

Batterie- und Brennstoffzellensysteme

BSZ-Systementwurf

André Weber

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffe der Elektrotechnik IAM-WET

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

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

andre.weber@kit.edu

www.iam.kit.edu/wet



- Stackmodul / Hotbox
- Brenngasversorgung
 - Entschwefelung
 - (Vor-) Reformierung
 - Luftzudosierung bei partieller Oxidation
 - Wasserdampferzeugung und -zudosierung bei (interner) Reformierung
 - Anodenabgas-Rezirkulation
- Luftversorgung
 - Verdichter, Gebläse
 - HT-Wärmetauscher
 - Startbrenner / el. Luftvorwärmung
- Nachverbrennung
 - Wärmeauskopplung, HT- und LT-Wärmetauscher
- DC/DC-Wandler, Wechselrichter

Elektrochemische Energiewandlung in Brennstoffzellen

Wirkungsgrade im Brennstoffzellensystem

thermodynamischer WG:

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H}$$

elektrochemischer WG:

$$\eta_{el} = \frac{U_{cell}}{U_{th}} = -\frac{nFU_{cell}}{\Delta G}$$

Brenngasausnutzung:

$$\beta_f = \frac{\text{umgesetzter Brennstoff}}{\text{zugeführter Brennstoff}}$$

Faraday WG:

$$\eta_f = \frac{I}{I_m}$$

Reformerwirkungsgrad:

$$\eta_{ref} = \frac{\Delta H}{\Delta H_{fuel}}$$

el. Systemwirkungsgrad:

$$\eta_{elS} = \frac{W_{el}}{nFU_{cell}}$$

el. Nettowirkungsgrad

$$\eta_{electrical} = \eta_{th} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_f \cdot \beta_f \cdot \eta_{Ref} \cdot \eta_{elS} = \frac{\text{produzierte el. Energie}}{\text{zugeführte chem. Energie}}$$

