

# PVK Werkstoffkunde & Fertigung I/II: Handout

Assistenz: Andreas Güntner

---

## 1 Kristallzustand der Metalle

### 1.1 Bezeichnung von Geraden

[xyz] Richtung

<xyz> Richtungsfamilie

Als Richtungsfamilie werden alle Richtungen bezeichnet, die kristallographisch äquivalent sind

### 1.2 Bezeichnung von Ebenen

(xyz) Ebene

{xyz} Ebenenfamilie

#### Millersche Indizes:

1. Das kleinste gemeinsame Vielfache der reziproken Achsenabschnitte

$$\text{z.B. Achsenabschnitte: } 2, 1, 3 \xrightarrow{\frac{1}{x}} \frac{1}{2}, \frac{1}{1}, \frac{1}{3} \xrightarrow{\times 6} (3 \ 6 \ 2)$$

2. bei kubischem Gitter: Kleinste ganzzahlige Flächennormale

$$\text{z.B. 2 Vektoren der Ebene gegeben: } \vec{u}, \vec{v} \rightarrow \vec{u} \times \vec{v} = \vec{n}$$

#### Tipp:

- Achsenabschnitte oft einfacher zu bestimmen, wenn Koordinatensystem verschoben wird.
- Reziproker Wert von  $\infty$  ist 0
- Textur: (Walzebene)[Walzrichtung], z.B. (1 0 0) [0 0 1]

## Sonderfall hexagonalen Gitter:

### Vorgehen:

- Ebene für 3-Achsen und 4-Achsen über Achsabschnitte bestimmen
- Richtungen in 3-achsigem System bestimmen und 4-achsig über Formeln

$$u = \frac{n}{3}(2u' - v')$$

$$v = \frac{n}{3}(2v' - u')$$

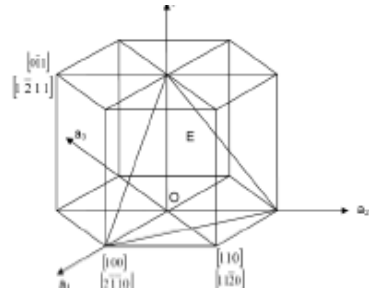
$$t = -\frac{n}{3}(u' + v') = -(u + v) \Leftrightarrow u + v + t = 0$$

$$w = n \cdot w'$$

$$u' = \frac{1}{n}(2u + v)$$

$$v' = \frac{1}{n}(2v + u)$$

$$w' = \frac{1}{n}w$$



## 1.3 Textur

**Darstellung:** (Walzebene)[Walzrichtung], z.B. (1 0 0) [0 0 1]

## 1.4 Gitterfehler

### 1.4.1 Nulldimensionale Gitterfehler: Leerstellen + Zwischengitteratom

- Berechnung durch Arrhenius-Funktion (auf Einheiten achten!!!)
- Erzeugung durch Temperaturerhöhung, Vernichtung durch Abkühlung

### 1.4.2 Eindimensionaler Gitterfehler: Versetzungen

- Beschreibung durch Burgersvektor
- Schraubenversetzung, Stufenversetzung

### 1.4.3 Zweidimensionaler Gitterfehler: Stapelfehler, Korngrenzen

- Korngrenzen werden über Winkeländerung der Gitterorientierung klassifiziert
- Zur Kaltumformung am Besten geeignet sind Werkstoffe mit niedriger Stapelfehlerenergie, d.h. Werkstoffe mit vielen Stapelfehlern. Diese behindern das Versetzungslaufen, wodurch beim Kaltumformen eine Verfestigung auftritt. Dadurch ist ein gleichmäßiger Materialfluss gewährleistet und Rissbildung wird vermieden.

## 2 Legierungskunde

### 2.1 Grundlagen

	Komponentengehalt in der Legierung	Komponentengehalt in der Phase	Anteil der Phase an der Legierung
Massengehalt	$\omega_A, \omega_B$	$\omega_A^\alpha, \omega_A^\beta$	$\omega_\alpha, \omega_\beta$
Stoffgehalt	$c_A, c_B$	$c_A^\alpha, c_A^\beta$	$c_\alpha, c_\beta$
Bestimmung im Diagramm	senkr. nach unten gehen und ablesen	Horizontal zu Phasengrenze gehen und am Schnittpunkt senkrecht nach unten, ablesen	Hebelgesetz an den Phasengrenzen

#### Gibbsche Phasenregel:

Gibbs'sches Phasengesetz:  $P + F = K + 2$

P : #Phasen  
F : #Freiheitsgrade  
K : #Komponenten

für  $p = \text{const}$  gilt:  $P + F = K + 1$

- Wichtig für Haltelinie in Erstarrungskurve
- sehr gute Erläuterung SÜ 4 Aufgabe 3 MuLÖ

#### Gesetz der wechselnden Phasenzahl:

Beim Übergang von einem Phasenraum zum nächsten wird die Phasenzahl um 1 erhöht oder erniedrigt.

Ausnahme: Eutektischer / peritektischer Punkt.

#### Mischkristall : ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ )

Kristall, das aus mehreren Komponenten besteht, Löslichkeit der Komponenten liegt in bestimmten Bereich

z.B. Austenit, Ferrit

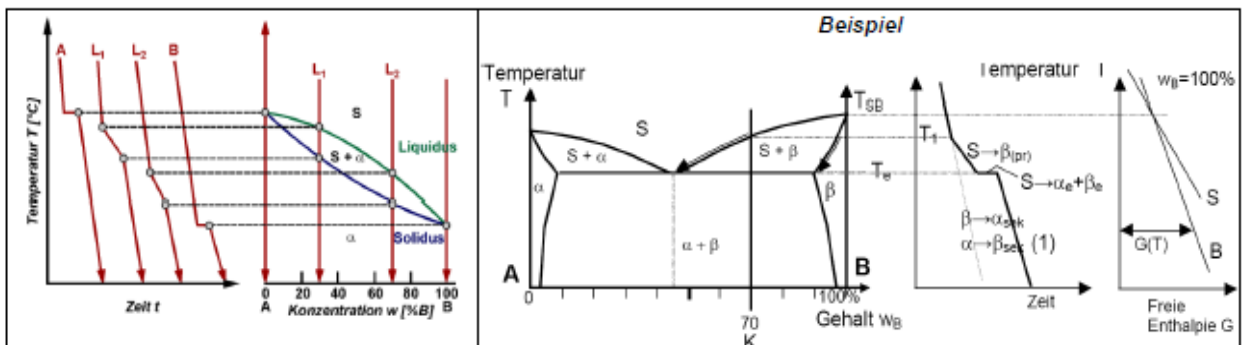
#### Intermetallische Verbindung: (A,B,C,D,)

