Karlsruhe Institute of Technology

Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

Verfahrenstechnisches Praktikum WS 2018/2019

Versuch D3:
Energiebilanz einer Verbrennung

Geb.: 40.13 II

Engler-Bunte-Institut Bereich Verbrennungstechnik

ENGLER-BUNTE-INSTITUT

1. Einführung und Grundlagen

1.1 Energiebilanz einer Verbrennung

Die Energiebilanz einer Verbrennung wird am Beispiel einer kleinen Brennkammer untersucht, in welcher die bei der Verbrennung von Erdgas freiwerdende Energie zur Erwärmung des Wassers benutzt wird. Der Apparat führt also den gleichen Prozess durch, wie er in einem Heizungskessel abläuft. Aus versuchstechnischen Gründen wurde eine andere geometrische Anordnung gewählt als bei Heizkesseln üblich.

Der Grad der Energieausnutzung in feuerungstechnischen Anlagen lässt sich durch eine Bilanz aller die Grenzen des Apparates überschreitenden Wärmeströme bestimmen.

Folgende Ströme überschreiten die Kontrollraumgrenze, die mit der äußeren Wand der Versuchsanlage zusammenfällt.

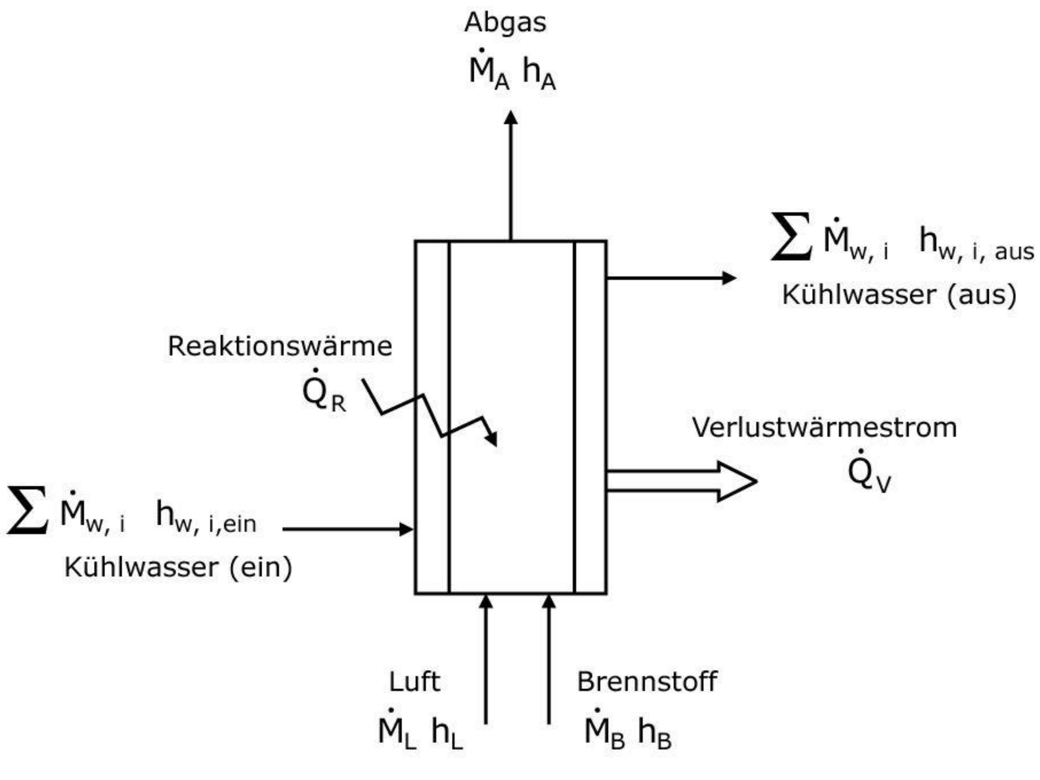


Bild 1: Zur Herleitung der Energiebilanz

In das System hinein gehen die folgenden Massenströme:

1. $\dot{M}_B$ = Massenstrom des Brennstoffes in $\frac{kg}{s}$
2. $\dot{M}_L$ = Massenstrom der Verbrennungsluft in $\frac{kg}{s}$
3. $\sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i}$ = Gesamtmassenstrom des Kühlwassers in $\frac{kg}{s}$