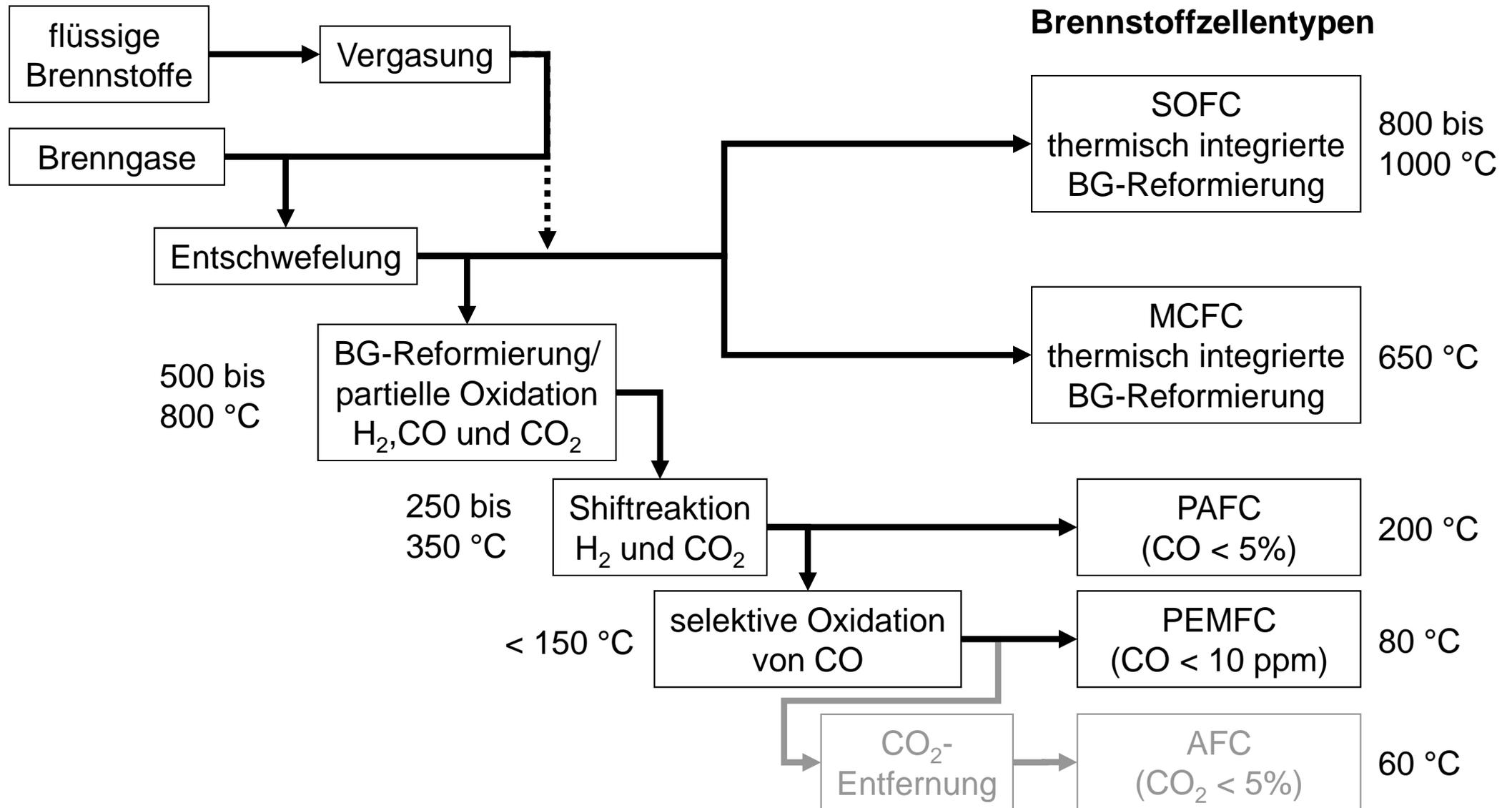
therm. Nettowirkungsgrad

$$\eta_{thermal} = \frac{\text{Nutzwärme}}{\text{zugeführte chem. Energie}}$$

Gesamtwirkungsgrad

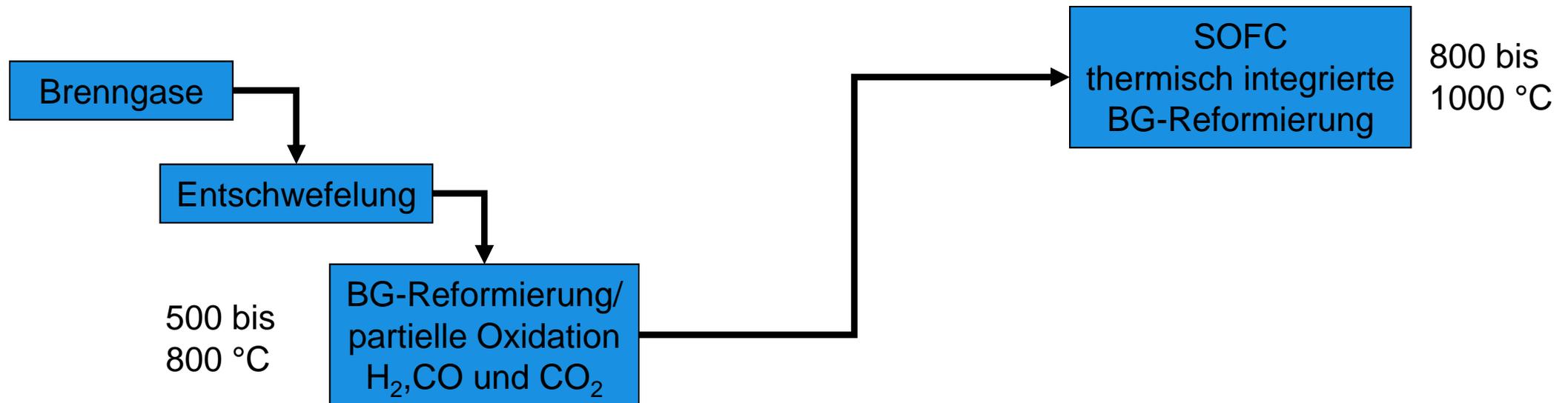
$$\eta_{tot} = \eta_{electrical} + \eta_{thermal}$$

Brennstoffaufbereitung für verschiedene BSZ-Typen



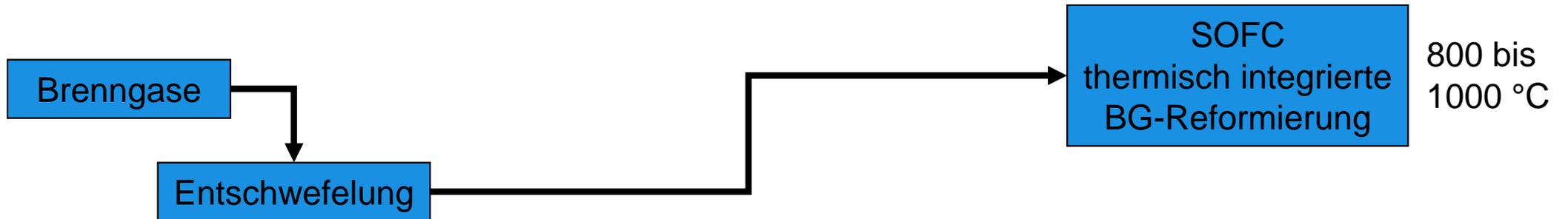
Brennstoffaufbereitung für verschiedene BSZ-Typen

