

HP 2008/09-2: Aluminiumerzeugung

Punkte

1 Aluminium wird durch Elektrolyse aus geschmolzener Tonerde (Al_2O_3) gewonnen. Tonerde bildet mit dem Aluminiumsalz Kryolith ein Kristallgemisch. Dies nutzt man bei der Elektrolyse aus, um den Schmelzpunkt der Tonerde zu senken. Tonerde schmilzt bei $2050^\circ C$, Kryolith bei $1000^\circ C$, ihr Eutektikum liegt bei 18,5% Tonerde und schmilzt bei $935^\circ C$.

1.1 Zeichnen Sie das Zustandsschaubild, und beschriften Sie die Linien und Phasenfelder. 4,0

2 Das erzeugte Aluminium wird zu hochfestem Aluminium verarbeitet. Die Eigenschaften werden im Zugversuch untersucht.

Zugprobe: DIN 50125-E5x10x40

Messprotokoll

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F in kN	0	4,8	9,6	14,4	19,2	24,0	26,2	27,2	25,2
ΔL in mm	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,5	1,2	1,8	3,2

2.1 Zeichnen Sie das Spannungs-Dehnungs-Diagramm. 4,0

2.2 Ermitteln Sie aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm folgende Kennwerte: 4,0

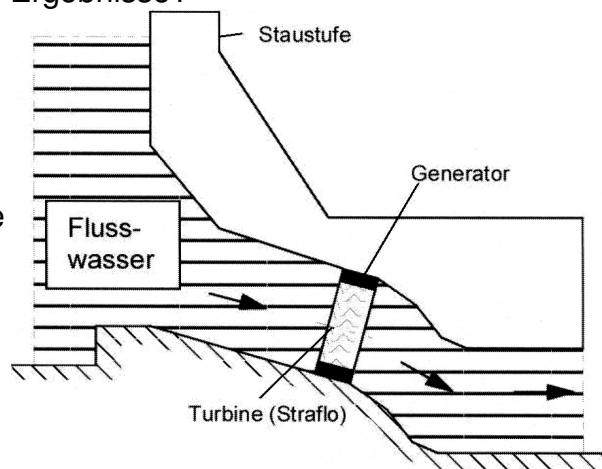
- Dehngrenze
- Zugfestigkeit
- Bruchdehnung
- E-Modul

2.3 Welche Zugprobe der Form A liefert gleiche Ergebnisse? 2,0

3 Zur Aluminiumerzeugung wird die elektrische Energie von einem Laufwasserkraftwerk (LWK) bereitgestellt.

Für 1 kg Aluminium sind 15 kWh elektrische Energie erforderlich.

3.1 Skizzieren Sie das Blockschaltbild eines Laufwasserkraftwerkes mit den auftretenden Energieformen. 2,0



3.2 Wie viel Aluminium kann jährlich mit der Leistung des Laufwasserkraftwerkes erzeugt werden? 2,0

Daten:

Turbinendurchsatz: $\dot{V} = 100 \frac{m^3}{s}$

Mittlere Fallhöhe des Wassers: $h = 5 \text{ m}$

Wirkungsgrad des Kraftwerkes $\eta_{LWK} = 0,92$

3.3 Laufwasserkraftwerke tragen zur Deckung der Grundlast bei. Erläutern Sie den Begriff der Grundlast und nennen Sie eine weitere Kraftwerksart, welche diese Aufgabe erfüllt. 2,0

