



Master Regenerative Energien

Regenerative Wärmetechnik

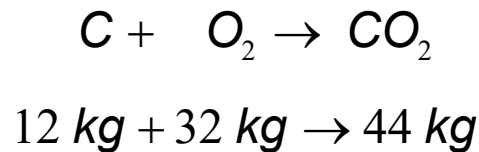
3. Verbrennungsrechnung und Brennwertnutzung

Luft- und Sauerstoffbedarf für die Verbrennung

$$\dot{m}_L + \dot{m}_B = \dot{m}_A + \dot{m}_G \quad | : \dot{m}_B \quad M_L = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_B} \quad M_G = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_B}$$

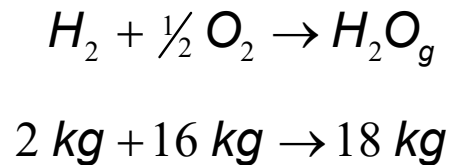
$$M_L + 1 = A + M_G$$

- M_L Wichtige Kenngröße für Effizienz der Verbrennung,
- resultiert aus stöchiometrischem Sauerstoffbedarf (Reaktionsgleichung):

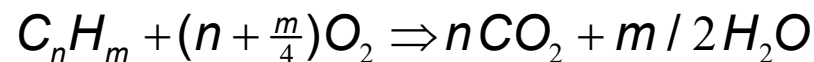


**Stöchiometrischer
Sauerstoffbedarf:**

$$\frac{m_{O_2}}{m_C} = \frac{32 \text{ kg}}{12 \text{ kg}} = 2,67$$



$$\frac{m_{O_2}}{m_{H_2}} = \frac{16}{2} = 8$$



$$\frac{n_{O_2}}{n_{C_n H_m}} = \frac{(n + \frac{m}{4})}{1}$$

Mindestluftbedarf

Zusammensetzung der Luft: (Zweistoffgemisch „Luftstickstoff“ und O₂)

Stoffmengenanteile: $x_{N_2} = \frac{n_{O_2}}{n_L} = 0,79$

$$x_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_L} = 0,21$$

Massenanteile: $\xi_{N_2} = 0,768$

$$\xi_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{m_L} = 0,232$$

$$\frac{m_L}{m_{O_2}} = \frac{1}{0,232} = 4,31$$

Stöchiometrischer (Mindest-)Luftbedarf z.B. für C:

$$\frac{m_{LMin}}{m_B} = \frac{m_{LMin}}{m_{O_2}} \frac{m_{O_2}}{m_C} \frac{m_C}{m_B} = 4,31 \cdot 2,67 \text{ C}$$

$$\frac{m_{O_2}}{m_C} = \frac{32 \text{ kg}}{12 \text{ kg}} = 2,67$$

$$\frac{m_{LMin}}{m_B} = 11,5 \text{ C}$$

$$\frac{m_C}{m_B} = C$$

u.s.w. für alle Brennstoff-Elemente

Spezifischer, molarer, volumetrischer Bedarf an trockener Luft

$$M_{tL\min} = \frac{m_{tL\min}}{m_B} = 11,5C + 34,5H + 4,3(S - O) \quad \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg B}}$$

C und H erzeugen den Hauptluftbedarf, O-Anteil im Brennstoff
vermindert den Luftbedarf, $S < 0,01$ (Holz: $C : H : O = 0,50 : 0,06 : 0,44$)

Üblich ist auch

$$\frac{n_{tL\min}}{m_B} = 4,76 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \quad n_L = \frac{n_{O_2}}{x_{O_2}} = 4,76 n_{O_2} \quad \frac{\text{kmol Luft}}{\text{kg B}}$$

und

$$L_{t\min} = \frac{V_{tL\min}}{m_B} = \frac{n_{tL\min}}{m_B} v_0 = 8,89C + 26,69H + 3,33(S - O) \quad \frac{\text{m}^3 \text{ Luft}}{\text{kg B}}$$

$$\bar{v}_0 = 22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$$

sowie für gasförmige Brennstoffe

$$L_{t\min} = \frac{V_{tL\min}}{V_B} = 4,76 \left[0,5(x_{H_2} + x_{CO}) + 2x_{CH_4} + (n + m/4)x_{C_nH_m} + 1,5x_{H_2S} - x_{O_2} \right] \quad \frac{\text{m}^3 \text{ Luft}}{\text{m}^3 \text{ B}}$$

X_i - Stoffmengenanteile

Mindestluftbedarf für trockene Verbrennungsluft

$$M_{\text{tL min}} = \frac{m_{\text{tL min}}}{m_B} = 11,44 C + 34,33 H + 4,29(S - O) \quad \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg B}}$$

Berücksichtigung des in der Verbrennungsluft enthaltenen Wassers:

$$X = \frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_{\text{tL}}} = \frac{\frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_B}}{\frac{\dot{m}_{\text{tL}}}{\dot{m}_B}} = \frac{M_W}{M_{\text{tL}}} \quad \text{absolute Feuchte}$$

$$M_{W, \text{Umgebungsluft}} = X_U M_{\text{tL}} \quad X_U: \text{Umgebungsfeuchte:}$$

$$X_{U, \text{Winter}} \approx 2 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

$$X_{U, \text{Sommer}} \approx 0,009 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Mindestluftbedarf für feuchte Verbrennungsluft

$$M_L = M_{\text{tL}} + M_{W, U} = M_{\text{tL}} (1 + X_U)$$

Umgebungsfeuchte der Luft kann oft vernachlässigt werden $X_U = 0$,
im Abgas muss aber Brennstofffeuchte und Reaktionswasser (bei H im Brennstoff)
berücksichtigt werden.

Luftüberschuss

Da nicht jedes Brennstoffmolekül sofort in Kontakt zu einem Luftmolekül kommt wird für jede technische Verbrennung ein Luftüberschuss benötigt $m_L > m_{Lmin}$

spezifisch

$$M_{Lmin} = \frac{\dot{m}_{Lmin}}{\dot{m}_{Br}} \quad \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg B}}$$

$$M_L = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{Br}}$$

volumetrisch

$$L_{min} = \frac{\dot{V}_{Lmin}}{\dot{m}_{Br}} \quad \frac{\text{m}^3 \text{ Luft}}{\text{kg B}}$$

$$L = \frac{\dot{V}_L}{\dot{m}_{Br}}$$

Luftüberschuss
(Luftzahl)

$$\lambda = \frac{M_L}{M_{Lmin}} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{Lmin}} \cdot \frac{\rho_L}{\rho_L} = \frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{Lmin}} =$$

$$\lambda = \frac{L}{L_{min}}$$

Feuerungsart	handbeschickte Rostfeuerung	automatische Rostfeuerung	Kohlestaub- feuerung	Gas- und Öl- feuerung	Gasturbinen
typische λ	1,7 - 2	1,25 – 1,35	1,05 – 1,15	1,03 – 1,1	1,7 - 2

Je besser der Kontakt Luft-Brennstoff desto weniger Luftüberschuss wird benötigt

$$M_L = M_{tL} + M_{W,VL} = \lambda M_{tLmin} (1 + X_U) \quad \text{für genaue Berechnungen}$$

ÜA 3 Verbrennung+BWN/1

Berechnen Sie den stöchiometrischen Luftbedarf für Holz mit den Eigenschaften aus VOA_2/1.

(Massenzusammensetzung: $C' : H' : O' = 50:6:44$; $C : H : O : W = 30:3,6:26,4:40$)

Welcher Luftüberschuss liegt vor, wenn der Luftbedarf für die Verbrennung $M_L = 4,6 \text{ kg/kg}$ angegeben wird?

$$M_{tL\min} = M_{L\min} = \frac{m_{L\min}}{m_B} = 11,44C + 34,33H + 4,29(S - O)$$

$$M_{L\min,tB} = \frac{m_{L\min}}{m_{tB}} = 11,44C' + 34,33H' + 4,29(S' - O')$$

$$M_{L\min,tB} = \frac{M_{L\min}}{(1 - W)}$$

Rauchgas - Massenstrom

Neben Gesamtmassenbilanz ist auch die Aufteilung in trockenen und feuchten Gasstrom sinnvoll

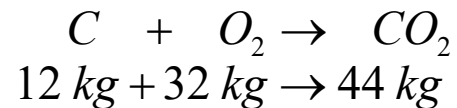
$$M_G = \frac{m_G}{m_B} = (1 - A) + \lambda M_{L_{\min}}$$

$$M_G = M_{tG} + M_W$$

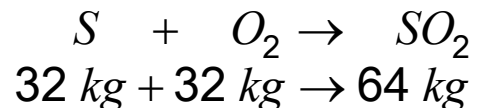
Trockene Rauchgaskomponenten folgen analog zum Luftbedarf aus Stöchiometrie der Teilreaktionen und den Massenanteilen der Komponenten im Brennstoff,

hinzu kommen Stickstoff und Sauerstoffrest aus Verbrennungsluft.

