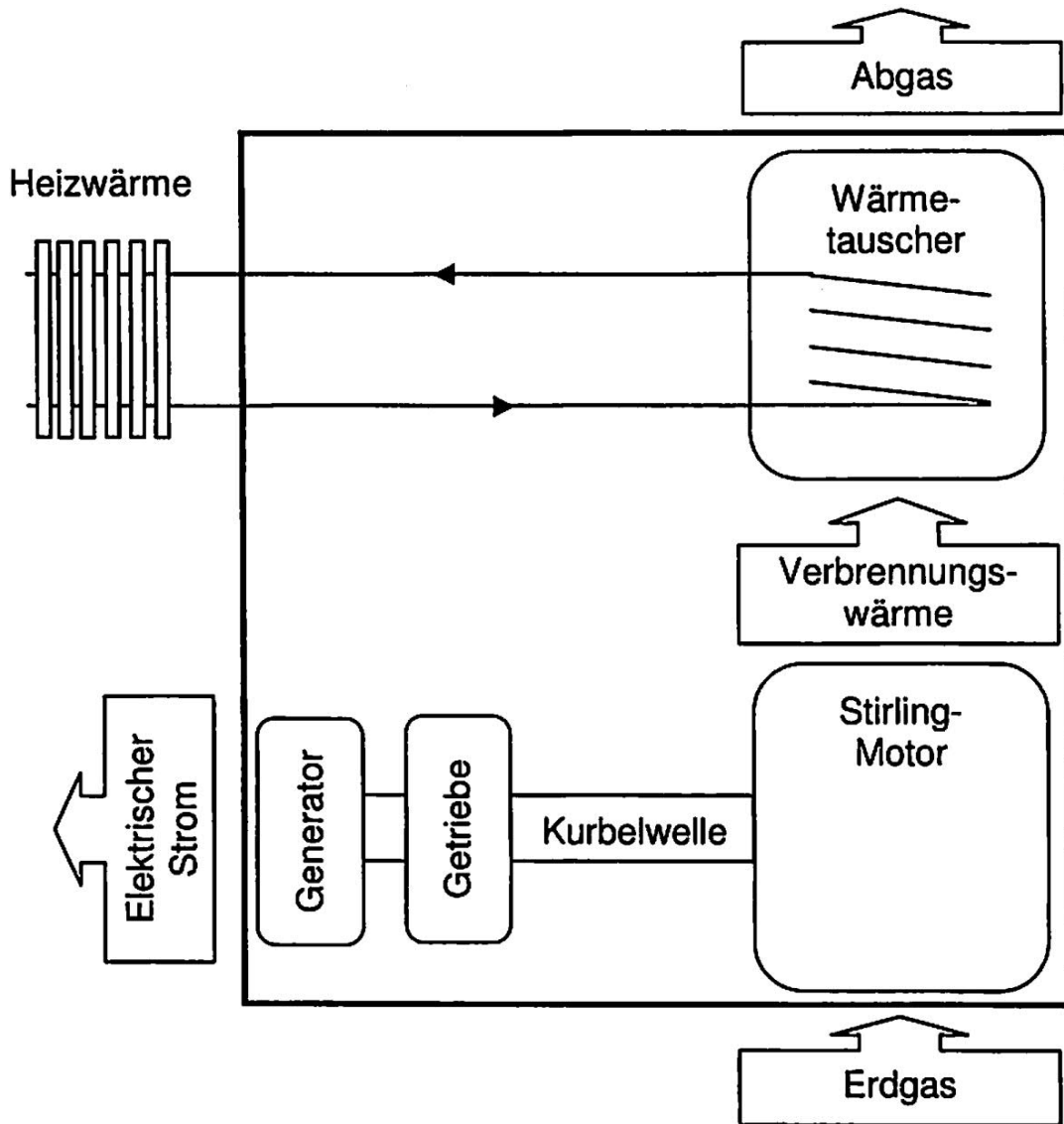




tgt HP 2012/13-1: Mikro-Blockheizkraftwerk

Die Versuchsanlage eines Mikro-Blockheizkraftwerkes soll ein modernes Einfamilienhaus mit Heizwärme und elektrischem Strom versorgen.

