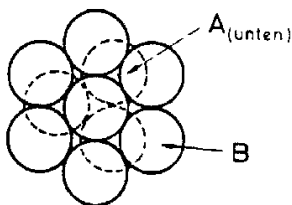


Füllgrad $V_{\text{fest}} / V = 0,68$
Anzahl der Nachbarn $k = 8$

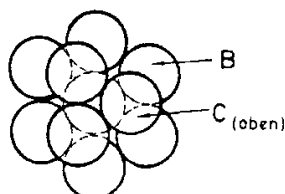
3. Möglichkeit - **dichtest gepackt**



In einer Ebene kann eine Kugel maximal von 6 gleich großen Kugeln umgeben sein. 3 darüberliegende und 3 darunterliegende Kugeln können die Zentralkugel zusätzlich berühren.



Liegen Ober- und Unterschicht übereinander, so entsteht eine Schichtfolge A B A (Fall 1: **hexagonal dichteste Packung**)



Ist die oberste Schicht gegenüber der untersten Schicht um 60° versetzt, so ergibt sich eine Schichtfolge A B C A B C (Fall 2: **kubisch flächenzentriert**)

Füllgrad $V_{\text{fest}} / V = 0,74$
Anzahl der Nachbarn $k = 12$

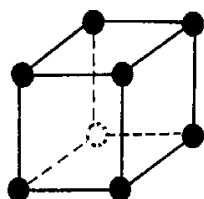
Die **Koordinationszahl k** gibt die Anzahl der Atome an, die ein Zentralatom umgeben. Sie ist ein Maß für die Dichte einer Kugelpackung ($k_{\text{max}} = 12$).

6.5.2 **Wichtige Kristallstrukturen**

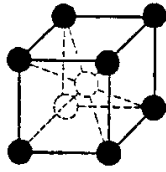
Atome gleicher Größe

Aus den Kugelpackungen nach Abschn. 6.5.1 ergeben sich vier elementare Kristallstrukturen:

kubisch primitiv

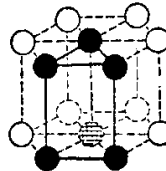


An den Eckpunkten der Elementarzelle befindet sich je ein Atom.
Beispiel: NaCl, wenn zwischen Na- und Cl-Atomen nicht unterschieden wird.

kubisch raumzentriert (krz)

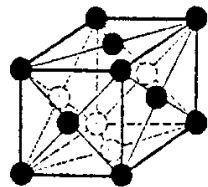
Die mittlere Kugel mit den entsprechenden Oktanten ihrer 8 Nachbarn stellt eine Elementarzelle dar.

Beispiele: α -Eisen, Kalium, Natrium, Molybdän

hexagonal dichteste Packung (hdp)

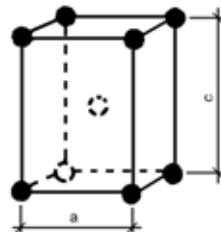
6 Kugeln, die um eine mittlere Kugel angeordnet sind, bilden den Teil eines Hexagons. Die Grundflächen der Elementarzelle sind dichtest gepackte Ebenen.

Beispiele: Magnesium, Zink, Titan, Kobalt

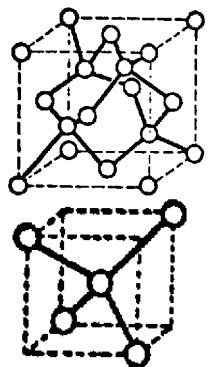
kubisch flächenzentriert (kfz)

Eine um $35,2^\circ$ (Winkel zwischen Raumdiagonale und Würfelflächen) gegenüber den dichtest gepackten Flächen geneigte Raumfläche bildet die Außenfläche einer kubischen Elementarzelle. Die Außenfläche der Elementarzelle und die dichtest gepackten Ebenen sind nicht identisch.

Beispiele: γ -Eisen, Aluminium, Blei, Kalzium, Silber, Gold, Platin, Nickel, Kupfer

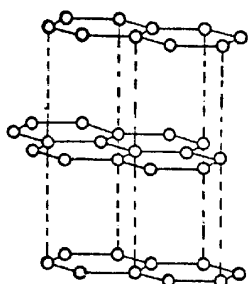
Andere Kristallstrukturen**Tetragonal**

Ähnlich der krz-Struktur, Verhältnis $a / c \neq 1$
Beispiele: Martensit, Zinn

Diamant

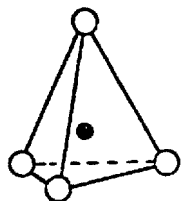
Besteht ausschließlich aus Kohlenstoffatomen. Die besondere Kristallstruktur ergibt sich aus der Orientierung der kovalenten Bindungen. In der Diamantenstruktur kristallisiert z.B. auch Silizium.

Graphit



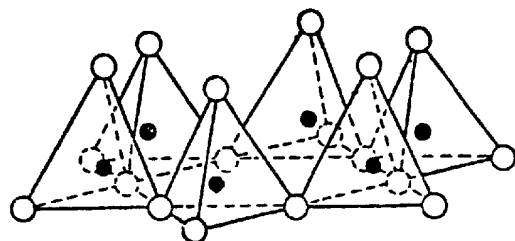
Eine weitere Modifikation des Kohlenstoffs (Schichtenstruktur). Er besitzt innerhalb der Schichten kovalente Bindung und zwischen den Schichten metallische Bindung.

Silikate



Die Atome "O" und "Si" sind in Form von Tetraedern angeordnet, die sich aus der Orientierung der Bindung ergeben.

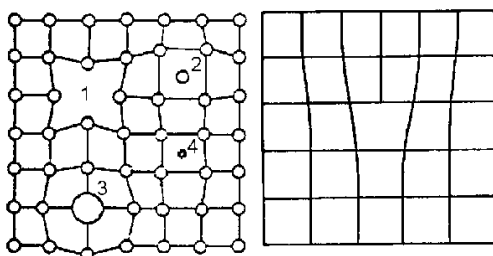
○ Sauerstoff ● Silizium



Die Einzeltetraeder können zwei- oder dreidimensional angeordnet sein.

6.5.3 Begriffe und Kenngrößen von Kristallen

- primitive Elementarzelle: kleinste Grundeinheit des Raumgitters
- Gitterparameter: charakteristische Länge einer Elementarzelle, z.B. Atomabstand
- Realkristalle: In der Natur vorkommende Kristallformen, deren Regelmäßigkeit durch Kristallfehler gestört ist.
- Kristallfehler: Kristalle sind in ihrem Aufbau nicht immer regelmäßig. Sie können örtliche Störungen oder Fehler besitzen. Die wichtigsten sind **Punktfehler** (fehlende, zusätzliche oder artfremde Atome) und **Linienfehler** oder Versetzungen (z.B. eingeschobene, unvollständige Kristallebenen = **Stufenversetzung**).



- 1 - Leerstelle
- 2 - Zwischengitteratom
- 3 - Substitutionsfremdatom
- 4 - Einlagerungsfremdatom

Bild 58. Punktfehler und Stufenversetzung

Mischkristalle: Realkristalle, die aus verschiedenen Atomen oder Molekülen bestehen.

Dichtest gepackte Ebenen: Kristallebenen, in denen gleichgroße Atome, als Kugeln dargestellt, einander berühren und in der Ebene je 6 Nachbarn besitzen.

Dichtest gepackte Richtungen:	Richtungen, die durch eine Gerade (Vektor) dargestellt werden können und entlang denen sich die Atome, durch Kugeln dargestellt, berühren.
Gleitebenen:	Ebenen, auf denen ein Verschieben von Atomen gegeneinander am leichtesten möglich ist.
Spaltebenen:	Ebenen, entlang denen eine Spaltung der Kristallebenen bzw. eine Trennung der Atome am leichtesten möglich ist.
Millersche Indizes:	System zur Bezeichnung von Ebenen und Richtungen in einem Kristallsystem.

6.5.4 Charakteristische Werkstoffeigenschaften als Folge der Kristallstruktur der Werkstoffe

Verschiedene Kristallstrukturen unterscheiden sich in:

- Packungsdichte
- Verzahnung der Atome entlang charakteristischer Ebenen
- Isotropie, s. Abschn. 5.1.

Sie beeinflussen daher vor allem folgende Werkstoffeigenschaften:

- Dichte
- Plastische Verformbarkeit
- Festigkeit und Bruchverhalten
- Richtungsabhängigkeit bestimmter Eigenschaften, z.B. Spaltbarkeit von Graphit

6.6 Amorphe Werkstoffe - Stoffe aus langen Kettenmolekülen

Die meisten amorphen Werkstoffe bestehen aus Molekülketten (kettenartige Aneinanderreihung von Einzelbausteinen). Diese Bausteine können Moleküle sein, die selbst eine Ordnung besitzen. Die Molekülketten können querverbunden oder vernetzt sein.

Monomere:	Grundbausteine der Molekülketten
Polymere:	Molekülketten
Vernetzungsgrad:	Ausmaß der Querverbindungen zwischen den Molekülketten

Je nach Vernetzungsgrad wird unterschieden zwischen:

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. Kettenpolymeren | ↓
steigender
Vernetzungs-
grad |
| 2. Elastomeren | |
| 3. Dreidimensionale Netzwerken | |

Speziell bei Kunststoffen unterscheidet man:

- | | |
|-----------------|---|
| 1. Thermoplaste | = Kettenpolymere |
| 2. Elastoplaste | = Elastomere |
| 3. Duroplaste | = Raumpolymere = dreidimensionale Netzwerke |

6.6.1 Kettenpolymere - Thermoplaste

Thermoplaste sind Kettenmoleküle oder verzweigte Ketten, die ohne Ordnung und Querverbindungen im Raum angeordnet sind.



Bild 59. Kettenmolekül und verzweigte Kette

Bindungsart zwischen den Ketten: Van-der-Waals'sche Bindung
 Bindungsart innerhalb der Ketten: meist kovalent

Eigenschaften: meist kleiner E-Modul, große Kriechverformungen, geringe Temperaturbeständigkeit, hohe Temperaturabhängigkeit aller mechanischen Eigenschaften

Beispiele: Viele Kunststoffe, z.B.
 Polyäthylen PE (C₂H₄)_n
 Polyvinylchlorid PVC (C₂H₃Cl)_n

6.6.2 Elastomere

Elastomere sind Kettenmoleküle mit geringem Vernetzungsgrad (etwa alle 100 - 1000 Monomere). Da die Querverbindungen die Ketten nach ihrer Verformung in ihre Ursprungslage zurückführen, besitzen sie eine große elastische Verformbarkeit.

Eigenschaften: Niedriger E-Modul, große elastische Verformbarkeit

Beispiel: Vulkanisierter Weichgummi (durch Zusatz von Schwefel, Graphit etc. werden zwischen den langen Kettenmolekülen des Naturgummis während des Vulkanisierens Querverbindungen geschaffen: Neopren, Butadien-Kautschuk (Buna))

6.6.3 Dreidimensionale Netzwerke - Duroplaste

Zwischen den Kettenmolekülen werden so viele Querverbindungen geschaffen, dass ein durchgehendes Netzwerk von Molekülketten entsteht.

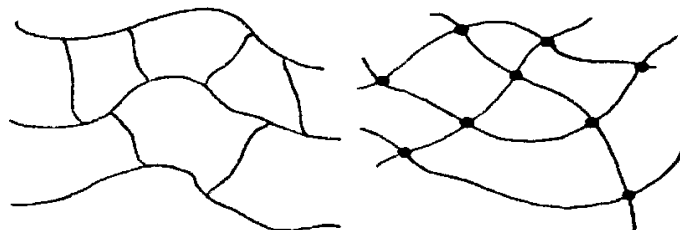


Bild 60. Netzwerkmodifikationen bei Duroplasten

Eigenschaften: Erhöhte Steifigkeit, Festigkeit, Temperaturwiderstand, reduzierte plastische Verformbarkeit

Beispiele: Epoxydharz, Polyesterharz, anorganisches Oxid- und Silikatglas

6.6.4 Charakteristische Werkstoffeigenschaften als Folge des Vernetzungsgrads

Mit zunehmendem Vernetzungsgrad steigen:

- Festigkeit
- Steifigkeit (E-Modul)
- Temperaturbeständigkeit
- Kriechwiderstand

Thermoplaste: schmelz- und schweißbar

Duroplaste: kein Schmelzen, sondern thermische Zersetzung bei Temperatursteigerung

6.7 Sole und Gele

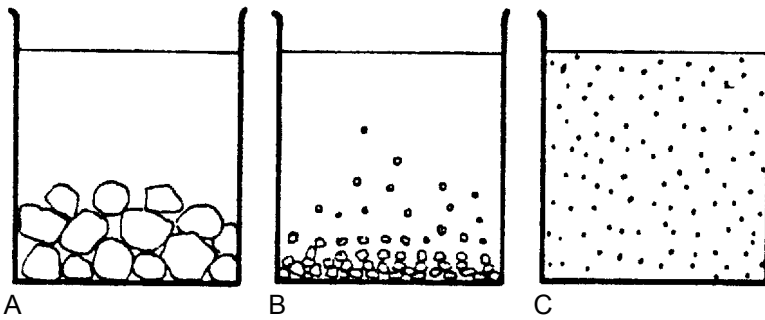


Bild 61. Verteilung verschieden großer Partikel in einer Flüssigkeit

Beispiel A: In einem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter sinken grobe Partikel schnell ab.

Beispiel B: In einem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter sinken feine Partikel langsam ab.

Beispiel C: Partikel kolloidaler Größe (1-1000 nm) sinken nicht mehr ab, sondern sind in der Flüssigkeit gleichmäßig verteilt. Es entsteht eine Suspension (Sol).

Wird dem Sol Wasser entzogen, so entsteht ein starrer Körper (Gel).

6.7.1 Oberflächenspannung - Oberflächenenergie

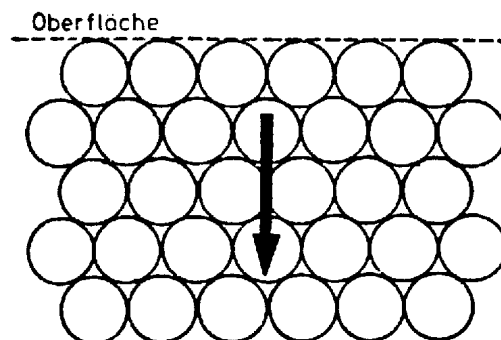


Bild 62. Abnahme des Energieniveaus in oberflächennahen Schichten

Da die oberflächennahen Atome aufgrund der geringeren Anzahl von Wechselwirkungspartnern eine geringere Energieabsenkung als die oberflächenfernen Atome erfahren, liegt ihr Energieniveau höher. Das bedeutet andererseits, dass zur Erzeugung von Oberflächen Energie aufgewendet werden muss. Die auf die Oberflächenzunahme bezogene aufzuwendende Energie wird als **spezifische Oberflächenenergie** σ bezeichnet:

$$\sigma = \frac{\text{Energiezunahme } \Delta W}{\text{Oberflächenzunahme } \Delta S}$$

Die spezifische Oberflächenenergie und die Oberflächenspannung sind zahlen- und dimensionsmäßig identisch.

Folgen:

1. Atome oder Moleküle versuchen sich so anzuordnen, dass bei gegebenem Volumen ihre Oberfläche zu einem Minimum wird (Kugel).
2. Die Oberflächenspannung führt zu Kräften, die nach innen gerichtet sind (Van-der-Waals'sche Kräfte) und zur Adsorption von benetzenden Flüssigkeiten oder Gasen.
3. An einem Werkstoffpartikel wirken daher Massenkräfte und Oberflächenkräfte.

Die **Massenkräfte** sind dem Volumen, die **Oberflächenkräfte** der Oberfläche des Partikels proportional. Da mit kleiner werdendem Durchmesser eines Partikels das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen wächst, steigt entsprechend das Verhältnis der Oberflächenkräfte zu den Massenkräften. Teilchen, die so klein sind, dass die Oberflächenkräfte größer als die Massenkräfte sind, besitzen kolloidale Größe (1-1000 nm).

6.7.2 Die Struktur von Solen und Gelen

Sol: Die einzelnen Partikel sind durch die flüssige Phase deutlich voneinander getrennt.

Gel: Die Festkörper des Gels bilden ein zusammenhängendes, homogenes Gerüst und sind in ihrer Lage zueinander fixiert. Es gibt Bereiche, die mit Flüssigkeit gefüllt sind (Kapillarporen) und Bereiche zwischen Partikeln (Gelporen).

Bindungen zwischen den Partikeln = Van-der-Waals'sche Kräfte

Elastisches Gel: Die einzelnen Partikel sind nur an wenigen Punkten miteinander verbunden (ähnlich langen Kettenmolekülen).

Starres Gel: Die Partikel bilden ein verwobenes dreidimensionales Netzwerk.

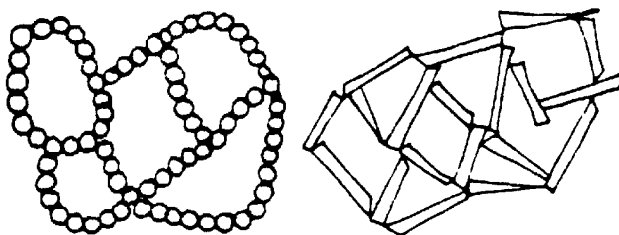


Bild 63. Verschiedene Gelstrukturen mit Kapillarporen

Wichtigste Strukturparameter der Sole und Gele sind:

- Teilchengröße
- Porosität
- Konzentration der festen und der flüssigen Phase
- Vernetzungsgrad

7 Herstellung und Formgebung von Werkstoffen

Fast alle Baustoffe sind Mischungen verschiedener Komponenten. Durch das Mischen von Komponenten können Werkstoffeigenschaften besonders einfach und wirksam beeinflusst werden.

Die Mischung mindestens zweier metallischer Komponenten wird als Legierung bezeichnet.

7.1 Mischen von Werkstoffkomponenten

Sind die Komponenten eines Werkstoffs im festen und flüssigen Zustand ineinander völlig löslich, so entsteht ein kontinuierliches, homogenes Gefüge.

Gase sind unbegrenzt mischbar. Bei Flüssigkeiten und Gläsern ist die Mischbarkeit größer als bei kristallinen Stoffen, da die geometrischen Bedingungen für die Löslichkeit von untergeordneter Bedeutung sind. Unterschieden wird zwischen voller und beschränkter Löslichkeit.

Bei beschränkter Löslichkeit entstehen Phasen (s. Abschn. 5.2). Phasen- und Kornaufbau eines Werkstoffs sind für seine mechanischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Sie können durch Wärme oder mechanische Behandlung beeinflusst werden, so dass damit auch die Eigenschaften des Werkstoffs gezielt verändert werden können.

7.2 Phasendiagramme

Phasendiagramme geben Anzahl und Zusammensetzung der Phasen an (s. Abschn. 5.2), die in einem Werkstoff aus mehreren Komponenten bei einer bestimmten Temperatur und bestimmten Gewichtsanteilen der Komponenten auftreten.

Es wird unterschieden zwischen Phasendiagrammen für den:

- Gleichgewichtszustand
- metastabilen Zustand
- Ungleichgewichtszustand

Gleichgewichtszustand:

Die Zusammensetzung der Phasen aus verschiedenen Komponenten ist so, dass ein Minimum der potentiellen Energie des Gesamtsystems erreicht wird (stabiler Zustand).

Metastabiler Zustand:

Die sich einstellenden Phasen sind zwar stabil, führen aber noch nicht zu einem Minimum der potentiellen Energie.

Ungleichgewichtszustand:

Durch plötzliches Abkühlen einer Schmelze wird eine bestimmte Zusammensetzung von Phasen "eingefroren", die nur bei hohen Temperaturen dem Gleichgewicht entspricht. Mit der Zeit strebt der so entstandene Ungleichgewichtszustand einem stabilen oder metastabilen Zustand zu.

7.2.1 Mischung von zwei Komponenten mit voller Löslichkeit

Volle Löslichkeit

Die Struktur der Mischung und der Einzelkomponenten sind gleich. Die Atome der Komponente mit der geringeren Volumenkonzentration ordnen sich als Fremd- oder Substitutionsatome in das Kristallgitter der anderen Komponente ein. Es entstehen Mischkristalle.

Voraussetzungen für die volle Löslichkeit sind Komponenten mit:

1. gleicher Kristallstruktur
2. annähernd gleicher Größe (Größenunterschied <15 %)
3. verträglichen Ladungen
4. annähernd gleicher Anzahl von Valenzelektronen (chemische Ähnlichkeit)

Beispiel: Kupfer-Nickel-Legierung

Tab. 9. Chemische Kennwerte von Cu und Ni

Element	Kristallstruktur	Atomare Ordnungszahl	Anzahl von Valenzelektronen
Cu	kfz	29	1
Ni	kfz	28	2

Damit sind die Voraussetzungen für volle Löslichkeit erfüllt!
 Es kommt zur Bildung von Mischkristallen mit kfz-Struktur, die bei der Abkühlung einer Schmelze aus Nickel und Kupfer entstehen.

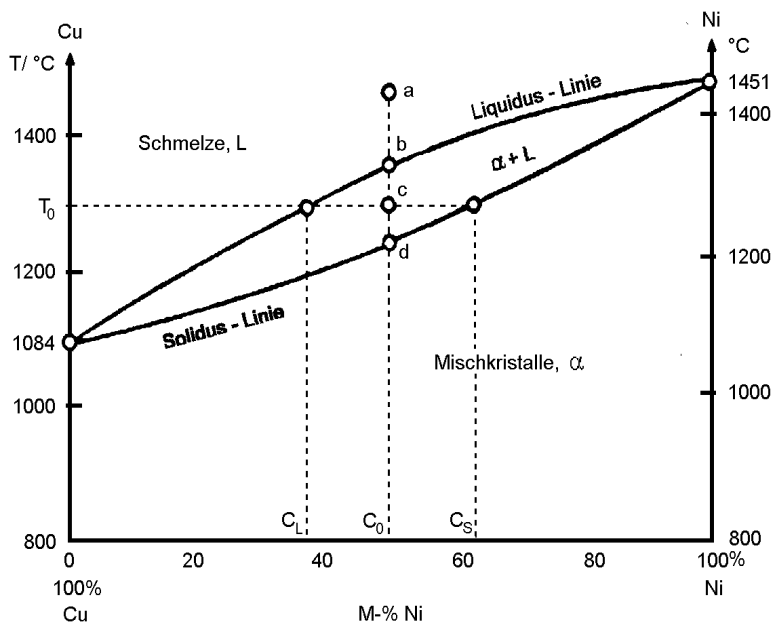


Bild 64. Phasendiagramm Cu-Ni

- Schmelze** flüssige Phase (Liquidus) = L
- Mischkristall** feste Phase (Solidus) = S oder α
- Liquiduslinie** Beginn des Erstarrens der Schmelze beim Abkühlen (Schmelzpunkt)
- Soliduslinie** Ende des Erstarrungsvorgangs beim Abkühlen

Experimentelle Bestimmung von Phasendiagrammen

Beim Abkühlen einer Schmelze weist die Abkühlkurve (Beziehung zwischen Temperatur und Zeit) charakteristische Knick- oder Haltepunkte auf, die Punkten auf der Liquidus- oder Soliduslinie entsprechen. Ihre Ursache sind Energieumwandlungen, die bei Phasenänderungen auftreten.

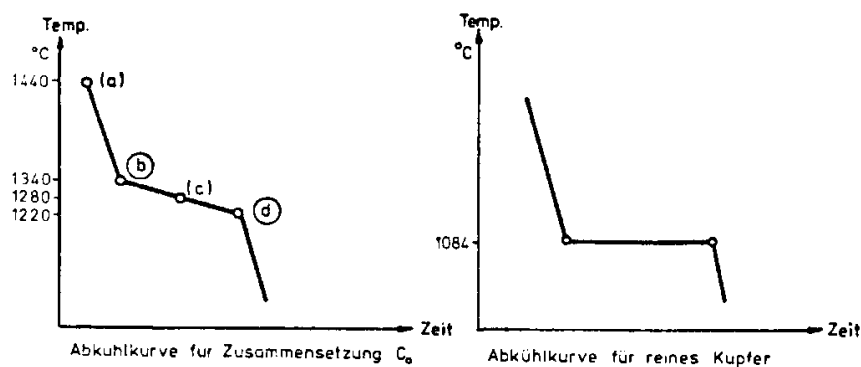


Bild 65. Abkühlkurven für Cu-Ni-Legierungen (vergl. Phasendiagramm)

Mit der Hilfe der Gibbs'schen Phasenregel kann bestimmt werden, ob in der Abkühlkurve Knick- oder Haltepunkte auftreten:

$$F = K + 2 - P$$

F Anzahl der Freiheitsgrade bzw. der möglichen Variablen (Temperatur, Druck, Zusammensetzung)

K Anzahl der Komponenten

P Anzahl der Phasen

Im Normalfall bleibt während der Abkühlung der Schmelze der Druck konstant, so dass sich die Anzahl der Freiheitsgrade um 1 reduziert. Es gilt dann:

$$F = K + 1 - P$$

Beispiel 1: 100 M-% Cu bei $T = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$ (Schmelzpunkt des reinen Kupfers)

$$K = 1$$

$$P = 2 \text{ (L und } \alpha \text{)}$$

$$F = 0$$

d.h. die Temperatur muss konstant bleiben, bis die gesamte Schmelze vom festen in den flüssigen Zustand umgewandelt ist. Die Abkühlkurve hat einen Haltepunkt.

Beispiel 2: 50 M-% Cu, 50 M-% Ni, an der Liquidus-Linie (Punkt b im Phasendiagramm)

$$K = 2 \text{ (Cu und Ni)}$$

$$P = 2 \text{ (L und } \alpha \text{)}$$

$$F = 1$$

Die Abkühlkurve hat einen Knick, die Temperatur bleibt veränderlich.

Der Massenanteil der Phasen in einer Legierung mit der Zusammensetzung C_0 bei einer bestimmten Temperatur T_0 kann nach der Waage-Regel (Gesetz der abgewandten Hebelarme) berechnet werden (vgl. Bild 64):

Gehalt an fester Phase S

der Zusammensetzung C_0 :
$$\frac{C_0 - C_L}{C_S - C_L} \cdot 100, \text{ in M-\%}$$

Gehalt an flüssiger Phase L

der Zusammensetzung C_0 :
$$\frac{C_S - C_0}{C_S - C_L} \cdot 100, \text{ in M-\%}$$

Die Zusammensetzung der Phase hängt von der Temperatur ab, bei der sie ausgeschieden wird. Sie ergibt sich aus der S- bzw. L-Linie für die jeweilige Temperatur.

Flüssige Phase: Kupferanteil: $(1 - C_L) \cdot 100$ in M-%
Nickelanteil: $C_L \cdot 100$ in M-%

Feste Phase: Nickelanteil: $C_S \cdot 100$ in M-%
Kupferanteil: $(1 - C_S) \cdot 100$ in M-%

7.2.2 Mischung von zwei Komponenten mit beschränkter Löslichkeit

Beschränkte Löslichkeit

Sind nicht alle Bedingungen für volle Löslichkeit erfüllt, so kann eine Komponente nur einen beschränkten Volumenanteil einer anderen Komponente aufnehmen. Es entstehen bei zwei vorhandenen Komponenten zwei Phasen.

Phase 1: Kristallstruktur der 1. Komponente mit beschränktem Gehalt an Atomen der 2. Komponente

Phase 2: Kristallstruktur der 2. Komponente mit beschränktem Gehalt an Atomen der 1. Komponente

Beispiel: Blei-Zinn-Legierung

Tab. 10. Chemische Kennwerte von Pb und Sn

Element	Kristallstruktur	Atomare Ordnungszahl	Anzahl von Valenzelektronen
Pb	kfz	82	2
Sn	Tetragonal	50	2

Damit sind die Voraussetzungen für volle Löslichkeit nicht erfüllt!
Die vorhandene beschränkte Löslichkeit führt jedoch zur Bildung von **Mischkristallen** α und β .

α kfz-Struktur des Pb mit Sn als Einlagerungsatome

β Tetragonale Struktur des Sn mit Pb als Einlagerungsatome

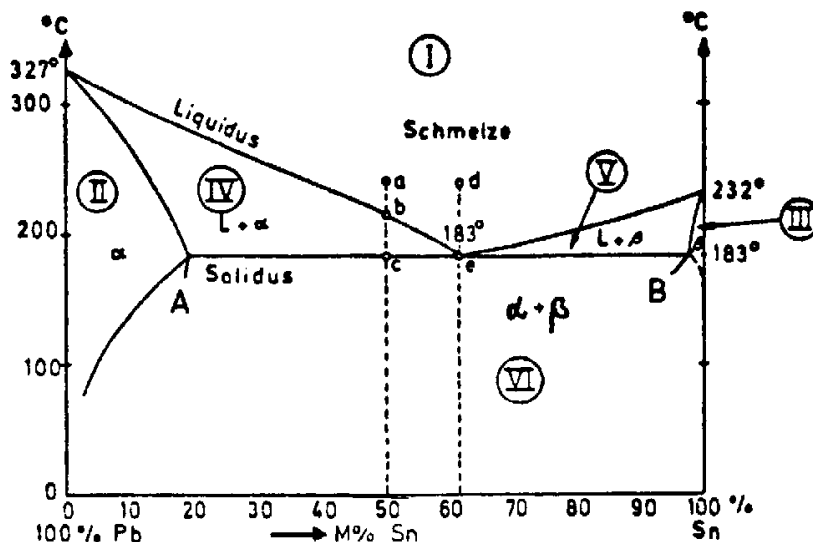


Bild 66. Phasendiagramm Pb-Sn

Bereich I: Oberhalb der Liquiduslinie liegt ein Gemisch von Pb und Sn als Schmelze vor.

Bereich II: Bildung von α -Mischkristallen

Bereich III: Bildung von β -Mischkristallen

Bereich IV: α -Mischkristalle und Schmelze (L)

Bereich V: β -Mischkristalle und Schmelze (L)

Bereich VI: Die gesamte Schmelze ist erstarrt. Es sind sowohl α - als auch β -Mischkristalle vorhanden. Ihre Zusammensetzung ändert sich mit sinkender Temperatur, da die Löslichkeit von Pb in Sn und Sn in Pb mit fallender Temperatur absinkt.

