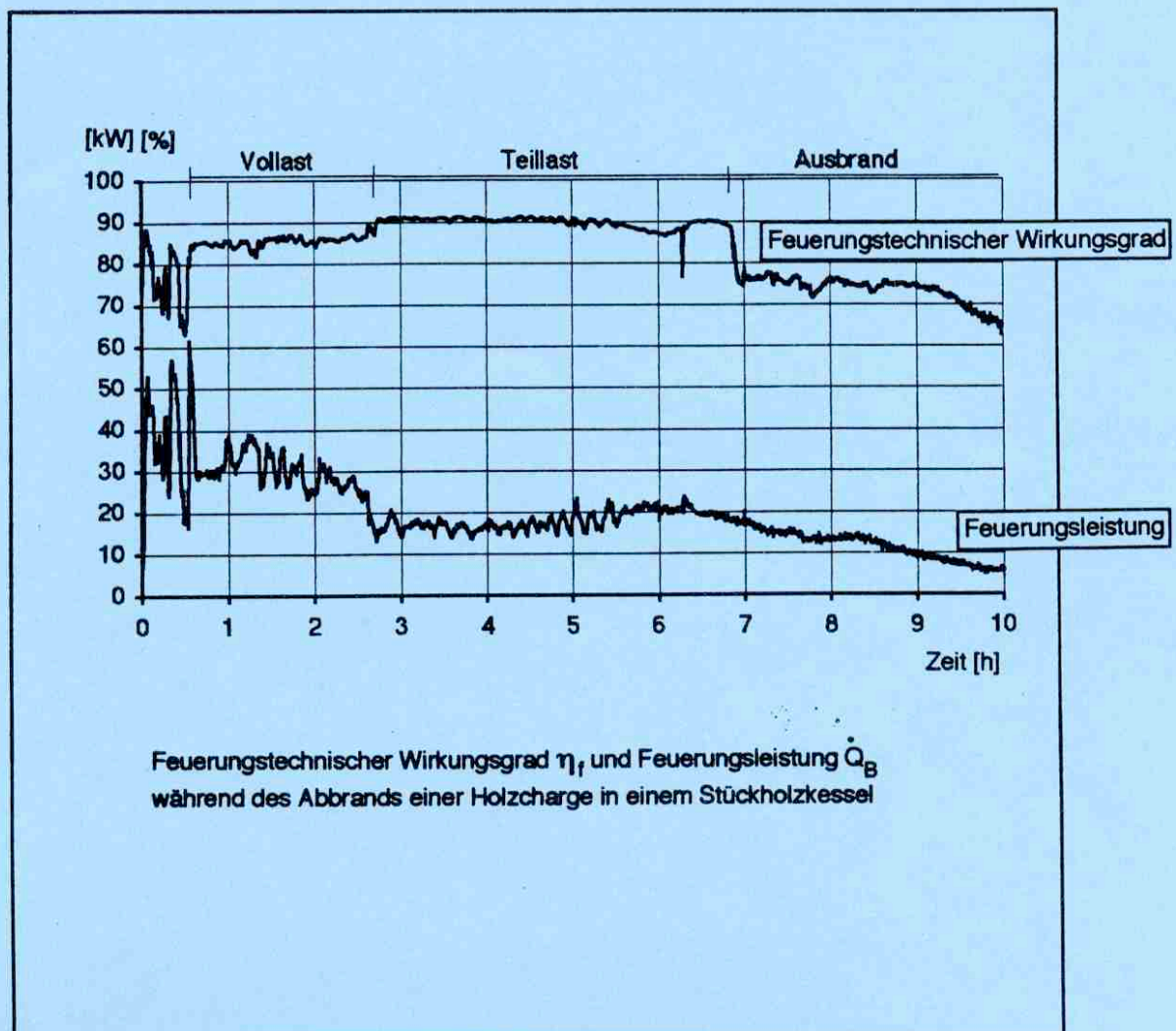


# Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen

Jürgen Good  
Thomas Nussbaumer



Diane 7  
Projekt Klein-Holzfeuerungen  
Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen

Anschrift der Verfasser:

Dr. Jürgen Good  
Dr. Thomas Nussbaumer  
Verenum  
Sonnegstrasse 25  
8006 Zürich

Bezugsquelle:

ENET  
Postfach 142  
3000 Bern 6  
Telefon 031' 44 19 00  
Fax 031' 44 77 56

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Zusammenfassung .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Einleitung.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Kesselwirkungsgrad.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad .....</b>	<b>7</b>
4.1. Neue Herleitung zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrads 8	
4.1.1. Verbrennungsgleichung.....	8
4.1.2. Weitere Grössen .....	10
4.1.3. Thermische Verluste .....	12
4.1.4. Chemische Verluste .....	16
4.2. Vereinfachte Berechnungsmethode.....	17
4.3. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad nach DIN .....	19
4.4. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad nach EMPA .....	21
4.5. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad nach BLT Wieselburg .....	23
4.6. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad nach Ökozentrum Langenbruck .....	25
<b>5. Vergleich der verschiedenen Berechnungsverfahren .....</b>	<b>26</b>
<b>6. Mittelwertbildung und Fehlerbetrachtung.....</b>	<b>30</b>
<b>7. Schlussfolgerungen .....</b>	<b>35</b>
<b>8. Empfehlungen .....</b>	<b>36</b>
<b>9. Anhang.....</b>	<b>39</b>
9.1. Herleitung der Luftüberschusszahl.....	39
9.2. Herleitung für vereinfachte Berechnung der thermischen Verluste.....	44
9.3. Herleitung für vereinfachte Berechnung der chemischen Verluste .....	48
9.4. Zusammenstellung der vereinfachten Berechnungsformeln .....	51
9.5. Nomogramme .....	54
9.6. Fehlerbetrachtung .....	56
<b>10. Symbolverzeichnis.....</b>	<b>65</b>
<b>11. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>69</b>



## 1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Methode zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades bei Holzfeuerungen vorgestellt. Ausgehend von der Verbrennungsgleichung von Holz werden Formeln zur Berechnung der thermischen und chemischen Verluste im Abgas hergeleitet. Zum Vergleich werden die vom TÜV verwendete Berechnungsmethode nach DIN 4702 sowie die von der EMPA Dübendorf, von BLT Wieselburg und vom Ökozentrum Langenbruck verwendeten Formeln beschrieben. Anhand von Fallbeispielen werden die Formeln mit für Holzfeuerungen typischen Abgaswerten verglichen. Es wird gezeigt, dass die Resultate der vorgestellten Berechnungsmethode sehr gut mit den Werten nach DIN übereinstimmen und die Abweichungen bei den Fallbeispielen kleiner als 0.2 % sind. Bei tiefem Kohlenmonoxidgehalt stimmt die Berechnung nach EMPA gut mit den anderen Methoden überein, bei hohem CO-Gehalt im Abgas führt sie dagegen zu Abweichungen im Prozentbereich.

