

Werkstoffe und Fertigung II  
Prof.Dr. K. Wegener

Sommersemester 2007

Name	
Vorname	
Legi-Nr.	

# Übung 10

## Stähle, Gusseisen, Aluminium, physikalische Eigenschaften

---

### Musterlösung

Ausgabe: 04.05.2007

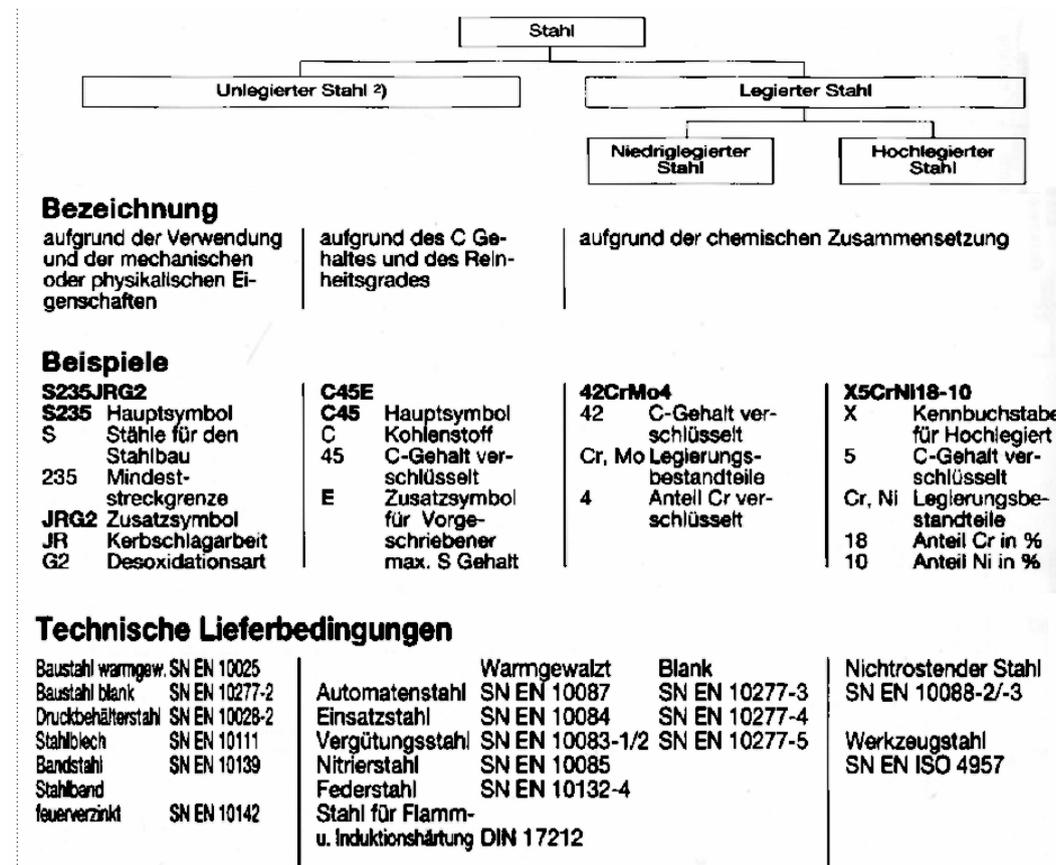
Abgabe: 10.05.2007

**Lernziele**

Werkstoffe und Fertigung II, Kap. 15, Kap. 16, Kap. 17, Kap. 20

**Kerninformationen**

**1. Einteilung der Stähle**



Summengruppe 1: Cr, Cu, Mo, Ni

Summengruppe 2: Nb, Ti, V, Zr

Ein Stahl, gilt auch als niedriglegiert, wenn die Summe der Gehalte der Elemente einer Gruppe mehr als 70% der Summe der Grenzwerte nach Tabelle 15.1 ausmacht, auch wenn alle Einzelgrenzwerte unterschritten bleiben.

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 %
Al Aluminium	0,30
B Bor	0,000 8
Bi Bismut	0,10
Co Cobalt	0,30
Cr Chrom	0,30
Cu Kupfer	0,40
La Lanthanide (einzeln gewertet)	0,10
Mn Mangan	1,65 <sup>a</sup>
Mo Molybdän	0,08
Nb Niob	0,06
Ni Nickel	0,30
Pb Blei	0,40
Se Selen	0,10
Si Silicium	0,60
Te Tellur	0,10
Ti Titan	0,05
V Vanadium	0,10
W Wolfram	0,30
Zr Zirconium	0,05
Sonstige (mit Ausnahme von Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Stickstoff) (jeweils)	0,10

<sup>a</sup> Falls für Mangan nur ein Höchstwert festgelegt ist, ist der Grenzwert 1,80 % und die 70 %-Regel (siehe 3.1.2) gilt nicht.