Anlagenschema:



Brennstoff:

Erdgas: $H_U = 35 \text{ MJ/m}^3$
 Verbrauch: $\dot{V} = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$
 min^{-1}

Wirkungsgrade:

bar
 Generator: $\eta_G = 94\%$
 Getriebe: $\eta_{GT} = 97\%$
 Wärmetauscher: $\eta_{WT} = 95\%$

Motordaten:

Arbeitsgas: Stickstoff
 Nenndrehzahl: $n = 1500$
 Verdichtungsverhältnis: $\epsilon = 3$
 Maximaldruck: $p_{\text{max}} = 22$
 Zylinderanzahl: $z = 4$

Energiebedarf eines Einfamilienhauses im Jahresdurchschnitt:

Strom: 4000 kWh Heizwärme 22000 kWh

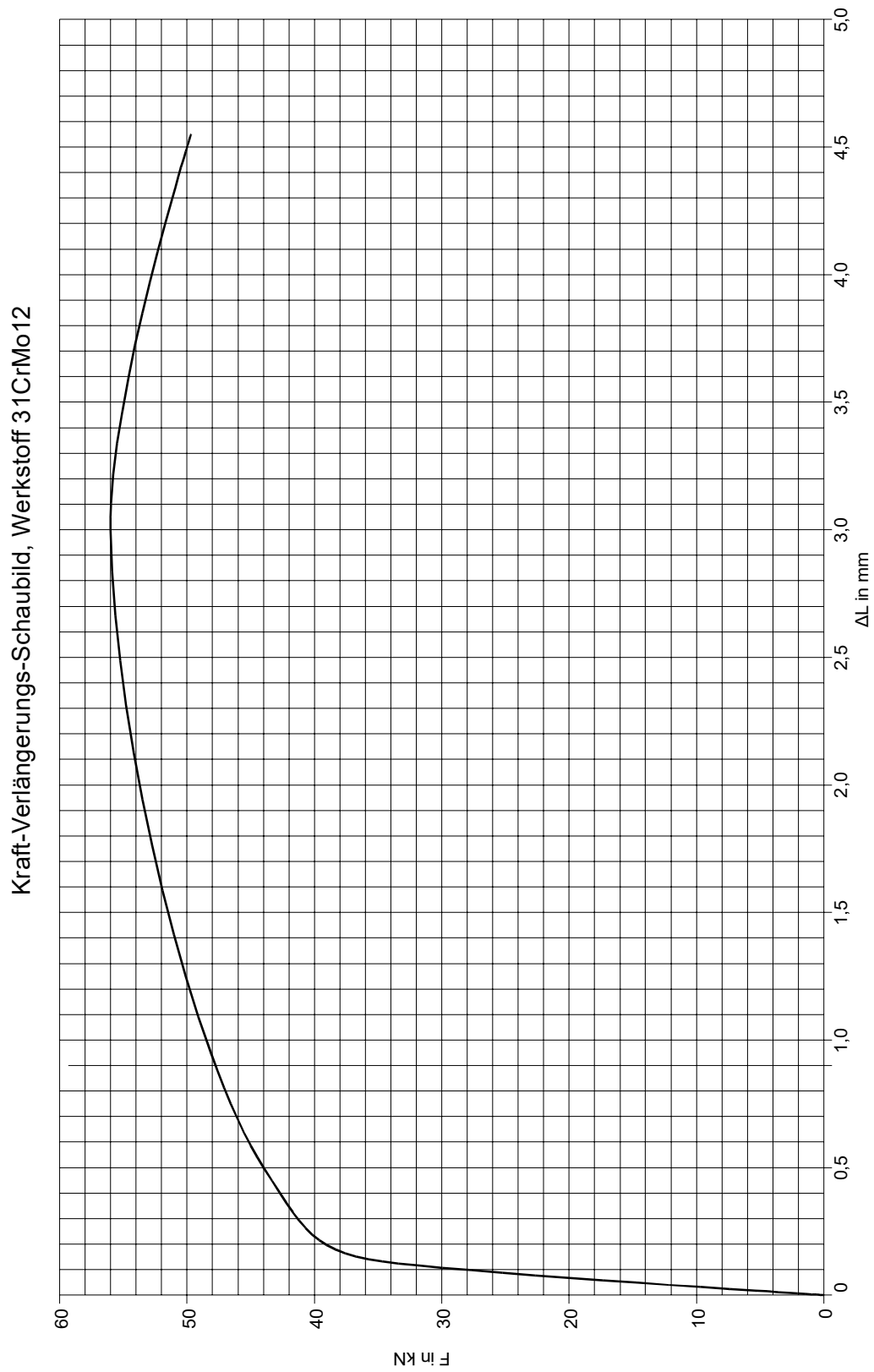


Teilaufgaben:		Punkte
1	Nennen Sie zwei Gründe für den Einsatz eines Stirlingmotors als Wärme-Kraft-Maschine eines Mikro-Blockheizkraftwerkes.	2,0
2	Skizzieren Sie den Vergleichsprozess des Stirlingmotors in ein p,V-Diagramm und kennzeichnen Sie die zu- bzw. abgeführten Wärmen und Arbeiten.	3,0
3	Durch Versuchsmessungen wurden die Zustandsdaten in einem Zylinder vor der Kompression im unteren Totpunkt ermittelt. Druck $p_1 = 5 \text{ bar}$ Volumen $V_1 = 0,0375 \text{ l}$ Temperatur $\vartheta_1 = 50^\circ\text{C}$	
3.1	Bestimmen Sie alle fehlenden Zustandsgrößen und stellen Sie diese in einer Tabelle dar.	5,0
3.2	Ermitteln Sie die Nutzarbeit und den thermischen Wirkungsgrad eines Zylinders. Berücksichtigen Sie hierzu nur die von außen zugeführte Wärme bei der Expansion.	4,0
