

---

# Werkstoffkunde Zusammenfassung

© 1996 by Mike Ullrich

---

<b>1. WERKSTOFFHAUPTGRUPPEN .....</b>	<b>2</b>
<b>2. ATOMAUFBAU UND -BINDUNG .....</b>	<b>2</b>
ATOMAUFBAU .....	2
QUANTENZAHLEN .....	2
ATOMBINDUNG .....	2
<b>3. KRISTALLINE STRUKTUREN.....</b>	<b>3</b>
BRAVAIS GITTERTYPEN.....	3
GITERRICHTUNGEN .....	4
GITTEREBENEN (MILLER'SCHE INDIZES).....	4
<b>4. STÖRUNGEN IN KRISTALLINEN STRUKTUREN .....</b>	<b>5</b>
PUNKTFÖRMIGE GITTERSTÖRUNGEN ( 0 - DIMENSIONAL ).....	5
LINIENFÖRMIGE GITTERSTÖRUNGEN ( 1 - DIMENSIONAL ).....	5
FLÄCHENFÖRMIGE GITTERSTÖRUNGEN ( 2 - DIMENSIONAL ).....	7
RÄUMLICHE GITTERSTÖRUNGEN ( 3 - DIMENSIONAL ) .....	7
<b>5. AMORPHE UND TEILKRISTALLINE STRUKTUREN .....</b>	<b>8</b>
AMORPHE STRUKTUREN .....	8
TEILKRISTALLINE STRUKTUREN .....	8
POLYMERE .....	8
<b>6. LEGIERUNGSLEHRE .....</b>	<b>10</b>
KONZENTRATIONSANGABEN .....	10
PHASENREGEL.....	10
ZUSTANDSÄNDERUNGEN (REINE METALLE).....	10
<b>7. DIFFUSION.....</b>	<b>12</b>
<b>8. ERHOLUNG UND REKRISTALLISATION .....</b>	<b>12</b>
<b>9. WERKSTOFFPRÜFUNG .....</b>	<b>13</b>
ZUGVERSUCH.....	13
HÄRTEPRÜFUNG.....	14
KRIECHVERSUCH .....	14
KERBSCHLAGBIEGEVERSUCH.....	15
RIßZÄHIGKEITSVERSUCH.....	15
DAUERSCHWINGVERSUCH ( = SCHWINGFESTIGKEITSVERSUCH = ERMÜDUNGSVERSUCH).....	15
<b>10. GRUNDLAGEN DER BAUTEILDIMENSIONIERUNG.....</b>	<b>16</b>
<b>11. EISENBASISWERKSTOFFE .....</b>	<b>17</b>
AUSTENITUMWANDLUNG .....	17
ZTU - DIAGRAMME.....	17
WÄRMEBEHANDLUNG.....	18
EISENGUßWERKSTOFFE .....	19
<b>12. NICHTEISENMETALLE .....</b>	<b>20</b>
<b>13. INGENIEURKERAMISCHE WERKSTOFFE .....</b>	<b>21</b>

## 1. Werkstoffhauptgruppen

- Metalle
- Keramiken und Gläser
- Kunststoffe
- Verbundstoffe
- Halbleiter

## 2. Atomaufbau und -bindung

### • Atomaufbau

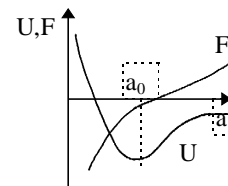
- Kern: Protonen (+) und Neutronen (neutr.)
- Hülle: Elektronen (-)
  
- Avogadro Konstante:  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  Teilchen pro Mol
- Molvolumen:  $V_M = \frac{m_M}{r}$

### • Quantenzahlen

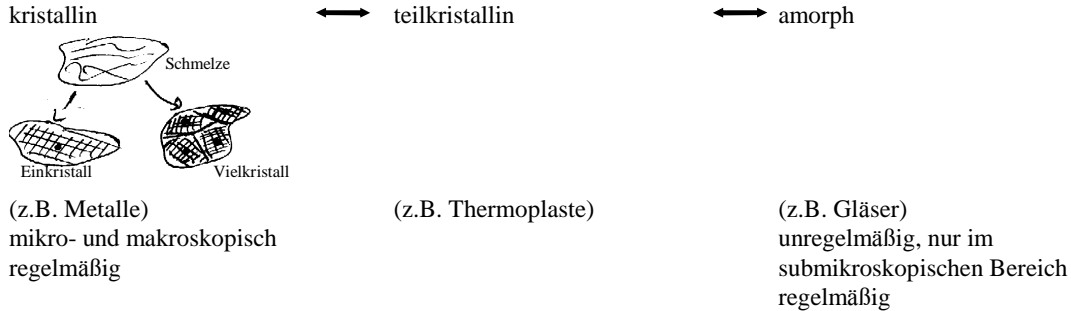
- *Hauptquantenzahl*:  $n=1,2,3,\dots$  ist Hauptschale (K,L,M,...)
- *Nebenquantenzahl*: entspricht den Orbitalen: s, p, d, f
- *Magnetquantenzahl*:  $0 \leq |m| \leq l$  entspricht der Ausrichtung. Besetzung erfolgt nach Hund'scher Regel
- *Spinquantenzahl*:  $\pm \frac{1}{2}$
- *Pauli Prinzip*: 2 Elektronen stimmen in den 4 Quantenzahlen niemals überein.
- **Koordinationszahl**: KZ = Anzahl Atome mit gleichem (min.) Abstand zum Atom

### • Atombindung

- primäre/chemische Bindung
  - *Ionenbindung* (z.B.  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$ )  
 elektrostatische Anziehung, Coulomb'sche Kräfte:  $F_C = -K / a^2$   
 gleichzeitig: Abstoßungskraft  $F_R = \lambda e^{-a/\rho}$   
 $F = F_C + F_R = dU / dt$   
 Gleichgewichtsabstand:  $a_0 = r_1 + r_2$  (Atomradien) aus  $F = 0$  !  
 KZ = 2, 3, 4, 6, 8, 12
  - *kovalente Bindung, Atombindung*  
 gemeinsame Elektronenpaare durch Atombindung  
 Bsp. Kunststoffe, Halbleiter, Diamant (KZ=4)
  - *Metallbindung*  
 Elektronenwolke um positive Kerne  
 $8 \leq \text{KZ} \leq 12$   
 => hohes Verformungsvermögen
- sekundäre/physikalische Bindung  
 geringer Bindungsbeitrag, Anzahl von entgegengesetzte Ladungen  
 Bsp. Kunststoffe
  - temporäre Dipole  
 Ausrichtung der Ladungen im Kern => elektrostatische. Anziehung
  - permanente Dipole / Wasserstoffbrückenbindung / *van-der-Waalsche Bindung*  
 Ladungsverschiebung ( $\delta^{+/-}$ )  
 Bsp.:  $\text{H}_2\text{O}$



### 3. Kristalline Strukturen



#### • Bravais Gittertypen

- **Kubisches Gitter**  $a_0 = b_0 = c_0$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

- kubisch primitiv



- **KRZ:** kubisch raumzentriert (z.B.  $\alpha$ -Fe)

- $KZ^{krz} = 8$
- 6 Gleitsysteme: z.B.  $\{110\} \langle 111 \rangle$
- Zwillingsysteme:  $\{112\} \langle 111 \rangle$
- Trennbruchsysteme:  $\{100\} \langle 100 \rangle$

- **KFZ:** kubisch flächenzentriert (z.B.  $\gamma$ -Fe)

- $KZ^{kfz} = 12$ , da 3 -  $\{100\}$  Ebenen á 4 Atome
- $RE = 4 V / a_0^3 = 4 (4/3 \pi r^3) / a_0^3 = 74\%$
- Oktaederlücken  $n_{Okt}^{kfz} = 1 + 12/4 = 4$  (Würfelmitte + -kanten)
- Tetraederlücken  $n_{Tetra}^{kfz} = 8$  (Raumdiagonale)
- Stapelfolge der  $\{111\}$ -Ebenen ist ABCABCABC...
- Dichtest gepackte Ebene ist  $\{111\}$
- Dichtest gepackte Richtung ist  $\langle 110 \rangle$
- 12 Gleitsysteme ist Gleitebene und -richtung:  $\{111\} - \langle 110 \rangle$   
 $\Rightarrow$  duktil, da Winkel zwischen  $\tau$  und Gleitsystem
- Zwillingsysteme bestehen aus ZGE:  $\{111\}$ , ZGR:  $\langle 112 \rangle$ , ZE:  $\{110\}$
- Trennbruchsysteme:  $\{111\} \langle 111 \rangle$

- **Tetragonales Gitter** ( primitiv, raumzentriert)



$$a_0 = b_0 \neq c_0, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

- **Orthombisches Gitter** ( primitiv, raum-, flächen-, basiszentriert)



$$a_0 \neq b_0 \neq c_0, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

- **Monoklines** ( primitiv, basiszentriert)/ **Triklines Gitter** ( primitiv)

$$a_0 \neq b_0 \neq c_0, \alpha \neq \beta \neq \gamma$$

- **HEX: Hexagonales Gitter**

z.B. Magnesium (Vorsicht  $\neq$  HEX Gitter der dichtesten Kugelpackung)

- $KZ^{hex} = 12$
- $RE = 74\%$ ;  $c/a = 1,630 \Rightarrow$  dichteste Packung
- Tetraederlücken: 4
- Oktaederlücken: 2
- 3 Gleitsysteme (Grundfläche in 3 Richtungen)