Kristall, der nur in einer ganz bestimmten Komponentenzusammensetzung zustande kommt

z.B.  $Fe_3C$

Eutektikum		Peritektikum	
1 Phase $\Rightarrow$ 2 Phasen		2 Phasen $\Rightarrow$ 1 Phase	
<b>Falls eutektische Umwandlung</b>	$S \rightarrow \alpha_e + \beta_e$	$S + \alpha_{pr} \rightarrow \beta_p$	
<b>Falls eutektoide Umwandlung (nicht aus Schmelze sondern aus Kristall)</b>	$\gamma \rightarrow \alpha_{ed} + \beta_{ed}$	$\gamma + \alpha \rightarrow \beta_{pd}$	

## 2.2 Erstarrungskurven



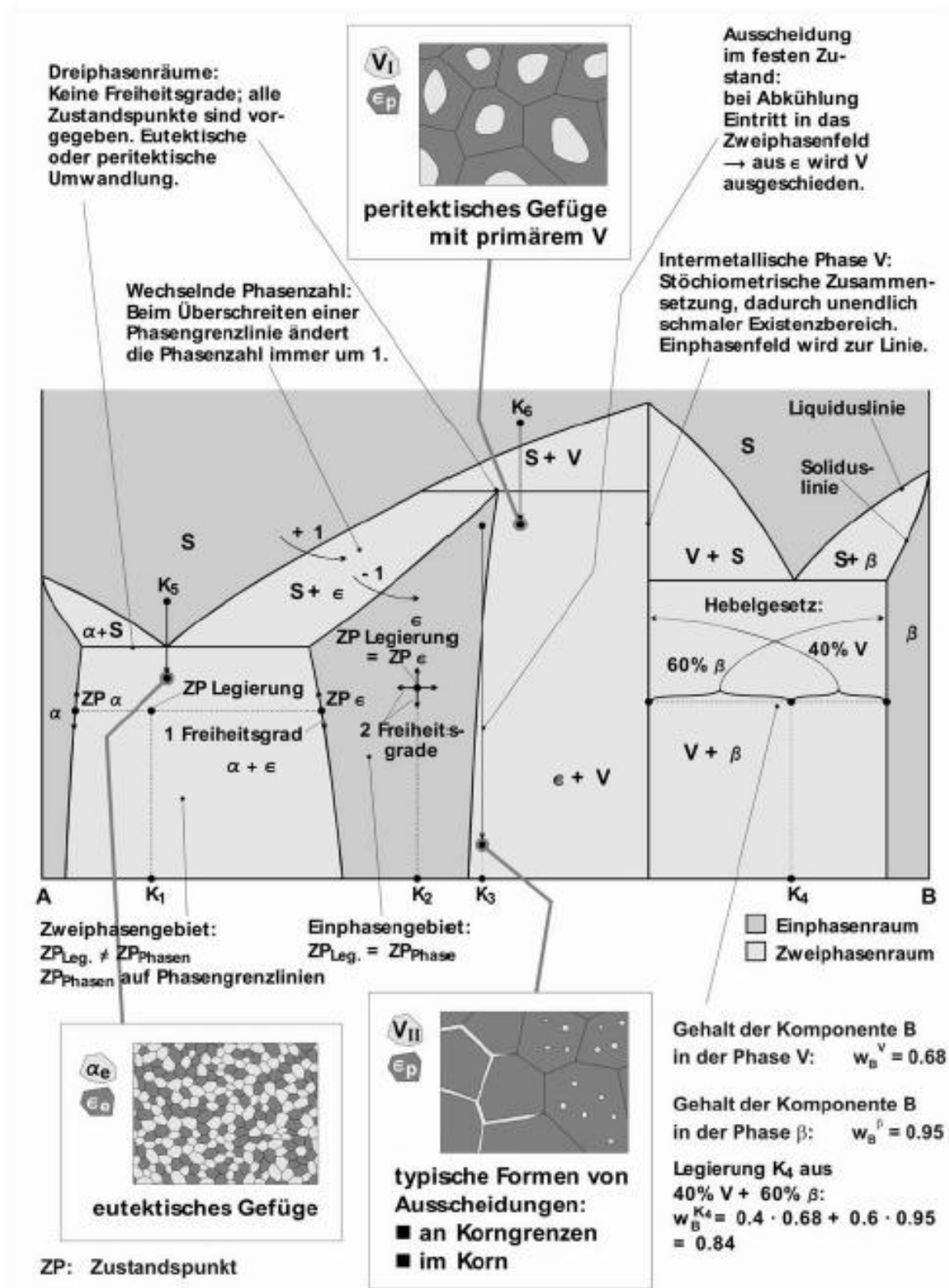
### Tipp:

Immer überlegen, ob Umwandlung an Phasengrenze:

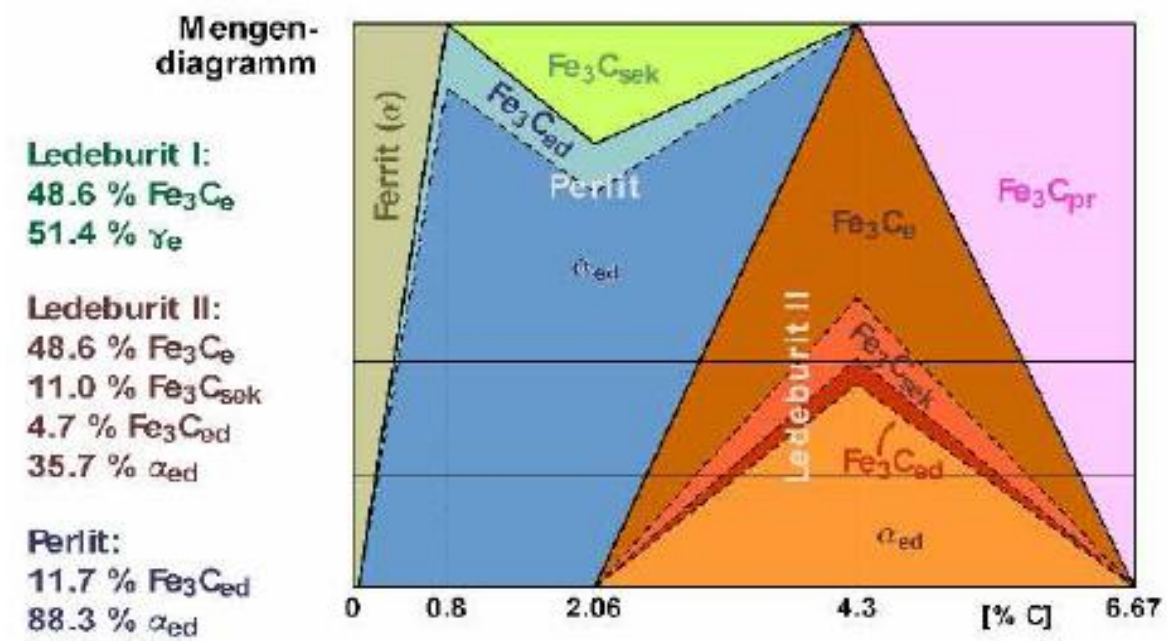
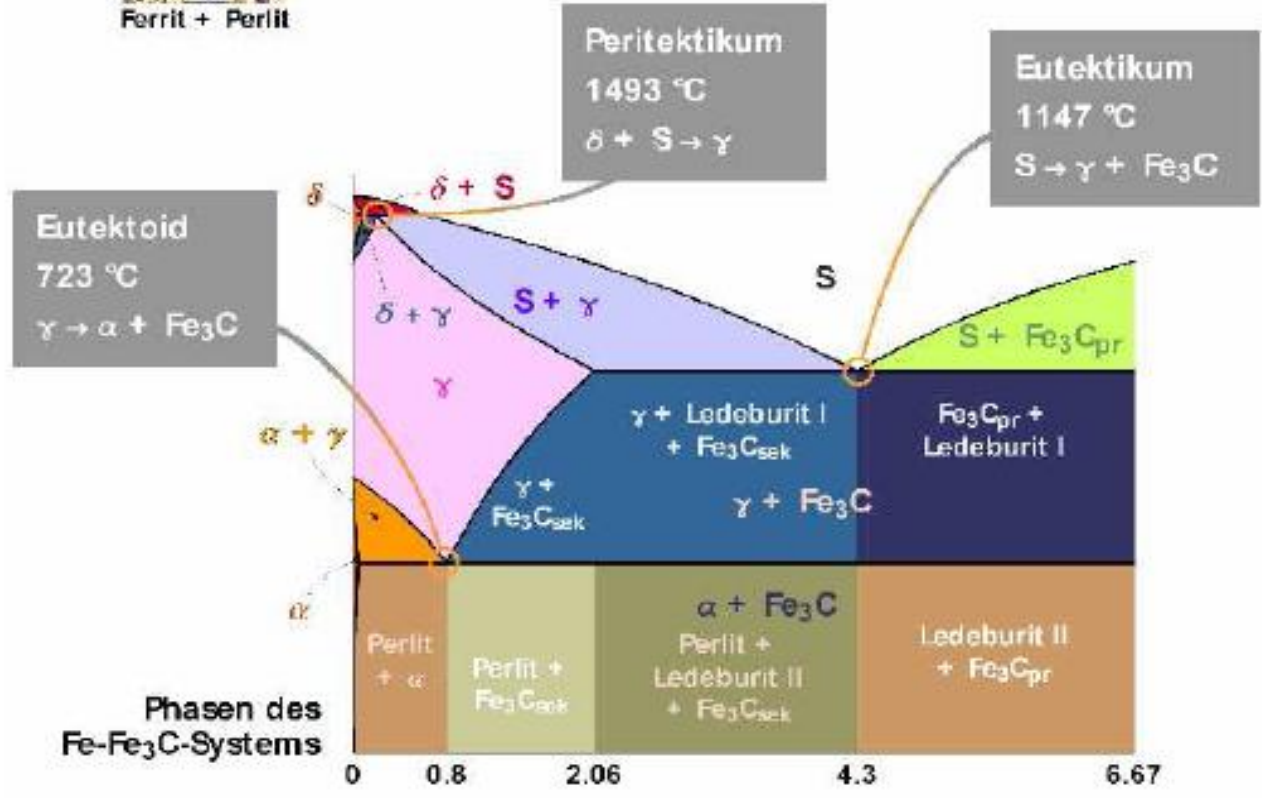
- vollst. stattfindet  $\Rightarrow$  Haltelinie (Freiheitsgrad = 0) z.B. Eutektische Gerade
- kontinuierlich bis zur nächsten Phasengrenze stattfindet  $\Rightarrow$  Gerade mit verminderter Steigung

## 2.3 Diagramme

### Legierungskunde Systemtypen:



# Das metastabile Eisen-Kohlenstoffsystem Fe-Fe<sub>3</sub>C.- (Gefügebilder, Zustandsdiagramm, Mengendiagramm)



### 3 Diffusion

Diffusionskoeffizient :  $D = D_0 \exp^{-\frac{Q}{RT}}$

#### 3.1 Stationäre Diffusion

$$j = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

j in  $[\frac{kg}{s \cdot m^2}]$

z.B.: **Zeitunabhängige** Diffusionsströmung durch eine Metallplatte

#### 3.2 Instationäre Diffusion

$$\frac{c_a - c_x}{c_a - c_0} = \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

z.B.: Aufkohlungsprozess bei dem ein **zeitabhängiges** Konzentrationsprofil entsteht

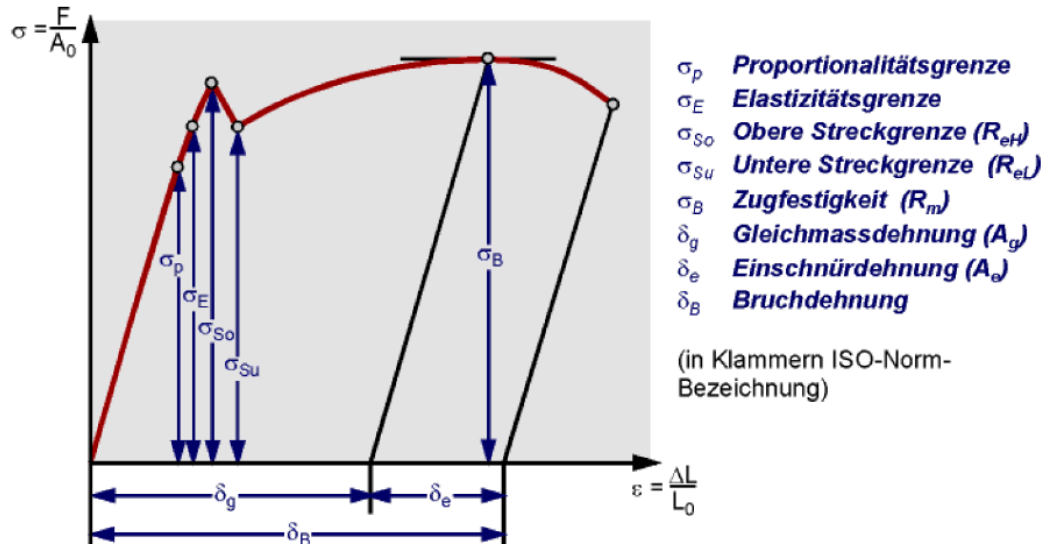
**Tipp: Interpolation**

$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
$a_1$	$b_1$
$a_2$	$b_2$
?	$b_3$
$a_4$	$b_4$

$$a_3 = a_2 + (a_4 - a_2) * \frac{b_3 - b_2}{b_4 - b_2}$$

## 4 Elastizität & Plastizität

### 4.1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm



### 4.2 Elastizität

**Hook'sches Gesetz:**  $\sigma = \varepsilon * E$        $\sigma = \frac{F}{A}$

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

**Spannungstensor:**

$$\underline{\underline{T}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

- Normalspannung in einer geg. Ebene:  $\sigma_n = (\underline{\underline{T}} \cdot \underline{n}) \cdot \underline{n}$
- Tangentialspannung in einer geg. Ebene:  $\sigma_t = (\underline{\underline{T}} \cdot \underline{n}) \cdot \underline{t}$   
(Richtung der Tangentialspannung:  $\underline{t}$ )

Achtung: Normalenvektor n immer normieren!!!