3.3	Analysieren Sie, inwieweit sich die Zustandsgrößen, die Nutzarbeit und der thermische Wirkungsgrad von einem Zylinder auf den ganzen Motor übertragen lassen.	2,0
4	Messungen ergaben für den gesamten Stirlingmotor eine Nutzarbeit je Zyklus von $ W_{\text{nutz}} = 34 \text{ J}$ bei Nenndrehzahl.	
4.1	Ermitteln Sie die erforderlichen Betriebsstunden des Stirlingmotors in Stunden pro Jahr, um den durchschnittlichen Jahresstrombedarf des Einfamilienhauses abzudecken.	4,0
4.2	Überprüfen Sie, ob mit der ermittelten Laufzeit die Wärmeversorgung des Einfamilienhauses sichergestellt wird, wenn 80 % der eingesetzten Primärenergie (Erdgas) zur Wärmeerzeugung genutzt werden.	4,0
5	Der Kolben des Stirlingmotors wird aus dem Werkstoff 31CrMo12 gefertigt. Zur Überprüfung der Herstellerangaben wird ein Zugversuch mit kurzem Proportionalstab $d_0 = 8 \text{ mm}$ durchgeführt. Der Datenschreiber der Zugversuchsmaschine liefert das in dem Arbeitsblatt dargestellte Diagramm. Ermitteln Sie mit Hilfe des Diagramms die Zugfestigkeit R_m , die Dehngrenze $R_{p0,2}$, die Bruchdehnung A und den Elastizitätsmodul.	6,0
		$\Sigma=30,0$



Arbeitsblatt

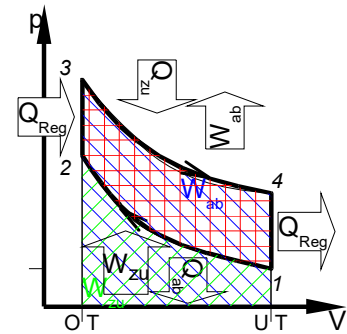
zu Ausgabe 5





Lösungsvorschläge

- 1 Vorteile von Stirling-Motoren sind: kontinuierliche Verbrennung, dadurch ruhiger Lauf und gute Abgaswerte möglich; beliebige Brennstoffe bzw. Wärmequellen möglich; hoher Wirkungsgrad, dadurch geringer Verbrauch
- 2 pV-Diagramm eines Stirlingmotors