Ausgehend von der exakten Berechnungsmethode wird eine vereinfachte Formel hergeleitet, die bei normalen Betriebsbedingungen einer Holzfeuerung (CO-Gehalt < 0.5 Vol.-%, CO<sub>2</sub>-Gehalt > 5 Vol.-%, Abgastemperatur < 400°C) praktisch ohne Genauigkeitseinbuße gegenüber der exakten Berechnung angewendet werden kann. Die vereinfachte Formel eignet sich für eine rasche und einfache Bestimmung mit einem Taschenrechner oder zur einfachen Programmierung in einer Berechnungsroutine. Zur grafischen Bestimmung können die aus der Formel abgeleiteten Nomogramme verwendet werden. Die vorgestellte vereinfachte Berechnungsmethode ist wesentlich einfacher in der Anwendung als die Bestimmung nach DIN und der Berechnungsvorgang ist zudem einfach verständlich und nachvollziehbar. *Es wird deshalb vorgeschlagen, für eine einfache Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von Holzfeuerungen die auf S. 37 zusammengefasste vereinfachte Berechnungsformel und für eine rasche grafische Bestimmung die auf S. 38 abgebildeten Nomogramme zu verwenden.*

*Wenn sehr hohe Genauigkeit verlangt wird und zur Berechnung eine etwas aufwendigere Berechnungsroutine programmiert werden kann, wird empfohlen, die in Kapitel 4.1 dargestellte exakte Berechnungsmethode anzuwenden.* Gegenüber der vereinfachten Methode kann damit der Wirkungsgrad auch bei CO-Gehalten im Prozentbereich noch mit hoher Genauigkeit bestimmt werden – was allerdings bei Holzfeuerungen nach dem heutigem Stand der Technik kaum mehr von Bedeutung ist. Im weiteren kann die exakte Berechnungsmethode durch Einsetzen der entsprechenden Brennstoffkonstanten auf beliebige biogene und fossile Brennstoffe übertragen werden. Bei Bedarf kann somit – wie in dieser Arbeit am Beispiel Holz gezeigt – eine in weiten Bereichen gültige vereinfachte Berechnung für beliebige Brennstoffe hergeleitet werden.

## 2. Einleitung

Im Rahmen eines Ringversuchs wurden an der EMPA Dübendorf, beim TÜV Bayern in München und bei der Bundesanstalt für Landtechnik (BLT) in Wieselburg verschiedene Holzfeuerungen einer Typenprüfung unterzogen. Dabei wurde festgestellt, dass die Prüfinstitute unterschiedliche Methoden zur Berechnung der thermischen und chemischen Abgasverluste verwenden. Der TÜV führt die Bestimmung des Wirkungsgrades nach DIN 4702 durch, während die EMPA Dübendorf und BLT Wieselburg eigene Formeln verwenden [Bühler 1992]. Die unterschiedlichen Berechnungen führten vor allem bei hohem CO-Gehalt zu Abweichungen im Prozentbereich.

Da die verwendeten Formeln nicht in allen Punkten nachvollziehbar sind, soll in der vorgestellten Arbeit eine physikalisch begründete, zuverlässige und einfache Methode zur Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von Holzfeuerungen hergeleitet werden. Die Berechnungsmethode soll nachvollziehbar sein und als Vorschlag für eine Vereinheitlichung der Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen dienen.

Der Vollständigkeit halber werden im folgenden der Kesselwirkungsgrad und der feuerungstechnische Wirkungsgrad definiert. Anschliessend wird eine Formel zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades hergeleitet und mit den von den erwähnten Prüfinstituten benützten Formeln verglichen. Auf die Bestimmung des Kesselwirkungsgrades wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

## 3. Kesselwirkungsgrad

Der Kesselwirkungsgrad  $\eta_k$  wird entweder nach der *direkten Methode* bestimmt aus dem Verhältnis zwischen erzeugter und zugeführter Wärmeleistung:

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{Q}_B} 100 \quad [ \% ] \quad (1)$$

mit:  $\dot{Q}_N$  = erzeugte Wärmeleistung [ kW ]  
 $\dot{Q}_B$  = zugeführte Wärmeleistung [ kW ]

Die erzeugte Wärmeleistung wird wasserseitig gemessen unter Berücksichtigung der Pumpenleistung und der Wärmeverluste des Prüfstandes, die zugeführte Wärmeleistung wird aus der pro Zeit verfeuerten Brennstoffmenge und dem Heizwert des Brennstoffs berechnet.

Der Kesselwirkungsgrad kann aber auch nach der *indirekten Methode* bestimmt werden durch Summierung der Betriebsverluste und Berücksichtigung eines allfälligen Kondensationsgewinnes:

$$\eta_k = 100 - (V_{\text{therm}} + V_{\text{chem}} + V_F + V_{\text{Str}}) + \Delta V_{\text{Kond}} \quad [\%] \quad (2)$$

mit:	$V_{\text{therm}}$	=	thermische Verluste durch fühlbare Wärme der Abgase	[ % ]
	$V_{\text{chem}}$	=	chemische Verluste durch unvollständige Verbrennung	[ % ]
	$V_F$	=	Verluste durch Brennbares im Feuerungsrückstand	[ % ]
	$V_{\text{Str}}$	=	Verluste durch Strahlung, Konvektion, Leitung	[ % ]
	$\Delta V_{\text{Kond}}$	=	Wärmegewinn durch Abgaskondensation	[ % ]

#### 4. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad  $\eta_f$  wird bestimmt durch die Berechnung der thermischen und chemischen Verluste im Abgas:

$$\eta_f = 100 - (V_{\text{therm}} + V_{\text{chem}}) \quad [\%] \quad (3)$$

mit:	$V_{\text{therm}}$	=	thermische Verluste durch fühlbare Wärme der Abgase	[ % ]
	$V_{\text{chem}}$	=	chemische Verluste durch unvollständige Verbrennung	[ % ]

## 4.1. Neue Herleitung zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrads

### 4.1.1. Verbrennungsgleichung

Die Herleitung zur Bestimmung der Abgasverluste beruht auf der Verbrennungsgleichung und der daraus abgeleiteten Abgaszusammensetzung. Zur Berücksichtigung der Verluste durch unvollständige Verbrennung wird die Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas in die Berechnung mit einbezogen. Um die Berechnungen zu vereinfachen, wird folgende Beziehung verwendet:

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2} + \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2} = 1 \quad (4)$$

mit:  $\text{CO}_2$  = Kohlendioxidgehalt der trockenen Abgase [ Vol.-% ]  
 $\text{CO}$  = Kohlenmonoxidgehalt der trockenen Abgase [ Vol.-% ]