Diese Massenströme transportieren die folgenden Energieströme in das System hinein (h_i ist die spezifische Enthalpie):

1. $\dot{H}_B = \dot{M}_B \cdot h_B$ = Energiestrom des Brennstoffes in kJ/h

2. $\dot{H}_L = \dot{M}_L \cdot h_L$ = Energiestrom der Luft in $\frac{kJ}{h}$ (fühlbare Wärme der Verbrennungsluft)

3. $\sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,i,ein} = \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i} \cdot h_{w,i,ein}$
   = Energiestrom von Wasser in $\frac{kJ}{h}$

4. $\dot{Q}_R = \Delta_R h \cdot \dot{M}_B$ = Die bei der Verbrennung freigesetzte Wärmeleistung ($\lambda \geq 1$)
   $\Delta_R h$ bezeichnet dabei die pro kg Brennstoff freigesetzte Reaktionsenergie.

Aus dem System heraus gehen die Massenströme:

1. $\dot{M}_A$ = Massenstrom des Abgases in kg/s

2. $\sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i}$ = Gesamtmassenstrom des Kühlwassers in kg/s

Die Massenströme transportieren die folgenden Energieströme aus dem System heraus:

1. $\dot{H}_A = \dot{M}_A \cdot h_A$ = Energiestrom des Abgases in J/s (fühlbare Wärme des Abgases)

2. $\sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,i,aus} = \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i} \cdot h_{w,i,aus}$ = Energiestrom des Kühlwassers in J/s am Austritt

Zudem gibt die Brennkammer über ihre warmen Wände Energie in Form eines Verlustwärmestroms ab:

$\dot{Q}_V$ = Verlustwärmestrom

Der Satz von der Energieerhaltung sagt aus, dass die zugeführten und die abgeführten Energieströme gleich sind:

$$\dot{E}_{zu} = \dot{E}_{ab}$$

$$\dot{H}_B + \dot{H}_L + \sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,i,ein} + \dot{Q}_R = \dot{H}_A + \sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,i,aus} + \dot{Q}_V$$

Die Energieströme ergeben sich aus den Massenströmen und den Stoffeigenschaften (spezifische Wärmekapazitäten c_p sowie den Temperaturen (in K)) zu:

$$\dot{H}_B = \dot{M}_B \cdot h_B = \dot{M}_B \cdot c_{pB} \cdot \Delta\vartheta_B = \dot{M}_B \cdot c_{pB} \cdot (\vartheta_B - \vartheta_0)$$

$$\dot{H}_L = \dot{M}_L \cdot h_L = \dot{M}_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta\vartheta_L = \dot{M}_L \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_L - \vartheta_0)$$

$$\sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,ein} = \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_w \cdot h_{w,ein} = \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i} \cdot c_{pw} \cdot \Delta\vartheta_{w,ein} = c_{pw} \cdot \Delta\vartheta_{w,ein} \cdot \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i}$$
$$= c_{pw} \cdot (\vartheta_{w,ein} - \vartheta_0) \cdot \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i}$$

$$\sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,aus} = \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_w \cdot h_{w,aus} = \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i} \cdot c_{pw} \cdot \Delta\vartheta_{w,i,aus} = \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i} \cdot c_{pw} \cdot (\vartheta_{w,i,aus} - \vartheta_0)$$

mit der Bezugstemperatur $\vartheta_0 = 273{,}15$ K.

Da der Brennstoff- und Luftstrom in Volumenströmen gemessen werden und die spezifischen Wärmen in $\frac{kJ}{m_n^3}$ gegeben sind, ist es zweckmäßig, die Massenströme für Brennstoff, Luft und Abgas in Volumenströme bzw. in Normvolumenströme umzurechnen.