Brennstoffzellentypen



Brennstoffaufbereitung für verschiedene BSZ-Typen

Brennstoffzellentypen





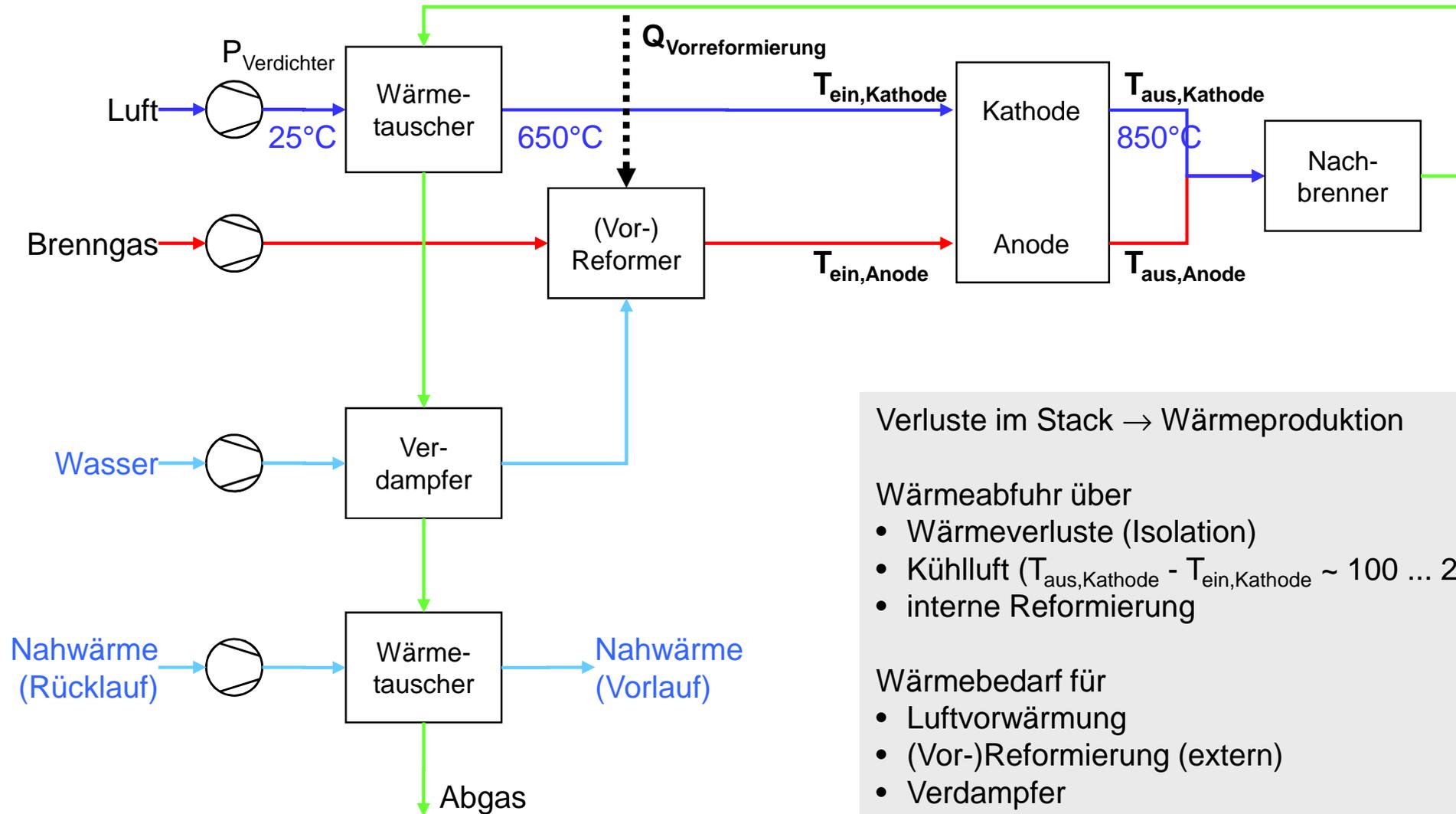
Systemtechnik

Auswirkung der internen Reformierung: Beispiel 100 kW SOFC

Int. Ref. grad	Luftzahl	Verdichterleistung	η_{Sys}	$P_{\text{Luftvorwärmer}}$
0 %	10	15 kW _e	38 %	410 kW _{th}
50 %	7	10 kW _e	43 %	208 kW _{th}
100 %	3	4 kW _e	49 %	90 kW _{th}

Inputdaten für die Anlagensimulation

Brennstoff:	Erdgas 100 kW (H _u)
Spannung:	0,75 V
Luft-Aufheizspanne im Stack:	100 K
Brennstoffnutzungsgrad:	80 %
Verdichter-Wirkungsgrad:	70 %
Druck	1 bar



Verluste im Stack → Wärmeproduktion

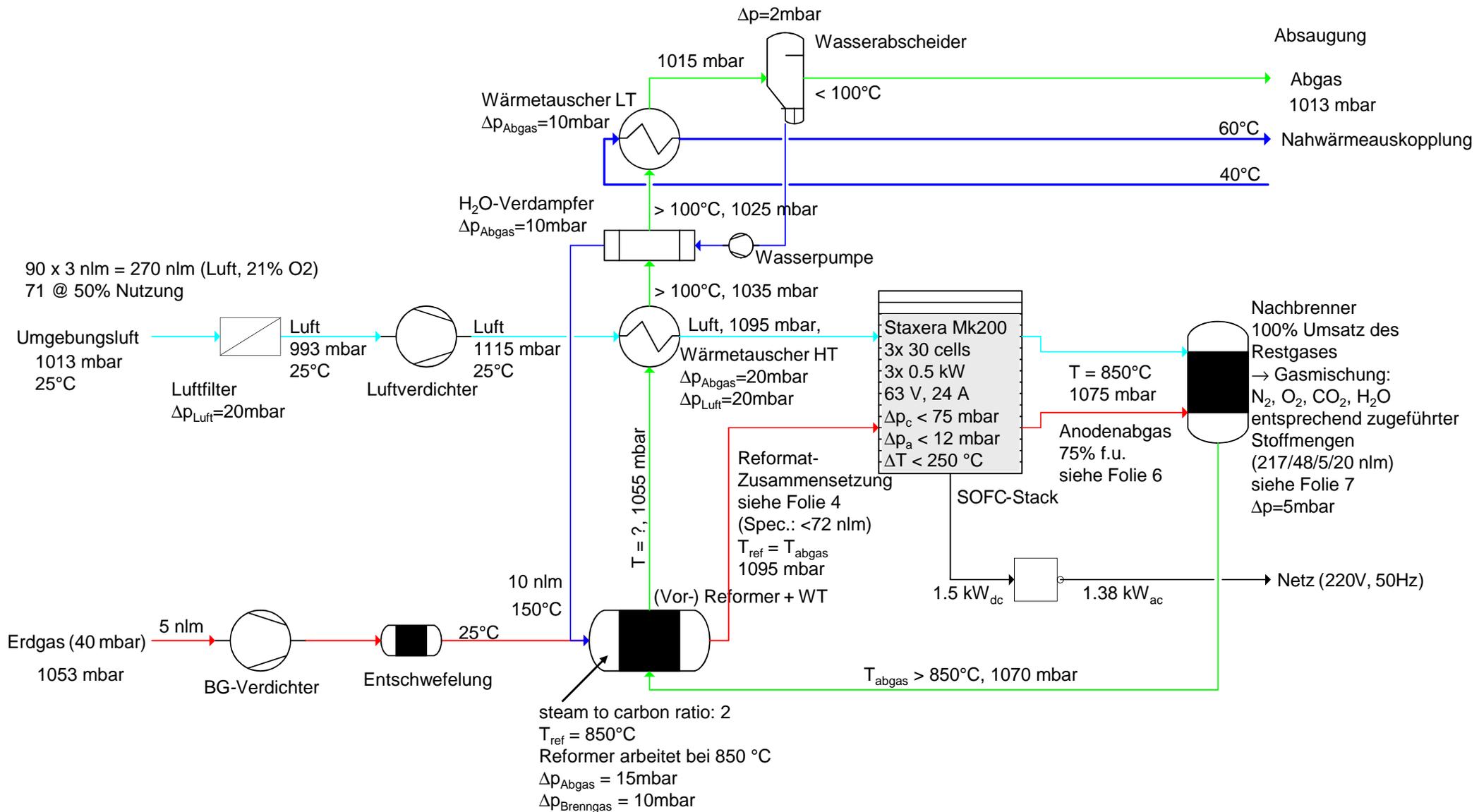
Wärmeabfuhr über

- Wärmeverluste (Isolation)
- Kühlluft ($T_{\text{aus,Kathode}} - T_{\text{ein,Kathode}} \sim 100 \dots 200 \text{ K}$)
- interne Reformierung

Wärmebedarf für

- Luftvorwärmung
- (Vor-)Reformierung (extern)
- Verdampfer

SOFC Brennstoffzellenheizgerät (Mögliche) 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 → 23.81 A



Systemauslegung

Betriebspunkt Stack

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 @ 100% f.u.
2521 A @ 85% f.u.
2857 A @ 75% f.u.