- **Rhomboedrisches Gitter** (primitiv)

wie monoklin, aber  $a_0 = b_0 = c_0$

• **Gitterrichtungen**

- $\mathbf{r} = \begin{pmatrix} u' a_0 \\ v' b_0 \\ w' c_0 \end{pmatrix} = p \begin{pmatrix} u a_0 \\ v b_0 \\ w c_0 \end{pmatrix}$ ; mit p so gewählt, daß u, v, w ganzzahlig und teilerfremd

- [ u v w ] ist eindeutige Gitterrichtung
- bei negativen Werten Querstrich über Zahl
- < 1 0 0 > ist Gesamtheit der [ 1 0 0 ], [ 0 1 0 ], [ 0 0 1 ] Richtungen

• **Gitterebenen (Miller'sche Indizes)**

- $h' = a_0 / x'$      $k' = b_0 / y'$      $l' = c_0 / z'$     mit  $x', y', z'$  Schnitt mit Achsen
- teilerfremd, ganzzahlig:  $h = p h'$ ,  $k = p k'$  und  $l = p l'$
- ( h k l ) ist eindeutige Gitterebene und steht senkrecht auf [ h k l ]
  - parallele Ebenen haben gleiche Indizes
  - parallel zur Achse  $l' = \infty \Rightarrow l = 0$
  - { 1 0 0 } steht für alle Ebenen von Typ ( 1 0 0 ) ( $\Rightarrow$  Würfelflächen)

- **Raumerfüllung:**  $RE = n^{\text{Atome}} \cdot V^{\text{atome}} / V^{\text{elementarzelle}}$

• Verbindungen

- Substitutionsmischkristalle durch Austausch von Basisatomen
  - Nachbarschaftsverhältnisse:

- statistisch regellos



- entmischt



- nahgeordnet
- ferngeordnet



häufig bei 1:1 oder 1:3 Verhältnissen

- Interstitutionsmischkristalle durch Einlagerung
  - $\Leftrightarrow 0,43 \leq r_b / r_A \leq 0,59$   
z.B. Hybride, Nitride, Karbide, Boride
  - Einlagerungionenverbindungen (in Tetraederlücken oder Oktaederlücken)

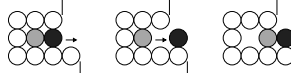
• Merkmale:

- Oktaederlücken: kfz, krz, hex
- Tetraederlücken
- Stapelfolge
- Atomzahl
- Gleitsysteme = Gleitebenen + Gleitrichtungen

## 4. Störungen in kristallinen Strukturen

### • punktförmige Gitterstörungen ( 0 - dimensional )

#### • Leerstelle



- *Leerstellenbildung:*  
bei thermischer Beanspruchung

- *Leerstellenkonzentration:*

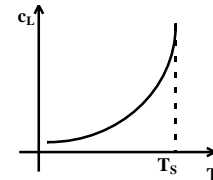
$$c_L = n / N = c_0 \exp \left[ \frac{\Delta H}{k_B T} \right] = c_0 \exp \left[ \frac{\Delta H^*}{RT} \right]$$

Wahrscheinlichkeitsterm

mit  $n$  = Zahl d. Leerstellen,  $N$  = Zahl der Gitteratome,

$H$  = Bildungsenthalpie,  $H^* = \dots$  pro Mol

- Nichtgleichgewichtsleerstellenkonzentration durch
  - Abschrecken
  - Bestrahlen mit energiereichen Teilchen
  - Plastische Verformung



#### • Substitutionsatome/ - mischkristalle

- Fremdatome ersetzen A - Atome im A - Gitter
- (Atomradien dürfen um höchstens 15% abweichen )
- Rein (nur A), Binär (A und B), Ternär (A, B und C)
- FOLGEN:
  - ⇒ *Größeneffekt:* Verspannungen und Volumenänderungen
  - ⇒ *Moduleffekt:* lokale Änderung der Bindungsverhältnisse, des Elastizitätsmoduls

#### • Interstitutionsatome/ - mischkristalle

- Zwischengitteratome/ - mischkristalle
- Fremdatome werden auf Gitterlückenplätze eingelagert



- Binär: oder Ternär:
- Bedingung:  $r_B \ll r_A$
- FOLGEN:
  - ⇒ *Größeneffekt:* Verspannungen
  - ⇒ *Moduleffekt:* starke Änderung der Bindungsverhältnisse

- ∅ etwa Faktor 100
- ∅ größer als bei
- ∅ Substitution

#### • Substitutions - und Interstitutionsatome

- bei wichtigen Werkstoffen, wie z.B.  $\alpha$  - Fe

### • linienförmige Gitterstörungen ( 1 - dimensional )

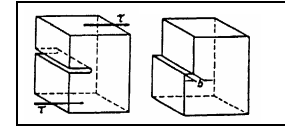
#### • Versetzungen

- entstehen durch mechanische Beanspruchung oder beim Kristallisationsprozess bei Schubspannungen an Korn - und Phasengrenzen
- sind wichtigster Träger der plastischen Verformung
- Schubspannung:  $\tau = ( F / A_0 ) \cos \varphi \cos \lambda$
- Normalspannung:  $\sigma = ( F / A_0 ) = m \tau$  mit  $m$  = Schmidfaktor
- Gleitverformung
  - kristallographisch unbegrenzte Abgleitung von Gleitebenen in Gleitrichtung
  - für  $\tau > \tau_{krit}$  ⇒ Gleitverformung ⇒ Gleitbänder
- Zwillingsverformung
  - kristallographisch unbegrenzte Abgleitung von Zwillingsebenen (ZE) in Zwillingsgleitrichtung (ZGR)
  - für  $\tau > \tau_{krit}$  ⇒ Zwillingsverformung ⇒ Zwillingsbänder

- **Burgersvektor:** Umlauf um die Versetzung auf beliebiger Strecke, anschl. Übertragung in das ungestörte Gitter ergibt Versatz  $\Rightarrow \vec{b}$

- **Stufenversetzung**

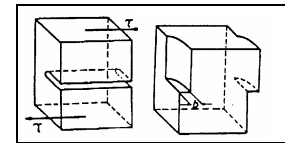
- Symbole:  $\perp$  und  $\tau$
- Auftreten einer eingeschobenen Gitterhalbebene
- Linienvektor  $\vec{s}$  entspricht der Versetzungslinie mit  $\vec{s} \perp \vec{b} \parallel$  Bewegungsrichtung
- kfz: 2  $\{110\}$  - Ebenen
- krz: 3  $\{111\}$  - Ebenen



Stufenversetzung

- **Schraubenversetzung**

- Symbole:  $\otimes$  und  $\odot$
- Schraubenförmige Aufspaltung von Gitterebenen
- $\vec{s} \parallel \vec{b} \perp$  Bewegungsrichtung



Schraubenversetzung

- **Mischversetzung oder g - Versetzung**

- $\vec{b} = \vec{b}_\perp + \vec{b}_\parallel$  ;  $\vec{b} \parallel \tau$
- Ortsabhängigkeit des Winkels zwischen  $\vec{b}$  und  $\vec{s}$
- Bewegungsrichtung  $\perp \vec{s}$

- **Eigenspannungsfelder**

- Abstoßung von gleichsinnigen Stufenversetzungen in einer Ebene
- Anziehung von ungleichsinnigen Stufenversetzungen
- $\tau_{\text{Eigenspannung}} \sim 1 / \text{Radius des Versetzungskerns}$
- Abstoßung von Versetzungen aufgrund ihrer Eigenspannungsfelder  $\Rightarrow$  mit steigender Anzahl von Versetzungen steigt die Festigkeit  $\Rightarrow$  *Versetzungsverfestigung*

- **Linienenergie**

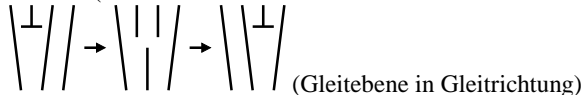
- $U_L \sim G |\vec{b}|^2$  mit  $G = \text{Schubmodul}$
- nur kürzeste Burgersvektoren werden realisiert:
- innere Energie = Arbeit zur Erzeugung von Versetzungen prop. Zur Länge der Versetzungslinie

- **Teil-/ Shockley / unvollständige Versetzung**

- $\vec{b} = (1/6) a <112>$
- $\Rightarrow$  Stapelfehler: z.B. ABCABABC

- **Versetzungsbewegungen und -erzeugung**

- **Gleiten** (WICHTIGSTE ART DER PLASTISCHEN VERFORMUNG!)