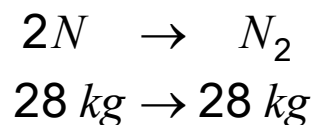
$$M_{tG} = \frac{m_{tG}}{m_B} = \frac{m_{CO_2}}{m_B} + \frac{m_{N_2}}{m_B} + \frac{m_{SO_2}}{m_B} + 0,768 \frac{\lambda m_{L_{\min}}}{m_B} + 0,232 (\lambda - 1) \frac{m_{L_{\min}}}{m_B}$$



$$\frac{m_{CO_2}}{m_B} = \frac{m_{CO_2}}{m_C} \frac{m_C}{m_B} = \frac{44}{12} C = 3,67 C$$



$$\frac{m_{SO_2}}{m_B} = \frac{64}{32} S = 2 S$$



$$\frac{m_{N_2}}{m_B} = \frac{28}{28} N = 1 N$$

Trockenes Rauchgas

Brennstoffbezogene Masse trockenes RG

$$M_{tG} = (3,67C + 2S + N + 0,768\lambda M_{L\min} + 0,232(\lambda - 1)M_{L\min})$$

Massenanteile der trockenen RG-Komponenten

$$\xi_{tCO_2} = \frac{3,67C}{M_{tG}} \quad \xi_{tN_2} = \frac{N + 0,768\lambda M_{L\min}}{M_{tG}} \quad \xi_{tO_2} = \frac{0,232(1-\lambda)M_{L\min}}{M_{tG}}$$

Volumenanteile (entsprechend Analysenmethoden)

Abgasmesswerte beziehen sich auf trockenes Abgas

für ideale Gase $\bar{v}_0 = 22,4 \frac{m^3}{kmol}$

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V_{ges}} \quad \text{z.B.} \quad CO_2 = \varphi_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{ges}} \quad \varphi_i = \frac{V_i}{V_{ges}} = \frac{n_i \bar{v}_0}{n_{ges} \bar{v}_0} = x_i$$

Umrechnung von Volumenanteil (Messgröße) in Massenanteil (Rechengröße)

$$\xi_i = \frac{m_i}{m_{ges}} = \frac{V_i \rho_{0i}}{\sum V_i \rho_{0i}} = \frac{\varphi_i \rho_{0i}}{\sum \varphi_i \rho_{0i}} \quad \varphi_i = \frac{V_i}{V_{ges}} = \frac{\xi_i / \rho_{0i}}{\sum \xi_i / \rho_{0i}}$$

$$\rho_{0i} = \frac{1}{v_{0i}} = \frac{M_i}{\bar{v}_0} \quad \begin{array}{l} \text{für genaue Rechnungen} \\ \text{Berücksichtigung der Realgasdichten} \end{array}$$

Weitere Rauchgaseigenschaften

$$\xi_{tCO_2} = \frac{3,67C}{M_{tG}} \quad \xi_{tN_2} = \frac{N + 0,768\lambda M_{Lmin}}{M_{tG}} \quad \xi_{tO_2} = \frac{0,232(1-\lambda)M_{Lmin}}{M_{tG}} \quad \varphi_i = \frac{V_i}{V_{ges}} = \frac{\xi_i / \rho_{0i}}{\sum \xi_i / \rho_{0i}} = x_i$$

Mittlere Molare Masse
des trockenen Gases:

$$\bar{M}_{tG} = \sum_i x_{t,i} \bar{M}_i = \frac{1}{\sum_i \xi_{t,i} / \bar{M}_i}$$

Mittlere spezifische
Wärmekapazität trock. Gas:

$$c_{pm,tG} = \sum_i \xi_{t,i} c_{p,i}$$

CO_{2max} :
 CO_2 - Anteil für $\lambda=1$
Brennstoffkennwert

$$\varphi_{CO_{2max}} = CO_{2max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{Gasmin}}$$

Trockenes Rauchgas:

$$\varphi_{O_2} + \varphi_{N_2} + \varphi_{CO_2} = 1$$

$$\lambda = 1 \rightarrow \varphi_{O_2Abgas} = 0$$

$$\varphi_{CO_{2max}} = 1 - \varphi_{N_2}$$

$$= 0,21$$

für reinen C

Berechnung des Luftüberschusses aus RG-Anteilen

$$\varphi_{O_2} + \varphi_{N_2} + \varphi_{CO_2} = 1$$

$$\varphi_{CO_2} = CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{Gas}}$$

Luftüberschuss: im Abgas enthaltener O₂-Anteil vermindert den CO₂-Anteil

$$\lambda = \frac{L}{L_{min}} \approx \frac{V_G}{V_{Gmin}} = \frac{\frac{V_{CO_2}}{CO_2}}{\frac{V_{CO_2}}{CO_{2max}}} = \frac{CO_{2max}}{CO_2}$$

$$\frac{M_L}{M_{Lmin}} \frac{\rho_L}{\rho_L} \approx \frac{\lambda M_{Lmin} + 1}{M_{Lmin} + 1} \frac{\rho_G}{\rho_G}$$

Alternativ zum CO₂-Anteil kann auch der O₂-Anteil gemessen werden

$$\lambda \approx \frac{CO_{2max}}{CO_2} = \frac{CO_{2max}}{(1 - N_2) - O_2}$$

Für reinen C und niedrige Wassestoffanteile gilt

$$\lambda \approx \frac{CO_{2max}}{CO_2} = \frac{0,21}{0,21 - O_2}$$

$$O_2 \approx 0,21 \left[1 - \frac{CO_2}{CO_{2max}} \right]$$

Unvollkommene Verbrennung: $\varphi_{O_2} + \varphi_{N_2} + (\varphi_{CO_2} + \varphi_{CO}) = 1$

CO- Anteil: Kennzeichnung der Verbrennungsgüte im realen Verbrennungsprozess

Verluste durch unvollkommene und unvollständige Verbrennung

Wirkungsgrad

$$\eta_K = \frac{Q_{Nutz}}{m_B H_u} = \frac{\dot{H}_B - Q_{Verlust}}{\dot{H}_B} = 1 - \sum_i \varepsilon_i$$

Verlustgrad

$$\varepsilon_i = \frac{Q_{vi}}{m_B H_u}$$

Thermische
(Abgas-)Verluste

$$\varepsilon_{therm} = \frac{m_G c_{pGm} (t_{GA} - t_o)}{m_B H_i} = \frac{M_G c_{pGm} (t_{GA} - t_o)}{H_i} \quad M_G = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_B} \approx \lambda M_{Lmin} + 1$$

Chermische Verluste
(**unvollkommene** Verbrennung)

$$\varepsilon_{chem} = \frac{\dot{m}_{CO} H_{i,CO}}{\dot{m}_B H_i} = \frac{\xi_{CO} M_G H_{i,CO}}{H_i} \quad \dot{m}_{CO} = \xi_{CO} \dot{m}_G$$

Rost-Verluste
(**unvollständige** Verbrennung)

$$\varepsilon_{Rost} = \frac{\dot{m}_{Unverbrannt} H_{i,C}}{\dot{m}_B H_{i,C}} = \frac{\dot{m}_{Unverbrannt}}{\dot{m}_B}$$