$$\dot{H}_L = \dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot h_L = \dot{V}_L \cdot \hat{c}_{pL} \cdot \vartheta_L = \dot{V}_{n,L} \cdot \hat{c}_{p_nL} \cdot \Delta\vartheta_L = \dot{V}_{n,L} \cdot \hat{c}_{p_nL} \cdot (\vartheta_L - \vartheta_0)$$

$$\dot{H}_B = \dot{V}_B \cdot \rho_B \cdot h_B = \dot{V}_L \cdot \hat{c}_{pB} \cdot \vartheta_B = \dot{V}_{n,B} \cdot \hat{c}_{p_nB} \cdot \Delta\vartheta_B = \dot{V}_{n,B} \cdot \hat{c}_{p_nB} \cdot (\vartheta_B - \vartheta_0)$$

$$\dot{H}_A = \dot{V}_A \cdot \rho_A \cdot h_A = \dot{V}_A \cdot \hat{c}_{pA} \cdot \vartheta_A = \dot{V}_{n,A} \cdot \hat{c}_{p_nA} \cdot \Delta\vartheta_A = \dot{V}_{n,A} \cdot \hat{c}_{p_nA} \cdot (\vartheta_A - \vartheta_0)$$

Wobei $\hat{c}_p = c_p \cdot \rho$ bzw. $\hat{c}_{p_n} = c_p \cdot \rho_n$ die volumenspezifische Wärmekapazität ist und die Einheit $\frac{J}{m^3 \cdot K}$ bzw. $\frac{J}{m_n^3 \cdot K}$ besitzt.

Die freigesetzte Reaktionswärme $\Delta_R H$ wird in der Feuerungstechnik auch als unterer Heizwert H_u bezeichnet. Er ist im Allgemeinen auf den Normvolumenstrom des Brennstoffs bezogen und besitzt die Einheit $\frac{kJ}{m^3_{n,\,Brenngas}}$. Für die freigesetzte Reaktionswärme gilt damit:

$$\dot{Q}_R = \dot{V}_{n,B} \cdot H_u$$

Aus den bekannten bzw. messbaren Größen:

$\dot{V}_B$	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Brennstoffvolumenstrom
$\dot{V}_L$	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Verbrennungsluftstrom
$\dot{V}_A$	$\left[\frac{m^3}{h}\right]$	Abgasvolumenstrom
H_u	$\left[\frac{kJ}{m_n^3}\right]$	Heizwert des Brennstoffs
$\dot{M}_{w,i}$	$\left[\frac{kg}{h}\right]$	Kühlwasserströme (1-6)
$\hat{c}_{p_n}$	$\left[\frac{kJ}{m_n^3 K}\right]$	mittlere (volumenbezogene) spezifische Wärmekapazität (Gase)

c_{pW}	$\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	mittlere spezifische Wärmekapazität (Wasser)
ϑ	[K]	Temperaturen

lässt sich nun aus der Wärmebilanz der schwer messbare Wärmeverlust $\dot{Q}_V$ berechnen.

$$\dot{Q}_V = \dot{H}_B + \dot{H}_L + \dot{Q}_R + \sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,i,ein} - \sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,i,aus} - \dot{H}_A$$

Die Energieausnutzung einer feuerungstechnischen Anlage wird durch den Wirkungsgrad ausgedrückt.

Dafür gibt es zwei Definitionen:

1. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad η_f ist Maß für die Qualität des Wärmeaustausches innerhalb der Feuerungsanlage. Dabei werden alle von den Flammengasen abgegebenen Wärmeströme ($\dot{Q}_{nutz}$ und $\dot{Q}_V$) gleichartig behandelt, da ein Wärmeaus-tausch nötig ist, um diese Ströme zum Fließen zu bringen. Die Abgasenergie wird hingegen davon unterschieden, da sie ohne Wärmeaustausch zustande kommt.

$$\eta_f = \frac{\dot{Q}_{nutz} + \dot{Q}_V}{\dot{Q}_{zu}}$$

bzw.

$$\eta_f = \frac{\dot{Q}_{nutz} + \dot{Q}_V}{\dot{Q}_R + \dot{H}_B + \dot{H}_L} = 1 - \frac{\dot{H}_A}{\dot{Q}_R + \dot{H}_B + \dot{H}_L}$$