## 4.3 Plastizität

Das Wandern der Versetzungen sorgt für eine irreversible Verformung des Körpers

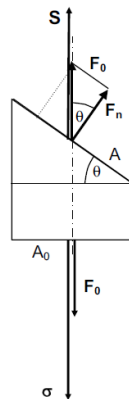
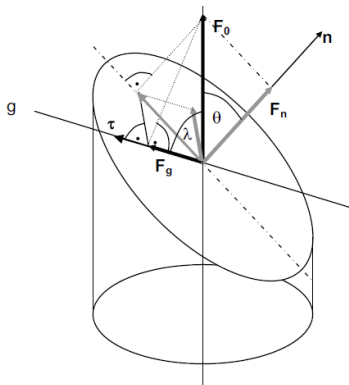
**Wahre Dehnung:**  $\varphi = \ln(1 + \varepsilon)$

**Wichtige Eigenschaften beim Zugvergleich Stab – Probe:**

**Einschnürung:**  $\Delta l_{e,p} = \Delta l_{e,s}$  die Einschnürdehnung ist also längenabhängig (lokaler Prozess)

**Gleichmasdehnung:**  $A_{g,p} = A_{g,s}$  die Gleichmasdehnung ist längenunabhängig

**Schmidtsches Schubspannungsgesetz:**



$$\tau = \sigma \cdot \cos(\lambda) \cdot \cos(\theta)$$

Vorgehen:

- Winkel geometrisch bestimmen
- Skalarprodukt verwenden

$$\cos(\lambda) = \frac{g \cdot n_0}{\|g\| \cdot \|n_0\|}$$

$$\cos(\theta) = \frac{n_0 \cdot n}{\|n_0\| \cdot \|n\|}$$

$g$     Richtungsvektor der Schubspannung  $\tau$   
 $n_0$     Richtung der Krafteinleitung  
 $n$     Normale zur Schnittbe

**Ludwiggleichung für plastische Beschreibung bis Gleichmassdehnung:**

$$\sigma - R_{p0.2} = C * \varepsilon_{pl}^n$$

Hinweise:

- $\varepsilon_{pl}$  ohne Lüdersdehnung ( bei  $A_g$  ist  $A_l$  inbegriffen )
- $C$  und  $n$  sind Materialparameter

## 5 Kriechen

### 5.1 Kriechen (Last const.)

Kriechrate:

$$\dot{\varepsilon} = A * \sigma^n * e^{-\frac{Q}{RT}}$$

### 5.2 Relaxation (Dehnung const.)

Spannungsverlust:

$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_0^{n-1}} = (n - 1) * B * E * t$$

$$B = A * e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)}$$

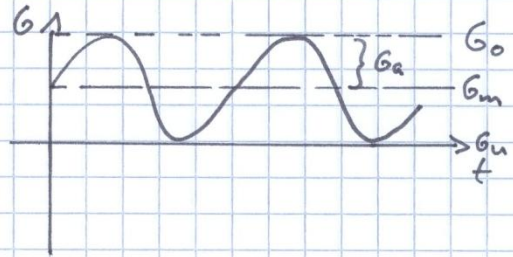
## 6 Ermüdung am gekerbten Bauteil

1.  $G_0, G_u, G_m, G_a$  bestimmen:

$$G_0 = G_{\max}$$

$$G_m = (G_0 + G_u) \cdot \frac{1}{2}$$

$$G_a = (G_0 - G_u) \cdot \frac{1}{2}$$



2. Spannungsüberhöhung durch Kerbwirkung:

2 Lösungswege

über Formzahl  $\alpha_k$   
und Kerbstützfaktor  $\psi_{Sk}$

$$G_{0k} = \alpha_k \cdot G_0$$

$$G_{uk} = \alpha_k \cdot G_u$$

$$G_{mk} = \alpha_k \cdot G_m$$

$$G_{ak} = \alpha_k \cdot G_a$$

Beanspruchung  
der Probe

über Kerbwirkung  $\beta_k$

$G_0, G_u, G_m, G_a$  bleiben unverändert  
 $\beta_k$  enthält alle Kerbeeinflüsse

Kerbstützfaktor

$$\psi_{Sk} = 1 + 0,75 \cdot \left[ (C \cdot \alpha_k - 1)^4 \sqrt{\frac{3000 \text{ N}}{G_S}} \right]$$

$G_S$  ... Streckgrenze,  $C=1$  bei Zy-Druck  
= 1,7 Biege-Radial  
= 1,5 Biege-Flachstab  
= 1,3 Torsion-Radial

$$G_{Sk} = \psi_{Sk} \cdot G_S$$

$$G_{Bk} = \psi_{Sk} \cdot G_B$$

$$G_{Wk} = b_0 \cdot b_s \cdot \delta_{Wk} \cdot G_W$$

Material-  
Kennwerte

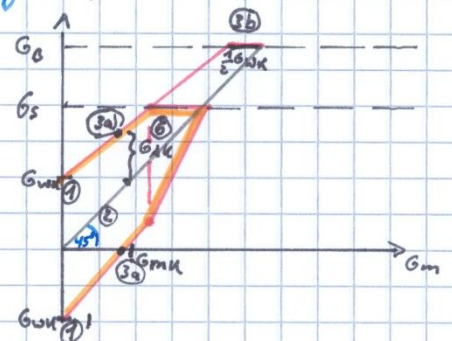
$$G_{Sk} = b_0 \cdot b_s \cdot \frac{1}{\beta_k} \cdot G_S$$

$$G_{Bk} = b_0 \cdot b_s \cdot \frac{1}{\beta_k} \cdot G_B$$

$$G_{Wk} = b_0 \cdot b_s \cdot \frac{1}{\beta_k} \cdot G_W$$

3. Dynamische Festigkeit berechnen über Smith-Diagramm

- Vorgehen:
1.  $\pm G_{Wk}$  eintragen
  2. 45° Gerade einzeichnen
  3. a) falls  $G_{ak}$  ( $G_{mk}$ ) gegeben  $\rightarrow$  eintragen  
b) Schnittpkt. 45° und  $G_0$   $\frac{1}{2} G_{Wk}$  abtragen
  4. Punkte ① und ③b) verbinden (oder ②a)
  5. Übertragung in Drückbereich
  6.  $G_{Su}$  bei  $G_{mk}$  ablesen



