

BSZ-Systementwurf

André Weber

Institut für Angewandte Materialien – Elektrochemische Technologien (IAM-ET)

Adenauerring 20b, Geb. 50.40 (FZU), Raum 314

phone: 0721/608-7572, fax: 0721/608-7492

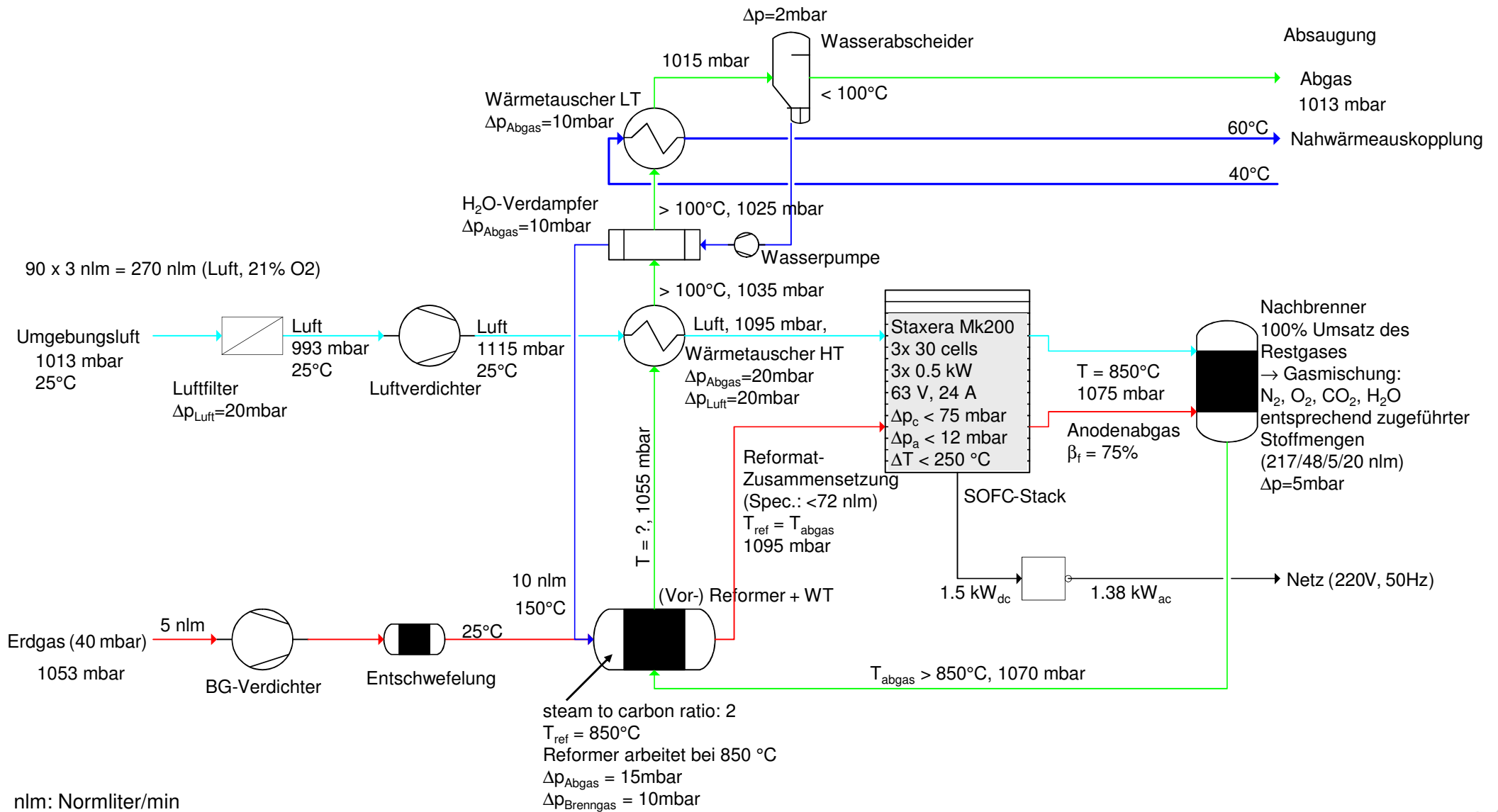
andre.weber@kit.edu

www.iam.kit.edu/et



SOFC Brennstoffzellenheizgerät

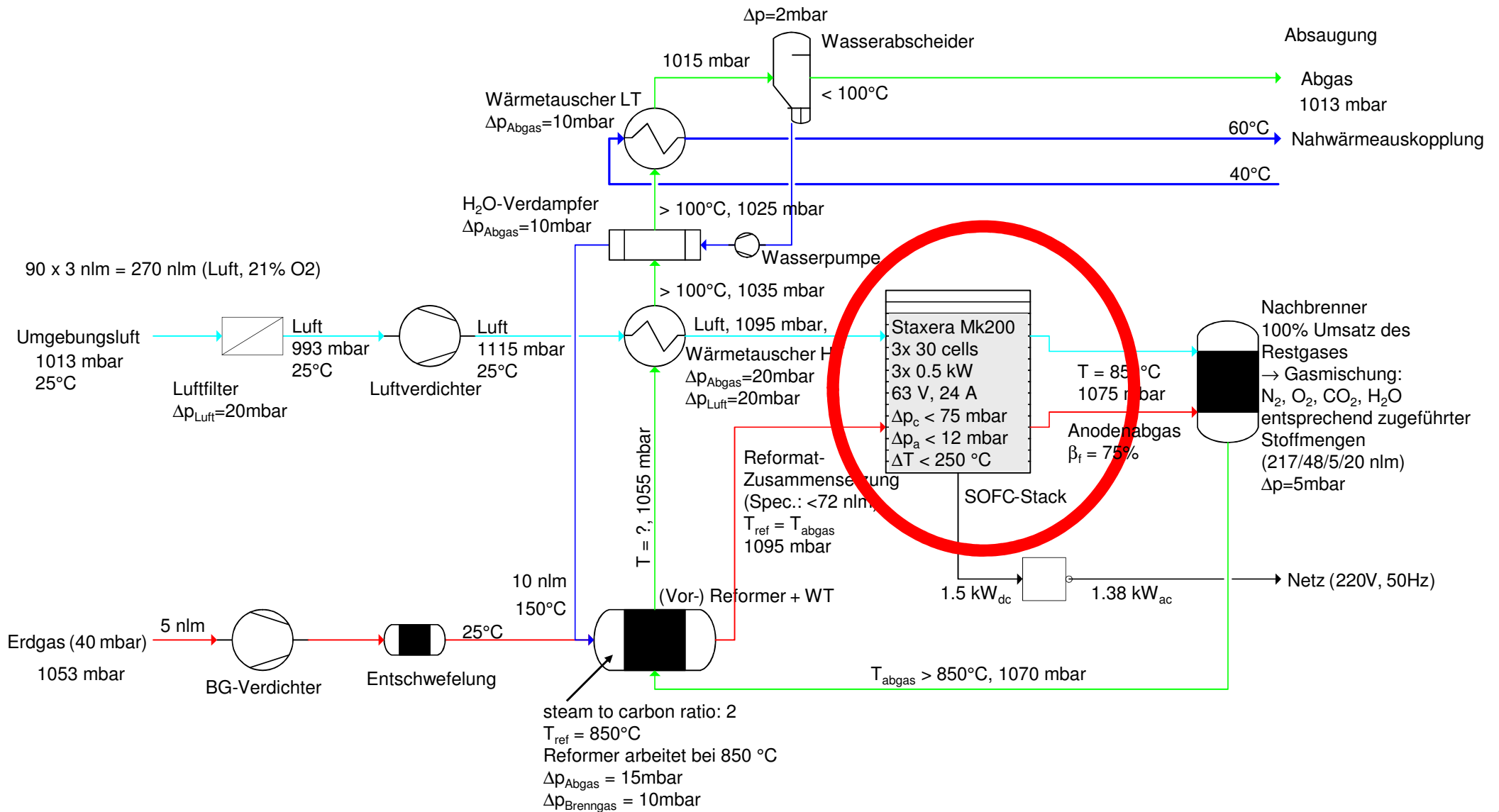
Verschaltung der Komponenten



nlm: Normliter/min

SOFC Brennstoffzellenheizgerät

Verschaltung der Komponenten



Stack

1 Overview

The Staxera 30 cell stack features stamped sheet metal interconnects for low cost and electrolyte supported cells for thermal and redox stability. Low anode and cathode pressure drops help to minimize system parasitic losses, while an open cathode allows tight system integration if desired.

2 Technical Data

2.1 Performance Data

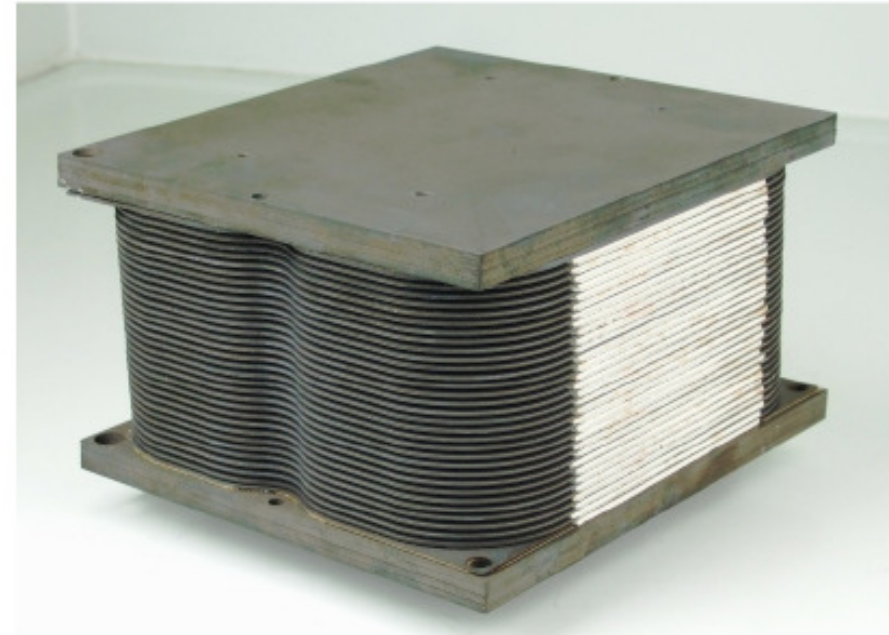
Power	~ 500 W (electric)	850°C, depending on fuel composition
Lifetime	1000 hours Degradation < 5%	
Power density	0,156 kW / liter	
Operating voltage	21 V	0.7 V/cell
Pressure drop anode	< 20 mbar	850°C fuel gas flow $\leq 0,8$ NI/min per cell
Pressure drop cathode	< 20 mbar	850°C air flow $\leq 0,8$ NI/min per cell

2.2 Stack design

Cells	Electrolyte supported	Supplied by H.C. Starck
Seals	Glass / ceramic	
Interconnectors	Stamped sheet metal	
Size	3,2 liters 182 x 168 mm 105 mm high	
Mass	< 12 kg	