Im weiteren werden folgende Abkürzungen eingeführt:

$$\beta = \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2} \quad (5 \text{ a})$$

$$A = 1 + m/4 - n/2 \quad (\text{Brennstoffkonstante für den Brennstoff } \text{CH}_m\text{O}_n) \quad (5 \text{ b})$$

Annahmen für die Berechnung:

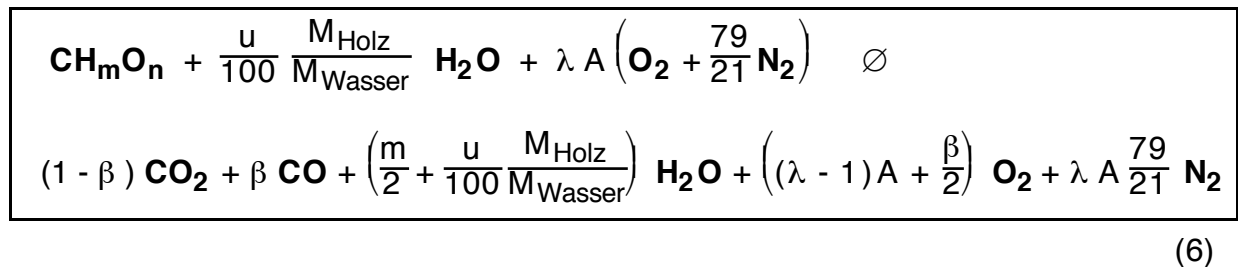
- Vernachlässigung von Kohlenwasserstoffen und Russ im Abgas (unvollständige Verbrennung, wobei nur CO berücksichtigt wird)
- Abgase verhalten sich wie ideale Gase
- Zusammensetzung von Holz:  $\text{CH}_m\text{O}_n$  mit  $m = 1.44$  und  $n = 0.66$ , somit  $A = 1.03$ . (Die Brennstoffkonstante  $A = 1 + m/4 - n/2 = 1.03$  beschreibt den Sauerstoffbedarf pro Mol  $\text{CH}_m\text{O}_n$  für eine vollständige Verbrennung)
- Zusammensetzung der Verbrennungsluft: 21 Vol.-%  $\text{O}_2$  und 79 Vol.-%  $\text{N}_2$
- Luftfeuchtigkeit der Verbrennungsluft wird vernachlässigt
- Vernachlässigung der Stickoxide
- überstöchiometrische Verbrennung mit Luftüberschusszahl  $\lambda \geq 1$



Damit gilt, dass der Kohlenstoff im Abgas in Form von CO und CO<sub>2</sub> gebunden ist, für β gilt somit:

$$\beta = \text{Molverhältnis von CO zu C im Brennstoff} \quad [-]$$

Damit gilt für die Reaktionsgleichung der Verbrennung von feuchtem Holz:



mit:  $u$  = Holzfeuchtigkeit in % atro  
 $M_{\text{Holz}}$  = Molmasse von Holz  $\text{CH}_{1.44}\text{O}_{0.66}$  = 24.0 kg kmol<sup>-1</sup>  
 $M_{\text{Wasser}}$  = Molmasse von Wasser = 18.0 kg kmol<sup>-1</sup>

Aus Gleichung (6) können die stöchiometrischen Faktoren  $\nu_i$  der Abgaskomponenten wie folgt bestimmt werden:

Abgaskomponente	stöchiometrischer Faktor $\nu_i$
CO <sub>2</sub>	1 - β
CO	β
H <sub>2</sub> O	$\frac{m}{2} + \frac{u}{100} \frac{M_{\text{Holz}}}{M_{\text{Wasser}}}$
O <sub>2</sub>	$(\lambda - 1) A + \frac{\beta}{2}$
N <sub>2</sub>	$\lambda A \frac{79}{21}$

Tabelle 1: Stöchiometrische Faktoren der Abgaskomponenten bei unvollständiger Verbrennung. Bei vollständiger Verbrennung wird β = 0 gesetzt.

#### 4.1.2. Weitere Grössen

- Luftüberschusszahl  $\lambda$  (Herleitung analog [Nussbaumer & Kerschbaumer 1987] unter Berücksichtigung von  $\beta$ , siehe Anhang 1 )

$$\lambda = \frac{21(1-\beta)}{A \text{ CO}_2} + \frac{21}{100} \left( 1 - \frac{1-\beta}{A} \right) \quad (7)$$

mit:  $\text{CO}_2$  = Kohlendioxidkonzentration [Vol.-%]

$$\lambda = \frac{21 \left( 1 - \frac{\beta}{2A} \right) - \frac{21}{100} \left( 1 - \frac{1-\beta}{A} \right) \text{O}_2}{21 - \text{O}_2} \quad (8)$$

mit:  $\text{O}_2$  = Sauerstoffkonzentration [Vol.-%]

Für  $A = 1.03$  und  $\beta = 0$  resultieren die häufig verwendeten Beziehungen:

$$\lambda' \approx \frac{20.4}{\text{CO}_2} \quad (9) \quad \text{und} \quad \lambda' \approx \frac{21}{21 - \text{O}_2} \quad (10)$$

- Heizwert  $h_u$  in kJ pro kg Brennstoff:

Der Heizwert wird in der Folge auf Normbedingungen ( $T_n = 273.15 \text{ K}$  resp.  $T_n = 0 \text{ °C}$  und  $p_n = 101.3 \text{ kPa} = 1013 \text{ mbar}$ ) pro kg Brennstoff bezogen.

$$h_u = \frac{h_{u \text{ atro}} - \Delta h_v \frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \quad [\text{kJ kg}^{-1}] \quad (11)$$

mit:  $h_{u \text{ atro}}$  = Heizwert pro kg absolut trockenes Holz [kJ kg<sup>-1</sup>]  
 $\Delta h_v$  = Verdampfungsenthalpie von Wasser [kJ kg<sup>-1</sup>]  
 $u$  = Holzfeuchtigkeit pro kg absolut trockenes Holz [%]

Nach [ VDI-Wärmeatlas, Baehr ] beträgt die Verdampfungsenthalpie von Wasser bei Normtemperatur :

$$\Delta h_v = 2501 \text{ kJ kg}^{-1} \quad \text{bei } T = 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$$

Der Heizwert pro kg absolut trockenes Holz unterscheidet sich je nach Holzart:

Holzart	Heizwert pro kg absolut trockenes Holz $h_{u \text{ atro}} \text{ [ kJ kg}^{-1} \text{ ]}$
Birke	19'900
Rotbuche	17'500
<i>Laubholz im Mittel</i>	<i>18'100</i>
Fichte	19'200
Tanne	19'300
<i>Nadelholz im Mittel</i>	<i>19'400</i>

Tabelle 2: Heizwert pro kg absolut trockenes Holz für verschiedene Holzarten [Bossel].

