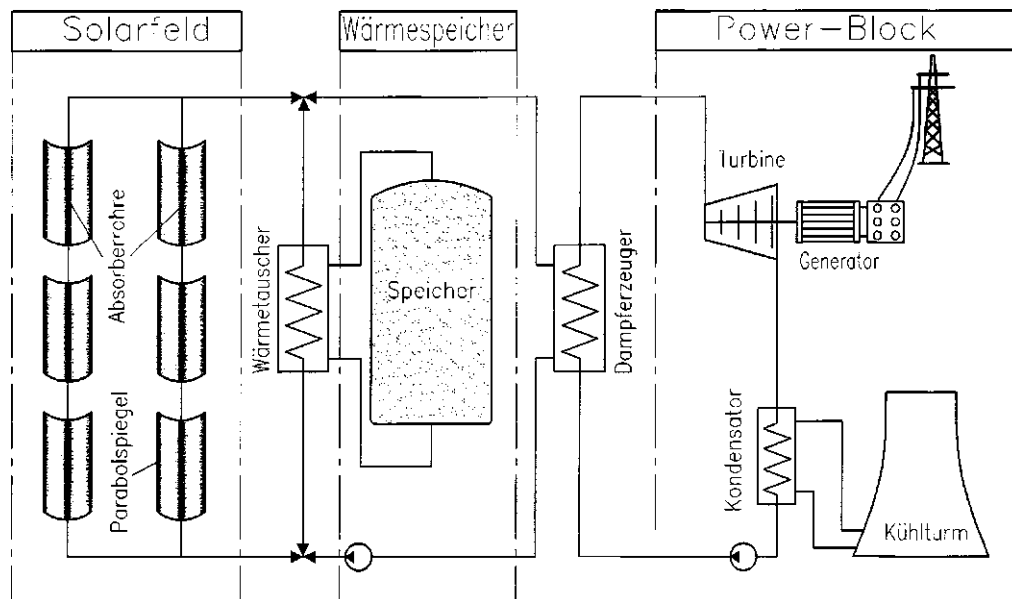


# HP 2010/11-5: Solarthermisches Kraftwerk

## HP 2010/11-5: Solarthermisches Kraftwerk

Das Kraftwerk besteht aus Solarfeld, Wärmespeicher und dem Power-Block. Im Solarfeld wird ein Wärmeträgeröl erhitzt und durch den Wärmetauscher des Dampferzeugers gepumpt. Der so erzeugte Dampf treibt die Turbine zur Stromgewinnung an.



### Teilaufgaben:

- |     |   | Punkte |
|-----|---|--------|
| 1   | Skizzieren Sie die Energiewandlungskette von der Sonne bis zum Verbraucher und benennen Sie die einzelnen Energieformen.  | 3,0    |
| 2   | Die vom Wärmeträgeröl durchströmten Absorberrohre unterliegen im Ganzjahresbetrieb starken Temperaturschwankungen. Sie werden aus einem speziellen Verbundwerkstoff aus Metall und Glas hergestellt.<br>Beurteilen Sie die hierfür maßgeblichen physikalisch-technischen Werkstoffeigenschaften des Verbundwerkstoffes.   | 2,5    |
| 3   | Im Dampferzeuger wird Wasser vom Zustand 1 ( $\vartheta_1 = 27^\circ\text{C}$ ; $p_1 = 100\text{ bar}$ ) isobar auf den Zustand ( $380^\circ\text{C}$ ; $100\text{ bar}$ ) gebracht. Der so erzeugte Dampf wird in der Turbine auf den Zustand ( $p_5 = 0,04\text{ bar}$ ; Wassergehalt 10%) entspannt. Anschließend wird der Nassdampf im Kondensator vollständig kondensiert. |        |
| 3.1 | Zeichnen Sie den Dampfprozess in das T,s - Diagramm ein und nummerieren Sie die Zustände (siehe Arbeitsblatt).  | 4,0    |
| 3.2 | Ermitteln Sie mit Hilfe des T,s-Diagramms die spezifische Nutzarbeit $W_{\text{Nutz}}$ .  | 4,0    |
| 3.3 | Warum darf der Wassergehalt am Turbinenausstritt 10 % nicht überschreiten?  | 1,0    |