2.3 Operating conditions

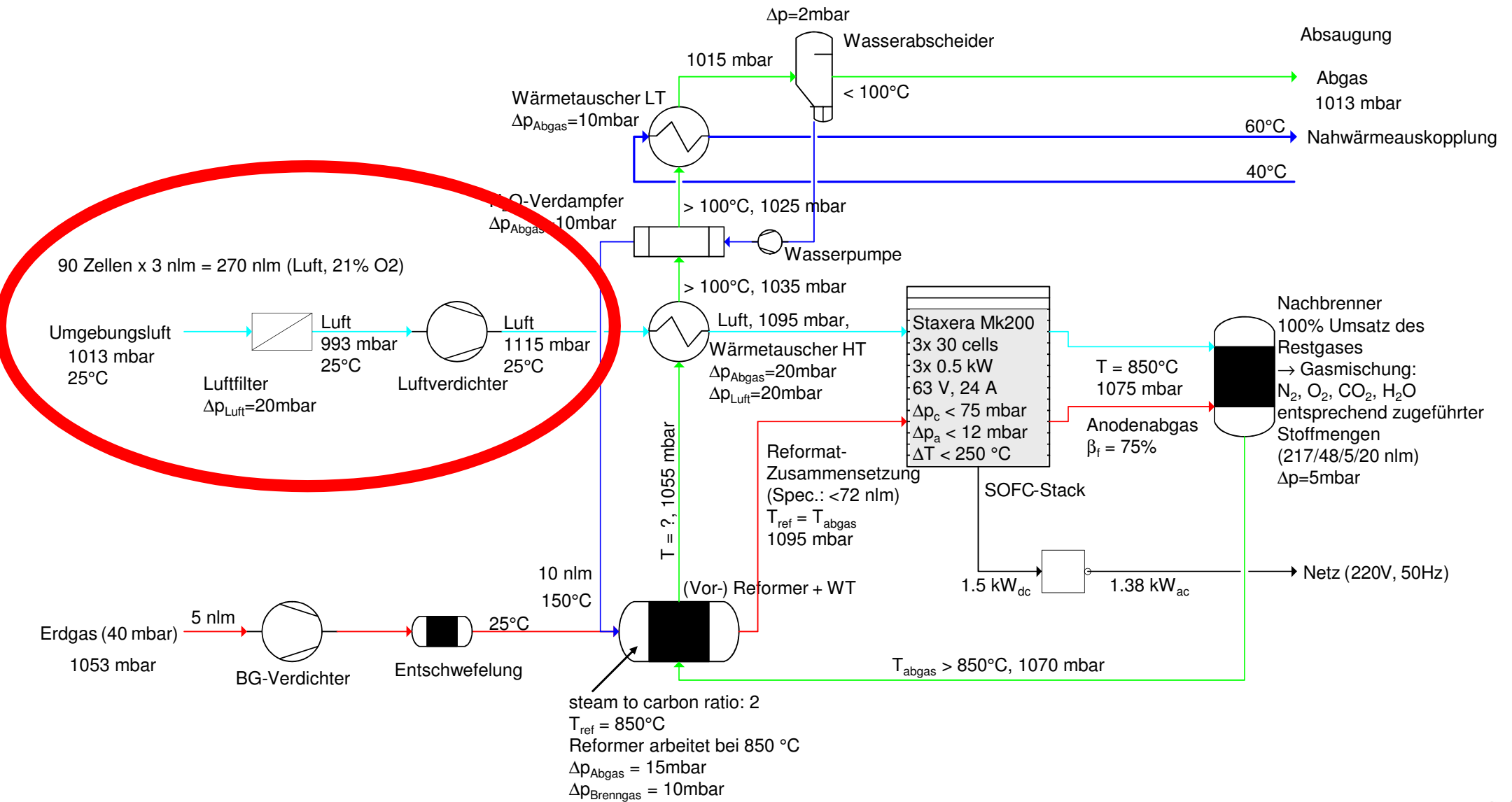
Operating temperature	850°C	
Furnace heating or cooling rate	$\leq 4^\circ\text{C}$ per minute	
Cathode exhaust temperature	$\leq 860^\circ\text{C}$	
Anode exhaust temperature	$\leq 860^\circ\text{C}$	Other acceptable fuels include dry natural gas CPOX reforming, steam reforming, or hydrogen
Anode inlet – exhaust temperature gradient	$\leq 250^\circ\text{C}$	
Cathode inlet – exhaust temperature gradient	$\leq 250^\circ\text{C}$	
Anode inlet – cathode inlet temperature gradient	$\leq 250^\circ\text{C}$	
Pressure difference Anode-Cathode	≤ 20 mbar	
Air flow required for cooling	~ 3 NI/min per cell	highly dependent on system surroundings and stack integration
Min. cell voltage	700 mV	per cell



30 Zellen a 16.7 W @ 0.7V $\rightarrow$ 23.81 A

SOFC Brennstoffzellenheizgerät

Luftversorgung



3 Stacks a 500 W

je 30 Zellen a 0.7 V = 21 V Stackspannung

mittlere Stromdichte im Arbeitspunkt: $500 \text{ W} / 21 \text{ V} = 23.81 \text{ A}$

Luftbedarf (ohne Berücksichtigung Kühlleistungsbedarf)

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A $\rightarrow$ 2143 A @ 100% o.u.

4286 A @ 50% o.u.

Zellen sind gasseitig parallelgeschaltet !

Umrechnung Strom – Gasfluss?

o.u.: oxidant utilization

β_f : fuel utilization



Gasumsatz

Strom → Gasfluss

Elementarladung: $e_0 = 1.602 \times 10^{-19} \cdot \text{C}$

Avogadro-Konstante: $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Faraday-Konstante: $F = 9.649 \times 10^4 \cdot \frac{\text{C}}{\text{mol}}$

Normalbedingungen:

Druck: $p_0 := 1 \text{ atm}$ $p_0 = 1.01325 \cdot \text{bar}$ $p_0 = 101325 \cdot \text{Pa}$

Temperatur: $T_0 := 273.15 \text{ K}$ $T_0 = 0 \cdot ^\circ\text{C}$

Molvolumen: $V_{m0} := 22.41 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$

Normalbedingungen

$T = 0^\circ\text{C}$

$p = 1013.25 \text{ mbar}$

Standardbedingungen

$T = 25^\circ\text{C}$

$p = 1013 \text{ mbar}$

Teilchendichte eines idealen Gases unter Normalbedingungen

$$n_0 := \frac{N_A}{V_{m0}} \quad n_0 = 2.687 \times 10^{25} \text{ m}^{-3} \quad n_0 = 2.687 \times 10^{22} \cdot \frac{1}{\text{L}} \quad n_0 = 2.687 \times 10^{19} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Umrechnung Strom in Gasfluss

elektrischer Strom: $I := 1 \text{ A}$ $I = 6.242 \times 10^{18} \cdot \frac{e_0}{\text{s}}$

Ladungszahl H_2 : $n_{\text{H}_2} := 2$

Stoffmengenstrom H_2 : $J_{\text{H}_2} := \frac{I}{n_{\text{H}_2} F}$ $J_{\text{H}_2} = 5.182 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{mol}}{\text{s}}$

Gasfluss (flow rate): $\dot{V}_{\text{H}_2} := J_{\text{H}_2} \cdot V_{m0}$ $\dot{V}_{\text{H}_2} = 6.968 \cdot \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$



Luftversorgung

Benötigte Luftmenge

3 Stacks a 500 W

je 30 Zellen a 0.7 V = 21 V Stackspannung, mittlere Stromdichte im Arbeitspunkt: 500 W / 21 V = 23.81 A

Umrechnung Strom in Gasfluss

elektrischer Strom: $I := 23.81 \text{ A}$ $I = 1.486 \times 10^{20} \frac{e_0}{s}$

Ladungszahl O_2 : $n_{O_2} := 4$

Zellenzahl: $n_{cell} := 3 \cdot 30$

Stoffmengenstrom O_2 : $J_{O_2} := \frac{n_{cell} \cdot I}{n_{O_2} F}$ $J_{O_2} = 5.552 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{s}$

Gasfluss (flow rate): $fr_{O_2} := J_{O_2} \cdot V_{m0}$ $fr_{O_2} = 7.466 \frac{L}{min}$

$$fr_{air} := fr_{O_2} \cdot \frac{1}{21\%} \quad fr_{air} = 35.551 \frac{L}{min} \quad \frac{fr_{air}}{50\%} = 71.102 \frac{L}{min}$$

Luftbedarf (ohne Berücksichtigung Kühlleistungsbedarf)

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 35.55 nlm Luft @ 100% o.u.

71.12 nlm ≈ 72 nlm @ 50% o.u.

Luftbedarf aus Stack-Datenblatt (Berücksichtigung Kühlleistungsbedarf !)

3 nlm / Zelle = **270 nlm (@ 7.6% o.u.)**

o.u.: oxidant utilization

β_f : fuel utilization

Luftvorwärmung und Stackkühlung

Luftbedarf aus Stack-Datenblatt: 3 nlm / Zelle = 270 nlm

Temperaturdifferenz Einlass – Auslass: 250 K

Luftauslasstemperatur (max. Stacktemperatur) = 850°C

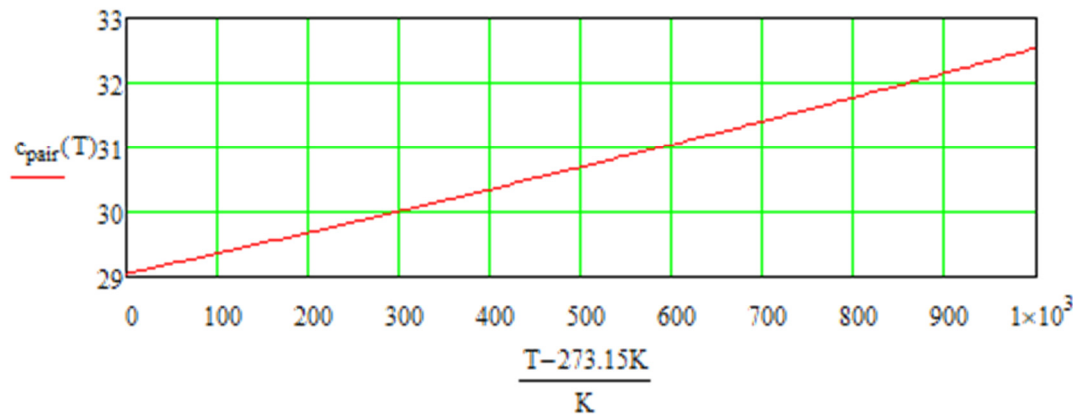
Lufteinlasstemperatur: 600°C

Wärmekapazität bei const. Druck $p = 1 \text{ atm}$: c_p

$$c_{pO_2}(T) := \left[27.96 + 4.180 \cdot \left(\frac{T}{1000K} \right) - 0.167 \cdot \left(\frac{T}{1000K} \right)^2 + 0 \cdot \left(\frac{T}{1000K} \right)^3 \right] \cdot \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$$

$$c_{pN_2}(T) := \left[28.30 + 2.537 \cdot \left(\frac{T}{1000K} \right) + 0.5443 \cdot \left(\frac{T}{1000K} \right)^2 + 0 \cdot \left(\frac{T}{1000K} \right)^3 \right] \cdot \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$$

$$c_{pair}(T) := 21\% \cdot c_{pO_2}(T) + 79\% \cdot c_{pN_2}(T)$$



Kühlleistung

$$T_{airin} := 600K + 273.15K \quad T_{airout} := 850K + 273.15K$$

$$W_{mcool} := \int_{T_{airin}}^{T_{airout}} c_{pair}(\tau) d\tau \quad W_{mcool} = 7.875 \times 10^3 \frac{J}{\text{mol}}$$

$$\text{Luftmenge: } \dot{V}_{air} := 270 \frac{L}{\text{min}}$$

$$P_{cool} := \frac{\dot{V}_{air} \cdot W_{mcool}}{V_{m0}} \quad P_{cool} = 1.581 \text{ kW}$$

Luftvorwärmung Wärmetauscher

$$T_U = 298.15 \text{ K}$$

$$W_{preheat}(T) := \int_{T_U}^{T_{airin}} c_{pair}(\tau) d\tau$$

$$P_{preheat}(T) := \frac{\dot{V}_{air}}{V_{m0}} \cdot W_{preheat}(T) \quad P_{preheat}(T_{airin}) = 3.471 \cdot \text{kW}$$

Molvolumen:

$$V_{m0} := 22.41 \frac{L}{\text{mol}}$$

Einschub Wärmekapazität $C_p(T)$

Temperaturabhängigkeit der "Molwärme" C_p

[\[Bearbeiten\]](#)

Mit der Beziehung

$$C_p = a + b \cdot (T/1000) + c \cdot (T/1000)^2 + d \cdot (T/1000)^3$$

können im Temperaturbereich 273 K - ca. 1300 K (0-1000 °C) die Wärmekapazitäten von Gasen berechnet werden. Die Einheit [J/(mol K)] kann leicht durch Division durch die molare Masse [g/mol] in die technische Einheit [J/(g K)] umgerechnet werden. Die C_p -Werte für 25 °C wurden als Beispiele hiermit berechnet. (Anm.: auch über der flüssigen Phase eines Stoffs existiert eine messbare gasförmige Phase).