Als repräsentativer Heizwert wird nach [Bossel] und [Energiehandbuch]

$$h_{u \text{ atro}} = 18'500 \text{ kJ kg}^{-1} \quad \text{gewählt. Damit folgt aus Gleichung (11):}$$

$$h_u = \frac{18'500 - 2'500 \frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \text{ [kJ kg}^{-1} \text{]} \quad (12)$$

- Molmasse  $M_{Br}$  des Brennstoffs:

$$M_{Br} = M_{Holz} \left( 1 + \frac{u}{100} \right) \text{ [kg kmol}^{-1} \text{]} \quad (13)$$

mit:  $M_{Holz}$  = Molmasse von absolut trockenem Holz  
 $M_{Holz}$  = Molmasse von  $\text{CH}_{1.44}\text{O}_{0.66}$  = 24.0 kg kmol<sup>-1</sup>

- trockenes Abgasvolumen  $V_{A\ tr}$  pro kg Brennstoff bei unvollständiger Verbrennung:

$$V_{A\ tr} = (v_{CO_2} + v_{CO} + v_{O_2} + v_{N_2}) \frac{V_N}{M_{Br}} \quad [m_n^3\ kg^{-1}]$$

$$= \left( 1 - \beta + \beta + (\lambda - 1) A + \frac{\beta}{2} + \lambda A \frac{79}{21} \right) \frac{V_N}{M_{Br}}$$

$V_{A\ tr} = \left( 1 + \frac{\beta}{2} - A + \lambda A \frac{100}{21} \right) \frac{V_N}{M_{Br}} \quad [m_n^3\ kg^{-1}]$	(14)
---	------

mit:  $V_N$  = Normvolumen = 22.4141  $m_n^3\ kmol^{-1}$

#### 4.1.3. Thermische Verluste

Der thermische Abgasverlust entspricht der Enthalpiedifferenz  $\Delta h$  der Abgase bei Abgas- und Umgebungstemperatur bezogen auf den Heizwert  $h_u$  des Brennstoffs. Die Verdampfungsenthalpie  $\Delta h_v$  wird nicht berücksichtigt, d.h. es wird angenommen, dass keine Kondensation des Wasserdampfes stattfindet.

$V_{therm} = \frac{\Delta h}{h_u} 100 \quad [ \% ]$	(15)
---	------

mit:  $\Delta h$  = Enthalpiedifferenz der Abgase [ kJ kg<sup>-1</sup> ]  
 $h_u$  = Heizwert  $h_u$  pro kg Brennstoff [ kJ kg<sup>-1</sup> ]

Für die Enthalpiedifferenz  $\Delta h$  der Abgase bei Abgas- und Umgebungstemperatur gilt unter den Annahmen:

- unvollständige Verbrennung,  $\beta \neq 0$
- Abgase verhalten sich wie ideale Gase
- Abgasekomponenten sind im betrachteten Temperaturbereich gasförmig (keine Kondensation)
- Stickoxide und Russ werden vernachlässigt
- überstöchiometrische Verbrennung mit Luftüberschusszahl  $\lambda \geq 1$

$$\Delta h = \frac{V_N}{M_{Br}} \int_{T_U}^{T_A} \left( \sum v_i C_{p_i}(T) \right) dT \quad i = \text{CO}_2, \text{CO}, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{N}_2 \quad [\text{kJ kg}^{-1}]$$

$$\Delta h = \frac{V_N}{M_{Br}} \int_{T_U}^{T_A} \left( v_{\text{CO}_2} C_{p_{\text{CO}_2}}(T) + v_{\text{CO}} C_{p_{\text{CO}}}(T) + v_{\text{O}_2} C_{p_{\text{O}_2}}(T) + \right. \\ \left. + v_{\text{H}_2\text{O}} C_{p_{\text{H}_2\text{O}}}(T) + v_{\text{N}_2} C_{p_{\text{N}_2}}(T) \right) dT \quad [\text{kJ kg}^{-1}] \quad (16)$$

mit:	$V_N$	= Normvolumen	$[\text{m}_n^3 \text{ kmol}^{-1}]$
	$M_{Br}$	= Molmasse des Brennstoffs	$[\text{kg kmol}^{-1}]$
	$T_A$	= Abgastemperatur	$[\text{°C}]$
	$T_U$	= Umgebungstemperatur	$[\text{°C}]$
	$v$	= Stöchiometrischer Faktor	$[-]$
	$C_p$	= Spezifische Wärmekapazität	$[\text{kJ m}_n^{-3} \text{ K}^{-1}]$

- Spezifische Wärmekapazität  $C_p$  :

Die spezifische Wärmekapazität eines realen Gases ist von der Temperatur und vom Druck abhängig. Gemäss den getroffenen Annahmen verhalten sich die Abgaskomponenten wie ideale Gase, was für reale Gase bei kleinem Druck ( $p \ll 0$ ) zutrifft. Die spezifische Wärmekapazität eines idealen Gases ist somit druckunabhängig. Die für technische Berechnungen verwendeten spezifischen Wärmekapazitäten von Abgaskomponenten sind – basierend auf den für reale Gase gemessenen Werten – extrapoliert für  $p \ll 0$  [Baehr & Diederichsen 1988, JANAF-Daten]. Die Verbrennung läuft in den meisten Fällen unter atmosphärischen Bedingungen ab. Bis auf den Wasserdampf verhalten sich die Abgaskomponenten unter diesen Bedingungen bereits annähernd wie ideale Gase. Die spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf als reales Gas zeigt jedoch eine deutliche Druckabhängigkeit [VDI-Wärmeatlas].

Die spezifische Wärmekapazität  $C_p$  wird in der Regel in  $[\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}]$  angegeben [Baehr 1988]. Die in der Folge bestimmten Wärmekapazitäten sind mit der jeweiligen Dichte beim Normzustand ( $0 \text{ °C}$ ,  $1013 \text{ mbar}$ ) multipliziert:

$$C_p = \rho_n c_p \quad [\text{kJ m}_n^{-3} \text{ K}^{-1}] = [\text{kg m}_n^{-3}] [\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}] \quad (17)$$

Komponente	$\rho_n (= M / V_n)$ kg m <sub>n</sub> <sup>-3</sup>
Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	1.97
Sauerstoff O <sub>2</sub>	1.43
Kohlenmonoxid CO	1.25
Wasserdampf H <sub>2</sub> O	0.80
Stickstoff N <sub>2</sub>	1.26

Tabelle 3: Normdichte idealer Gase [VDI-Wärmeatlas]

Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität der Abgaskomponenten ist in Bild 1 dargestellt.