# HP 2010/11-5: Solarthermisches Kraftwerk

- 4 Das Kraftwerk hat eine Leistung von 50 MW.
- 4.1 Bei klarem Himmel beträgt die Sonneneinstrahlung 2000 W/m<sup>2</sup>. 3,0  
Ermitteln Sie die erforderliche Spiegelfläche, wenn das Kraftwerk einen Gesamtwirkungsgrad von 20% hat.

- 4.2 Jeden Tag läuft das solarthermische Kraftwerk für einige Stunden im Speicherbetrieb. Hierbei wird die produzierte Wärme zum Erwärmen der Salzschnmelze im Speicher verwendet. 3,0

Daten:

Wärmekapazität des Salzes	$c_{\text{Salz}} =$	1,55 kJ/kgK
Dauer des Speicherbetriebs	$t =$	7,5 h
Wirkungsgrad im Speicherbetrieb	$\eta_{\text{Nacht}} =$	0,335
Speicheranfangstemperatur	$\vartheta_a =$	292 °C
Speicherendtemperatur	$\vartheta_e =$	386 °C

Ermitteln Sie die erforderliche Masse der Salzschnmelze.

- 5 Die Turbinenlaufräder sollen aus einer Titan-Molybdän-Legierung hergestellt werden. Das Zustandsdiagramm dieser Legierung ist auf dem Arbeitsblatt abgebildet.
- 5.1 Unter welchen Bedingungen entstehen Legierungen des abgebildeten Zustandsdiagramms? 2,5
- 5.2 Benennen Sie im Zustandsdiagramm die Linien und Felder. 2,0
- 5.3 Zeichnen Sie die Abkühlungskurve einer Legierung mit 80% Titan (Arbeitsblatt) und benennen Sie die wichtigen Punkte und Bereiche. 2,0
- 6 Aus dem Werkstoff der Turbinenlaufräder wird ein kurzer Proportionalstab mit 8 mm Durchmesser hergestellt. Der durchgeführte Zugversuch liefert folgende Ergebnisse: 3,0

$$F_{\text{max}} = 65 \text{ kN}$$

$$\text{Länge der Probe nach dem Bruch} = 45 \text{ mm}$$

Für den Betrieb der Turbinenlaufräder ist eine Mindestzugfestigkeit von 1100 N/mm<sup>2</sup> bei einer Bruchdehnung von 12 % gefordert.

Beurteilen Sie, ob der verwendete Werkstoff diesen Anforderungen genügt.