(Gleitebene in Gleitrichtung)

- Tepichanalogon
- optimale Ebene zum Gleiten ist die Ebene mit größter Schubspannung

- **Quergleiten**

- Wechsel aus Gleitebene in neue Gleitebene über Quergleitebene aufgrund eines Hindernisses
- bei Schraubenversetzungen möglich

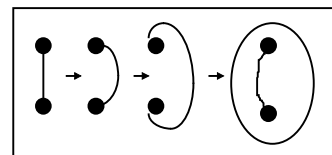
- **Klettern**

- Voraussetzung: Diffusion, meist bei hohen Temperaturen ( $\rightarrow$  Kriechen)  $\Rightarrow$  nicht konservativ
- entlang Versetzungslinie diffundieren Atome auf andere Plätze

- **Frank-Read-Quelle**

- Voraussetzung:  $\tau > \tau_{\text{Krit}}$
- Vorgang kann sich wiederholen  $\rightarrow$  Ausdehnung bis Korngrenze

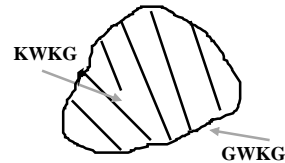
- **Orowan Mechanismus** (siehe Zugversuch)



- **Crowdion**

• **flächenförmige Gitterstörungen** ( 2 - dimensional )

- **Stapelfehler**
  - z.B. ABC AB ABC
  - durch Aufspalten von vollständigen Versetzungen zwischen den res. Teilversetzungen
  - nötig: Stapelfehlerenergie  $\gamma$
- **Antiphasengrenzen**
  - Grenzfläche von Ordnungsbereichen
- **Korn- und Phasengrenzen**
  - amorphe Zonen
  - stören Abgleitvorgänge
  - Ansammlung von Fremd- und Legierungsatomen
  - $\Rightarrow$  Begünstigung von Bruchvorgängen durch Versprödung
- **Korngrenzen** (Großwinkel)
  - zwischen Bereichen *gleicher* chem. Zusammensetzung, aber unterschiedlicher Orientierung
- **Phasengrenze**
  - zwischen Bereichen *unterschiedlicher* chem. Zusammensetzung, meist auch unterschiedlicher Orientierung
- **Zwillingsgrenzen**
  - verzerrungsfreie Korngrenze
  - Zwillingssebene, -gleitebene
  - keine inkohärente Schicht  $\rightarrow$  geringerer Energiegehalt
- **Kleinwinkelkorngrenzen**
  - innerhalb von Körnern
  - Verzerrung
  - keine inkohärente Schicht



• **räumliche Gitterstörungen** ( 3 - dimensional )

- **Teilchen**
  - **Ausscheidungen**
    - bei „übersättigten“ Legierungen bei geeigneter Temperatur, z.B.  $\text{Ni}_3\text{Al}$
    - stabil für  $T < T_{\text{auflös}}$
    - *kohärent*:
      - gleiche Gitterstruktur der Ausscheidung
      - Grenzflächenenergie:  $\gamma_G$  klein
    - *teilkohärent*
      - gleiche Gitterrichtungen, aber z.B. geringere Abstände
    - *inkohärent*:
      - $\gamma_G$  groß
  - **Dispersion**
    - durch pulvermetallurgisches Einbringen von meist Oxiden in Metallen oder Metall Legierungen, z.B.  $\text{Al}_2\text{O}_3$
    - stabil für  $T < T_S^{(\text{Disp})}$
    - stets inkohärent
- **Mikrorisse**
  - scharfe Rißspitzen, nahe Rißufer
  - entstehen z.B. bei Versetzungsreaktionen
  - mechanische Beanspruchung  $\Rightarrow$  Spannungsüberhöhung
- **Poren**
- **Blasen**

## 5. Amorphe und teilkristalline Strukturen

### • Amorphe Strukturen

- **Metallische Gläser (amorphe Metalle)**
  - extrem schnelle Abkühlung eines Metalles aus der Schmelze (Walzabschrecken)
  - 4, 8, 11, 14, 16 - Flächner
  - Raumerfüllung:  $RE < RE_{kfz, krz, hex}$
  - Metalle nie teilkristallin (bei ausreichender  $W_{therm}$  vollständige Kristallisation)
  - günstige mechanische, korrosive und magnetische Eigenschaften
- **Gläser**
  - Hauptbestandteil:  $SiO_2$  → sog. eingefrorene Flüssigkeiten
  - $[SiO_4]^{4-}$ : kristalline und amorphe Anordnungen

### • Teilkristalline Strukturen

- **Glaskeramiken**
  - Glaskeramiken mit Ausdehnungskoeffizient  $\alpha_{th} \approx 0$  ⇒ temperaturwechselbeständig  
z.B. Lithium - Alumo - Silikate
  - spanend bearbeitbare Glaskeramiken durch hohen Phlogopit Anteil  
z.B. Fluorglimmer

### • Polymere

- Bindungen
  - kovalente Bindung innerhalb der Molekülketten
  - sekundäre Bindung zwischen Nachbarmolekülen durch Polarisierung und Dipolbildung
    - ⇒ Plastomere: Zusammenhalt nicht gebundener Makromoleküle
      - niedrige Schmelztemperaturen
      - breiter Erweichungsbereich
      - kautschukelastisches Verhalten
    - ⇒ kristalline Strukturen: dreidimensionale Netzwerke
    - ⇒ Duromere, Elastomere: Überlagerung von Atombindungen
- Herstellung durch
  - *Polymerisation*  
Verknüpfung ungesättigter Monomere unter Ausnutzung aufbrechender C-C-Doppelbindungen (z.B. Polyvinylchlorid)
  - *Polykondensation*  
Verknüpfung von bifunktionellen Monomeren unter Abspaltung eines niedermolekularen Nebenproduktes wie Wasser, Ammoniak, ... (z.B. Phenolharz)
  - *Polyaddition*  
Austausch von Atomen ohne Entstehung von Nebenprodukten (z.B. Polyurethan)
- Temperaturabhängige Eigenschaften
  - tiefe Temperaturen: *energieelastisches Verhalten*
  - hohe Temperaturen: *entropieelastisches Verhalten*
  - höchste Temperaturen: Sekundärbindungen vernachlässigbar klein → Molekülketten frei beweglich (außer kovalente Vernetzung)
- **Polymerwerkstoffklassen**
  - *Thermoplaste = Plastomere*
    - unvernetzte Makromoleküle
    - nur Sekundärbindungen zwischen Ketten
    - aufschmelzen möglich → Spritzguß, Recycling durch Schmelzen
    - amorphe Thermoplaste (z.B. Polystyrol (PS), Polyvinylchlorid (PVC))
    - teilkristalline Thermoplaste (z.B. Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA) )

- *Duromere*
  - engmaschig kovalent vernetzt
  - Aufschmelzen nicht möglich  
⇒ Recycling nur durch spanende Bearbeitung
  - z.B. Phenolharze (PF)
- *Elastomere*
  - weitmaschig kovalent vernetzt
  - elastisches Verhalten
  - Aufschmelzen nicht möglich (s.o.)
  - z.B. Polymerurethan (PU)
- *Additive:*
  - Weichmacher (Vergrößerung des Abstandes)
  - Füllmaterialien (Festigkeitssteigerung durch z.B. Asbestfasern)
  - Stabilisatoren ( gegen Oxidation)
  - Farben (Pigmente und Farbstoffe)
  - Flammverzögerer (besonders Halogen- und Phosphorverbindungen)
- **Konstitution**
  - Konstitution := Angaben über die Verknüpfung von Atomen bzw. Atomgruppen zu Makromolekülen
  - Homopolymere:
  - Kopolymere: 2 und mehr Sorten
  - Block - Kopolymere: Blöcke einer Sorte
  - Pfropf - Kopolymere: 2. Sorte seitliche Kettenäste
  - Polyblends: Misch aus 2 Homopolymeren
- **Konfiguration**
  - Konfiguration := Orientierung der Atomgruppen entlang einer (gedacht) gestreckten Kette
  - *Taktizität:*
    - *ataktisch:* statistisch ⇒ Verhinderung von kristallinen Strukturen
    - *syndiotaktisch:* alternierend ⇒ Förderung von kristallinen Strukturen
    - *isotaktisch:* nur auf einer Seite
  - *cis-trans-Isomerie:* benachbart (cis), gegenüberliegend (trans)
- **Konformation**
  - Konformation := Kettenausrichtung (z.B. gestreckt, verdreht, ringförmig)
  - nur durch Drehung der bestehenden Bindungen ⇒ leicht reversibel
  - gestaffelte Konformation besitzt niedrigste Energie
- **Molekülstrukturen**
  - lokale Zurückführung der komplexen Gitterstrukturen auf Bravaisches Kristallsystem
  - Spärolite:
    - wichtigste Anordnungen
      - radiale Orientierungsverteilung
      - Orientierten Faltslamellen
      - parallel ausgerichtete gestreckte Moleküle
    - Helix entsteht durch Drehen der Molekülketten um sich selbst
    - → Festigkeitssteigerung durch Kristallisation und Ausrichtung der Moleküle
  - Bsp. 1: Polyethylen (PE): Anordnung erfolgt in orthombischer Zelle (im Mikrobereich)
  - Bsp. 2: Polyamid (PA): Anordnung in trikliner Zelle
- **Störungen in kristallinen Molekülstrukturen**
  - Klinken: Auslenkungen < Abstand der Molekülketten
  - Jogs: Auslenkungen > Abstand der Molekülketten
  - Leerstellen (s.o.)
  - amorphe Grenzschichten (z.B. Verschlaufungen)

## 6. Legierungslehre

### • Konzentrationsangaben

- Masseprozent:  $c_A = \frac{m_A}{m_A + m_B} * 100$  Masse - %      m = Gewicht
- Atomprozent:  $c_A' = \frac{n_A}{n_A + n_B} * 100$  Atom - %      n = Zahl der Atome
- Volumenprozent: analog
- Zusammenhang:  $n_A = \frac{N_A}{A_r(A)} m_i$       mit  $N_A$  = Avogadrokonstante,  $A_r$  = rel. Atommasse

### • Metallegierungen

- *Homogene Legierungen*
  - Legierungszusatz B ist stets Interstitutions - oder Substitutionsmischkristall (s.o.)
- *Heterogene Legierungen*
  - einzelne Phasen mit jeweils reinem Metall (A oder B) oder Mischkristall