Linie II / IV + II / VI: gibt die Löslichkeit von Sn in Pb an.

Linie III / V + III / VI: gibt die Löslichkeit von Pb in Sn an.

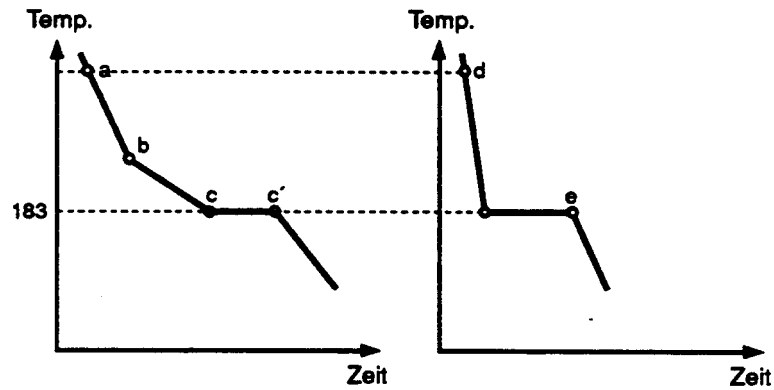


Bild 67. Abkühlkurven für Pb-Sn-Legierungen

Eutektikum

Der niedrigste Schmelzpunkt einer Blei-Zinn-Legierung stellt sich bei einer Zusammensetzung von 39 M-% Blei und 61 M-% Zinn ein (Eutektikum). Beim Erreichen der eutektischen Temperatur von 183 °C geht die Schmelze direkt in den festen Zustand über.

Nach der Gibbs'schen Phasenregel ist hier:

$$\begin{aligned} P &= 3 \text{ (L, } \beta, \alpha) \\ K &= 2 \text{ (Pb und Sn)} \\ F &= 0 \end{aligned}$$

Beim Erreichen der eutektischen Temperatur weist die Abkühlkurve daher einen Haltepunkt auf. Eine Legierung mit eutektischer Zusammensetzung besteht aus einer besonders homogenen Mischung von α - und β -Mischkristallen. Liegt die Zusammensetzung einer Legierung links vom Eutektikum, ist sie **untereutektisch**, liegt sie rechts vom Eutektikum, so ist sie **übereutektisch**. Legierungen mit einer Zusammensetzung der Komponenten zwischen A und B (s. Phasendiagramm Pb-Sn) haben beim Erreichen der eutektischen Temperatur eine Restschmelze mit eutektischer Zusammensetzung, die dann während eines Haltepunkts der Abkühlkurve zu einer eutektischen Struktur erstarrt.

7.2.3 Mischung von zwei Komponenten, die ineinander unlöslich sind

Für zwei im festen Zustand nicht ineinander lösliche Komponenten mit unterschiedlichen Schmelzpunkten ergibt sich folgendes Phasendiagramm:

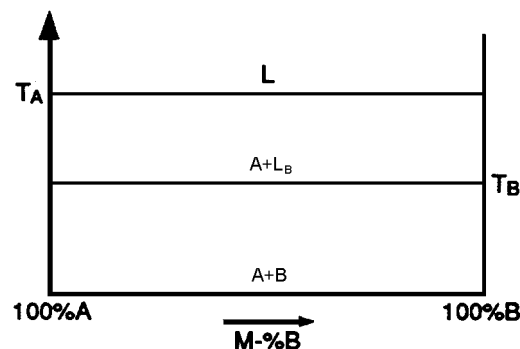


Bild 68. Phasendiagramm zweier im festen Zustand unlöslicher Komponenten

- L Schmelze aus den Komponenten A und B
- A Reine Phase aus A-Kristallen
- B Reine Phase aus B-Kristallen
- L_B Schmelze der reinen Komponente B
- T_A Schmelzpunkt der Komponente A
- T_B Schmelzpunkt der Komponente B

7.2.4 Die Entstehung des Metallgefüges

Beim Erstarren eines Metalls aus dem schmelzflüssigen Zustand beginnen die Kristalle an vielen Stellen gleichzeitig zu wachsen. Mit fortschreitender Erstarrung wachsen die Kristalle aufeinander zu bis sie aneinander stoßen. Die einzelnen Kristalle, deren Kristallgitter unterschiedlich orientiert sind, nennt man **Körner**. Wenn bei geringer Abkühlgeschwindigkeit die Erstarrung langsam verläuft, entsteht ein grobkörniges Gefüge. Hohe Abkühlgeschwindigkeiten ergeben ein feinkörniges Gefüge.

Die Größe der Körner und die Ablagerungen an den Korngrenzen beeinflussen wesentlich die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Metalls.

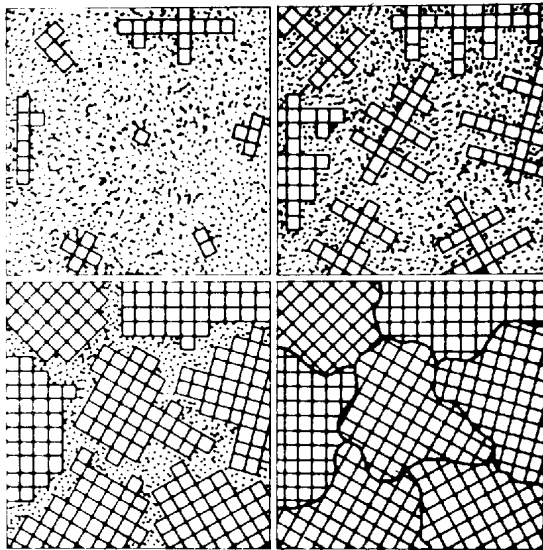


Bild 69. Gefügebildung beim Erstarren eines Metalls

Um Kristallisationskeime bilden sich die ersten Kristalle (oben links), die regelmäßig weiterwachsen (oben rechts), bis sie aneinander stoßen (unten links) und durch gegenseitige Behinderung unregelmäßige Begrenzungsflächen bilden (**Korngrenzen**).

7.2.5 Weitere Begriffe

Eutektoid

Bei manchen Mehrphasensystemen sind auch Phasenumwandlungen im festen Zustand möglich. Ähnlich wie beim Erstarren einer Schmelze kann auch hier ein singulärer Punkt entstehen, den man als **Eutektoid** bezeichnet. Die Temperatur, bei der diese Umwandlung eintritt, ist die **eutektoidische Temperatur** (Beispiel: Eisen-Kohlenstoff-System, Bild 70).

Peritektikum

Bei der Abkühlung einer festen Phase mit Schmelze unter die **peritektische Temperatur** tritt eine Umwandlung in eine andere, feste Phase ein (Beispiel: Eisen-Kohlenstoff-System, Bild 70).

7.3 Stahl und Gusseisen

Stahl und Gusseisen sind Legierungen aus Eisen und Kohlenstoff sowie anderen Legierungskomponenten, z.B. Si, Mn, Ni, Cr, Mo, W, Ti.

Die Stahlsorten und deren Zusammensetzung werden mit Hilfe des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms unterteilt.

Stahl und Gusseisen unterscheiden sich im C-Gehalt:

Stahl: Kohlenstoffgehalt < 2,1 %

Gusseisen: Kohlenstoffgehalt > 2,1 %

7.3.1 Struktur des reinen Eisens

In verschiedenen Temperaturbereichen nimmt reines Eisen unterschiedliche Kristallstrukturen an:

Tab. 11. Kristall-Modifikationen des Eisens

Bezeichnung	Temperaturbereich	Struktur
α -Fe	< 911 °C	krz
γ -Fe	911 – 1392 °C	kfz
δ -Fe	1392 – 1563 °C	krz
	> 1563 °C	Schmelze

7.3.2 Grundstrukturen des Eisen-Kohlenstoff-Systems (Fe-C-System)

Die Löslichkeit des Kohlenstoffs im Eisen ist beschränkt. Daher entstehen Fe-C-Mischkristalle nur bei kleinen Kohlenstoffgehalten. Die Menge an gelöstem Kohlenstoff fällt mit sinkender Temperatur und ist beim γ -Eisen (kfz) größer, als beim α - und beim δ -Eisen (krz):

Tab. 12. Grundstrukturen des Fe-C-Systems

Bezeichnung	Temperaturbereich	Kohlenstoffgehalt C_{\max}	Metallurgischer Name
α_M -Fe	< 911 °C		Ferrit
γ_M -Fe	723 – 1493 °C	2,1 %	Austenit
δ_M -Fe	1392 – 1563 °C	0,2 %	

Primärzementit, Fe_3C

Bei Kohlenstoffgehalten > 4,3 % wird Zementit direkt aus der Schmelze ausgeschieden.

Sekundärzementit, Fe_3C

Bei der Umwandlung von Austenit (γ_M) in den kohlenstoffärmeren Ferrit (α_M) wird Sekundärzementit Fe_3C ausgeschieden.

Perlit

Gefüge des Eisen-Kohlenstoff-Gemischs bei eutektoider Zusammensetzung ($C = 0,83\%$). Bei der Abkühlung unter 723 °C wird Austenit (γ_M) in Ferrit (α_M) und Zementit (Fe_3C) umgewandelt. Perlit besteht aus dünnen, aufeinanderfolgenden Schichten von Fe_3C und Ferrit.

Ledeburit

Gefüge des Eisen-Kohlenstoff-Gemischs bei eutektischer Zusammensetzung ($C = 4,3\%$). Bei $T > 723\text{ °C}$ besteht es aus fein verteiltem Fe_3C und Austenit (γ_M).

Bei $T < 723\text{ °C}$ besteht es aus Fe_3C und α_M bzw. Fe_3C und Perlit.

7.4 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

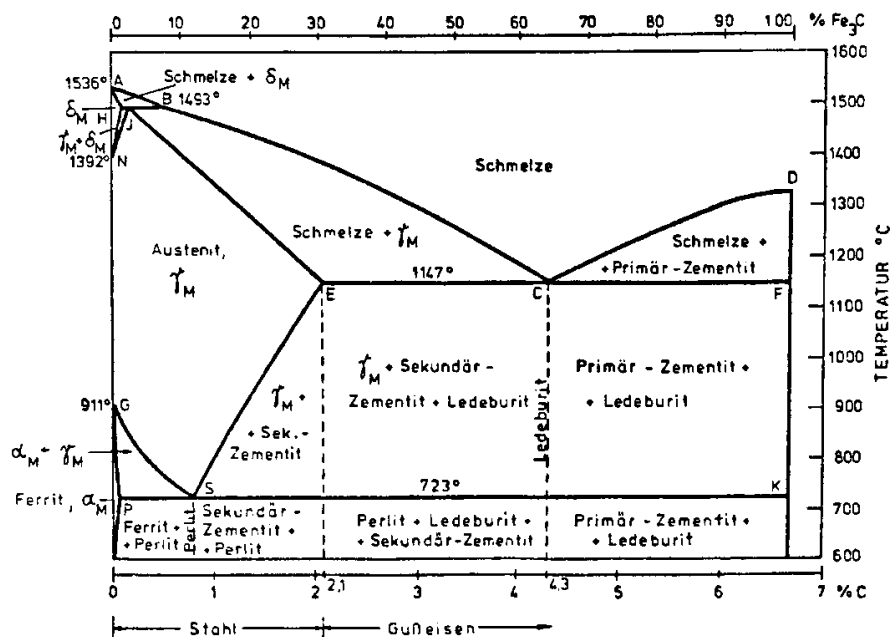


Bild 70. Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Es wird unterschieden zwischen Fe-C-Diagramm (maximaler C-Gehalt: 6,7 %, **stabiles System**) und Fe-Fe₃C-Diagramm (**metastabiles System**). Bei hohen C-Gehalten kann aus dem Fe₃C (metastabiles System) elementarer Kohlenstoff (Graphit) ausgeschieden werden (stabiles System).

Wichtige ausgezeichnete Punkte:

- A **Schmelzpunkt** des reinen Eisens, T = 1536 °C
- C **Eutektikum** bei 4,3 % C, T = 1147 °C
- S **Eutektoid** bei 0,83 % C, T = 723 °C
- J **Peritektikum** bei 0,2 % C, T = 1493 °C

7.4.1 Stähle bei Raumtemperatur

Untereutektoider Stahl: C < 0,83 %

Bestandteile: Ferrit und Perlit

Beim Abkühlen aus dem Austenitbereich (γ_M) wird Ferrit (α_M) ausgeschieden.

Bei 723 °C wird der verbleibende Austenit (γ_M) zu Perlit umgewandelt.

Eutektoider Stahl: C = 0,83 %

Er besteht aus reinem Perlit.

Bei T = 723 °C wird γ_M in α_M umgewandelt und der überschüssige Kohlenstoff als Fe₃C ausgeschieden.

Übereutektoider Stahl: 0,83 % < C < 2,1 %

Bestandteile: Sekundärzementit und Perlit

Beim Abkühlen des reinen Austenits wird zunächst Sekundärzementit ausgeschieden. Bei 723 °C bildet sich Perlit aus dem noch verbleibenden Austenit.

7.4.2 Gusseisen bei Raumtemperatur (2,1 % < C < 4,3 %)

Weißes Gusseisen: Kohlenstoff liegt in Form von Fe₃C vor

Graues Gusseisen: Kohlenstoff liegt in Form von Graphit vor

Untereutektisches, weißes Gusseisen

Bestandteile: Perlit, Ledeburit und Sekundärzementit

Bei ca. 1300 °C erstarrt Austenit aus der Schmelze. Bei 1147 °C findet die eutektische Umwandlung unter Bildung von Austenit und Ledeburit statt. Bei weiterer Abkühlung wird Sekundärzementit ausgeschieden. Das verbleibende Austenit wird bei 723°C, dem Eutektoid, in Perlit umgewandelt.

Untereutektisches, graues Gusseisen

Bestandteile: Ferrit und Graphit

Erstarrung nach dem stabilen Eisen-Graphit-System. Beim Abkühlen unter 1147 °C wird Graphit aus dem Austenit (γ_M) ausgeschieden. Bei $T < 723$ °C wandelt sich das verbleibende Austenit in Ferrit und Graphit um.

Beim grauen Gusseisen wird unterschieden zwischen:

Gusseisen mit Lamellengraphit (GG)

Lamellenartige Anordnung des Graphits, dadurch besonders spröde.

Gusseisen mit Kugelgraphit (GGG)

Nach Zugabe von anderen Legierungselementen (z.B. Mg, Cr) Bildung von kugelförmigem Graphit, erhöhte Duktilität und Zugfestigkeit.

Temperguss (GT)

Erstarren aus der Schmelze unter Zugabe von Legierungskomponenten zu Ledeburit und Perlit (weißes Gusseisen) mit nachfolgender Wärmebehandlung. Zerfall des Fe_3C in Eisen und kugeligen Graphit, besonders zäh und zugfest.

7.4.3 Bedeutung des C-Gehalts für die mechanischen Eigenschaften der Stähle

Mit steigendem C-Gehalt des Stahls erhöht sich seine Streckgrenze und Zugfestigkeit, Duktilität und Bearbeitbarkeit nehmen ab.

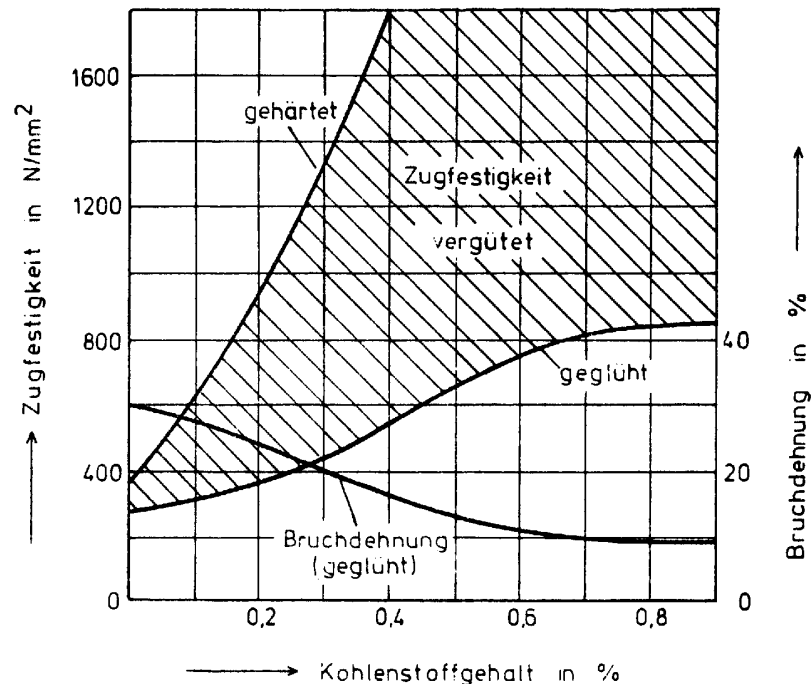


Bild 71. Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Stahl in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt

7.5 Formgebung und Wärmebehandlung

Werkstoffe müssen zu ihrer technischen Verwendung in bestimmte Formen gebracht werden. Die Möglichkeiten der Formgebung eines Werkstoffs hängen von Mikrostruktur, Gefüge und Bindungsart ab. Die Art der Formgebung selbst kann die Struktur des Werkstoffs entscheidend beeinflussen.

7.5.1 Formgebung durch Schmelzen und Erstarren

Anwendung: Bei Stoffen mit relativ niedrigem Schmelzpunkt

- z.B.
- Metalle
 - Thermoplaste
 - Gläser

Vorgang:

1. **Schmelzen:** Die Atome und Moleküle sind frei beweglich.

2. **Gießen** in Formen:

- z.B.
- Sandguss
 - Schleuderguss
 - Kokillenguss
 - Hohl-guss
 - Spritzguss
 - Strangguss

3. **Erstarren** in der Form

Die Erstarrung der Schmelze bei Abkühlung beginnt an den Wandungen der Form. Bei kristallinen Stoffen bilden sich dort, ausgehend von Kristallisationskeimen, einzelne Körner.

Einfluss auf das Gefüge:

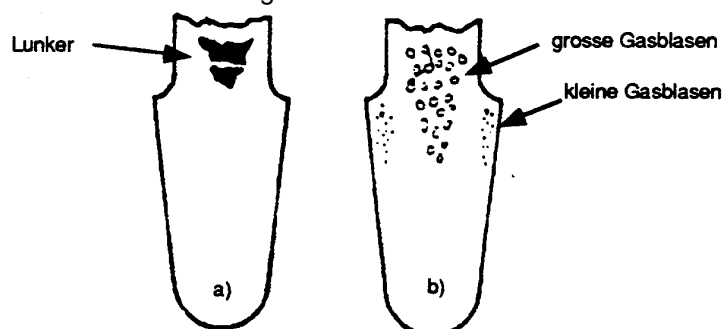


Bild 72. Lunkerbildung beim Kokillenguss

- a) Volumenänderungen (Schrumpfen) verursachen ein Absinken des Spiegels der Schmelze und die Bildung von Hohlräumen in der Mitte der Form (**Lunkerbildung**).
- b) Die Schmelze kann gelöste Gase enthalten, deren Löslichkeit mit sinkender Temperatur abfällt. Beim Erstarren werden die Gase ausgeschieden. Es bilden sich eingeschlossene **Gasblasen**.
- c) In einer Legierung kann die Löslichkeit eines Legierungselements mit sinkender Temperatur fallen. Dadurch erhöht sich während des Erstarrens die Konzentration dieser Legierungskomponente in der noch verbleibenden Schmelze. Es kommt zu Entmischungen (**Seigerungen**).

Beispiel Stahl: Die Löslichkeit von Kohlenstoff und Eisenoxiden sinkt mit der Temperatur. Der noch nicht erstarrte Kern wird kohlenstoffreicher. Die Reaktion von ausgeschiedenem C mit FeO führt zur Bildung von CO₂-Gas (Kochen des Stahls). Ein so hergestellter Stahl wird als **unberuhigter Stahl** bezeichnet. Die Reaktion von FeO kann durch Zugabe von Legierungselementen als Oxidbildner (z.B. Si) reduziert oder verhindert werden (**beruhigter Stahl**).

7.5.2 Formgebung durch Kalt- oder Warmverformung

Anwendung: Bei Werkstoffen, die im kalten bzw. warmen Zustand plastisch verformbar sind.

- z.B.
- Metalle
 - Thermoplaste
 - Gläser

Definitionen:

Kaltverformung

Bearbeitung des Werkstoffs bei Temperaturen unterhalb der Rekristallisationstemperatur (s. Abschn. 7.5.3)

Warmverformung

Verformung bei Temperaturen oberhalb der Rekristallisationstemperatur

Technische Formgebungsverfahren:

Warmverformung

Schmieden
Stauchen oder Pressen
Walzen

Kaltverformung

Walzen
Ziehen
Recken
Strangpressen
Verdrillen
Schlagen

Folgen einer Kaltverformung:

1. Der **Werkstoff wird verfestigt**, die Duktilität nimmt ab, z.B. bei Stahl.
Ursache: Erhöhung der Versetzungsdichte, Blockieren von Versetzungen (siehe Abschn. 5.5)
2. Der **Werkstoff wird anisotrop**: Die Kaltverformung verursacht eine bleibende Streckung der einzelnen Körner in Richtung der äußeren Beanspruchung. Der Werkstoff verliert dadurch die Isotropie.
3. Die **Oberfläche wird rau**, Bildung sog. **Lüderslinien**.

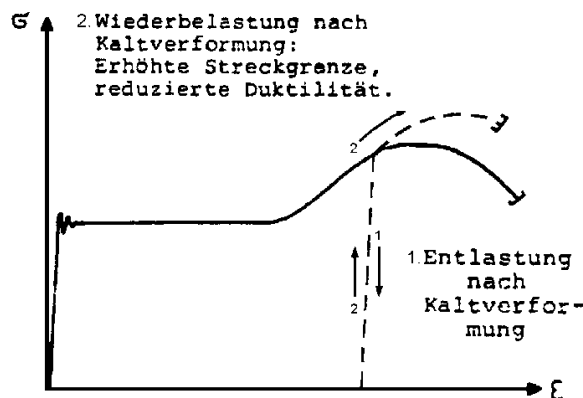


Bild 73. Folgen einer Kaltverformung

Folgen einer Warmverformung:

1. Der Werkstoff kann sich entfestigen.
Beispiel: Vorher kaltverformter Stahl
2. Bildung einer Walzhaut

7.5.3 Nachbehandlung

Die mechanischen Eigenschaften von durch Gießen oder Verformen hergestellten Werkstoffen können durch eine Nachbehandlung verbessert werden.

Definitionen:

Nachbehandlung: Im allgemeinen Temperierung eines Werkstücks nach vorangegangener Formgebung

Vergüten: Gezielte Verbesserung der Werkstoffeigenschaften: Festigkeit, Streckgrenze, Duktilität

Homogenisieren: Leichtes Erwärmen zum Ausgleich von Konzentrationsunterschieden

Glühen: Erwärmen eines Werkstoffs auf relativ hohe Temperaturen und darauffolgendes langsames Abkühlen

Härten: Erwärmen und darauffolgendes schnelles Abkühlen (Abschrecken)

Strukturveränderungen während des Glühens:

Kristallerholung

Abbau von Eigenspannungen, die während einer vorangegangenen Kaltverformung entstanden sind. Versetzungen ordnen sich um.

Rekristallisation

Oberhalb der Rekristallisationstemperatur wachsen aus den durch vorhergegangene Kaltverformung verspannten Körnern völlig neue Körner. Sie beginnen meist an den Stellen stärkster Gitterstörungen und gehen, ähnlich wie die Erstarrung aus der Schmelze, von Keimen aus. Somit wird die Versetzungsdichte im Kristallgitter verringert.

Bei vorhergegangener schwacher Kaltverformung: Geringe Rekristallisation.

Nach starker Kaltverformung: Starke Rekristallisation und Bildung vieler kleiner Körner, da viele Keime vorhanden sind.

Die Rekristallisationstemperatur eines Werkstoffs hängt vom Maß der vorhergegangenen Kaltverformung ab: Je größer die plastische Verformung, desto kleiner die Rekristallisationstemperatur.

Tab. 13. Rekristallisations- und Schmelztemperaturen verschiedener Werkstoffe

Werkstoff	Rekristallisations-temperatur in °C	Schmelzpunkt in °C
Eisen	450	1537
Aluminium	150	660
Kupfer	200	1083
Nickel	600	1453
Zink	<20	420
Blei	<20	327
Zinn	<20	231

Kornwachstum

Bei langandauernder Wärmebehandlung oberhalb der Rekristallisationstemperatur schließen sich kleine Körner zu größeren Körnern zusammen.

7.6 Diffusionsvorgänge - Sintern

Anwendung: Stoffe mit sehr hoher Schmelztemperatur oder Verbundwerkstoffe, deren Komponenten stark unterschiedliche Schmelzpunkte haben, werden durch Sintern hergestellt.

- z.B.
- keramische Werkstoffe
 - Zemente
 - Cermets (Verbundwerkstoff aus einer keramischen und einer metallischen Phase)
 - Pulvermetallurgie

Vorgang:

Verbindung von Partikeln im festen Zustand durch Bewegung (Diffusion) einzelner Atome. Die Beweglichkeit der Atome wächst mit steigender Temperatur, so dass auch unterhalb der Schmelztemperatur ein Verschweißen der Partikel möglich ist. (vgl. Skriptum Baustoffkunde II, Abschn. 2.4f)

1. **Aufbereiten** der Rohstoffe zu einem Pulver
2. **Vermischen** des Pulvers
3. **Formgebung**, z.B. durch Pressen
4. Wärmebehandlung bei $T < T_{\text{Schmelz}}$

Parameter, welche die Eigenschaften des Werkstoffs beeinflussen:

1. Teilchengröße und Teilchengrößenverteilung
2. Zusatzstoffe
3. Druck
4. Sintertemperatur

7.7 Temperaturabhängige Prozesse

7.7.1 Arrheniusgleichung

Viele Vorgänge in der Natur sind temperaturabhängig. Die Beziehung zwischen der Geschwindigkeit eines Vorgangs und der Temperatur kann mit Hilfe der Arrheniusgleichung ausgedrückt werden.

$$v = A \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}$$

A Konstante

v Geschwindigkeit des Ablaufs

Q Aktivierungsenergie pro Mol, $[Q] = \frac{\text{J}}{\text{mol}}$

T absolute Temperatur, $[T] = \text{K}$

R Gaskonstante, $R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

Die Geschwindigkeit des Vorgangs nimmt mit steigender Temperatur zu. Sie ist nicht beliebig zu steigern, sondern strebt einem Endwert zu. Bei einer konstant bleibenden Temperatur steigt die Geschwindigkeit eines Vorgangs mit fallender Aktivierungsenergie. Für eine gegebene Aktivierungsenergie tritt eine Reaktion mit erkennbarer Geschwindigkeit erst oberhalb einer bestimmten Temperatur auf, s. Bild 74.

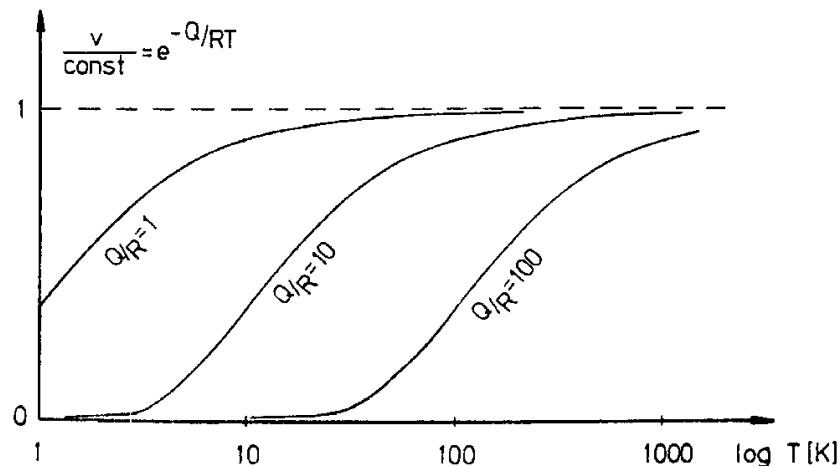


Bild 74. Verlauf der Reaktionsgeschwindigkeit für Stoffe mit verschieden hoher Aktivierungsenergie in Abhängigkeit von der Temperatur

7.7.2 Aktivierungsenergie

Um eine Reaktion zu ermöglichen, muss eine Aktivierungsbarriere überwunden werden, die zwischen zwei stabilen Positionen liegt. Die dazu erforderliche Energie heißt **Aktivierungsenergie**.

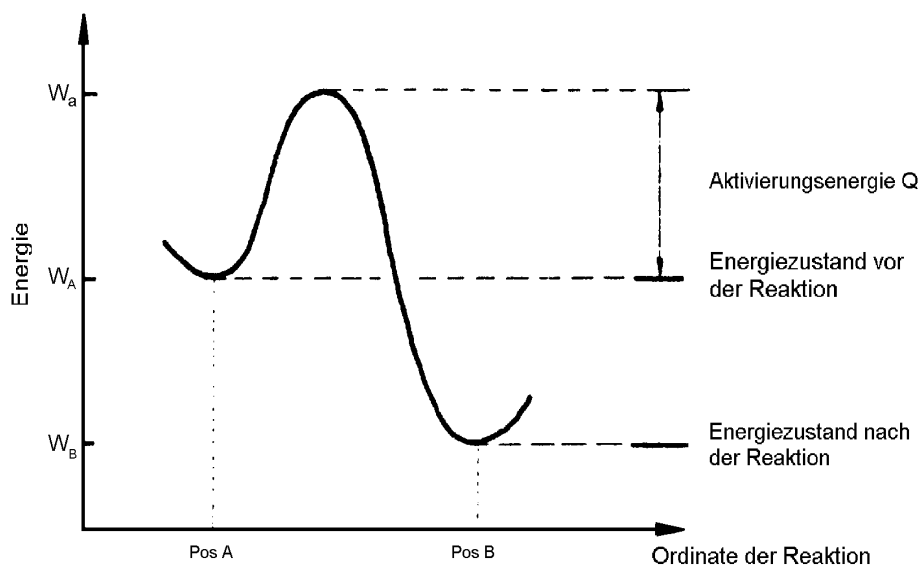


Bild 75. Energiezustände eines reaktionsfähigen Systems

Beispiel:

Platzwechselforgänge von Atomen in einem Kristallgitter werden durch die Schwingungen der Atome um ihre Ruhelage ermöglicht. Soll ein Atom von einer Position (A) in eine andere, energieärmere Position (B) wandern, so muss es auf dem Wege einen Energiezustand (W_a) annehmen, der größer als der Energiezustand bei A (W_A) oder bei B (W_B) ist.