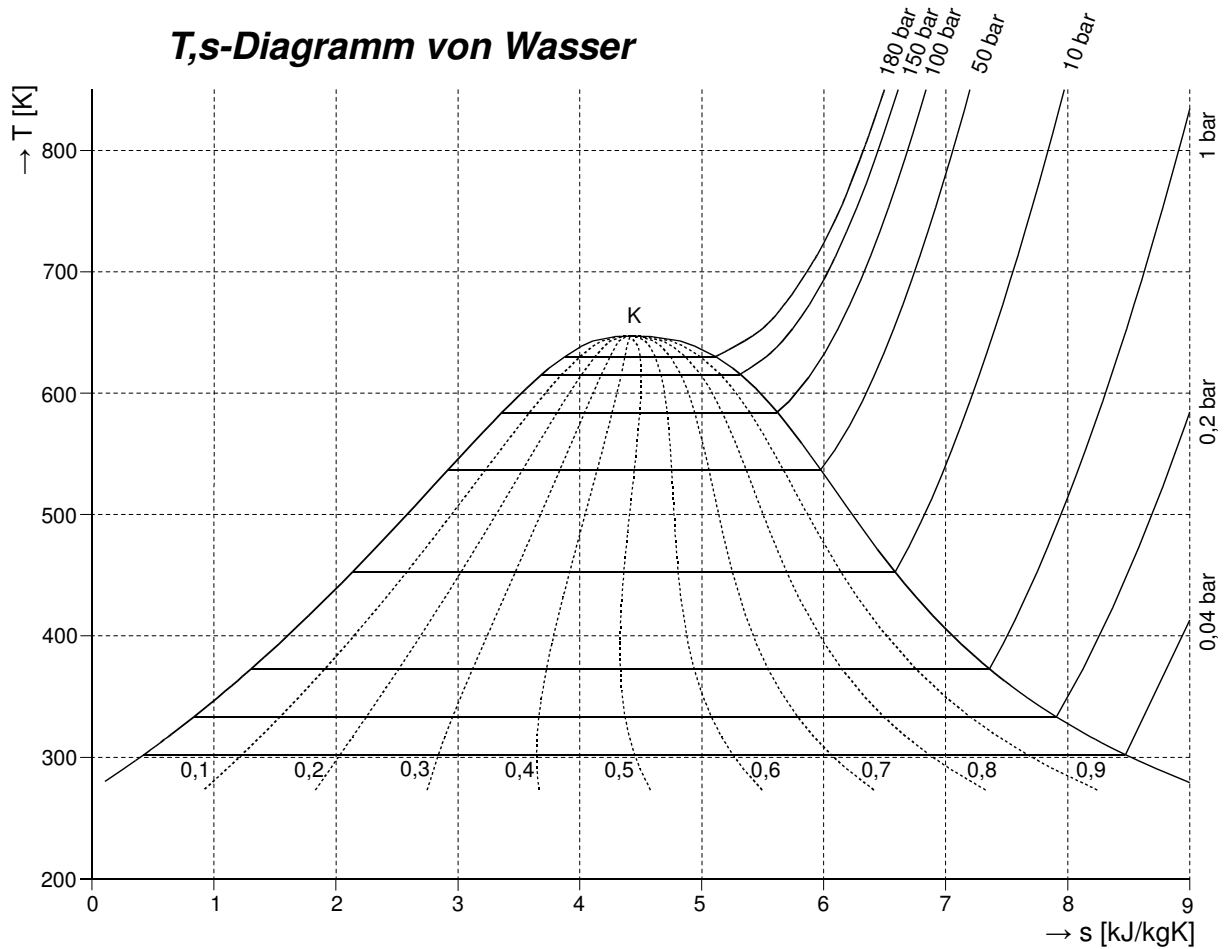
---

Alle Teilaufgaben sind unabhängig voneinander lösbar.