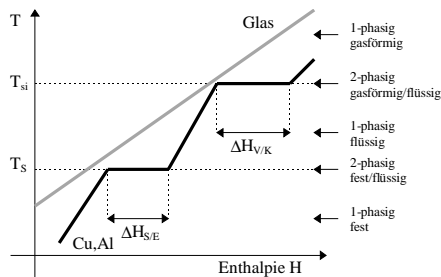
### • Phasenregel

$$F + P = K + 2$$

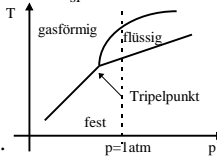
- $K$  = *Komponenten*, d.h. chem. Elemente, die das System bilden  
mit  $K=1$  für reine Metalle,  $K=2$  binäre Metallegierungen,  $K=3$  für ternäre Metallegierungen
- $P$  = *Phasen*: unterschiedliche Phasenbereiche  
mit  $P=1$  für homogenen Zustand,  $P = n$  für n-phasigen heterogenen Zustand
- $F$  = *Freiheitsgrade*: Zustandsgröße eines Systems (Druck, Temperatur, Konzentration)  
mit  $F=0$  bei nonvariantem,  $F=1$  bei univariatem,  $F=2$ , bei bivariatem und  $F=3$  bei trivariatem Gleichgewicht
- **Normaldruck**:  $p = 1$  bar  
⇒  $F^* = F - 1$   
⇒ reduzierte Phasenregel:  $F^* + P = K + 1$

### • Zustandsänderungen (reine Metalle)

- ohne Umwandlung im festen Zustand (z.B. Cu, Al)

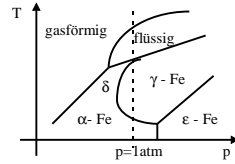


- Richard'sche Regel:  $\Delta H_S \approx 9.2 T_S$
- Fronton'sche Regel:  $\Delta H_{Si} \approx 92 T_{Si}$



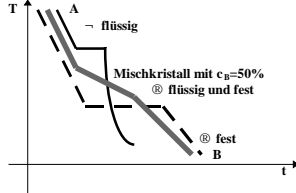
- Temperatur - Druckkurve:

- Metall mit Umwandlung im festen Zustand (z.B. Fe, Ti)



- Thermische Analyse

- T, t - Diagramm:

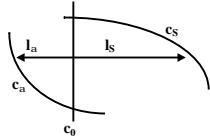


- Zustandsdiagramm:** durch Übertragen der Solidus- und Liquiduslinien bei verschiedenen  $c_B$

$T = \text{const.} \Rightarrow$  Temperaturschnitte: Konoden

$c_B = \text{const.} \Rightarrow$  Konzentrationsschnitte

- Hebelgesetz:**  $m_\alpha = (l_S / l_l) m_{\text{ges}}$ , d.h. die Massenanteile der Phasen sind den abgewandten Hebelarmen proportional.



- binäre Legierungen

flüssig / fest	vollkommen löslich	beschränkt löslich	nicht löslich
vollkommen löslich	<p>z.B. Cu und Ni                      @ zahlreiche Anwendungen:                      Münzen, säurebeständige Werkstoffe</p>		
beschränkt löslich	<p>eutektische Reaktion (z.B. Pb und Sb [=Antimon])                      @ Rohre, Kabelmäntel, Akkumulatorenplatten                      S, a und b sind stabile Zustände</p>		
nicht löslich	<p>eutektische Reaktion (z.B. Bi und Cd)                      → Weichlote, Zahntechnik, Sicherungen                      (z.B. Bi [= Wismut] und Cu)</p>	<p>monotektische Reaktion (z.B. Cu und Pb)                      → Gleitlagerwerkstoffe</p>	<p>es liegen entweder <math>S_A + S_B</math>; <math>S_A + B</math> oder <math>A + B</math> vor (z.B. Fe und Pb)</p>
beidseitig beschränkt	<p>peritektische Reaktion                      z.B. Silber - Platin</p>		
intermetallische Verbindung	<p>→ zwei eutektische Punkte                      z.B. Mg, und Si</p>		

- **ternäre Legierungen**
  - Darstellung in Dreieckskoordinaten  
→ Parallele zu CA liefert  $c_B$
  - Darstellung in Rechteckskoordinaten  
→ aus Dreieckskoordinaten
  - Zustandsdiagramme (3d)  
→ Randsysteme
  - ternäre Teildiagramme  
→ Schnitte mit  $T_i$ ,  $c_i$  oder  $c_i / c_k$  konstant

## 7. Diffusion

- ∅ wichtig für Umwandlung in festen Zustand
- ∅ benötigt Zeit, durch rasches Abkühlen kann sie verhindert werden

- Selbstdiffusion
  - Platzwechselfvorgänge der Gitteratome
  - Zufallsbewegung durch ZV:  $\bar{x}^2 = 2 D_S t$ , mit  $D_S = D_0 \exp [ - \Delta H_S^* / RT ] =$   
Selbstdiffusionskoeffizient, mit  $\Delta H_S = \Delta H_B + \Delta H_W$  Aktivierungsenthalpie ist Bildungs- und  
Wanderungsenthalpie  
bei Metallen:  $\Delta H_B \approx \Delta H_W$
  - besonders an Korn- und Phasengrenzen, Dilatationsbereich von Stufenversetzungen
  - Diffusion von Substitutions - und Interstitutionsatomen

## 8. Erholung und Rekristallisation

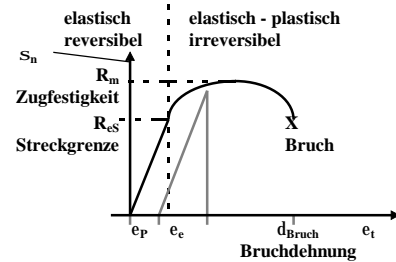
- ∅ Verformte Werkstoffe weniger stabil als unverformte
- ∅ Zufuhr von thermischer Energie → innere Energie sinkt, Umlagerung, Abbau von Störungen
- ∅ Glühbehandlung ⇒ mechanische, elektrische, magnetische Eigenschaften ändern sich

- für  $T < T_{\text{Glüh, krit.}} \Rightarrow$  **Erholung**
  - große Härte, Streckgrenze
  - keine lichtmikroskopisch erkennbaren Gefügeveränderungen
  - → Umordnung von Versetzungen (Gleiten, Klettern, ...)
  - → Vergrößerung von Zellabmessungen
  - → Polygonisation: Bildung von Kleinwinkelkorngrenzen durch Gleiten und Klettern der Stufenversetzungen
- für  $T > T_{\text{Glüh, krit.}} \Rightarrow$  **Rekristallisation**
  - geringe Härte, Streckgrenze
  - deutliche lichtmikroskopisch erkennbare Gefügeveränderungen
  - Treibende Kraft: Differenz der Versetzungsenergie zwischen kristallisierten und nicht kristallisierten Körnern
  - Rekristallisationstemperatur:  $T_R = 0,4 T_S / T_{Li}$  ist Temperatur, bei der der Werkstoff in 1 h vollständig rekristallisiert (Taman'sche Regel)
  - Korngröße
    - hoher Verformungsgrad → viele Keime → kleine Korngröße
    - niedrige Glühtemperatur → viele Keime
- **Warm- und Kaltumformung**
  - Kaltumformung: hohe Versetzungsdichte durch mech. Beanspruchung
  - Warmumformung: geringe Versetzungsdichte (Rekristallisation)

## 9. Werkstoffprüfung

### Zugversuch (DIN 10002)

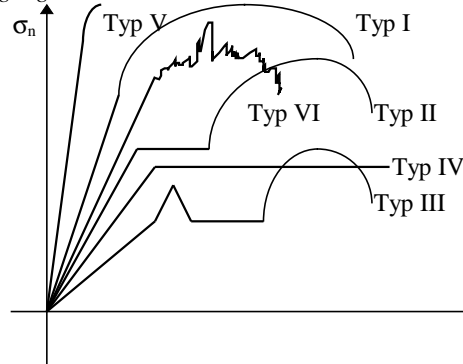
- **Spannung:**
  - Nennspannung:  $\sigma_n = F / A_0$
  - tatsächliche Spannung:  $F / A = \sigma_n (1 + \epsilon_p)$
- **Dehnung:**
  - Totaldehnung:  $\epsilon_t = \Delta L / L_0 = \epsilon_p + \epsilon_e$
  - wahre Dehnung:  $\phi_t = \ln(1 + \epsilon_t)$
  - Dehngrenze:  $R_{p\ x\%}$  = Werkstoffwiderstand gegen Überschreiten einer plastischen Verformung von x %
  - Bruchdehnung:  $\delta_{Bruch} = \text{Gleichmaßdehnung} + \text{Einschnürdehnung}$
- Hook'sches Gesetz:  $\sigma = E \epsilon_{t,e}$  gilt nur für elast. Bereich
- Querkontraktion:  $\epsilon_q = -\nu \epsilon_t$ 
  - Brucheinschnürung:  $\psi \approx 0 \rightarrow$  spröde,  $\psi$  groß  $\rightarrow$  duktil
- plastische Verformung  $\rightarrow$  Behinderung von Versetzungsbewegungen  $\rightarrow$  irreversibel
- Mikrostruktur (Art, Größe und Verteilung von Versetzungen, Fremdatomen, Korngrenzen, Teilchen)  $\rightarrow \tau_{krit.}$  und  $R_{eS}$



### Brucharten:

- *makroskopisch*
  - Zähbruch: verformungsreich
  - Tassen - Teller - Bruch
  - Spröbruch: verformungslos
- *mikroskopisch*
  - Bruchfläche
    - Gleitbruch: örtliche Verformungen
    - Spaltbruch: örtliche Trennung
  - kristallographischer Verlauf
    - transkristalliner Bruch: Reiß durch Körner
    - interkristalliner Bruch: entlang Korngrenzen
  - Orientierung
    - Normalspannungsbruch
    - Schubspannungsbruch