3.

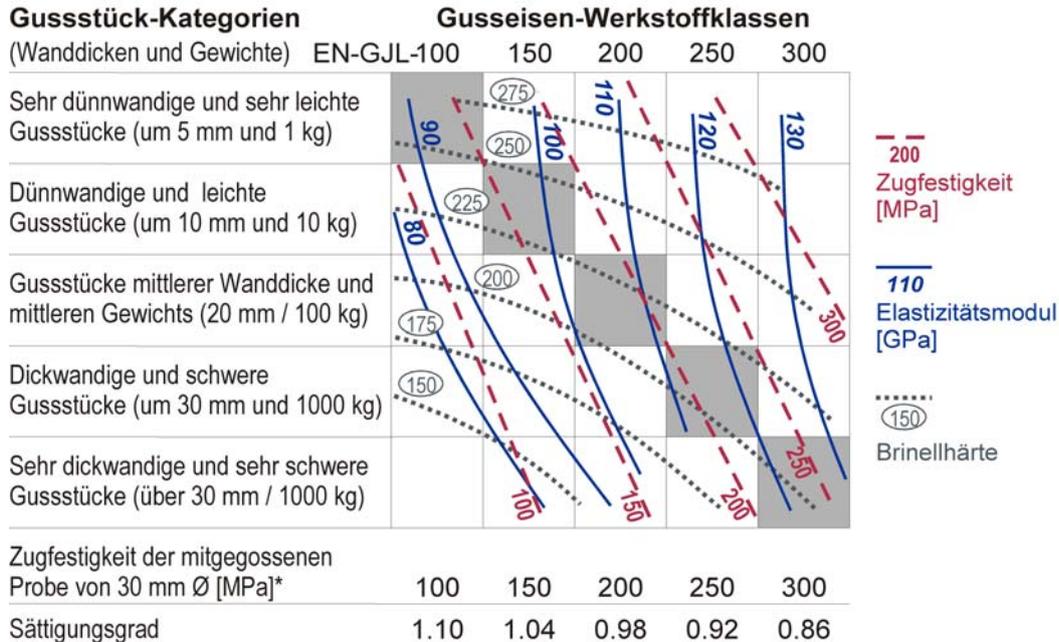
## 2. Wirkung von Legierungselementen bei Stählen [Meier]

+ Erhöhung - Verminderung ohne Einfluss	Legierungselemente										
	Cr	Ni	Al	W	V	Co	Mo	Si	Mn	S	P
Warmumformbarkeit	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	
Kaltumformbarkeit		+		-		-	-	-	-	-	-
Zerspanbarkeit		-		-		-	-	-	+	+	
Warmfestigkeit	+	+		+	+	+	+	+			
Korrosionsbeständigkeit	+	+			+					-	
Härtetemperatur	+	+	+	+	+	+	+	+	-		
Härtbarkeit, Vergütbarkeit	+	+		+	+	+	+	+	+		
Nitrierbarkeit	+		+	+	+		+	-	+		
Schweisbarkeit	-	-	+		+		-		-	-	-
Zugfestigkeit	+	+		+	+	+	+	+	+		+
Streckgrenze	+	+		+	+	+	+	+	+		+
Kerbschlagzähigkeit	-	+	-		+	-	+	-		-	-
Verschleissfestigkeit	+	-		+	+	+	+	-	-		

### 3. Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffe

Gusseisen-Werkstoffe haben Kohlenstoffgehalte oberhalb 2%. Dem Vorteil von tiefer Schmelztemperatur und guter Vergießbarkeit sowie kleiner Schwindung steht der Nachteil der Sprödigkeit bzw. reduzierten Zugfestigkeit durch den hohen Kohlenstoffgehalt gegenüber. Durch gezielte Massnahmen (Legierungszusammensetzung, Wärmebehandlungen) werden diese Negativeinflüsse möglichst vermindert.

Collaud-Diagramm: Zugfestigkeit, E-Modul und Härte für verschiedene Gusseisen-Werkstoffklassen in Abhängigkeit von der Wandstärke. Die Werkstoffe sind u.a. charakterisiert durch die Zugfestigkeit, die an einer Probe ermittelt wurden.