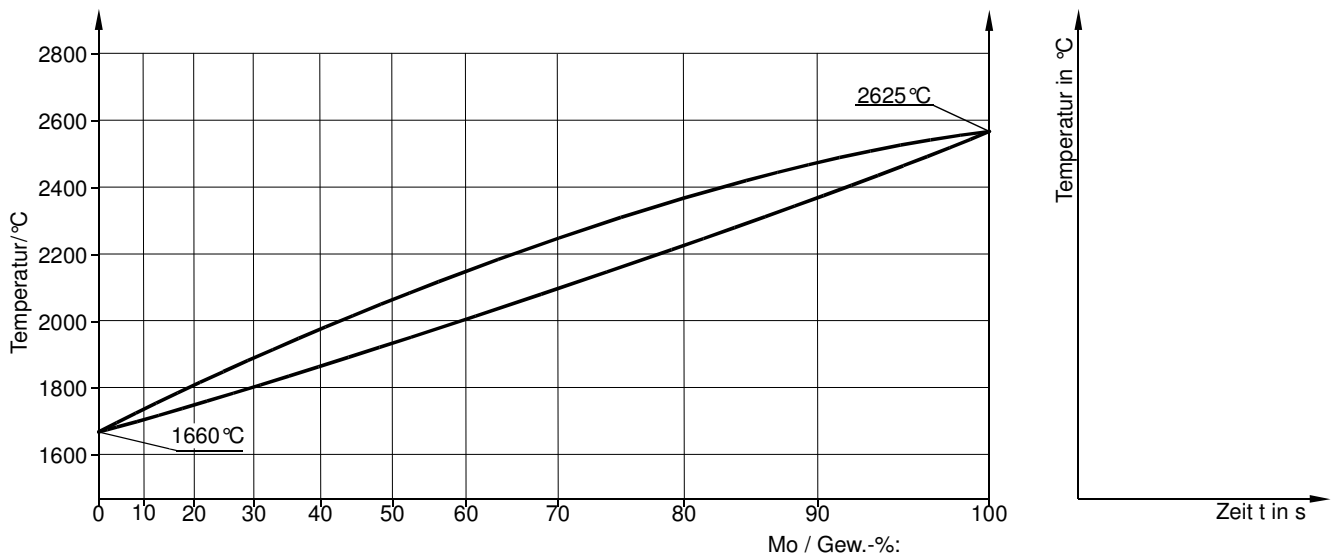
$\Sigma=30,0$

# HP 2010/11-5: Solarthermisches Kraftwerk

Zu Aufgabe 5.3.1 und 5.3.2



Zu Aufgabe 5.5.2 und 5.5.3



# HP 2010/11-5: Solarthermisches Kraftwerk

## Lösungsvorschlag

1 siehe Grafik:

2 Gefordert sind Eigenschaften (also  $\geq 2$ )

Lösungsvorschlag 1: wünschenswerte Eigenschaften (ohne *Beurteilung*) für den Verbundwerkstoff und seine Komponenten, auf die sich *hierfür* beziehen könnte.

Hier für die Durchströmung durch Wärmeträgeröl

- niedriger Strömungswiderstand (glatte Oberfläche bzw. geringe Kohäsion)
- Chemische Beständigkeit gg. das Öl

Hier für die Absorberrohre

- Strahlungsdurchlässigkeit bei guter Wärmeisolierung gegen kalte Umgebungsluft
- Hitzebeständig ( $\vartheta$  bis 800 °C)

Hier für den ganzjährigen Betrieb:

- Beständig gegen Frost.
- Temperaturwechselbeständig, z.B. bei Regen auf heiße Absorberrohre.
- Festigkeit, Zähigkeit, z.B. gegen Hagel
- Korrosionsbeständigkeit, z.B. gegen UV-Strahlen

Hier für den Verbund verschiedener Werkstoffe

- Verträglichkeit bezüglich chemischer oder elektrochemischer Korrosion

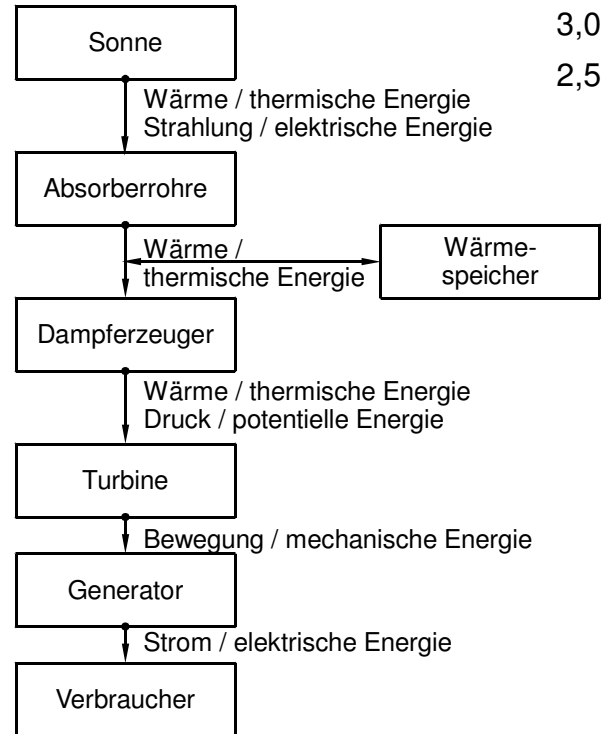
Hier für den Tag-Nacht-Temperaturwechsel