Der dem Prozess entzogene Nutzwärmestrom $\dot{Q}_{Nutz}$ ist dabei die an das Kühlwasser abgegebene Leistung:

$$\dot{Q}_{nutz} = \sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,aus} - \sum_{i=1}^{6} \dot{H}_{w,ein} = \sum_{i=1}^{6} \dot{M}_{w,i} \cdot c_{pw}c \cdot (\vartheta_{w,i,aus} - \vartheta_{w,ein})$$

2. Der Gesamtwirkungsgrad gibt den Anteil der für den jeweiligen Prozess genutzten Wärme an. Als Verluste werden hierbei außer der Abgasenergie auch die Wandverluste angesehen:

$$\eta_{ges} = \frac{\dot{Q}_{nutz}}{\dot{Q}_R + \dot{H}_B + \dot{H}_L} = 1 - \frac{\dot{H}_A + \dot{Q}_V}{\dot{Q}_R + \dot{H}_B + \dot{H}_L}$$

1.2 Rauchgaszusammensetzung

Für die Auslegung von technischen Verbrennungseinrichtungen spielt der spezifische Luftbedarf eine wichtige Rolle (Dimensionierung der Leitungen, Pumpen, Verdichter etc.). Ebenso sind die Volumenströme der Verbrennungsgase (Rauchgase) zur Auslegung von Verbrennungseinrichtungen wichtige Größen. Die spezifische Mindestrauchgasmenge ist die Menge der Verbrennungsprodukte (Stoffmenge der Rauchgase), die bei stöchiometrischer Verbrennung eines Mols des Brennstoffes für eine vorgegebene Reaktionsgleichung entstehen.
Für die Verbrennung von Methan ergibt sich:

$$\mathrm{CH_4 + 2O_2 \leftrightarrows CO_2 + 2\,H_2O}$$

oder

$$\mathrm{CH_4 + 2O_2 + 2 \cdot \frac{0{,}79}{0{,}21} N_2 \leftrightarrows CO_2 + 2\,H_2O + 2 \cdot \frac{0{,}79}{0{,}21} N_2}$$

Der Sauerstoffbedarf der Reaktion mit reinem Sauerstoff ist wie folgt definiert:

$$O_{2\mathrm{min}} = 2 \frac{mol\ O_2}{mol\ CH_4}$$

Für die Rauchgasmenge, die bei stöchiometrischer Verbrennung von Methan mit Luft entsteht, gilt:

$$\mathrm{R_{min_{Luft}}} = \left(\frac{\mathrm{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2}}}{\mathrm{n_{CH_4}}} \right)_{\mathrm{min}} = 10{,}524 \frac{\mathrm{mol_{Rauchgas}}}{\mathrm{mol_{Brenngas}}}$$

Für andere Brennstoffe oder Gemische aus Brennstoffen sind die entsprechenden Beziehungen leicht aus den entsprechenden Umsatzgleichungen abzuleiten. Für die Auslegung von technischen Verbrennungseinrichtungen ist schließlich noch die Zusammensetzung der Rauchgase eine wichtige Information. Die Zusammensetzung der Rauchgase in Volumenanteilen oder Molanteilen kann leicht mit Hilfe der Reaktionsgleichungen für die betrachteten Verbrennungsreaktionen, die als Volumengleichungen zu lesen sind, angegeben werden. Wird der Volumenanteil bzw. Molanteil des Verbrennungsprodukts j im Rauchgas mit X_j bezeichnet, ist

$$\mathrm{X_j} = \frac{\mathrm{n_j}}{\sum_j \mathrm{n_j}} = \frac{\mathrm{n_j}}{\mathrm{R}}$$

Für die Verbrennung von Methan mit Luft bei einer Luftzahl von $\lambda \geq 1$ ergibt sich damit

$$\mathrm{CH_4 + 2\lambda O_2 + 2 \cdot \frac{0{,}79}{0{,}21} \lambda N_2 \leftrightarrows CO_2 + \ 2\,H_2O + 2(\lambda - 1)O_2 + \ 2 \cdot \frac{0{,}79}{0{,}21} \lambda N_2}$$