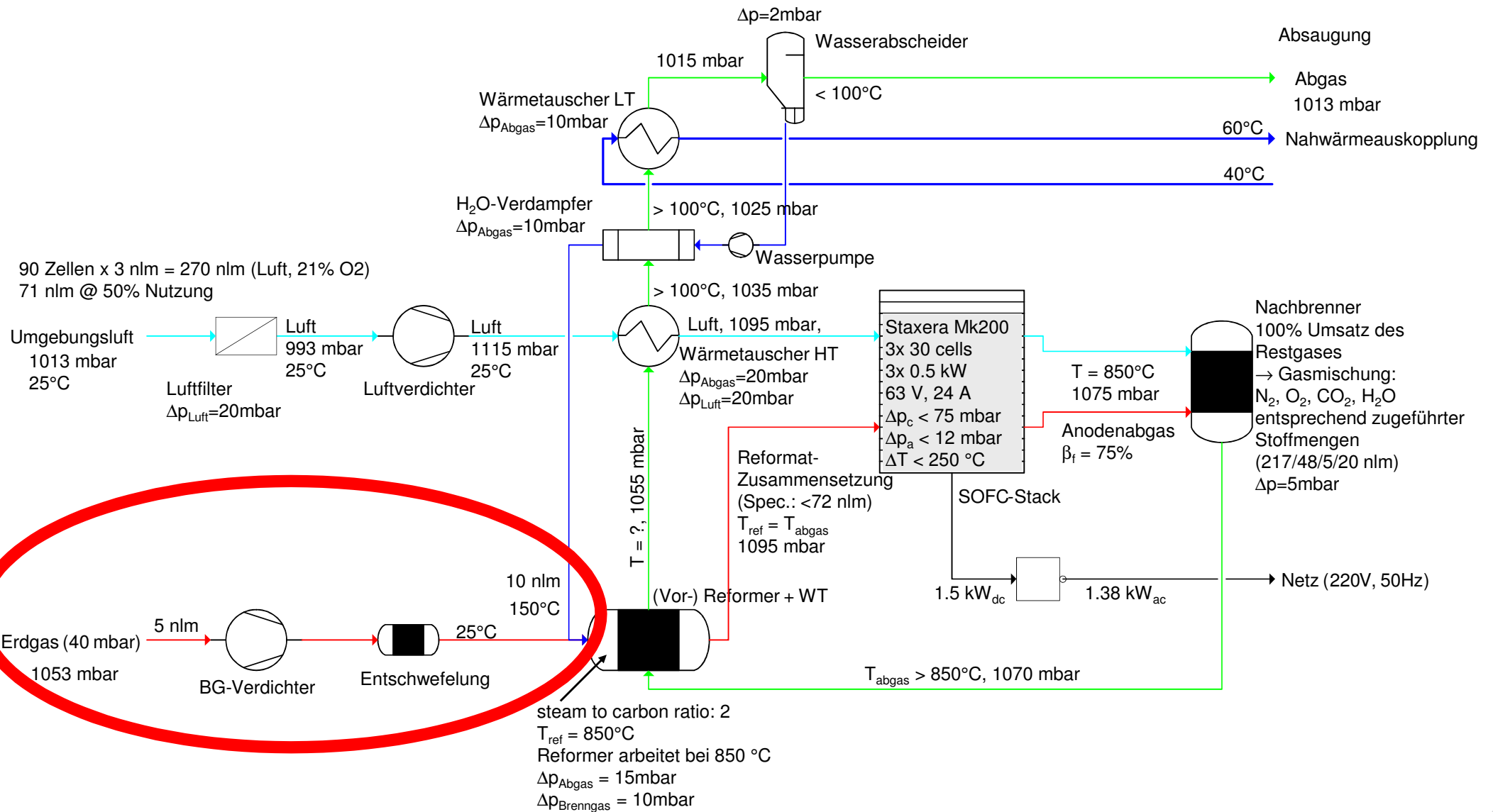
Temperaturabhängigkeit von C_p bei Gasen

Material	molare Masse in g/mol	a	b	c	d	C_p (25 °C) in J/(mol·K)	C_p (25 °C) in J/(g·K)
Wasserstoff	2,016	29,09	-0,8374	2,013	0,0000	29,0	14,4
Sauerstoff	32,00	27,96	4,180	-0,1670	0,0000	29,2	0,912
Stickstoff	28,01	28,30	2,537	0,5443	0,0000	28,8	1,03
Kohlenmonoxid	28,01	27,63	5,024	0,0000	0,0000	29,1	1,04
Kohlendioxid	44,01	21,57	63,74	-40,53	9,684	37,2	0,846
Wasser (gasförmig)	18,02	30,38	9,621	1,185	0,000	33,4	1,85
Metan	16,04	17,46	60,50	1,118	-7,210	35,4	2,21
Ethan	30,07	5,355	177,8	-68,75	8,520	52,5	1,75
n-Propan	44,10	-5,062	308,7	-161,9	33,33	73,5	1,67
n-Butan (gasförmig)	58,12	-0,05024	387,3	-201,0	40,64	98,6	1,70
n-Pentan (gasförmig)	72,15	0,4145	480,6	-255,2	52,85	122	1,70
n-Hexan (gasförmig)	86,18	1,792	570,9	-306,2	64,04	147	1,70



SOFC Brennstoffzellenheizgerät

Brenngasversorgung



3 Stacks a 500 W

je 30 Zellen a 0.7 V = 21 V Stackspannung

mittlere Stromdichte im Arbeitspunkt: $500 \text{ W} / 21 \text{ V} = 23.81 \text{ A}$

Brennstoffbedarf

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 2143 A @ $\beta_f = 100\%$

2521 A @ $\beta_f = 85\%$

2857 A @ $\beta_f = 75\%$

Stromäquivalent des benötigten Gases



Brenngasversorgung

3 Stacks a 500 W

je 30 Zellen a 0.7 V = 21 V Stackspannung

mittlere Stromdichte im Arbeitspunkt: 500 W / 21 V = 23.81 A

Umrechnung Strom in Gasfluss

elektrischer Strom: $I := 23.81 \text{ A}$ $I = 1.486 \times 10^{20} \frac{e_0}{s}$

Ladungszahl CH_4 : $n_{\text{CH}_4} := 8$

Zellenzahl: $n_{\text{cell}} := 3 \cdot 30$

Stoffmengenstrom CH_4 : $J_{\text{CH}_4} := \frac{n_{\text{cell}} \cdot I}{n_{\text{CH}_4} F}$ $J_{\text{CH}_4} = 2.776 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{s}$

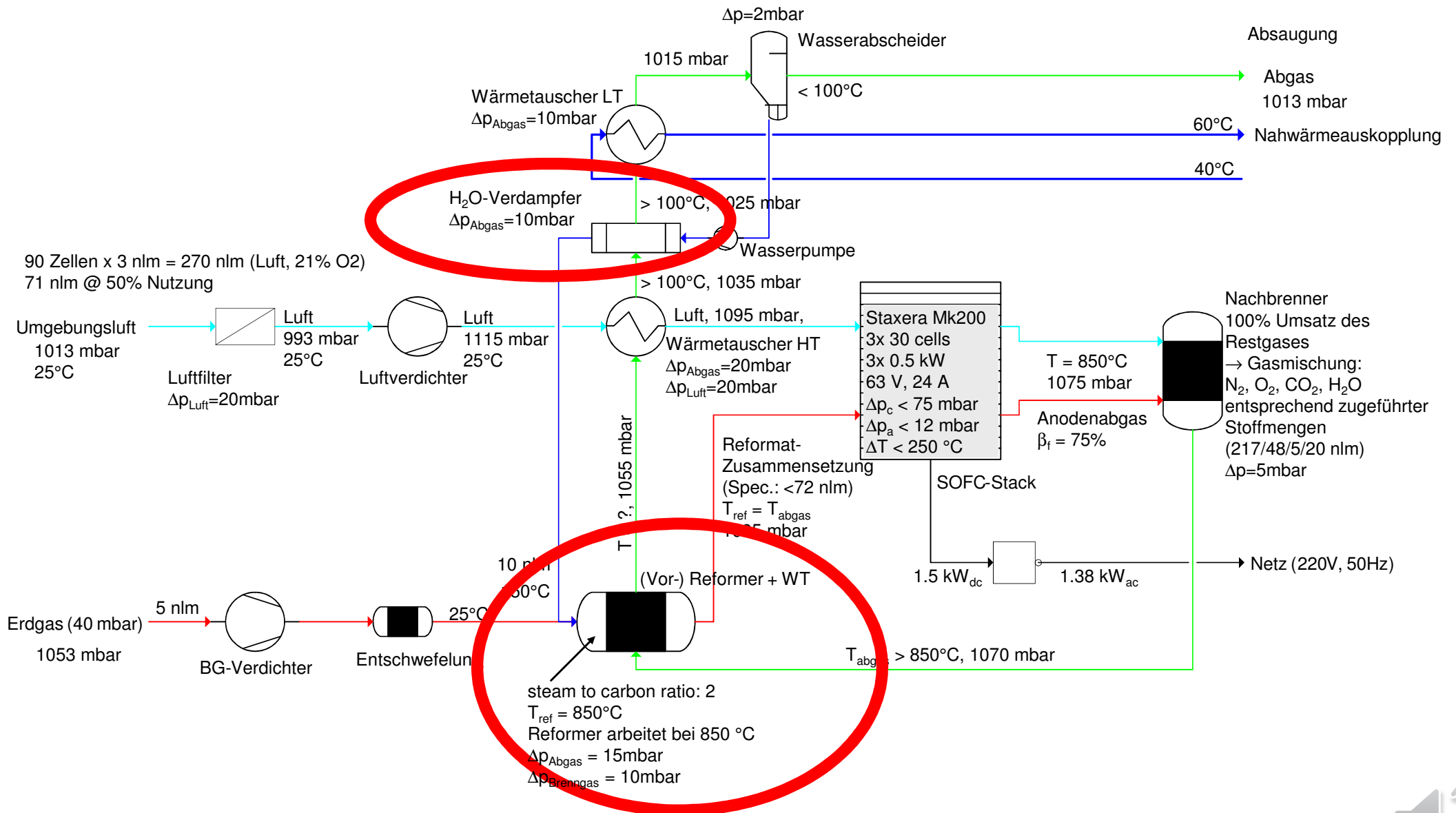
Gasfluss (flow rate): $\text{fr}_{\text{CH}_4} := J_{\text{CH}_4} \cdot V_{m0}$ $\text{fr}_{\text{CH}_4} = 3.733 \frac{\text{L}}{\text{min}}$

Brennstoffbedarf (Methan)

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 2143 A @ $\beta_f = 100\%$ dies entspricht 3.733 nlm CH_4
2521 A @ $\beta_f = 85\%$ dies entspricht 4.393 nlm
2857 A @ $\beta_f = 75\%$ dies entspricht 4.977 nlm $\approx$ 5 nlm

SOFC Brennstoffzellenheizgerät

Brenngastemperierung und Reformierung



Brenngastemperierung

Edukte Aufheizen

Brenngasausnutzung (β_f : fuel utilization): $\beta_f := 75\%$ $T_{ref} = 850^\circ\text{C}$

$$\text{fr}_{\text{CH}_4} := \frac{\text{fr}_{\text{CH}_4}}{\beta_f} \quad \text{fr}_{\text{CH}_4} = 4.977 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$W_{\text{CH}_4}(T) := \int_{T_U}^T c_{p\text{CH}_4}(\tau) d\tau \quad W_{\text{CH}_4}(T_{ref}) = 47.539 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$P_{\text{CH}_4\text{heat}}(T) := \frac{\text{fr}_{\text{CH}_4}}{V_{m0}} \cdot W_{\text{CH}_4}(T) \quad P_{\text{CH}_4\text{heat}}(T_{ref}) = 176 \cdot \text{W}$$

Reformierung - Wasserdampf/Kohlenstoff-Verhältnis (SCR: Steam to Carbon Ratio) $\text{SCR} := 2$

$$\text{fr}_{\text{H}_2\text{O}} := \text{SCR} \cdot \text{fr}_{\text{CH}_4} \quad \text{fr}_{\text{H}_2\text{O}} = 9.954 \cdot \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}}(T) := \int_{T_U}^T c_{p\text{H}_2\text{O}}(\tau) d\tau + \Delta H_{\text{H}_2\text{O}lg}(T)$$

$$\text{Verdampfung des Wassers bei } 100^\circ\text{C: } \Delta H_{\text{H}_2\text{O}lg}(T_{lg}) = 40661.465 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\text{Verdampfer (25}^\circ\text{C auf 120}^\circ\text{C): } T_{eva} = 120^\circ\text{C} \quad W_{\text{H}_2\text{O}}(T_{eva}) = 46.997 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\text{Aufheizen auf } T_{ref}: \quad W_{\text{H}_2\text{O}}(T_{ref}) - W_{\text{H}_2\text{O}}(T_{eva}) = 28.038 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\text{Wärmeleistung gesamt: } P_{\text{H}_2\text{Oheat}}(T) := \frac{\text{fr}_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{m0}} \cdot W_{\text{H}_2\text{O}}(T) \quad P_{\text{H}_2\text{Oheat}}(T_{ref}) = 555 \cdot \text{W}$$

$$\text{Wärmeleistung Verdampfer: } P_{\text{H}_2\text{Oeva}}(T) := \frac{\text{fr}_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{m0}} \cdot W_{\text{H}_2\text{O}}(T) \quad P_{\text{H}_2\text{Oeva}}(T_{eva}) = 348 \cdot \text{W}$$