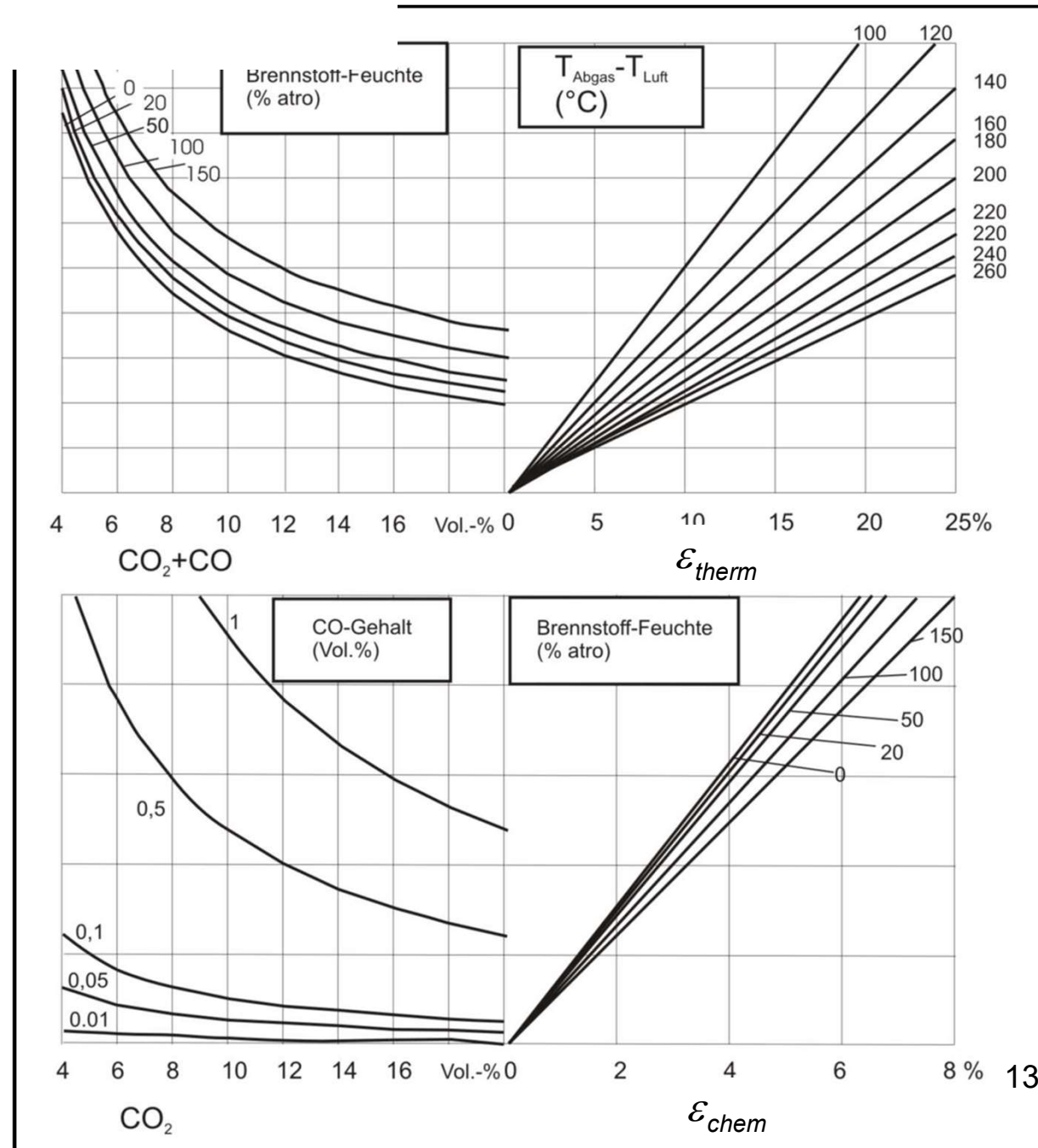
Wärme-Verluste
(über Kesseloberfläche)

$$\varepsilon_{WV} = \frac{\alpha_{res} A_{o,Kessel} (t_{O,Kessel} - t_U)}{\dot{m}_B H_i} \quad \alpha_{res}$$

WÜ-Koeffizient resultierend
aus Strahlung und Konvektion

Thermische und chemische Verluste bei der Verbrennung am Beispiel von Holz

$$CO_2 = \frac{CO_{2,max}}{\lambda}$$

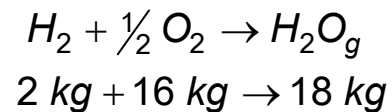


Feuchtes Rauchgas - Wasseranteil

$$M_G = M_{tG} + M_W$$

Wassergehalt des Rauchgases folgt aus Reaktionswasser, Brennstofffeuchte
(+ ggf. Umgebungsfeuchte der Verbrennungsluft)

„Reaktionswasser“



$$\frac{m_{W,R}}{m_B} = \frac{m_W}{m_H} \frac{m_H}{m_B} = 9H$$

Wasser aus
Brennstofffeuchte

$$\frac{m_{W,F}}{m_B} = W$$

Umgebungsfeuchte
(für genaue Rechnungen)

$$M_{W,U} = X_U \lambda M_{L \min}$$

**Brennstoffbezogene
Wassermasse**

$$M_W = \frac{m_{W,R}}{m_B} + \frac{m_{W,F}}{m_B} (+M_{W,U})$$

$$\boxed{M_W = 9H + W} + (X_U \lambda M_{L \min})$$

Absolute Feuchte
Rauchgas

$$X = \frac{M_W}{M_{tG}} = \frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_{tG}} = \frac{9H + W}{3,67C + 2S + N + 0,768\lambda M_{L \min} + 0,232(\lambda - 1)M_{L \min}}$$

Wasseranteil
Rauchgas

$$\xi_W = \frac{m_W}{m_G} = \frac{m_W}{m_{tG} + m_W} = \frac{X}{1 + X}$$

Zusammenfassung Rauchgas

Neben Gesamtmassenbilanz ist auch die Aufteilung in trockenen und feuchten Gasstrom sinnvoll

$$M_G = \frac{m_G}{m_B} = (1 - A) + \lambda M_{L\min}$$

$$M_G = M_{tG} + M_W$$

Trockene Rauchgaskomponenten folgen analog zum Luftbedarf aus Stöchiometrie der Teilreaktionen und den Massenanteilen der Komponenten im Brennstoff,

hinzu kommen Stickstoff und Sauerstoffrest aus Verbrennungsluft.

$$M_{tG} = \frac{m_{tG}}{m_B} = 3,67C + 2S + N + 0,768\lambda M_{I\min} + 0,232(\lambda - 1)M_{I\min}$$

Wassergehalt des Rauchgases folgt aus Reaktionswasser, Brennstofffeuchte (+ ggf. Umgebungsfeuchte der Verbrennungsluft)

$$M_W = \frac{m_W}{m_B} \approx 9H + W$$

Absolute Feuchte des Rauchgases (maßgeblich für Tautemperatur)

$$X = \frac{M_W}{M_{tG}} = \frac{m_W}{m_{tG}} = \frac{9H + W}{3,67C + 2S + N + 0,768\lambda M_{L\min} + 0,232(\lambda - 1)M_{L\min}}$$

Rauchgasfeuchte – Sättigungsdampfdruck - Tautemperatur

Rauchgasfeuchte aus Verbrennungsrechnung bekannt

$$X = \frac{M_w}{M_{tG}} = \frac{9H + W}{3,67C + 2S + N + 0,768\lambda M_{L\min} + 0,232(\lambda - 1)M_{L\min}}$$

Zusammenhang Partialdruck – absolute Feuchte (Anwendung ideales Gasgesetz)

$$X = \frac{m_W}{m_{tG}} = \frac{\frac{p_W V}{R_W T}}{\frac{p_G V}{R_{tG} T}} = \frac{R_{tG}}{R_W} \frac{p_W}{p_{ges} - p_W} \quad \frac{R_{tG}}{R_W} = \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_{tG}} \approx 0,6$$

Quotient der molaren Massen

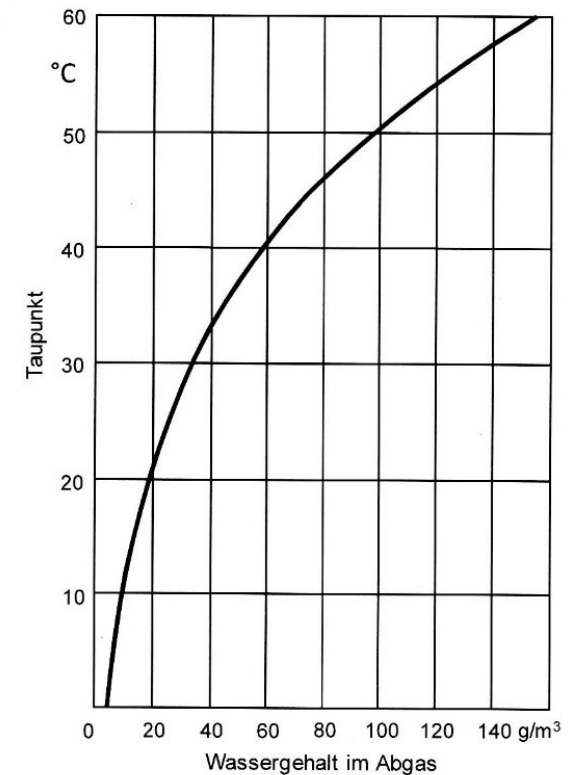
$$p_W(x) = \frac{x p_{ges}}{\frac{\bar{M}_W}{\bar{M}_{tG}} - x}$$

Wasserdampf-Partialdruck
im Rauchgas

Taupunkt: WD-Partialdruck $p_W(x)$ = Sättigungsdruck p_{sat}
Dampfdruck des reinen Wassers

Tautemperatur: Kondensationstemperatur bei p_{sat}

$$t_{tau} = t_{p_{sat}}^{VL} \quad (\text{z.B. WD-Tafel, Diagramm oder DD-Glchg.})$$



ÜA 3 Verbrennung+BWN /1

Berechnen Sie Abgasmenge und Tautemperatur des Abgases für Holz mit den Eigenschaften aus VOA_2/1.