4. Festigkeitsnachweis

Bruch:  $G_{0k} \leq G_{zul} = \frac{G_{Bk}}{C_B \cdot S_B}$

Fließen:  $G_{0k} \leq G_{zul} = \frac{G_{Sk}}{C_S \cdot S_F}$

Ermüdung:  $G_{ak} \leq G_{zul} = \frac{G_{Ak}}{C_B \cdot S_D}$

$G_0 \leq G_{zul} = \frac{G_{Bk}}{C_B \cdot S_B}$

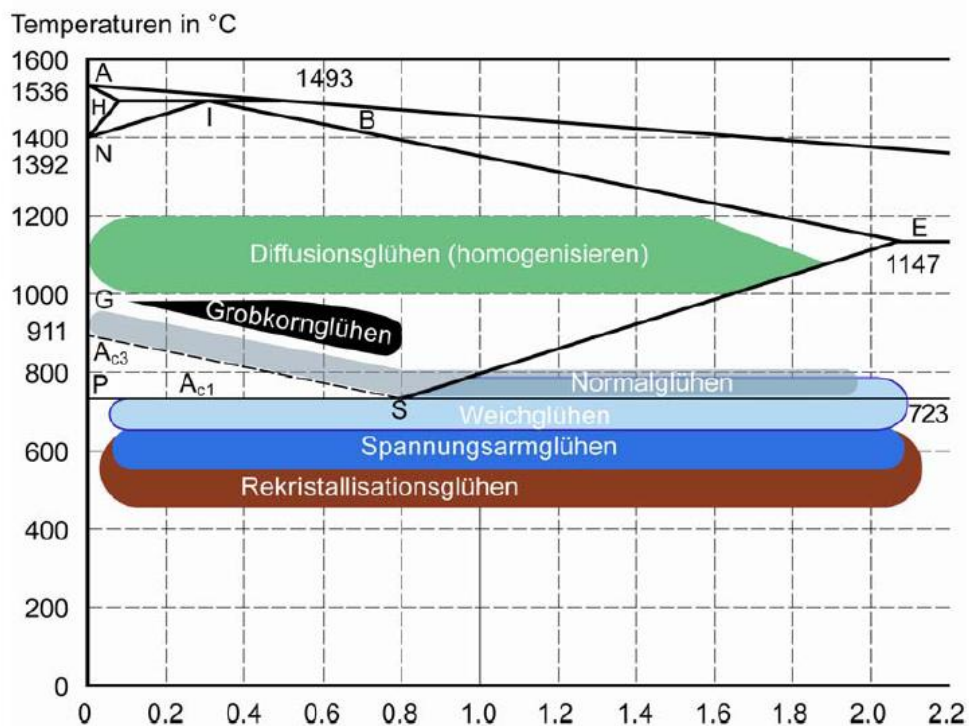
$G_0 \leq G_{zul} = \frac{G_{Sk}}{C_S \cdot S_F}$

$G_a \leq G_{zul} = \frac{G_{Ak}}{C_B \cdot S_D}$

## 7 Glühverfahren

Die Wärmebehandlungen im Gleichgewicht (Glühverfahren) von Stahl bringen ihn meistens dem Gleichgewichtszustand näher. Abgekühlt wird langsam, es wird mit nur geringer Unterkühlung gearbeitet. Die Verfahren unterscheiden sich bezüglich

- zeitlichem Verlauf der Glühtemperatur
- den erreichten Gefügeständen als Ziel der Wärmebehandlung
- mit oder ohne Phasenumwandlung ( $\alpha \leftrightarrow \gamma$ )



# 8 Stahl

## Kurznamen nach EN 10027-1:2005

Nach Verwendungszweck	<u>Unlegierte</u> Stähle mit mittlerem <u>Mn</u> -Gehalt < 1% (ausgenommen Automatenstähle)	<u>Unlegierte</u> Stähle mit mittlerem <u>Mn</u> -Gehalt $\geq 1\%$ , <u>unlegierte</u> Automatenstähle sowie <u>legierte</u> Stähle (ausgenommen Schnellarbeitsstähle), sofern der mittlere Gehalt der einzelnen Legierungselemente < 5%.	Nichtrostende Stähle und andere legierte Stähle (ausgenommen Schnellarbeitsstähle), sofern der mittlere Gehalt mindestens eines Legierungselementes $\geq 5\%$ ist.
-----------------------	---	--	---

## Beispiele

<b>S235JRG2</b>	<b>C45E</b>	<b>42CrMo4</b>	<b>X5CrNi18-10</b>
<b>S235</b> Hauptsymbol	<b>C45</b> Hauptsymbol	<b>42</b> C-Gehalt	<b>X</b> Kennbuchstabe
<b>S</b> Stähle für den Stahlbau	<b>C</b> Kohlenstoff	verschlüsselt	
<b>235</b> Mindeststreckgrenze	<b>45</b> C-Gehalt verschlüsselt	<b>Cr, Mo</b> Legierungsbestandteile	<b>5</b> C-Gehalt verschlüsselt
<b>JRG2</b> Zusatzsymbol	<b>E</b> Zusatzsymbol für vorgeschriebener max. S-Gehalt	<b>4</b> Anteil Cr verschlüsselt	<b>Cr, Ni</b> Legierungsbestandteile
<b>JR</b> Kerbschlagarbeit			<b>18</b> Anteil Cr in %
<b>G2</b> Desoxidationsart			<b>10</b> Anteil Ni in %

Schnellarbeitsstahl: S-8-2-4-3 [ S - %W - %Mo - %V - %Co ]

## Wirkung von Legierungselementen bei Stählen [Meier]

+ Erhöhung - Verminderung ohne Einfluss	Legierungselemente										
	Cr	Ni	Al	W	V	Co	Mo	Si	Mn	S	Pb
Warmumformbarkeit	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	
Kaltumformbarkeit		<sup>+</sup> Cr		-		-	-	-	-	-	-
Zerspanbarkeit		-		-			-	-	-	+	+
Warmfestigkeit	+	+		+	+	+	+	+			
Korrosionsbeständigkeit	+	+			+					-	
Härtetemperatur	+	<sup>+</sup> Cr	+	+	+	+	+	+	-		
Härtbarkeit, Vergütbarkeit	+	+		+	+	+	+	+	+		
Nitrierbarkeit	+		+	+	+		+	-	+		
Schweisbarkeit	-	-	+		+		-		-	-	-
Zugfestigkeit	+	+		+	+	+	+	+	+		+
Streckgrenze	+	+		+	+	+	+	+	+		+
Kerbschlagzähigkeit	-	<sup>+</sup> T <sub>0</sub>	-		+	-	+	-		-	-
Verschleißfestigkeit	+	-		+	+	+	+	-	-		