Stromäquivalent des benötigten Gases



Umrechnung Strom - Gas

		Eingabefelder (nur die gelben Felder verändern)						Gesamtfluss						Strom-äquivalent		Stoffparameter								
		Zusammensetzung				Anteil		Fluss (wird aufsummiert)						A	molare Masse g/mol	Dichte (id. Gas) g/l	Dichte (flüssig) g/cm³	Ladungs- zahl	Ladung/ Molekül As	Ladung/ mol As/mol	Ladung/sl As/nL			
H	C	O	N	Ar	vol%	nccm	nlm	g/min	g/h	nlm	ncm³ / min	slm	sccm									g/min	g/h	
								Normbed.: 0°C / 1atm								Normbed.: 0°C / 1atm								
								Druck / bar						1.01325										
								Temp. / °C						20										
Gas -> Strom, Eingabe Gasflüsse der Komponenten																								
Sauerstoff	O2			2			0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	31.9988	1.427689		-4.00	-6.41E-19	-3.86E+05	-17217.62
Luft	Luft			0.42	1.58		0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	28.8504	1.287217	0.7869	-0.84	-1.35E-19	-8.10E+04	-3615.70
Stickstoff	N2				2		0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	28.0135	1.249876	0.7894	0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
Argon	Ar					1	0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	39.9480	1.782358		0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
Wasser	H2O	2		1			0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	18.0153	0.803787		0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
Kohlendioxid	CO2		1	2			0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	44.0098	1.963584		0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
Wasserstoff	H2	2					0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	2.0159	0.089942		2.00	3.20E-19	1.93E+05	8608.81
Kohlenmonoxid	CO		1	1			0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	28.0104	1.249739		2.00	3.20E-19	1.93E+05	8608.81
Kohlenstoff (s)	C		1				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	12.0110	0.535894		4.00	6.41E-19	3.86E+05	17217.62
Methan	CH4	4	1				100		4.98	4.98000	4980.000	5.345	5344.635	3.565	213.875	2858.12	16.0428	0.715779		8.00	1.28E-18	7.72E+05	34435.24	
Methanol	CH3OH	4	1	1			0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	32.0422	1.429624	0.7869	6.00	9.61E-19	5.79E+05	25826.43
Ethanol	C2H5OH	6	2	1			0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	46.0690	2.055461	0.7894	12.00	1.92E-18	1.16E+06	51652.86
Ethin	C2H2	2	2				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	26.0379	1.161731		10.00	1.60E-18	9.65E+05	43044.05
Ethan	C2H6	6	2				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	30.0696	1.341616		14.00	2.24E-18	1.35E+06	60261.67
Propen	C3H6	6	3				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	42.0806	1.877510		18.00	2.88E-18	1.74E+06	77479.29
Propan	C3H8	8	3				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	44.0965	1.967453		20.00	3.20E-18	1.93E+06	86088.10
Naphthalin (s)	C10H8	8	10				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	128.1735	5.718713	1.14	48.00	7.69E-18	4.63E+06	206611.44
Toluol	C7H8	8	7				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	92.1405	4.111030	0.8714	36.00	5.77E-18	3.47E+06	154958.58
KW1	CnHm	4	2				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	28.0538	1.251674		12.00	1.92E-18	1.16E+06	51652.86
KW2	CnHm	18	8				0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	114.2309	5.096637		50.00	8.01E-18	4.82E+06	215220.25
ammonia NH3	NH3	3			1		0			0.00000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	17.0306	0.759852		3.00	4.81E-19	2.89E+05	12913.22



Systemauslegung

Betriebspunkt Stack

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 @ 100% f.u. dies entspricht 3.734 nlm CH₄
2521 A @ 85% f.u. dies entspricht 4.393 nlm
2857 A @ 75% f.u. dies entspricht 4.978 nlm ≈ 5 nlm

Luftbedarf (ohne Berücksichtigung Kühlleistungsbedarf)

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 2143 A @ 100% o.u. dies entspricht 35.56 nlm Luft
4286 A @ 50% o.u. dies entspricht 71.12 nlm ≈ 72 nlm

Systemauslegung

Betriebspunkt Stack

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 @ 100% f.u. dies entspricht 3.734 nlm CH₄
2521 A @ 85% f.u. dies entspricht 4.393 nlm
2857 A @ 75% f.u. dies entspricht 4.978 nlm ≈ 5 nlm

Luftbedarf (ohne Berücksichtigung Kühlleistungsbedarf)

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 2143 A @ 100% o.u. dies entspricht 35.56 nlm Luft
4286 A @ 50% o.u. dies entspricht 71.12 nlm ≈ 72 nlm

Verlustleistung System:

- a) Brenngas ein: $P_{BG} = ?$
- b) el. Leistung aus: 1.5 kW

Brenngasaufbereitung

Energieinhalte und Leistung

Brennstoffbedarf

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A \rightarrow 2143 A @ 100% f.u.; 2857 A @ 75% f.u.
dies entspricht 4.978 nlm CH₄ \rightarrow 5 nlm CH₄

Leistung:

aus unterem Brennwert LHV_{CH₄} von Methan: 32.7 MJ/m³

Heating value and flow rate:
$$\text{LHV}_{\text{CH}_4} := 32.7 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \quad \text{fr}_{\text{CH}_4} := 5 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Power:
$$p_{\text{CH}_4} := \text{LHV}_{\text{CH}_4} \cdot \text{fr}_{\text{CH}_4} \quad p_{\text{CH}_4} = 2.725 \text{ kW}$$

Systemauslegung

Betriebspunkt Stack

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 @ 100% f.u. dies entspricht 3.734 nlm CH₄
2521 A @ 85% f.u. dies entspricht 4.393 nlm
2857 A @ 75% f.u. dies entspricht 4.978 nlm ≈ 5 nlm

Luftbedarf (ohne Berücksichtigung Kühlleistungsbedarf)

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 2143 A @ 100% o.u. dies entspricht 35.56 nlm Luft
4286 A @ 50% o.u. dies entspricht 71.12 nlm ≈ 72 nlm