(Massenzusammensetzung: C' : H' : O' = 50:6:44; C : H : O : W = 30:3,6:26,4:40)

$$M_G = M_{tG} + M_W = (1 - A) + \lambda M_{L\min}$$

$$M_{tG} = \frac{m_{tG}}{m_B} = 3,67C + 2S + N + 0,768\lambda M_{L\min} + 0,232(\lambda - 1)M_{L\min}$$

$$\xi_{tCO_2} = \frac{3,67C}{M_{tG}} \dots$$

$$M_W = \frac{m_W}{m_B} \approx 9H + W$$

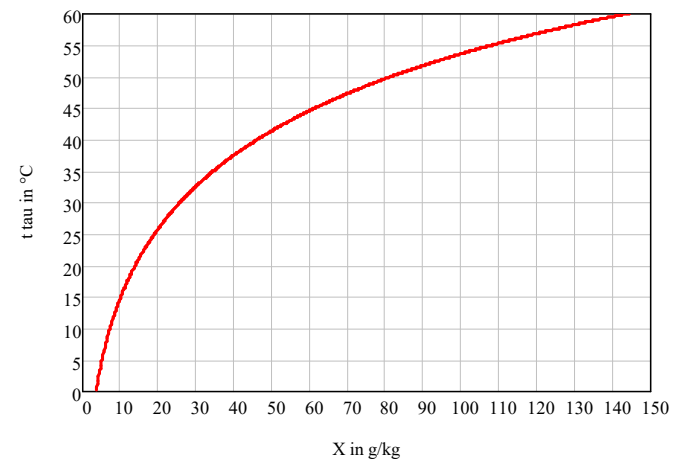
$$X = \frac{M_W}{M_{tG}} = \frac{m_W}{m_{tG}} = \frac{9H + W}{3,67C + 2S + N + 0,768\lambda M_{L\min} + 0,232(\lambda - 1)M_{L\min}}$$

$$p_{sat} = \frac{X_{sat} p_{ges}}{\frac{\bar{M}_W}{\bar{M}_{tG}} - X_{sat}}$$

$$t_{tau} = t^{VL}(p_{sat})$$

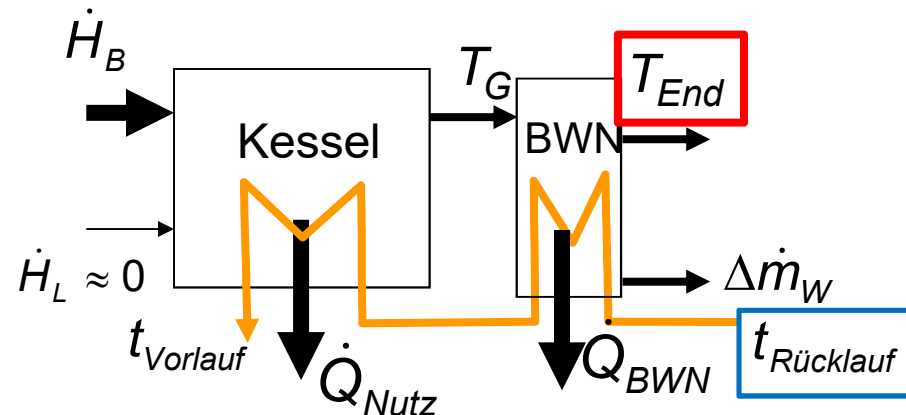
$$\bar{M}_W = 18 \frac{kg}{kmol}$$

$$\bar{M}_{tG} = \frac{1}{\sum_i \xi_{t,i} / \bar{M}_i} \approx 30 \frac{kg}{kmol}$$



Brennwertnutzung - Temperaturen

- Abkühlung der Abgase unterhalb Tautemperatur
- Nutzen abhängig von erreichbarer Endtemperatur der Gasauskühlung



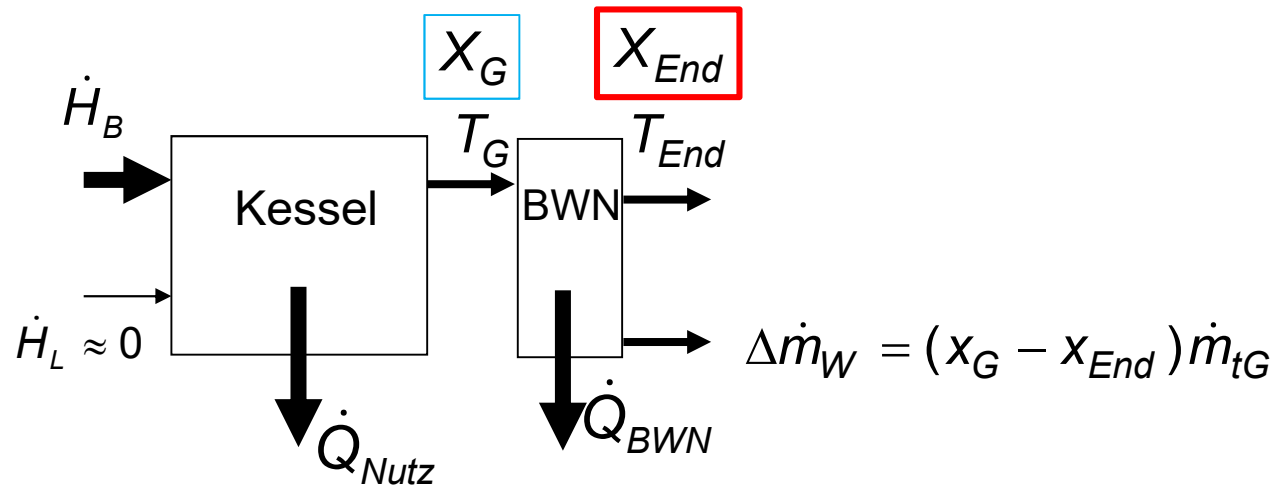
Abkühlung kann durch Heizungsrücklauf oder vorzuwärmende Verbrennungsluft erfolgen

T_{End} folgt aus niedrigster Wärmenutzungstemperatur

$$T_{End} = T_{Nutz,min} + \Delta T_{WÜ}$$

Brennwertnutzung – Abgasfeuchte/Kondensat

- Rückgewinnung der Kondensationsenthalpie von Reaktionswasser und Brennstofffeuchte



Abgasfeuchte aus Verbrennungsrechnung

$$X_G = \frac{M_w}{M_{tG}} = \frac{9H + W}{M_{tG}} = \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_{tG}}$$