\* entspricht einer massgebenden Wandstärke von 15 mm

#### 4 Bezeichnungssystematik der Aluminiumwerkstoffe nach EN 573-1:

Nach chemischer Zusammensetzung, numerisch verschlüsselt:



Ziffernschlüssel 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, ...)	

#### 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

#### 5 Wärmeausdehnung

Die temperaturabhängige Längenzunahme beträgt:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

$\alpha$  linearer Ausdehnungskoeffizient

$l_0$  Ausgangslänge

$\Delta T$  Temperaturänderung [K oder °C]

# 1 Stahlbezeichnungen

---

Erklären Sie die Stahlbezeichnungen: .... Lösung

a) S355J2G3

S: Stahl für den Stahlbau

355: Mindeststreckgrenze = 355 N/mm<sup>2</sup>

J2: Übergangstemperatur -20°C, Kerbschlagarbeit = 27 J bei dieser Temperatur.

G3: stark beruhigt.

b) C45

C: Unlegierter Stahl, Edelstahl

Stahl für Wärmebehandlung, Vergütungsstahl

45: 15/100 = 0.45% C

c) 17CrNiMo6

Niedriglegierter Stahl, Einsatzstahl

17/100= 0.17%C Kohlenstoff, 6/4 = 1.5% Chrom; Weitere wesentliche Legierungselemente:

Nickel, Molybdän, ohne Mengenangabe.

d) 42CrMo4

Niedriglegierter Stahl, Vergütungsstahl

42/100= 0.42%C Kohlenstoff, 4/4 = 1% Cr Chrom; Weiteres wesentliches Legierungselement:

Molybdän, ohne Mengenangabe.

e) 34CrAl6

Niedriglegierter Stahl, Nitrierstahl

34/100 = 0.34% C, 6/4=1.5% Cr; Aluminium als Nitridbildner, ohne Mengenangabe.

f) 10S Pb20

Niedriglegierter Stahl, Automatenstahl

10/100=0.1% Kohlenstoff C; 20/100=0.2 % Schwefel S für kurzbrechende Späne; Blei zum Schmieren der Werkzeuge.

g) X12CrNiWTi16-13

Hochlegierter Stahl, Warmfester Stahl

12/100=0.12% C; 16% Cr; 13% Ni. Wolfram und Titan ohne Mengenangabe.

h) S2-10-1-8

Schnellarbeitsstahl. Für Werkzeuge zum Spanen. Schneidhaltig bei hoher Temperatur.

2% W Wolfram; 10% Mo Molybdän; 1% V Vanadium; 8% Co Kobalt.(plus C, Cr)

## 2 Kornfeiner bei Stahl

---

Erklären Sie die Wirkung von Kornfeinern in Stahl (V, Ti, Nb, Al)

*Lösung*

- *V, Ti, Nb bilden Karbonitride, Al Aluminium-Nitrid, diese wirken als Kristallisationskeime, bei der Phasenumwandlung führen sie zur Bildung von feinem Korn.*
- *Kornfeiner können auch Teilchenhärtung bewirken innerhalb der Kristallite.*

## 3 Stahlguss

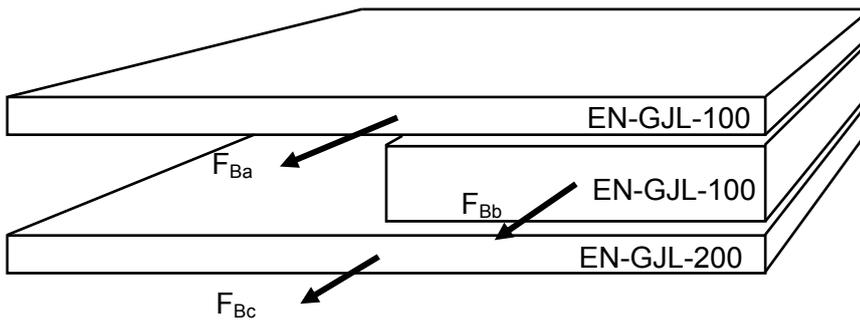
---

- a) Wann spricht man von Stahlguss?
- b) Was sind die erwünschten Eigenschaften von Stahlguss?
- c) Was sind die unerwünschten Eigenschaften von Stahlguss?