$$\sum_j \mathrm{n_j} = \mathrm{R} = 1 + 9{,}524\,\lambda$$

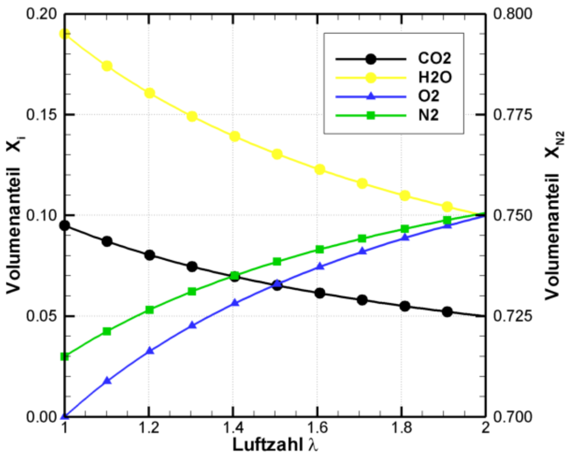
Damit berechnen sich die Anteile der einzelnen Rauchgaskomponenten gemäß

$$\mathrm{X_{CO_2}} = \frac{\mathrm{n_{CO_2}}}{\sum_j \mathrm{n_j}} = \frac{\mathrm{n_{CO_2}}}{\mathrm{R}} = \frac{1}{\mathrm{R}} = \frac{1}{1 + 9{,}524\,\lambda} \frac{mol_{CO_2}}{mol_{Rauchgas}}$$

$$X_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{\sum_j n_j} = \frac{n_{H_2O}}{R} = \frac{2}{R} = \frac{2}{1+9{,}524\,\lambda}\frac{mol_{H_2O}}{mol_{Rauchgas}}$$

$$X_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{\sum_j n_j} = \frac{n_{O_2}}{R} = \frac{2(\lambda-1)}{R} = \frac{2(\lambda-1)}{1+9{,}524\,\lambda}\frac{mol_{O_2}}{mol_{Rauchgas}}$$

$$X_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{\sum_j n_j} = \frac{n_{N_2}}{R} = \frac{7{,}524\,\lambda}{R} = \frac{7{,}524\,\lambda}{1+9{,}524\,\lambda}\;\frac{mol_{N_2}}{mol_{Rauchgas}}$$



Die Zusammensetzung des Rauchgases bei der Verbrennung von Methan mit Luft ist in der nebenstehenden Abbildung in Abhängigkeit der Luftzahl angegeben.

Methan ist der wasserstoffreichste Kohlenwasserstoff. Das Rauchgas bei der Verbrennung von Methan (oder Erdgas) enthält daher den niedrigsten Anteil an Kohlendioxid. Bei anderen Brennstoffen ergeben sich andere Verhältnisse.

Beispiel: Verbrennung von Kohlenwasserstoffen (Heizöl) mit Luft:

$$C_mH_n + \left(m+\frac{n}{4}\right)\lambda O_2 + \left(m+\frac{n}{4}\right)\frac{0{,}79}{0{,}21}\lambda N_2 \leftrightarrows m\,CO_2 + \frac{n}{2}H_2O + \left(m+\frac{n}{4}\right)(\lambda-1)O_2 + \left(m+\frac{n}{4}\right)\frac{0{,}79}{0{,}21}\lambda N_2$$

Dann ist

$$\sum_j n_j = R = \frac{n}{4} + 4{,}762\,\lambda\left(m+\frac{n}{4}\right)$$

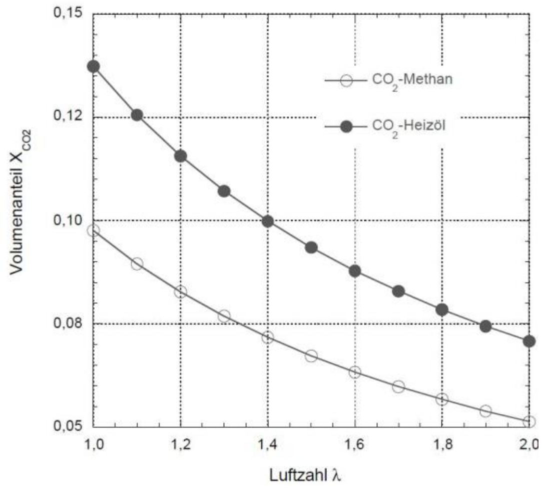
Damit wird der Anteil von Kohlendioxid im Rauchgas mit nachfolgender Gleichung ermittelt:

$$X_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{\sum_j n_j} = \frac{n_{CO_2}}{R} = \frac{m}{R} = \frac{4m}{n+4{,}762\lambda(4m+n)}$$