3 Zylinder

Ergebnisse																Aufgabe: tgt HP 2012/13-1 Mikro-Blockheizkraft															
		1E+05	1E+06	1E+00	1E+00	1E+03	1E+00	1E+03	1E+00	1E+03	1E+03	1E+03	1E+03	1E+00	1E+00																
Zustand	Typ	p	V	T	ϑ	w	W	q	Q	m	cp	cv	Rs	χ	ε																
1	t	5,00	37,50	323,2	50,0					0,195	1,038	0,741	0,297	1,401																	
12	t					105	20,6	-105,4	-20,6		1,038	0,741	0,297	1,401	3,00																
2	c	15,00	12,50	323,2	50,0					0,195	1,038	0,741	0,297	1,401																	
23	c					0	0,0	111,7	21,8		1,038	0,741	0,297	1,401	1,00																
3	c	22,00	12,50	474,0	200,8					0,195	1,038	0,741	0,297	1,401																	
34	t					-155	-30,2	154,6	30,2		1,038	0,741	0,297	1,401	0,33																
4	c	7,33	37,50	474,0	200,8					0,195	1,038	0,741	0,297	1,401																	
41	c					0	0,0	-111,7	-21,8		1,038	0,741	0,297	1,401	1,00																
1	c	5,00	37,50	323,2	50,0					0,195	1,038	0,741	0,297	1,401																	
						ΣwNutz	ΣWnu	Σq	ΣQ							η _{therm}															
						-49	-9,6	49,2	9,6							0,32															
						Σwab	ΣWab	Σqab	ΣQab							η _{carnot}															
Lösungen für Kreisprozesse mit idealen Gasen (p,V-Diagramm)						-155	-30,2	-105,4	-20,6							0,32															
© www.ulrich-rapp.de						105	20,6	154,6	30,2																						

3.1 Zustandsänderung 1 – 2 (isotherm)

$$T_2 = T_1 = 323 \text{ K}$$

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

$$\Rightarrow p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = p_1 \cdot \epsilon = 5 \text{ bar} \cdot 3 = 15 \text{ bar}$$

Zustand	p [bar]	V [l]	T [K]
1	5,0	0,0375	323
2	15,0	0,0125	323
3	22,0	0,0125	473,7
4	7,33	0,0375	473,7

Zustandsänderung 2 – 3 (isochor)

$$V = \text{const} \Rightarrow V_3 = V_2 = 0,0125 \text{ l}$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \Rightarrow$$

$$T_3 = \frac{p_3}{p_2} \cdot T_2 = \frac{22 \text{ bar}}{15 \text{ bar}} \cdot 323 \text{ K} = 473,7 \text{ K}$$

Zustandsänderung 4 – 1 (isochor)

$$V_4 = V_1 = 0,0375 \text{ l}$$

Zustandsänderung 3 – 4 (isotherm)

$$T_4 = T_3 = 473,7 \text{ K}$$

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

$$\Rightarrow p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4} \right) = 22 \text{ bar} \cdot \left(\frac{0,0125 \text{ l}}{0,0375 \text{ l}} \right) = 7,33 \text{ bar}$$



- 3.2 Nutzarbeit W_{nutz} (für Wärmeaustausch mit dem Regenerator gilt: $Q_{23} + Q_{41} = 0$)

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \Rightarrow m_h = \frac{p_1 \cdot V_h}{R_i \cdot T_1} = \frac{5 \text{ bar} \cdot 0,0375 \text{ dm}^3}{297 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 323 \text{ K}} = 0,195 \text{ g};$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1038 \text{ J/kgK}}{741 \text{ J/kgK}} = 1,40$$

$$W_{\text{Nutz}} = \Sigma W = +W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} = +20,6 \text{ J} + 0 \text{ J} - 30,1 \text{ J} + 0 \text{ J} = -9,5 \text{ J}$$

$$W_{12} = -m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} = -0,195 \text{ g} \cdot 297 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 323 \text{ K} \cdot \ln \frac{1}{3} = +20,6 \text{ J}$$

$$W_{34} = -m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln \frac{V_4}{V_3} = -0,195 \text{ g} \cdot 297 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 473,7 \text{ K} \cdot \ln 3 = -30,1 \text{ J}$$