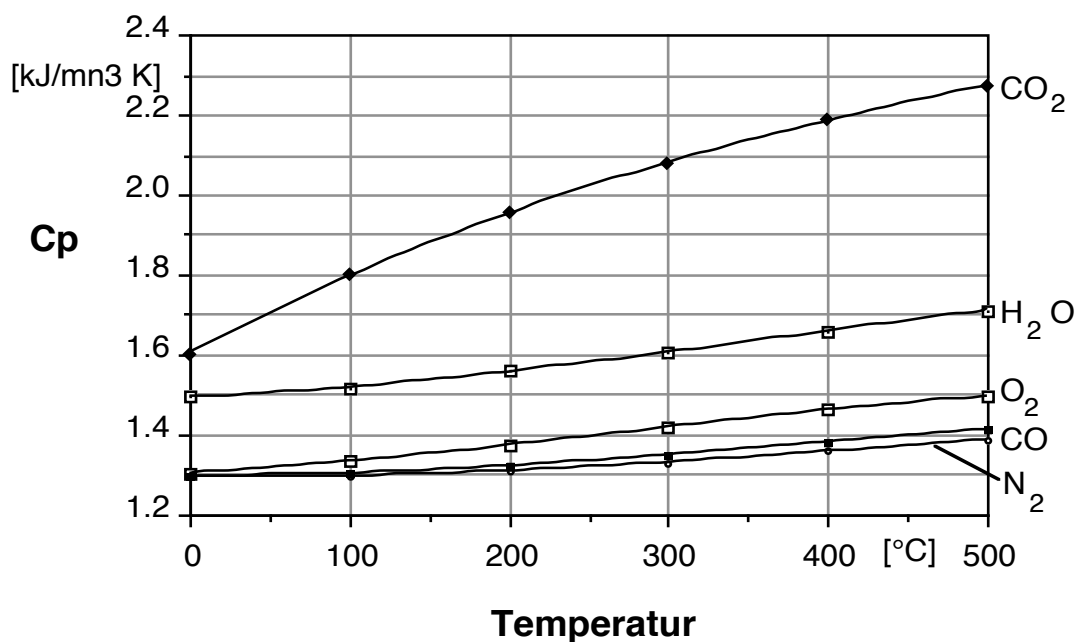


Bild 1: Spezifische Wärmekapazität in Funktion der Temperatur. (Daten nach [Baehr & Diederichsen 1988] umgerechnet mit Normdichte gemäss Tab. 3)

Die Temperaturabhängigkeit (T in °C) der spezifischen Wärmekapazität Cp wird für jede Abgaskomponente durch ein Polynom dritten Grades beschrieben:

$$C_p(T) = a + b \left( \frac{T}{1000} \right) + c \left( \frac{T}{1000} \right)^2 + d \left( \frac{T}{1000} \right)^3 \quad [\text{kJ m}_n^{-3} \text{K}^{-1}] \quad (18)$$

Zur Bestimmung der Polynomkoeffizienten für CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und N<sub>2</sub> werden Stützstellen aus der Literatur eingesetzt [ Baehr 1988 ]:

Abgaskomponente	spezifische Wärmekapazität Cp(T) in kJ m <sub>n</sub> <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>					
	0 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	1.6032	1.7975	1.9535	2.0805	2.1857	2.2734
Kohlendioxid CO	1.2994	1.3055	1.3227	1.3498	1.3818	1.4146
Sauerstoff O <sub>2</sub>	1.3060	1.3329	1.3750	1.4202	1.4615	1.4969
Wasserdampf H <sub>2</sub> O	1.4942	1.5189	1.5593	1.6070	1.6585	1.7127
Luftstickstoff N <sub>2</sub>	1.2947	1.2984	1.3104	1.3318	1.3592	1.3890

Tabelle 4: Stützstellen zur Berechnung der Polynomkoeffizienten

Abgaskomponente	Polynomkoeffizienten			
	a	b	c	d
Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	1.6034	2.1431	-2.1869	1.1630
Kohlenmonoxid CO	1.2995	-.018696	.80591	-.61574
Sauerstoff O <sub>2</sub>	1.3056	.20030	.94865	-1.1713
Wasserdampf H <sub>2</sub> O	1.4939	.17832	.86698	-.69907
Luftstickstoff N <sub>2</sub>	1.2949	-.028935	.61873	-.36759

Tabelle 5: Polynomkoeffizienten der Abgaskomponenten

Das Integral in Gleichung (16) lässt sich somit analytisch lösen. Mit

$$\Delta T = \frac{T_A - T_U}{1000} \quad [-] \quad (19)$$

folgt

$$\Delta h = \frac{V_N}{M_{Br}} (T_A - T_U) \sum v_i \left( a_i + \frac{b_i}{2} \Delta T + \frac{c_i}{3} \Delta T^2 + \frac{d_i}{4} \Delta T^3 \right)_{(i=CO_2, CO, O_2, H_2O, N_2)} \quad [kJ \, kg^{-1}] \quad (20)$$

Durch Einsetzen von Gl. 12, 13 und 20 in Gl. (15) folgt

$$V_{\text{therm}} = \frac{V_N (T_A - T_U)}{M_{\text{Holz}} (185 - 0.25 u)} \sum v_i \left( a_i + \frac{b_i}{2} \Delta T + \frac{c_i}{3} \Delta T^2 + \frac{d_i}{4} \Delta T^3 \right) [\% ]$$

mit  $i = \text{CO}_2, \text{CO}, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{N}_2$  (21)

#### 4.1.4. Chemische Verluste

Chemische Abgasverluste entstehen bei unvollständiger Verbrennung. Die nicht vollständig oxidierten Abgaskomponenten, z.B. Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe, weisen eine positive Reaktionsenthalpie auf. In erster Näherung wird nur Kohlenmonoxid berücksichtigt. Der Heizwert von Kohlenmonoxid  $h_{\text{CO}}$  bei Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar) beträgt:

nach [DIN 4702]  $h_{\text{CO}} = 12'640 \text{ kJ m}_n^{-3}$   
 nach [Dubbel]  $h_{\text{CO}} = 10'111 \text{ kJ kg}^{-1}$

Die chemischen Verluste  $V_{\text{chem}}$  werden wie folgt berechnet:

$$V_{\text{chem}} = \frac{\text{CO } V_{\text{Atr}} h_{\text{CO}}}{h_u} [\% ]$$

(22)

mit:  $\text{CO} =$  Kohlenmonoxidgehalt im trockenen Abgas [ Vol.-% ]  
 $V_{\text{Atr}} =$  Trockenabgasvolumen pro kg Brennstoff [  $\text{m}_n^3 \text{ kg}^{-1}$  ]  
 $h_{\text{CO}} =$  Heizwert von CO = 12'640 [  $\text{kJ m}_n^{-3}$  ]  
 $h_u =$  Heizwert des Brennstoffs [  $\text{kJ kg}^{-1}$  ]



## 4.2. Vereinfachte Berechnungsmethode

Eine vereinfachte Methode für die Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades kann mit wenigen Vereinfachungen aus der ausführlichen Berechnungsmethode hergeleitet werden (ausführliche Herleitung siehe Anhang 9.1 - 9.3).