HP 2008/09-2: Aluminiumerzeugung

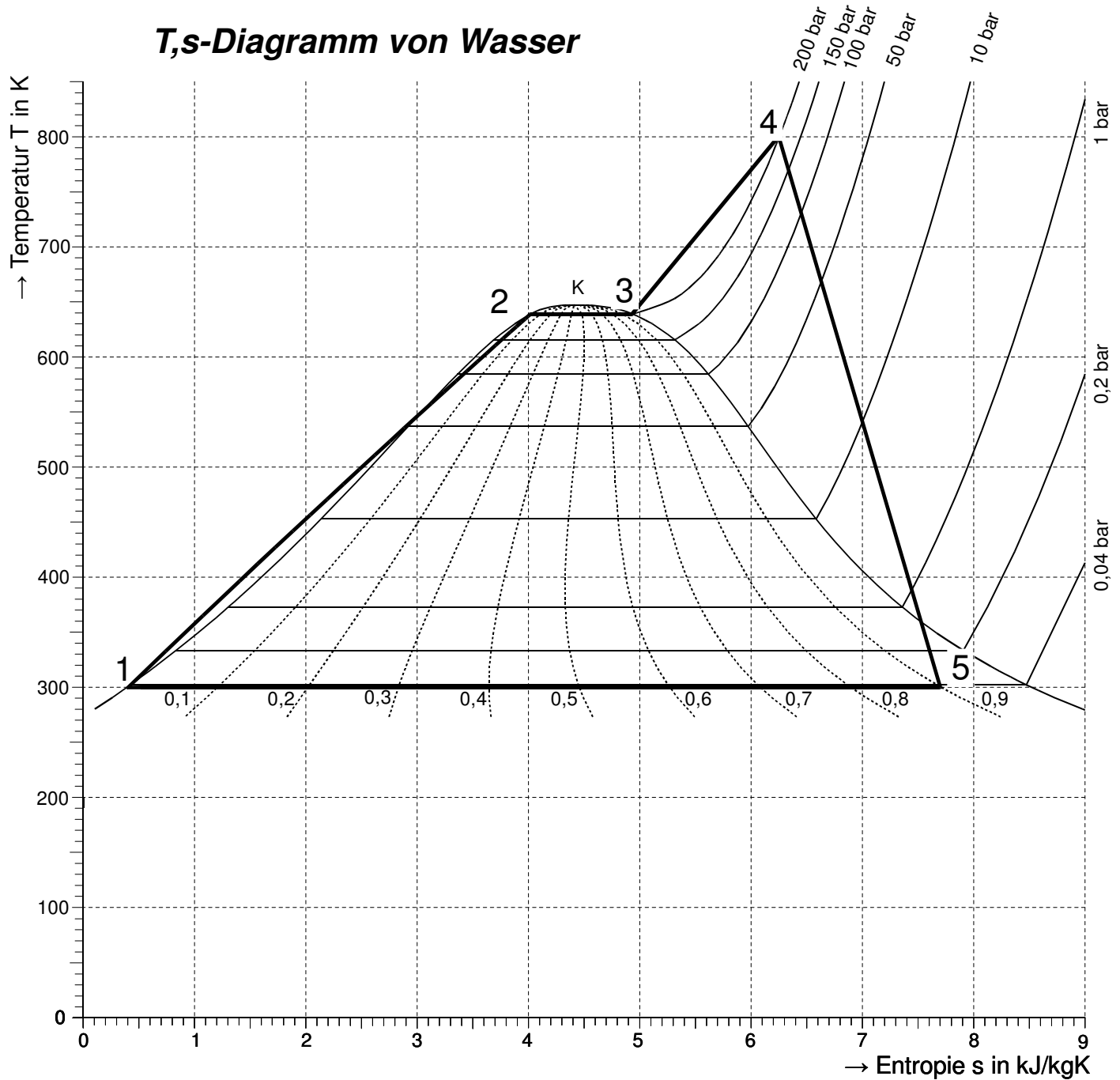
- 4 Aluminiumhütten beziehen zusätzlich elektrische Energie aus Steinkohlekraftwerken (SKK). Der Dampfprozess ist im Arbeitsblatt näherungsweise dargestellt.
- 4.1 Kennzeichnen Sie die zugeführte spezifische Wärme q_{zu} auf dem Arbeitsblatt. 2,0
- 4.2 Berechnen Sie näherungsweise die zugeführte spezifische Wärme q_{zu} . 4,0
- 4.3 Zur Erzeugung von 1 kg Aluminium werden 15 kWh an elektrischer Energie benötigt. 2,0
Welche Masse an Steinkohle wird je Tonne Aluminium benötigt, wenn das Steinkohlekraftwerk einen Wirkungsgrad von $\eta_{SKK}=0,38$ hat?
-

$\Sigma = 30,0$

HP 2008/09-2: Aluminiumerzeugung

Arbeitsblatt

Zu den Aufgaben 4.1 und 4.2



HP 2008/09-2: Aluminiumerzeugung

Lösungsvorschläge

Teilaufgaben:

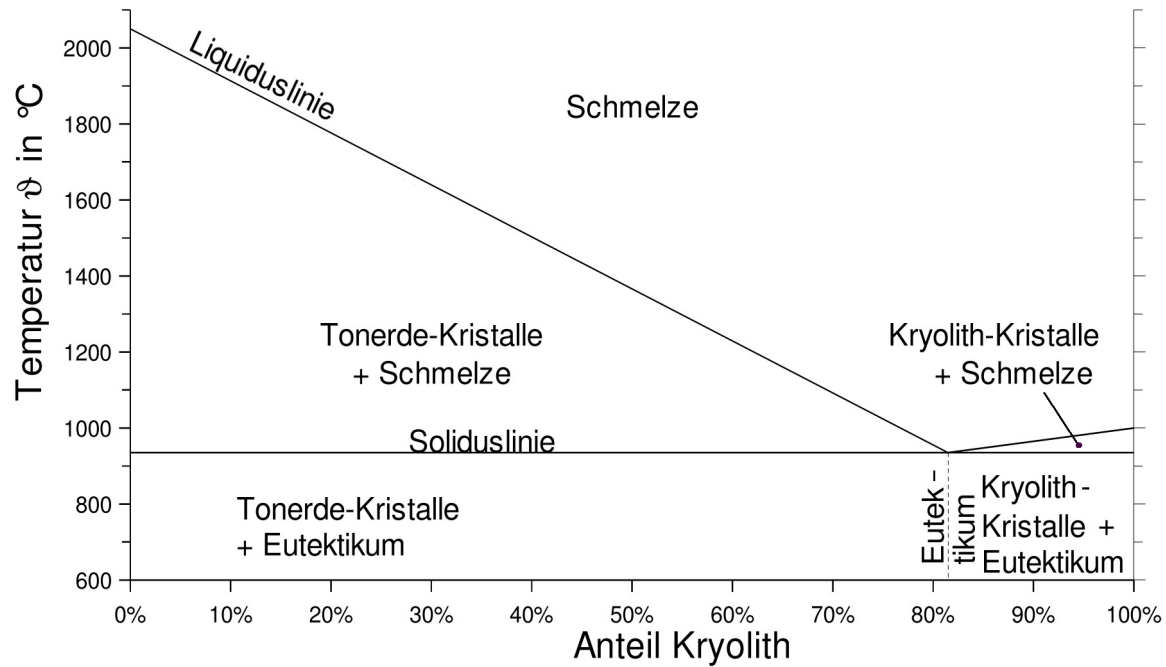
Punkte

1

1.1

Zustandsdiagramm Tonerde - Kryolith

4,0



HP 2008/09-2: Aluminiumerzeugung

2

2.1 Beispielrechnung für das zweite Wertepaar

4,0

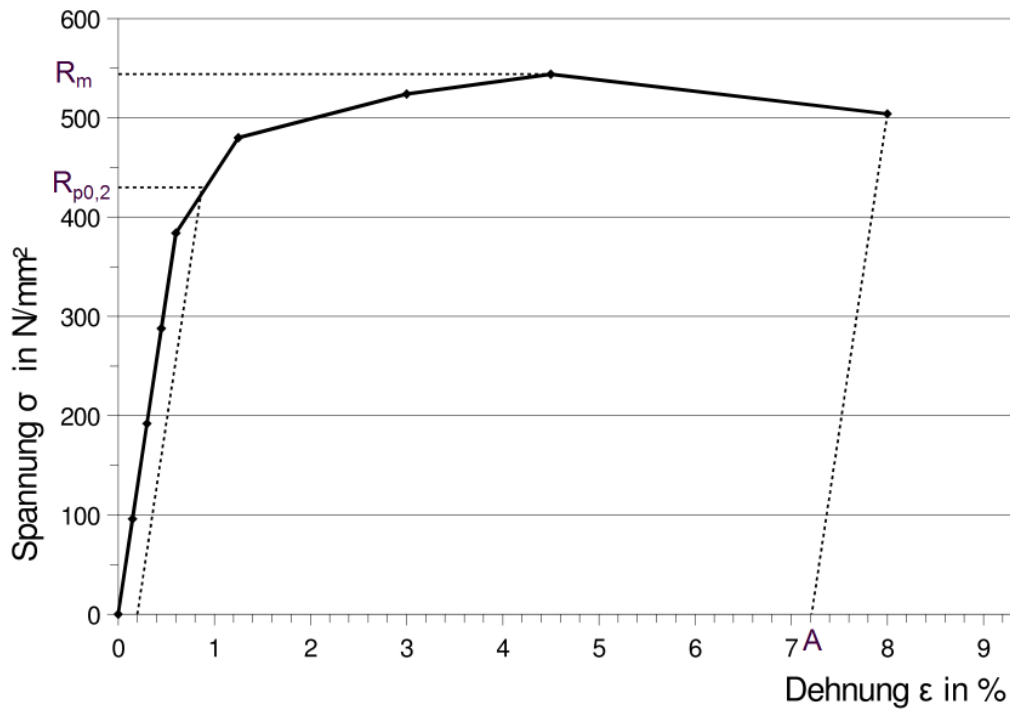
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{0,06 \text{ mm}}{40 \text{ mm}} = 0,0015 = 0,15\%$$