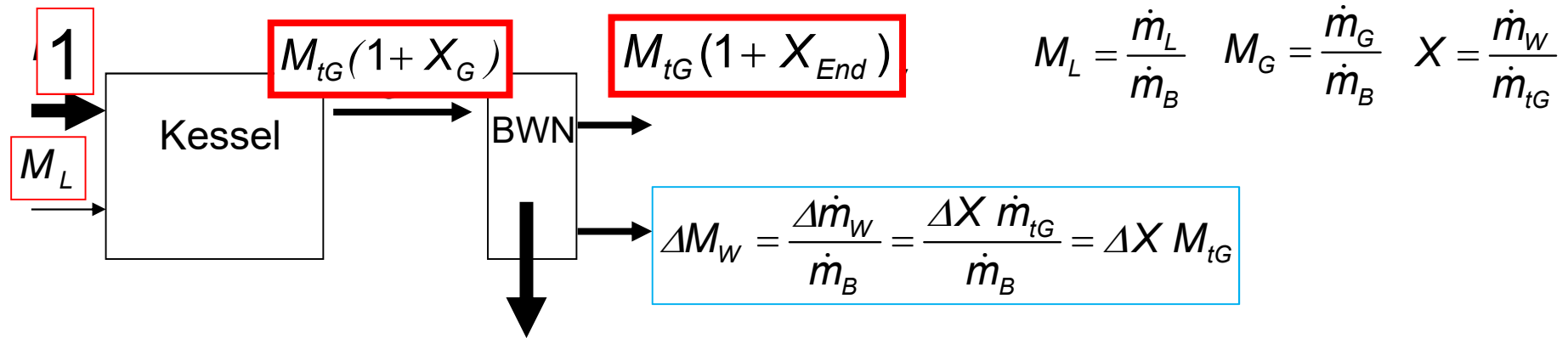
$$\dot{m}_{w,G} = x_G \dot{m}_{tG}$$

Endfeuchte abhängig von niedrigster Rücklauftemperatur

$$X_{End} = x_{sat} = \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_{tG}} \frac{p_{sat}(t_{End})}{p_{ges} - p_{sat}(t_{End})}$$

$$\dot{m}_{w,End} = x_{End} \dot{m}_{tG}$$

Brennwertnutzung - Wasser- Massenbilanz

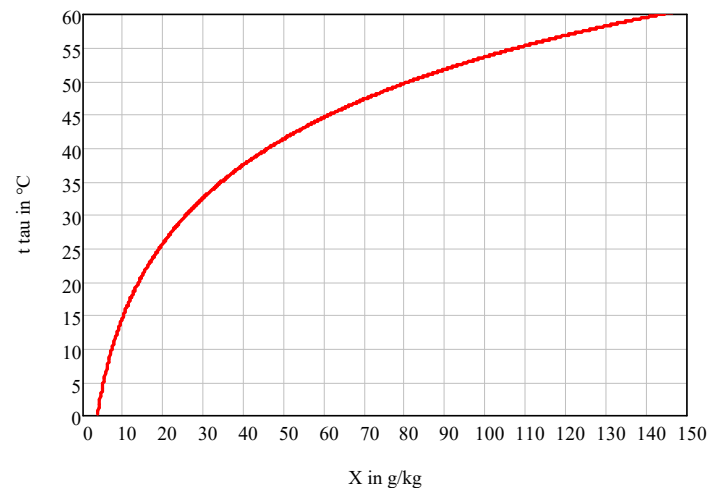


Vereinfachte Massenbilanz (A = 0)

$$M_L + 1 = M_G = M_{tG} + M_W = M_{tG} + X M_{tG}$$

$$M_G = M_{tG}(1 + X)$$

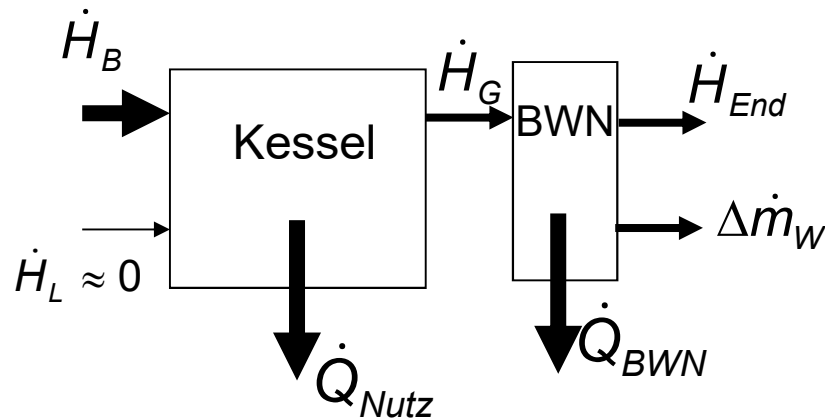
Zusammenhang
Feuchte - Tautemperatur



Brennwertnutzung - Wirkungsgrad

Darstellung im Vergleich zum konventionellen Kessel

$$\eta_{Konv} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{H}_B} = \frac{\dot{H}_B - \dot{H}_G}{\dot{H}_B} = 1 - \frac{\dot{H}_G}{\dot{H}_B} = 1 - \varepsilon_{V,G}$$



$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_{Nutz} + \dot{Q}_{BWN}}{\dot{H}_B} = \eta_{Konv} + \frac{\Delta \dot{H}_{BWN}}{\dot{H}_B} = \eta_{Konv} + \frac{(\dot{H}_G - \dot{H}_{End})}{\dot{H}_B}$$

Wärmerückgewinnung aus BWN: „positiver Verlustgrad“

$$\eta_K = \eta_{Konv} + \varepsilon_{BWN}$$

Berechnung der Abgasenthalpie (analog „Feuchte Luft“)

$$H_G = H_{tG} + H_W = m_{tG} h_{tG} + m_W h_W \quad \left| \cdot \frac{1}{m_{tG}} \right.$$

$$h_G = h_{tG} + X h_W$$

$$h_G = \frac{H_G}{m_{tG}}$$

$$X = \frac{m_W}{m_{tG}}$$

Spezifische Enthalpie
bezogen auf trockenes Abgas

Absolute Feuchte

$$h_G = c_{pG} (T - T_0) + X h_W$$

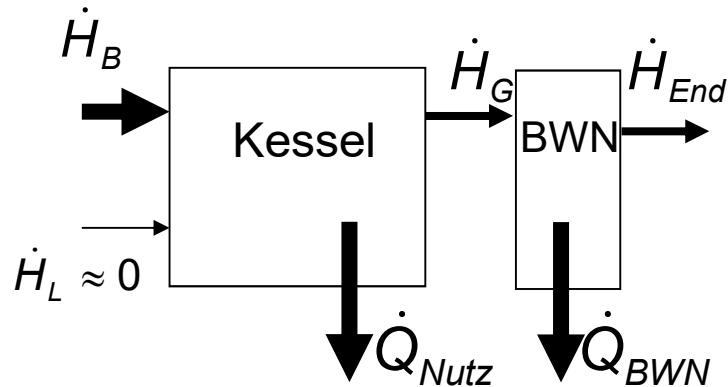
$$c_{pm,tG} = \sum_{i=1} \xi_{i,t} c_{pm,i} = \sum_{i=1} \frac{\xi_i}{1 - \xi_W} c_{pm,i}$$

Mittlere spez. Wärmekapazität trockenes Abgas

$$h_G = c_{pm} t_G + X_G \left(\Delta^{LV} h + c_{pD} t_G \right)$$

Bezugspunkt: $h_0 = 0$ bei $t_0 = 0^\circ\text{C}$,
flüssiges Wasser, trockene Luft

Berechnung der Abgasenthalpie - Änderung



$$\Delta \dot{H}_{BWN} = \dot{m}_{tG} (h_G - h_{End})$$

$$h_G = h_{tG} + X_G h_w$$

$$h_G = c_{pm,tG} t_G + X_G (\Delta^{LV} h + c_{pD} t_G)$$

$$\eta_{Konv} + \varepsilon_{BWN} = \eta_{Konv} + \frac{M_{tG} \Delta h_{BWN}}{H_{i/s}}$$

$$h_{End} = c_{pm,tG} t_{End} + X_{End} (\Delta^{LV} h + c_{pD} t_{End})$$

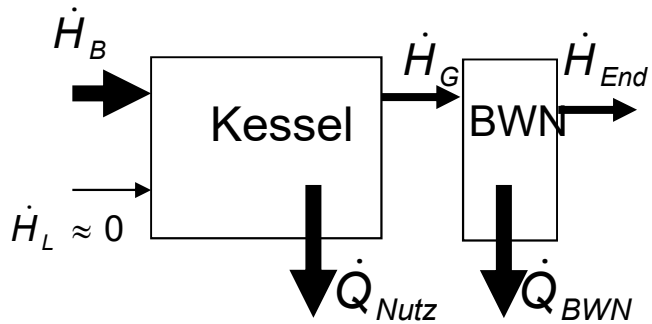
$$\Delta h_{BWN} = h_G - h_{End} = (X_G - X_{End}) \Delta^{LV} h + c_{p,TG} (T_G - T_{End}) + c_{pD} (X_G t_G - X_{End} t_{End})$$

latente Wärme

fühlbare
Wärme Abgas

fühlbare
Wärme Dampf

Kesselwirkungsgrad mit BWN



$$\eta_K = \eta_{Konv} + \varepsilon_{BWN} = 1 - \frac{\dot{m}_G h_G}{\dot{H}_B} + \frac{\dot{m}_{tG} \Delta h_{BWN}}{\dot{m}_B H_{i/s}}$$

$$= 1 - \frac{M_G h_G}{H_{i/s}} + \frac{M_{tG} \Delta h_{BWN}}{H_{i/s}}$$

$$\eta_K = \eta_{Konv} + \frac{M_{tG} \Delta h_{BWN}}{H_{i/s}}$$

$$\eta_K \approx 1 - \frac{M_G c_{pG} t_G}{H_{i/s}} + \underbrace{\frac{M_{tG} [(X_G - X_{End}) \Delta^{LV} h]}{H_{i/s}}}_{\text{latent}} + \underbrace{\frac{M_{tG} c_{p,TG} (t_G - t_{End})}{H_{i/s}}}_{\text{fühlbar}}$$