# 8.1 Tabellen

## 8.1.1 Unlegierter Stahl

G	S	235	JO	W																																				
Gussqualität	Hauptsymbol für Verwendungszweck	Mindeststreckgrenze	Kerbschlagzähigkeit oder Angabe über die Beruhigung	spezielle Eigenschaften																																				
(sonst leerlassen)	S	Stahl für Stahlbau	Kerbschlagzähigkeit:  Kerbschlagarbeit <table border="1"> <tr> <th colspan="3">Kerbschlagarbeit</th> <th>T</th> </tr> <tr> <th>27J</th> <th>40J</th> <th>60J</th> <th>in °C</th> </tr> <tr> <td>JR</td> <td>KR</td> <td>LR</td> <td>+20</td> </tr> <tr> <td>JO</td> <td>KO</td> <td>LO</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>J2</td> <td>K2</td> <td>L2</td> <td>-20</td> </tr> <tr> <td>J3</td> <td>K3</td> <td>L3</td> <td>-30</td> </tr> <tr> <td>J4</td> <td>K4</td> <td>L4</td> <td>-40</td> </tr> <tr> <td>J5</td> <td>K5</td> <td>L5</td> <td>-50</td> </tr> <tr> <td>J6</td> <td>K6</td> <td>L6</td> <td>-60</td> </tr> </table>	Kerbschlagarbeit			T	27J	40J	60J	in °C	JR	KR	LR	+20	JO	KO	LO	0	J2	K2	L2	-20	J3	K3	L3	-30	J4	K4	L4	-40	J5	K5	L5	-50	J6	K6	L6	-60	C mit besonderer Kaltumformbarkeit
	Kerbschlagarbeit			T																																				
	27J	40J		60J	in °C																																			
	JR	KR		LR	+20																																			
	JO	KO		LO	0																																			
	J2	K2		L2	-20																																			
	J3	K3		L3	-30																																			
	J4	K4		L4	-40																																			
	J5	K5		L5	-50																																			
	J6	K6		L6	-60																																			
	E	Maschinenbaustahl		(für Halbzeug mit Bezugsdurchmesser)	D für Schmelztauchüberzüge																																			
	B	Betonstahl		Mindeststreckgrenze = maximale Spannung bevor plastisches Fließen eintritt	E für Emaillierung																																			
	D	Flacherzeugnisse für Kaltumformen			F Schmieden																																			
H	Flacherzeugnisse aus höherfestem Stahl zum Kaltumformen	H Hohlprofile																																						
		L für tiefere Temperaturen																																						
L	Stahl für Leitungsrohren	M Thermomechanisch gewalzt																																						
M	Elektroblech	N Normalgeglüht oder normalisierend gewalzt																																						
P	Stahl für Druckbehälter	O für Offshore																																						
R	Stahl für Schienen	P Spundwandstahl																																						
T	Verpackungsblech und -band	Q Vergütet																																						
Y	Spanstähle	S für Schiffsbau																																						
		T für Rohre																																						
		W Wetterfest																																						
		Cu Chemische Symbole für vorgeschriebene Elemente																																						
		+C Grobkornstahl																																						
		+F Feinkornstahl																																						
		+H mit besonderer Härbarkeit																																						
		+Z Feuerverzinkt																																						
		G1 unberuhigt																																						
		G2 beruhigt																																						
		G3 Gütegruppe																																						
		G4 Gütegruppe																																						
		+ZE Elektrolytisch verzinkt																																						
		+A Weichgeglüht																																						
		+N Normalgeglüht																																						
		+QT Vergütet																																						

C	45	E
Festes Symbol	C-Gehalt · 100	Spezielle Eigenschaften: E: vorgeschriebener maximaler S-Gehalt R: vorgeschriebener Bereich für S-Gehalt C: Besondere Kaltumformbarkeit G: weitere Merkmale S: für Federn U: für Werkzeuge

## 8.1.2 Legierter Stahl

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

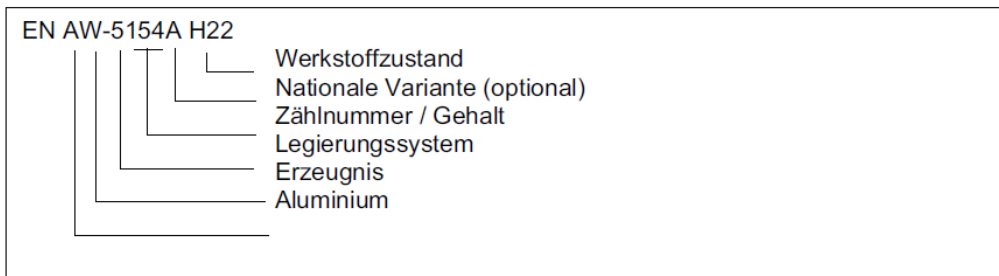
Multiplikatoren für die Bezeichnung niedriglegierter Stähle (Gesamtanteil Legierungselemente < 5%)

Grenzgehalte an Legierungselementen, bis zu denen ein Stahl als unlegiert gilt:

Festgelegtes Element	Grenzwert Massenanteil in %	Festgelegtes Element	Grenzwert Massenanteil in %
Al Aluminium	0,30	Pb Blei	0,40
B Bor	0,0008	Se Selen	0,10
Bi Bismut	0,10	Si Silicium	0,60
Co Cobalt	0,30	Te Tellur	0,10
Cr Chrom	0,30	Ti Titan	0,05
Cu Kupfer	0,40	V Vanadium	0,10
La Lanthanide	0,10	W Wolfram	0,30
(einzeln gewertet)		Zr Zirconium	0,05
Mn Mangan	1,65 <sup>a</sup>	Sonstige (mit Ausnahme von Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Stickstoff)	0,10
Mo Molybdän	0,08	jeweils	
Nb Niob	0,06		
Ni Nickel	0,30		

<sup>a</sup> Falls für Mangan nur ein Höchstwert festgelegt ist, beträgt der Grenzwert 1,8% und die 70%-Regel (siehe 3.1.2) gilt nicht

## 9 Aluminium



Zifferschlüssel nach EN 573-1

1xyz	99,yz% Aluminium (≥99.00%)	1000 Serie
2xyz	Hauptlegierungselement Kupfer	2000 Serie
3xyz	Hauptlegierungselement Mangan	3000 Serie
4xyz	Hauptlegierungselement Silizium	4000 Serie
5xyz	Hauptlegierungselement Magnesium	5000 Serie
6xyz	Hauptlegierungselement Magnesium und Silizium	6000 Serie
7xyz	Hauptlegierungselement Zink	7000 Serie
8xyz	Hauptlegierungselement sonstige Elemente	8000 Serie
9xyz	Nicht verwendet	9000 Serie

Erzeugnisform für Bezeichnung nach EN 573-1

B	Masseln
C	Gussstücke
M	Vorlegierungen
W	Halbzeuge (gewalzt, geschmiedet, ...)