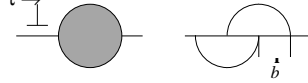
### Verfestigungskurven



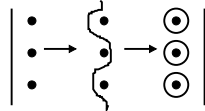
- *Typ I:* z.B.: Cu, Ni, Al, Austenit
- *Typ II:* inhomogener Dehnungsbereich: Lüdersverformung und -front, z.B.: Cu-Legierungen
- *Typ III:* nur bei Interstitutionskristallen, wegen Größeneffekt
- *Typ IV:* Idealfall, z.B. Metalle bei hohen Temperaturen
- *Typ V:* z.B. Martensit
- *Typ VI:* Rekalterungsprozesse (Versetzungen, ...)  $\Rightarrow$  unregelmäßig

- Besonderheit bei Entlastung nach elastisch - plastischer Verformung  $\Rightarrow R_{eS}$  wächst wegen Ausbildung von Konzentrationswolken durch Diffusion der Legierungsatome
- **Verfestigungsmechanismen:** es gilt die Additivität (außer  $R_{orientn}$ )
  - *Versetzungsverfestigung:* wegen Versetzungsbewegung entgegen Eigenspannungsfeld anderer Versetzungen,  $R_{Vers} = c \cdot G \cdot |b| \cdot \sqrt{\rho_t}$  mit  $\rho_t$  = Versetzungsdichte

- **Korngrenzenverfestigung:** Aufstau von Versetzungen, Induktion von Gleitvorgängen in Nachbarkörnern:  $R_{KG} = \text{konst} / \sqrt{d}$  mit  $d$  = mittlerer Korndurchmesser
- **Mischkristallverfestigung:** Versetzungen müssen Fremdatome in Gleitebene überwinden:  $R_{MK} = \text{konst.} \cdot G \cdot (c_{\text{FREMDATOM}})^{1/2 \dots 1}$
- **Teilchenverfestigung:** Überwinden von Teilchen durch Schneiden, Umgehen:  $R_{\text{Teil}}$ 
  - **Schneiden:**



- **Umgehen (Orowan Mechanismus):**



- **Orientierungsverfestigung:** bei Vielkristallen Verfestigung durch kleine Anzahl an Kornorientierungen:  $R_{\text{orient}}$

## • Härteprüfung

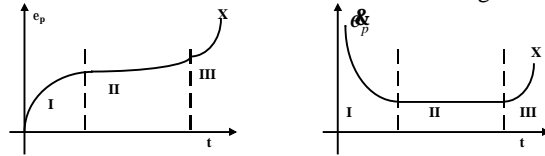
Härte := Widerstand gegen Eindringen eines härteren Körpers  
aber keine Werkstoffkenngröße für Dimensionierungen

- Rockwell Härte:
  - Kegel (Diamant) → HRC ( $HRC = 100 - 500 \cdot t$  [mm])
  - Kugel (geh. Stahl) → HRB ( $HRB = 130 - t$  [mm])
- Brinell Härte: Kugel (geh. Stahl) → HB
- Vickers Härte Diamant Pyramide → HV

## • Kriechversuch

(auch Zeitstandsversuch) Dauerbelastung mit  $F = \text{konst.}$ , meist auch hohe Temperaturen

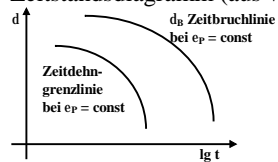
- Kriechkurven: Kriechgeschwindigkeit:



Bereich II: konstante Kriechgeschwindigkeit → *stationärer Kriechbereich*

Bereich III: Kriechschädigung (Porenbildung an KG)

- Kriechdehnung:  $\delta \approx \delta^* = d\epsilon / dt \cdot t_B$  (Monkman-Grant)
- **Korngröße** wächst ⇒  $\epsilon_p$  kleiner (d.h. grobkristalline Werkstoffe bei Hochtemperatur - Verformung vorteilhafter)
- **Legierungen:** steigender Anteil von Mischkristallen, Teilchen oder Dispersionen ⇒  $\epsilon_p$  sinkt
- **gerichtete Erstarrung des Eutektikums** ⇒  $\epsilon_p$  größer
- **Versetzungskriechen**
  - Vor.:  $\sigma_n$  groß, T mittel
  - Kombiniertes Klettern und Gleiten zur Überwindung von Hindernissen
- **Diffusionskriechen**
  - Vor.:  $\sigma_n$  klein, T hoch
  - Gerichteter Materialfluß in Beanspruchungsrichtung durch entgegengesetzt verlaufenden Leerstellenfluß
- Zeitstandsdiagramm (aus vielen Kriechkurven)



• **Kerbschlagbiegeversuch**

(liefert Versprödungsneigung bei Unterschreiten bestimmter Temperaturen)

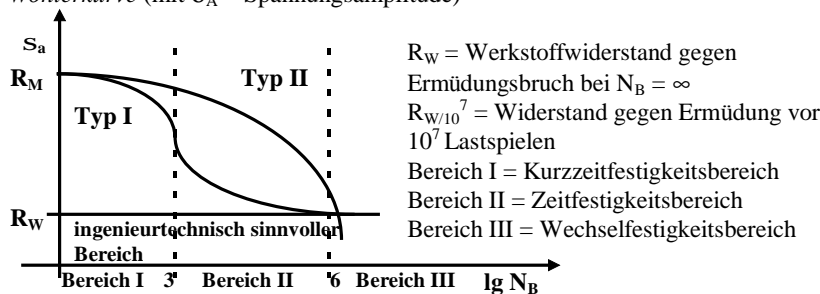
- Versprödungsarten: Spannungsversprödung, Geschwindigkeitsversprödung, Temperaturversprödung
- Schlagzähigkeit:  $a_K = W / A = \text{Schlagarbeit} / \text{Kerbquerschnitt}$
- Übergangtemperatur:  $T_{\bar{U}}$  bei  $a_K = 20 \text{ J/cm}^2$  oder Sprödbbruchanteil (Bruchfläche) = 50%  
→ Werkstoff stets oberhalb  $T_{\bar{U}}$  einsetzen
- $a_K, T$  Diagramme:
- ferritisch - perlitische Stähle (Tiefemperaturversprödung)
  - steigender Kohlenstoff(=Zementit) Gehalt  $\Rightarrow a_K$  sinkt
  - steigende Korngröße  $\Rightarrow T_{\bar{U}}$  steigt
  - Substitutionsatome: günstig sind Mn, Nb (Niob); ungünstig sind P, Si
- austenitische Stähle:  $a_K$  nahezu konstant

• **Rißzähigkeitsversuch**

- Werkstoffwiderstand gegen instabile Ausbreitung von Rissen, die bei  $\tau \geq \tau_{krit}$
- durch kontinuierliche Beanspruchung einer rißbehafteten Probe
- Probenformen:
  - 3PB: 3-Punkt Biegeprobe
  - CT: Kompakt Zugprobe (quadratisch)
  - RCT: Kompakt Zugprobe (rund)

• **Dauerschwingversuch** (= Schwingfestigkeitsversuch = Ermüdungsversuch)

- periodische Beanspruchung mit konst. Amplitude  $\Rightarrow$  *Werkstoffermüdung*
- Bruchlastspielzahl  $N_B$  (entspricht der Zahl der Schwingungen bis zum Bruch)
- *Wöhlerkurve* (mit  $\sigma_A = \text{Spannungsamplitude}$ )



- Dehnungswöhlerkurve mit  $\epsilon_W$  und  $\epsilon_{W/10^7}$  wie oben
- Stadien der Ermüdung
  - Ver- und Entfestigung
  - *Rißbildung*  
Mikroriß: Länge:  $a < 2 d_{KG}$ ;  $\alpha(\text{Riß}, N) = 45^\circ$ ; entstehen durch Versetzungen, dann Intrusionen
  - *Rißausbreitung*  
Vor.: Anriß  
Parisgesetz: Rißausbreitungsgeschwindigkeit  $da/dN = \text{konst.} (\Delta K)^m$  mit Spannungsintensität  $K$
- *Mittelspannung*
  - Zugmittelspannung:  $\sigma_M > 0 \Rightarrow$  Spannungswöhlerkurve sinkt  $\Rightarrow$  erhöhte Rißbildung und -ausbreitung
  - [ Druckmittelspannung:  $\sigma_M < 0 \Rightarrow$  Kurve steigt  $\Rightarrow$  gehemmte Rißbildung und -ausbreitung ]
  - Eigenspannung: wirkt bei großem  $R_{eS}$  wie lokale Mittelspannung
  - quantitativer Zusammenhang von Dauerfestigkeit und Mittelspannung
    - Goodman Näherung: linear
    - Gerber Näherung: Viertelkreis
    - Experimentelle Erfahrung: zwischen Gerber und Goodman
- *Dauerfestigkeit*
  - Smith Diagramm
  - Haigh Diagramm:  $\sigma_A$  über  $\sigma_M$

- *Einflüsse auf Dauerschwingverhalten*
  - Werkstoffbeanspruchung  
 $R(\text{Umlaufbiegung}) > R(\text{Biegung}) > R(\text{Zug, Druckbelastung})$
  - Werkstoffzustand  
kugelgestrahlte Werkstoffe sind schwingfester
  - Werkstoffgeometrie  
 $R(\text{gekerbter Stahl}) \leq R(\text{glatter Stahl})$
  - Werkstoffumgebung  
im  $\text{H}_2\text{O}$  stärkere Rißbildung und -ausbreitung durch Korrosion