Wassermenge bezogen auf gasförmigen Zustand, ideales Gas



Reformierung

Dampfreformierung: $\text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}_2 + \text{CO}_2$

dies entspräche: 20 nlm H_2 + 5 nlm CO_2 aus 5 nlm CH_4 + 10 nlm H_2O

Brennstoffbedarf

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A $\rightarrow$ **2857 A @ $\beta_f = 75\%$** dies entspricht **4.978 nlm $\approx$ 5 nlm CH_4**

Der Brennstoff (Annahme: reines Methan) wird mit einem S/C-Verhältnis von 2 extern reformiert, d.h. 5 nlm CH_4 + 10 nlm H_2O

Annahme: die Reformier-Wärmetauscher- und Verdampfer-Einheit arbeitet isotherm bei $T_{\text{ref}} = 850^\circ\text{C}$

(optimale Wärmeversorgung über Abgasstrang)

Methan aufheizen: $25^\circ\text{C} \rightarrow T_{\text{ref}}$ 176 W

Wasser aufheizen: $25^\circ\text{C} \rightarrow T_{\text{ref}}$ 555 W

Wärmebedarf Reformierung

Reformierung @ T_{ref} :

Dampfreformierung: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ $\Delta_R H_{298\text{K}}^0 = 206.1 \text{ kJ/mol}$

CO-Shift: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ $\Delta_R H_{298\text{K}}^0 = -41.2 \text{ kJ/mol}$

$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$ $\Delta_R H_{298\text{K}}^0 = 164.9 \text{ kJ/mol}$



Reformierung

Enthalpien Reaktanden und Reaktionsprodukte

Standardbildungsenthalpie bei 25 °C (298 K) / 1 atm

$$T_U = 298.15 \text{ K}$$

$$H_{f,CH_4} := -74850 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$H_{f,O_2} := 0 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$H_{f,CO} := -110500 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$H_{f,CO_2} := -393510 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$H_{f,H_2} := 0 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$H_{f,H_2O} := -285840 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Verdampfungsenthalpie H_2O : $\Delta H_{H_2O,lg}(T_U) = 44.018 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ $\Delta H_{H_2O,lg}(T_{lg}) = 40.661 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

Enthalpien $H(T)$:

$$H_{f,CH_4}(T) := H_{f,CH_4} + \int_{T_U}^T c_{p,CH_4}(\tau) d\tau$$

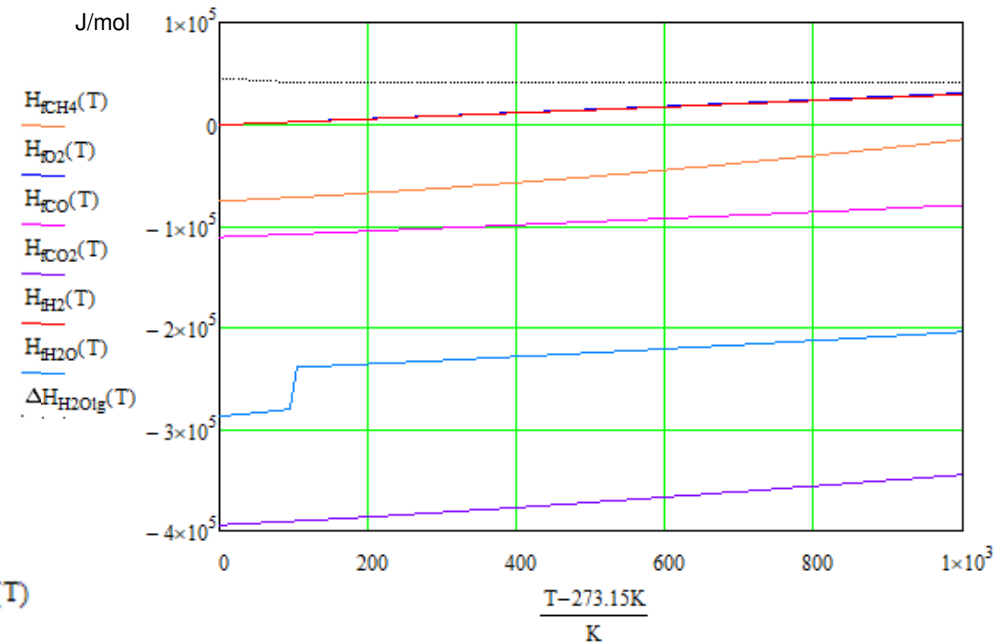
$$H_{f,O_2}(T) := H_{f,O_2} + \int_{T_U}^T c_{p,O_2}(\tau) d\tau$$

$$H_{f,CO}(T) := H_{f,CO} + \int_{T_U}^T c_{p,CO}(\tau) d\tau$$

$$H_{f,CO_2}(T) := H_{f,CO_2} + \int_{T_U}^T c_{p,CO_2}(\tau) d\tau$$

$$H_{f,H_2}(T) := H_{f,H_2} + \int_{T_U}^T c_{p,H_2}(\tau) d\tau$$

$$H_{f,H_2O}(T) := H_{f,H_2O} + \int_{T_U}^T c_{p,H_2O}(\tau) d\tau + \Delta H_{H_2O,lg}(T)$$



Reformierung

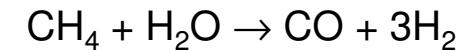
Reaktionsenthalpien

Reaktionsenthalpie:

$$T_U = 298.15 \text{ K} \quad T_{\text{ref}} = 850 \text{ °C}$$

Dampfpreformierung: $\Delta H_{\text{rSR}}(T) := -H_{\text{rCH}_4}(T) - H_{\text{rH}_2\text{O}}(T) - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{O}^{\text{O}}}(T) + 3 \cdot H_{\text{rH}_2}(T) + H_{\text{rCO}}(T)$

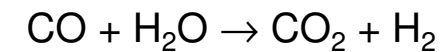
$$\Delta H_{\text{rSR}}(T_U) = 206.172 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \Delta H_{\text{rSR}}(T_{\text{ref}}) = 226.68 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$



$\Delta H_r > 0 \rightarrow$ endotherm

CO-Shiftreaktion: $\Delta H_{\text{rSH}}(T) := -H_{\text{rCO}}(T) - H_{\text{rH}_2\text{O}}(T) - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{O}^{\text{O}}}(T) + H_{\text{rH}_2}(T) + H_{\text{rCO}_2}(T)$

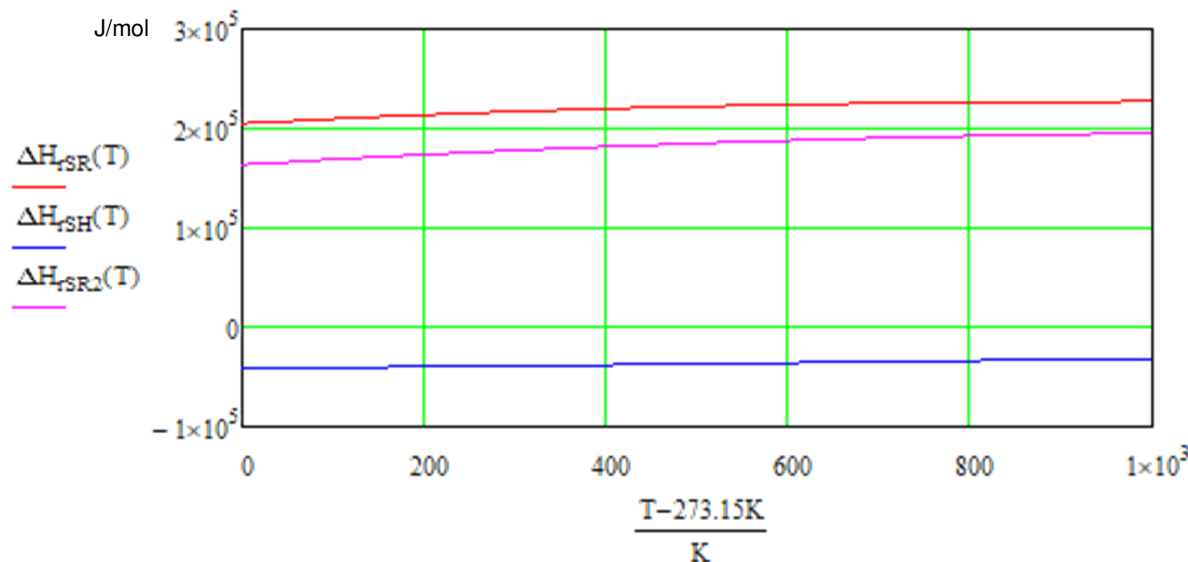
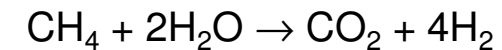
$$\Delta H_{\text{rSH}}(T_U) = -41.188 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \Delta H_{\text{rSH}}(T_{\text{ref}}) = -33.289 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$



$\Delta H_r < 0 \rightarrow$ exotherm

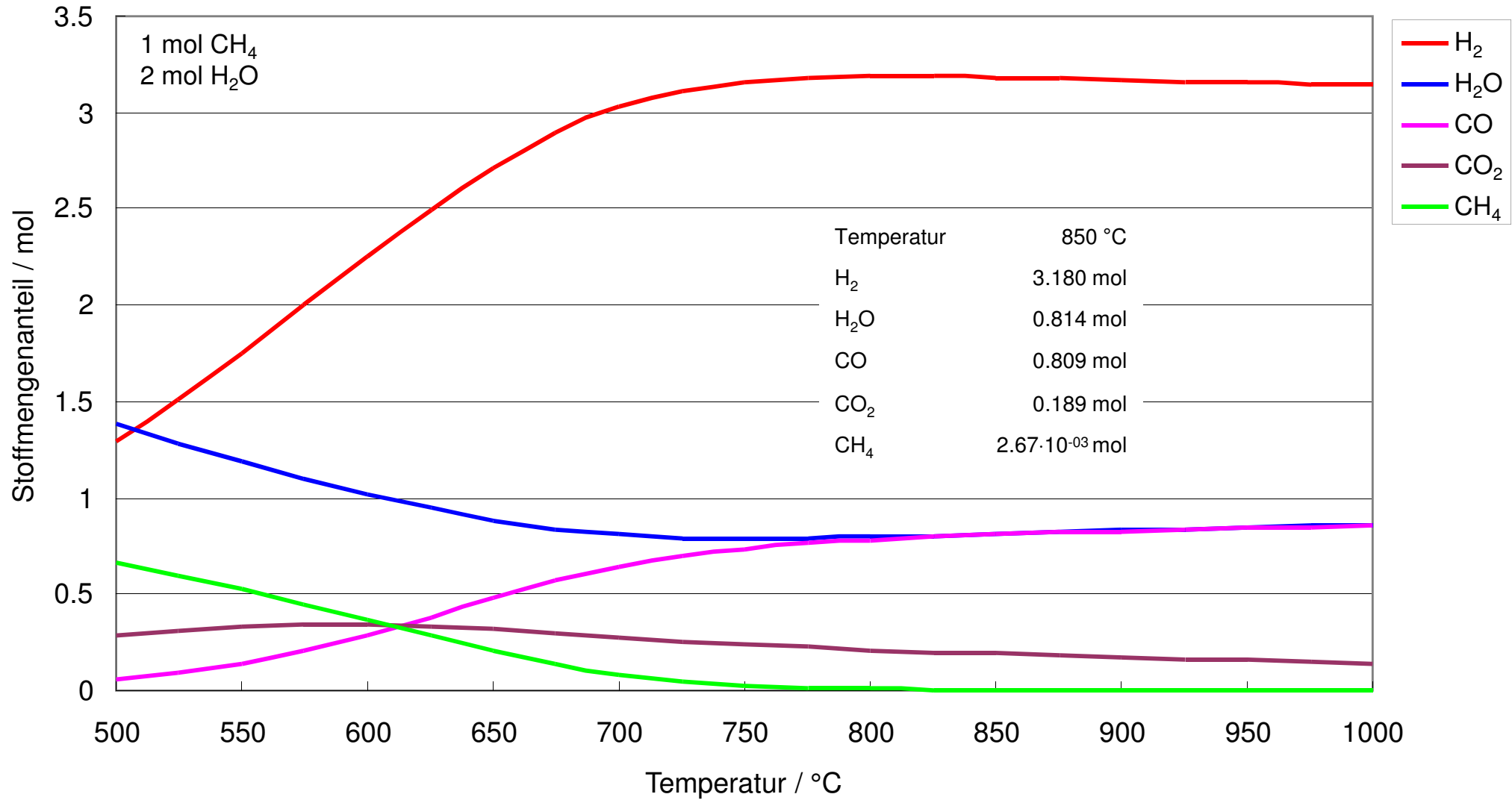
DR+CO-Shift: $\Delta H_{\text{rSR2}}(T) := -H_{\text{rCH}_4}(T) - 2(H_{\text{rH}_2\text{O}}(T) + \Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{O}^{\text{O}}}(T)) + 4 \cdot H_{\text{rH}_2}(T) + 1 \cdot H_{\text{rCO}_2}(T)$

$$\Delta H_{\text{rSR2}}(T_U) = 164.984 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad \Delta H_{\text{rSR2}}(T_{\text{ref}}) = 193.392 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$