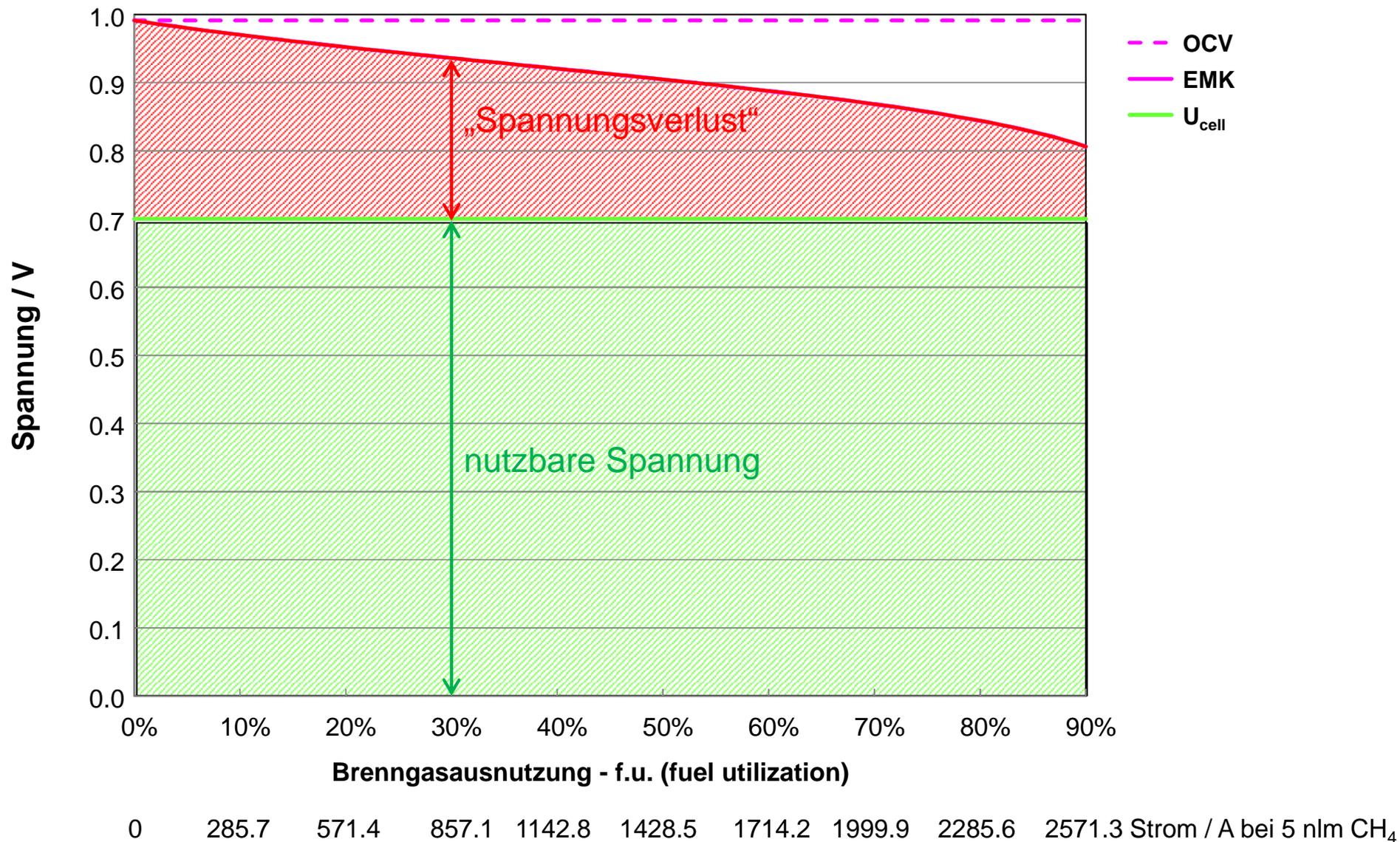
Verlustleistung System:

a) Brenngas ein: $P_{\text{BG}} = 2725 \text{ W}$ (5 nlm CH₄)

b) el. Leistung aus: 1.5 kW

$$\eta_{\text{electrical}} = \frac{\text{produzierte el. Energie}}{\text{zugeführte chem. Energie}} = 55\% \quad P_{\text{V, System}} = P_{\text{BG}} - P_{\text{el}} = 1225 \text{ W}$$

OCV, EMK und Arbeitsspannung



Systemauslegung

Betriebspunkt Stack

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 @ 100% f.u. dies entspricht 3.734 nlm CH₄
2521 A @ 85% f.u. dies entspricht 4.393 nlm
2857 A @ 75% f.u. dies entspricht 4.978 nlm ≈ 5 nlm

Luftbedarf (ohne Berücksichtigung Kühlleistungsbedarf)

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 2143 A @ 100% o.u. dies entspricht 35.56 nlm Luft
4286 A @ 50% o.u. dies entspricht 71.12 nlm ≈ 72 nlm

Verlustleistung System:

a) Brenngas ein: $P_{BG} = 2725 \text{ W}$ (5 nlm CH₄)

b) el. Leistung aus: 1.5 kW

$$\eta_{\text{electrical}} = \frac{\text{produzierte el. Energie}}{\text{zugeführte chem. Energie}} = 55\% \quad P_{V,\text{System}} = P_{BG} - P_{el} = 1225 \text{ W}$$

Verlustleistung im Stack:

$OCV_m = ?$

$U_{\text{cell}} = 0.7 \text{ V}$

$$P_{V,\text{Ebene}} = (OCV_m - U_{\text{cell}}) \cdot I$$

Systemauslegung

Betriebspunkt Stack

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 @ 100% f.u. dies entspricht 3.734 nlm CH₄
 2521 A @ 85% f.u. dies entspricht 4.393 nlm
2857 A @ 75% f.u. dies entspricht 4.978 nlm ≈ 5 nlm

Luftbedarf (ohne Berücksichtigung Kühlleistungsbedarf)

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 2143 A @ 100% o.u. dies entspricht 35.56 nlm Luft
4286 A @ 50% o.u. dies entspricht 71.12 nlm ≈ 72 nlm

Verlustleistung System:

a) Brenngas ein: $P_{BG} = 2725 \text{ W}$ (5 nlm CH₄)

b) el. Leistung aus: 1.5 kW

$$\eta_{\text{electrical}} = \frac{\text{produzierte el. Energie}}{\text{zugeführte chem. Energie}} = 55\% \quad P_{V,\text{System}} = P_{BG} - P_{el} = 1225 \text{ W}$$