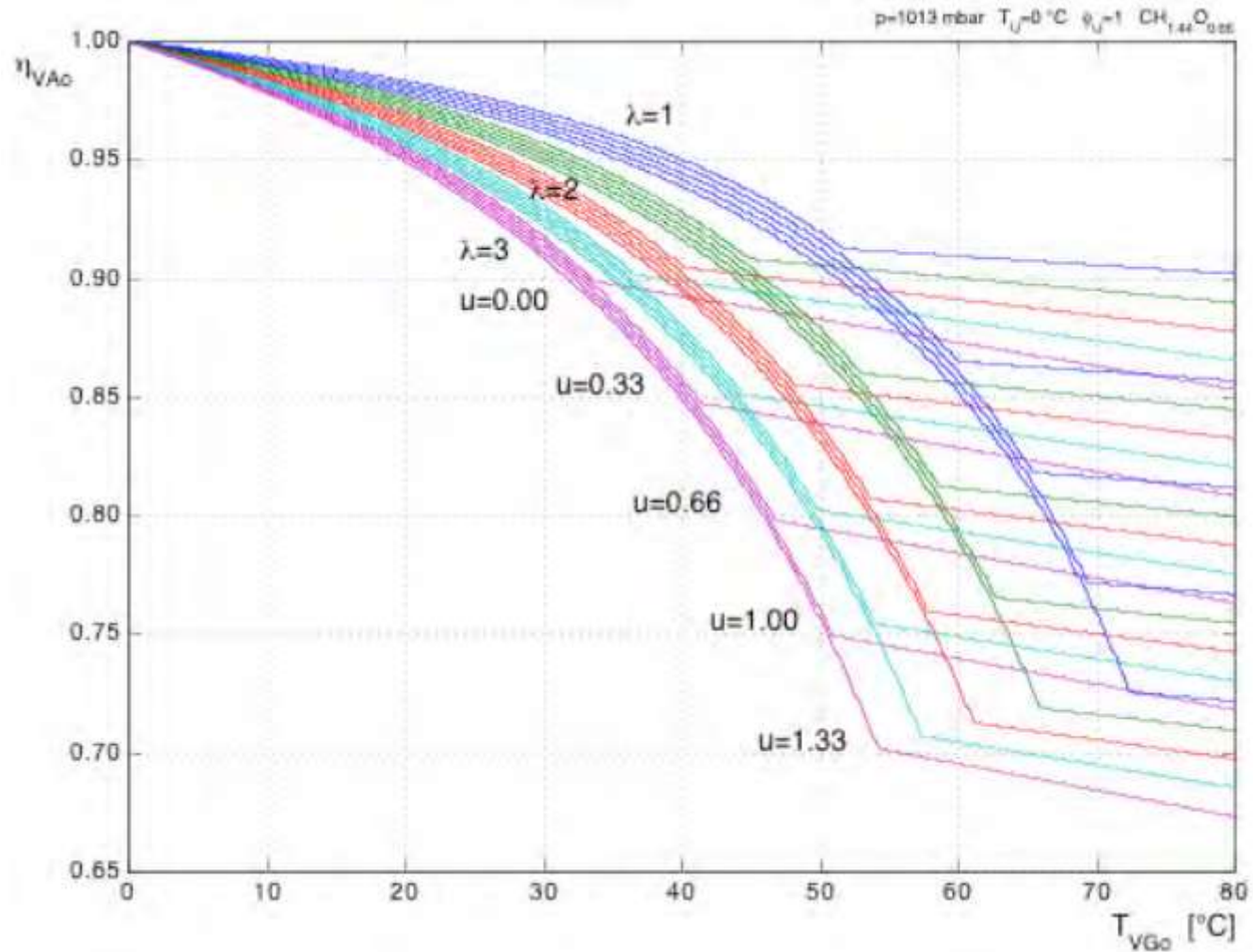
Wirksamkeit der Brennwertnutzung abhängig von

- Wassergehalt des Brennstoffs $H_i = (1 - W) H_{i,t} - 2,44 W$ $H_s = (1 - W) H_{s,t}$ $X_G = \frac{9H + W}{M_{tG}}$

- Endtemperatur $\Delta h_{\text{f\"uhlbar}} = c_P(t_G - t_{\text{End}})$ $\Delta h_{\text{latent}} = \Delta^{LV} h \left[X_G - X_{\text{End}(t_{\text{end}})} \right]$

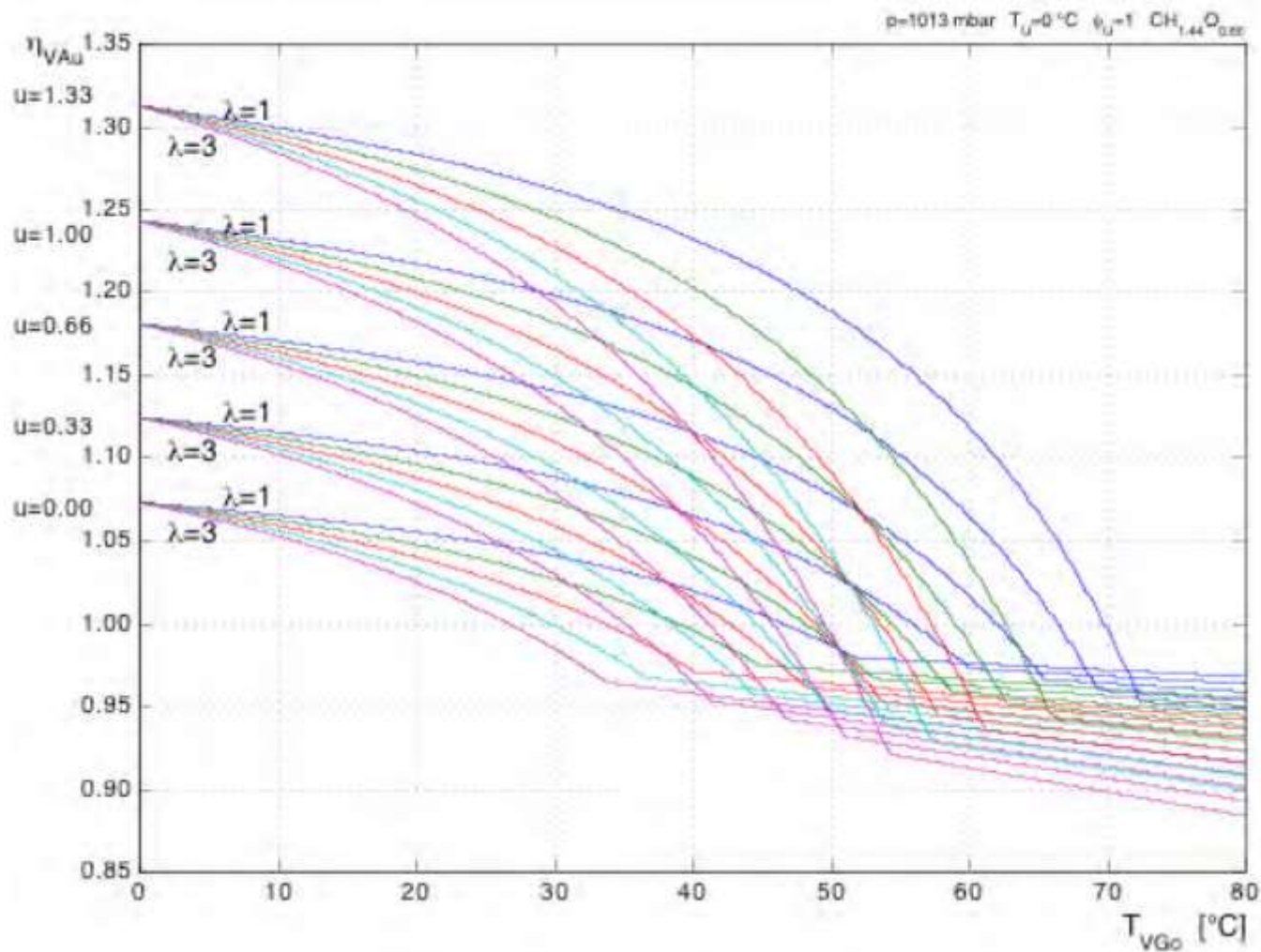
- Luftüberschuss $M_G = \lambda M_{L\min} + 1$ $X_G = \frac{9H + W}{M_{tG}}$