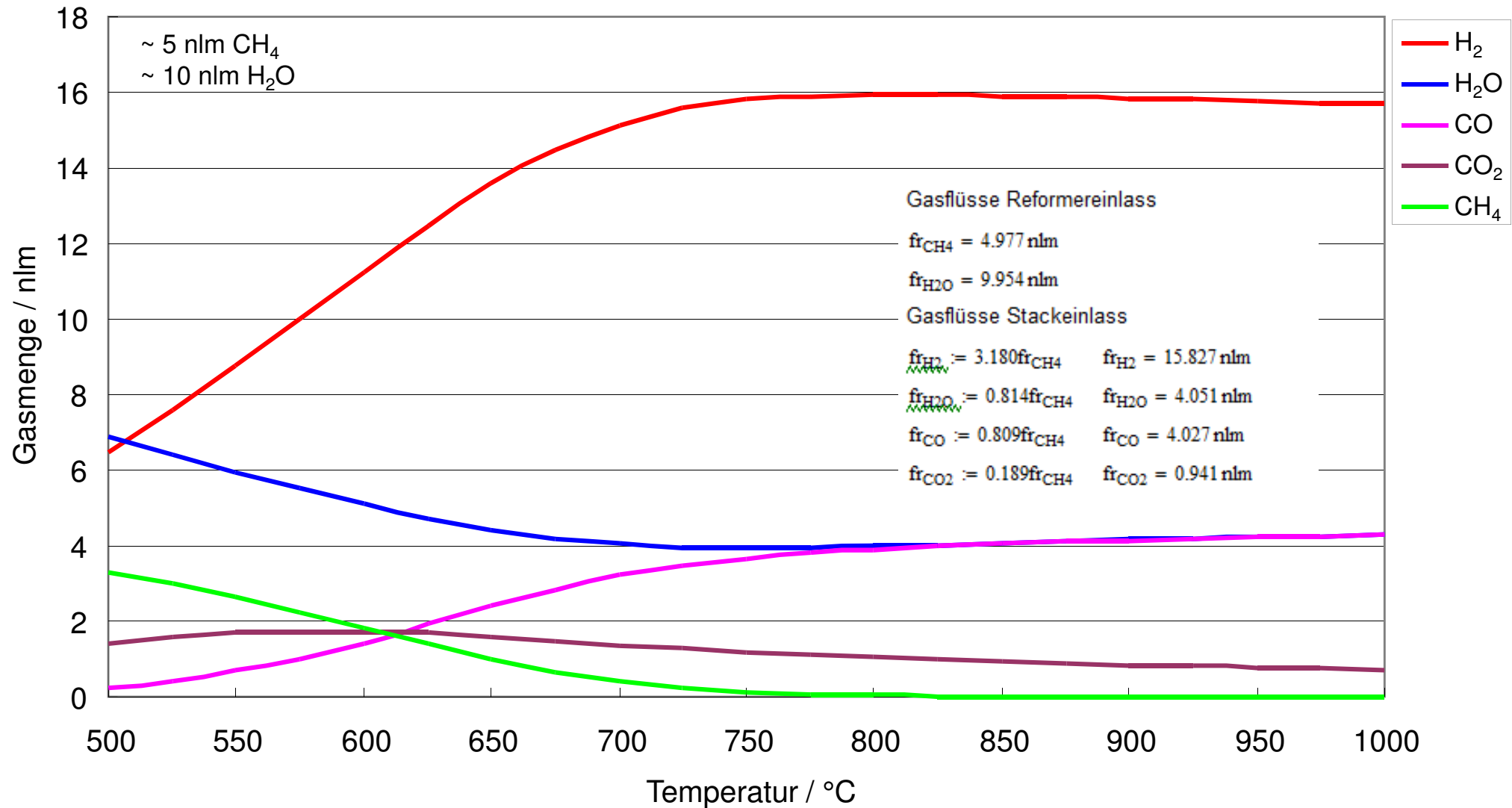
Reformierung

Gleichgewichtszusammensetzung (Dampfreformierung, $\text{SCR} = 2$)



Reformierung

Gasfluss Reformat (Dampfreformierung, SCR = 2)



Reformierung

Wärmeleistungsbedarf

Reformer (isotherm bei T_{ref} , Reaktanden und Produkte im Gleichgewicht):

Methan (5 nlm) aufheizen von T_U auf T_{ref} : $P_{CH_4heat}(T_{ref}) = 176 \cdot W$

Wasser (10 nlm) aufheizen von T_U auf T_{ref} : $P_{H_2Oheat}(T_{ref}) = 555 \cdot W$ inkl. Verdampfung bei $100^\circ C$

Reformierung bei $T_{ref} = 850 \cdot ^\circ C$

$$\Delta H_{rRef}(T) := -H_{fCH_4}(T) - (2 - 0.814)H_{fH_2O}(T) + 3.18 \cdot H_{fH_2}(T) + 0.809 H_{fCO}(T) + 0.189 \cdot H_{fCO_2}(T)$$

$$\Delta H_{rRef}(T_{ref}) = 219.706 \cdot \frac{kJ}{mol}$$

Stoffmenge (5 nlm Methan) $\dot{m}_{CH_4} = 4.977 \cdot \frac{L}{min}$ $\frac{\dot{m}_{CH_4}}{V_{m0}} = 0.222 \cdot \frac{mol}{min}$

$$P_{ref}(T) := \Delta H_{rRef}(T) \cdot \frac{\dot{m}_{CH_4}}{V_{m0}} \quad P_{ref}(T_{ref}) = 813.263 \cdot W \quad P_{ref}(T_U) = 925.727 \cdot W$$

Leistungsbedarf Reformierung: $P_{heatfuel} := P_{CH_4heat}(T_{ref}) + P_{H_2Oheat}(T_{ref}) + P_{ref}(T_{ref}) \quad P_{heatfuel} = 1.545 \cdot kW$

Temperatur	850 °C
H ₂	3.180 mol
H ₂ O	0.814 mol
CO	0.809 mol
CO ₂	0.189 mol
CH ₄	2.67 · 10 ⁻⁰³ mol

Reformierung Gasleistungen

Reaktionsenthalpien bei Oxidation

$$\Delta H_{rCH4ox}(T) := -H_{fCH4}(T) - 2H_{fO2}(T) + H_{fCO2}(T) + 2H_{fH2O}(T) \quad \Delta H_{rCH4ox}(T_{ref}) = -798.474 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_{rH2ox}(T) := -H_{fH2}(T) - 0.5 \cdot H_{fO2}(T) + H_{fH2O}(T) \quad \Delta H_{rH2ox}(T_{ref}) = -247.966 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_{rCOox}(T) := -H_{fCO}(T) - 0.5 \cdot H_{fO2}(T) + H_{fCO2}(T) \quad \Delta H_{rCOox}(T_{ref}) = -281.255 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$P_{HCH4Sysin}(T) := -\frac{fr_{CH4}}{V_{m0}} \cdot \Delta H_{rCH4ox}(T) \quad P_{HCH4Sysin}(T_U) = 3.296 \cdot \text{kW} \quad \text{berücksichtigt Kondensationswärme}$$

$$P_{HH2Stackin}(T) := -\frac{fr_{H2}}{V_{m0}} \cdot \Delta H_{rH2ox}(T) \quad P_{HH2Stackin}(T_{ref}) = 2.919 \cdot \text{kW}$$

$$P_{HCOStackin}(T) := -\frac{fr_{CO}}{V_{m0}} \cdot \Delta H_{rCOox}(T) \quad P_{HCOStackin}(T_{ref}) = 0.842 \cdot \text{kW}$$

Gasleistungen (Reaktionsenthalpien)

$$\text{Gasleistung System ein: } P_{Sysin}(T) := P_{HCH4Sysin}(T) \quad P_{Sysin}(T_U) = 3.296 \cdot \text{kW}$$

$$\text{Gasleistung Stack ein: } P_{HStackin}(T) := P_{HH2Stackin}(T) + P_{HCOStackin}(T) \quad P_{HStackin}(T_{ref}) = 3.761 \cdot \text{kW}$$

$$\eta_{ref} := \frac{P_{HStackin}(T_{ref})}{P_{Sysin}(T_U)} \quad \eta_{ref} = 114.121 \%$$