- Ähnliche Wärmeausdehnungskoeffizienten des verwendeten Glases und Metalls, um Spannungen gering zu halten oder
  - Ausreichend Elastizität mindestens einer der Komponenten, um vorhandene Spannungen auszugleichen
- Hinweis: konstruktive Lösungen wie bewegliche Verbindungen sind nicht gefragt

Lösungsvorschlag 2: *Beurteilung* der Eigenschaften von Glas und Metall

- Glas und Metall sind wärmeleitend
  - $\rightarrow$  kann zu Wärmeverlusten führen (deshalb sind Absorberrohre vakuumisoliert)
  - $\rightarrow$  Metall überträgt die Strahlungswärme gut auf das Wärmeträgeröl
- Glas ist strahlungsdurchlässig  $\rightarrow$  geeignet zur Abschirmung der Metallrohre

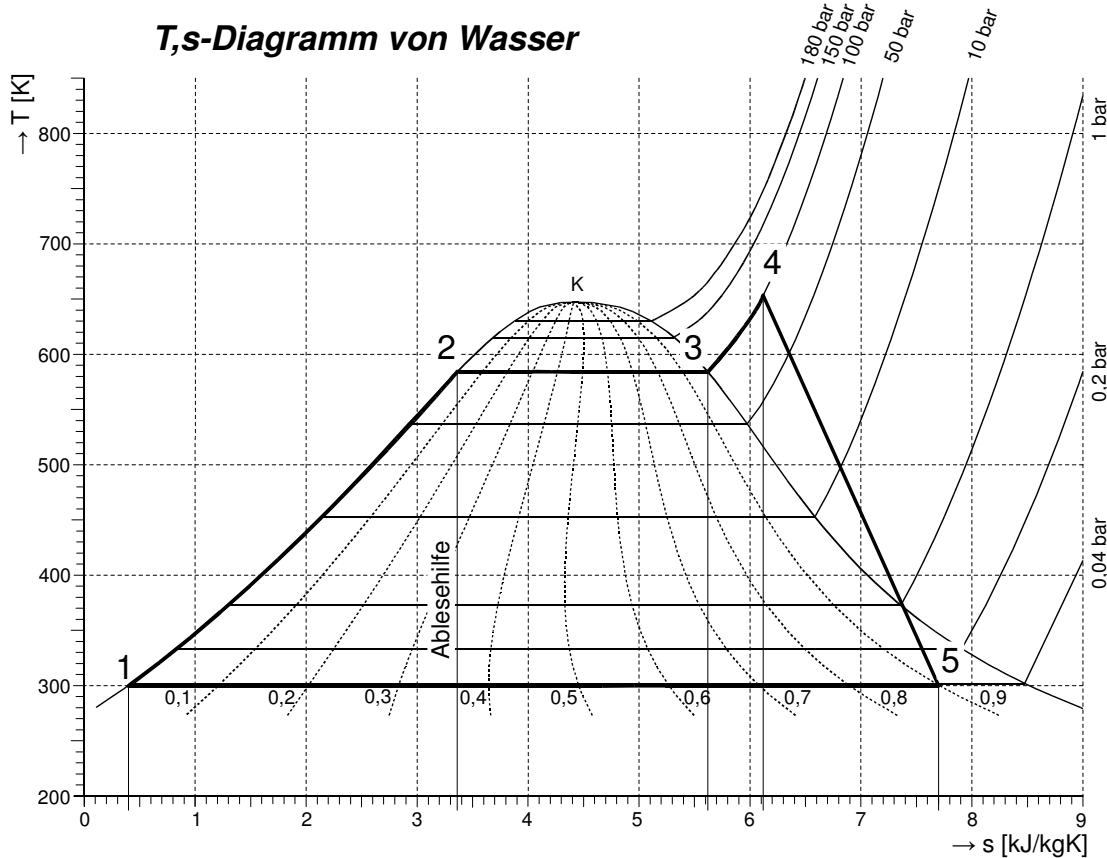
Hinweis: Moderne Technik muss viele Anforderungen erfüllen und wünscht sich viele Werkstoffeigenschaften. Da diese sich oft widersprechen (Zielkonflikt), immer konstruktive Anpassungen möglich sind und über allem die Kostenfrage schwebt, ist oft nicht eine einzelne Eigenschaft maßgeblich, sondern meistens ein Mix derselben. Deshalb konkurrieren manchmal sehr unterschiedliche Werkstoffe für eine Aufgabe wie verschiedenen Metalle (Stahl, Aluminium), Kunststoffe und Verbundwerkstoffe für den Karosseriebau (immerhin ist Holz selten geworden :-).