## 10. Grundlagen der Bauteildimensionierung

### • **allg. Vorgehen**

→ höchstbeanspruchte Stelle finden

Grundarten

- Zug:  $\sigma_n = F / A_0$
- Biegung:  $\sigma_R = M / W$  mit  $W = b h^2 / \sigma$
- Torsion:  $\tau_R = M_t / W$  mit  $W = \pi d^3 / 16$
- Schub:  $\tau_n = F / A_0$

Querschnittübergänge

- Kerben:  $\delta = \alpha_K \sigma_n$  mit  $\alpha_K > 1$  geometrieabhängig

→ relevante Versagenshypothese aufstellen

- spröder Werkstoff: Normalspannungshypothese:  $\sigma_v = \sigma_{\max}$
- duktiler Werkstoff: Schubspannungshypothese:  $\sigma_v = 2 \tau_{\max}$
- oder: Gestaltänderungshypothese:  $\sigma_v = (1 / \sqrt{2}) \parallel \sigma_1, \sigma_2 \parallel$

→ Wahl des geeigneten Werkstoffwiderstandes

wahrscheinlichste Versagensart (gem. Kap.9) wählen

S ist Sicherheitsbeiwert

⇒ Versagensbedingung  $\sigma_v = R$  oder Festigkeitsbedingung  $\sigma_v \leq R / S$

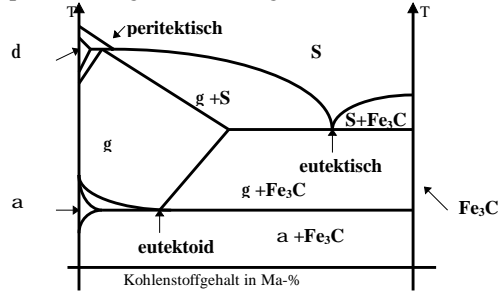
### • **schwingende Beanspruchung**

- Betriebslasten  
Palmgren-Miner-Regel:  $D = \sum 1 / N_{B,i}$  mit  $D = \text{Schädigung}$ ,  $N = \text{Bruchlastspielzahl}$
- Mehrachsige Beanspruchungen  
schwierig (aktuelle Forschung)
- sonstige Einflüsse: Korrosion, Reibung, Wärmebehandlung, Montagefehler, Überlasten
- Regelwerke: DIN, VDI, ISO, EN, VdTÜV, ...

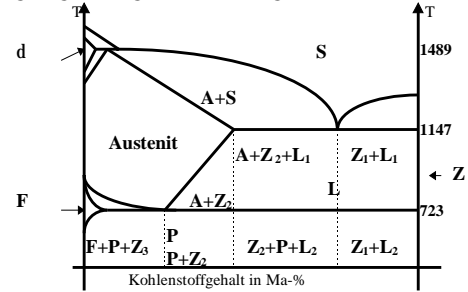
## 11. Eisenbasiswerkstoffe

- Zustandsdiagramm

phasenmäßige Betrachtung



gefügemäßige Betrachtung



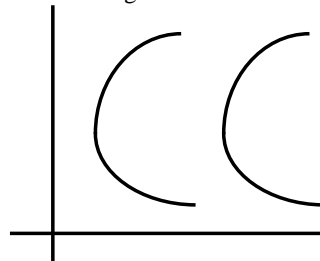
### Austenitumwandlung

- Perlit:**  $\alpha + Fe_3C$  mit 0,8 Ma-% -C durch eutektische Reaktion
  - Umwandlung erfordert große Diffusionsströme
  - rasche Abkühlung führt zu feinstreifigem Sorbit oder Troostit
- Martensit:**
  - durch extrem hohe Abkühlgeschwindigkeiten  $v > v_{krit.}$
  - bei  $c > 0,5$  Ma - % - C bleibt Restaustenit
  - Bain'sche Konstruktion: Umklapp - Prozeß
  - Umwandlung der virtuellen Martensitelementarzelle:  $c^{virt}$  um 20% und  $a^{virt}$  um 12% aufgrund von Verzerrungsdipolen durch C - Atome
  - ⇒ tetragonal raumzentrierte Elementarzelle (verzerrt durch hohen C-Gehalt)
  - ⇒ hohe Härte und Festigkeit, aber auch hohe Sprödigkeit ⇒ Anlassen notwendig
- Aufhärbarkeit**
  - Randschichthärtung, Schalenhärtung
  - wächst mit Anteil des gelösten Kohlenstoffs
- Durchhärbarkeit**
  - Kernhärtung
  - wächst bei legierten Stählen
- Stirnabschreckversuch (Jominy Test)
  - ???
- Abkühlen unter Bainitbildung
  - nur bei isothermer Umwandlung
  - zwischen Perlitstufe ( $T_{Perlit}$ ) und Martensitstarttemperatur ( $M_S$ )
  - konst. Abkühlung
- Ledeburit:**  $\alpha + Fe_3C$  mit 4,3 Ma-% -C entsteht durch eutektische Reaktion

### ZTU - Diagramme

Grundlage zur Beurteilung von Wärmebehandlungen  
gelten nur für eine chem. Zusammensetzung

- isothermes ZTU Diagramm



- bei const. Abkühlgeschw.
- durch Übertragen der Anfangs - und Endpunkte von Umwandlungen aus  $\gamma$ -Anteil - lg t - Diagrammen
- bei mittleren Temp. große Umwandlungsgeschw. (Nase wird bestimmt durch Produkt aus Keimzahl und Diffusionskoeffizient)
- sehr starker Einfluß von Legierungselementen auf Umwandlungsbeginn und -ende

- kontinuierliches ZTU Diagramm

- Variation des T,t Verlaufs
- auch hier: sehr starker Einfluß von Legierungselementen auf Umwandlungsbeginn und -ende

## • Wärmebehandlung

Gefüge- und Zustandsänderungen zur Verbesserung der Verarbeitungs- oder Gebrauchseigenschaften

### • Thermische Verfahren

- *Glühen*
  - Normalglühen, Normalisieren (bes. bei untereutektoiden Stählen)
    - Werkstoffvorgeschichte beseitigen, Normalzustand herstellen
    - feinstreifiges Perlit Gefüge herstellen
    - Aufheizen bis  $\gamma$  Bereich, langsames Abkühlen
  - Erholungsglühen
    - Veränderung der Gitterstörungsanordnung (z.B. durch Vorverformung)
    - $T < 500^\circ\text{C}$ , keine Phasenumwandlung
  - Rekrystallisationsglühen
    - Verringerung der Gitterstörungsichte
    - starke Veränderung der mechanischen Eigenschaften
    - $T < 700^\circ\text{C}$
  - Spannungsarmglühen (Vorsicht: bei Vorverformung PSK Linie)
    - Beseitigen von Eigenspannungen
    - langes Glühen ( $T < 600^\circ\text{C}$ ), langsames Abkühlen
  - Grobkornglühen
    - Erzeugung grober Körner zwecks besserer Bearbeitbarkeit
    - $950 < T < 1100^\circ\text{C}$
    - thermische Energie  $\rightarrow$  Abbau der Korngrenzenergie
    - aber: teuer, schlechte Eigenschaften
  - Diffusionsglühen
    - Verringerung von örtlichen Verunreinigungen
    - lange, hohe Temp.  $\rightarrow$  sehr teuer
  - Weichglühen (unter  $723^\circ\text{C}$ )
    - Verbesserung der spanabhebenden Bearbeitbarkeit
    - um eutektische Temperatur pendeln
    - nach spanabhebender Bearbeitung können weitere Behandlungen erfolgen
- *Anlassen*

allg.: immer  $T < 723^\circ\text{C}$   
 $T < 80^\circ\text{C} \Rightarrow$  Clusterbildung  
 $T < 160^\circ\text{C} \Rightarrow$  Martensitzerfall  
 $T < 300^\circ\text{C} \Rightarrow$  Austenitzerfall  
 $T < 360^\circ\text{C} \Rightarrow$  Umwandlung in Gleichgewichtsphase Ferrit  
 $T < 600^\circ\text{C} \Rightarrow$  Bildung von Misch- und Sonderkarbiden
- *Härten*
  - $\rightarrow$  harter, aber spröder Werkstoff durch vollständige oder teilweise Ausenitisierung
  - $v > v_{\text{krit.}}$
- *Vergüten*
  - Kombination von Härten und Anlassen
  - Erzeugung gewünschter Kombination von Festigkeit und Duktilität
  - Vergütungsschaubilder:  $\sigma_N$ ,  $R_{eS}$  oder  $R_m$  über Anlaßtemperatur
- *Altern*

- *Patentieren*
  - hochfester, duktiler Werkstoffzustand
  - isotherme Umwandlung der unteren Perlitstufe
  - → Sorbit, Troostit
- Randschichthärten
  - harte, verschleißfeste Randschicht bei duktilem Kern
  - Flammhärten, Induktionshärten, Tauchhärten, Laserstrahlhärten, Elektronenstrahlhärten(im Vakuum)
- **Thermochemische Verfahren**

Härten der Randschicht durch Eindiffusion/Effusion von Nichtmetallen und/oder Metallen