$$\sigma_z = \frac{F}{S_0} = \frac{4,8 \text{ kN}}{50 \text{ mm}^2} = 96 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{mit} \quad S_0 = a \cdot b = 5 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} = 50 \text{ mm}^2$$

Wertetabelle

Messung Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ_z in N/mm ²	0	96	192	288	384	480	524	544	504
F in kN	0	4,8	9,6	14,4	19,2	24,0	26,2	27,2	25,2
ΔL in mm	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,50	1,20	1,80	3,20
ϵ in %	0	0,15	0,30	0,45	0,60	1,25	3,00	4,50	8

Spannungs-Dehnungs-Diagramm



2.2 Aus dem Diagramm abgelesene Werte

4,0

Dehngrenze $R_{p0,2} = 430 \text{ N/mm}^2$

Zugfestigkeit $R_m = 540 \text{ N/mm}^2$

Bruchdehnung $A = 7,2 \%$

Mit einem Wertepaar des elastischen Bereiches aus der Wertetabelle

$$E = \frac{\sigma_{z5}}{\epsilon_5} = \frac{384 \text{ N/mm}^2}{0,60\%} = 64 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$$

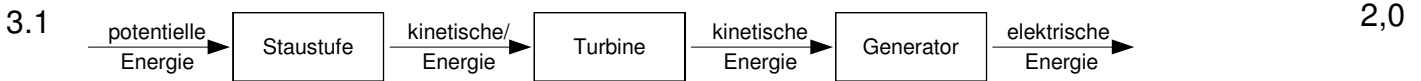
2.3 Form A steht für eine runde Probe. Für vergleichbare Ergebnisse muss der Anfangsquerschnitt S_0 und die Länge L_0 übereinstimmen:

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \rightarrow d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_0}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 50 \text{ mm}^2}{\pi}} = 8 \text{ mm}$$

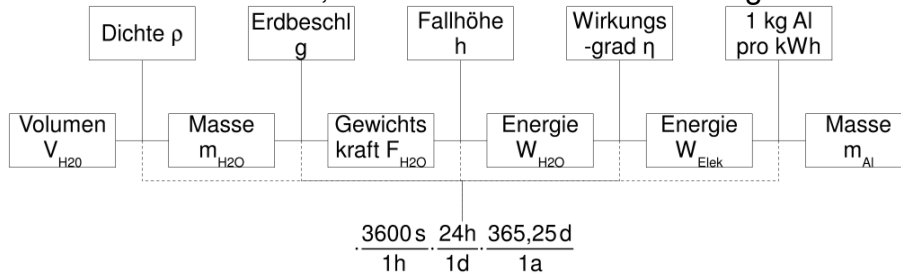
Ergebnis: Zugprobe DIN 50125 - A8x40

HP 2008/09-2: Aluminiumerzeugung

3



3.2 Bevor man losrechnet, sollte man sich über den Weg im Klaren sein: 4,0



Eine elegante Rechnung verwendet die zeitbezogenen Größen \dot{V} (Volumenstrom), \dot{m} (Massenstrom) und P (Leistung = Energiestrom). (\dot{F} ist nicht üblich.)