*Lösung*

- a) *Kohlenstoffgehalt < 2%*
- b) *- hohe Festigkeit  
- Zähigkeit  
- Schweissbarkeit*
- c) *- Hohe Schwindung, ca 2%,  
- Gefahr von Rissen und Lunkern  
- Hohe Vergusstemperatur*

## 4 Gusseisen



### Lösung

- a) Bei welcher Zugkraft bricht eine Gusseisenplatte aus EN-GJL-100 mit dem Querschnitt 10mm x 200mm?

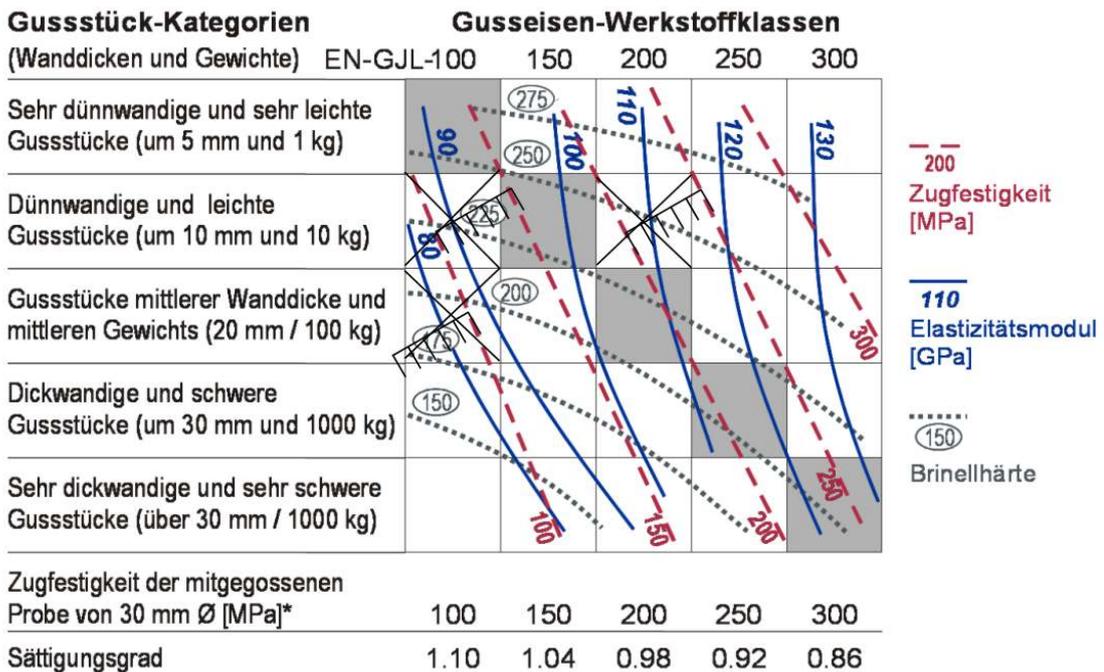
Zugfestigkeit:  $R_m = 110\text{MPa}$ . Bruchkraft  $F_B = R_m \cdot A = 110 \cdot 2000 \text{ mm}^2 = \mathbf{220 \text{ kN}}$

- b) Bei welcher Zugkraft bricht eine Gusseisenplatte aus EN-GJL-100 mit dem Querschnitt 20mm x 100mm?

Zugfestigkeit:  $R_m = 90\text{MPa}$ . Bruchkraft  $F_B = R_m \cdot A = 90 \cdot 2000 \text{ mm}^2 = \mathbf{180 \text{ kN}}$

- c) Bei welcher Zugkraft bricht eine Gusseisenplatte aus EN-GJL-200 mit dem Querschnitt 10mm x 200mm?

Zugfestigkeit:  $R_m = 212\text{MPa}$ . Bruchkraft  $F_B = R_m \cdot A = 212 \cdot 2000 \text{ mm}^2 = \mathbf{424 \text{ kN}}$



\* entspricht einer massgebenden Wandstärke von 15 mm

## 5 Festigkeit von Grauguss

---

- a) Stimmt die Aussage, dass Grauguss mit lamellenförmigem Graphit (GJL) die niedrigere Zugfestigkeit hat als Grauguss mit Kugelgraphit (GJS)? Begründen Sie!

- Ja, wenn die Matrix (der Eisengrundwerkstoff, in welchen der Graphit eingebettet ist, Ferrit, Perlit, Bainit) vom GJL nicht eine wesentlich höhere Festigkeit hat als jene vom GJS. Graphit hat auf Zug und auf Schub keine hohe Festigkeit. Auf Druck übernehmen die Graphiteinschlüsse einen Teil der Last. Lamellen stellen grossflächigere Störungen dar als Kugeln.