  - *Einsatzhärten*
    - Aufkohlen der Oberfläche durch z.B. Methan oder Kohlenstoffpulver (Flüssigaufkohlen: umweltschädlich)
    - dann: Härtung: Direkthärtung, Einfachhärtung, Doppelhärtung
    - nur bei geringen C - Gehalten, Martensitumwandlung erforderlich
  - *Nitrieren*
    - für Werkstoffe, die wenig Verzug durch Wärmeeinwirkung erfahren dürfen
    - Eindiffusion von Stickstoff durch Glühen
    - rasche Abkühlung → Nitridausscheidungen → Verfestigung
- **Thermomechanische Verfahren**
  - Verformen der stabilen Hochtemperaturphase (mit Rekristallisation)
  - Verformen der metastabilen Hochtemperaturphase (ohne Rekristallisation)
  - Verformen während der Umwandlung der Hochtemperaturphase
    - Isoforming
- **Stähle in der Praxis**
  - Unlegierte Stähle: St x mit  $x = 1/10$  Zugfestigkeit
  - Qualitätsstähle: C x mit  $x = 100 \cdot$  Kohlenstoffgehalt
  - Edelmetalle: Ck x mit  $x = 100 \cdot$  Kohlenstoffgehalt
  - Mikrolegierte Stähle StE x mit  $x =$  Mindeststreckgrenze (geringe Gehalte von Al, Nb, V, Ti )
  - Niedriglegierte Stähle (Legierungen  $< 5\%$ )
  - Hochlegierte Stähle: z.B. X 12 CrNi 18 8 bedeutet: 0.12%C, 18%Cr, 8%Ni
  - Schnellarbeitsstähle: S %W %Mo %V %Co
  - Stahlguß: GS x o.ä.
- **Eisengußwerkstoffe**
  - **Stahlguß** (aufwendig)
  - **Gußeisen**
    - *weiße Gußeisen*

metastabile Umwandlung in  $\gamma$  und  $Fe_3C$  (bes. durch hohe Abkühlgeschw. und hohen Mn Anteil)

      - Hartguß
      - Temperrohuß
        - durch zus. Nachbehandlungen
          - weißer Temperguß
          - schwarzer Temperguß
    - *Schalenhartguß*

stabile und metastabile Umwandlung
    - *graue Gußeisen*

stabile Umwandlung in  $\gamma$  und C (bes. durch langsame Abkühlgeschw. und hohen Si und C Anteil)

      - perlitische Gußeisen
        - metastabile Umwandlung in  $\alpha$  und  $Fe_3C$ , schnelle Abkühlung
      - perlitisch - ferritische Gußeisen
        - stabile und metastabile Umwandlung
      - ferritische Gußeisen
        - stabile Umwandlung in  $\alpha$  und C, langsame Umwandlung

## 12. Nichteisenmetalle

Leichtmetalle: Al, Mg, Ti

Schwermetalle: Cu, Ni

### • Aluminium

#### • unlegiertes Aluminium

- niedrige Dichte
- hohe spezifische Festigkeit
- große elektrische (dichtebezogene) Leitfähigkeit
- kfz Gitterstruktur, sehr gut kalt- und warmumformbar
- → Überlandleitungen, Folien, Reflektoren

#### • Aluminium-Knet-Legierungen

nach dem Gießen in Walzprozess umgeformte Legierungen

aber: Wasserstoffaufnahme beim Schmelzen → Gefahr der Porenbildung, Entgasung erforderlich

- *System Al-Cu*
  - mit der Temperatur abnehmende Löslichkeit des  $\alpha$  Kristalls → Aushärtbarkeit
  - solange Aushärten, bis GP-II Zone (Guinier-Preston) vorliegt, dort größte Härte (Peak-Aging, vorher: Under-Aging, nachher Over-Aging)
- *System Al-Mg*
  - aber: grobe Ausscheidungen, Gefahr interkristalliner Korrosion
- *System Al-Si*
  - wichtig für Al-Gußverfahren (Sand-, Kokillen-, Druckguß).
  - aber: grobes Gefüge → Veredeln
- *System Al-Mg-Si*

### • Magnesium

niedrige Dichte, große chemische Reaktionsfähigkeit (Sauerstoff)

- Reinmagnesium
  - hex Gitter → schlecht kaltumformbar
  - nur geringe technische Bedeutung
- Magnesiumlegierungen
  - Zulegieren versch. Elemente zur Eigenschaftsverbesserung

### • Titan

niedrige Dichte, hohe (spez.) Festigkeit, hohe Korrosionsbeständigkeit, hoher Preis

- **Unlegiertes Titan**
  - hex -Gitter → mäßige Kaltumformbarkeit
  - stark Sauerstoffaufnehmend → Wärmebehandlung und Schweißen erfordert Schutzgas
  - → Behälter für oxidierende Säuren und -gemische
- **Titanlegierungen**
  - hex -Legierungen: gute Warmfestigkeit
  - krz - Legierungen: höhere Festigkeit als hex, aber auch höhere Dichte
  - hex + krz Legierungen: hohe spez. Festigkeit → Luft- und Raumfahrt, Gasturbinenteile

### • Kupfer

#### • unlegiertes Kupfer

- kfz Gitter → sehr gut umformbar
- hohe el. Leitfähigkeit und thermische Leitfähigkeit (in Abhängigkeit von Verunreinigungen) → Leiter, Wärmetauscher
- beständig gegen alkalische und neutrale wäßrige Lösungen → Wasserleitungen, Armaturen
- Wärmebehandlung: verringert Festigkeit, Kaltverformung verbessert Härte zu Lasten der Elastizität
- Problem: Wasserstoffkrankheit bei sauerstoffhaltigen Cu

#### • Kupferlegierungen

- höhere Festigkeit, aber geringere elektrische Leitfähigkeit

- *Messing* (CuZn)
  - für  $c_{Zn} < 37 \text{ Ma\%}$ : gute Kaltverformbarkeit (MK Verfestigung)
  - für  $c_{Zn} > 37 \text{ Ma\%}$  günstig für spanabhebende Bearbeitung (Teilchenverfestigung)
- *Bronzen*
  - klassische Bronze (CuSn)
    - starke Abhängigkeit des Gefüges von Abkühlgeschwindigkeit
    - Walzbronzen → Relais - Federn
    - Gußbronzen → Zahnräder
    - Rotguß → Lagerbüchsen
  - CuAl Legierungen
    - hohe Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit
  - CuMn Legierungen
    - hohe Dämpfung, seewasserbeständig → Schiffschrauben
- *CuNi Legierungen*
  - Widerstand nicht temperaturabhängig: z.B. Konstantan → Thermoelemente
  - hohe Korrosionsbeständigkeit
- **Nickel**
  - z.B. hochwarmfeste Ni-Legierungen (Superlegierungen)
  - z.B. korrosionsbeständige Ni-Legierungen → chem. Verfahrenstechnik

## 13. Ingenieurkeramische Werkstoffe

- anorganisch nichtmetallische Werkstoffe
- hohe Schmelztemperaturen, große Härte
- geringer therm. Ausdehnungskoeffizient → therm. Abwechselnde Beanspruchung
- aber: spröde, sehr kleine Reißzähigkeit
- **Herstellung**
  - Pulversynthese
  - Massenaufbereitung (Mahlen, Mischen, Granulieren, Sprühtrocknen)
  - Formgebung (Pressen, Gießen)
  - Sintern
    - Wärmebehandlung zum Abbau von Grenzflächenenergie
    - Verringerung des Porenvolumens
    - aber: Mikrorissausbreitung an Restporen
  - Endbearbeitung (Schleifen, Spanende Bearbeitung, Polieren, ...)
- **Elementkeramiken**  
kovalente Bindungen
  - *Kohlenstoff*
    - Diamant
      - Nichtgleichgewichtsphase
      - tetragonales Gitter
      - isotrop (keine Vorzugsorientierung)
    - Graphit
      - HEX Gitter
      - anisotrop (Eigenschaften sind richtungsabhängig!)
      - Eignung als Hochtemperaturwerkstoff, hohe Thermoschockbeständigkeit
  - Silizium und Germanium
    - Funktionswerkstoffe
    - Silizium: Halbleiterbauelemente
    - Germanium: Halbleiterbauelemente mit hohen Grenzfrequenzen
  - Bor
    - in Faserform für Verbundwerkstoffe → z.B. borfaserverstärktes Al
- **Oxidkeramiken**  
oxidische Verbindungen von Metallen mit typischen Ionengittern

- hohe Festigkeit, Härte, Korrosionsbeständigkeit, Hochtemperaturfestigkeit
- → Feuerfestmaterialien, Isolatoren, Kondensatoren
- **Nichtoxidkeramiken**
  - Karbide, Nitride, Boride von Metallen
  - 60-70% kovalente Bindungen mit ionischen Anteilen
  - Einlagerungsgitter
  - → Gleitlager, Turboladerrotoren, Sandstrahldüsen
- **Mischkeramiken**
  - aus mehreren Basisstoffen
  - hohe Festigkeit, reduzierte Sprödigkeit
  - → Verschleißbeanspruchung
- **Faserverstärkte Keramiken**
  - Einlagerung von Keramikfasern und - whiskern
  - → feste und zähe Werkstoffe

**A**

Altern .....21  
 Aluminium .....24  
**Aluminium-Knet-Legierungen**24  
**amorphe Metalle** ..... 9  
 Amorphe Strukturen ..... 9  
 Anlassen .....21  
**Antiphasengrenzen**.....8  
 Atomaufbau.....2  
 Atombindung.....2  
 Atomprozent ..... 11  
 Aufhärbarkeit .....20  
**Ausscheidungen** .....8  
 Austenit .....20  
 Austenitumwandlung.....20  
 Avogadro Konstante.....2