Werkstoffzustand	
O	weichgeglüht
F	Gusszustand
Hxy	x=1 → kaltverfestigt
	x=2 → kaltverfestigt und rückgeglüht
	y → y/8 hart
H112	Durch Warmumformung oder begrenzte Kaltumformung geringfügig verfestigt
T1	Kontrollierte Abkühlung nach Guss und kaltausgelagert
T4	Lösungsgeglüht und kaltausgelagert
T5	Kontrollierte Abkühlung nach dem Guss und warmausgelagert
T6	Lösungsgeglüht und vollständig warmausgelagert

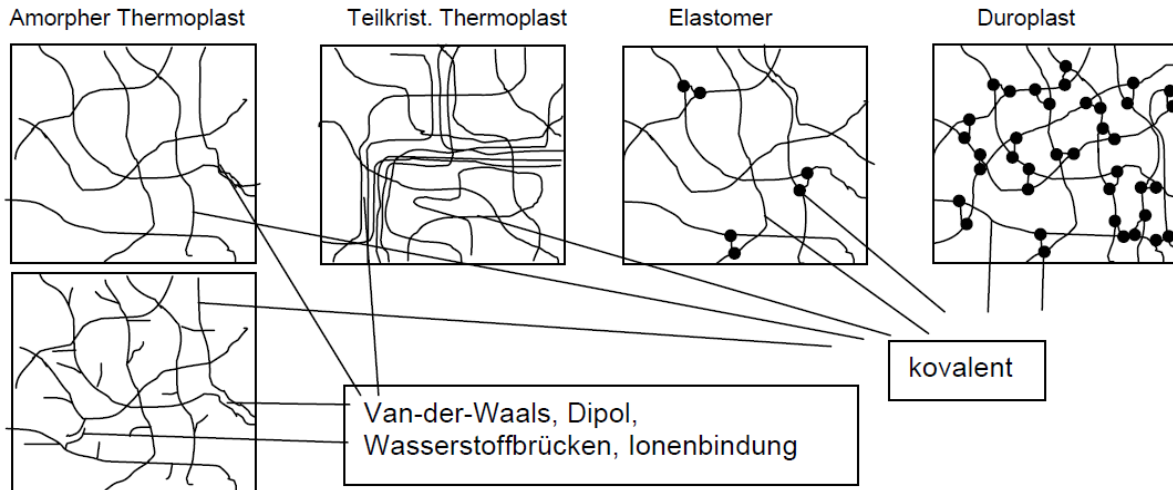
### 9.1 Aushärtbare Aluminiumlegierungen

Bei hochwertigen Alulegierungen kann die Festigkeit durch Teilchenhärtung erhöht werden. Um zu entscheiden, ob eine Legierung aushärtbar ist, verwendet man die Plus-Minus-Regel. Diese besagt, dass eine Alulegierung v.a. dann aushärtbar ist, falls die eingelagerten Fremdatome grössere und kleinere Atomradien als Aluminium haben.

Aluminium: Einige Legierungselemente				
Element	Ordnungszahl	Atomgewicht	Atomradius (pm)	
Al	Aluminium	13	27	143
Cu	Kupfer	29	63	128
Mg	Magnesium	12	24	160
Li	Lithium	3	7	152
Si	Silizium	14	28	117
Zn	Zink	30	65	133

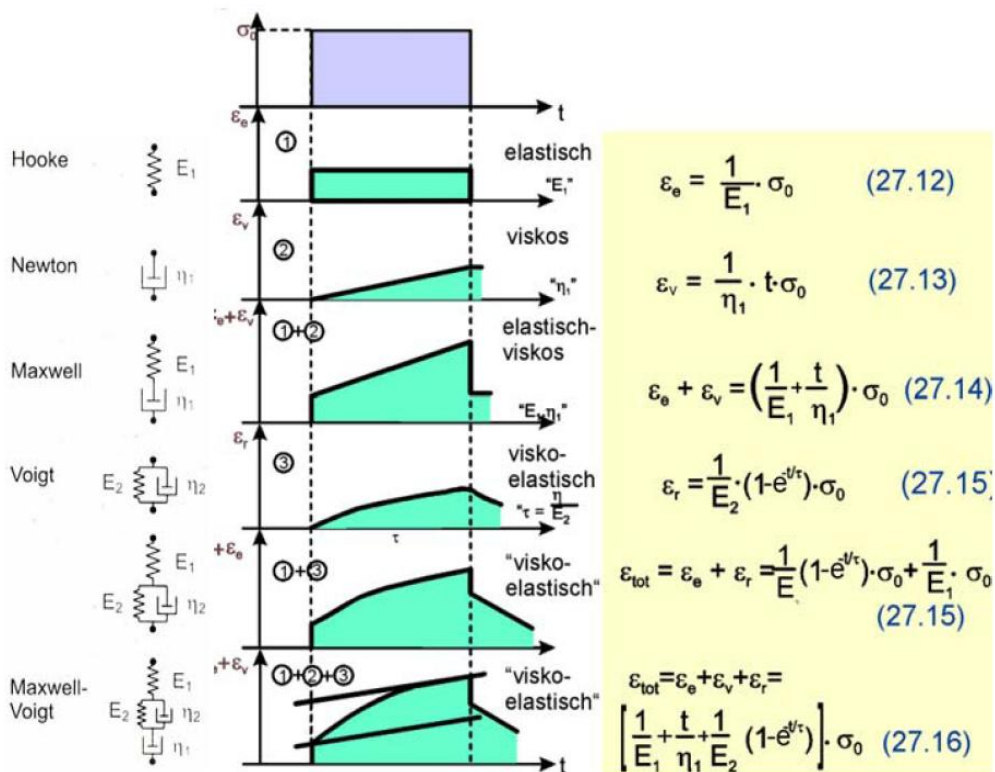
# 10 Polymere

## 10.1 Struktur



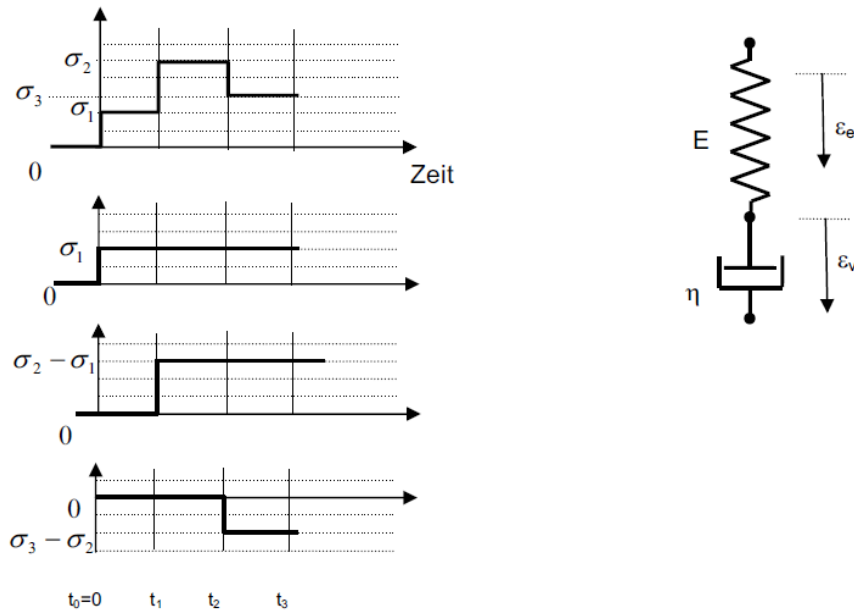
## 10.2 Mechanische Eigenschaften

Zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Polymeren verwendet man Feder-Dämpfer-Modelle. Jedes in Reihe geschaltene Feder-Dämpfer-Modell kann als Addition von Standardelemente berechnet werden.