Thermischer Wirkungsgrad η

$$\eta_{\text{therm}} = \frac{|W_{\text{Nutz}}|}{Q_{\text{zu}}} = \frac{|W_{\text{Nutz}}|}{Q_{34}} = \frac{|W_{\text{Nutz}}|}{|W_{34}|} = \frac{9,5 \text{ J}}{30,1 \text{ J}} = 0,316$$

- 3.3 Druck, Temperatur und Wirkungsgrad addieren sich nicht (= intensive Zustandsgrößen). Sie bleiben für den Motor also genauso groß wie für einen Zylinder.

Volumen und die Masse des beteiligten Gases verändern sich mit der Anzahl der Zylinder (=extensive Zustandsgrößen) und damit auch die Nutzarbeit. Volumen und Nutzarbeit sind beim 4-Zylinder-Motor also viermal größer als bei einem Zylinder.

4 Motor

4.1
$$W_{\text{erf}} = \frac{W_{\text{el}}}{\eta_G \cdot \eta_{\text{GT}}} = \frac{4000 \text{ kWh}}{0,94 \cdot 0,97} = 4387 \text{ kWh}$$

Die Gleichung für den Zeitbedarf kann man sich herleiten, indem man darauf achtet, dass die Einheiten aufgehen:

$$W_{\text{erf}} [\text{kWh od. J}] = |W_{\text{nutz}}| \left[\frac{\text{J}}{\text{Umdr}} \right] \cdot n \left[\frac{\text{Umdr}}{\text{min}} \right] \cdot \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{h}} \right) \cdot t [\text{h}]$$

Den Umrechnungsfaktor 60min/h (= 1 !) kann man weglassen, also gilt:

$$t = \frac{W_{\text{erf}}}{|W_{\text{Nutz}}| \cdot n} = \frac{4387 \text{ kWh}}{34 \text{ J} \cdot \frac{1500}{\text{min}}} = \frac{4387 \text{ kWh}}{34 \text{ J} \cdot \frac{25}{\text{s}}} = \frac{4387 \text{ kWh}}{850 \text{ W}} = 5161 \text{ h}$$

- 4.2 Die Grundformel leite ich wieder mit der Einheitenmethode her:

$$W_{\text{Heiz}} [\text{kWh od. J}] = \dot{V} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \cdot t [\text{h}] \cdot H_U \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right]$$

In der Reinschrift dürfen die Wirkungsgrade nicht fehlen:

$$\begin{aligned} W_{\text{Heiz}} &= \dot{V} \cdot t \cdot H_U \cdot 80\% \cdot \eta_{\text{WT}} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 5161 \text{ h} \cdot 35 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \cdot 0,8 \cdot 0,95 \\ &= 137283 \text{ MJ} = 137283 \text{ MWh} \cdot \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} = 38134 \text{ kWh} \end{aligned}$$