Verlustleistung im Stack:

$OCV_m = 0.925 \text{ V}$

$U_{\text{cell}} = 0.7 \text{ V}$

$$P_{V,\text{Ebene}} = (OCV_m - U_{\text{cell}}) \cdot I = 5.36 \text{ W} \rightarrow P_{V,\text{Stacks}} = 482 \text{ W}$$

Verlustleistung f.u.:

25% Brenngasleistung ein = $25\% \cdot 2.725 \text{ W} = 681 \text{ W}$

$$P_{V,\text{System}} = 1163 \text{ W}$$

Systemauslegung Brenngasaufbereitung

Brennstoffbedarf

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → **2857 A @ 75% f.u.** dies entspricht **4.978 nlm** ≈ **5 nlm CH₄**

Der Brennstoff (Annahme: reines Methan) wird mit einem S/C-Verhältnis von 2 extern oder intern reformiert, d.h. 5 nlm CH₄ + 10 nlm H₂O

5 nlm Methan entspricht $3.7 \cdot 10^{-3}$ mol/s

10 nlm Wasser entspricht $7.4 \cdot 10^{-3}$ mol/s

Wärmebedarf Reformier + WT

Methan aufheizen: 25°C → T_{ref}

Wasser aufheizen: 120°C → T_{ref}

Reformierung @ T_{ref}:

Dampfreformierung: CH₄ + H₂O → CO + 3 H₂ Δ_RH⁰_{298K} = 206,1 kJ/mol

CO-Shift: CO + H₂O → CO₂ + H₂ Δ_RH⁰_{298K} = -41,2 kJ/mol

→ Berechnung über Wärmekapazitäten und Reaktionsenthalpien

$$\dot{v}_{\text{CH}_4} := 5 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$W_{\text{CH}_4}(T) := \int_{T_U}^T c_{p\text{CH}_4}(\tau) d\tau$$

$$P_{\text{CH}_4}(T) := \frac{\dot{v}_{\text{CH}_4}}{V_{\text{mol}}} \cdot W_{\text{CH}_4}(T)$$

$$P_{\text{CH}_4}(850\text{K} + 273.15\text{K}) = 175 \text{ W}$$

$$\dot{v}_{\text{H}_2\text{O}} := 10 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}}(T) := \int_{T_U}^T c_{p\text{H}_2\text{O}}(\tau) d\tau + \Phi(T - 373\text{K}) \cdot \Delta H_{\text{dH}_2\text{O}}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}}(T) := \frac{\dot{v}_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{mol}}} \cdot W_{\text{H}_2\text{O}}(T)$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}}(850\text{K} + 273.15\text{K}) = 558 \text{ W}$$

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



Brenngasaufbereitung

Energieinhalte und Leistung

Brennstoffbedarf

Stromäquivalent: 90 Zellen, 23.81 A → 2143 A @ 100% f.u.; 2857 A @ 75% f.u.
dies entspricht 4.978 nlm CH₄ → 5 nlm CH₄

Leistung:

aus unterem Brennwert LHV_{CH₄} von Methan: 32.7 MJ/m³

Heating value and flow rate:
$$\text{LHV}_{\text{CH}_4} := 32.7 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \quad \text{fr}_{\text{CH}_4} := 5 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Power:
$$p_{\text{CH}_4} := \text{LHV}_{\text{CH}_4} \cdot \text{fr}_{\text{CH}_4} \quad p_{\text{CH}_4} = 2.725 \text{ kW}$$

$$\text{LHV}_{\text{H}_2} := 9.9 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \quad \text{fr}_{\text{H}_2} := 15.9 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$p_{\text{H}_2} := \text{LHV}_{\text{H}_2} \cdot \text{fr}_{\text{H}_2} \quad p_{\text{H}_2} = 2.624 \text{ kW}$$

$$\text{LHV}_{\text{CO}} := 11.5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \quad \text{fr}_{\text{CO}} := 4.04 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

$$p_{\text{CO}} := \text{LHV}_{\text{CO}} \cdot \text{fr}_{\text{CO}} \quad p_{\text{CO}} = 0.774 \text{ kW}$$

$$p_{\text{Ref}} := p_{\text{H}_2} + p_{\text{CO}} \quad p_{\text{Ref}} = 3.398 \text{ kW}$$

$$\Delta p_{\text{Ref}} := p_{\text{Ref}} - p_{\text{CH}_4} \quad \Delta p_{\text{Ref}} = 0.673 \text{ kW}$$

Systemauslegung

Luftzufuhr

Luftbedarf:

72 nlm für 3 Stacks (50% Nutzung)

Annahme: Luft wird im Stack von 650 auf 850 °C erwärmt

dies benötigt eine Leistung von 962 W im Wärmetauscher
der Stack wird mit 334 W Leistung gekühlt

$$c_{pO_2}(T) := \left(29.96 + 4.18 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{T}{K} + -1.67 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{T^{-2}}{K^{-2}} \right) \cdot \frac{J}{\text{Mol} \cdot K}$$

$$c_{pN_2}(T) := \left(28.3 + 2.537 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{T}{K} + -5.443 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{T^{-2}}{K^{-2}} \right) \cdot \frac{J}{\text{Mol} \cdot K}$$

$$c_{pair}(T) := 0.21 \cdot c_{pO_2}(T) + 0.79 \cdot c_{pN_2}(T)$$

$$\dot{V}_{air} := 72 \frac{L}{\text{min}} \quad T_{airin} := 650K + 273.15K$$
$$T_{airout} := 850K + 273.15K$$

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

$$P_{preheat}(T) := \frac{\dot{V}_{air}}{V_{mol}} \cdot W_{preheat}(T) \quad P_{preheat}(850K + 273.15K) = 962 \text{ W}$$

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

$$P_{cool}(T) := \frac{\dot{V}_{air}}{V_{mol}} \cdot W_{cool}(T) \quad P_{cool}(850K + 273.15K) = 334 \text{ W}$$