### • Thermische Verluste

Vereinfachungen:

- CO wird in der Verbrennungsgleichung vernachlässigt ( $CO = 0, \beta = 0$ )
- Die temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazitäten  $C_{p_i}(T)$  der Abgaskomponenten werden durch einen konstanten Wert ersetzt, der den Mittelwert über den Temperaturbereich von 0 bis 180 °C darstellt:

$$C_{p_i}(T) = \overline{C_{p_i}}(T_A=180^\circ\text{C}) = \phi \quad [\text{kJ m}_n^{-3} \text{K}^{-1}]$$

- Für  $\lambda$  wird die vereinfachte Formel (Anhang 9.1 Gl. A5)  $\lambda = \frac{20.4}{CO_2+CO}$  eingesetzt.

Daraus folgt eine vereinfachte Formel zur rechnerischen Bestimmung der thermischen Verluste  $V_{\text{therm}}$ :

$$V_{\text{therm}} = \frac{(T_A - T_U) \left\{ 1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 u \right\}}{\frac{h_{u \text{atro}}}{100} - 0.25 u} \quad [\%] \quad (23)$$

mit: $T_A$	= Abgastemperatur	[ °C ]
$T_U$	= Umgebungstemperatur	[ °C ]
$CO$	= Kohlenmonoxidkonzentration	[ Vol.-% ]
$CO_2$	= Kohlendioxidkonzentration	[ Vol.-% ]
$u$	= Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz	[ % ]
$h_{u \text{atro}}$	= Heizwert pro kg absolut trockenes Holz = 18'500	[ kJ kg <sup>-1</sup> ]

- **Chemische Verluste**

Vereinfachungen:

- CO wird nicht vernachlässigt ( $CO \neq 0, \beta \neq 0$ )

- Für  $\lambda$  wird die vereinfachte Formel (Anhang 9.1, Gl. A5)

$$\lambda = \frac{20.4}{CO_2 + CO} \quad [ \% ] \quad (24)$$

eingesetzt. Bei der Messung des Sauerstoffgehalts erfolgt eine Umrechnung auf den Kohlendioxidgehalt:

$$CO_2 = 0.98 (21 - O_2) - 0.61 CO \quad [ \text{Vol.-%} ] \quad (24b)$$

Daraus folgt eine vereinfachte Formel zur rechnerischen Bestimmung der chemischen Verluste  $V_{\text{chem}}$ :

$$V_{\text{chem}} = \frac{CO}{CO + CO_2} \frac{11'800}{\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u} \quad [ \% ] \quad (25)$$

mit:  $T_A$  = Abgastemperatur [ °C ]  
 $T_U$  = Umgebungstemperatur [ °C ]  
 $CO_2$  = Kohlendioxidkonzentration [ Vol.-% ]  
 $CO$  = Kohlenmonoxidkonzentration [ Vol.-% ]  
 $u$  = Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz [ % ]  
 $h_{u\text{atro}}$  = Heizwert pro kg absolut trockenes Holz = 18'500 [ kJ kg<sup>-1</sup> ]

### 4.3. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad nach DIN

Nach DIN 4702, Teil 2 werden die Verluste wie folgt berechnet.

- **Thermische Verluste**

Der Wärmeverlust  $q_A$  wird wie folgt berechnet:

$$q_A = \frac{(V_A c_{pm,A})}{H_u} (t_A - t_L) \quad [-] \quad (26)$$

Das Abgas wird dabei unterteilt in trockenes Abgas und Wasserdampf:

$$q_A = (V_{Atr} c_{pm,Atr} + V_W c_{pm,H_2O}) (t_A - t_L) \frac{1}{H_u} \quad [-] \quad (27)$$

mit:	$V_A$	=	Abgasmenge	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
	$V_{Atr}$	=	trockene Abgasmenge	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
	$V_W$	=	Wasserdampfmenge	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
	$c_{pm,A}$	=	mittlere spezifische Wärmekapazität der Abgase im Temperaturbereich $t_L$ bis $t_A$	[ Ws m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
	$c_{pm,Atr}$	=	mittlere spezifische Wärmekapazität der trockenen Abgase im Temperaturbereich $t_L$ bis $t_A$	[ Ws m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
	$c_{pm,H_2O}$	=	mittlere spezifische Wärmekapazität des Wasser- dampfs im Temperaturbereich $t_L$ bis $t_A$	[ Ws m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
	$t_L$	=	Temperatur der Umgebungsluft	[ °C ]
	$t_A$	=	Temperatur der Abgase	[ °C ]
	$H_u$	=	Heizwert des Brennstoffes	[ Ws kg <sup>-1</sup> ]

Für die Berechnung von  $c_{pm,Atr}$  wird ein ein Polynom zweiten Grades in Funktion der Abgastemperatur und des Kohlendioxidgehalts, für die Berechnung von  $c_{pm,H_2O}$  wird ein Polynom zweiten Grades in Funktion der Abgastemperatur angegeben. Die mittlere spezifische Wärmekapazität  $c_{pm}$ , berechnet bei Abgastemperatur, entspricht dem Mittelwert über den Temperaturbereich zwischen Umgebungs- und Abgastemperatur.

- **Chemische Verluste**

Der Wärmeverlust  $q_U$  durch unvollkommene Verbrennung wird folgendermassen berechnet, wobei die Formel nach DIN 4702 (Gl. 28) entsprechend den angegebenen Einheiten korrigiert wurde :

$$q_U = CO V_{Atr} \frac{12.64}{H_u} \quad \text{in [\%]} \quad (28)$$

$q_U = CO V_{Atr} \frac{12'640'000}{H_u} 100 \quad [\%]$	(29)
--	------

mit:	CO	= Kohlenmonoxidgehalt der Abgase	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
	12'640'000	= Heizwert von CO	[ Ws m <sup>-3</sup> ]
	V <sub>Atr</sub>	= Trockenes Abgasvolumen pro kg feuchtes Holz	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
	H <sub>u</sub>	= Heizwert bezogen auf 1 kg feuchtes Holz	[ Ws kg <sup>-1</sup> ]

- **Luftüberschusszahl**

$$\lambda = 1 + \left[ \frac{CO_{2 \max} + SO_{2 \max}}{(CO_2 + SO_2)_{gem} + CO_{gem}} - 1 \right] \frac{V_{Atr \min}}{L_{min}} \quad (30)$$

mit:	CO <sub>2 max</sub>	= maximaler Kohlendioxid-Anteil	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
	SO <sub>2 max</sub>	= maximaler Schwefeldioxid-Anteil	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
	(CO <sub>2</sub> + SO <sub>2</sub> ) <sub>gem</sub>	= gemessener (CO <sub>2</sub> + SO <sub>2</sub> )-Anteil der Abgase	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
	CO <sub>2gem</sub>	= gemessener CO <sub>2</sub> -Anteil der Abgase	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
	V <sub>Atr min</sub>	= trockene Abgasmenge bei stöchiometrischer Verbrennung	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
	L <sub>min</sub>	= Luftbedarf	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]

Die Luftüberschusszahl  $\lambda$  wird für die Berechnung der thermischen und chemischen Verluste nicht benötigt.