Quelle: Neuenschwader, Grundlagen der Abgaskondensation (1998)



Wirkungsgrad der Verbrennungsanlage bezogen auf den Brennwert, bei vollständiger Verbrennung, Betrieb ohne Hilfsenergie und ideal isoliertem Heizungsraum

Quelle: Neuenschwader, Grundlagen der Abgaskondensation (1998) und Kaltschmitt S.549



Wirkungsgrad der Verbrennungsanlage bezogen auf den Heizwert, bei vollständiger Verbrennung, Betrieb ohne Hilfsenergie und ideal isoliertem Heizungsraum

ÜA 3 Verbrennung+BWN /2

In einer Hackschnitzelheizung wird Brennstoff mit einem Wassergehalt $W = 40\%$ mit einer Luftzahl $\lambda = 1,3$ verbrannt. Für den trockenen Brennstoff sind der Heizwert $H_{i(t)} = 18,3 \text{ MJ/kg}$ und der minimale Luftbedarf $M_{L\min(t)} = 5,89$ bekannt.

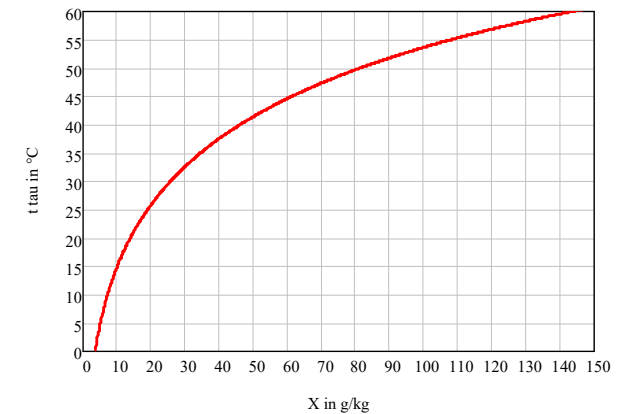
- a) Berechnen Sie H_i und H_s des feuchten Brennstoffes sowie die tatsächlichen brennstoffbezogenen Luft- und Abgasmassenströme M_L , M_G , M_{tG} , M_W .

Das entstehende Abgas hat eine absolute Feuchte von $X_G = 149 \text{ g/kg}$ und eine mittlere Molare Masse des trockenen Gases $\bar{M}_{tG} = 30,7 \text{ g/kg}$. (Daten analog zu Aufgabe 1)

- b) Bestimmen Sie die Tautemperatur des Abgases. ($t_{\text{tau}} = 60,6^\circ\text{C}$)

Das Gas wird in einem Brennwert-Kessel auf $t_G = 40^\circ\text{C}$ abgekühlt.

- c) Welche Verbesserung des Wirkungsgrades ergibt sich durch den Brennwertkessel gegenüber dem konventionellen Kessel? (ÜA2/2: $t_{G,\text{konv}} = 223^\circ\text{C}$, $\eta_K = 0,85$)



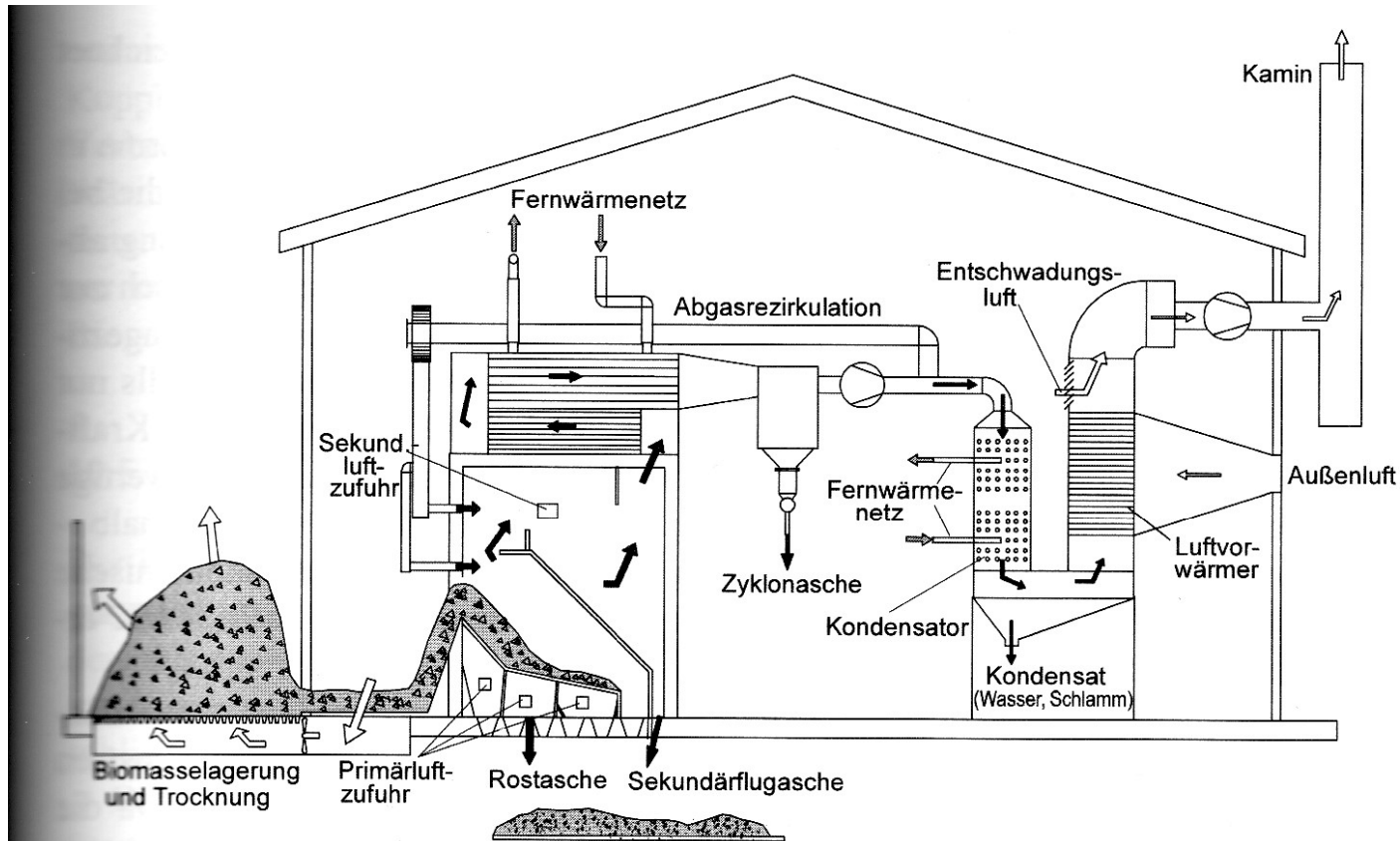
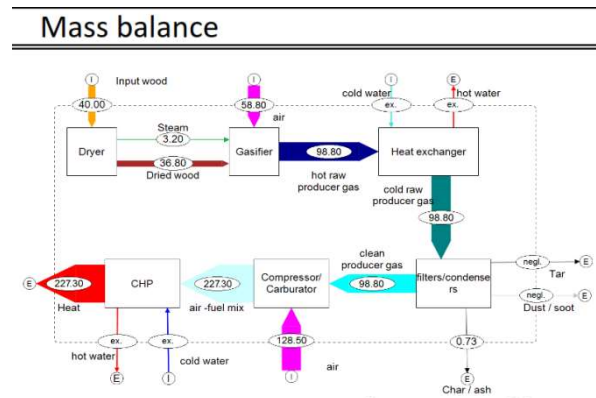


Abb. 10.64 Heizanlage mit Lufterwärmung, Abgasentschwadung und Brennstoffvortrocknung (nach /10-62/) (die Temperatur des Brennstoffs vor der Feuerung ist hier höher als die Umgebungstemperatur)