- b) Wie steht es mit der Druckfestigkeit?

- Analog: Druckfestigkeit von GJL ist schlechter als die von GJS, wenn die Matrix vom GJL nicht wesentlich besser ist als vom GJS.

- c) Was bedeuten die Bezeichnungen EN-GJL-200 und EN-GJS-200?

- Zwei Graugusswerkstoffe mit Lamellen- und Kugelgraphit, aber gleich grosser Zugfestigkeit: 200 N/mm<sup>2</sup>. D.h. EN-GJL-200 hat eine Matrix mit höherer Festigkeit.

- d) Wie verhalten sich die Druckfestigkeiten der obigen Werkstoffe?

$$\frac{\text{Druckfestigkeit}_{\text{Lamell}} |\sigma_{dBL}|}{3} = \text{Zugfestigkeit}_{\text{Lamell}} \sigma_{zBL} = \text{Zugfestigkeit}_{\text{Kugel}} \sigma_{zBS} = \frac{\text{Druckfestigkeit}_{\text{Kugel}} |\sigma_{dBS}|}{1.5 \dots 2}$$

$$\frac{\text{Druckfestigkeit}_{\text{Lamell}} |\sigma_{dBL}|}{\text{Druckfestigkeit}_{\text{Kugel}} |\sigma_{dBS}|} = \frac{3}{1.5 \dots 2} = 1.5 \dots 2$$

## 6 Sphäroguss, Temperguss

- Was ist der Unterschied zwischen Sphäroguss und schwarzem Temperguss
- Tragen Sie im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm die Bereiche ein, in welchen
  - durch das Tempern weisser Temperguss entsteht.
  - durch das Tempern schwarzer Temperguss entsteht.
- Wie erstarrt schwarzer Temperguss, schwarz oder weiss?  
Was passiert dabei?