Die Volumenanteile der anderen Rauchgaskomponenten ergeben sich entsprechend. Die untere Abbildung gibt einen Vergleich des Kohlendioxidanteils im Rauchgas bei der Verbrennung von Methan bzw. Heizöl mit Luft in Abhängigkeit der Luftzahl wieder. Die Zusammensetzung von Heizöl ist dabei mit m = 12 angenommen.

Für andere Brennstoffe ergeben sich durch die entsprechenden Definitionen der Reaktionsgleichungen für die Verbrennung analoge Beziehungen für Luftbedarf, Rauchgasmenge, Rauchgaszusammensetzung. Diese Größen beziehen sich jeweils auf eine vorgegebene Reaktionsgleichung, für die vollständiger Umsatz vorausgesetzt wird. Tatsächlich liegt aber für jede chemische Reaktion ein Gleichgewicht vor. Für Verbrennungsreaktionen liegen die Gleichgewichte weit auf der Seite der Produkte, so dass die bisherige Schreibweise eine gute

Annäherung an den tatsächlichen Zustand ist. Zu beachten ist jedoch, dass in den Verbrennungsreaktionen auch Komponenten auftreten, die bisher noch vernachlässigt wurden.



2. Aufgabenstellung

An einer wassergekühlten Brennstrecke sind für drei verschiedene Einstellungen die Wärme-bilanzen aufzustellen und die Wärmeverluste zu bestimmen. Es werden drei verschiedene Luftzahlen (Verhältnis von tatsächlichem zu stöchiometrischem Luftstrom, vgl. Grundlagen) eingestellt ($\lambda = 1$; $\lambda = 1{,}1$; $\lambda = 1{,}2$), der Brennstoffdurchsatz beträgt dabei 4 $\mathrm{m_n^3/h}$. Die Kühlwasser-volumenströme sind für jede Luftzahlvariation so einzustellen, dass die Kühlwassertemperatur in jeder der fünf Segmente der Brennkammer (s. Bild 2) 70°C beträgt. Zusätzlich muss für jede Luftzahlvariation die CO_2 Konzentration mittels eines Messgeräts, wie es auch Schornsteinfeger benutzen, gemessen werden.

3. Versuchsaufbau und Durchführung

Die Brennstrecke besteht aus einem zylindrischen, in fünf Abschnitte gegliederten Brennraum, dessen Wände durch Wasser gekühlt werden (Bild 2). Zusätzlich ist am Ende der Brennkammer eine spiralförmige Kühlschlange eingebaut. Als Brennstoff wird Erdgas verwendet. Die Ströme von Erdgas und Verbrennungsluft werden mit Rotametern (od. Schwebekörperdurchflußmessgeräten) bestimmt und dann dem Brenner zugeführt. Als Temperatur der beiden Ströme kann Raumtemperatur (20°C) angenommen werden. Die bei den einzelnen Einstellungen entstehenden Abgasmengen werden angegeben, die Art der Bestimmung zeigt das Kapitel "Grundlagen". Die Abgastemperatur wird mit Hilfe eines Platin-Rhodium/Platin-Thermoelements gemessen. Die Kühlwasserdurchsätze durch die fünf Abschnitte und die Spirale werden mit Rotametern gemessen. Die Kühlwassereintritts-temperaturen sind gleich und werden von einem gemeinsamen Thermometer angezeigt.