3

3.1

4,0



Dampfprozess im T,s-Diagramm (Wasser)

3.2

4,0

$$q_{12} = \frac{T_1 + T_2}{2} \cdot (s_2 - s_1) = \frac{300 + 584}{2} \text{ K} \cdot (3,36 - 0,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 1308 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{23} = \frac{T_2 + T_3}{2} \cdot (s_3 - s_2) = \frac{584 + 584}{2} \text{ K} \cdot (5,62 - 3,36) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 1320 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{34} = \frac{T_3 + T_4}{2} \cdot (s_4 - s_3) = \frac{584 + 653}{2} \text{ K} \cdot (6,11 - 5,62) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 303 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{zu} = q_{12} + q_{23} + q_{34} = (1308 + 1320 + 303) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2931 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{51} = \frac{T_5 + T_1}{2} \cdot (s_1 - s_5) = \frac{300 + 300}{2} \text{ K} \cdot (0,4 - 7,70) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = -2040 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{ab} = q_{51} = -2190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{Nutz} + q_{zu} + q_{ab} = 0 \rightarrow w_{Nutz} = -q_{zu} - q_{ab} = -2931 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - (-2190) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -741 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Aus dem T,s-Diagramm abgelesene Werte können abweichen.

Dampfprozess berechnen (Wasser)

3.3

Ein höherer Gehalt flüssigen Wassers schädigt die Turbinenschaufeln.

1,0

# HP 2010/11-5: Solarthermisches Kraftwerk

4

4.1 Annahme: 50 MW ist die elektr. Ausgangsleistung des Kraftwerkes. 3,0

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \rightarrow P_{\text{Sonne}} = \frac{P_{ab}}{\eta} = \frac{50 \text{ MW}}{20\%} = \frac{50 \text{ MW}}{0,2} = 250 \text{ MW}$$

$$P_{\text{Sonne}} = \text{Strahlungsdichte } S \cdot A \rightarrow A = \frac{P_{\text{Sonne}}}{S} = \frac{250 \text{ MW}}{2000 \text{ W/m}^2} = 125\,000 \text{ m}^2$$

4.2 Wenn man die Aufgabe insofern verstanden hat, dass Wärme gespeichert werden soll, kann man sich von den gegebenen Größen leiten lassen, die nicht viel Auswahl bieten. 3,0

Da nur eine Leistung  $P$  (Annahme s.o.) und eine Dauer  $t$  gegeben ist, sind sie der Ausgangspunkt für die Energiemenge, die im Spiel ist:

$$P = \frac{W}{t} \rightarrow W_{ab} = P_{ab} \cdot t = 50 \text{ MW} \cdot 7,5 \text{ h} = 375 \text{ MWh} = 1,350 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

Wirkungsgrade wirken immer in Richtung „ungünstig“, also muss mehr Wärme gespeichert werden als Arbeit abgegeben wird:

$$\eta = \frac{W_{ab}}{Q_{zu}} \rightarrow$$

$$Q_{\text{Speicher}} = \frac{W_{ab}}{\eta_{\text{Nacht}}} = \frac{375 \text{ MWh}}{0,335} = 1119,4 \text{ MWh}$$

$$Q_{\text{Speicher}} = \frac{W_{ab}}{\eta_{\text{Nacht}}} = \frac{1,350 \cdot 10^{12} \text{ J}}{0,335} = 4,030 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