**B**

Bain'sche Konstruktion.....20  
 Bainitbildung.....20  
**binäre Legierungen** .....12  
 Bindung .....2  
**Blasen** .....8  
 Bor .....26  
 Bravais Gittertypen .....3  
 Brinell Härte .....15  
 Bronzen .....25  
 Brucharten .....14  
 Bruchdehnung .....14  
 Bruchlastspielzahl .....17  
 Burgersvektor .....6

**C**

chemische Bindung .....2  
 cis-trans-Isomerie .....10  
**Crowdion** .....7

**D**

Dauerfestigkeit ..... 17; 18  
 Dauerschwingverhalten .....19  
 Dauerschwingversuch .....17  
 Dehngrenze .....14  
 Dehnung.....14  
 Dehnungswöhlerkurve .....17  
 Diamant.....25  
 Diffusion .....13  
 Diffusionglühen .....21  
 Diffusionskriechen .....15  
**Dispersion** .....8  
 Durchhärbarkeit .....20  
 Duomere .....10

**E**

Eigenspannungsfelder ..... 6  
 Einsatzhärten ..... 22  
 Eisenbasiswerkstoffe ..... 20  
 Eisengußwerkstoffe ..... 22  
 Elastomere .....10  
 Elektronenstrahlhärten.....22  
**Elementkeramiken** .....25  
 Erholung .....13  
 Erholungsglühen .....21  
**Ermüdungsversuch**.....17  
 eutektische Reaktion .....12

**F**

Flammhärten.....22  
 Formgebung.....25  
**Frank-Read-Quelle**.....7  
 Freiheitsgrade .....11  
 Fronton'sche Regel.....11

**G**

**Gamma - Versetzung** ..... 6  
 Gerber.....18  
 Germanium .....25  
 Gitterebenen .....4  
 Gitterrichtungen.....4  
 Gitterstörungen  
     **0 - dimensionale** .....5  
     1 - dimensionale .....5  
     2 - dimensionale .....8  
     3 - dimensionale .....8  
     flächenförmige .....8  
     linienförmige .....5  
     punktförmige .....5  
     räumliche.....8  
**Gläser** .....9  
**Glaskeramiken** .....9  
**Gleiten** .....6  
 Gleitverformung .....5  
 Glühen .....21  
 Goodman .....18  
 Granulieren .....25  
 Graphit.....25  
 Grobkornglühen.....21  
 Grundlagen der  
     Bauteildimensionierung.....19  
 Guinier-Preston .....24  
**Gußeisen** .....22

**H**

Haigh Diagramm .....18  
 Halbleiter .....2  
 Härten .....21

Härteprüfung .....15  
 Hartguß .....22  
 Hauptquantenzahl.....2  
**Hebelgesetz** .....12  
**HEX Gitter** .....3  
**Hexagonales Gitter** .....3  
 Hund'sche Regel.....2

**I**

Induktionshärten .....22  
 Ingenieurkeramische Werkstoffe25  
 inkohärent.....8  
**Interstitialsatome** .....5  
 Interstitutionsmischkristalle .....4  
 Ionenbindung .....2  
 Isoforming .....22

**J**

Jogs .....10  
 Jominy Test.....20

**K**

**Kaltumformung** .....13  
 Keramiken und Gläser .....2  
 Kerbschlagbiegeversuch .....17  
**Kleinwinkelkorngrenzen** .....8  
**Klettern**.....6  
 Klinken .....10  
 kohärent .....8  
**Konfiguration** .....10  
**Konformation** .....10  
**Konstitution** .....10  
 Konzentrationsangaben .....11  
**Koordinationszahl** .....2  
**Korngrenzen** .....8  
 Korngrenzenverfestigung .....15  
 Korngröße.....15  
 kovalente Bindung .....2  
 Kriechversuch .....15  
 Kristalline Strukturen .....3  
 KRZ Gitter .....3  
**Kubisches Gitter** .....3  
 Kunststoffe .....2  
 Kupfer .....24

**L**

Laserstrahlhärten .....22  
**Ledeburit** .....20  
**Leerstelle** .....5  
 Legierungen .....15  
 Legierungslehre .....11  
 Linienenergie .....6

**M**

Magnesium ..... 24  
 Magnetquantenzahl ..... 2  
 Mahlen ..... 25  
**Martensit** ..... 20  
 Massenaufbereitung ..... 25  
*Masseprozent* ..... 11  
 Messing ..... 25  
 Metallbindung ..... 2  
 Metalle ..... 2  
**Metallegierungen** ..... 11  
**Metallische Gläser** ..... 9  
**Mikrorisse** ..... 8  
 Mikroriß ..... 17  
 Miller'sche Indizes *Siehe* Gitterebenen  
 Mischen ..... 25  
*Mischkristallverfestigung* ..... 15  
**Mischversetzung** ..... 6  
*Mittelspannung* ..... 17  
**Molekülstrukturen** ..... 10  
 Molvolumen ..... 2  
**Monoklines Gitter** ..... 3  
*monotektische Reaktion* ..... 12

**N**

*Nebenquantenzahl* ..... 2  
 Nickel ..... 25  
 Nitrieren ..... 22  
 Normalglühen ..... 21  
 Normalisieren ..... 21

**O**

*Orientierungsverfestigung* ..... 15  
**Orowan Mechanismus** ..... 7; 15  
**Orthombisches Gitter** ..... 3

**P**

Parigesetz ..... 17  
 Patentieren ..... 22  
*Pauli Prinzip* ..... 2  
 Peak-Aging ..... 24  
*peritektische Reaktion* ..... 12  
**Perlit** ..... 20  
**Phasengrenze** ..... 8  
 Phasenregel ..... 11  
 physikalische Bindung ..... 2  
*Plastomere* ..... 9  
*Polyaddition* ..... 9  
 Polygonisation ..... 13  
*Polykondensation* ..... 9  
 Polymere ..... 9  
*Polymerisation* ..... 9  
**Poren** ..... 8

primäre Bindung ..... 2  
 Pulversynthese ..... 25

**Q**

Quantenzahlen ..... 2  
**Quergleiten** ..... 6

**R**

Randschichthärten ..... 22  
**Raumerfüllung** ..... 4  
 reduzierte Phasenregel ..... 11  
 Rekristallisation ..... 13  
 Rekristallisationsglühen ..... 21  
**Rhomboedrisches Gitter** ..... 3  
 Richard'sche Regel ..... 11  
*Rißausbreitung* ..... 17  
*Rißbildung* ..... 17  
 Rißzähigkeitsversuch ..... 17  
 Rockwell Härte ..... 15

**S**

*Schalenhartguß* ..... 22  
 Schlagzähigkeit ..... 17  
*Schneiden* ..... 15  
**Schraubenversetzung** ..... 6  
 schwingende Beanspruchung ..... 19  
**Schwingfestigkeitsversuch** ..... 17  
 sekundäre Bindung ..... 2  
 Selbstdiffusion ..... 13  
 Shockley - Versetzung ..... 6  
 Silizium ..... 25  
 Sintern ..... 25  
 Smith Diagramm ..... 18  
*Spannung* ..... 14  
 Spannungsarmglühen ..... 21  
 Spärolite ..... 10  
*Spinquantenzahl* ..... 2  
 Sprühtrocknen ..... 25  
**Stahlguß** ..... 22  
 Stapelfehler ..... 6; 8  
 Stirnabschreckversuch ..... 20  
 Störungen ..... 5  
**Stufenversetzung** ..... 6  
**Substitutionsatome** ..... 5  
 Substitutionsmischkristalle ..... 4

**T**

T, t - Diagramm ..... 12  
 Taman'sche Regel ..... 13  
 Tauchhärten ..... 22  
**Teilchen** ..... 8  
*Teilchenverfestigung* ..... 15  
*teilkohärent* ..... 8

Teilkristalline Strukturen ..... 9  
 Teilversetzung ..... 6  
 Temperatur - Druckkurve ..... 11  
 Temperrohguß ..... 22  
**ternäre Legierungen** ..... 13  
**Tetragonales Gitter** ..... 3  
**Thermochemische Verfahren** ..... 22  
**Thermomechanische Verfahren** ..... 22  
*Thermoplaste* ..... 9  
 Titan ..... 24  
**Triklines Gitter** ..... 3

**U**

*Umgehen* ..... 15  
 unvollständige Versetzung ..... 6

**V**

*van-der-Waalsche Bindung* ..... 2  
 Verbundstoffe ..... 2  
*Verfestigungskurven* ..... 14  
*Verfestigungsmechanismen* ..... 14  
*Vergüten* ..... 21  
 Versagensbedingung ..... 19  
 Versagenshypothese ..... 19  
**Versetzungen** ..... 5  
*Versetzungsbewegungen* ..... 6  
*Versetzungserzeugung* ..... 6  
*Versetzungskriechen* ..... 15  
*Versetzungsverfestigung* ..... 15  
 Vickers Härte ..... 15  
 Volumenprozent ..... 11

**W**

Wärmebehandlung ..... 21  
**Warmumformung** ..... 13  
 Wasserstoffbrückenbindung ..... 2  
 Weichglühen ..... 21  
 Werkstoffbeanspruchung ..... 19  
 Werkstoffgeometrie ..... 19  
 Werkstoffprüfung ..... 14  
 Werkstoffumgebung ..... 19  
 Werkstoffwiderstand ..... 17  
 Werkstoffzustand ..... 19  
*Wöhlerkurve* ..... 17

**Z**

Zugversuch ..... 14  
 Zustandsänderungen ..... 11  
**Zustandsdiagramm** ..... 12; 20  
**Zwillingsgrenzen** ..... 8  
 Zwillingsverformung ..... 5  
**Zwischengitteratome** ..... 5