Die Aktivierungsenergie Q kann experimentell bestimmt werden, indem die Geschwindigkeit eines Vorgangs bei verschiedenen Temperaturen ermittelt wird (siehe Bild 76):

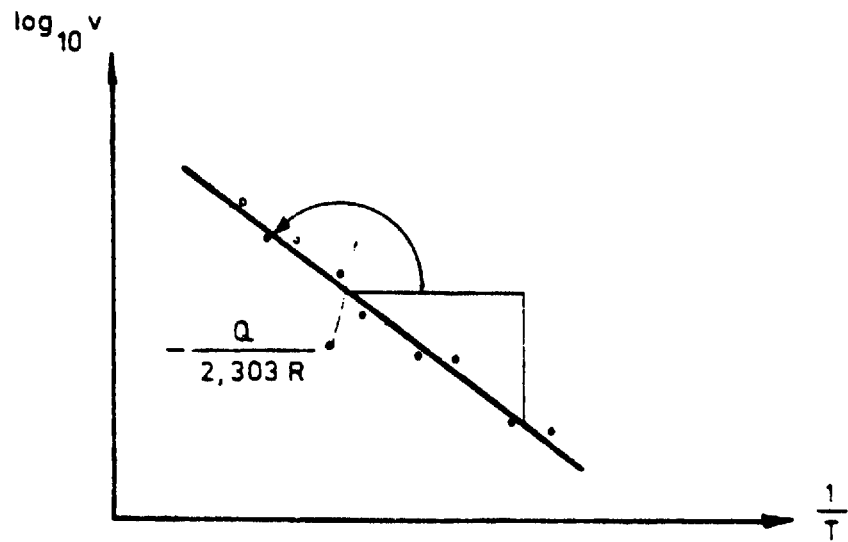


Bild 76.

$$v = A \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot T}}$$

$$\ln v = -\frac{Q}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln A$$

$$\log_{10} v = -\frac{Q}{2,303 \cdot R} \cdot \frac{1}{T} + \log_{10} A$$

8 Die wichtigsten Metalle im Bauwesen

Werkstoffe:

- Eisen
- Stahl
- Stahllegierungen
- Gusseisen
- Aluminium und seine Legierungen
- Kupfer
- Blei

8.1 Der Stahl

8.1.1 Definition

Stahl ist ein Werkstoff, dessen Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elements, dessen Kohlenstoffgehalt im Allgemeinen kleiner als 2 % ist und der andere Elemente enthält. Eine begrenzte Anzahl von Chromstählen kann mehr als 2 % Kohlenstoff enthalten, aber 2 % ist die übliche Grenze zwischen Stahl und Gusseisen. (DIN EN 10020 Ausgabe: 2000-07)

8.1.2 Ausgangsstoffe

Eisenerze bestehen zu 20 - 70 % aus Eisenoxiden:

Fe_3O_4	Magneteisenstein
Fe_2O_3	Roteisenstein
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	Brauneisenstein

und der sogenannten Gangart:

SiO_2	Kieselsäure
Al_2O_3	Tonerde
CaCO_3	Kalkstein
MgO	Magnesia

Zuschlag: prozessregulierende Stoffe, z.B. Kalk

Brennstoff: meist Koks

Im Hochofen werden die Eisenerze reduziert. Durch Reaktion von Eisenerz, Koks, Zuschlag und Luft entstehen Roheisen und Schlacke. Die Reaktionsprodukte werden weiterverarbeitet:

Roheisen zu

- | | | | |
|--------------|---------|-------|-------|
| - Gusseisen: | 2,1 % < | C < | 4,3 % |
| - Stahl: | C < | 2,1 % | |

Schlacke zu

- Hüttenzement (CEM III)
- Hüttensteinen
- Hüttenbims
- Hüttenwolle

8.1.3 Einteilung der Stähle

Die Einteilung der Stähle nach DIN EN 10020 erfolgt:

- nach der chemischen Zusammensetzung
- nach Hauptgüteklassen

Nach der chemischen Zusammensetzung werden unterschieden:

- unlegierte Stähle
bei denen für jedes Legierungselement ein Höchstwert festgelegt wird

- nicht rostende Stähle
mit Cr > 10 M-% und C < 1,2 M-%
- andere legierte Stähle
bei denen mindesten ein Legierungselement den Höchstwert für unlegierte Stähle überschreitet

Nach den Hauptgüteklassen wird folgendermaßen eingeteilt:

Unlegierte Stähle werden unterteilt in:

- Unlegierte Qualitätsstähle
- unlegierte Edelstähle

Nichtrostende Stähle werden nach Nickelgehalt unterschieden und nach den Haupteigenschaften in korrosionsbeständig, hitzebeständig und warmfest eingeteilt.

Andere legierte Stähle werden unterteilt in:

- legierte Qualitätsstähle
- legierte Edelstähle

Qualitätsstähle können legiert oder unlegiert sein. Für Qualitätsstähle bestehen im Allgemeinen festgelegte Anforderungen z.B. an die Zähigkeit, Korngröße oder Umformbarkeit. Aufgrund ihres unterschiedlichen Gehalts an nichtmetallischen Einschlüssen sind sie für eine Wärmebehandlung nicht geeignet. Zu den **unlegierten Qualitätsstählen** gehören Stahlbaustähle nach DIN 10025-2, schweißbare Feinkornbaustähle und Betonstähle. Zu den **legierten Qualitätsstählen** zählen schweißbare Feinkornbaustähle, legierte Stähle für Schienen, Spundbohlen und Grubenausbau, legierte Stähle für warm- oder kaltgewalzte Flacherzeugnisse für Kaltverformungen, sowie legierte Stähle in denen Kupfer das einzige festgelegte Legierungselement ist.

Edelstähle können legiert oder unlegiert sein. Sie weisen insbesondere bezüglich nichtmetallischer Einschlüsse einen höheren Reinheitsgrad auf als Qualitätsstähle. In den meisten Fällen sind sie für ein Vergüten oder Oberflächenhärten vorgesehen. Eine genaue Einstellung der chemischen Zusammensetzung und besondere Sorgfalt im Herstellungs- und Überwachungsprozess stellen verbesserte Eigenschaften zwecks Erfüllung erhöhter Anforderungen sicher.

8.1.4 Bezeichnungssysteme

Die Bezeichnung der Stähle erfolgt nach DIN EN 10027 durch Kurznamen und / oder Nummern. Diese Bezeichnungssysteme sind in Deutschland noch nicht vollständig für alle Erzeugnisgruppen eingeführt. Dies gilt vor allem für Betonstähle und Spannstähle.

Kurznamen bestehen aus Haupt- und Zusatzsymbolen sowie aus Angaben zur Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit. Die Stähle werden mit Kurznamen entweder nach ihrer Verwendung oder nach ihrer chemischen Zusammensetzung benannt.

Bezeichnung nach Verwendung:

Hauptsymbole:

S	Stähle für den Stahlbau
G	Stahlguss
P	Druckbehälterstahl
L	Stähle für Leitungsrohre
E	Maschinenbaustähle
B	Betonstähle
Y	Spannstähle

Zusatzsymbole:

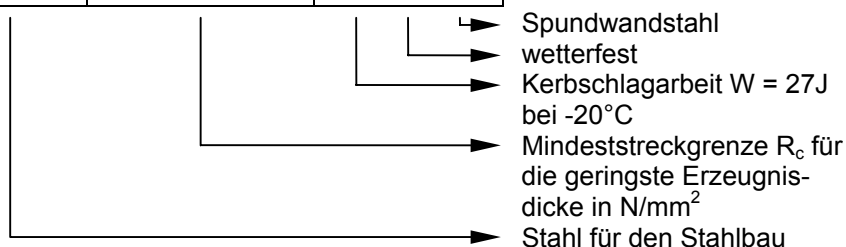
Kerbschlagarbeit			Prüftemp.
27 J	40 J	60 J	°C
JR	KR	LR	+20
J0	K0	L0	0
J2	K2	L2	-20
J3	K3	L3	-30
J4	K4	L4	-40
J5	K5	L5	-50
J6	J6	L6	-60

Daneben existieren noch weitere Zusatzsymbole, z.B.

- W wetterfest
- H Hohlprofile u.A.
- P Spundwandstahl

Beispiel:

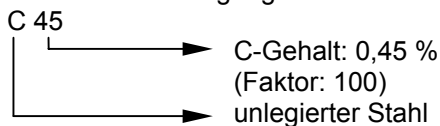
Hauptsymbol	Mindeststreckgrenze	Zusatzsymbole
S	355	J2 W P



Bezeichnung nach der chemischen Zusammensetzung

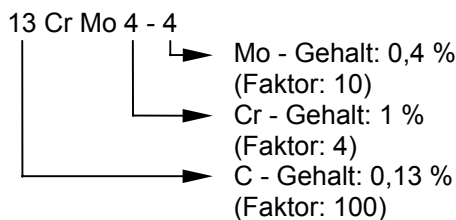
- für unlegierte Stähle mit einem mittleren Mangengehalt ≤ 1 %:

Beispiel:



- für unlegierte Stähle mit einem mittleren Mangengehalt > 1 % und für legierte Stähle mit Gehalten der einzelnen Legierungselementen < 5 % (niedrig legierte Stähle):

Beispiel:



Element	Faktor
Cr, Co, Mn, Si, Ni, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
C, N, P, S	100
B	1000

Tab. 14. Faktoren für die Ermittlung der Kennzahlen für niedrig legierte Stähle mit Legierungsgehalten der einzelnen Elemente < 5 %

- für legierte Stähle, wenn der Gehalt mindestens eines Legierungselements $\geq 5\%$ ist (hoch legierte Stähle):

Beispiel: X 40 Cr 13

Cr - Gehalt: 13 %
(Faktor 1)

C - Gehalt: 0,4 %
(Faktor 100)

Nummernsystem:

Das Nummernsystem ist wie folgt aufgebaut:

Beispiel: 1.0144

Zählnummer

Stahlgruppennummer,
hier: 01 = allgemeine
Baustähle mit
 $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$

Werkstoffhauptgruppen-
nummer, hier: 1 = Stahl

8.1.5 Stähle für den Stahlbau

Warmgewalzte unlegierte Baustähle (DIN EN 10025)

Sie sind die wichtigsten Stähle für den Stahlbau und in der Regel schweißbar.

Wetterfeste Baustähle und nichtrostende Stähle

(DIN EN 10155, DIN EN 10888)

Als wetterfest bezeichnet man Stähle, die durch den Zusatz geringer Mengen bestimmter Legierungselemente, insbesondere Cr, Cu, V und P, korrosionsbeständiger sind als normaler Baustahl. Die erhöhte Beständigkeit wird durch die Bildung einer Oxidschicht auf der Stahloberfläche bewirkt, die im Gegensatz zu normalem Rost dichter ist und besser haftet und somit den Korrosionsprozess aufhält.

Hochfeste Feinkornbaustähle (DIN EN 10113)

Diese Stähle sind schweißgeeignet und aufgrund ihrer erhöhten Streckgrenze für Geschossbauten, Stahlbrücken, Türme etc. einsetzbar.

Tab. 15. Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften für Flach- und Langerzeugnisse aus unlegierten Baustählen nach DIN EN 10025

Stahlsorte nach EN 10 027-1 und ECLASS IC 10	Stahlsorte nach EN 10025 (1990)	Frühere Bezeichnung nach DIN 17 100	Desoxi- dationsart ⁵⁾	Stahl- art ²⁾	Schmelzanalyse ⁷⁾ Massenanteile in %				Streckgrenze R_{eH} ¹⁾ in N/mm ² min.		Zugfestigkeit R_m ¹⁾ in N/mm ² für Nenn- dicken in mm		Bruchdehnung ¹⁾ in %, min. $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$	
					C ³⁾	Mn	Si	P, S je	> 16 ≤ 80	> 100 ≤ 100	< 3 ≥ 3	≥ 3 ≤ 100	≥ 3 ≤ 40	> 63 ≤ 100
S185 ⁴⁾	1.0035	Fe 310-0	freigestellt	BS	-	-	-	-	185	-	310 bis 540	290 bis 510	18 16	-
S235JR ⁴⁾	1.0037	Fe 360 B	freigestellt	BS	0,17	1,40	-	0,045	235	-	360 bis 510	340 bis 470	26 24	24 22
S235JRG2 ⁴⁾	1.0036	Fe 360 BFN	freigestellt	BS	0,17	1,40	-	0,045	235	-	360 bis 510	340 bis 470	26 24	24 22
S235JRG1 ⁴⁾	1.0038	Fe 360 BFN	freigestellt	BS	0,17	1,40	-	0,045	235	-	360 bis 510	340 bis 470	26 24	24 22
S235JO	1.0114	Fe 360 C	FN	QS	0,17	1,40	-	0,040	235	-	360 bis 510	340 bis 470	26 24	24 22
S235J2G3	1.0116	Fe 360 D1	FF	QS	0,17	1,40	-	0,035	235	-	360 bis 510	340 bis 470	26 24	24 22
S235J2G4	1.0117	Fe 360 D2	FF	QS	0,17	1,40	-	0,035	235	-	360 bis 510	340 bis 470	26 24	24 22
S275JR	1.0044	Fe 430 B	FN	BS	0,21	1,50	-	0,045	275	-	430 bis 580	410 bis 560	22 20	20 18
S275JO	1.0143	Fe 430 C	FN	QS	0,18	1,50	-	0,040	275	-	430 bis 580	410 bis 560	22 20	20 18
S275J2G3	1.0144	Fe 430 D1	FF	QS	0,18	1,50	-	0,035	275	-	430 bis 580	410 bis 560	22 20	20 18
S275J2G4	1.0145	Fe 430 D2	FF	QS	0,18	1,50	-	0,035	275	-	430 bis 580	410 bis 560	22 20	20 18
S355JR	1.0045	Fe 510 B	FN	BS	0,24	1,60	0,55	0,045	355	-	510 bis 680	490 bis 630	22 20	20 18
S355JO	1.0553	Fe 510 C	FN	QS	0,20	1,60	0,55	0,040	355	-	510 bis 680	490 bis 630	22 20	20 18
S355J2G3	1.0570	Fe 510 D1	FF	QS	0,20	1,60	0,55	0,035	355	-	510 bis 680	490 bis 630	22 20	20 18
S355J2G4	1.0577	Fe 510 D2	FF	QS	0,20	1,60	0,55	0,035	355	-	510 bis 680	490 bis 630	22 20	20 18
S355K2G3	1.0595	Fe 510 DD1	FF	QS	0,20	1,60	0,55	0,035	355	-	510 bis 680	490 bis 630	22 20	20 18
S355K2G4	1.0596	Fe 510 DD2	FF	QS	0,20	1,60	0,55	0,035	355	-	510 bis 680	490 bis 630	22 20	20 18
E295 ⁵⁾	1.0050	Fe 490-2	FN	BS	-	-	-	0,045	295	-	490 bis 660	470 bis 610	20 18	18 16
E335 ⁵⁾	1.0060	Fe 590-2	FN	BS	-	-	-	0,045	335	-	590 bis 770	570 bis 710	16 14	14 12
E360 ⁵⁾	1.0070	Fe 690-2	FN	BS	-	-	-	0,045	360	-	690 bis 900	670 bis 830	11 10	9 8

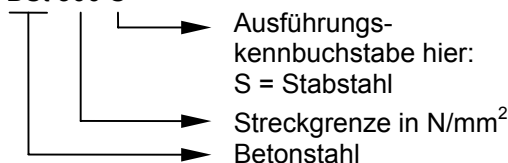
1) Die Werte für den Zugversuch in der Tabelle gelten für Längsproben (l), bei Band, Blech und Breitflachstahl in Breiten ≥ 600 mm für Querproben (t).
 2) BS: Grundstahl; QS: Qualitätsstahl.
 3) Für Erzeugnis-Nenn-dicken ≤ 16 mm.
 4) Nur in Nenn-dicken ≤ 25 mm lieferbar.
 5) Diese Stahlsorten kommen üblicherweise nicht für Profilerzeugnisse (L-, U-Winkel) in Betracht.
 6) FU: Unberuhigt; FN: Beruhigt; FF: Besonders beruhigt.
 7) N-Gehalt $\leq 0,009$ %.

8.1.6 Betonstähle (DIN 488, DIN ENV 10080)

Betonstähle werden zur Bewehrung von Beton eingesetzt und nehmen im Stahlbeton Zugspannungen auf. Die Normung für Betonstahl ist in Europa noch nicht harmonisiert, deshalb gilt in Deutschland DIN 488 T 1-7.

Bezeichnung

BSt 500 S



Tab. 16. Sorteneinteilung und Eigenschaften der Betonstähle nach DIN 488 T 1

	1	2	3	4	5	
Kurzname		BSt 420 S	BSt 500 S	BSt 500 M ²⁾	Wert p in % ³⁾	
Kurzzeichen ¹⁾		III S	IV S	IV M		
Werkstoffnummer		1.0428	1.0438	1.0466		
Erzeugnisform		Betonstabstahl	Betonstabstahl	Betonstahl- matte ²⁾		
1	Neendurchmesser d_s	mm	6 bis 28	6 bis 28	4 bis 12 ⁴⁾	-
2	Streckgrenze R_e (β) ⁵⁾ bzw. 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ ($\beta_{0,2}$) ⁵⁾	N/mm ²	420	500	500	5,0
3	Zugfestigkeit R_m (β) ⁵⁾	N/mm ²	500 ⁶⁾	550 ⁶⁾	550 ⁶⁾	5,0
4	Bruchdehnung A_{10} (δ_{10}) ⁵⁾	%	10	10	8	5,0
5	Dauerschwingfestigkeit gerade Stäbe ⁷⁾	N/mm ² Schwingbreite $2 \sigma_A (2 \cdot 10^6)$	215	215	-	10,0
6	gebogene Stäbe	$2 \sigma_A (2 \cdot 10^6)$	170	170	-	10,0
7	gerade freie Stäbe von Matten mit Schweiß- stelle	$2 \sigma_A (2 \cdot 10^6)$	-	-	100	10,0
8		$2 \sigma_A (2 \cdot 10^6)$	-	-	200	10,0
9	Rückbiegeversuch mit Biegerollendurchmesser für Neendurchmesser	6 bis 12 14 und 16	5 d_s	5 d_s	-	1,0
10			6 d_s	6 d_s	-	1,0
11	d_s in mm	20 bis 28	8 d_s	8 d_s	-	1,0
12	Biegedorndurchmesser beim Faltversuch an der Schweißstelle		-	-	6 d_s	5,0
13	Knotenscherkraft S	N	-	-	$0,3 \cdot A_s \cdot R_e$	5,0
14	Unterschreitung des Nennquerschnittes A_s ⁸⁾	%	4	4	4	5,0
15	Bezogene Rippenfläche f_R		Siehe DIN 488 T 2	Siehe DIN 488 T 2	Siehe DIN 488 T 4	0
16	Chemische Zusammen- setzung bei der Schmelzen- und Stückanalyse ⁹⁾	C	0,22 (0,24)	0,22 (0,24)	0,15 (0,17)	-
17		P	0,050 (0,055)	0,050 (0,055)	0,050 (0,055)	-
18	Massengehalt in %, max.	S	0,050 (0,055)	0,050 (0,055)	0,050 (0,055)	-
19		N ¹⁰⁾	0,012 (0,013)	0,012 (0,013)	0,012 (0,013)	-
20	Schweißbeignung für Verfahren ¹¹⁾		E, MAG, GP, RA, RP	E, MAG, GP, RA, RP	E ¹²⁾ , MAG ¹²⁾ , RP	-

¹⁾ Für Zeichnungen und statische Berechnungen.
²⁾ Die in dieser Spalte festgelegten Anforderungen gelten mit Ausnahme der Zeilen 7, 8, 12, 13 und 15 auch für Bewehrungsdraht.
³⁾ p-Wert für eine statistische Wahrscheinlichkeit $W = 1 - \alpha = 90$ (einseitig) (bezogen auf die Produktion eines Werkes).
⁴⁾ Für Betonstahlmatten mit Neendurchmessern von 4,0 und 4,5 mm gelten die in Anwendungsnormen festgelegten einschränkenden Bestimmungen; die Dauerschwingfestigkeit braucht nicht nachgewiesen zu werden. Bewehrungsdraht wird ebenfalls mit Neendurchmessern von 4 bis 12 mm hergestellt.
⁵⁾ Früher verwendete Zeichen.
⁶⁾ Für die Istwerte des Zugversuchs gilt, daß R_m min. $1,05 \cdot R_e$ (bzw. $R_{p0,2}$), beim Betonstahl BSt 500 M mit Streckgrenzwerten über 550 N/mm² min. $1,03 \cdot R_e$ (bzw. $R_{p0,2}$) betragen muß.
⁷⁾ Die geforderte Dauerschwingfestigkeit an geraden Stäben gilt als erbracht, wenn die Werte nach Zeile 6 eingehalten werden.
⁸⁾ Die Produktion ist so einzustellen, daß der Querschnitt im Mittel mindestens dem Nennquerschnitt entspricht.
⁹⁾ Die Werte in Klammern gelten für die Stückanalyse.
¹⁰⁾ Die Werte gelten für den Gesamtgehalt an Stickstoff. Höhere Werte sind nur dann zulässig, wenn ausreichende Gehalte an stickstoffbindenden Elementen vorliegen.
¹¹⁾ Die Kennbuchstaben bedeuten: E = Metall-Lichtbogenhandschweißen, MAG = Metall-Aktivgasschweißen, GP = Gaspressschweißen, RA = Abrennstumpfschweißen, RP = Widerstandspunktschweißen (siehe Abschnitt 8.10.3).
¹²⁾ Der Neendurchmesser der Mattenstäbe muß mindestens 6 mm beim Verfahren MAG und mindestens 8 mm beim Verfahren E betragen, wenn Stäbe von Matten untereinander oder mit Stabstählen ≤ 14 mm Neendurchmesser verschweißt werden.

8.1.7 Spannstähle

Spannstähle werden für den Spannbetonbau verwendet. Durch eine Vorspannung des eingebauten Stahls werden im Betonquerschnitt Druckspannungen erzeugt, die sich den aus Nutzung und Eigenlast des Bauwerks herrührenden Zug- und Biegezugspannungen überlagern und somit aufheben können. Spannstähle sind Stähle mit hoher Zugfestigkeit und Streckgrenze und einem geringen Relaxationsverlust. Eine Normung für Spannstähle existiert in Deutschland nicht; nur eine bauaufsichtliche Zulassung für die einsetzbaren Stahlsorten. In Europa existiert ein Normentwurf (DIN EN 10138 T 1-5).

Bezeichnung:

Beispiel:

St 1570 / 1770



8.1.8 Eigenschaften der Stähle des Bauwesens

Strukturunabhängige Eigenschaften

Elastizitätsmodul E	210.000 N/mm ²
Schubmodul G	81.000 N/mm ²
Dichte ρ (je nach C-Gehalt)	(7,83 - 7,88) kg/dm ³
Wärmeausdehnungskoeffizient α _T (je nach C-Gehalt)	(10,7-11,5) · 10 ⁻⁶ 1/K
Wärmeleitfähigkeit λ	13,4 · 10 ⁴ J/(mhK)

Zugfestigkeit

Reines Eisen	~ 180 N/mm ²
Baustähle	300 - 700 N/mm ²
Spannstähle	600 - 2.000 N/mm ²
Kaltgezogene Stahldrähte	2.000 - 4.000 N/mm ²

Die **plastische Verformbarkeit** der Stähle sinkt mit steigender Zugfestigkeit:

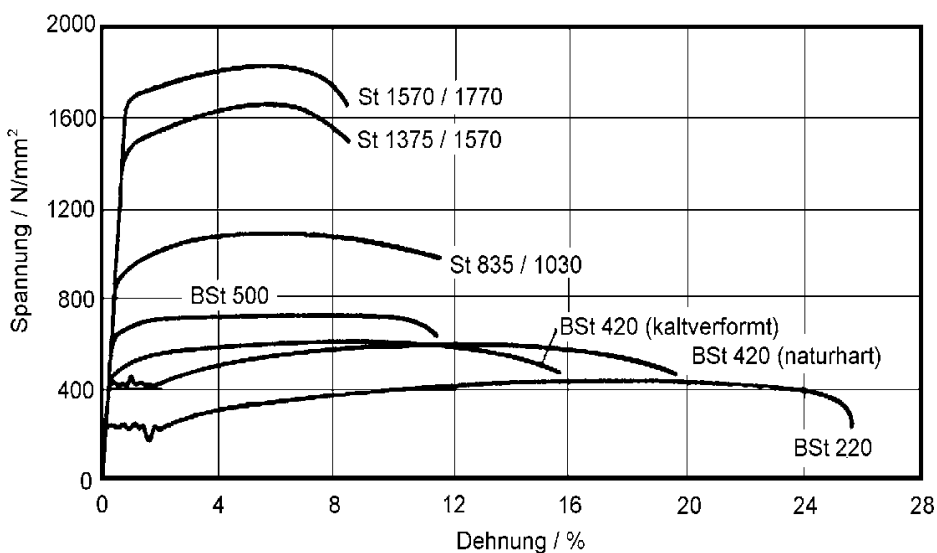


Bild 77. Spannungs-Dehnungs-Linien verschiedener Beton- und Spannbetonstähle

Dauerstandfestigkeit

Baustähle zeigen bei Raumtemperatur kein Absinken der Festigkeit unter langandauernder statischer Beanspruchung, d.h. die Dauerstandfestigkeit ist etwa gleich der Kurzzeitfestigkeit.

Kriechen und Relaxation

Normale Baustähle zeigen bei normaler Temperatur und Spannungen unterhalb der Streckgrenze keine Kriechverformungen. Bei hochfesten Spannstählen können jedoch auch bei Normaltemperatur deutliche Kriechverformungen auftreten.

8.3 Das Aluminium

8.3.1 Ausgangsstoffe

Aluminium ist das weitverbreitetste Metall der Erdkruste. Es ist im allgemeinen stark chemisch gebunden. Am häufigsten kommt Aluminium in Form von Bauxit (Gehalt an Al_2O_3 von 55 bis 65 %) vor.

Gewinnung von Aluminium:

1. Aufbereitung des Aluminiumerzes zur Abtrennung von Al_2O_3 (Bayerverfahren)
2. Gewinnung von Aluminium aus Al_2O_3 im Elektrolyseofen

Einsatz von Aluminium als **Legierung**:

Wichtigste Legierungskomponenten: Cu, Mg, Mn, Si, Zn

Weniger häufig: Ni, Fe, Co, Ti, Cr

8.3.2 Klassifizierung und Bezeichnungen

Die Bezeichnung erfolgt nach der **chemischen Zusammensetzung** unter Angabe der Legierungsmengen oder nach einem numerischen System (DIN EN 1780 und DIN EN 573). Verwendet werden Kennbuchstaben zur Beschreibung von **Herstellungsverfahren**.

Aluminiumlegierungen lassen sich unterscheiden in:

Knetlegierungen, können durch Kneten (Walzen, Pressen, Ziehen, Schmieden) weiter verformt werden.

Gusslegierungen, die nach den verschiedenen Gießverfahren verarbeitet werden:

- GS Sandguss
- GD Druckguss
- GK Kokillenguss
- GC Strangguss

Der Angabe der **Festigkeit** wird der Buchstabe F vorangestellt.

Beispiele:

EN AW-Al Mg 3 Si: Aluminiumknetlegierung mit 2 bis 4 % Mg (i.M. 3 %),
kleine Mengen an Si (0,3 bis 0,8 %)

EN AC-Al Si 12: Aluminium-Gusslegierung mit 11 bis 13,5 % Si
(i.M. 12 %)

Beide Legierungen enthalten kleine Mengen (0,3 bis 0,5 %) Mangan.

EN AC-Al Zn Mg 1 F 36: Al-Zn-Mg-Legierung, Zugfestigkeit 360 N/mm²

Tab. 18. Eigenschaften von Aluminium-Legierungen

Legierung nach DIN EN 1780 und DIN EN 1706	Festigkeitseigenschaften für			Bemerkungen
	Bleche	Rohre	Profile	
AlCuMg 1	F37 - F40	F38 - F40	F40	kalt ausgehärtet
AlCuMg 2	F41 - F44	F43 - F44	F44	kalt ausgehärtet
AlMgSi 1	F28	F28	F28	Warm ausgehärtet
AlMgSi 2	F32	F32	F32	Warm ausgehärtet
AlMg 3 o. AlMgMn	F23	F23	F18	nicht aushärtbar
AlMn	F9 - F15	---	---	nicht aushärtbar

8.3.3 Eigenschaften

Elastizitätsmodul E	60.000 bis 70.000 N/mm ²
Dichte ρ	2,7 bis 2,8 kg/dm ³
Wärmeausdehnungskoeffizient α_T	$23 \cdot 10^{-6}$ bis $24 \cdot 10^{-6}$ 1/K
Schmelzpunkt von reinem Al	660 °C

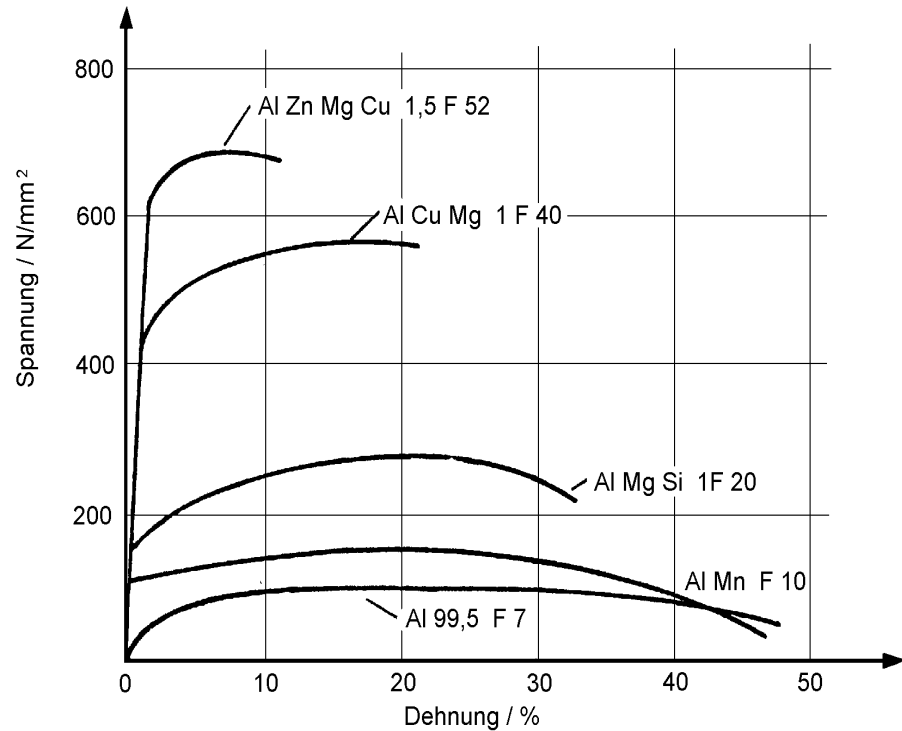


Bild 79. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einiger häufig verwendeter Al-Legierungen

9 Festigkeit und Bruch

9.1 Zielsetzung und Definitionen

Konstruktionen versagen durch:

- Überschreiten der Festigkeit eines Werkstoffs (Bruch)
- Überhöhte Verformung
- Abnutzung oder Korrosion

Von diesen Versagensarten ist der Bruch am gefährlichsten, da er u.U. plötzlich eintreten und zum Einsturz eines Bauwerks führen kann.