#### 4.4. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad nach EMPA

- **Thermische Verluste**

Die thermischen Verluste  $V_t$  werden nach der Siegert'schen Formel berechnet [Bühler 1992] :

$$V_t = \frac{\sigma (t_A - t_L)}{CO_2\%v_{tr}} \quad [ \% ] \quad (31)$$

mit:  $CO_2\%v_{tr}$  = Kohlendioxidgehalt des trockenen Abgases [ Vol.-% ]  
 $t_L$  = Temperatur der Umgebungsluft [ °C ]  
 $t_A$  = Temperatur der Abgase [ °C ]  
 $\sigma$  = Siegert'scher Faktor  
 $\sigma$  =  $0.65 + (449 [u / (1 + u)] + 4.47) (CO_2\%v_{tr} + 5.0) 10^{-4}$  \* [ K<sup>-1</sup> ]  
 $u$  = Holzfeuchtigkeit [ kg kg<sub>atro</sub><sup>-1</sup> ]

Gültigkeitsbereich: CO = 0 - 1 Vol.-%

Bemerkung: In [Bühler 1992] ist für Formel (31) [ - ] statt [ % ] angegeben

\* Quelle [Nussbaumer 1988]

- **Chemische Verluste**

Die chemischen Verluste  $V_c$  werden nach Dubbel berechnet.

Bei der Kontrolle der bei den Ringversuchen verwendeten Berechnungsmethoden hat sich herausgestellt, dass an der EMPA zur Auswertung der Ringversuche mit einer fehlerhaften Formel gerechnet wurde, so dass die chemischen Verluste um den Faktor 2 zu gering berechnet wurden:

Bei den Ringversuchen von der EMPA verwendete Formel [Bühler 1992]:

$$V_c = 64.8 \frac{CO\%v_{tr}}{CO\%v_{tr} + CO_2\%v_{tr} 2} \quad [ \% ] \quad (32)$$

Bei der Typenprüfung an der EMPA sonst verwendete Formel [Brenn 1992]:

$$V_c = 64.8 \frac{CO\%v_{tr}}{CO\%v_{tr} + CO_2\%v_{tr}} \quad [ \% ] \quad (33)$$

mit: 64.8 = Mittelwert für feste Brennstoffe

$CO_2\%v_{tr}$  = Kohlendioxidgehalt des trockenen Abgases [ Vol.-% ]

$CO\%v_{tr}$  = Kohlenmonoxidgehalt des trockenen Abgases [ Vol.-% ]

Gültigkeitsbereich: CO = 0 - 1 Vol.-%

• **Luftüberschusszahl**

$$\lambda = 0.21 \left[ \frac{a}{\frac{CO_2\%v_{tr}}{100}} + 1 - a \right] \quad (34)$$

mit:  $a = 0.97$  (Brennstoffkonstante)

Die Luftüberschusszahl wird für die Berechnung der thermischen und chemischen Verluste nicht benötigt.

#### 4.5. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad nach BLT Wieselburg

- **Thermische Verluste**

Der thermische Verlust im Abgas (=Rauchgas, RG)  $q_{VhRG}$  wird wie folgt berechnet [Bühler 1992] :

$$q_{VhRG} = \frac{(h_{RG} - h_L)}{1000 \text{ Hu}_f} 100 \quad [\%] \quad (35)$$

$q_{VhRG} = \frac{(h_{RG} - h_L)}{10 \text{ Hu}_f} \quad [\%]$	(36)
--	------

mit:  $h_{RG}$  = Enthalpie des Abgases [ kJ kg<sup>-1</sup> ]  
 $h_L$  = Enthalpie der Verbrennungsluft [ kJ kg<sup>-1</sup> ]  
 $\text{Hu}_f$  = Heizwert des feuchten Brennstoffs [ MJ kg<sup>-1</sup> ]

$$\text{Hu}_f = \text{Hu}_{tr} (1 - w) - 2.44 w \quad [\text{MJ kg}^{-1}] \quad (37)$$

mit:  $\text{Hu}_{tr}$  = Heizwert des Brennstoffs (nach ÖNORM M 7132) [ MJ kg<sup>-1</sup> ]  
 = 19.0 MJkg<sup>-1</sup> für Nadelhölzer  
 = 18.0 MJkg<sup>-1</sup> für Laubhölzer  
 $w$  = Wassergehalt [ kg kg<sup>-1</sup> ]

$$h_{RG} = \text{RG}_{Fs} (t_{RG} - 25) [\bar{C}_p]_0^{t_{RG}} \quad [\text{kJ kg}^{-1}] \quad (38)$$

mit:  $\text{RG}_{Fs}$  = feuchte Abgasmenge [ kmol kg<sup>-1</sup> ]  
 $t_{RG}$  = Abgastemperatur [ °C ]  
 $[\bar{C}_p]_0^{t_{RG}}$  = Mittlere spez. Molwärme des Gasgemisches zwischen  
 0 °C und  $t_{RG}$  °C , nach [Schmidt] [ kJ kmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> ]

$$h_L = [\bar{C}_p]_0^{t_L} L_s (t_L - 25) \quad [\text{kJ kg}^{-1}] \quad (39)$$

mit:  $L_s$  = zugeführte Luftmenge [ kmol kg<sup>-1</sup> ]  
 $t_L$  = Lufttemperatur [ °C ]  
 $[\bar{C}_p]_0^{t_L}$  = Mittlere spez. Molwärme von Luft zwischen

$$0 \text{ °C und } t_L \text{ °C , nach [Schmidt]} = 29.11 \quad [ \text{kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1} ]$$

Für weitergehende Angaben siehe [Bühler].