Bleibt noch die Wärmekapazität  $c_{\text{Salz}}$  und die Temperaturdifferenz  $\Delta T$ :

$$Q = m \cdot c_{\text{Salz}} \cdot \Delta T \rightarrow$$

$$m = \frac{Q_{\text{Speicher}}}{c_{\text{Salz}} \cdot \Delta T} = \frac{4,030 \cdot 10^{12} \text{ J}}{1,55 \text{ kJ/kgK} \cdot (386 - 292)^\circ \text{C}} = 27659 \text{ t}$$

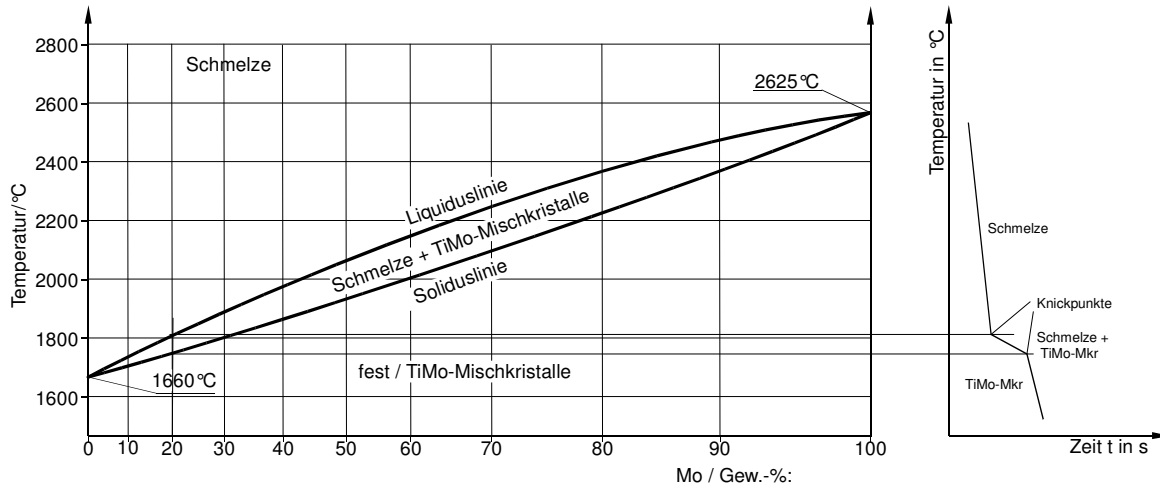
# HP 2010/11-5: Solarthermisches Kraftwerk

5

5.1 Es handelt sich um eine Mischkristall-Legierung. Sie entsteht, wenn die beiden Komponenten im festen Zustand vollkommen löslich sind. Voraussetzung dafür ist wiederum, dass die Komponenten ähnliche Atomgröße und Gitterstruktur haben. 2,5

5.2 2,0

5.3 2,0



6 3,0

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot (8 \text{ mm})^2}{4} = 50,27 \text{ mm}^2$$

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} = \frac{65 \text{ kN}}{50,27 \text{ mm}^2} = 1293 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die Zugfestigkeit ist größer als  $1100 \text{ N/mm}^2$  und damit ausreichend.

kurzer Proportionalstab bedeutet:  $5 = \frac{L_0}{d_0} \rightarrow$

$$L_0 = d_0 \cdot 5 = 8 \text{ mm} \cdot 5 = 40 \text{ mm}$$

$$A_5 = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{45 \text{ mm} - 40 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} = 0,125 = 12,5 \%$$

Die Bruchdehnung ist  $>12\%$ , deshalb ist der Werkstoff etwas zäher. Ob dies erwünscht ist (in der Toleranz liegt), kann man nur annehmen.