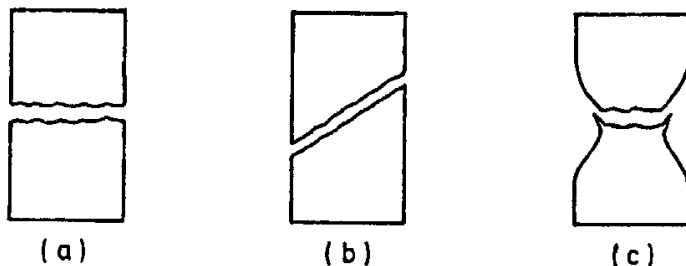


Bild 80. Erscheinungsformen des Bruchs

- a) Spaltbruch (Trennbruch): Bruchfläche senkrecht zur angreifenden Normalspannung (z.B. Plexiglas)
- b) Schub- oder Scherbruch: Bruchfläche in Richtung der Hauptschubspannung (z.B. Holz)
- c) Einschnürungsbruch: Auftreten starker Verformungen, z.B. Verringerung des Querschnitts vor dem Bruch (z.B. duktiler Stahl)

Transkristalliner Bruch

Die Bruchfläche durchläuft verschiedene Körner eines kristallinen Werkstoffs.

Interkristalliner Bruch

Die Bruchfläche verläuft entlang der Korngrenzen.

Zäher Bruch

Der Bruch tritt erst nach deutlich erkennbarer plastischer Verformung des Werkstücks ein. Vor dem Bruch bildet sich häufig eine Einschnürung aus. Die Bruchfläche ist meist matt oder faserig.

Spröder Bruch

Er tritt ohne oder nur mit sehr geringer plastischer Verformung auf und ist die Folge eines sehr schnell wachsenden Risses (**Spaltbruch**). Es tritt keine Einschnürung auf, die Bruchflächen sind bei polykristallinen Werkstoffen meist rau.

Übergang vom zähen zum spröden Bruch

Vor allem krz-Metalle können je nach Temperatur spröde oder zäh brechen. Eine Spröbruchneigung liegt nur vor bei:

- Niedriger Temperatur
- 3-achsigem Spannungszustand

9.2 Theoretische Zugfestigkeit

Beim Bruch einer Probe bilden sich zwei neue Oberflächen. Dazu ist Energie notwendig, die sogenannte Oberflächenenergie γ .

Durch den Bruch der Probe wird aber auch elastische Energie frei, die durch Aufbringen einer äußeren Spannung σ im Volumen der Probe gespeichert war. Unter der Voraussetzung einer linear elastischen Verformung ε_b bis zum Bruch bei der Spannung β_z ist die Energievolumendichte ω beim Bruch:

$$\begin{aligned}\omega &= \int \sigma d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_b} E \varepsilon d\varepsilon \\ &= E \frac{1}{2} \varepsilon^2 \Big|_0^{\varepsilon_b} \\ &= E \frac{1}{2} \varepsilon_B^2 \quad \text{mit } \varepsilon_B = \frac{\beta_z}{E} \\ &= \frac{1}{2E} \beta_z^2\end{aligned}$$

Die flächenbezogene elastische Energie W_z in einer Schicht der Höhe des Atomabstands a_0 ist dann:

$$W_z = \frac{\beta_z^2 \cdot a_0}{2 \cdot E}$$

Da beim Bruch $W_z \geq$ spez. Oberflächenenergie γ ist, folgt

$$\frac{\beta_z^2 \cdot a_0}{2 \cdot E} \geq \gamma$$

und somit $\beta_z \geq \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{a_0}}$

Beispiel:

Glas: $E = 7 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$

$\gamma = 3 \cdot 10^{-7} \text{ J/mm}^2$

$a_0 \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

Theoretisch: $\beta_z = 14500 \text{ N/mm}^2$

Experimentell: $\beta_z = 10 \text{ bis } 50 \text{ N/mm}^2$

Die Zugfestigkeit der meisten Realwerkstoffe ist um zwei bis drei Größenordnungen geringer als die theoretische Zugfestigkeit. Gelingt es jedoch, **fehlerfreie Einkristalle** herzustellen, so kommt deren Festigkeit der theoretischen Zugfestigkeit nahe. Die Zugfestigkeit von Werkstoffen wird daher in hohem Maß von Werkstofffehlern, z.B. Poren, Kerben, Korngrenzen etc. beeinflusst.

9.3 Kerben

Kerben sind plötzliche Querschnittsänderungen.

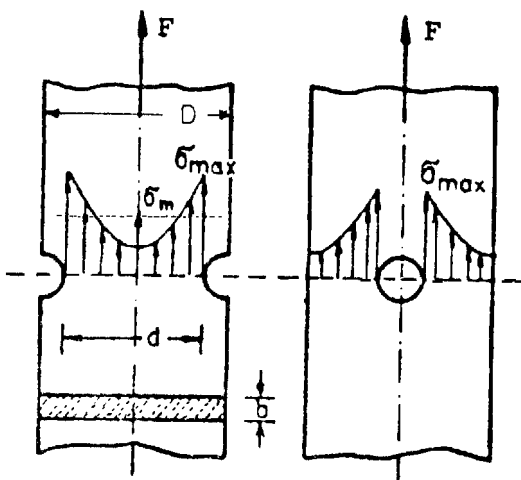


Bild 81. Spannungen an Kerben am Zugstab

Wird ein gekerbter Stab mit einer Zugspannung beansprucht, so treten Spannungsspitzen σ_{max} im Kerbgrund auf.

Die Nennspannung σ_m ist die auf den Restquerschnitt bezogene Kraft F:

$$\sigma_m = \frac{F}{d \cdot b}$$

Die Spannungserhöhung an der Kerbwurzel gegenüber der Nennspannung σ_m kann durch die **Formziffer K** ausgedrückt werden :

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_m}$$

Sie hängt von der Form und Größe der Probe und der Kerbe sowie der Beanspruchungsart ab.

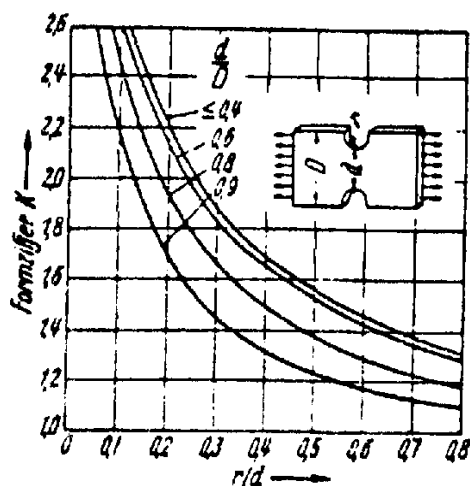


Bild 82. Ermittlung der Formziffer K

Bei zähen Werkstoffen werden aufgrund plastischer Verformungen die Spannungsspitzen am Kerbgrund abgebaut. Sie reduzieren die Nennfestigkeit der Werkstoffe daher nicht. Bei spröden Werkstoffen führen die Spannungsspitzen jedoch zum vorzeitigen Bruch der Probe.

Je nach der Anfälligkeit eines Werkstoffs gegenüber Kerben unterscheidet man zwischen **kerbempfindlichen** und **kerbunempfindlichen** Werkstoffen. Die Kerbanfälligkeit eines Werkstoffs kann, ebenso wie die plastische Verformung, von der Temperatur abhängig sein. Ein Maß hierfür ist die **Kerbschlagzähigkeit** a_k (siehe Abschn. 1.10).

9.4 Zäher Bruch

Kennzeichen des zähen Bruchs ist die Einschnürung. Je zäher der Werkstoff, desto deutlicher ist die Einschnürung. In Vielkristallen entwickelt sich der Bruch in drei Stadien:

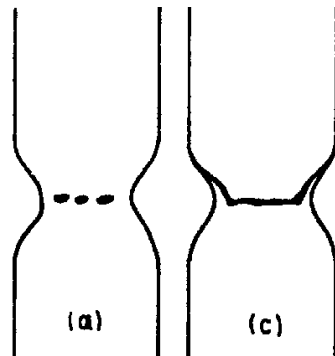


Bild 83. Bruchbildung beim zähen Bruch

- Bildung von größeren Poren an der Stelle der größten Einschnürung
- Zusammenschluss einzelner Poren in der Probenmitte, Bildung eines "Risses"
- Fortpflanzung des Risses zur Probenoberfläche in Richtung der Hauptschubspannung

Bei weniger duktilen Werkstoffen oder bei Druckbeanspruchung kann auch ein Scherbruch unter einem Winkel von 45° gegenüber der äußeren Belastung auftreten.

Ursachen der Porenbildung:

- Hohe Versetzungsdichte nach plastischer Verformung in der Nähe von Fremdeinschlüssen, wie Schlacken, Oxiden etc., verursacht örtliche Spannungskonzentrationen bei geringer Verformbarkeit. Viele Fremdeinschlüsse fördern daher die Poren- bzw. Rissbildung und reduzieren die Zähigkeit eines Werkstoffs.
- Porenbildung an Korngrenzen

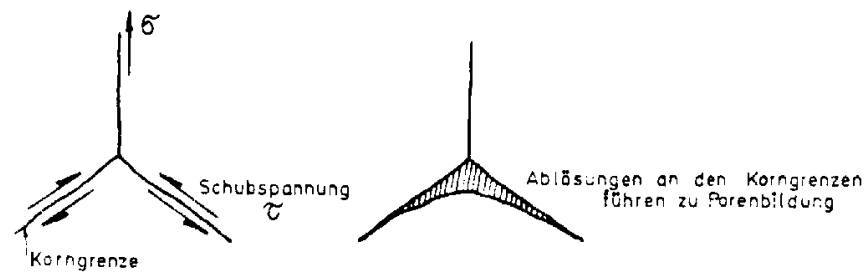


Bild 84. Porenbildung an Korngrenzen

9.5 Der spröde Bruch - Bruchmechanik

9.5.1 Einführung

Die Bruchmechanik geht von der Vorstellung aus, dass die Zugfestigkeit eines Werkstoffs vor allem von Fehlstellen, Poren, Rissen oder Kerben beeinflusst wird. An den Wurzeln dieser Fehlstellen treten hohe Spannungsspitzen auf, die bei fehlender plastischer Verformbarkeit den frühzeitigen, verformungslosen Bruch des Werkstoffs zur Folge haben.

Die Bruchmechanik erlaubt es dem entwerfenden Ingenieur abzuschätzen, mit welchen Fehlern ein Werkstoff bzw. eine Konstruktion behaftet sein darf, ohne dass ein Sprödebruch eintritt.

9.5.2 Grundbeziehungen nach Griffith

Gegeben sei eine unendliche Scheibe der Dicke $d = 1$, die an den Rändern durch eine gleichmäßig verteilte Zugspannung σ beansprucht wird:

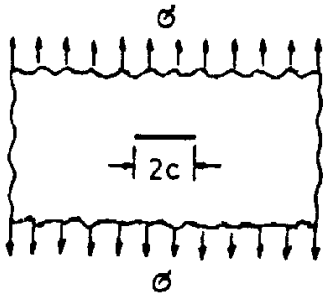


Bild 85. Unendliche Scheibe, Dicke $d = 1$

Durch Einfügen eines Risses der Länge $2c$ ändert sich die elastische Verformungsenergie W_E um einen Betrag ΔW_E :

$$\Delta W_E = \frac{\pi \cdot c^2 \cdot \sigma^2}{E}$$

Zur Bildung der beiden Rissflächen ist eine Oberflächenenergie W_s erforderlich:

$$W_s = 4 c \cdot \gamma$$

E Elastizitätsmodul in N/mm^2

γ spezifische Oberflächenenergie in J/m^2

Ein Rissfortschritt tritt ein, wenn

$$\frac{d(\Delta W_E)}{dc} \geq \frac{dW_s}{dc} \tag{1}$$

d.h., wenn durch den Rissfortschritt mehr oder genauso viel Energie freigesetzt wird, wie zur Bildung der neuen Oberflächen erforderlich ist.

Es folgt:

$$\begin{aligned} \frac{2\pi \cdot c \cdot \sigma^2}{E} &\geq 4 \cdot \gamma \\ \Rightarrow \sigma^2 &\geq \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot c} \end{aligned}$$

Für die Bedingung nach Gl. 1 strebt σ gegen σ_{cr} und

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot c}} \tag{2}$$

9.5.3 Erweiterte Form nach Irwin

Bei der Rissfortpflanzung wird neben elastischer Energie Energie durch plastische Verformungen im Bereich der Risswurzel aufgebracht:

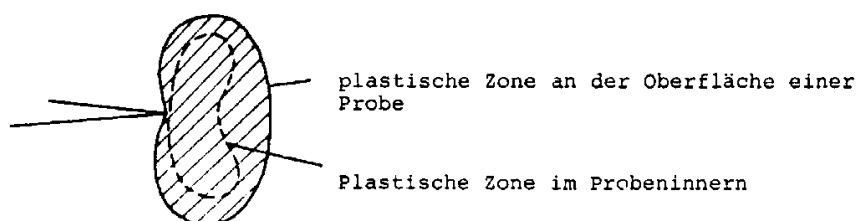


Bild 86. Plastische Zone an der Risswurzel

Zur Erfassung des plastischen Verformungsanteils erweiterte daher Irwin die Griffith-Beziehung zu:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot (\gamma + W_p)}{\pi \cdot c}} \quad (3)$$

Mit $G_c = 2 \cdot (\gamma + W_p)$

ergibt sich:

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{E \cdot G_c}{\pi \cdot c}}$$

Fasst man E und G_c zu K_c zusammen, erhält man

$$K_c^2 = G_c \cdot E$$

und damit $\sigma_{cr} = \frac{K_c}{\sqrt{\pi \cdot c}}$ oder $K_c = \sigma_{cr} \cdot \sqrt{\pi \cdot c}$ (4)

mit: W_p "plastic work" = Energieanteil der plastischen Verformung in N/m

G_c "kritische Rissenergie" in N/m

K_c Bruchzähigkeit, $[K_c] = \text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$

K_c ist eine Materialkonstante, die von der Probendicke abhängig sein kann.

Beschränkungen

1. Die Glgn. 2 bis 4 gelten nur für einen Riss in einer unendlichen Scheibe. Bei anderen Körperformen und Rissanordnungen muss Gl. 4 mit einem Formbeiwert F multipliziert werden:

$$K_c = \sigma_c \cdot \sqrt{\pi \cdot c} \cdot F \quad (5)$$

2. Wegen der unterschiedlichen Größe der plastischen Zonen im Probeninneren und an der Probenoberfläche ist bei kleinen Probendicken die Bruchzähigkeit auch von der Probendicke d abhängig. Zur experimentellen Bestimmung von K_c für metallische Werkstoffe muss daher die Bedingung erfüllt sein:

$$d \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_c}{\beta_s} \right)^2$$

d Probendicke
 K_c Bruchzähigkeit
 β_s Streckgrenze

Formbeiwerte F bei verschiedenen Probenformen und Rissanordnungen:

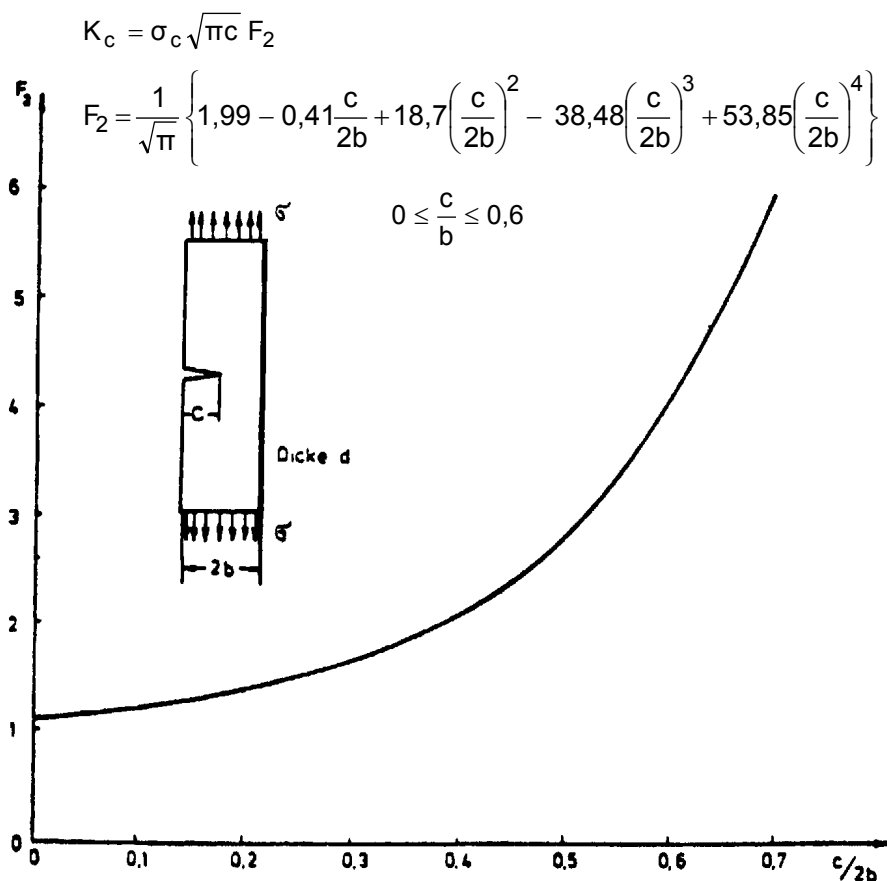


Bild 87.

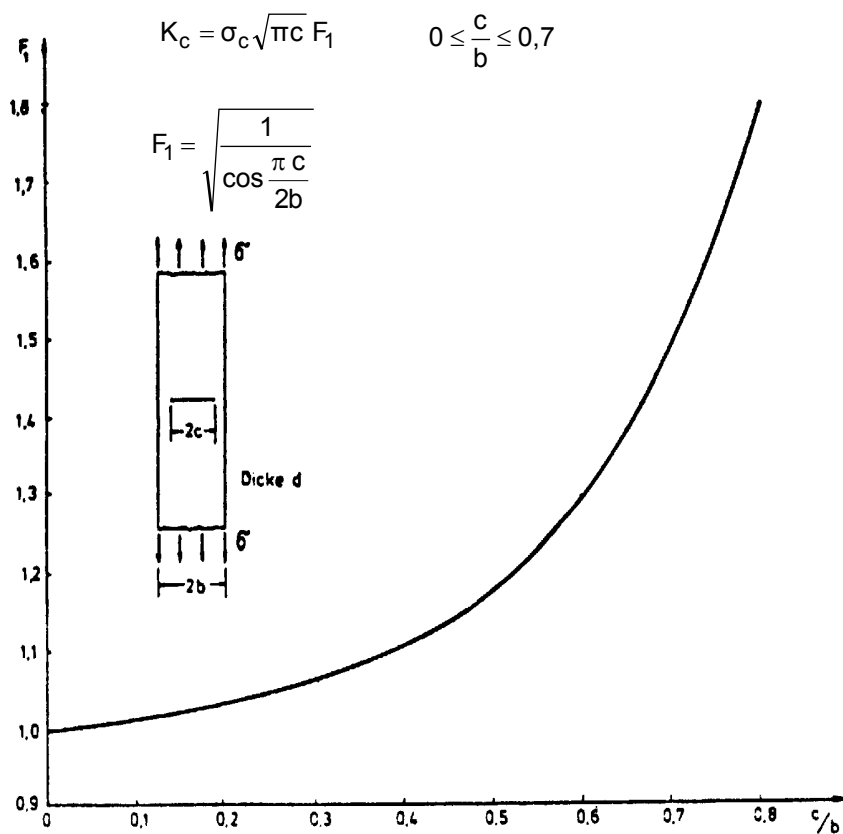
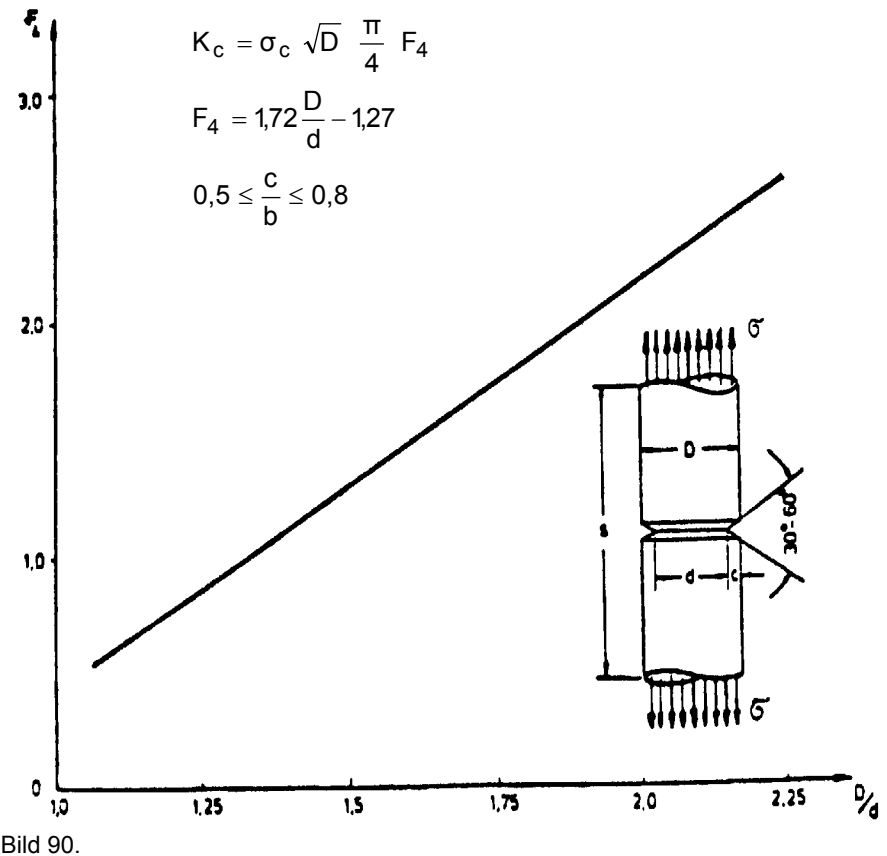
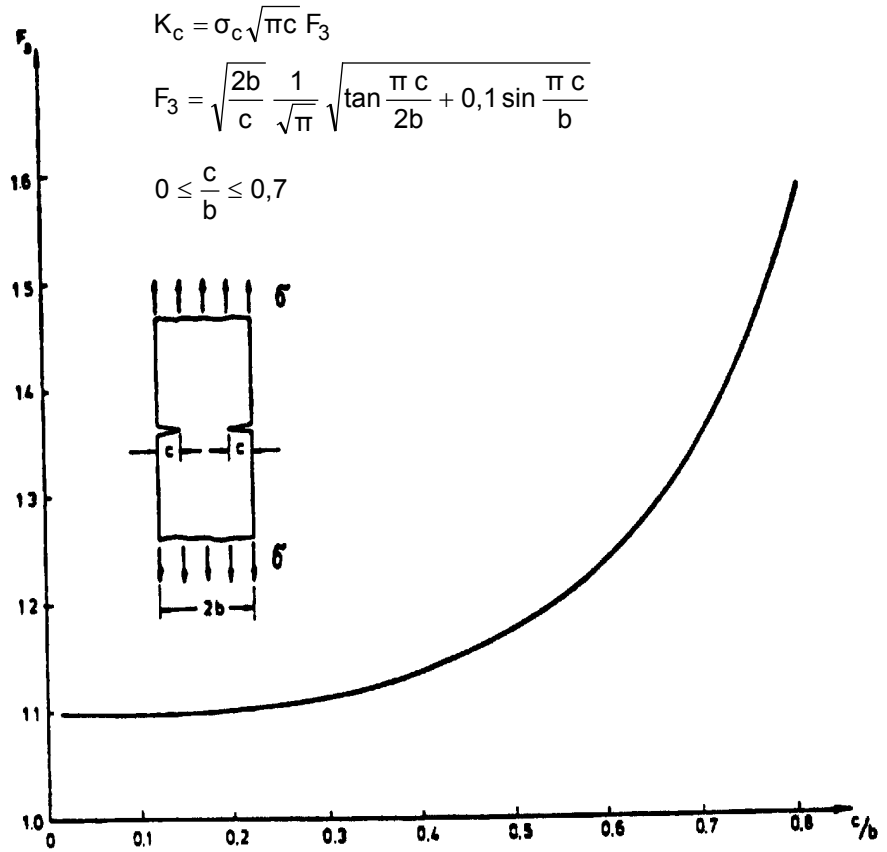


Bild 88.



9.5.4 Einflüsse auf die Bruchzähigkeit K_c

Die Bruchzähigkeit K_c eines Werkstoffs hängt ab von:

- der Zusammensetzung und Mikrostruktur
- der Wärmebehandlung
- dem Verformungszustand
- der Temperatur

und kann in breiten Grenzen streuen. Die Bruchzähigkeit muss daher im Bedarfsfall experimentell bestimmt werden.

Tab. 19. Eigenschaften verschiedener Werkstoffe bei 20°C

Werkstoff	Streckgrenze in N/mm^2	Zugfestigkeit in N/mm^2	Bruchzähigkeit in $N/mm^{3/2}$
S 235	ca. 240	ca. 370	4.000 – 5.500
S 355	ca. 340	ca. 600	3.000 – 4.500
AlCuMg	450	500	900
AlZnMgCu 1,5	500	580	950
Ti 6 Al 4 V	900	1.000	2.750

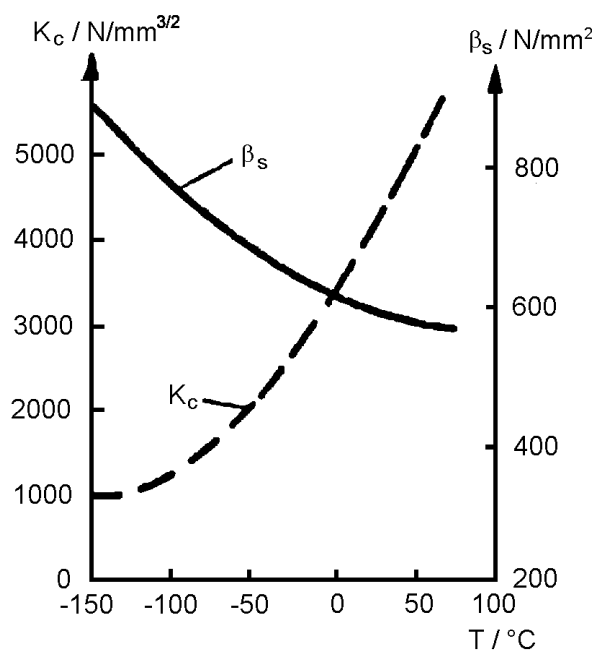


Bild 91. Einfluss der Temperatur auf K_c und β_s

9.6 Verhalten bei wiederholter Belastung

9.6.1 Definitionen

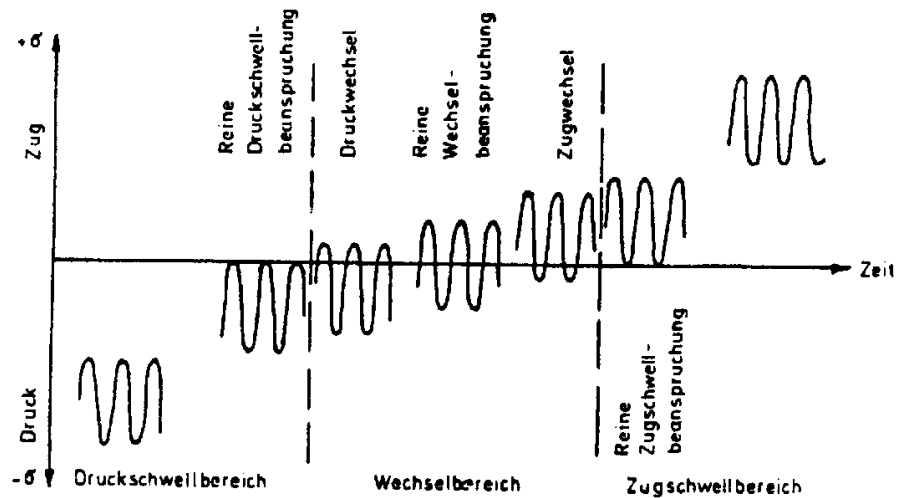
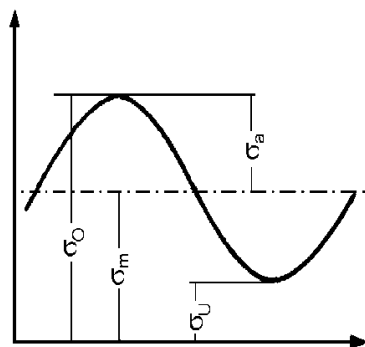


Bild 92. Bereiche dynamischer Beanspruchung



σ_O = Oberspannung

σ_U = Unterspannung

$\sigma_m = \frac{\sigma_O + \sigma_U}{2}$ = Mittelspannung

$\sigma_a = \frac{\sigma_O - \sigma_U}{2}$ = Spannungsamplitude

Bild 93. Bezeichnung der Spannungen bei dynamischer Beanspruchung

Ermüdungsfestigkeit

Größte Ober- bzw. Unterspannung, die der Werkstoff für eine bestimmte Anzahl von Lastwechseln ertragen kann.