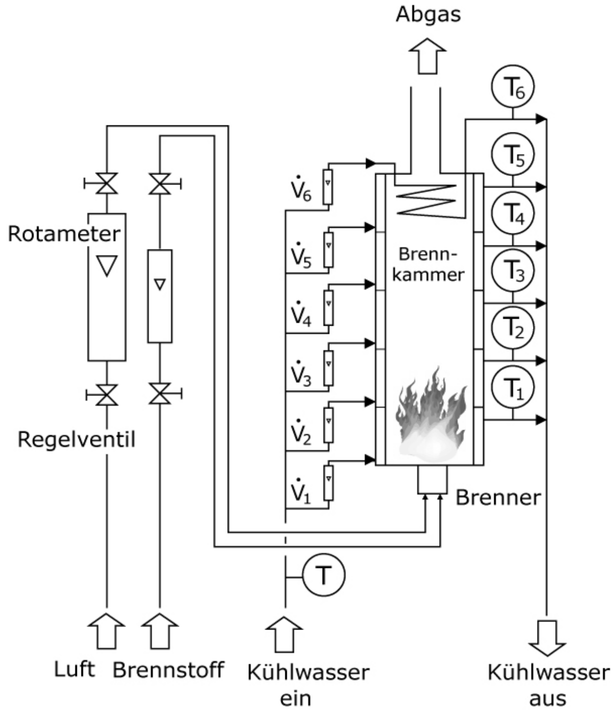


Bild 2: Versuchsaufbau

4. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

Die Energiebilanzen sind in übersichtlicher Form darzustellen. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad und der Gesamtwirkungsgrad sind als Funktion der Luftzahl in jeweils einem Diagramm darzustellen. Dabei muss $c_{pn,\ Abgas}$ mit den Werten aus der untenstehenden Tabelle linear extrapoliert werden.

Die Molenbrüche von CO_2, H_2O, O_2, N_2 im Abgas sind zu berechnen und in Abhängigkeit von der Luftzahl in einem Diagramm darzustellen. Für diese Berechnung soll vereinfacht angenommen werden, dass das Erdgas zu 100% aus Methan besteht. Zusätzlich sind die gemessene und die berechnete CO_2 Konzentration für alle drei Luftzahlen zu vergleichen. Außerdem sollen die an der Anlage und mit dem Messgerät gemessene Abgastemperatur bei allen drei Luftzahlen verglichen werden.

5. Anhang

Stoffeigenschaften

Erdgaszusammensetzung: CH_4 95%; C_2H_6 2,5%; N_2 2%; CO_2 0,5%

Unterer Heizwert: $H_u = 35890\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{m^3}}$

Spezifische Wärmen:

- Wasser $\hat{c}_{p_nW} = 4{,}18\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg\cdot K}}$
- Luft $\hat{c}_{p_nL} = 1{,}007\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{m_n^3\cdot K}}$
- Erdgas $\hat{c}_{p_nB} = 2{,}210\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{m_n^3\cdot K}}$
- Abgas $\hat{c}_{p_nA}$ in $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{m_n^3\cdot K}}$ (siehe Tabelle)

ϑ \ λ	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,40	1,50
375 K	1,381	1,377	1,373	1,373	1,369	1,365	1,365	1,363	1,360
475 K	1,398	1,394	1,390	1,386	1,386	1,381	1,381	1,377	1,373
575 K	1,411	1,406	1,402	1,402	1,398	1,394	1,390	1,390	1,386

Temperatur Brennstoff und Luft bei Zufuhr: 20 °C

Abgasmenge:

-spezifische (für Methan): $R = 1 + 9{,}524\,\lambda \quad \left[\frac{\mathrm{m^3_{n,Abgas}}}{\mathrm{m^3_{n,Brenngas}}}\right]$

-gesamte: $\dot{V}_{n,A} = R \cdot \dot{V}_{n,B} \quad [\mathrm{m_n^3/h}]$

Hinweise zur Auswertung:
Die Umrechnung von Normvolumenströmen $\dot{V}_n$ in Volumenströme $\dot{V}$ bzw. umgekehrt erfolgt unter der Annahme idealen Gasverhaltens mit Hilfe der folgenden Gleichung:

$$\dot{V} = V_n \cdot \frac{p_n}{p} \cdot \frac{T}{T_n} = \dot{V}_n \cdot \frac{\rho_n}{\rho}$$

mit
p_n = 1,013 bar
T_n = 273,15 K
p = Druck des Gases in bar
T = Temperatur des Gases in K
ρ = Dichte des Gases beim Druck p und der Temperatur T
ρ_n = Dichte des Gases beim Druck p_n und der Temperatur T_n