Vergleich interne / externe Reformierung

Verlustleistung im Stack:

$$OCV_m = 0.925 \text{ V}$$

$$U_{\text{cell}} = 0.7 \text{ V}$$

$$I = 23.81 \text{ A}$$

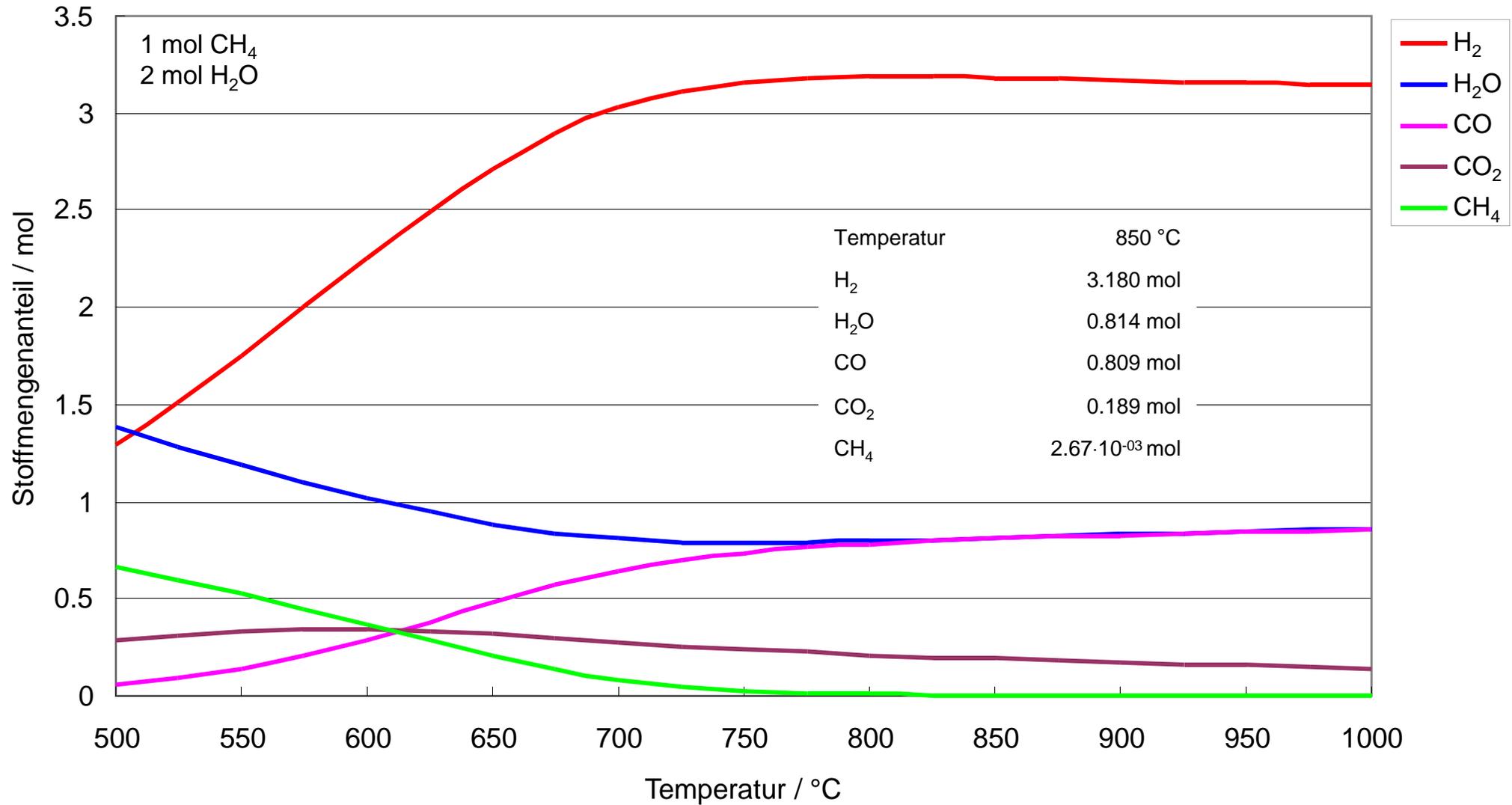
$$P_{V,\text{Ebene}} = (OCV_m - U_{\text{cell}}) \cdot I = 5.36 \text{ W} \rightarrow P_{V,\text{Stacks}} = 482 \text{ W}$$