Wechselfestigkeit β_{We}

Größte Spannungsamplitude, die der Werkstoff unendlich oft ertragen kann, wenn $\sigma_m = 0$.

Dauerfestigkeit β_{Be}

Größte Spannungsamplitude, die der Werkstoff unendlich oft ertragen kann, wenn $\sigma_m \neq 0$.

9.6.2 Wichtige Einflussparameter

Beanspruchung:

Die Anzahl der Lastspiele N bis zum Bruch nimmt ab mit:

- steigender Mittelspannung σ_m
- steigender Spannungsamplitude σ_a

Aggressive Medien, die eine Korrosion des beanspruchten Werkstoffs fördern, reduzieren die Anzahl der Lastspiele bis zum Bruch.

Werkstoffeigenschaften

Eine Anhebung der Streckgrenze von Metallen, z.B. durch Kaltverformung, führt zu keiner wesentlichen Erhöhung der Dauerfestigkeit.

Die Dauerfestigkeit spröder Werkstoffe wird durch **Kerben** wesentlich herabgesetzt. Bei zähen Werkstoffen wirken sich Kerben auf die Dauerfestigkeit dagegen wenig aus.

Spröde und **raue Oberflächenschichten** verringern die Dauerfestigkeit eines Werkstoffs. Glatte, duktile Überzüge können die Dauerfestigkeit erhöhen.

9.6.3 Darstellung des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen

Wöhler-Linien

Sie stellen den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Lastspiele N bis zum Bruch und σ_a für $\sigma_m = \text{const.}$ dar. Bei doppelt logarithmischer Auftragung von σ_a und N zeigt sich mit ausreichend hoher Lastspielzahl, dass sich σ_a einem bestimmten Wert nähert, der als Dauerfestigkeit β_{Be} bezeichnet wird.

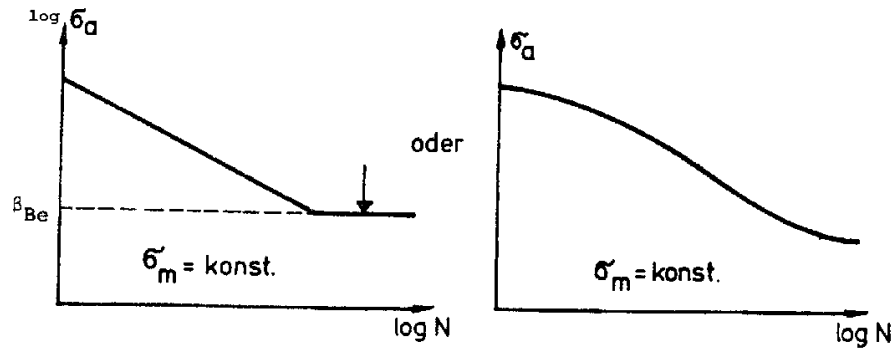


Bild 94. Beispiel von Wöhlerlinien eines S 235

Smith-Diagramm

Darstellung der Kombinationen von σ_m , σ_a , σ_o , σ_u , die für einen Werkstoff nach einer bestimmten Anzahl von Lastspielen N einen Ermüdungsbruch verursachen:

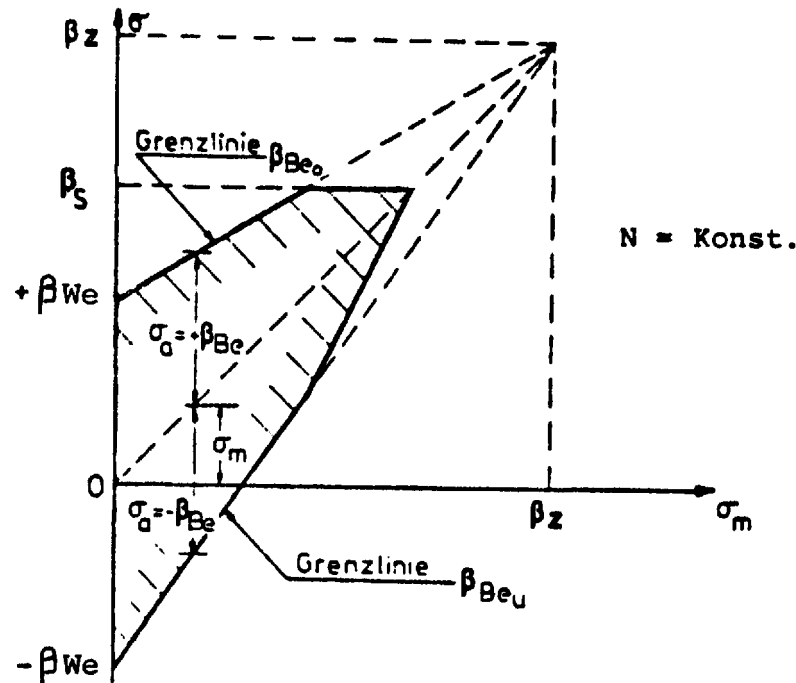


Bild 95. Smith-Diagramm mit der Zugfestigkeit β_z und der Streckgrenze β_s des Werkstoffs

Die Grenzlinie β_{Be_0} in Bild 95 ist durch folgende Gradengleichung beschrieben:

$$\begin{aligned}\beta_{Be_0} &= \beta_{We} + \sigma_m \cdot \left(\frac{\beta_z - \beta_{We}}{\beta_z} \right) \\ &= \beta_{We} + \sigma_m \cdot \left(1 - \frac{\beta_{We}}{\beta_z} \right)\end{aligned}\quad \text{für } \beta_{We} < \beta_{Be_0} < \sigma_s$$

Die Dauerfestigkeit ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}\beta_{Be} &= \beta_{Be_0} - \sigma_m \\ \beta_{Be} &= \beta_{We} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_m}{\beta_z} \right)\end{aligned}\quad \text{Goodman-Beziehung}$$

$$\text{oder } \beta_{Be} = \beta_{We} \cdot \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\beta_z} \right)^2 \right) \quad \text{Gerber-Beziehung}$$

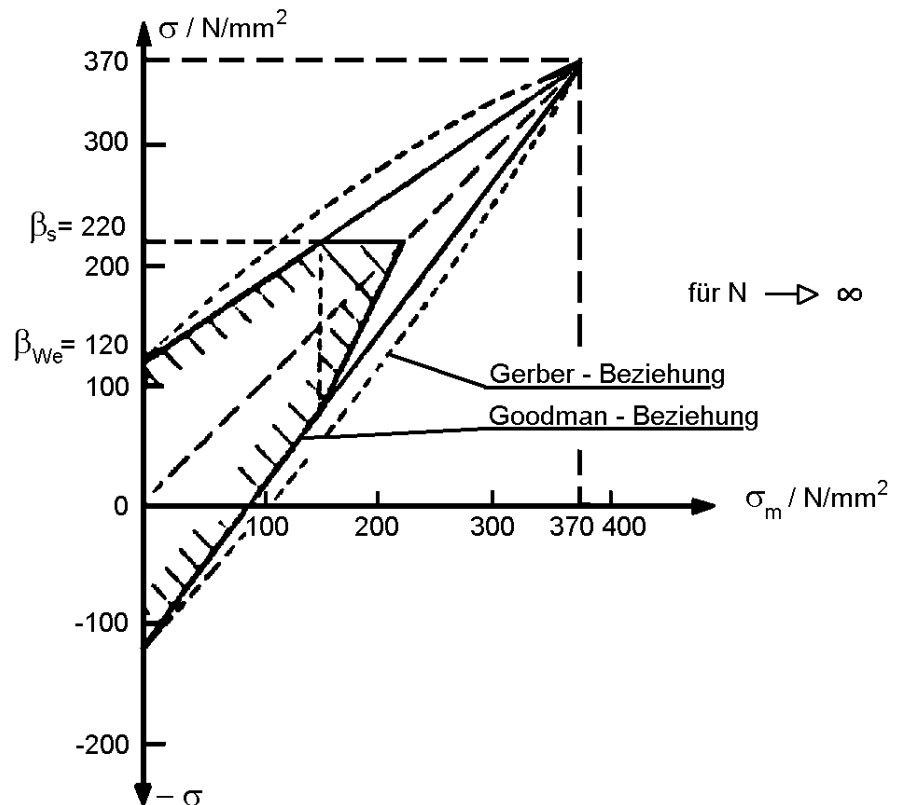


Bild 96. Gerber- und Goodman-Beziehung im Smith-Diagramm

Beachte:

Die Ermüdungsfestigkeit von Werkstoffen ist meist großen Streuungen unterworfen. Daher werden häufig Wöhlerlinien für bestimmte Versagenswahrscheinlichkeiten angegeben.

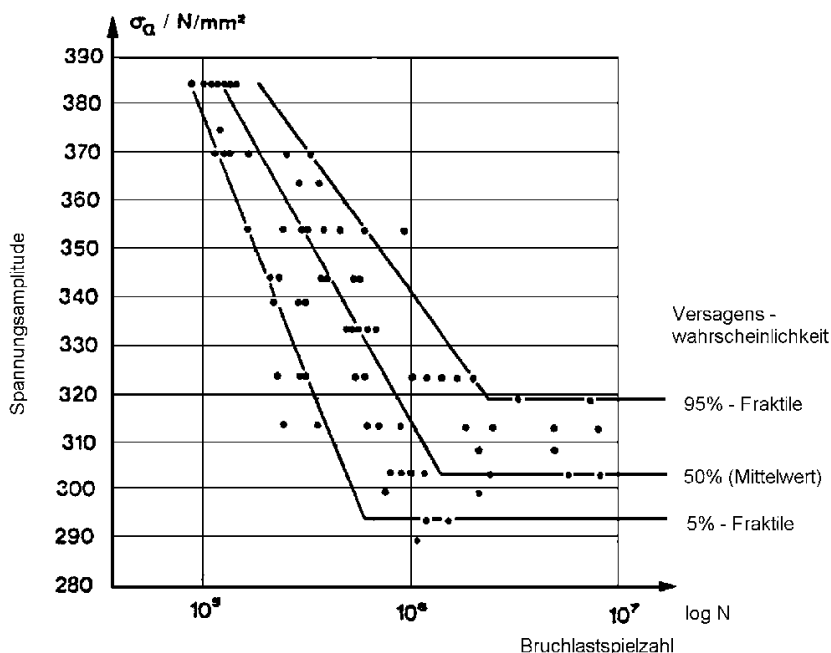


Bild 97. Wöhler-Diagramm mit Versagenswahrscheinlichkeiten

9.6.4 Abschätzung des Ermüdungsverhaltens von Bauwerken

Während eines Ermüdungsversuchs im Labor werden Spannungsamplitude σ_a und Mittelspannung σ_m meist konstant gehalten. Bei einem Bauwerk dagegen können Mittelspannung und Spannungsamplitude in weiten Grenzen schwanken. Das zu erwartende Ermüdungsverhalten von Bauwerken kann aus einfachen Laborversuchen mit Hilfe der Miner-Regel abgeschätzt werden. Danach tritt der Bruch ein, wenn

$$\sum \frac{n_v}{N_v} = 1 \quad \text{Miner-Regel}$$

n_v Anzahl der Lastspiele mit σ_{mv} und σ_{av} , die auf das Bauwerk einwirken

N_v Anzahl der Lastspiele, die bei σ_{mv} und $\sigma_{av} = \text{const.}$ zum Ermüdungsbruch führen

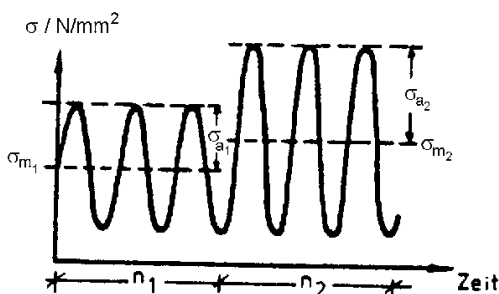


Bild 98. Anwendung der Miner-Regel

N_1 Anzahl der Lastspiele, die bei σ_{m1} und $\sigma_{a1} = \text{const.}$ den Bruch zur Folge haben

N_2 Anzahl der Lastspiele, die bei σ_{m2} und $\sigma_{a2} = \text{const.}$ den Bruch zur Folge haben

Sind $n_1 < N_1$ und $n_2 < N_2$, tritt bei der in Bild 98 dargestellten kombinierten Beanspruchung der Bruch ein, wenn

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1$$

9.6.5 Bruchvorgang bei Ermüdungsbeanspruchung

Bei einer Ermüdungsbeanspruchung sind die aufgebrachten Spannungen meist wesentlich kleiner als die Streckgrenze des Werkstoffs. Der Ermüdungsbruch ist daher **verformungsarm** und tritt ohne Vorankündigung ein.

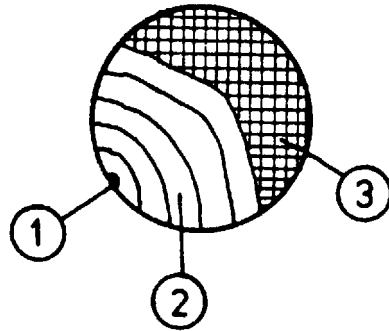


Bild 99. Bruchbildung eines Ermüdungsbruchs

Ein Ermüdungsbruch nimmt seinen Ausgang an einer örtlichen Fehlstelle ①. Ausgehend von dieser Fehlstelle tritt langsames Rißwachstum und damit eine fortlaufende Querschnittsverminderung ein ②. Ist diese so groß, daß der Restquerschnitt die aufgebrachte Belastung nicht mehr ertragen kann, kommt es zum plötzlichen Bruch ③.

9.7 Bruchverhalten bei mehrachsiger Beanspruchung

In Bauwerken sind Werkstoffe häufig einer mehrachsigen Beanspruchung unterworfen. Festigkeit und Verformungsverhalten von Werkstoffen bei mehrachsiger Beanspruchung können mit Hilfe von Bruch- bzw. Fließkriterien aus dem bekannten Verhalten bei einachsiger Beanspruchung abgeschätzt werden.

9.7.1 Der Mohrsche Spannungskreis

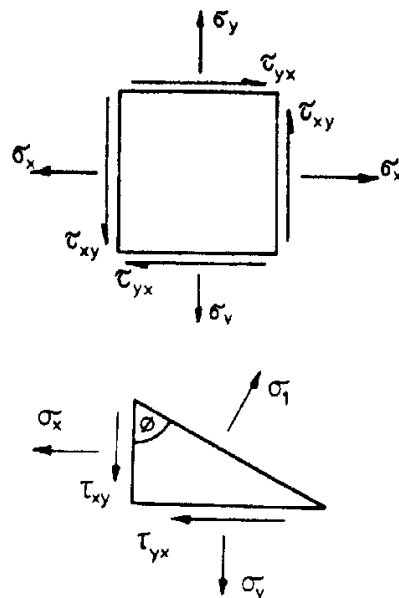


Bild 100. Definition der Spannungen bei zweiachsiger Belastung

An einem Element in der Ebene greifen die Spannungen σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{yx} an. In den Schnittflächen Φ bzw. $\Phi + 90^\circ$ durch das Element wirken nur Normalspannungen σ_1 bzw. σ_2 :

$$\tan(2 \cdot \Phi) = \frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

$$\sigma_{1/2} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Die Spannungen σ_1 und σ_2 sind Hauptspannungen. Sie stellen die maximalen bzw. die minimalen Normalspannungen dar, die in einer Schnittfläche des Elements wirken.

Der Zusammenhang zwischen σ_1 , σ_2 , τ_{\max} , σ_x , σ_y , τ_{xy} kann durch den sog. Mohrschen Spannungskreis graphisch dargestellt werden (eine detaillierte Herleitung der Zusammenhänge wird in der Vorlesung Mechanik gezeigt).

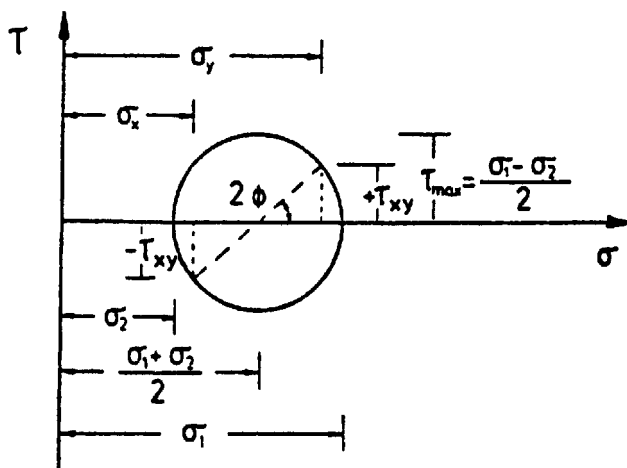


Bild 101. Mohrscher Spannungskreis für mehrachsige Beanspruchung

9.7.2 Mohrsche Spannungskreise für verschiedene Spannungszustände

Bei einem räumlichen Spannungszustand können für jede Hauptebene Mohrsche Spannungskreise angegeben werden. Definitionsgemäß sind die Hauptspannungen

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3.$$

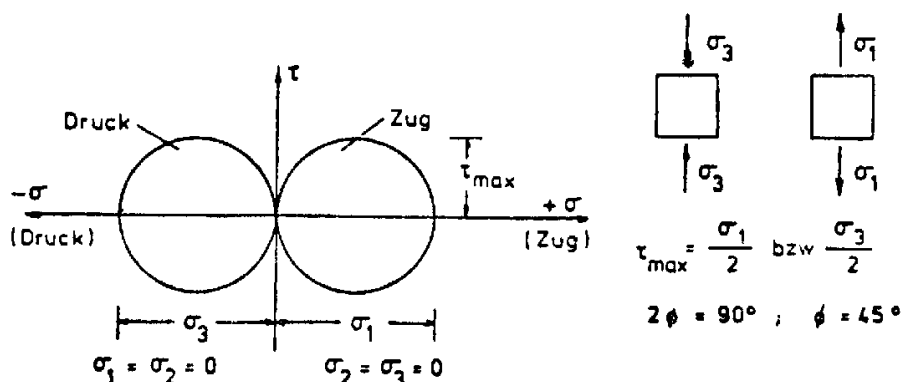


Bild 102. Einachsiger Druck und einachsiger Zug

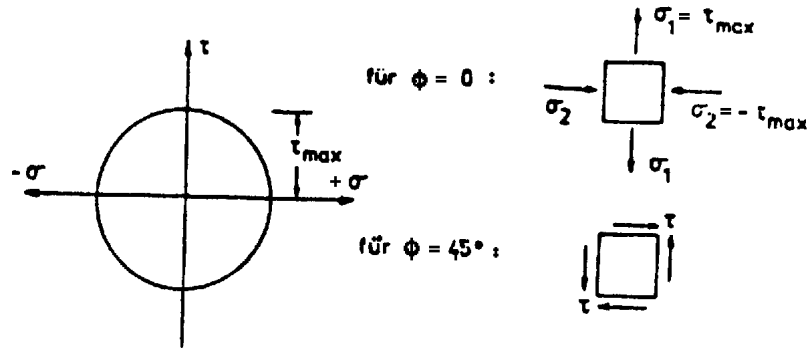


Bild 103. Reiner Schub oder reine Torsion

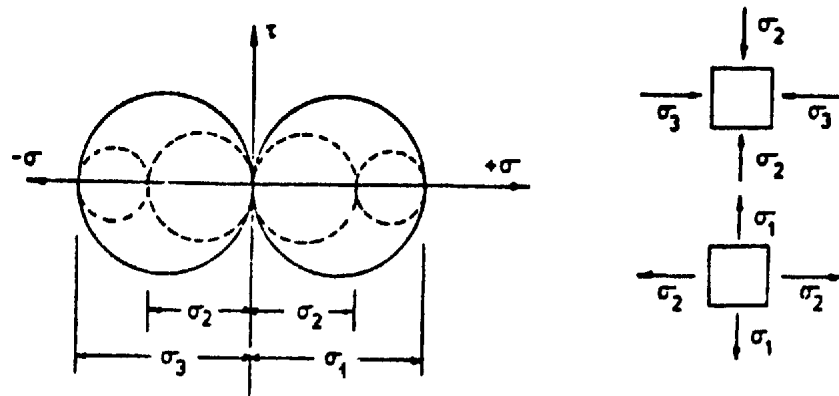


Bild 104. Zweiachsiger Druck und zweiachsiger Zug

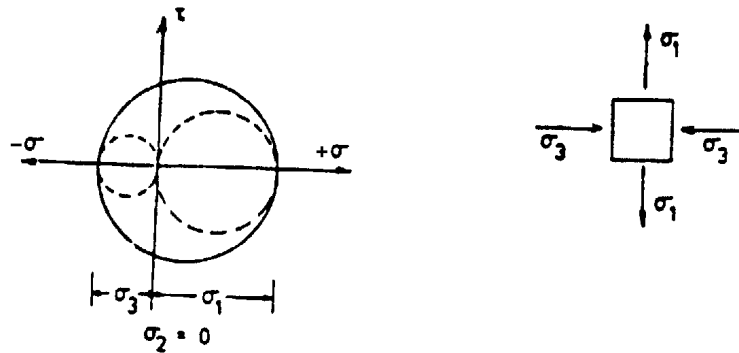


Bild 105. Zweiachsiger Druck-Zug

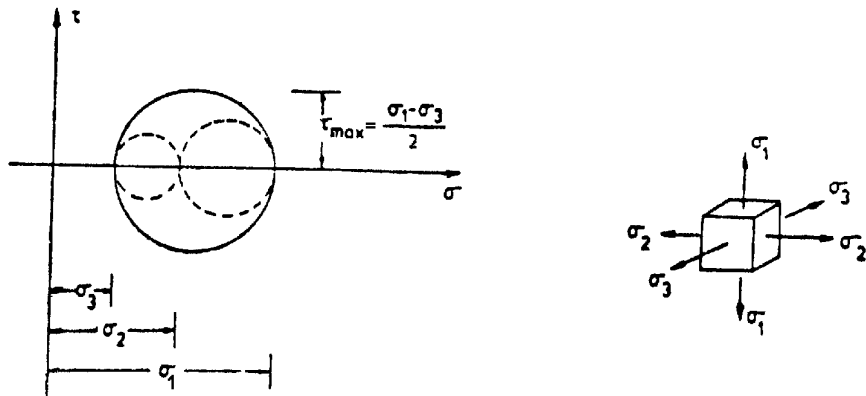


Bild 106. Dreiachsige Spannungszustände

9.7.3 Bruch- und Fließbedingungen (Vergleichsspannungshypothesen)**Bruchbedingung**

Kriterium für das Eintreten des Bruchs (Erreichen der Festigkeit)

Fließbedingung

Kriterium für das Eintreten des Fließens

Hypothese der maximalen Normalspannung

Annahme, dass Fließen dann eintritt, wenn die größte Hauptspannung einen Grenzwert erreicht:

$$\sigma_1 = \beta_s$$

Hypothese der maximalen Dehnungen

Annahme, dass Fließen eintritt, sobald die Dehnung in einer der Hauptrichtungen einen Grenzwert erreicht. Bei linear-elastischem Verhalten ist die Dehnung ε_1 in Richtung der Hauptspannung σ_1 :

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)]$$

E Elastizitätsmodul

ν Poissonsche Zahl

Bei einachsiger Belastung tritt Fließen ein, wenn

$$\varepsilon_1 = \frac{\beta_s}{E}$$

Das Fließkriterium bei mehrachsiger Beanspruchung ist daher

$$\frac{\beta_s}{E} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\sigma_1 = \beta_s + \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)$$

Hypothese der maximalen Schubspannung (Treska-Bedingung)

Annahme, dass Fließen dann eintritt, wenn in einer Ebene die Schubspannung einen Grenzwert erreicht:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

wobei $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

Die Fließbedingung bei mehrachsiger Beanspruchung ist daher:

$$\tau_{\max} = \frac{\beta_s}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

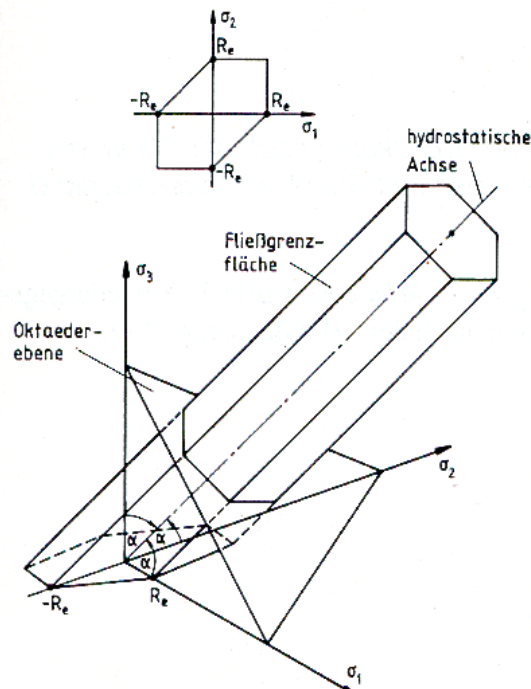


Bild 107. Fließgrenzfläche nach Treska

Fließen tritt ein, wenn

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta_s$$

$$\sigma_1 = \beta_s + \sigma_3$$

Beachte:

Nach der Treska-Bedingung hat die mittlere Hauptspannung σ_2 keinen Einfluss auf die erreichbare Maximalspannung.

Gestaltänderungsarbeitshypothese (Huber-v. Mises-Bedingung)

Annahme, dass Fließen dann eintritt, wenn die spezifische Gestaltsänderungsarbeit einen Grenzwert erreicht. Die spezifische Gestaltsänderungsarbeit W_d ist ein Maß für die Verzerrung der Form eines Körpers bei mehrachsiger Beanspruchung. Sie ist die Differenz zwischen der gesamten Verformungsenergie und der Verformungsenergie bei hydrostatischer Beanspruchung mit der Spannung

$$\sigma'_1 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

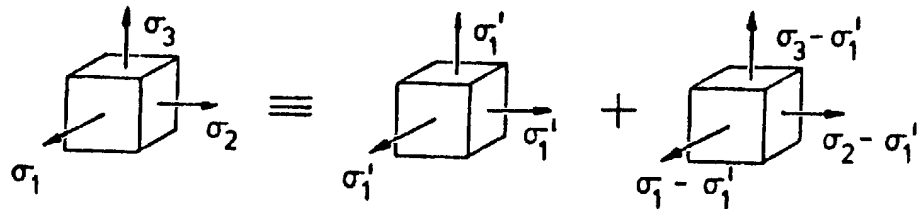


Bild 108. Aufteilung der Spannungen

$$W_d = \frac{1+\nu}{3 \cdot E} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

Bei einachsiger Zugbelastung tritt Fließen ein, wenn

$$\sigma_1 = \beta_s; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

dann ist $W_d = \frac{1+\nu}{3 \cdot E} \cdot 2 \cdot \beta_s^2$

Die Fließbedingung bei mehrachsiger Beanspruchung ist daher

$$\frac{1+\nu}{3 \cdot E} \cdot 2 \cdot \beta_s^2 = \frac{1+\nu}{3 \cdot E} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

oder $2 \cdot \beta_s^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2$

mit $\sigma_v = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$

gilt als Fließbeziehung

$$\sigma_v = \sqrt{2} \cdot \beta_s$$

Dieselbe Beziehung kann auch durch eine andere, einfache Überlegung abgeleitet werden:

Fließvorgänge werden oft durch Gleiten bestimmter Ebenen eingeleitet. Der Beginn des Fließens muss dann von der Größe τ_{\max} abhängen.

Es wird nun angenommen, dass Fließen trete umso eher ein, je mehr der tatsächliche Spannungszustand vom hydrostatischen Spannungszustand $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ abweicht.