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{V}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 100 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g \cdot h = 100 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 5\text{m} = 4,905 \cdot 10^6 \text{W}$$

$$P_{\text{el}} = \eta_{\text{LWK}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,92 \cdot 4,905 \cdot 10^6 \text{W} = 4,513 \cdot 10^6 \text{W}$$

$$\dot{m}_{\text{Al}} = P_{\text{el}} \cdot \frac{1 \text{kg}}{15 \text{kWh}} = 4,513 \cdot 10^6 \text{W} \cdot \frac{1 \text{kg}}{15 \text{kWh}} = 300,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{Al}} = 300,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{h}}{\text{Tag}} \cdot \frac{365,25 \text{ Tage}}{\text{Jahr}} = 2637 \frac{\text{t}}{\text{Jahr}}$$

oder:

Schüler haben oft Probleme, in Strömen (=Größen pro Zeit) zu denken. In diesem Fall empfehle ich, die Zeit aus den Formeln herauszunehmen (z.B. "Ich rechne für 1 Sekunde .."). Im Vorschlag stehen die gewählten Zeiträume im Index: Sekunde s, Stunde h (*lat. hora*), Tag d (*lat. dies*) und Jahr a (*lat. annus*).

$$m_{\text{H}_2\text{O};1\text{s}} = V_{\text{H}_2\text{O};1\text{s}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \text{m}^3 \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 100 \cdot 10^3 \text{kg}$$

$$F_{\text{H}_2\text{O};1\text{s}} = m_{\text{H}_2\text{O};1\text{s}} \cdot g = 100 \cdot 10^3 \text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,981 \cdot 10^6 \text{N}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O};1\text{s}} = F_{\text{H}_2\text{O};1\text{s}} \cdot h = 0,981 \cdot 10^6 \text{N} \cdot 5\text{m} = 4,905 \cdot 10^6 \text{J}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O};1\text{h}} = W_{\text{H}_2\text{O};1\text{s}} \cdot 3600 = 4,905 \cdot 10^6 \text{J} \cdot 3600 = 4,905 \cdot 10^6 \text{Wh} = 4,905 \cdot 10^3 \text{kWh} (= 17,66 \cdot 10^9 \text{J})$$

$$W_{\text{H}_2\text{O};1\text{a}} = W_{\text{H}_2\text{O};1\text{h}} \cdot 24 \cdot 365,25 = 4,905 \cdot 10^3 \text{kWh} \cdot 8766 = 43,00 \cdot 10^6 \text{kWh} (= 154,8 \cdot 10^{12} \text{J})$$

$$W_{\text{el};1\text{a}} = W_{\text{H}_2\text{O};1 \text{Jahr}} \cdot \eta_{\text{LWK}} = 43,00 \cdot 10^3 \text{kWh} \cdot 0,92 = 39,56 \cdot 10^6 \text{kWh} (= 142,4 \cdot 10^{12} \text{J})$$

$$m_{\text{Al};1\text{a}} = \frac{1 \text{kg}}{15 \text{kWh}} \cdot W_{\text{el};1\text{a}} = \frac{1 \text{kg}}{15 \text{kWh}} \cdot 39,56 \cdot 10^6 \text{kWh} = 2637 \text{t}$$

oder: Dreisatz ...

Pro Jahr können 2637 t Aluminium erzeugt werden.