Gasflüsse Reformereinlass

$$fr_{CH4} = 4.977 \text{ nlm}$$

$$fr_{H2O} = 9.954 \text{ nlm}$$

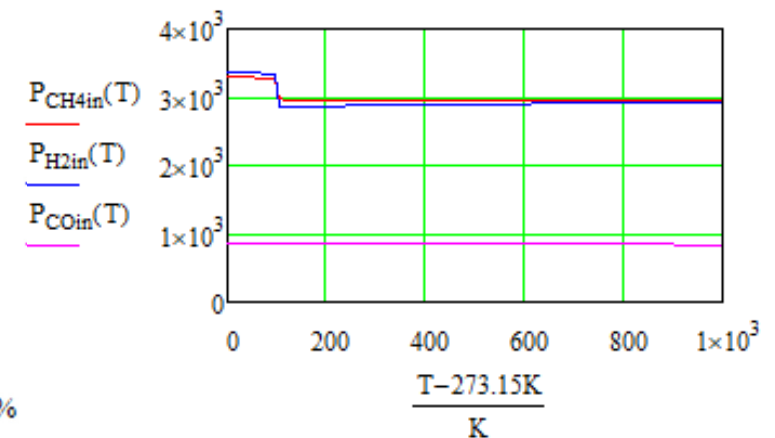
Gasflüsse Stackeinlass

$$fr_{H2} := 3.180 fr_{CH4} \quad fr_{H2} = 15.827 \text{ nlm}$$

$$fr_{H2O} := 0.814 fr_{CH4} \quad fr_{H2O} = 4.051 \text{ nlm}$$

$$fr_{CO} := 0.809 fr_{CH4} \quad fr_{CO} = 4.027 \text{ nlm}$$

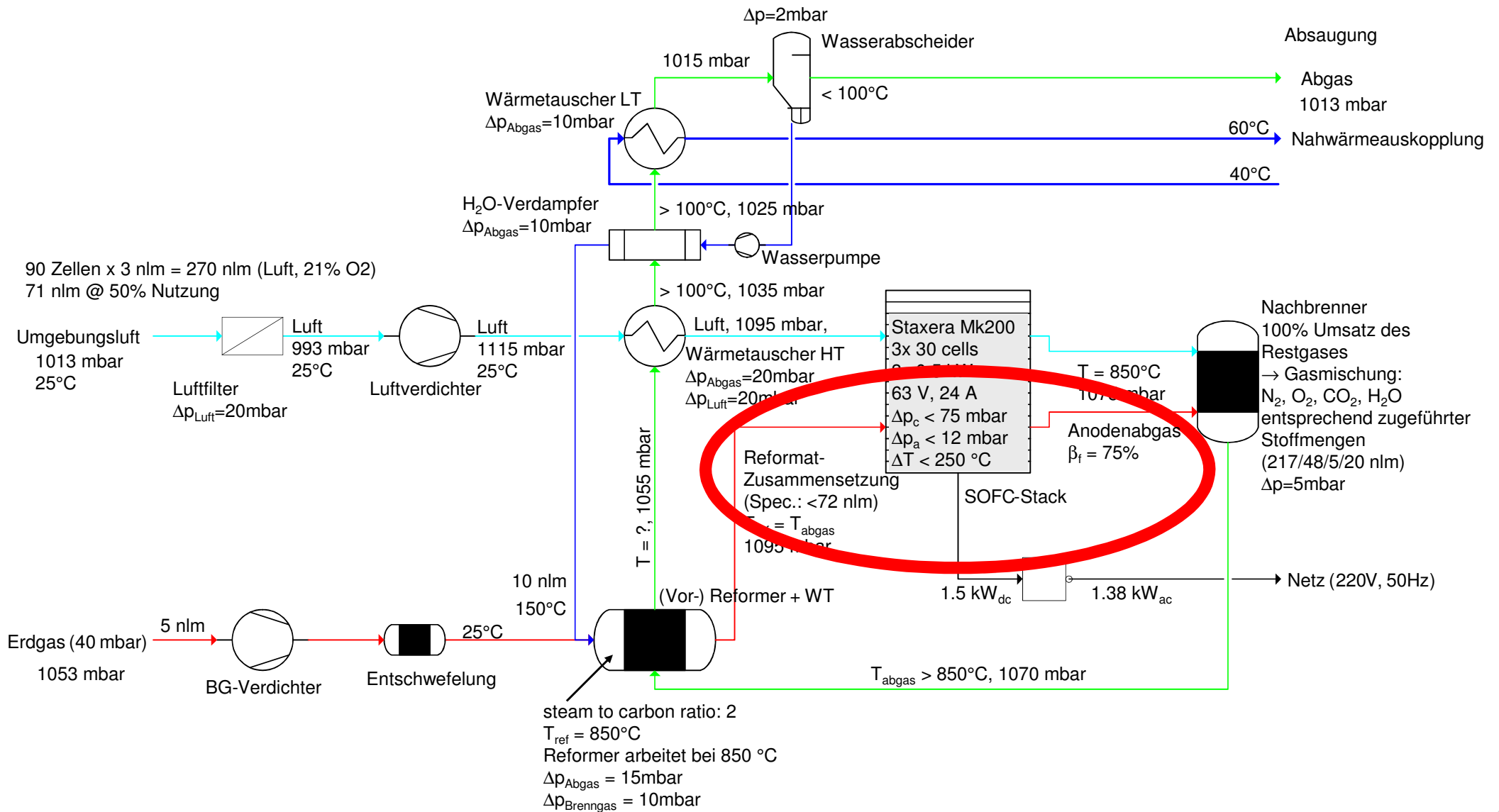
$$fr_{CO2} := 0.189 fr_{CH4} \quad fr_{CO2} = 0.941 \text{ nlm}$$



Endotherme Dampfreformierung erhöht den Energiegehalt des Brenngases um die aufgenommene Wärme.
Reformerwirkungsgrad (nach Definition) >1.

SOFC Brennstoffzellenheizgerät

Reformatumsatz im Stack



Reformatumsatz im Stack

Freie Reaktionsenthalpie und -entropie

Reaktionsentropien:

$$\Delta S_{rH2ox}(T) := -S_{H2}(T) - 0.5 \cdot S_{O2}(T) + S_{H2O}(T)$$

$$T_{ref} \Delta S_{rH2ox}(T_{ref}) = -61.982 \text{ K} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta S_{rCOox}(T) := -S_{CO}(T) - 0.5 \cdot S_{O2}(T) + S_{CO2}(T)$$

$$T_{ref} \Delta S_{rCOox}(T_{ref}) = -96.549 \text{ K} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$S_{H2}(T) := S_{0H2} + \int_{T_U}^T \frac{c_{pH2}(\tau)}{\tau} d\tau$$

freie Reaktionsenthalpie:

$$\Delta G_{rH2ox}(T) := \Delta H_{rH2ox}(T) - T \cdot \Delta S_{rH2ox}(T)$$

$$\Delta G_{rH2ox}(T_{ref}) = -185.985 \text{ K} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta G_{rCOox}(T) := \Delta H_{rCOox}(T) - T \cdot \Delta S_{rCOox}(T)$$

$$\Delta G_{rCOox}(T_{ref}) = -184.706 \text{ K} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Reaktionsentropie BG-Oxidation - Wärme:

$$P_{SH2Stackin}(T) := -\frac{\dot{f}_{rH2}}{V_{m0}} \cdot \Delta S_{rH2ox}(T) \cdot T$$

$$P_{SH2Stackin}(T_{ref}) = 729.591 \cdot \text{W}$$

$$P_{SCOSStackin}(T) := -\frac{\dot{f}_{rCO}}{V_{m0}} \cdot \Delta S_{rCOox}(T) \cdot T$$

$$P_{SCOSStackin}(T_{ref}) = 289.125 \cdot \text{W}$$

$$P_{SStackin}(T) := P_{SH2Stackin}(T) + P_{SCOSStackin}(T)$$

$$P_{SStackin}(T_{ref}) = 1.019 \text{ kW}$$

wird als Wärme abgeführt

freie Reaktionsenthalpie BG-Oxidation - max. el. Leistung:

$$P_{GH2Stackin}(T) := -\frac{\dot{f}_{rH2}}{V_{m0}} \cdot \Delta G_{rH2ox}(T)$$

$$P_{GH2Stackin}(T_{ref}) = 2.189 \cdot \text{kW}$$

$$P_{GCOSStackin}(T) := -\frac{\dot{f}_{rCO}}{V_{m0}} \cdot \Delta G_{rCOox}(T)$$

$$P_{GCOSStackin}(T_{ref}) = 0.553 \cdot \text{kW}$$

$$P_{GStackin}(T) := P_{GH2Stackin}(T) + P_{GCOSStackin}(T)$$

$$P_{GStackin}(T_{ref}) = 2.742 \text{ kW}$$

kann in el. Energie gewandelt werden

Stack- und Systemwirkungsgrad

Brenngasausnutzung

$$\beta_f = 0.75$$

genutzte freie Reaktionsenthalpie im Stack: $\beta_f \cdot P_{GStackin}(T_{ref}) = 2.057 \cdot kW$

Wärme durch Entropie: $\beta_f \cdot P_{SStackin}(T_{ref}) = 0.764 \cdot kW$

Wärme im Nachbrenner: $P_{NBin} := (1 - \beta_f) \cdot P_{HStackin}(T_{ref}) \quad P_{NBin} = 0.94 \cdot kW$

3 Stacks a 500 W $\rightarrow$ el. Leistung aus: 1.5 kW

$$P_{elStack} := 1.5 kW$$

$$P_{VelStack} := \beta_f \cdot P_{GStackin}(T_{ref}) - P_{elStack} \quad P_{VelStack} = 0.557 \cdot kW$$

Brennwert zugeführtes Methan: $fr_{CH_4} = 4.977 \cdot nlm$

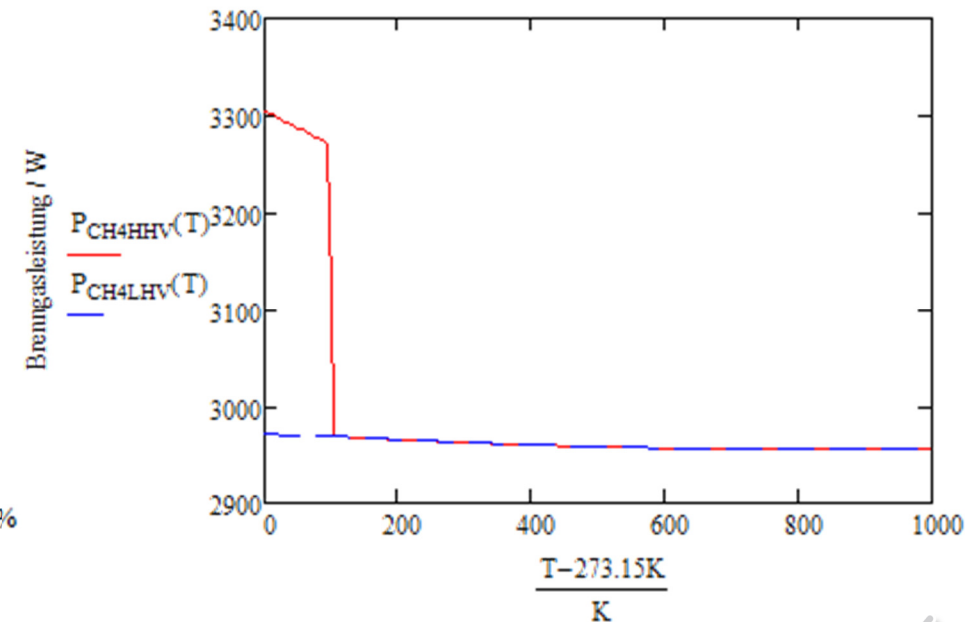
$$\Delta H_{rCH_4ox}(T_U) = -890.34 \cdot \frac{kJ}{mol} \quad P_{cond}(T) := \frac{fr_{CH_4}}{V_{m0}} \cdot 2 \Delta H_{H_2Olglt}(T)$$

$$P_{CH_4HHV}(T) := \frac{fr_{CH_4}}{V_{m0}} \cdot -\Delta H_{rCH_4ox}(T) \quad P_{CH_4LHV}(T) := P_{CH_4HHV}(T) - P_{cond}(T)$$

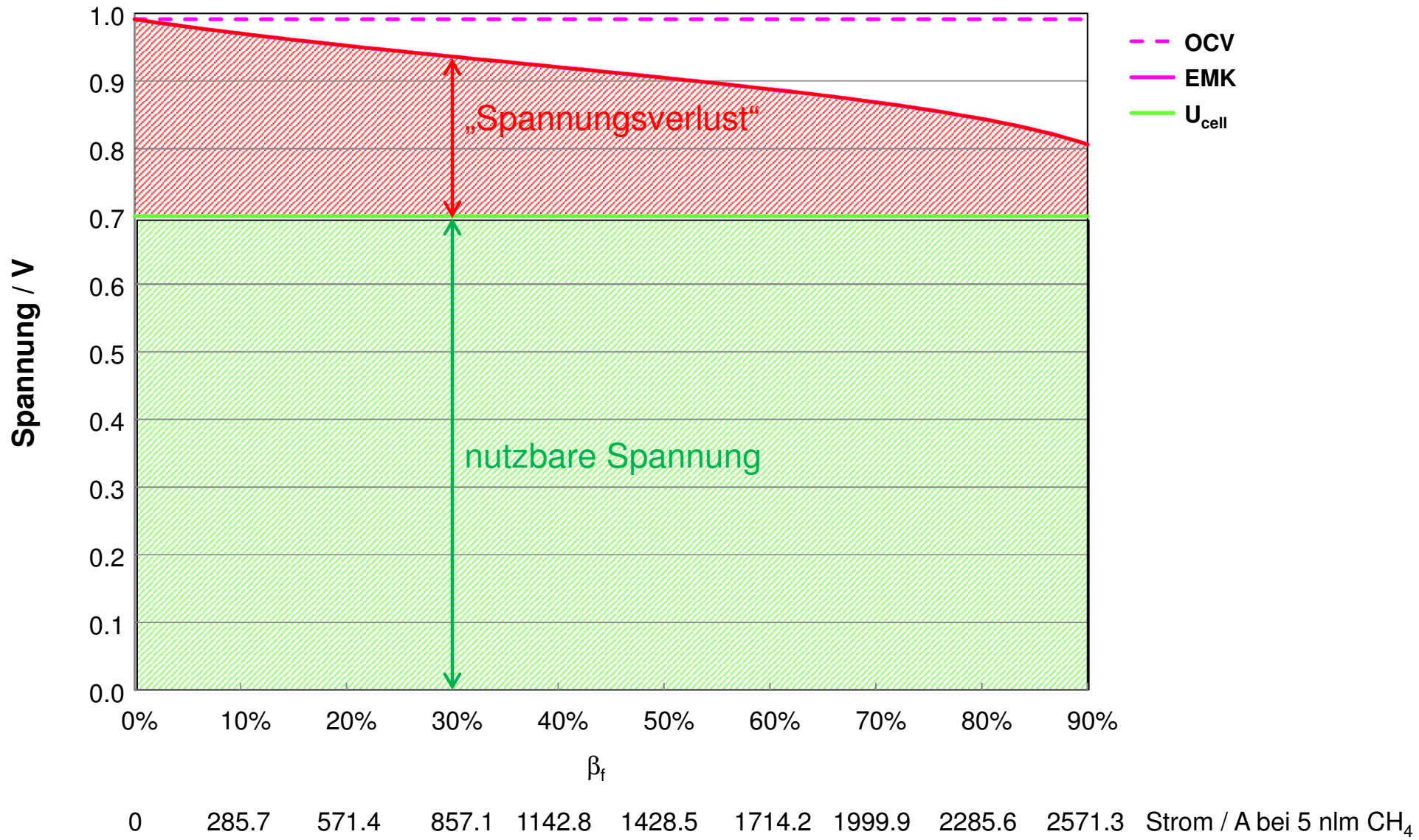
$$P_{CH_4HHV}(T_U) = 3.296 \cdot kW \quad P_{CH_4LHV}(T_U) = 2.97 \cdot kW$$