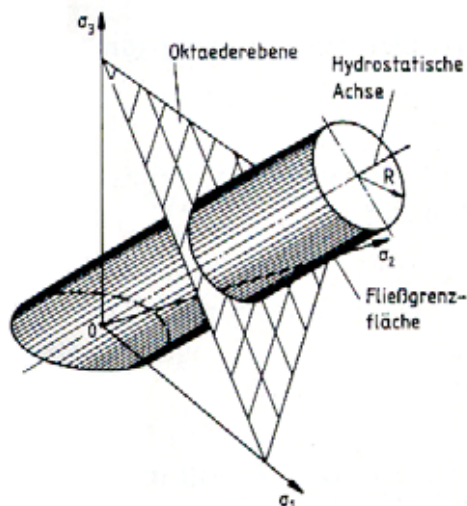


Bild 109. Fließgrenzfläche nach von Mises

D.h., sobald der Spannungszustand auf einer Oberfläche liegt, die einen bestimmten Abstand von der Raumdiagonalen $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ hat. Kann diese Oberfläche durch einen Zylinder dargestellt werden, dann folgt sie der Beziehung

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = r^2$$

Ermittlung von r aus dem Verhalten bei einachsiger Beanspruchung:

für $\sigma_1 = \beta_s$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

ist $\beta_s^2 + 0 + \beta_s^2 = r^2$

$$2 \cdot \beta_s^2 = r^2$$

Die Fließbedingung bei mehrachsiger Beanspruchung lautet dann:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \beta_s$$

Mohrsche Bruchhypothese

Annahme, dass Fließen dann eintritt, wenn in einer Ebene die maximale Schubspannung einen Wert überschreitet, der von der Normalspannung abhängt, die senkrecht zu dieser Ebene wirkt:

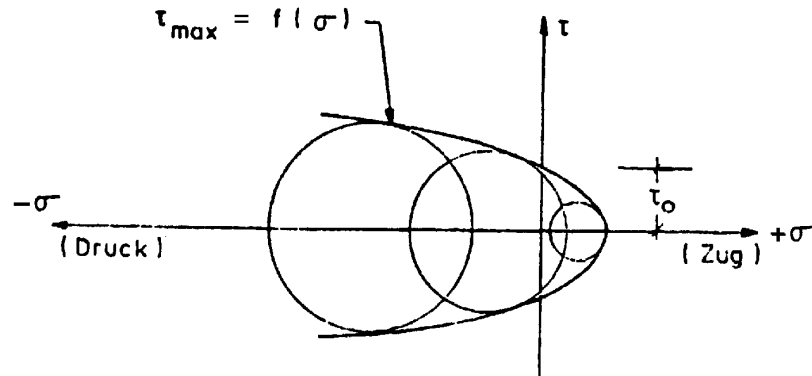


Bild 110. Bruchgrenzlinien in Mohrscher Darstellung (Mohrsche Hüllparabel)

Der Bruch tritt daher ein, sobald der für eine bestimmte Beanspruchung ungünstigste Spannungszustand die Einhüllende berührt. Ist diese Einhüllende eine Gerade, dann gilt

$$\tau_{\max} = \tau_0 + k \cdot \sigma \quad (\text{Mohr-Coulomb})$$

Anwendung auf das Verhalten metallischer Werkstoffe

Metallische Werkstoffe folgen meist der v.Mises-Bedingung. Die Treska-Bedingung liefert gute Näherungswerte:

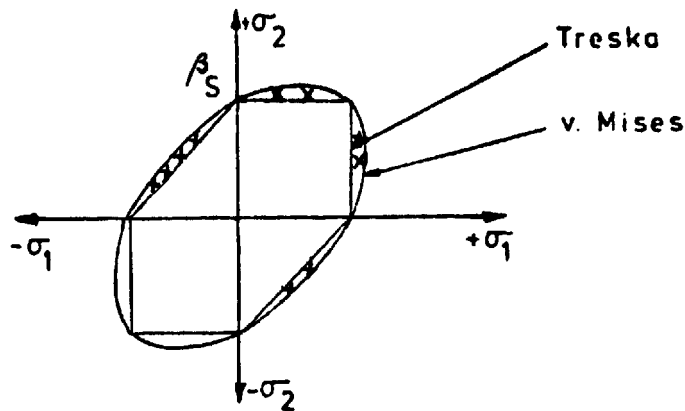


Bild 111. Zweiachsige Spannungszustände

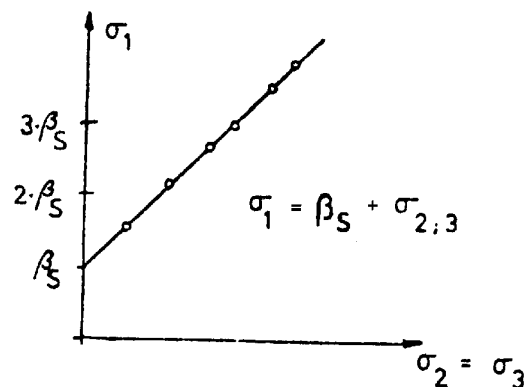


Bild 112. Dreiachsige Spannungszustände

Diese Beziehung gilt sowohl für die v. Mises-Bedingung als auch für die Treska-Bedingung.

10 Verfestigung von Metallen

10.1 Grundprinzip

Metallische Werkstoffe können durch

- a) Veränderung ihrer chemischen Zusammensetzung
- b) Veränderung ihrer Fein- oder Grobstruktur
- c) Schaffung von Ungleichgewichts- oder metastabilen Zuständen

verändert werden. Ihre mechanischen Eigenschaften, vor allem Streckgrenze, Zugfestigkeit, plastische Verformbarkeit, Korrosionsbeständigkeit werden dadurch optimiert.

Grundprinzip aller Verfestigungsmethoden:
Herabsetzen der Beweglichkeit von Versetzungen

10.2 Kaltverformung

Eine Kaltverformung metallischer Werkstoffe bewirkt eine Verfestigung. Sie bewirkt einen Anstieg von Härte, Streckgrenze und Zugfestigkeit, während die Bruchdehnung, die Brucheinschnürung und die Kerbschlagzähigkeit abnehmen. Durch eine nachfolgende Wärmebehandlung (Anlassen) kann die Verformbarkeit kaltverformter Metalle wieder verbessert werden.

Ursache der Verfestigung sind die Verspannung, Verbiegung und Verzerrung der Gleitpakete. Sie erschweren die Wanderung der Versetzungen. Korngrenzen behindern ebenfalls die Beweglichkeit der Versetzungen. Während der Kaltverformung erfolgt das Gleiten in unzählig vielen Kristallen, das man bisweilen äußerlich am Mattwerden der blanken Oberfläche eines hin und her gebogenen Drahtes erkennen kann. Der Verformungswiderstand während der Kaltverfestigung wird kontinuierlich größer, bis eine gewaltsame Überwindung zur Zerrüttung und zum Bruch des Werkstücks führt. Darum kann man eine Kaltverformung im Gegensatz zu einer Warmverformung nicht beliebig weit treiben. Zu beachten ist, dass durch ein Verweilen des kaltverfestigten Werkstücks oberhalb der Rekristallisationstemperatur die Festigkeits- und Verformungseigenschaften durch Rekristallisation, dem Wachsen neuer unverspannter Körner, wieder verloren gehen.

Bei Zink, Blei und Zinn liegt die Rekristallisationstemperatur unterhalb von 20 °C, so dass diese Metalle **nicht** durch Kaltverformung bei Raumtemperatur verfestigt werden können. (s. Abschn. 7.5.3)

Reckalterung

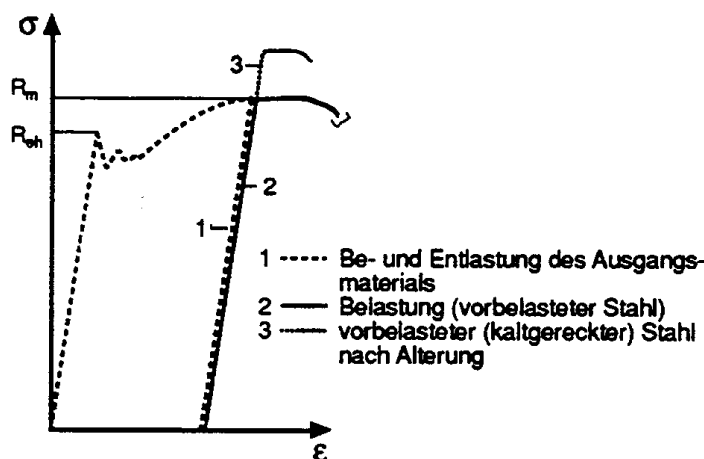


Bild 113. Spannungs-Dehnungslinien nach Verfestigung und Alterung

Werden Werkstoffe mit ausgeprägter Streckgrenze bis zu einer bestimmten Spannung (hier: R_m) (s. Bild 113) belastet, entlastet (Linie 1) und sofort wieder belastet, so beginnt das Fließen erneut bei R_m (Linie 2). Durch eine Alterung nach Entlastung stellt sich bei manchen Werkstoffen eine erhöhte Streckgrenze bei verminderter Verformbarkeit (Linie 3) ein.

10.3 Legierungshärten

Metallische Werkstoffe können durch Bildung homogener Mischkristall-Legierungen verfestigt werden.

Ursache

Die im Grundmetall durch die Legierungen eingebrachten Fremdatome reduzieren die Beweglichkeit der Versetzungen.

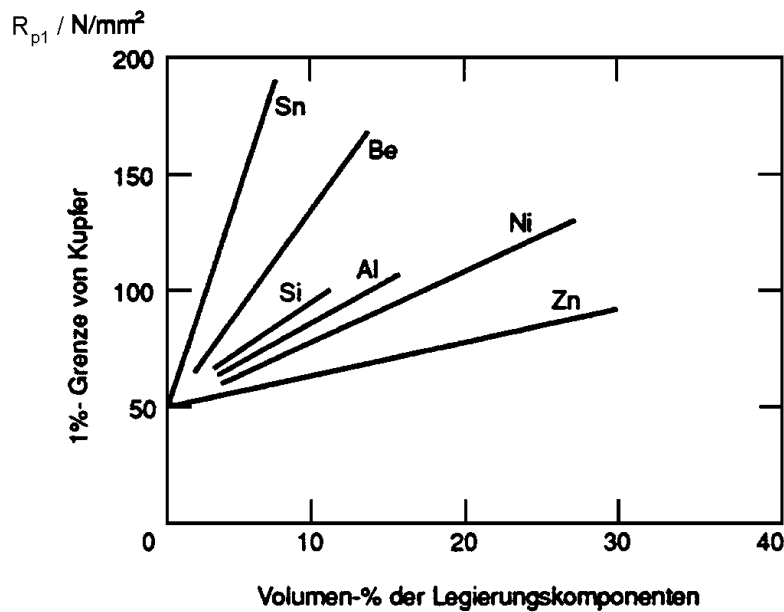


Bild 114. Einfluss verschiedener Legierungselemente auf die Streckgrenze R_{p1} (1%-Dehngrenze) von Kupfer

10.4 Ausscheidungshärten

Wichtigste Verfestigungsmethode für alle Nichteisenmetalle (vor allem für Aluminium):

In das Grundgitter eines metallischen Werkstoffs wird schrittweise eine zweite, sehr feinverteilte Phase ausgeschieden.

Wirkungsmechanismen:

Behinderung der Versetzungsbewegung durch:

- a) Verspannen des Kristallgitters
- b) Phasengrenzen

Voraussetzungen für Legierungen, die ausscheidungshärtbar sind:

- a) Beschränkte Löslichkeit der Legierungskomponenten
- b) Abnahme der Löslichkeit mit sinkender Temperatur

Ausscheidungshärten erfolgt in 3 Schritten:

- Schritt 1: Homogenisieren oder **Lösungsglühen** der Legierung
- Schritt 2: Schnelles Abkühlen - **Abschrecken**
- Schritt 3: Anlassen bzw. Altern bei erhöhter Temperatur = **Ausscheidungsglühen**

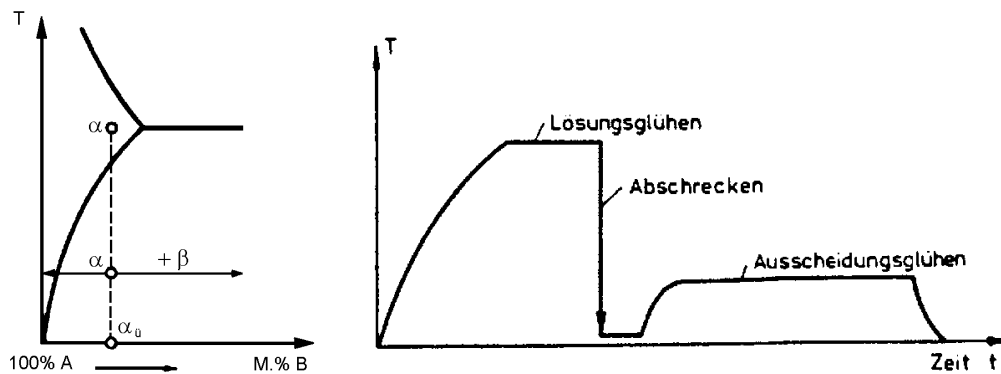
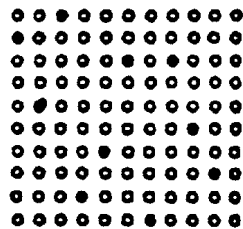


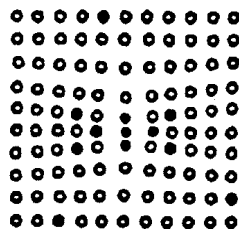
Bild 115. Zeitlicher Ablauf des Ausscheidungshärtens

- Schritt 1: Erwärmung bis knapp unter die eutektische Temperatur aber oberhalb der Löslichkeitslinie. Durch Homogenisieren entsteht ein stabiles Mischkristall α .
- Schritt 2: Als Folge des Abschreckens sollte eine β -Phase ausgeschieden werden. Wegen der schnellen Abkühlung liegt jedoch nur eine mit B-Atomen übersättigte α_u -Phase vor.
- Schritt 3: Erhöhung der Temperatur auf das 0,3 bis 0,5-fache der Schmelztemperatur (Ausscheidungsglühen). Ausscheidung einer β -Phase aus der übersättigten α -Phase. Härte, Festigkeit, Zähigkeit hängen von der Länge der Auslagerung und der Anlasstemperatur ab.

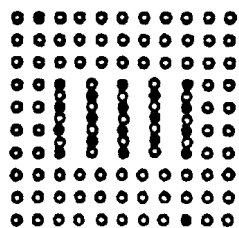
● gelöstes Atom ○ Matrixatom



übersättigte feste Lösung



mit dem Matrixgitter
kohärente Entmischungszone



aus der festen Lösung ausgeschiedene zweite Phase (inkohärente Gleichgewichtsausscheidung)

Bild 116. Verschiedene Lösungszustände eines Gemischs

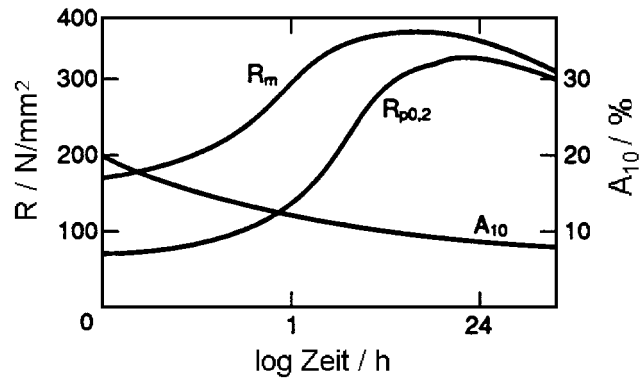


Bild 117. Einfluss der Dauer des Ausscheidungsglühens auf Zugfestigkeit R_m , 0,2-Grenze $R_{p0,2}$ und Bruchdehnung A_{10} einer Al-Mg-Si-Legierung

10.5 Umwandlungshärten

Das Umwandlungshärten ist die wichtigste Verfestigungsmethode für Stähle. Sie ist auch als **Abschreckhärtung** bekannt. Sie beruht darauf, dass beim plötzlichen Abkühlen von manchen Metallen Strukturumformungen stattfinden, die beim Stahl zur sog. Martensitbildung führen.

10.5.1 Martensitische Zustände

Wird ein Stahl bis in den austenitischen Bereich ($T > 723 \text{ °C}$) erwärmt und danach abgeschreckt, ist die diffusionsabhängige Umwandlung des Austenits (γ -Eisen-Mischkristall) in Ferrit (α -Eisen-Mischkristall) nicht mehr möglich. Anstelle des α -Eisen-Zementit-Systems entsteht der sog. Martensit durch **diffusionslose Umwandlung**.

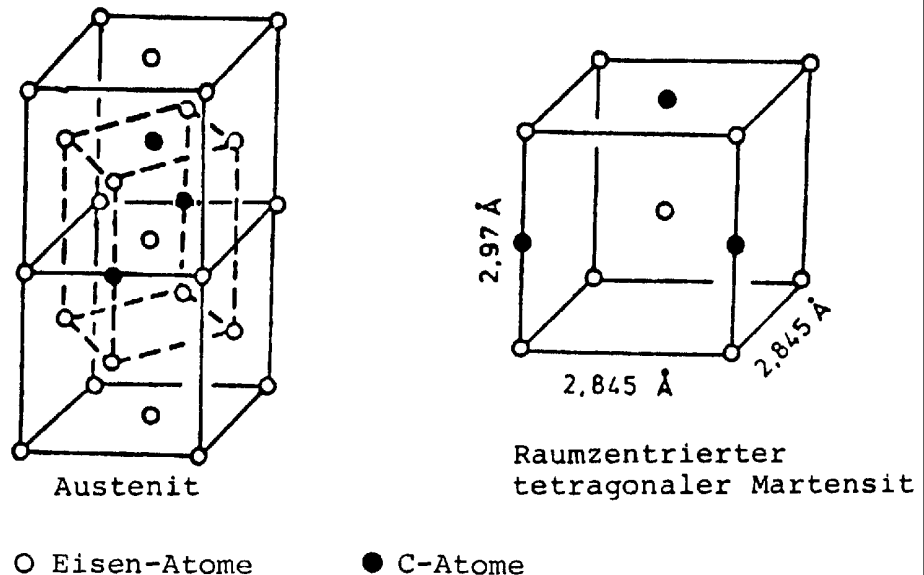


Bild 118. Martensitische Elementarzellen

Martensit wird durch Verschieben und Umlappen von Kristallebenen des Austenits gebildet. Er hat wegen seiner Struktur und der eingelagerten C-Atome eine große Härte und Sprödigkeit und ist daher nicht immer erwünscht.

Die Menge an Martensit, die bei der Abkühlung eines Stahls aus einem austenitischen Zustand entsteht, hängt von der Temperatur ab, bis zu der er nach einer vorangegangenen Erwärmung abgeschreckt wird.

Der verbleibende Austenit wird als **Restaustenit** bezeichnet.

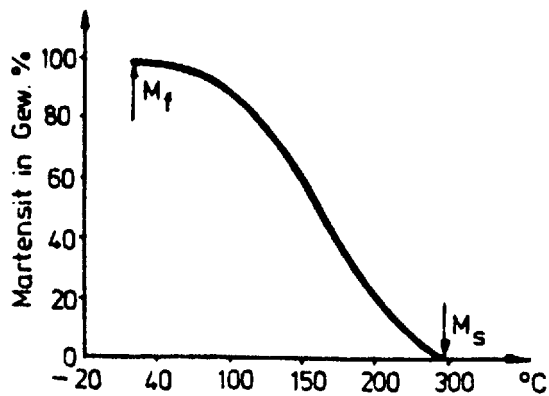


Bild 119. Die Bildung von Martensit in Abhängigkeit von der Temperatur

M_s Temperatur, bei der die Bildung von Martensit (M_s = Martensit-**start**) beginnt

M_f Temperatur, bei der eine vollständige Umwandlung in Martensit erfolgt (M_f = Martensit-**finish**)

Die Sprödigkeit martensitischer Stähle kann durch Anlassen vermindert werden.

1. Anlassstufe: Bei ca. 100 bis 200 °C Ausscheidung von C aus dem Martensit und Bildung des kohlenstoffärmeren **kubischen Martensits**.
2. Anlassstufe: Bei ca. 100 bis 300 °C Zerfall des Restaustenits.
3. Anlassstufe: Bei ca. 300 bis 400 °C Kohlenstoffverarmung des kubischen Martensits bis zur Bildung von **Ferrit**.

Mit steigender Anlassdauer wächst die Verformbarkeit des Stahls.

10.5.2 Zwischenstufenzustände

Durch Variation der Abkühlgeschwindigkeit oder durch Abkühlung von Stählen aus dem austenitischen Bereich bis zu einer Temperatur oberhalb der M_s -Temperatur, die dann über längere Zeit konstant gehalten wird, können Zwischenstufenzustände erreicht werden, die im sog. **ZTU-Schaubild** (Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild) darstellbar sind.

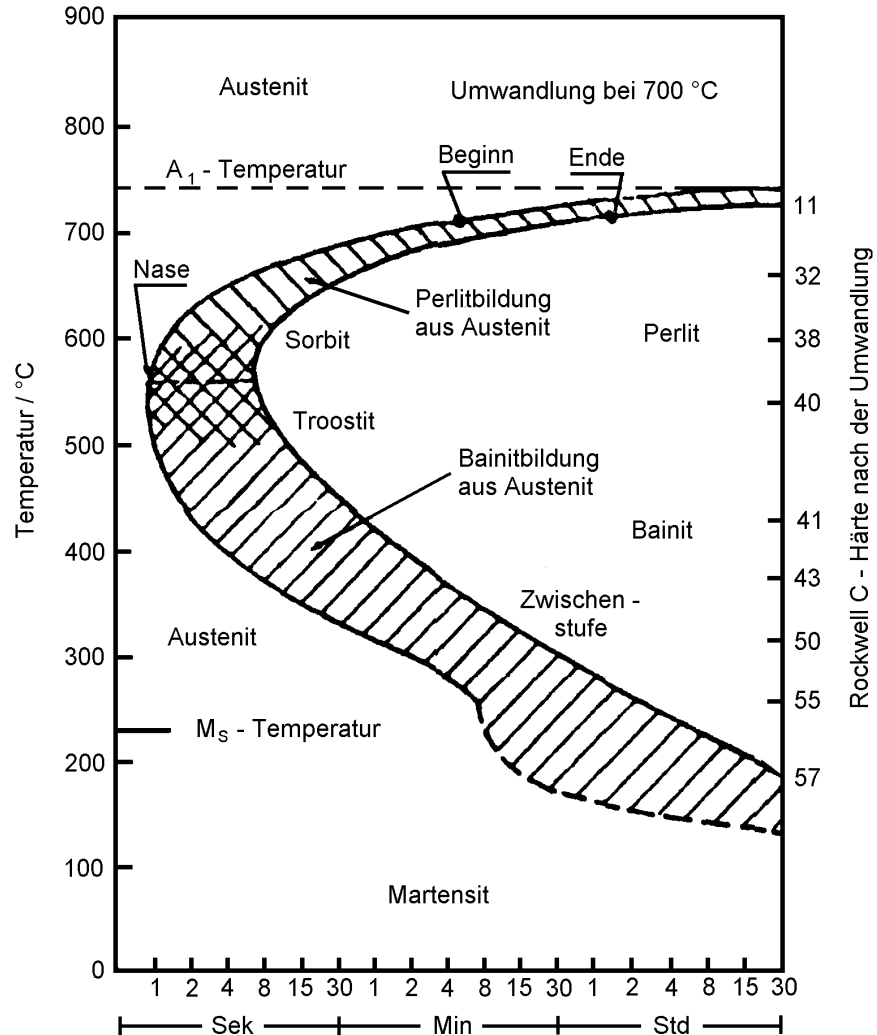


Bild 120. Isothermes ZTU-Schaubild für den Austenitfall in einem Kohlenstoffstahl mit eutektoider Zusammensetzung

Das ZTU-Schaubild für isotherme Umwandlung ($T = \text{const.}$) beschreibt für verschiedene Abkühltemperaturen die Umwandlung des Austenits in Abhängigkeit vom Zeitraum, in dem die Abkühltemperatur konstant gehalten wird. Die zwei charakteristischen Linien dieses Diagramms beschreiben Beginn und Ende des Austenitfalls.

Mit sinkender Temperatur wird der Austenit immer instabiler, d.h. die treibende Kraft, die seinen Zerfall bewirkt, wächst. Gleichzeitig nimmt die Diffusionsgeschwindigkeit mit sinkender Temperatur ab, so dass der Austenitfall verzögert wird. Daraus ergibt sich der nasenförmige Verlauf der beiden Kurven, der einen Minimalwert der Zerfalldauer bei einer Temperatur zwischen $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ angibt. Oberhalb der Nase erfolgt eine Umwandlung des Austenits in fein- oder grobkörniges Perlit. Unterhalb dieser Temperatur bildet sich Bainit; ein sehr feinkörniges Gefüge aus Ferrit und Karbid, in dem das Karbid nicht wie beim Perlit lamellenförmig, sondern in Form sehr kleiner Partikel ausgeschieden wird.

Unterhalb der M_s -Temperatur entsteht sofort Martensit, dessen Menge mit sinkender Temperatur zunimmt.

10.6 Verfestigung von Stählen

Die Eigenschaften von Stählen werden beeinflusst durch:

- Kaltverformung
- Wärmebehandlung (Glühen, Härten, Vergüten)
- Legieren

10.6.1 Glühen

- Erwärmen der Stähle auf eine bestimmte Temperatur
- Konstanthalten dieser Temperatur über einen gewissen Zeitraum
- langsames Abkühlen bis zur Raumtemperatur

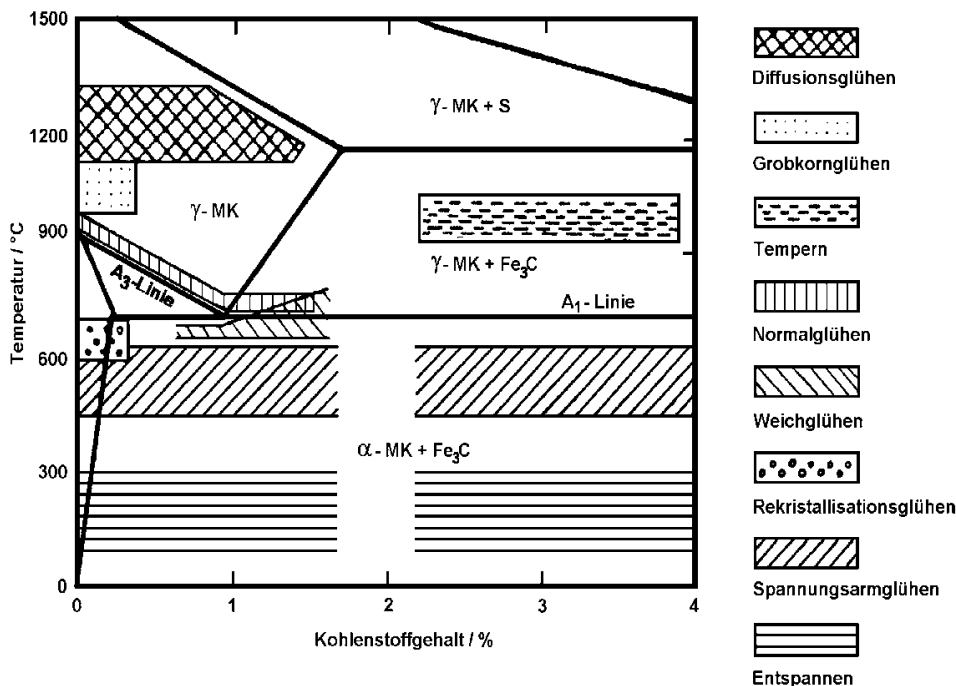


Bild 121. Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm und die Bereiche der Wärmebehandlung

Diffusionsglühen

Erwärmen bis in das Gebiet der γ -Eisen-Mischkristalle

Zweck: Ausgleich von Seigerungen des Kohlenstoffs, Vergrößerung der Kornstruktur, reduzierte Festigkeit und erhöhte Plastizität.

Normalglühen

Erwärmen bis oberhalb der A_3 - bzw. A_1 -Linie

Zweck: Ausgleichen von Inhomogenitäten aus Herstellung und Bearbeitung. Bei kurzzeitiger Dauer Erzielung eines feinkörnigen Gefüges, bei langer Dauer Vergrößerung der Kornstruktur. Häufig Ausgangspunkt weiterer Wärmebehandlungen.

Weichglühen

Erwärmen bis knapp unterhalb der A_1 -Linie (also keine Bildung von Austenit)

Zweck: Bildung eines körnigen Zementits im Perlit, der eine spätere spanabhebende Bearbeitung des Stahls erleichtert.

Rekristallisationsglühen (siehe Abschn. 7.5.3)

Spannungsarmglühen

Erwärmen auf eine Temperatur unterhalb der Rekristallisationstemperatur

Zweck: Reduktion von Eigenspannungen, Absinken der Streckgrenze und der Anfälligkeit zum Spröbruch.

Glühfarben

Bis etwa 400 °C ist die Erwärmung von Stählen nicht mit dem Auge erkennbar. Im einzelnen werden die folgenden Glühfarben mit den dazugehörigen Temperaturen unterschieden.

Grauglut	400 °C, kaum sichtbar
beginnende Rotglut	525 °C
Dunkelrotglut	700 °C
Kirschrotglut	850 °C
Hellrotglut	950 °C
Gelbglut	1100 °C
beginnende Weißglut	1300 °C
volle Weißglut	1500 °C

10.6.2 Härten

Erwärmen des Stahls auf Temperaturen oberhalb der A_3 - bzw. der A_1 -Linie (s. Bild 121) mit darauffolgendem Abschrecken in Luft, Wasser oder Öl.

Dies führt je nach Abschrecktemperatur und Geschwindigkeit zur Martensitbildung (siehe Abschn. 10.5.1) oder zu einem Zwischenstufenzustand (siehe Abschn. 10.5.2). Voraussetzung für die Härtebarkeit ist ein ausreichender C-Gehalt.

10.6.3 Vergüten

Ein gehärteter Stahl ist wegen der hohen Härte und Sprödigkeit des Martensitgefüges technisch nicht brauchbar. Zur Milderung der Sprödigkeit wird das Werkstück nach dem Härten angelassen, bzw. vergütet. Beim **Anlassen** werden Stähle, die eine möglichst hohe Härte behalten sollen (Stähle für Werkzeuge), auf 180 bis 300 °C erwärmt.

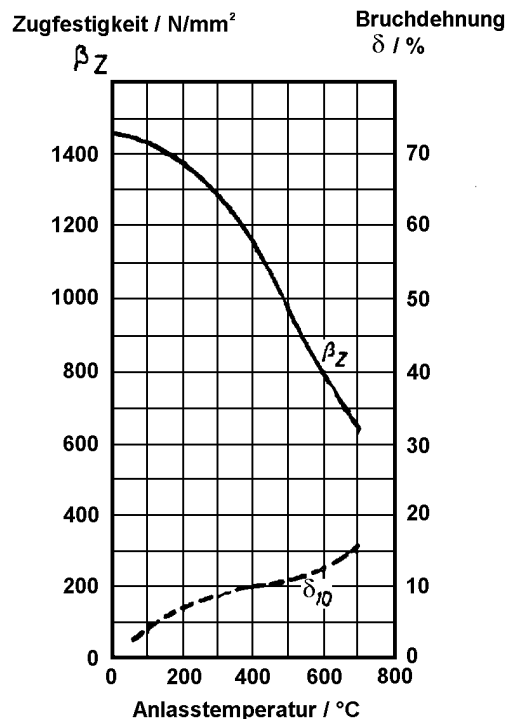


Bild 122. Abhängigkeit der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung gehärteten Stahls von der Anlasstemperatur

Stähle, die für Konstruktionszwecke Verwendung finden, werden vergütet. Unter **Vergüten** versteht man ein **Härten mit anschließendem Anlassen** auf Temperaturen zwischen 450 und 650 °C. Hierbei diffundiert Kohlenstoff aus den übersättigten Mischkristallen aus, und es bildet sich feinverteilter Zementit, durch den die Härte und die Festigkeit verringert werden. Die Wahl

der Anlasstemperatur ermöglicht eine optimale Verbindung von Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften.