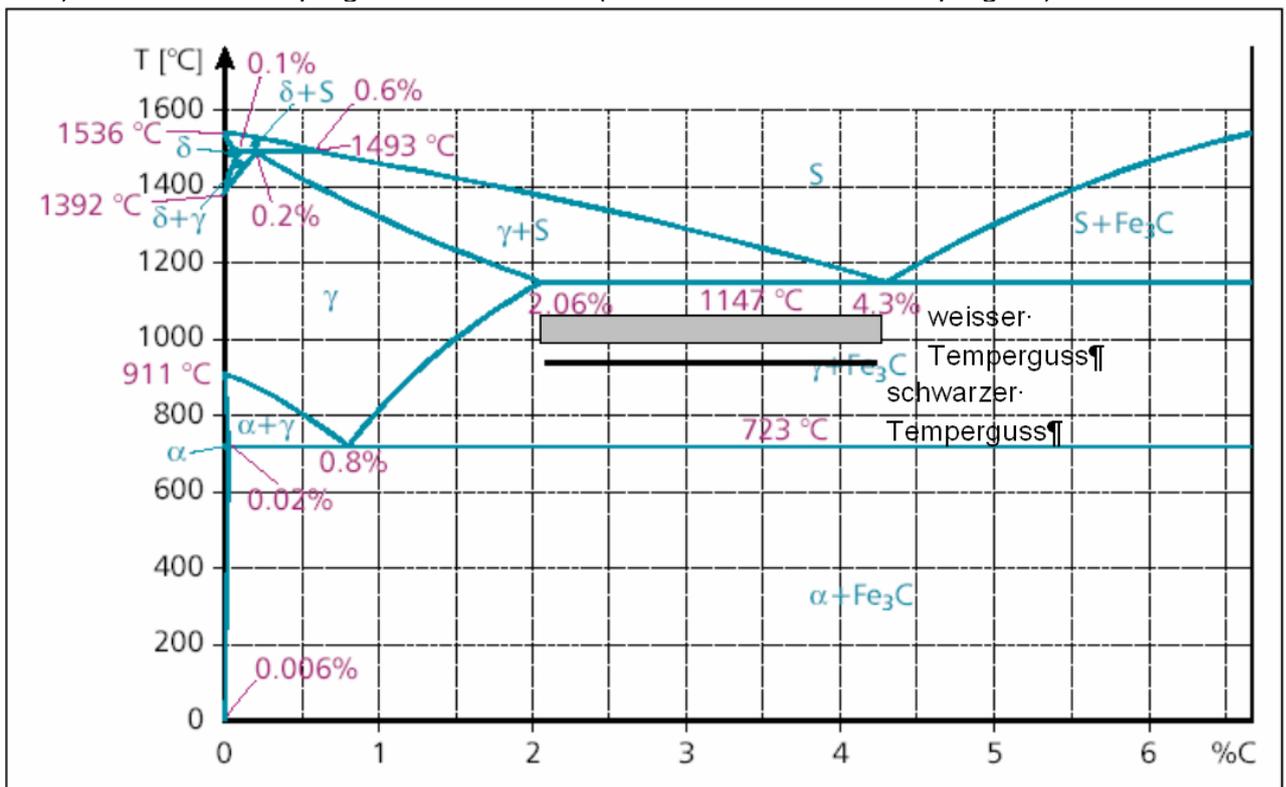
### Lösung

a)

- Beim Sphäroguss entstehen kugelförmige Graphitausscheidungen unmittelbar bei der Erstarrung aus der Schmelze, weil durch Zugabe von Mg oder Ce Fremdkerne eingebracht werden und die Grenzflächenenergie Graphit-Eisen erhöht wird.
- Temperguss entsteht durch eine Wärmebehandlung aus weiss erstarrtem Gusseisen (metastabil, ledeburitisch,  $\text{Fe}_3\text{C}$  statt Graphit.): Bei Abkühlung der Schmelze entstehen Primäraustenit  $\gamma_{pr}$  sowie Eutektikum (Ledeburit I), bestehend aus Austenit  $\gamma_e$  und Zementit  $\text{Fe}_3\text{C}_e$ . Der Austenit scheidet bei weiterer Abkühlung  $\text{Fe}_3\text{C}_{sek}$  aus und wandelt sich dann eutektoid in Perlit um. Dies ist weiss erstarrtes Gusseisen. Durch das Tempern wandelt sich das  $\text{Fe}_3\text{C}$  in Graphit um, welcher sich zu Kohlenstoffnestern zusammenballt. Das ist der schwarze Temperguss, der ähnliche Eigenschaften hat wie der Sphäroguss (duktil, nicht schweisssbar). Wird der Temperprozess in oxidierender Atmosphäre durchgeführt, verbrennt der vom Inneren ausdiffundierende Kohlenstoff an der Oberfläche: Weisser Temperguss, schweisssbar.

- b) Erzeugung von weissem Temperguss: Glühen bei 980-1060°C (z.B. 60-120 h je nach Wandstärke des Bauteiles oder gewünschter Wirkungstiefe). Erzeugung von schwarzem Temperguss: Glühbehandlung in nicht oxidierender Atmosphäre bei 950°C (z.B. 20 h)

- c) Schwarzer Temperguss erstarrt weiss (wie auch der weisse Temperguss).



## 7 Bezeichnungssystematik von Aluminiumlegierungen

a) Wie unterscheiden sich diese drei Werkstoffe:

- EN AW-6061A
- EN AW-6061A [Al Mg1SiCu(A)]
- EN AW-Al Mg1SiCu(A)

*Lösung*

- EN AW-6061A (Numerischer Schlüssel nach EN 573-1)
- EN AW-6061A [Al Mg1SiCu(A)] (EN 573-2: Bezeichnung nach chemischen Gehalten als Ergänzung zum numerischen Schlüssel nach EN 573-1)
- EN AW-Al Mg1SiCu(A) (EN 573-2: Bezeichnung nach chemischen Gehalten)

*Es handelt sich um den gleichen Werkstoff. (Auch die Bezeichnung nach chemischen Gehalten ist ein Name, der die Zusammensetzung des Werkstoffes nicht vollständig angibt.)*

b) Geben Sie für den Werkstoff EN AW-Al Mg3Mn H24 die Bezeichnung nach numerischem Schlüssel an.

*Lösung*

EN AW-5454 H24

Hauptlegierungselement ist Mg Magnesium: 5xyz, (xyz aus Liste: 454)

H24: H: Härte; 2: Kaltverfestigt und rückgeglüht. 4:  $4/8 = 1/2$  hart

c) Geben Sie die Bezeichnung an nach numerischem Schlüssel (EN 573-1) für Aluminium-Walzprofile mit dem Hauptlegierungselement Mn und dem Zustand  $1/4$ -hart durch 9% Kaltumformung

*Lösung*

EN AW-3iii H12 z.B. EN AW-3103 H12 (103 frei erfunden)

Zifferschlüssel nach EN 573-1		
3xyz	Hauptlegierungselement Mangan	3000 Serie
4xyz	Hauptlegierungselement Silizium	4000 Serie
5xyz	Hauptlegierungselement Magnesium	5000 Serie
6xyz	Hauptlegierungselement Magnesium und Silizium	6000 Serie

Erzeugnisform für Bezeichnung nach EN 573-1		
W	Halbzeuge (gewalzt, geschmiedet, ...)	