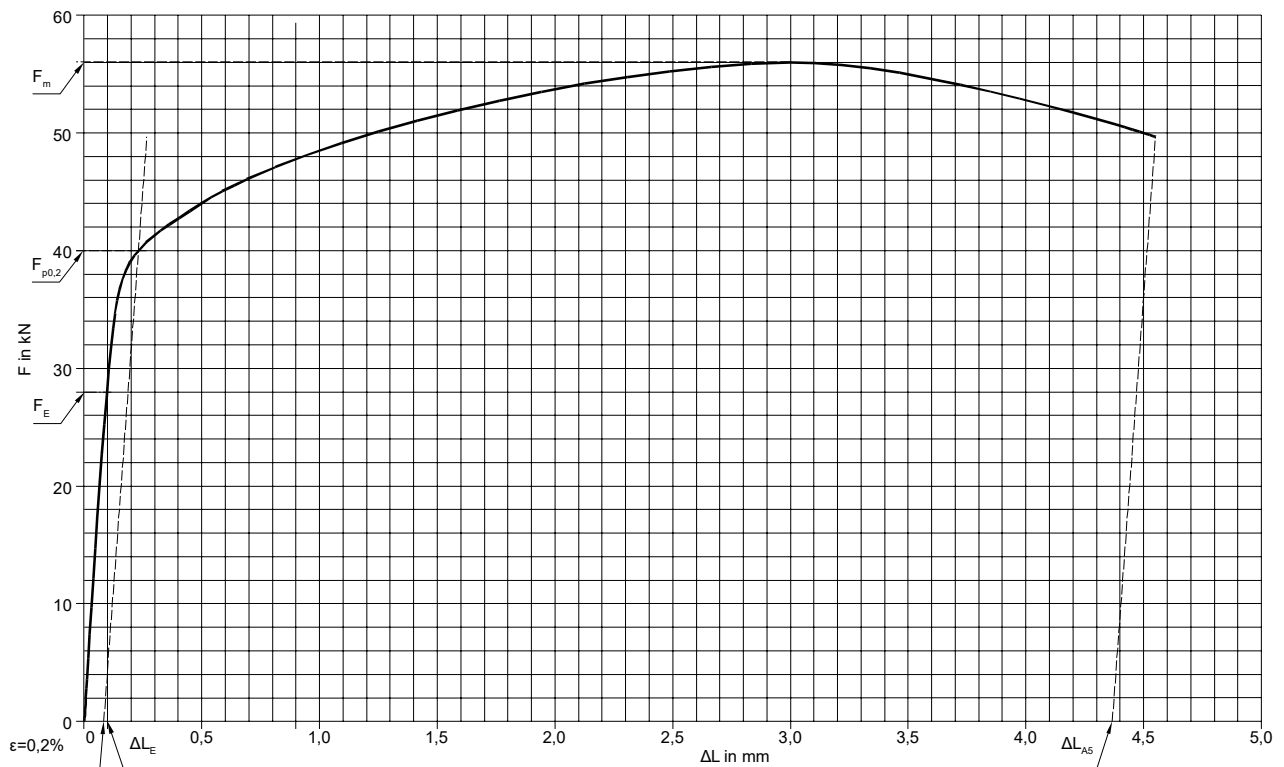
Damit wird der Jahreswärmebedarf von 22000 kWh überschritten. Ob das im Winter reicht, ist hier nicht gefragt.





5 Kraft-Verlängerungsdiagramm

Kraft-Verlängerungs-Schaubild, Werkstoff 31CrMo12



$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot (8 \text{ mm})^2}{4} = 50,3 \text{ mm}^2$$

$$L_0 = d_0 \cdot 5 = 8 \text{ mm} \cdot 5 = 40 \text{ mm} \quad (\text{Faktor 5 für kurzen Proportionalstab})$$

$$\Delta L_{0,2} = L_0 \cdot \epsilon = 40 \text{ mm} \cdot 0,2\% = 0,08 \text{ mm}$$

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{56 \text{ kN}}{50,3 \text{ mm}^2} = 1113 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} = \frac{40 \text{ kN}}{50,3 \text{ mm}^2} = 795 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$A_5 = \frac{\Delta L_{A5}}{L_0} = \frac{4,36 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} = 10,9\% \quad (\text{Index 5 für kurzen Proportionalstab})$$

Für die Berechnung von E wählt man ein beliebiges Wertepaar auf der Hookeschen Geraden. Es sollte weit oben liegen, damit sich Ablesefehler nicht so stark auswirken.

$$E = \frac{\sigma_E}{\epsilon_E} = \frac{\frac{F_E}{S_0}}{\frac{\Delta L_E}{L_0}} = \frac{F_E}{S_0} \cdot \frac{L_0}{\Delta L_E} = \frac{28 \text{ kN}}{50,3 \text{ mm}^2} \cdot \frac{40 \text{ mm}}{0,1 \text{ mm}} = 223 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$