Vollständige interne Reformierung: $\Delta P_{\text{ref}} = 673 \text{ W}$



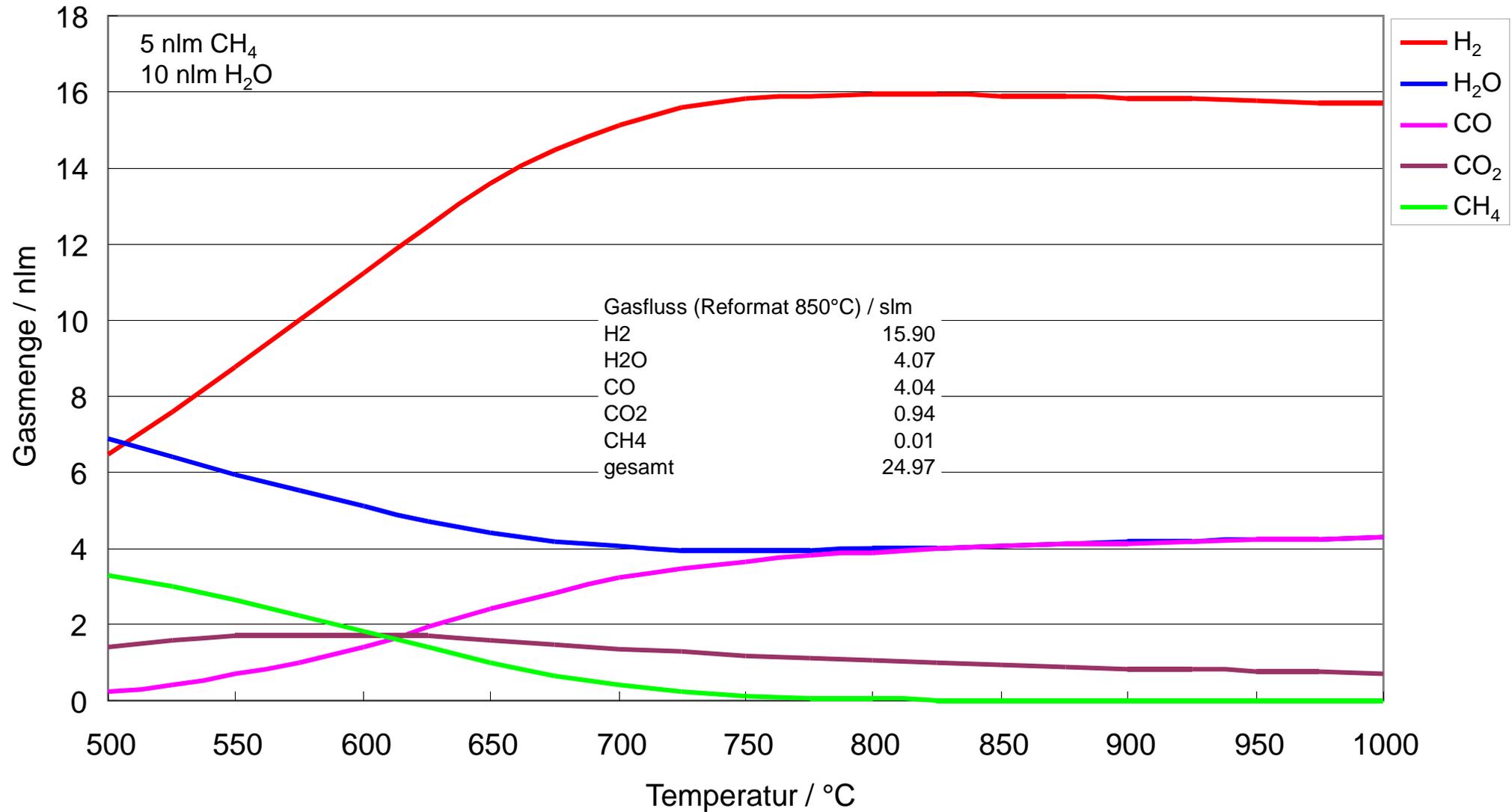
Brenngasaufbereitung

Gleichgewichtszusammensetzung (Dampfreformierung, S/C = 2)



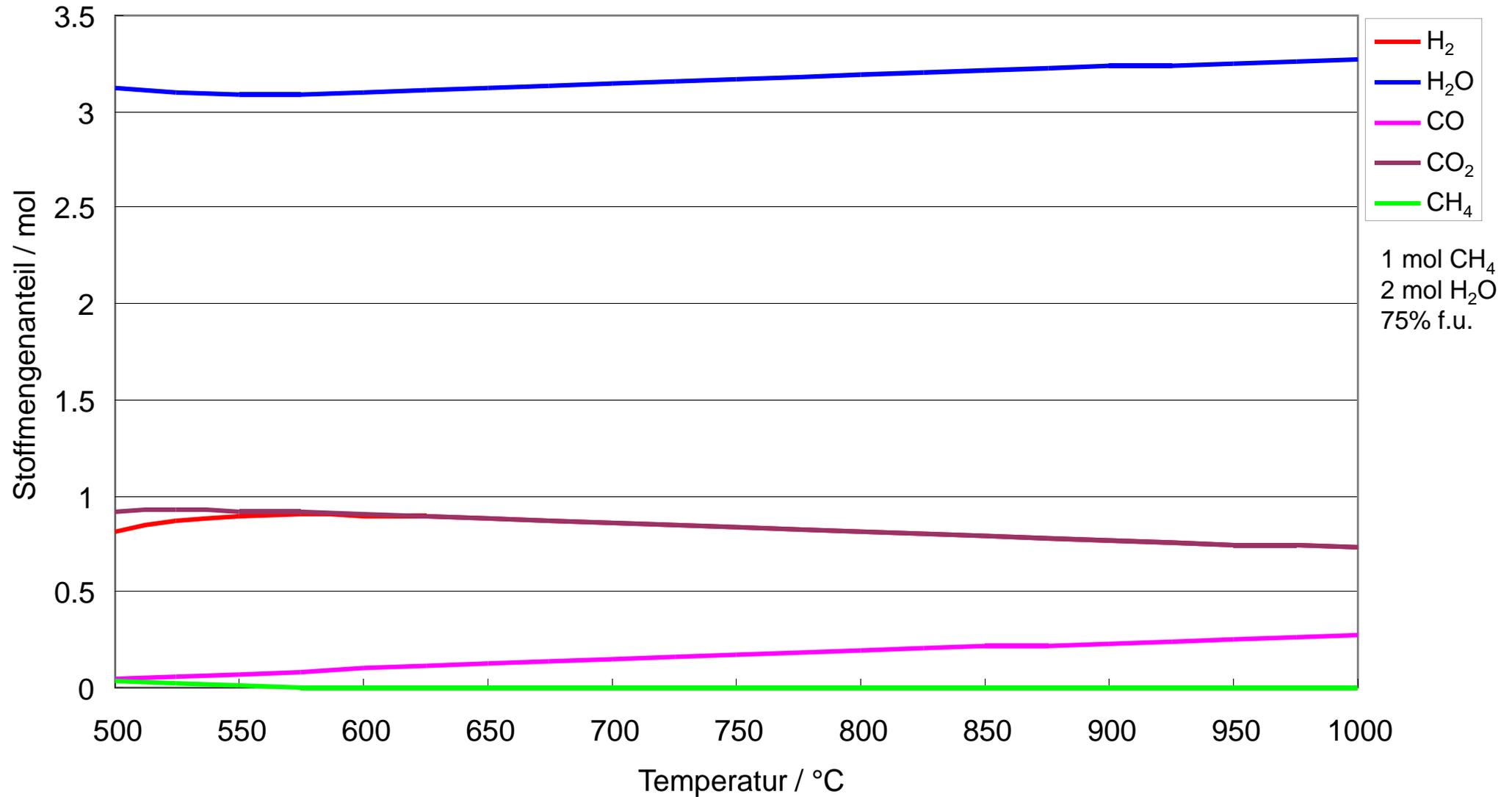
Brenngasaufbereitung

Gasfluss Reformat (Dampfreformierung, S/C = 2)



Brenngasumsatz

Gleichgewichtszusammensetzung des Anodenabgases



Brenngasumsatz

Gleichgewichtszusammensetzung des Nachbrennerabgases