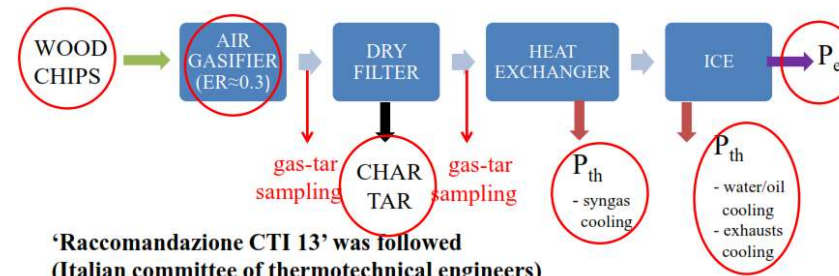
Energie- und Exergiefluss einer Vergasungsanlage



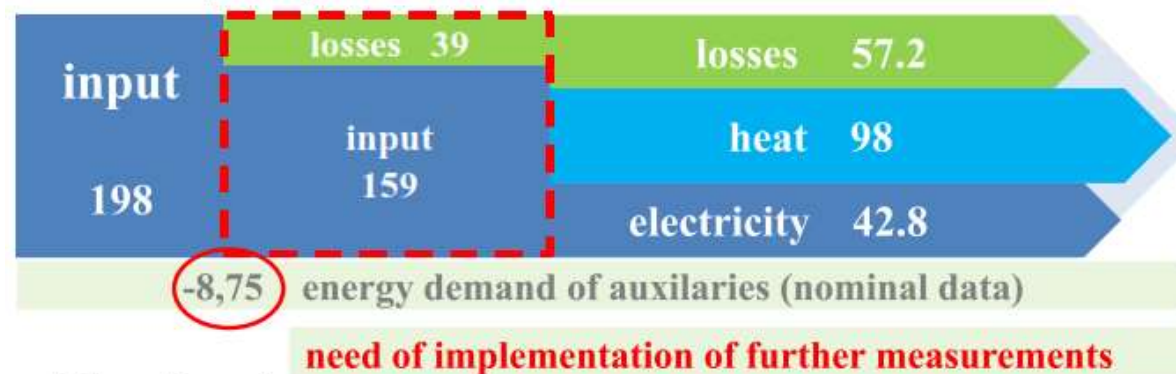
Gasification power plant (A tech.)

P_{el} : 45 kW_{el} (nominal data)

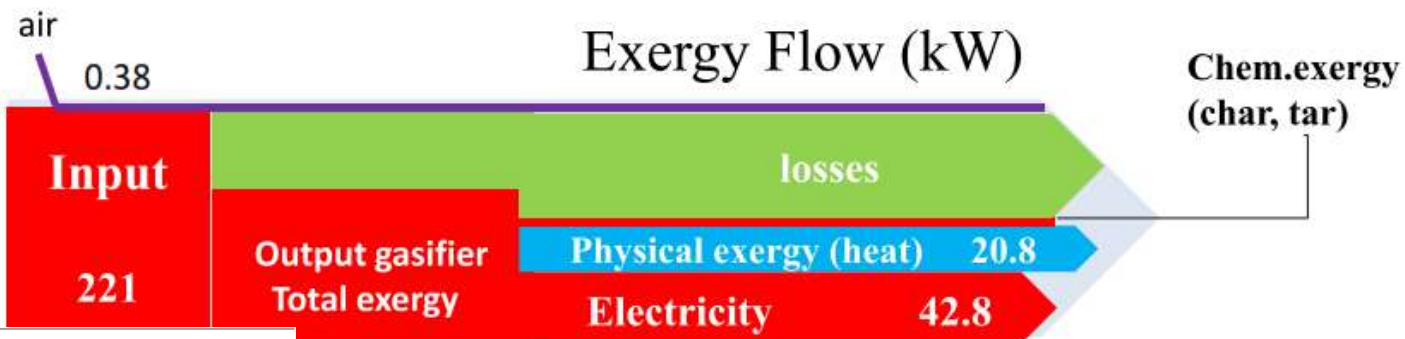
P_{th} : 120 kW_{th}



Fluxes (kW)



need of implementation of further measurements



Chem.exergy (char, tar)



FREIE UNIVERSITÄT BOZEN
LIBERA UNIVERSITÀ DI BOLZANO
FREE UNIVERSITY OF BOZEN - BOLZANO

S. Vakalis, D. Prando,
F. Patuzzi and M. Barattieri

ice of biomass small scale gasification plants by implementing mass and energy balances

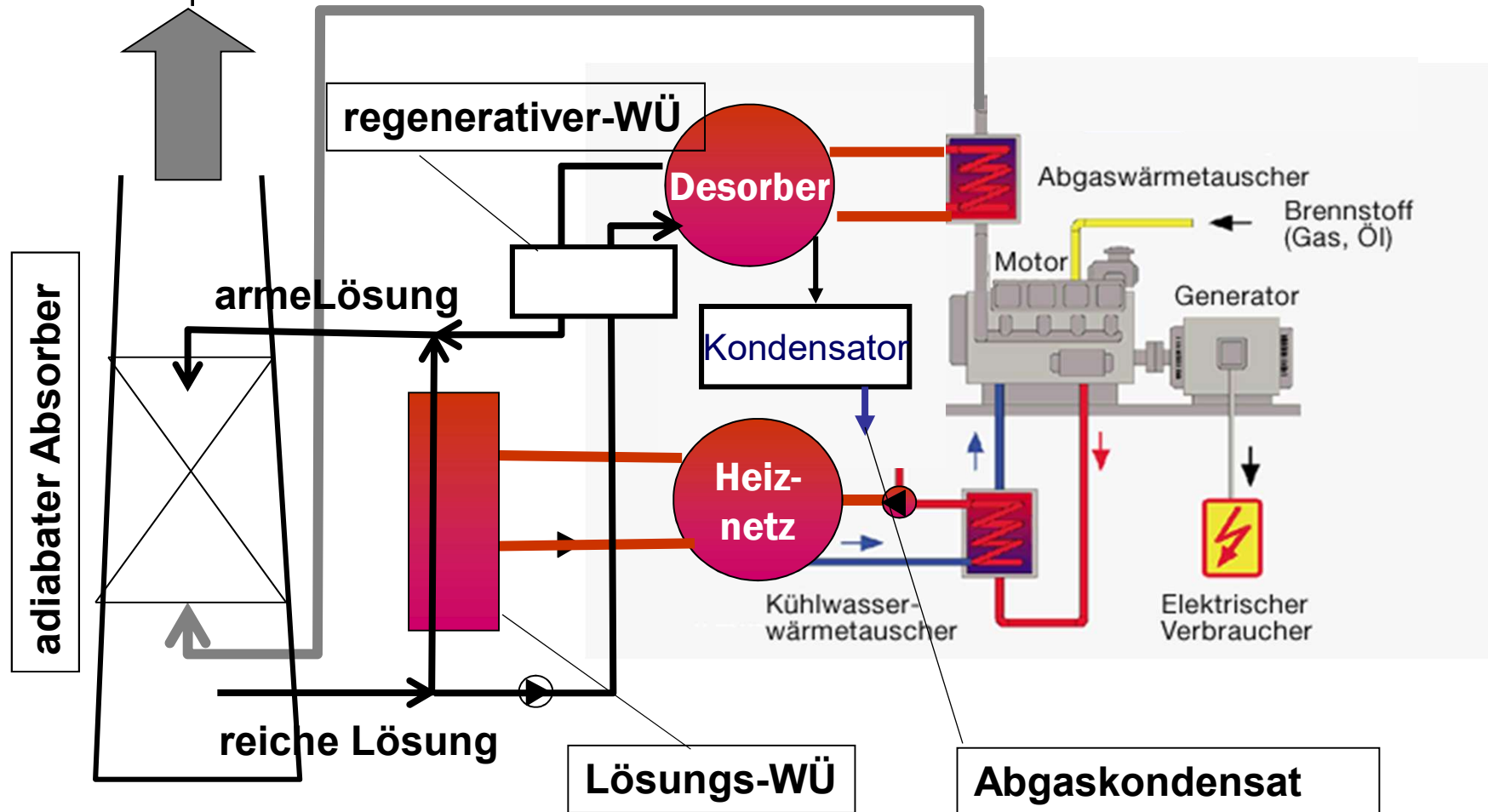
20

Hochtemperaturbrennwertnutzung

Trockenes Abgas

mit $\varphi < 1$

feuchtes Abgas



- Pilotanlage im HKW Buch der Vattenfall Europe Berlin