## 10.2.1 Superpositionsprinzip



Da die Deformationen von der Zeit und den Spannungen linear abhängen, darf die Gesamtdehnung als Summe der Dehnungen, welche die einzelnen Spannungsanteile jeweils allein bewirken würden, berechnet werden. Die Dauer wird vom Flankenanstieg bis zu der Zeit, zu welcher man die Dehnungen kennen will, hier  $t_3$ , gemessen:

Niveau  $\sigma_1 = 2$  während  $t_3 - t_0 = 3$ , Niveau  $\sigma_2 - \sigma_1 = 3$  während  $t_3 - t_1 = 2$ , Niveau  $\sigma_3 - \sigma_2 = -2$  während  $t_3 - t_2 = 1$ .

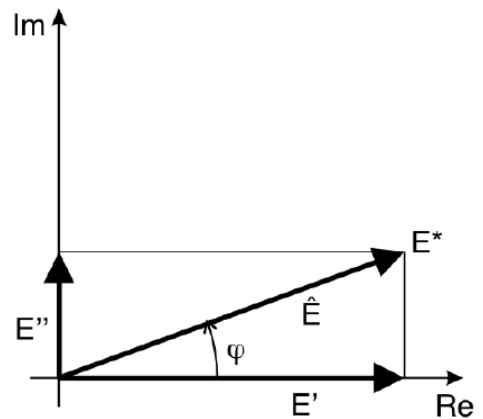
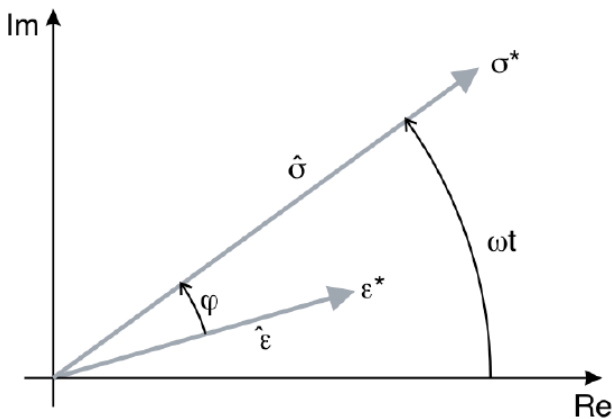
$$\varepsilon(t_3) = \left( \frac{1}{E} + \frac{t_3}{\eta} \right) \sigma_1 + \left( \frac{1}{E} + \frac{t_3 - t_1}{\eta} \right) \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) + \left( \frac{1}{E} + \frac{t_3 - t_2}{\eta} \right) \cdot (\sigma_3 - \sigma_2) = \frac{\sigma_3}{E} + \dots (**)$$

mit obigen Schemazahlen und  $E=500$ ,  $\eta=600$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_3) &= \left( \frac{1}{500} + \frac{3}{600} \right) \cdot 2 + \left( \frac{1}{500} + \frac{2}{600} \right) \cdot 3 + \left( \frac{1}{500} + \frac{1}{600} \right) \cdot (-2) \\ &= (0.002 + 0.005) \cdot 2 + (0.002 + 0.00333) \cdot 3 + (0.002 + 0.00167) \cdot (-2) = 0.0227 \end{aligned}$$

## 10.2.2 Zyklische Beanspruchung

Bei sinusförmigen Schwingbeanspruchungen tritt bei linear-viskoelastischen Stoffen eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Dehnung auf. Daraus folgt, dass die Energie nicht vollständig rückgewonnen werden kann, es kommt zu einer Energiedissipation („Dämpferwirkung“). Mathematisch wird dies durch das Einführen des komplexen E-Moduls erfasst.



Eulerbeziehung  $\sigma^* = \hat{\sigma} \cdot \cos \omega \cdot t + i \cdot \hat{\sigma} \cdot \sin \omega \cdot t = \hat{\sigma} \cdot e^{i\sigma \cdot t}$

$$\sigma^* = \hat{\sigma} \cdot e^{i\omega t}$$

$$\varepsilon^* = \hat{\varepsilon} \cdot e^{i(\omega t - \varphi)}$$

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \cdot e^{i\varphi}$$

$$E^* = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \cdot (\cos\varphi + i \sin\varphi)$$

$$E^* = \underbrace{\frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \cdot \cos\varphi}_{E'} + i \underbrace{\frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}} \cdot \sin\varphi}_{E''}$$

$$E^* = E' + iE''$$

Verlustfaktor  $\phi$ :  $\tan(\varphi) = \frac{E''}{E'}$

wobei  $E' = \text{Re}(E^*) = \text{Speichermodul}$

$E'' = \text{Im}(E^*) = \text{Verlustmodul}$

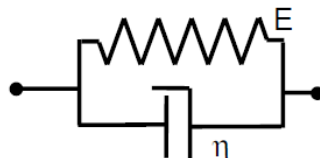
$$\hat{E} = \sqrt{E'^2 + E''^2} = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\varepsilon}}$$

Serieschaltung



$$E_{res}^* = \frac{1}{\frac{1}{E_1^*} + \frac{1}{E_2^*}}$$

Parallelschaltung



$$E_{res}^* = E_1^* + E_2^*$$

# 11 Keramik

## 11.1 Sinterprozess

- Sintergleichungen:

$$\text{Halswachstum: } \left(\frac{x}{a}\right)^n = \frac{C}{a^m} t \quad \text{Zentrumsannäherung: } \left(\frac{h}{a}\right)^{\frac{n}{2}} = \frac{C}{2^n \cdot a^m} t$$

a: Teilchenradius, x: Halsradius, h: halbe Annäherung, C, n, m: Werkstoffkennwerte  
 $C = C_0 \exp(-Q/RT)$ , n = 2 ... 7, m = 1 ... 4 (typische Werte)

- Dichte beim Sintern (gültig für Bereich des Halswachstums und der Zentrumsannäherung;  
 $h/a \approx 0.03$ ):

$$\varepsilon = -\frac{h}{a}, \quad \frac{V}{V_0} \approx 1 + 3\varepsilon \Rightarrow \frac{\rho_0}{\rho} \approx 1 + 3\varepsilon$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = 1 - 3 \left( \frac{Ct}{2^n a^m} \right)^{\frac{2}{n}}$$

- Verminderung der Porosität P:

$$P = \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{tot}}}, \quad \left( \frac{P_0}{P} \right)^n = 1 + Kt, \quad K = K_0 \exp(-Q/RT)$$

$$\rho = \rho_{\text{Matrix}} (1 - P)$$