## 8 Plus-Minus-Regel bei Aluminiumlegierungen

- a) Was sagt die Plus-Minus-Regel aus?  
 b) Bilden Sie Paare der Elemente Cu, Mg, Li, Sn, Zn, dass sie als Legierungselemente der Plus-Minus-Regel genügen.

### Lösung

a) Die Plusminusregel besagt, dass bevorzugt solche Legierungen aufhärtende Ausscheidungen bilden, bei welchen der Atomradius eines der Legierungselemente grösser, der andere kleiner ist als der Atomradius von Aluminium. Dadurch wird die Überstrukturbildung gefördert, d.h. die Legierungsatome sind abwechselnd gleichmässig verteilt, der Burgersvektor wird doppelt so gross.

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

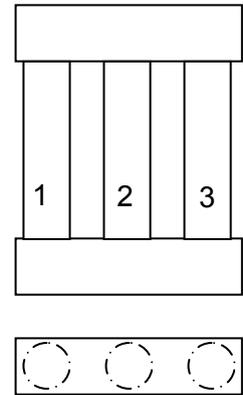
- b) Der Plus-Minus-Regel genügende Paare von Legierungselementen:  
 Si-Li, Si-Mg, Cu-Li, Cu-Mg, Zn-Li, Zn-Mg

## 9 Thermische Spannungen

Drei Stäbe sind zwischen zwei je als starr angenommenen Jochen eingespannt. Bei  $\vartheta = 20\text{ °C}$  sind sie spannungsfrei. Nun wird die Konstruktion auf  $90\text{ °C}$  aufgeheizt.

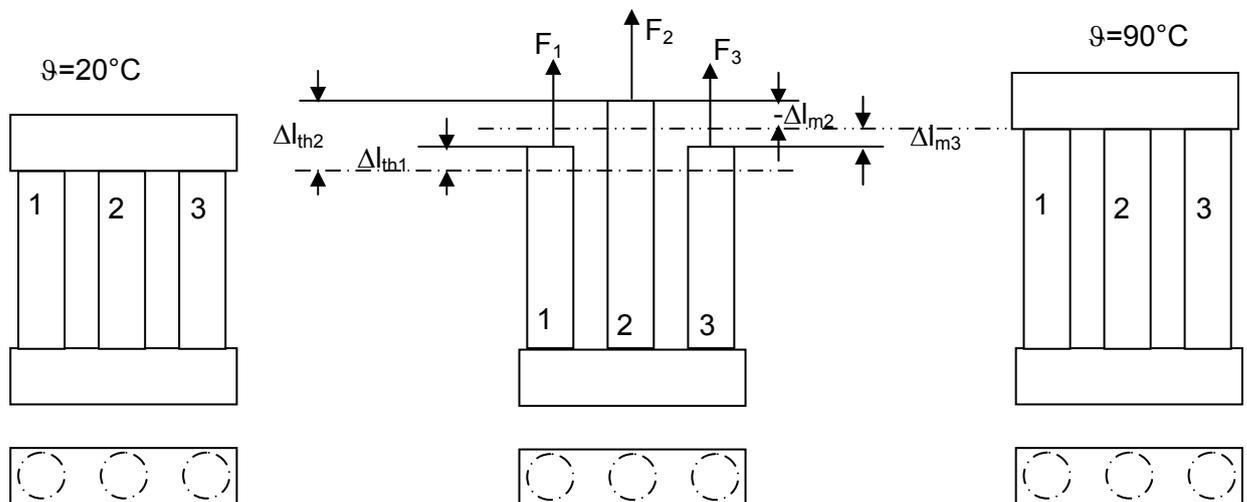
- Wie gross wären die thermischen Dehnungen der unbehinderten Stäbe?
- Welche Längsspannungen treten in den eingespannten Stäben auf?
- Wie gross sind die aus den Spannungen resultierenden mechanischen Dehnungen?