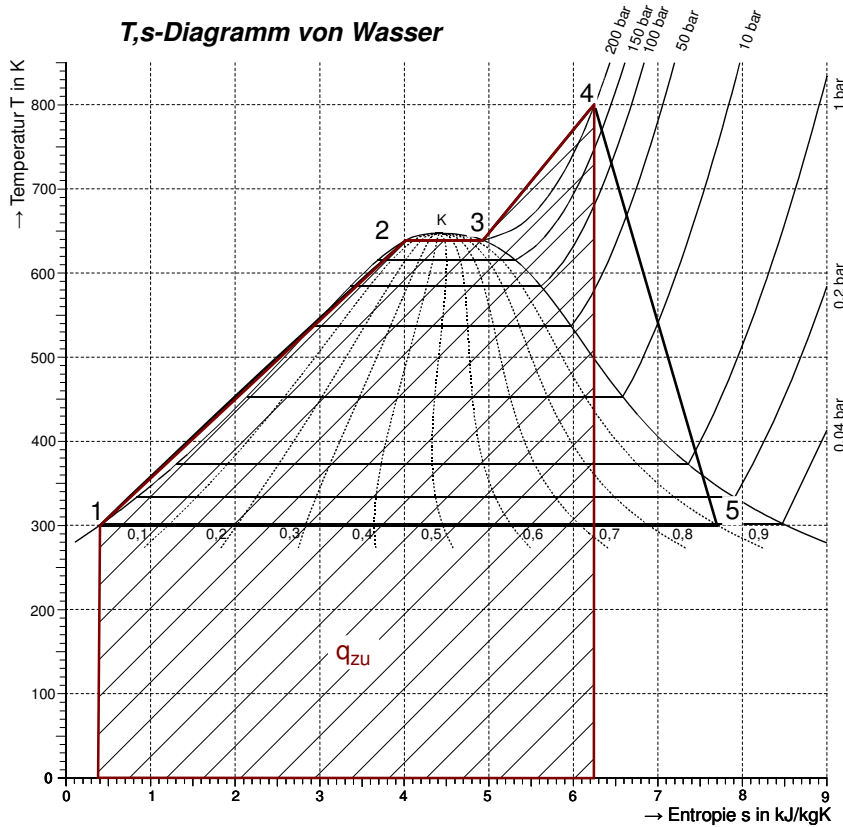
3.3 Grundlast ist der Bedarf an elektrischer Leistung, der im Tagesverlauf nicht unterschritten wird. Sie ist niedriger als das Angebot aus Kraftwerken, die nicht kurzzeitig abgeschaltet werden können, oder deren Primärenergie ungenutzt bliebe (Laufwasser, Wind, Gezeiten, Erdwärme..). Die Grundlast wird auch von Kern- und Kohlekraftwerken gedeckt. 2,0

HP 2008/09-2: Aluminiumerzeugung

4

4.1

2,0



Dampfprozess im T,s-Diagramm (Wasser)

4.2 Die Werte für die Entropie s stammen aus einer Wasserdampf tabel. Aus dem Diagramm abgelesene Werte können etwas abweichen.

4,0

$$q_{12} = \frac{T_1 + T_2}{2} \cdot (s_2 - s_1) = \frac{300 + 640}{2} \text{ K} \cdot (4,0 - 0,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 1692 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{23} = T_{2/3} \cdot (s_3 - s_2) = 640 \text{ K} \cdot (4,9 - 4,0) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 576 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{34} = \frac{T_3 + T_4}{2} \cdot (s_4 - s_3) = \frac{640 + 800}{2} \text{ K} \cdot (6,25 - 4,9) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 972 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{zu} = q_{12} + q_{23} + q_{34} = (1692 + 576 + 972) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3240 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Dampfprozess berechnen (Wasser)

4.3

2,0

$$m_{Sk} = \frac{W_{tAl}}{H_u \cdot \eta_{SKK}} = \frac{1000 \cdot 15 \text{ kWh}}{\frac{2,93 \cdot 10^{10} \text{ Ws}}{t_{Sk}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot 0,38} = \frac{39,47 \text{ MWh}}{8,14 \text{ MWh}} = 4,85 \text{ t}_{\text{Steinkohle je t Al}}$$

oder

spezifischer Energiebedarf für die Elektrolyse von Aluminium

$$w_{el} = \frac{15 \text{ kWh}}{\text{kg}_{Al}} = \frac{15 \text{ kW} \cdot 3600 \text{ s}}{\text{kg}_{Al}} = 54 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{Al}}$$

$$q = \frac{w_{el}}{\eta_{SKK}} = \frac{15 \text{ kWh/kg}_{Al}}{0,38} = 39,47 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}_{Al}} = 39,47 \frac{\text{kW} \cdot 3600 \text{ s}}{\text{kg}_{Al}} = 142,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{Al}}$$

$$H_u = \frac{Q}{m_{Sk}} = \frac{q \cdot m_{Al}}{m_{Sk}} \rightarrow \frac{m_{Sk}}{m_{Al}} = \frac{q}{H_u} = \frac{142,1 \text{ MJ/kg}_{Al}}{29,3 \text{ MJ/kg}_{Sk}} = 4,850 \frac{\text{kg}_{Sk}}{\text{kg}_{Al}} = 4,850 \frac{t_{Sk}}{t_{Al}}$$

Pro Tonne Aluminium werden 4,85 t Steinkohle benötigt.

Σ = 30,0