Wirkungsgrad bezogen auf Brennwert / Heizwert

$$\eta_{elHHV} := \frac{P_{elStack}}{P_{CH_4HHV}(T_U)} \quad \eta_{elHHV} = 45.514 \% \quad \eta_{elLHV} := \frac{P_{elStack}}{P_{CH_4LHV}(T_U)} \quad \eta_{elLHV} = 50.508 \%$$

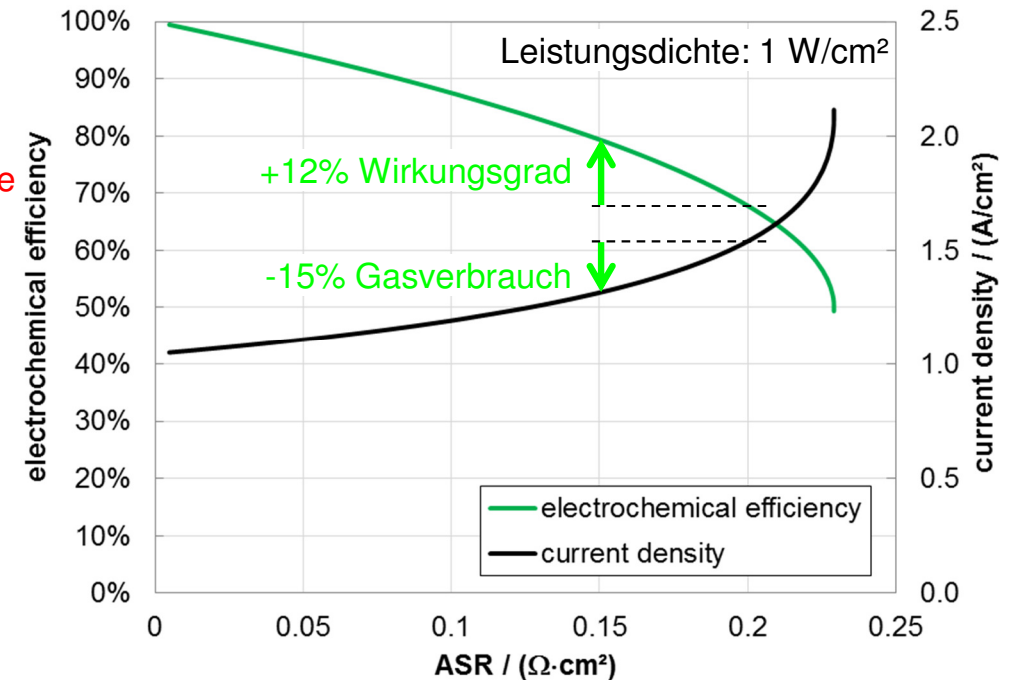
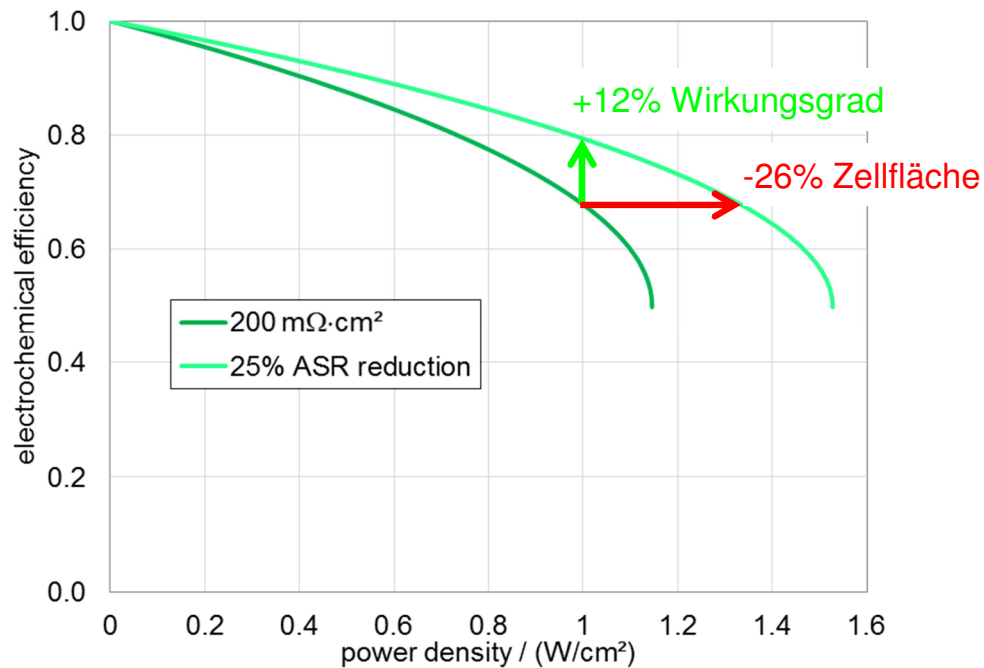


OCV, EMK und Arbeitsspannung



Elektrochemischer Wirkungsgrad

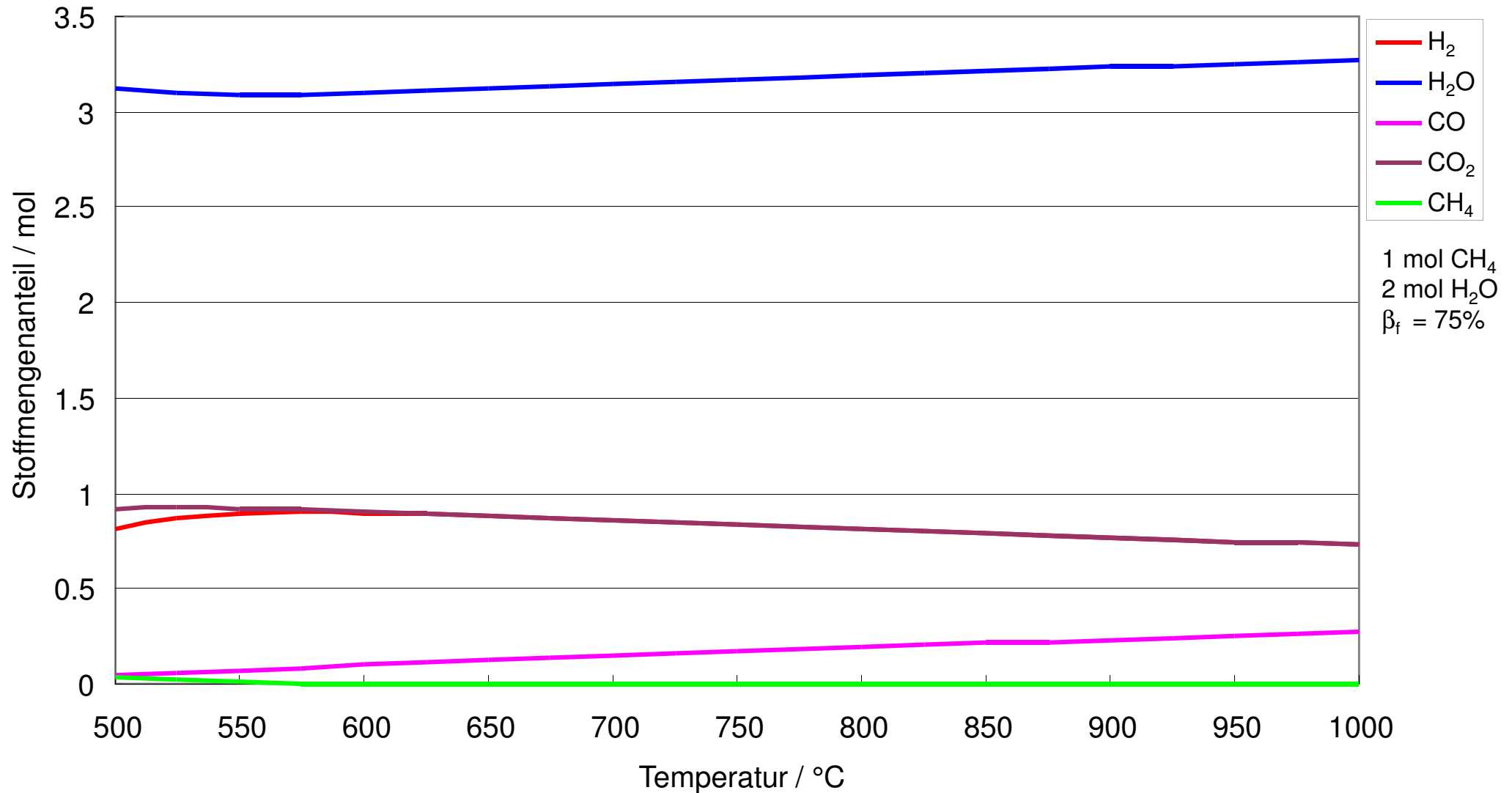
Einfluss des Innenwiderstandes der Zelle



ASR: area specific resistance (flächenspezifischer Widerstand in $\Omega\cdot\text{cm}^2$)