Eine besondere Art der Stahlvergütung ist das **Patentieren**. Der Stahl wird normalgeglüht, dann in einem Blei- oder Salzbad auf ca. 400 °C abgeschreckt und bis zur vollständigen Umwandlung in Perlit und Ferrit auf dieser Temperatur gehalten. Darauf folgt eine langsame Abkühlung an der Luft. Wegen der Bildung eines feinlamellaren Perlitgefüges sind patentierte Stähle besonders zum Kaltziehen geeignet und behalten dabei eine relativ hohe Zähigkeit.

10.6.4 Legieren

Phosphor P, Schwefel S, Stickstoff N, Sauerstoff O und Wasserstoff H werden als **Stahlbegleiter** bezeichnet. Sie sind meist unerwünscht und können schon in geringer Konzentration (< 0,1 %) zu Versprödung, erhöhter Korrosionsanfälligkeit und fehlender Eignung zum Schweißen des Stahls führen.

P	Kaltsprödigkeit	Verformbarkeit herabgesetzt
	Seigerung (Entmischung, Stahl bekommt inhomogenen Aufbau)	Schweißeignung vermindert
S	Neigt zur Seigerung	Schweißeignung vermindert
	Versprödung in der Wärme	
	Mangansulfide	Begünstigen spanabhebende Bearbeitung beim Drehen, Fräsen, Bohren (Automatenstähle)
N	fünffache Wirkung von P, durch Al-Zusätze (Bildung von Al-Nitriden) kann die schädliche Wirkung verhindert werden	Versprödung
O	Rotbrüchigkeit (FeO)	Verbrannter Stahl
H	Wasserstoffversprödung	(Achtung beim Schweißen)

Legierungselemente werden dem Stahl zur Erzielung gewünschter Eigenschaften zugegeben. Die wichtigsten Legierungselemente des Stahls sind Kohlenstoff C, Silizium Si, Mangan Mn und Nickel Ni.

Silizium:

Reduziert die Löslichkeit von Gasen in der Schmelze. Daher Verwendung zur Stahlberuhigung.

Herabsetzen der Löslichkeit von Kohlenstoff.

Bei Gehalten über 0,5 %: Erhöhung von Streckgrenze und Zugfestigkeit.

Bei Gehalten über 0,35 %: Erschwertes Pressschweißen.

Bei Gehalten über 0,65 %: Erschwertes Schmelzschweißen.

Mangan:

Bei Gehalten zwischen 1 bis 2 %: Erhöhung von Streckgrenze und Zugfestigkeit. Bruchdehnung bleibt konstant (Vergütungsstahl).

Hohe Härtebarkeit, hohe Festigkeit bei ausreichender Zähigkeit (Verformbarkeit).

Bindet S (MnS-Mangansulfid) und O (MnO) → beruhigter Stahl

Nickel:

Erhöhte Kaltzähigkeit (Vergütungsstähle), gleichmäßiges Korrosionsverhalten (nichtrostend).

Mangan und Nickel :

Reduzieren die A₁-Temperatur und erweitern daher den Bereich, in dem Austenit stabil ist. Stähle, die auch bei Raumtemperatur vorzugsweise aus Austenit bestehen, werden als austenitische Stähle bezeichnet.

Chrom (Cr):

Erhöht Zugfestigkeit, Bruchdehnung bleibt konstant. 1 % Cr erhöht die Zugfestigkeit um ca. 100 N/mm² (Vergütungsstähle)

Härte und Verschleißfestigkeit (Chromkarbide)

Bei Gehalten über 12 % wird der Stahl korrosionsbeständig.

Chrom, Molybdän (Mo), Wolfram (W) und Titan (Ti):

Erhöhen die A₁-Temperatur und erweitern damit das Gebiet des Ferrits (ferritische Stähle).

Niob (Nb) und Vanadium (V):

Feinkornstähle, C < 0,2 %,

Kornverfeinerung,

Ausscheidungshärtung.

11 Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen

11.1 Allgemeines

Korrosion ist die Zerstörung eines Werkstoffs durch chemische und elektrochemische Reaktionen mit seiner Umgebung oder durch physikalischen Angriff. Alle Werkstoffe des Bauwesens, Metalle, Beton, Ziegel, Kunststoff, Glas, Holz können durch Korrosion zerstört werden. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen ist es daher erforderlich, schon beim Entwurf eines Bauwerks Fragen der Korrosion und des Korrosionsschutzes zu berücksichtigen.

11.2 Elektrochemische Vorgänge

11.2.1 Warum korrodieren Metalle ?

Die meisten Metalle kommen in der Natur nicht in reiner Form vor, sondern als Hydroxide und Oxide. Durch Austreiben des Wassers bzw. des Sauerstoffs während der Verhüttung werden sie auf ein höheres Energieniveau gebracht:

Beispiel Eisen: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} + \text{Energie} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}$ (Roteisenerz)

Eisen hat daher das Bestreben, diese Energie wieder abzugeben. Dies ist die treibende Kraft für den Korrosionsvorgang.

Für eine Energiebetrachtung gilt: $4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1117,5\text{ kJ/mol}$

Steht ein Metall mit einer leitenden Flüssigkeit (Elektrolyt) in Verbindung, so hat es die Tendenz, sich in Ionen aufzulösen.

Dieser Vorgang wird als Oxidation bezeichnet. Allgemein gilt für ein n-wertiges Metall M



am Beispiel des Eisens: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

Die frei werdenden Elektronen sammeln sich an der Oberfläche des Metalls. Je größer die Neigung des Metalls zur Bildung von Ionen ist, desto größer ist die Ladung an der Oberfläche.

Am Beispiel der Kontaktkorrosion:

Befinden sich zwei verschiedene Metalle mit verschiedener Neigung zur Oxidation in einer leitenden Flüssigkeit, so besteht zwischen beiden Metallen ein Potentialunterschied. Verbindet man beide Metalle oder **Elektroden** leitend miteinander, so entsteht ein Elektronenfluss in Richtung des Potentialgefälles. Die Elektrode, von der der Stromfluss ausgeht, wird als **Anode** bezeichnet, die andere als **Kathode**.

Die Anreicherung von Elektronen an der Kathode kann zu verschiedenen Reaktionen führen, die in den folgenden Abschnitten beschrieben sind. An der Anode gehen Metallionen in Lösung. Das Metall korrodiert. Durch Reaktionen der Metallionen in der Lösung entstehen Korrosionsprodukte.

Diese Vorgänge hängen also von der Bildung eines sog. **Kontaktelements** ab, das entsteht, wenn beim Vorhandensein eines Elektrolyten zwei unterschiedliche Metalle leitfähig miteinander verbunden sind. Welches der beiden Metalle die größere Neigung zur Auflösung in Ionen hat und damit zur Anode wird, hängt in der Regel von der Stellung der Metalle in der **elektrolytischen Spannungsreihe** ab. Die elektrolytische Spannungsreihe gibt das Potential einer Metallelektrode gegenüber einer Wasserstoffelektrode an.

Tab. 20. Elektrolytische Spannungsreihe

Elektrodenpotential bei 25°C in molarer Lösung der Metallionen [V]		
Li ⁺	- 3,05	anodisch ↑ ↓ kathodisch
K ⁺	- 2,93	
Na ⁺	- 2,71	
Mg ²⁺	- 2,37	
Al ³⁺	- 1,66	
Cr ³⁺	- 0,74	
Zn ²⁺	- 0,76	
Fe ²⁺	- 0,44	
Ni ²⁺	- 0,25	
Pb ²⁺	- 0,13	
Fe ³⁺	- 0,045	
H ⁺	± 0,000	
Cu ²⁺	+ 0,34	
Cu ⁺	+ 0,47	
Ag ⁺	+ 0,80	
Pt ⁴⁺	+ 0,86	
Au ³⁺	+ 1,50	

Je tiefer das betrachtete Metall in der elektrolytischen Spannungsreihe steht, um so edler ist es, bzw. um so geringer ist seine Tendenz, sich in Ionen aufzulösen. Die in der Spannungsreihe festgelegte Reihenfolge der Normalspannungspotentiale gilt nur für Standardbedingungen. Die in der Praxis auftretenden Aktivitäten können erheblich von den Standardbedingungen abweichen, wodurch Sprünge in der Spannungsreihe möglich werden. Zum Beispiel wirkt Chrom auf Eisen nicht anodisch.

11.2.2 Korrosionsformen

Je nach Art der Kathodenreaktion unterscheidet man zwischen Wasserstoff- und Sauerstoffkorrosion.

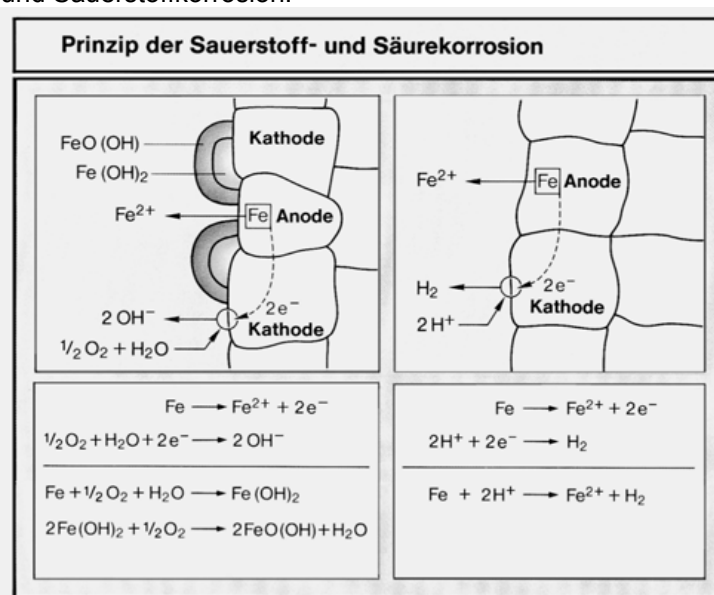
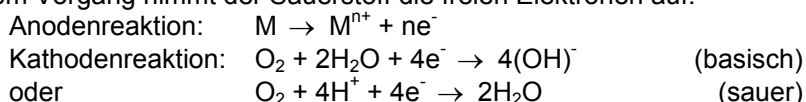


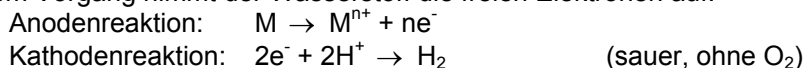
Bild 123. Sauerstoff- und Wasserstoffkorrosion (schematisch)

Sauerstoffkorrosion

Bei diesem Vorgang nimmt der Sauerstoff die freien Elektronen auf:

**Wasserstoffkorrosion**

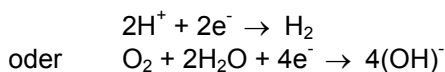
Bei diesem Vorgang nimmt der Wasserstoff die freien Elektronen auf:



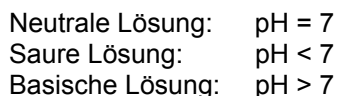
Dieser Korrosionsvorgang führt zu einer gleichmäßigen, u.U. restlosen Auflösung des unedlen Metalls bzw. zu einer Sättigung des Elektrolyten mit M^+ -Ionen.

11.2.3 Geschwindigkeit des Korrosionsablaufs

Die Geschwindigkeit des Korrosionsablaufs hängt nicht nur von der Geschwindigkeit der Metallauflösung an der Anode, sondern auch von der Geschwindigkeit der Kathodenreaktion ab:



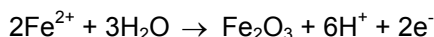
Die Geschwindigkeit der Kathodenreaktion ist von der Konzentration an H-Ionen oder an Sauerstoff im Elektrolyten abhängig. Die H-Ionen-Konzentration wird durch den **pH-Wert** beschrieben, der den negativen, dekadischen Logarithmus der H-Ionen-Konzentration angibt:



In einem sauren Elektrolyten ist die Wasserstoffionenkonzentration hoch, so dass nur die Wasserstoffkorrosion von Bedeutung ist. Die Reaktion verläuft um so schneller, je niedriger der pH-Wert ist.

In neutralen oder basischen Lösungen ist die Wasserstoffionenkonzentration gering, so dass Sauerstoffkorrosion überwiegt, wobei die Geschwindigkeit des Korrosionsvorgangs von der Konzentration von O_2 abhängt.

Je nach pH-Wert des Elektrolyten kann sich an der Metalloberfläche eine Passivschicht ausbilden, die, wenn sie porenfrei und dicht ist, die Auflösung des Metalls in Ionen und damit Korrosion verhindert. Beim Eisen führt folgende Reaktion zur Bildung einer Passivschicht:



Im **Pourbaix-Diagramm** können die Bedingungen abgegrenzt werden, unter denen für ein gegebenes Metall in einer wässrigen Lösung Korrosion, Korrosionsbeständigkeit oder Passivierung zu erwarten sind. In diesem Diagramm wird das Elektrodenpotential E in Abhängigkeit vom pH-Wert aufgetragen. Die Abgrenzungen der Bereiche gelten nur bedingt für praktische Verhältnisse.

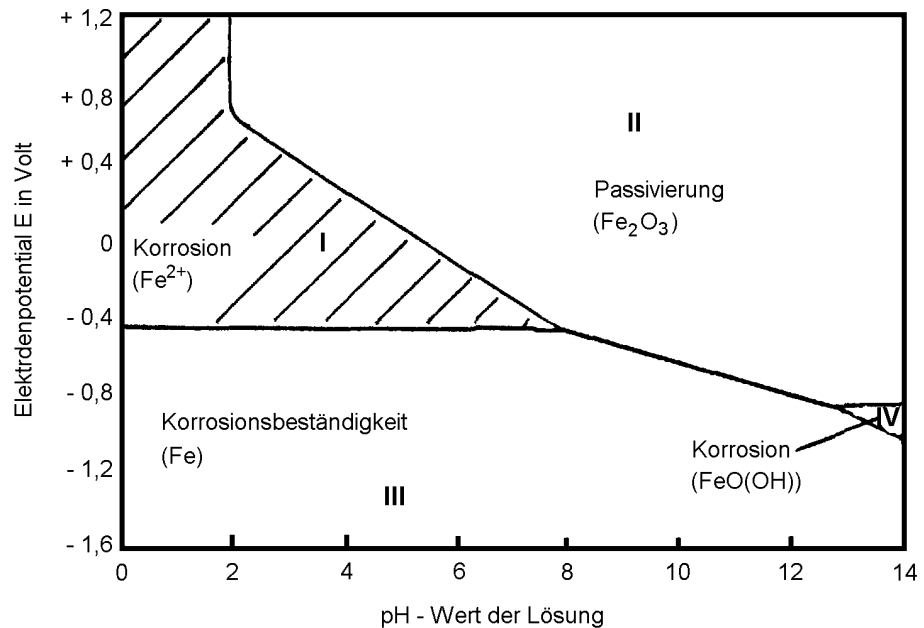


Bild 124. Vereinfachtes Pourbaix-Diagramm bei 25 °C für Eisen in wässriger Lösung

- Bereich I: Aktive Korrosion unter Bildung von Fe-Ionen
 Bereich II: Passivierung durch Bildung einer Passivschicht aus Eisenoxid Fe_2O_3
 Bereich III: Korrosionsbeständigkeit (kathodischer Schutz)
 Bereich IV: Korrosion unter Bildung von FeO(OH) (bei Raumtemperatur verläuft dieser Vorgang sehr langsam)

11.2.4 Korrosionstypen

Entstehung von Lokalelementen

Lokalelemente sind Voraussetzung für das Auftreten elektrolytischer Korrosion. Die Anoden und die Kathoden haben eine endliche Ausdehnung und die Teilprozesse laufen örtlich getrennt voneinander ab. Sie können unter folgenden Bedingungen entstehen:

- Wenn Elemente mit unterschiedlichem Potential in Kontakt stehen (**Kontaktkorrosion**). Dabei löst sich der an die Kathode angrenzende Bereich der Anode am schnellsten auf, so dass die Ausbildung einer Kerbe möglich ist.
- Bei Legierungen, die aus Phasen mit unterschiedlichem Potential bestehen oder bei denen durch Kristallfehler oder Konzentrationsunterschiede der Legierungselemente örtliche Energieunterschiede vorliegen.
- Örtliche Zerstörung oder Fehlstellen in einer korrosionsschützenden Deckschicht (Lochfraß).
- Zerstörung der Passivschicht durch Chloride, Bromide und Jodide.
- Als Folge einer unterschiedlichen Sauerstoffkonzentration in verschiedenen Bereichen einer Metalloberfläche, z.B. Wassertropfenkorrosion.

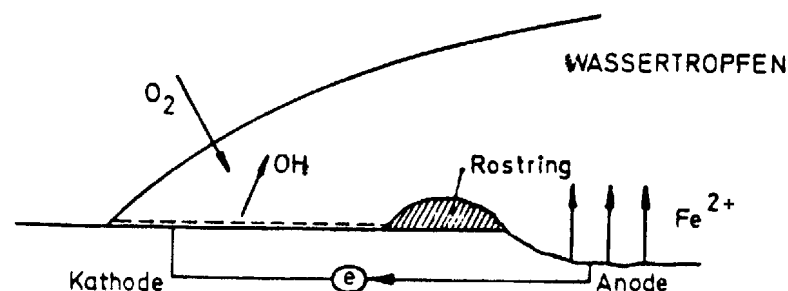
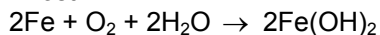


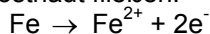
Bild 125. Wassertropfenkorrosion des Eisens

- a) Sauerstoff O_2 dringt aus der Luft in den Wassertropfen. In Nähe der Oberfläche des Wassertropfens ist die O_2 -Konzentration hoch, es entsteht weißer Rost:

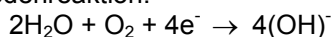


- b) Da die Rosthaut edler als die noch blanke Metalloberfläche ist, liegt ein Lokalelement vor, dessen Kathode die angerostete Oberfläche, dessen Anode das noch blanke Metall ist.

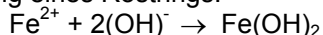
- c) An der Anode gehen Fe^{2+} -Ionen in Lösung, während die freien Elektronen zur Rosthaut fließen:



- d) Kathodenreaktion:



- e) Bildung eines Rostrings:



Flächenkorrosion

Eine mehr oder weniger gleichmäßige Flächenkorrosion findet statt, wenn Anoden und Kathoden mikroskopisch klein sind und gleichmäßig über die Oberfläche verteilt sind.

Mit atmosphärischer Korrosion bezeichnet man Korrosionserscheinungen, die bei Lagerung von Metallen im Freien bei normaler Temperatur auftreten können. Bei Luftfeuchtigkeiten oberhalb 60 bis 70 % kann ein Elektrolyt vorhanden sein:

- Bildung einer adsorbierten Wasserschicht ausreichender Dicke.
- Durch Kondensation von Wasser an Metalloberflächen, die kälter als die Umgebungstemperatur sind (Taubildung). Der Taupunkt kann durch Verunreinigungen der Luft oder der Metalloberfläche erhöht werden.

Spannungsrissskorrosion

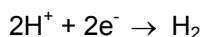
Dies ist eine inter- oder transkristalline Rissbildung in metallischen Werkstoffen bei gleichzeitiger Einwirkung einer Zugspannung und eines korrodierenden Mediums. Zugspannungen können durch äußere Einwirkung entstehen oder aus Eigenspannungen resultieren. Die Gefahr dieser Korrosionsart liegt darin, dass ohne deutlich sichtbare Schädigung und Verformung ein Sprödbruch eintreten kann. Spannungsrissskorrosion setzt voraus, dass

- der Werkstoff gegen diese Beanspruchung empfindlich ist,
- ein Korrosionsmittel vorliegt,
- Zugspannungen einwirken.

Korrosionsmittel sind z.B. Nitrate oder Chloride, welche die Passivschicht der Metalloberfläche örtlich zerstören. Es entstehen ein Lokalelement und örtliche Korrosion, welche Ausgangspunkt eines sich unter Zugspannungen fortpflanzenden Risses sein kann.

Wasserstoffversprödung

Die Wasserstoffversprödung ist die Folge einer kathodischen Reaktion. Bei der Wasserstoffkorrosion tritt an der Kathode folgende Reaktion auf:



Die Bildung des molekularen Wasserstoffs kann aber durch **Katalysatorgifte**, z.B. Sulfide und Cyanide, unterbunden werden. Dann können die sehr kleinen H-Atome in das Kristallgitter des Metalls eindringen und verbinden sich dort zu H_2 -Molekülen. Dadurch entstehen hohe Gasdrücke und eine Verzerrung des Gittersystems.

Folge: Steht der Werkstoff unter Zugspannungen, kann ein Sprödbruch ohne Vorwarnung eintreten. Besonders gefährdet sind Spannstähle.

11.3 Korrosionsschutz

11.3.1 Korrosionsfördernde Bedingungen

Korrosion tritt ein, wenn alle oder mehrere der folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- korrosionsanfälliger Werkstoff (hohe Tendenz zu Ionenbildung)
- Vorhandensein eines Elektrolyten
- korrosionsfördernde Eigenschaften des Elektrolyten:
 - niedriger pH-Wert
 - ungleicher Sauerstoffgehalt im Elektrolyten
 - Anwesenheit korrosionsfördernder Substanzen
- anodische Polarisierung: erhöhte Metallauflösung
- kathodische Polarisierung: Gefahr der Wasserstoffversprödung

Aufgabe des Korrosionsschutzes ist es, diese Bedingungen zu vermeiden oder ihre Wirkung zu verringern. Grundsätzlich baut der Korrosionsschutz auf einem (oder mehreren) der folgenden Verfahren auf:

- Verhinderung der Lokalelementbildung z.B. durch Vermeidung des Kontakts zwischen ungleichen Metallen
- Ausbildung bzw. Schutz einer Passivschicht
- Behinderung der O₂-Zufuhr oder des Eindringens korrodierender Medien.

11.3.2 Konstruktive Maßnahmen

- geneigte und glatte Flächen, die möglichst trocken und staubfrei bleiben
- Vermeidung von Wasseransammlungen (Spaltkorrosion)
- Vermeiden von Schwitzwasserbildung z.B. durch Isolierung
- Belüften von Spalten
- Isolierung zwischen verschiedenen Metallen

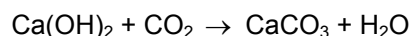
11.3.3 Passivierung

An der Oberfläche eines Metalls kann sich unter bestimmten Bedingungen ein fest haftender Film, meist eine Oxidschicht, bilden, die das Metall vor dem Angriff des korrodierenden Mediums schützt (siehe Abschn. 11.2.3). Der Übergang vom aktiven in den passiven Zustand wird als Passivierung bezeichnet, die sich bildende Schicht als Passivschicht.

Diese Bedingungen sind z.B. für einen im Beton eingebetteten Stahl gegeben. Das im Beton enthaltene Porenwasser ist alkalisch. Es hat einen pH-Wert von 12,6. Nach dem Pourbaix-Diagramm (siehe Abschn. 11.2.3) bildet sich bei diesem pH-Wert eine Oxidschicht auf der Stahloberfläche.

Der Korrosionsschutz liegt jedoch nicht mehr vor, wenn der pH-Wert des Betons abfällt oder die Passivität des Stahls auf andere Weise beeinflusst wird. Hierzu einige Beispiele:

- Große Fehlstellen im Beton, die sich mit Wasser mit niedrigerem pH-Wert füllen können.
- Karbonatisierung des Betons: Dringt aus der Luft Kohlendioxid in den Beton ein, so kann es bei Anwesenheit von Wasser mit Hydratationsprodukten des Zementsteins reagieren:



Dieser Vorgang bewirkt eine wesentliche Reduktion des pH-Werts des Porenwassers.

- In der Nähe von Rissen kann der eingebettete Stahl der freien, u.U. sauren Atmosphäre ausgesetzt sein.
- Im Beton enthaltene Chloride (z.B. aus Tausalzen) oder Nitrate (z.B. aus Düngemitteln) zerstören die Passivschicht.

Die schützende Wirkung des Betons gegenüber eingebettetem Stahl kann wie folgt gesichert werden:

- Herstellung einer ausreichenden Betonüberdeckung
- Herstellung eines dichten Betons, der das Eindringen von CO₂ und anderer korrodierender Medien behindert
- Kontrolle der im Gebrauchszustand zulässigen Rissbreiten
- Vermeidung von Komponenten im Beton, welche Chloride oder Nitrate enthalten oder welche zur Bildung von Sulfiden führen
- Vermeidung des Kontakts zu korrosionsfördernden Substanzen

11.3.4 Werkstoffauswahl

Stähle

Die Widerstandsfähigkeit von Stählen sinkt mit steigendem Gehalt an Schwefel und zunehmender Kaltverformung. Sie hängt auch von der Art des Vergütens ab.

Durch Legierungszugaben (Cu, Si, Cr, Ni, Mo, Mn) kann der Korrosionswiderstand erhöht werden.

Bei Chrom-Nickel- oder Chrom-Nickel-Molybdänstählen (Cr-Gehalt > 12%) bildet sich eine Passivschicht aus Chromoxid. Voraussetzung ist eine glatte und entzunderte Oberfläche.

Tab. 21. Zusammensetzung und Eigenschaften verschiedener Chromstähle

Bezeichnung	X8Cr17	X12CrNi18/8	X5CrNi18/9	X5CrNiMo18/10
Kurzbezeichnung	rostfrei 17	rostfrei 18/8	rostfrei 18/9	rostfrei 18/10/2
Legierungselemente in M.-%	C	0,10	0,12	0,07
	Cr	15,5 bis 17,5	17 bis 19	19
	Ni	-	8 bis 10	9 bis 11
	Mo	-	-	-
Verwendung	innen	innen und außen, normale Atmosphäre		außen, Industrieatmosphäre
β_S in N/mm ²	300	220	200	200
β_S in N/mm ²	500	600	600	600
Bruchdehnung in %	20	50	50	45

Aluminium

Mit steigendem Reinheitsgrad nimmt der Korrosionswiderstand zu. In normaler Atmosphäre bildet sich eine **Passivschicht** aus Aluminiumoxid, die in stark sauren oder alkalischen Medien (z.B. Beton) zerstört wird.

11.3.5 Inhibitoren

Dies sind Substanzen, die dem Elektrolyt als Flüssigkeit oder Gas zugesetzt werden und damit den Korrosionsvorgang verhindern oder hemmen.

Physikalische Inhibitoren werden an der Oberfläche des Metalls adsorbiert und schützen sie auf diese Weise.

Chemische Inhibitoren reagieren mit der Metalloberfläche oder verändern sie, wobei das Reaktionsprodukt korrosionsverhindernd wirkt.

Beispiele im Bauwesen:

- Beton als Inhibitor
- Schutz von Spannstählen im Spannkanal (z.B. VPI-Pulver)

11.3.6 Elektrochemische Verfahren

Korrosion und Korrosionsgeschwindigkeit hängen vom elektrischen Potential bei der Ionenauflösung des Metalls ab. Durch Anlegen einer zusätzlichen elektrischen Spannung können die Potentiale so beeinflusst werden, dass die anodische Korrosion gering ist.

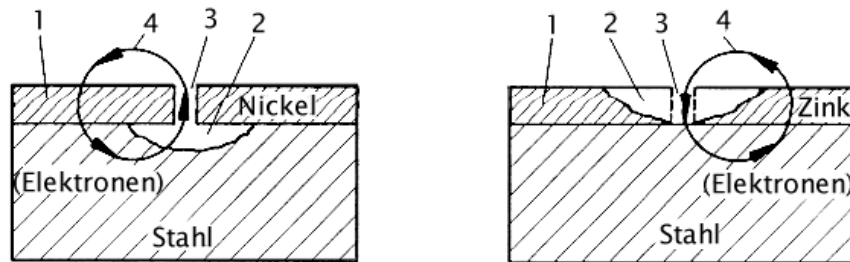
Dies geschieht entweder durch Erhöhung des elektrischen Potentials, so dass eine Passivierung der Oberfläche möglich ist (anodischer Schutz), oder durch Anlegen eines negativen Potentials, so dass das zu schützende Metall zur Kathode wird (kathodischer Schutz).

Kathodischer Korrosionsschutz (KKS) kann erreicht werden entweder durch

- elektrisch leitfähige Verbindung des zu schützenden Metalls mit einem weniger edlen Metall
- oder durch Anlegen einer Fremdspannung, die das zu schützende Metall zur Kathode macht.

11.3.7 Fremdmetallüberzüge

Darunter versteht man das Überziehen eines Metalls mit einem weniger oder nicht korrosionsanfälligen Werkstoff. Voraussetzung für ihre Wirksamkeit ist, dass sie porenlos und unverletzt sind, falls der Überzug edler als das zu schützende Metall ist, z.B. Nickel auf Eisen. Ist der Überzug unedler, so heilt die Überzugsschicht bei Verletzungen aus, z.B. Zink auf Eisen.



anodische Belastung von Stahl

- 1 - Lokalkathode
- 2 - Stahlabtrag
- 3 - Pore (Lokalanode)
- 4 - Lokalstrom (Kationen)

kathodischer Schutz von Stahl

- 1 - Lokalanode
- 2 - verstärkter Zinkabtrag
- 3 - Pore (Lokalkathode)
- 4 - Lokalstrom (Kationen)

Bild 126. Korrosion metallischer Überzüge

11.3.8 Anstriche

Eine Art des Korrosionsschutzes besteht darin, Metalle mit einem diffusionsdichten, beständigen Überzug zu versehen, der auch zu einer Oberflächenpassivierung führen kann.

Beispiele:

- Bleimennige (Pb_3O_4)
- Zinkchromat- und Chlorkautschukanstriche

Bedingungen für die dauerhafte Wirksamkeit:

- Diffusionsdichtheit
- Verformbarkeit auch über lange Dauer
- Stabilität bei erhöhten Temperaturen
- dauerhafte Haftung mit dem metallischen Untergrund.