Stab-Nr.	1 und 3	2
Material	Stahl	Aluminium-Legierung
Durchmesser $d$ [mm]	50	50
Länge $l_0$ [mm]	500	500
Elastizitätsmodul $E$ [ $10^3\text{ N/mm}^2$ ]	210	65
Elastizitätsgrenze $R_{p0.2}$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	420	165
Therm. lin. Ausdehnungskoeffizient $\alpha$ [ $10^{-6}\text{ °C}^{-1}$ ]	11.7	23.8



### Lösung

Ohne Joch würden sich die Stäbe unter der Erwärmung frei dehnen. Durch die Wirkung der Joche werden sie auf eine gemeinsame Länge gedehnt bzw. gestaucht. Durch die symmetrische Anordnung wird ein Verbiegen der Stäbe vermieden.



### a) Thermische Dehnungen der unbehinderten Stäbe

$$\varepsilon_{1th} = \varepsilon_{3th} = \frac{\Delta l_{1th}}{l_0} = \alpha_1 \cdot \Delta\vartheta = 11.7 \cdot 10^{-6} (\text{°C}^{-1}) \cdot (90 - 20) (\text{°C}) = 0.000819$$

$$\varepsilon_{2th} = \frac{\Delta l_{2th}}{l_0} = \alpha_2 \cdot \Delta\vartheta = 23.8 \cdot 10^{-6} (\text{°C}^{-1}) \cdot (90 - 20) (\text{°C}) = 0.00167$$

### b) Längsspannungen in den eingespannten Stäben

Längendifferenz aus thermischer Dehnung:

$$\Delta l_{2th} - \Delta l_{1th} = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot l_0 \cdot \Delta\vartheta = (23.8 - 11.7) \cdot 10^{-6} (\text{°C}^{-1}) \cdot 500 \text{ mm} \cdot (90 - 20) (\text{°C}) = 0.4235 \text{ mm}$$

**Bedingung für die mechanische Dehnung/Stauchung:**

$$\Delta l_{1m} - \Delta l_{2m} = \Delta l_{2th} - \Delta l_{1th}$$

**Kräftegleichgewicht:**  $F_1 + F_2 + F_3 = 0$  Mit  $F_3 = F_1$  folgt:  $F_2 = -2 \cdot F_1$

$$\Delta l_{1m} - \Delta l_{2m} = \frac{F_1}{A_1} \cdot \frac{l_0}{E_1} - \frac{F_2}{A_2} \cdot \frac{l_0}{E_2} = F_1 \cdot \left( \frac{l_0}{A_1 \cdot E_1} + \frac{2 \cdot l_0}{A_2 \cdot E_2} \right) = \Delta l_{2th} - \Delta l_{1th}$$

$$F_1 = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \cdot l_0 \cdot \Delta \vartheta}{\left( \frac{l_0}{A_1 \cdot E_1} + \frac{2 \cdot l_0}{A_2 \cdot E_2} \right)} = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \Delta \vartheta}{\frac{1}{A} \cdot \left( \frac{1}{E_1} + \frac{2}{E_2} \right)} = \frac{(23.8 - 11.7) \cdot 10^{-6} (\text{°C}^{-1}) \cdot (90 - 20) (\text{°C})}{\frac{4}{50^2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{210 \cdot 10^3} + \frac{2}{65 \cdot 10^3} \right) \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}^2 \cdot \text{N}}} = 46.79 \text{ kN}$$

**Spannungen**

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \frac{F_1}{A} = \frac{46.79 \text{ kN}}{1963 \text{ mm}^2} = 23.83 \text{ N/mm}^2 < 420 \text{ N/mm}^2 = R_{p0.2}$$

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{A} = -\frac{2 \cdot F_1}{A} = -2 \cdot \sigma_1 = -47.66 \text{ N/mm}^2; 47.66 \text{ N/mm}^2 < 165 \text{ N/mm}^2 = R_{p0.2}$$

**c) Dehnungen aufgrund der Spannungen:**

$$\epsilon_{1m} = \epsilon_{3m} = \frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{23.83 \text{ N/mm}^2}{210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2} = 0.0001135 = 0.01135\%$$

$$\epsilon_{2m} = \frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{-47.66 \text{ N/mm}^2}{65 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2} = -0.0007332 = -0.07332\%$$

**Ergänzung: Überprüfung Knickkraft für Stab 2**

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_K^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \pi \cdot \frac{d^4}{64}}{(0.5 \cdot l_2)^2} = \frac{\pi^3 \cdot 65000 \text{ N/mm}^2 \cdot 50^4 \text{ mm}^4}{62500 \text{ mm}^2 \cdot 64} = 3.15 \cdot 10^6 \text{ N} > 0.477 \cdot 10^6 \text{ N} = |F_2|$$

**Der Stab knickt nicht aus.**