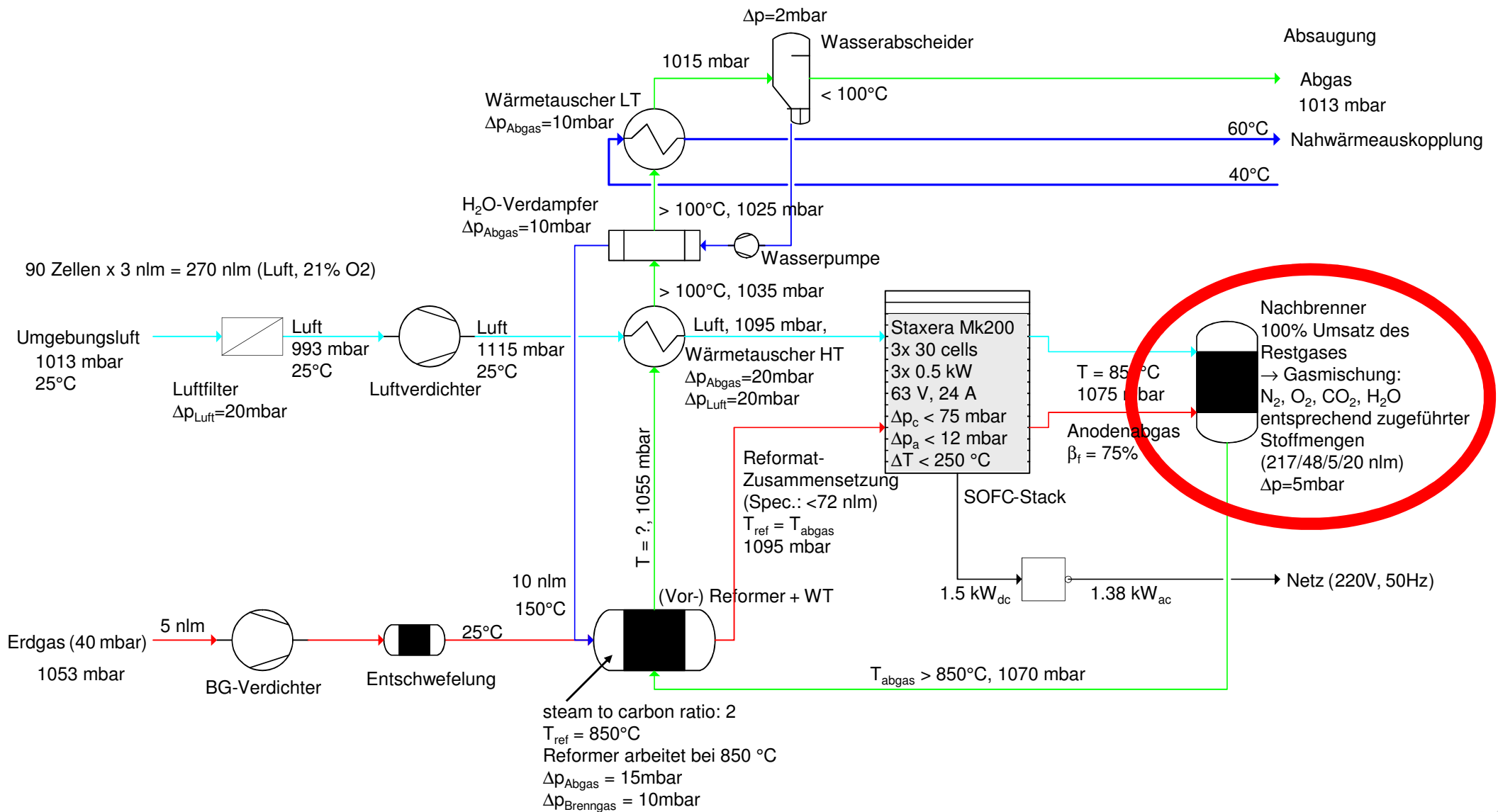
Brenngasumsatz

Gleichgewichtszusammensetzung des Anodenabgases



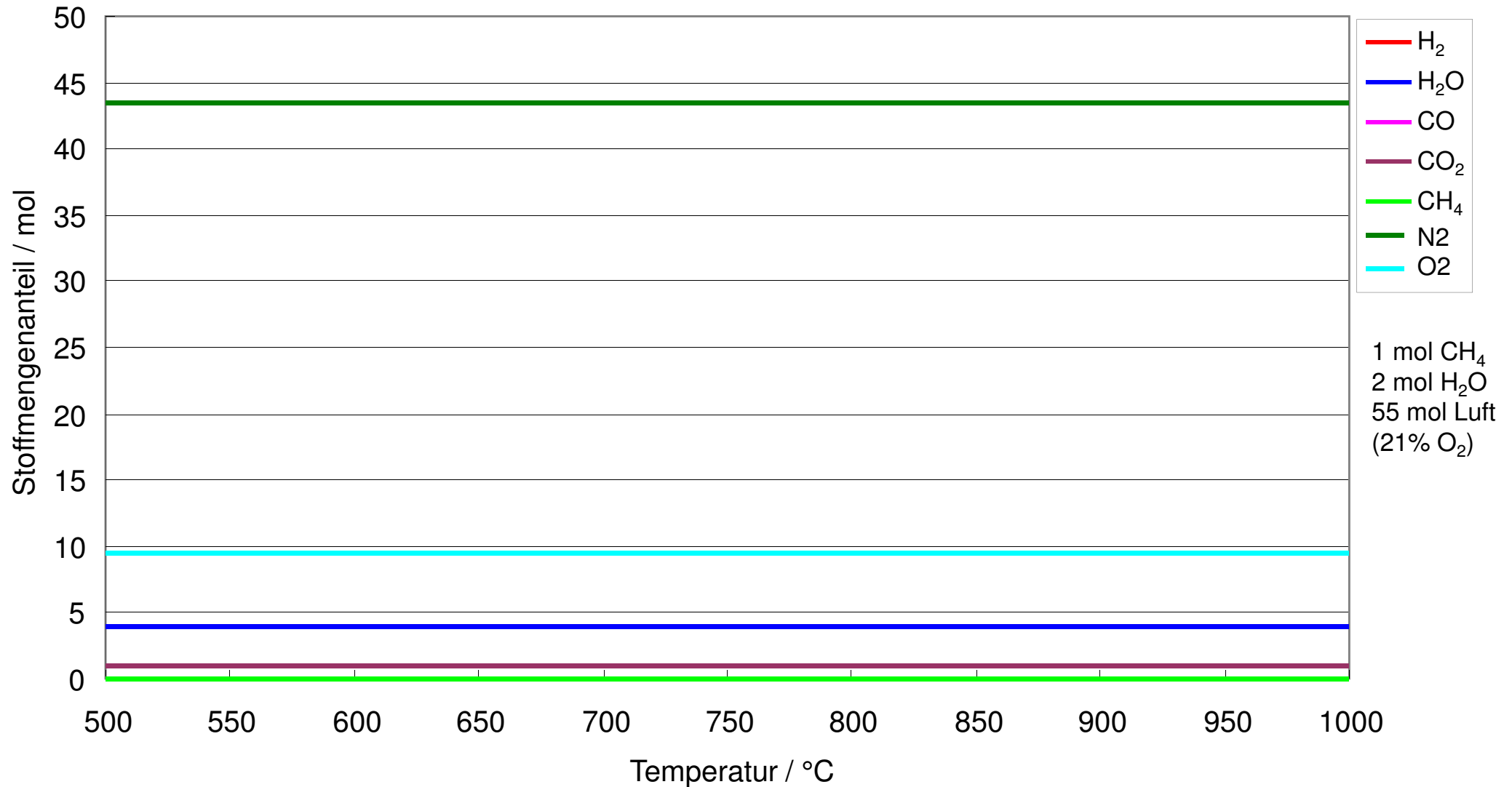
SOFC Brennstoffzellenheizgerät

Luftvorwärmung und Stackkühlung



Brenngasumsatz

Gleichgewichtszusammensetzung des Nachbrennerabgases



Wärmeproduktion Stack: Verluste + Reaktionsentropie

$$P_{thStack} := P_{VelStack} + \beta_f \cdot P_{SStackin}(T_{ref}) \quad P_{thStack} = 1.321 \text{ kW}$$

$$P_{HStackin}(T_{ref}) - P_{elStack} - P_{NBin} = 1.321 \text{ kW}$$

Wärmeproduktion Nachbrenner:

$$P_{NBin} = 0.94 \text{ kW}$$

abgeführt: $P_{NBout} := P_{thStack} + P_{NBin} \quad P_{NBout} = 2.261 \text{ kW}$

Gasflüsse

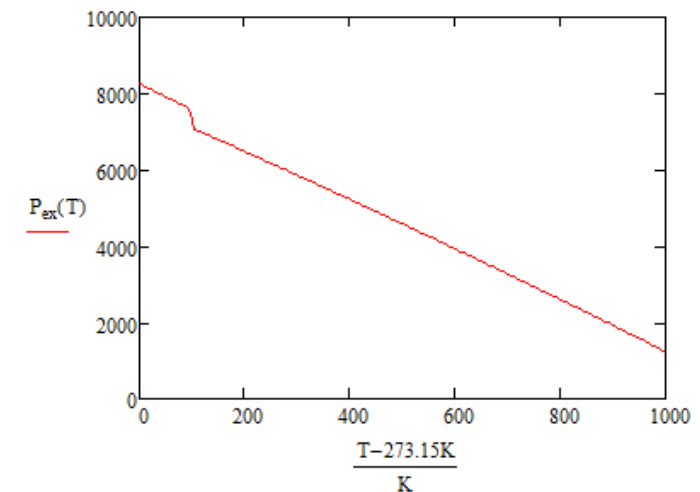
$$\begin{aligned} fr_{CH_4} &= 4.977 \text{ nlm} & fr_{CO_2out} &:= fr_{CH_4} & fr_{CO_2out} &= 4.977 \text{ nlm} \\ fr_{H_2Oin} &:= 2 \cdot fr_{CH_4} & fr_{H_2Oout} &:= fr_{H_2Oin} + 2 \cdot fr_{CH_4} & fr_{H_2Oout} &= 19.909 \text{ nlm} \\ fr_{air} &= 270 \text{ nlm} \\ fr_{O_2in} &:= 21\% \cdot fr_{air} & fr_{O_2in} &= 56.7 \text{ nlm} & fr_{O_2out} &:= fr_{O_2in} - 4 \cdot fr_{CH_4} & fr_{O_2out} &= 36.791 \text{ nlm} \\ fr_{N_2in} &:= 79\% \cdot fr_{air} & fr_{N_2in} &= 213.3 \text{ nlm} & fr_{N_2out} &:= fr_{N_2in} & fr_{N_2out} &= 213.3 \text{ nlm} \end{aligned}$$

Abgas: abgegeben Wärmeleistung bei Abkühlung von T_{NBout} nach T : $T_{NBout} := 1176.2 \text{ °C}$

$$P_{ex}(T) := \frac{-1}{V_{m0}} \int_{T_{NBout}}^T fr_{CO_2out} \cdot c_{pCO_2}(\tau) + fr_{H_2Oout} \cdot c_{pH_2O}(\tau) + fr_{O_2out} \cdot c_{pO_2}(\tau) + fr_{N_2out} \cdot c_{pN_2}(\tau) d\tau + \Phi(T_{lg} - T) \cdot P_{cond}$$

Wärmeleistung Nachbrennerausgang $P_{ex}(T_{Stackout}) = 2.26 \text{ kW}$

Wärmenutzung System $P_{ex}(60 \text{ °C}) = 7.839 \text{ kW}$



Wärmeeinsatz im System

Luft Vorheizen auf 600°C:	$P_{\text{preheat}}(T_{\text{airin}}) = 3.471 \cdot \text{kW}$	
Luft Kühlleistung im Stack:	$P_{\text{Stackcool}} = 1.581 \cdot \text{kW}$	
Methan (5 nlm) aufheizen von T_U auf T_{ref} :	$P_{\text{CH}_4\text{heat}}(T_{\text{ref}}) = 176 \cdot \text{W}$	
Wasser (10 nlm) aufheizen von T_U auf T_{ref} :	$P_{\text{H}_2\text{Oheat}}(T_{\text{ref}}) = 555 \cdot \text{W}$	inkl. Verdampfung bei 100°C
Leistungsbedarf Dampfreformierung:	$P_{\text{ref}}(T_{\text{ref}}) = 813.263 \cdot \text{W}$	
Wärmeleistungsaufnahme Luft:	$P_{\text{heatair}} := P_{\text{preheat}}(T_{\text{airin}}) + P_{\text{Stackcool}}$	$P_{\text{heatair}} = 5.052 \text{ kW}$
Wärmeleistungsaufnahme Brenngas:	$P_{\text{heatfuel}} = 1.545 \cdot \text{kW}$	
Wärmebedarf Luft + Brenngas:	$P_{\text{heat}} := P_{\text{heatair}} + P_{\text{heatfuel}}$	$P_{\text{heat}} = 6.597 \text{ kW}$
Wärmeaufnahme NW-Tauscher:	$P_{\text{NWT}} := P_{\text{ex}}(60^\circ\text{C}) - P_{\text{heat}}$	$P_{\text{NWT}} = 1.242 \text{ kW}$

Wärmequellen im System

el. Verlustleistung Stack:	$P_{\text{VelStack}}(T) := \beta_F \cdot P_{\text{GStackin}}(T) - 1.5 \text{ kW}$	$P_{\text{VelStack}}(T_{\text{ref}}) = 0.557 \text{ kW}$
Reaktionsentropie:	$\beta_F \cdot P_{\text{SStackin}}(T_{\text{ref}}) = 0.764 \text{ kW}$	
Nachbrenner:	$P_{\text{NBin}} = 0.94 \text{ kW}$	
	$P_{\text{thQ}} := P_{\text{VelStack}}(T_{\text{ref}}) + \beta_F \cdot P_{\text{SStackin}}(T_{\text{ref}}) + P_{\text{NBin}}$	$P_{\text{thQ}} = 2.261 \text{ kW}$

Wärmesenken im System

Reformierung:	$P_{\text{ref}}(T_{\text{ref}}) = 813.263 \cdot \text{W}$
Nahwärme:	$P_{\text{NWT}} = 1.242 \text{ kW}$
	$P_{\text{thS}} := P_{\text{ref}}(T_{\text{ref}}) + P_{\text{NWT}}$
	$P_{\text{thS}} = 2.055 \text{ kW}$
	$P_{\text{thQ}} - P_{\text{thS}} = 0.206 \text{ kW}$