11.3.9 Kunststoffüberzüge

Kunststoffüberzüge können auf Metalloberflächen im Tauchverfahren aufgebracht werden. Ähnlich wie Anstriche bilden sie keinen elektrochemischen Schutz. Ihre Wirksamkeit hängt daher von der völligen Dichtigkeit ab. Sie müssen die für Anstriche genannten Bedingungen erfüllen.

12 Verbindungsmittel

In vielen Fällen bestehen Baukonstruktionen aus Einzelteilen, die durch Verbindungsmittel zusammengefügt werden müssen (Fügetechnik).

Die charakteristischen Eigenschaften der Verbindungsmittel müssen schon beim Entwurf der Konstruktion berücksichtigt werden und können das Tragverhalten des Bauwerks wesentlich beeinflussen.

12.1 Verbindungsarten

- a) Mechanische Verbindungen:
Nieten, Schrauben, Stecken, Nageln (siehe Vorlesungen des Konstruktiven Ingenieurbaus).
- b) Chemisch-physikalische Verbindungen (Erzeugung atomarer oder molekularer Bindungen zwischen den zu verbindenden Flächen):
Schweißen, Löten, Leimen, Kleben

12.2 Chemisch-physikalische Grundlagen

12.2.1 Verbindungen ohne Verwendung eines Zusatzstoffs

Werden zwei Oberflächen in engen Kontakt gebracht, so haben sie das Bestreben, sich zu vereinigen und die Gesamtoberfläche zu reduzieren, wenn dadurch die potentielle Energie des Gesamtsystems reduziert wird. Selbst bei hochpolierten Oberflächen ist die Kontaktfläche zwischen zwei planen Scheiben nur gering, so dass die molekularen Anziehungskräfte zwischen den Oberflächen sehr klein sind. Eine Vereinigung der Oberflächen setzt daher Diffusionsvorgänge an den Oberflächen voraus, die bei Raumtemperatur meist unendlich langsam ablaufen.

Durch hohen Anpressdruck (**Pressschweißen**) kann die Kontaktfläche erhöht werden, durch eine Temperaturerhöhung wird der Diffusionsvorgang wesentlich beschleunigt. Bei einer Erwärmung bis zum Schmelzpunkt (**Schmelzschweißen**) ist die Beweglichkeit der Atome optimal, was zu einer schnellen Verbindung beider Oberflächen führt. (Schweißverfahren, s. Abschn. 12.3)

12.2.2 Verbindungen bei Verwendung eines Zusatzwerkstoffs mit hohem Schmelzpunkt

Zwei Werkstücke können dadurch miteinander verbunden werden, dass eine Zwischenschicht aus einem Werkstoff gebildet wird, dessen Schmelzpunkt etwa dem Schmelzpunkt der zu fügenden Werkstücke entspricht. Durch Anschmelzen der Oberflächen der Werkstücke entsteht eine hochfeste Verbindung (metallische Bindungen). Voraussetzung ist die Verträglichkeit (Mischbarkeit) von Grundmetall und Zusatzstoff.

12.2.3 Verbindungen bei Verwendung eines Zusatzwerkstoffs mit niedrigem Schmelzpunkt

Löten

Zwei metallische Werkstücke können dadurch miteinander verbunden werden, dass eine Zwischenschicht gebildet wird, deren Schmelzpunkt niedriger als der Schmelzpunkt der zu verbindenden Werkstoffe ist. Zwischen den Oberflächen und dem Zusatzwerkstoff entwickeln sich molekulare und in begrenztem Umfang metallische Bindungen.

Weichlöten: $T \leq 450 \text{ °C}$

Hartlöten: $T > 450 \text{ °C}$

12.2.4 Klebeverbindungen

Sie finden Anwendung im Holzbau (verleimte Konstruktionen), im Metallbau, für Konstruktionen aus Kunststoff und in beschränktem Umfang im Beton- und Stahlbetonbau.

Leimen und Kleben

Verwendung eines meist artfremden Zusatzwerkstoffs, der bei Normaltemperatur durch Entweichen eines Lösungsmittels oder durch einen chemischen Härtevorgang erstarrt, wobei die Erhärtung durch Temperaturerhöhung beschleunigt werden kann.

Die Verbindung kommt meist durch Adhäsion zustande (molekulare Anziehungskräfte zwischen ungleichen Stoffen, Van-der-Waals'sche Kräfte).

Voraussetzung für die Erzeugung einer guten Verbindung sind:

- Reduktion der potentiellen Energie des Gesamtsystems aus Werkstück und Kleber
- Gleichmäßiger Auftrag des flüssigen Klebers (Erhöhung der Kontaktfläche)
- Hohe Adhäsion zwischen der Oberfläche des Werkstücks und des erhärteten Klebers
- Verträgliche Polarität von Werkstückoberfläche und Kleber
- Möglichst niedrige Viskosität des flüssigen Klebers
- Ausreichende Festigkeit (Kohäsion) des erhärteten Klebers
- Geringe Schwind- oder Temperaturspannungen, die beim Erhärten des Klebers entstehen können
- Verträglichkeit der Verformungseigenschaften des Werkstücks und des Klebers in möglichst dünnen Klebefugen

Die Erfüllung von a) b) c) hängt von der Benetzbarkeit der Oberfläche durch den Kleber ab. Sie kann durch Bearbeitung (Reinigung) der Oberfläche beeinflusst werden.

Benetzbarkeit von Oberflächen und Adhäsionsenergie

Die in der Nähe einer Oberfläche angeordneten Atome sind nicht im Zustand minimaler potentieller Energie. Zur Erzeugung von Oberflächen ist daher Energie notwendig, d.h. Oberflächen sind Energiequellen (Oberflächenenergie und Oberflächenspannung γ (siehe Abschn. 6.7.1)).

Die Größe der Oberflächenenergie hängt vom Medium ab, das der Oberfläche benachbart ist.

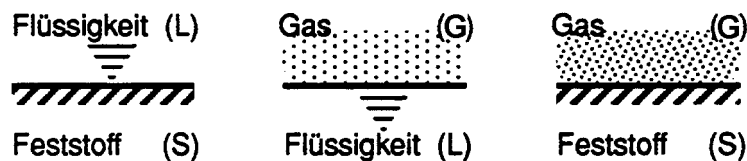


Bild 127. Grenzflächen

Wird auf eine Oberfläche ein Tropfen einer Flüssigkeit aufgebracht, so wirken in diesem Element Oberflächenspannungen, s. Bild 128.

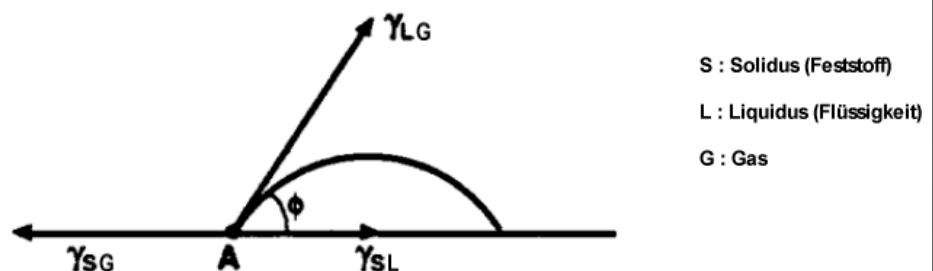


Bild 128. Der Winkel eines Flüssigkeitstropfens auf einer festen Oberfläche

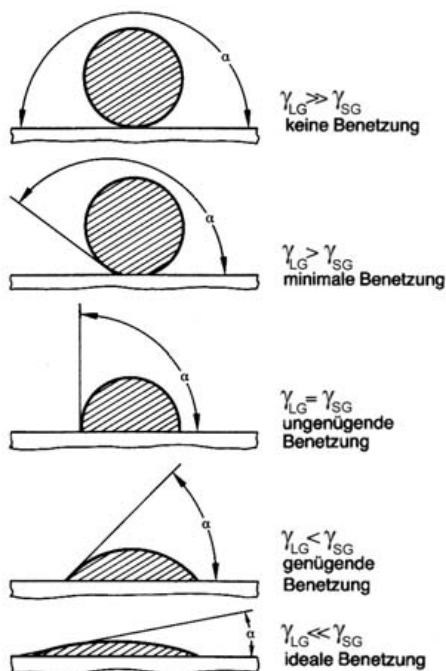


Bild 129. Oberflächenenergie und Randwinkel

Die **Adhäsionsenergie** W ist die Energie, die zum Trennen zweier Oberflächen aufgebracht werden muss. Sie gibt die Reduktion der freien Oberflächenenergie an, die bei der Vereinigung der Oberfläche mit der Flüssigkeit eintritt. Sie steht mit den Oberflächenenergien der betrachteten Grenzflächen in direktem Zusammenhang und entspricht der Differenz der Oberflächenenergien der Grenzflächen vor und nach dem Trennen. Für die Grenzfläche Feststoff - Flüssigkeit gilt:

$$W = \underbrace{\gamma_{SG} + \gamma_{LG}}_{\text{nach der Trennung}} - \underbrace{\gamma_{SL}}_{\text{vor der Trennung}} = \gamma_{SG} + \gamma_{LG} - \gamma_{SG} + \cos \phi \cdot \gamma_{LG}$$

mit $\gamma_{SL} = \gamma_{SG} - \cos \phi \cdot \gamma_{LG}$

$$W = \gamma_{LG} \cdot (1 + \cos \phi)$$

Die Adhäsionsenergie (= Verringerung der freien Oberflächenenergie) erreicht einen Größtwert für $\phi = 0^\circ$ (vollständige Benetzung) und wird zu Null für $\phi = 180^\circ$ (keine Benetzung).

Benetzbarkeit ist eine wesentliche Voraussetzung für das Erzielen einer guten Klebe- oder Lötverbindung. Sie kann durch Anrauen der Oberfläche, Entfernung dünner Fett- oder Staubfilme etc. der Oberfläche verbessert werden.

Klebstoffe

Im erhärteten Zustand bestehen Kleber aus vernetzten oder nichtvernetzten hochpolymeren Verbindungen (natürliche Stoffe oder Kunststoffe siehe Baustoffkunde II). Ihre Erhärtung erfolgt durch Entweichen eines Lösungsmittels oder durch eine chemische Reaktion zwischen verschiedenen Komponenten des Klebers.

Tab. 22. Übersicht über die gebräuchlichsten natürlichen und synthetischen Klebstoffe

Physikalisch bindend (hochpolymer)		Chemisch bindend (härtend) (niederpolymer)
Natürliche Rohstoffe	Synthetische Rohstoffe	
<u>Proteine:</u> Glutin Kasein Sojaprotein Blutalbumin	Polyvinylacetat Polyvinyläther Polyacrylat Polyäthylen	Harnstoff- Formaldehydharze Melamin- Formaldehydharze Phenol- Formaldehydharze Epoxydharze
<u>Stärke:</u> Stärke Dextrin Celluloseäther	Polystyrol	Polyurethane Aminoplaste Phenoplaste
Naturkautschuk	Synthetische Kautschuke	

Neben den Holzleimen sind die wichtigsten im Bauwesen verwendeten Kleber die Phenol- und Epoxydharze (siehe Skriptum Baustoffkunde II).

12.2.5 Einflüsse auf die Festigkeit von Klebeverbindungen

Konstruktive Durchbildung

Die Festigkeit des Klebers ist meist geringer als die der zu verbindenden Werkstücke (max. Zugfestigkeit ca. 100 N/mm^2). Diesem Nachteil kann man durch Vergrößerung der Klebeflächen entgegenwirken. Daher sind Überlappungs- oder Schäftungsstöße einem Stumpfstoß vorzuziehen.

Verbindungsformen

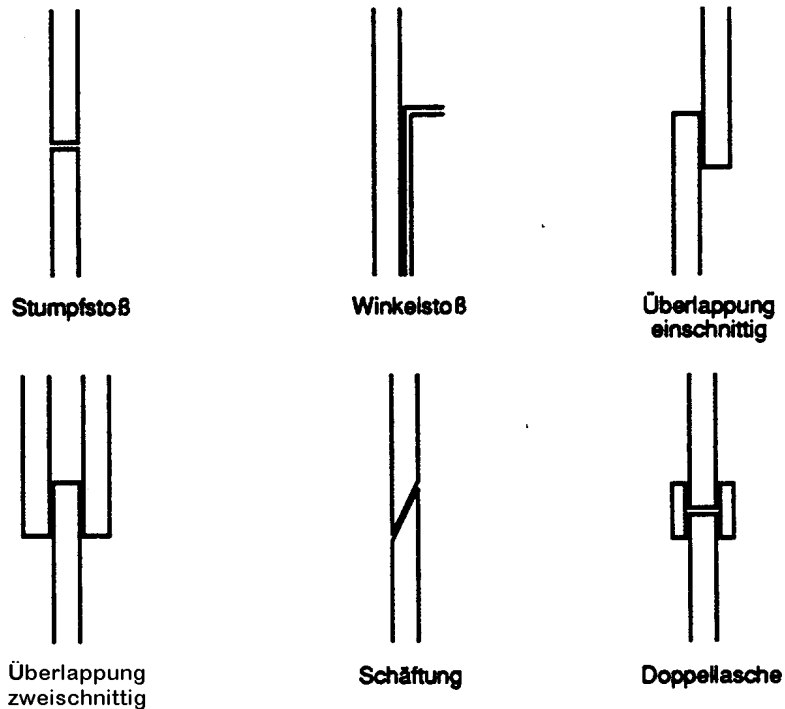


Bild 130. Verbindungsformen

12.3 Schweißverbindungen

12.3.1 Allgemeines

Bei den Schweißverfahren unterscheiden wir grundsätzlich zwischen:

- a) **Pressschweißverfahren**, bei denen die Verbindung hauptsächlich durch Anwendung eines äußeren Drucks mit oder ohne gleichzeitiger Erwärmung erzeugt wird.
- b) **Schmelzschweißverfahren**, bei denen die Verbindung der Oberflächen durch Wärmezufuhr und Anschmelzen der zu verbindenden Oberflächen geschieht.

Als Folge der Erwärmung bis nahe oder über den Schmelzpunkt der zu verbindenden Teile können erhebliche Gefüge- und Eigenschaftsänderungen des Werkstoffs eintreten.

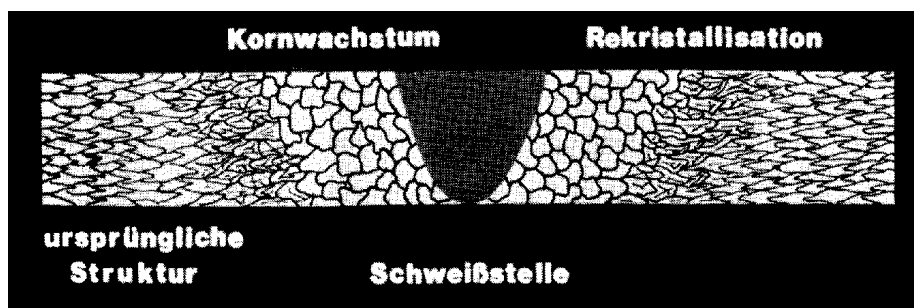


Bild 131. Schweißeinflusszone

Die Schweißbarkeit von Metallen richtet sich daher nach ihrer Struktur, Herstellungsart und dem jeweils angewandten Schweißverfahren (siehe Abschn. 12.3.3).

12.3.2 Technische Schweißverfahren (siehe DIN 1910)

Pressschweißen

Kaltpressschweißen: Schweißen unter Druck ohne Wärmezufuhr.

Ultraschallschweißen: Schweißen durch Erzeugung mechanischer Schwingungen im Ultraschallbereich.

Reibschweißen: Ausreichende Erwärmung der zu verbindenden Oberflächen durch Reiben, dann Verschweißung unter Druck.

Gaspressschweißen: Erhitzen der Teile mit oder ohne Stirnflächenabstand durch eine Brenngas- Sauerstoff-Flamme. Nach ausreichendem Erwärmen Schweißen unter Druck.

Widerstands-Pressstumpfschweißen: Die erforderliche Wärme wird durch elektrischen Strom unter Nutzung des elektrischen Widerstands in der Schweißzone erzeugt. Schweißen der Werkstücke unter Druck (stetiges Zusammenpressen). Übertragen des Stroms durch Elektroden.

Widerstands-Presspunktschweißen: Übertragung von Strom und Kraft durch Punktschweißelektroden.

Widerstands-Abbrennstumpfschweißen: Übertragung von Strom und Kraft durch Spannbacken. Die vorgewärmten Teile werden mit geringer Kraft zur Berührung gebracht (Schmorkontakt). Abbrennen, wobei schmelzflüssiger Werkstoff herausgeschleudert wird. Nach ausreichendem Erwärmen der Teile Verschweißen durch schlagartiges Stauchen.

Schmelzschiessen

GieBschmelzschiessen: Einbringen eines flüssigen Schweißzusatzwerkstoffs in die Fuge zwischen den kalten oder vorgewärmten Teilen. Dadurch Anschmelzen und Verbinden der Teile.

Gasschmelzschiessen: Entstehung des Schmelzflusses durch Einwirken einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme. Getrennte Zuführung von Wärme und Schweißzusatzwerkstoff.

Widerstandsschmelzschiessen: Aufschmelzen der Stoßflächen durch die Widerstandserwärmung mit oder ohne Zusatzwerkstoff.

Lichtbogenschweißen: Schmelzfluss entsteht durch Einwirken eines Lichtbogens entweder zwischen einer Elektrode und dem Werkstück oder zwischen zwei Elektroden. Die Elektroden sind gleichzeitig Schweißzusatzwerkstoff.

Schutzgasschweißen: Lichtbogenschweißen, bei dem Elektrode, Lichtbogen und Schmelzbad gegen die Atmosphäre durch zusätzliches Schutzgas abgeschirmt sind. Als Schutzgase finden Edelgase, mehratomige Gase oder Mischgase Verwendung.

Elektronenstrahl- bzw. Lichtstrahlschweißen: Energiezufuhr über gebündelte Elektronen- oder Lichtstrahlen (Laser).

12.3.3 Folgeerscheinungen des Schweißens

Schweißen stellt eine örtlich begrenzte Wärmebehandlung dar, die zu einer Änderung der Mikrostruktur und, je nach Erwärmungs- und Abkühlgeschwindigkeit, zu einer **Härtung** oder zu einer **Erweichung** des Werkstücks führen kann. Besonders bei zu schneller Abkühlung eines Stahls mit ausreichend hohem C-Gehalt kann unerwünschte Härtung (Martensitbildung) oder Reckalterung eintreten.

Härtungsgefüge können vermieden werden durch

- a) Wärmebehandlung nach dem Schweißen, z.B. Spannungsarmglühen oder Nachvergüten.
- b) Isothermes Schweißen: Vorwärmen des Schweißgutes auf Temperaturen oberhalb der M_s -Temperatur s. Abschn. 10.5.1, Bild 119. Nach dem Schweißen wird die Temperatur bis zur Umwandlung in ein Zwischenstufengefüge oder Perlit konstant gehalten.

Durch die örtliche, also ungleichmäßige Erwärmung des Werkstücks beim Schweißen können **Wärmespannungen** entstehen, die z.B. eine Verwölbung und Verzerrung, aber auch ein Anreißen des geschweißten Metalls zur Folge haben können.

Schweißnähte können je nach Ausbildung plötzliche Querschnittsveränderungen, d.h. **Kerben**, darstellen. An diesen Kerben erhöht sich die Gefahr eines Sprödbruchs vor allem in Gegenwart von Fehlstellen, ungenügender Füllung der Schweißnaht und Versprödung des Werkstücks. Bei der Auswahl der zu schweißenden Stellen und des Schweißverfahrens sind diese Gesichtspunkte in Abhängigkeit von dem zu schweißenden Werkstück zu berücksichtigen.

12.3.4 Die Schweißbarkeit von Stählen

Stähle sind zum Schweißen geeignet, wenn die örtliche Erwärmung nicht die Struktur und die Eigenschaften, die durch eine vorhergegangene Behandlung erzeugt wurden, wieder rückgängig macht.

Ferner ist es notwendig, dass der Stahl schnell abgekühlt werden kann, ohne dass dabei Gefügebildungen eintreten, die eine wesentliche Beeinträchtigung der ursprünglichen Eigenschaften des Stahls bedingen.

Die Schweißbarkeit eines Stahls richtet sich daher nach der Art seiner Vorbehandlung sowie nach seiner chemischen Zusammensetzung, insbesondere

re dem Gehalt an Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel und an Legierungselementen. Stähle sind vor allen Dingen dann zum Schweißen geeignet, wenn sie einen geringen Kohlenstoffgehalt und einen geringen Anteil an Stahlbegleitern (Schwefel, Stickstoff) haben.

Die Schweißbarkeit der Baustähle ist nicht immer garantiert. Stähle S 235 JR, S 355 JR sind geschweißte Konstruktionen geeignet.

Indexverzeichnis

— A —

Abkühlkurve 60
 Abschrecken 107
 Abschreckhärten 103
 Adhäsionsenergie 119
 Aggregatzustand 38
 Aktivierungsenergie 69
 Aluminium 78, 116
 amorph 39, 53
 Anion 43
 Anisotropie 23
 Anlassen 101, 107
 Anode 110
 Arbeitsvermögen 9
 Arrheniusgleichung 69
 atmosphärische Korrosion 114
 Atombindung 43
 Atomradius 40
 Ausscheidungshärten 101
 Austenit 103

— B —

Benetzbarkeit 119
 Bindungsarten 40
 Brinellhärte 11
 Bruch 80, 96
 Bruchzähigkeit 88

— D —

Dauerfestigkeit 89
 Dauerstandfestigkeit 10, 76
 Dehnung 5, 8
 Dehnungshypothese 96
 Diamant 51
 Dichte 14
 dichtest gepackt 52 siehe HDP und KFZ
 Diffusion 15, 68
 Diffusionsglühen 106
 Diffusionswiderstandszahl 17
 Dipolbindung 44
 Druckguß 78
 Duktilität 7, 46
 Duroplast 53

— E —

Edelgaskonfiguration 42
 Einkristall 33
 Einlagerungsatom 60
 Einschnürungsbruch 80
 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm 64
 elastische Verformung 6, 8
 elastisches Gel 56
 Elastizität 6
 Elastomer 53
 Elastoplast 53
 Elektrode 110
 Elektrolyt 110
 elektrolytische Korrosion 21
 Elektronegativität 41
 Elektronenaffinität 41
 Elektronenstrahlschweißen 123
 Elementarzelle 52
 E-Modul 47
 Entropie 15
 Ermüdung 11
 Ermüdungsfestigkeit 89
 Erweichen 123
 Eutektikum 61

Eutektoid 62

— F —

Fe-C-Diagramm siehe Eisen-Kohlenstoff-Diagramm
 Ferrit 103, 104
 Festigkeit 5, 10, 46, 80, 121
 feuerfest 21
 Feuerwiderstand 21
 Feuerwiderstandsklassen 21
 Ficksches Gesetz 16
 Fließen 8, 24, 96
 Fließlinie 35
 Formziffer 82
 Frank-Read-Quelle 29
 Fremdmetallüberzug 117
 Füller 23

— G —

Gangart 71
 Gaspreßschweißen 122
 Gasschmelzschweißen 123
 Gel 39, 55
 Gelporen 56
 gemischte Bindung 45
 gemischte Versetzung 27
 Gerber-Beziehung 91
 Gesetz der abgewandten Hebelarme 59
 Gestaltänderungsarbeitshypothese 97
 Gibbs'sche Phasenregel 59, 61
 Gießen 66
 Gießschmelzschweißen 123
 Gitterparameter 52
 Gleichmaßdehnung 8
 Gleitebene 53
 Gleitsystem 30
 Glühen 67, 106
 Glühfarben 107
 Goodman-Beziehung 91
 Graphit 52
 graues Gußeisen 65
 Grauguß 77
 Griffith 84
 Guß 78
 Gußeisen 62, 65, 77

— H —

Härten 67, 100, 107, 123
 Hauptgruppe 40
 HDP 33, 50, 51
 Heterogenität 23
 hexagonal dichteste Packung siehe HDP
 hochfeuerfest 21
 Homogenisieren 67
 Homogenität 23
 homöopolare Bindung 43
 Hookesches Gesetz 6
 Huber-v. Mises-Bedingung 97

— I —

Inhibitor 116
 interkristalliner Bruch 80
 Ionenbindung 43
 Ionisierungsenergie 41
 Irwin 84
 Isolator 47
 isothermes Schweißen 123
 Isotropie 23

— K —

Kaltpreßschweißen 122
Kaltverformung 67, 100
Kapillarporen 56
Katalysatorgift 114
Kathode 110
Kation 43
Kerbe 82, 90, 123
Kerbschlagzähigkeit 12, 82
Kernladungszahl 41
Kettenmolekül 53
Kettenpolymer 53
KFZ 33, 50, 51, 58, 60, 63
Kleben 119
Klebstoffe 120
Knetlegierung 78
Kokillenguß 78
Kolloid 39, 56
Konduktion 19
Kontaktkorrosion 113
Konvektion 19
Koordinationszahl 50
Korn 62
Körner 23
Korngrenze 23, 62
Kornwachstum 68
Korrosion 21, 110
Korrosionsschutz 115
kovalente Bindung 43, 46
KP 49, 50
Kriechen 10, 24, 36, 76
Kriechgrenze 10
Kriechmodul 10
Kriechzahl 10
Kristallerholung 68
Kristallfehler 52
kristallin 38
KRZ 33, 36, 50, 51, 63
kubisch flächenzentriert siehe KFZ
kubisch primitiv siehe KP
kubisch raumzentriert siehe KRZ
kubischer Martensit 104
Kugelgraphit 65, 77
Kugelpackung 49

— L —

Lamellengraphit 65
Ledeburit 63
Legierung 57, 78, 108, 116
Legierungselement 108
Legierungshärten 101
Leimen 119
Lichtbogenschweißen 123
Linienfehler 52
Liquiduslinie 58
Lochfraßkorrosion 113
Lokalelement 110, 113
Löslichkeit 57
Löten 118
Lüderslinie 35
Lüderslinien 67
Lunkerbildung 66

— M —

Martensit 103, 123
Matrix 23
Metallbindung 43, 46
Metallgefüge 62
Millersche Indizes 53
Miner-Regel 92
Mischkristall 60
Mohrsche Bruchhypothese 99
Mohrscher Spannungskreis 93

Molekülkette 53
Monomer 53

— N —

Nachbehandlung 67
nicht-kristallin siehe amorph
Normalglühen 106
Normalspannungshypothese 96

— O —

Oberflächenenergie 55
Oberflächenhärte 11

— P —

Passivierung 115
Patentieren 108
Periode 40
Periodensystem 40
Peritektikum 62
Perlit 63, 123
Permeation 15, 18
Petschgleichung 34
Phase 23, 59
Phasendiagramm 57, 60
pH-Wert 112
plastische Verformung 6, 24, 35
Plastizität 6, 33
Poissonsche Zahl 5
Polymer 53
Porosität 5, 7, 23
Potentialtopf 38
Pourbaix-Diagramm 112, 115
Preßschweißen 118, 122
Primärzementit 63
Proportionalstab 7
Punktfehler 52

— Q —

Quellen 14
Querdehnung 5

— R —

Radiation 19
Raumgitter 49
Raumpolymer 53
Realkristall 52
Reckalterung 100, 123
Reibschweißen 122
Rekristallisation 68
Rekristallisationsglühen 106
Relaxation 10, 36, 76
Restaustenit 103

— S —

Salz 43
Sauerstoffkorrosion 112
Scherbruch 80
Schleuderguß 78
Schmelzschweißen 118, 123
Schraubenversetzung 27
Schrumpfen 14
Schubbruch 80
Schubfestigkeit 26
Schubspannung 31
Schubspannungshypothese 96
Schutzgasschweißen 123
Schweißen 122, 123
Schwinden 14
Seigerung 66, 108
Sekundärzementit 63

Silikat 52
Sintern 68
Smith-Diagramm 90
Sol 39, 55
Soliduslinie 58
Spaltbruch 80
Spaltebene 53
Spannung 5, 8
Spannungsarmglühen 106, 123
Spannungs-Dehnungs-Diagramm 6, 8, 9, 34, 35
Spannungs-Dehnungslinien siehe Spannungs-Dehnungs-Diagramm
Spannungsrißkorrosion 21, 114
Sprödbbruch 114
spröder Bruch 80, 83
Sprödigkeit 6, 46, 108
Stahl 34, 35, 62, 71, 108, 116, 123
Stahlbegleiter 108
starres Gel 56
Streckgrenze 34, 89
Stufenversetzung 27, 52

— T —

technische Dehnung 8
technische Spannung 8
Temperguß 65, 77
Tetragonal 51, 60
Thermoplast 53
transkristalliner Bruch 80
Treiben 14
Trennbruch 80
Treska-Bedingung 96

— Ü —

übereutektisch 61
Ultraschallschweißen 122
Umwandlungshärten 103
untereutektisch 61

— V —

Van der Waals-Bindung 44
Verbindungsmittel 118
Verfestigung 8, 100
Verformung 5

Verformungsenergie 9
Vergüten 67, 107, 116
Vernetzungsgrad 53
Versetzung 27, 100
Versetzungsdichte 35
Vielkristall 34
viskose Verformung 6, 24
Volumendehnungskoeffizient 15

— W —

Waage-Regel 59
wahre Dehnung 8
wahre Spannung 8
Wärmeausdehnungskoeffizient 14
Wärmedehnung 14
Wärmedehnungskoeffizient 48
Wärmeleitfähigkeit 19
Wärmeleitung 15, 18
Wärmespannung 123
Warmverformung 67
Wasserdampfdiffusion 16
Wasserstoffkorrosion 112
Wasserstoffversprödung 114
Weichglühen 106
weißes Gußeisen 64
Widerstands-Abbrennstumpfschweißen 122
Widerstands-Preßpunktschweißen 122
Widerstands-Preßstumpfschweißen 122
Widerstandsschmelzschweißen 123
wiederholte Belastung 89
Wöhler-Linien 90

— Z —

zäher Bruch 80, 83
Zähigkeit siehe Duktilität
Zeitstandfestigkeit 10
Zementit 63
ZTU-Schaubild 105
Zugfestigkeit 81

— —

σ - ϵ -Diagramm siehe Spannungs-Dehnungs-Diagramm