- **Chemische Verluste**

Die chemischen Verluste im Abgas  $q_{VhRG}$  werden wie folgt berechnet:

$$q_{VhRG} = \frac{282'900 \text{ RG}_{Ts} \text{ CO}}{1000 \text{ Hu}_f} \cdot 100 \quad [ \% ] \quad (40)$$

$q_{VhRG} = \frac{28'290 \text{ RG}_{Ts} \text{ CO}}{\text{Hu}_f} \quad [ \% ]$	(41)
---	------

mit:  $h_{CO}$  = Heizwert von Kohlenmonoxid = 282'900 [ kJ kmol<sup>-1</sup> ]  
 $RG_{Ts}$  = trockene Abgasmenge [ kmol kg<sup>-1</sup> ]  
 $CO$  = Kohlenmonoxidkonzentration [ kmol kmol<sup>-1</sup> ]  
 $Hu_f$  = Heizwert des feuchten Brennstoffs [ MJ kg<sup>-1</sup> ]

$q_{VhRG} = \frac{282.9 \text{ RG}_{Ts} \text{ CO}}{\text{Hu}_f} \quad [ \% ]$	(42)
--	------

mit:  $RG_{Ts}$  = trockene Abgasmenge [ kmol kg<sup>-1</sup> ]  
 $CO$  = Kohlenmonoxidkonzentration [ Vol.-% ]  
 $Hu_f$  = Heizwert des feuchten Brennstoffs [ MJ kg<sup>-1</sup> ]

- **Luftüberschusszahl**

Die Luftüberschusszahl wird nach der Methode DIN 4702 berechnet (Gl. 30).



#### 4.6. Feuerungstechnischer Wirkungsgrad nach Ökozentrum Langenbruck

Die Grundlagen für die der folgenden Formeln sind in [Gaegauf, Salerno 1991] hergeleitet.

##### • Thermische Verluste

Die thermischen Verluste  $V_t$  durch fühlbare Wärme werden wie folgt berechnet [Bühler 1992] :

$$V_t = 100 \frac{(t_A - t_L)}{H_u} \frac{1}{1+u} \left( 1.675 \frac{CO_2}{CO_2+CO} + 1.21 \frac{CO}{CO_2+CO} + 1.282(\lambda-1) + 4.717\lambda + 1.008 \right) + 1.88 \frac{u}{1+u} [\%]$$

(43)

mit: $t_A$	=	Temperatur der Abgase	[ °C ]
$t_L$	=	Temperatur der Umgebungsluft	[ °C ]
$H_u$	=	Heizwert des Brennstoffs (Gl. 11)	[ kJ kg <sup>-1</sup> ]
$u$	=	Holzfeuchtigkeit	[ kg kg <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]
$CO_2$	=	Kohlendioxidgehalt des trockenen Abgases	[ Vol.-% ]
$CO$	=	Kohlenmonoxidgehalt des trockenen Abgases	[ Vol.-% ]
$\lambda$	=	Luftüberschusszahl (Gl. 7)	[ - ]

##### • Chemische Verluste

Die chemischen Verluste  $V_c$  werden wie folgt berechnet [Bühler 1992] :

$$V_c = \frac{1'179'150}{H_u} (1-x) \frac{CO}{CO_2 + CO} [\%]$$

(44)

mit: $x$	=	Wassergehalt	[ kg kg <sup>-1</sup> ]
$CO_2$	=	Kohlendioxidgehalt des trockenen Abgases	[ Vol.-% ]
$CO$	=	Kohlenmonoxidgehalt des trockenen Abgases	[ Vol.-% ]

## 5. Vergleich der verschiedenen Berechnungsverfahren

Um die verschiedenen Berechnungsmethoden zu vergleichen, werden ein Referenzfall sowie vier weitere Fälle definiert. Die Zahlenwerte sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Fall	Kohlendioxid CO <sub>2</sub> [Vol.-%]	Kohlenmonoxid CO [Vol.-%]	Abgastemperatur T <sub>A</sub> [°C]	Holzfeuchte u [% <sub>atro</sub> ]
A (Referenz)	10	0.01	200	20
B	<b>5</b>	0.01	200	20
C	10	<b>2</b>	200	20
D	10	0.01	<b>300</b>	20
E	10	0.01	200	<b>100</b>

Tabelle 6: Fallbeispiele

Mit diesen Zahlenwerten werden gemäss den verschiedenen Berechnungsmethoden der feuerungstechnische Wirkungsgrad, die thermischen und chemischen Verluste und die Luftüberschusszahl berechnet. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 7 - 11 aufgeführt.

Berechnungs- methode	feuerungst. Wirkungsgrad η <sub>f</sub> [%]	therm. Verlust V <sub>th</sub> [%]	chem. Verlust V <sub>chem</sub> [%]	Lambda λ [-]
neue Herleitung	85.9	14.0	.07	2.04 **
vereinfacht	86.0	14.0	.07	2.04 **
DIN	85.9	14.1	.06	2.04
EMPA	86.1	13.8	.06 (.03)*	2.04
Ökozentrum	85.8	14.1	.07	2.04
BLT Laubh.	85.7	14.2	.07	2.01
BLT Nadelh.	86.2	13.8	.06	2.05

Tabelle 7: Fall A (Referenzfall)

\* gemäss EMPA-Formel für Ringversuche (Gleichung 32)

\*\* wird für die Berechnung der Verluste benötigt

Berechnungsmethode	feuerungst. Wirkungsgrad $\eta_f$ [%]	therm. Verlust $V_{th}$ [%]	chem. Verlust $V_{chem}$ [%]	Lambda $\lambda$ [-]
neue Herleitung	73.7	26.2	.13	4.08 **
vereinfacht	73.8	26.1	.13	4.07 **
DIN	73.7	26.2	.13	4.07
EMPA	73.6 (73.7)*	26.3	.13 (.06)*	4.08
Ökozentrum	73.6	26.3	.13	4.07
BLT Laubh.	73.3	26.5	.13	4.00
BLT Nadelh.	74.1	25.8	.13	4.10

Tabelle 8: Fall B ( $CO_2 = 5$  Vol.-%)

\* gemäss EMPA-Formel für Ringversuche (Gleichung 32)

\*\* wird für die Berechnung der Verluste benötigt

Berechnungsmethode	feuerungst. Wirkungsgrad $\eta_f$ [%]	therm. Verlust $V_{th}$ [%]	chem. Verlust $V_{chem}$ [%]	Lambda $\lambda$ [-]
neue Herleitung	77.2	11.9	10.93	1.69 **
vereinfacht	77.1	12.0	10.93	1.70 **
DIN	77.2	12.0	10.83	1.70
EMPA	75.4 (80.3)*	13.8	10.80 (5.89)*	2.04
Ökozentrum	77.6	11.5	10.90	1.70
BLT Laubh.	76.9	12.1	11.04	1.68
BLT Nadelh.	77.6	11.7	10.71	1.71

Tabelle 9: Fall C ( $CO = 2$  Vol.-%)

\* gemäss EMPA-Formel für Ringversuche (Gleichung 32)

\*\* wird für die Berechnung der Verluste benötigt

Berechnungsmethode	feuerungst. Wirkungsgrad $\eta_f$ [%]	therm. Verlust $V_{th}$ [%]	chem. Verlust $V_{chem}$ [%]	Lambda $\lambda$ [-]
neue Herleitung	77.9	22.0	.07	2.04 **
vereinfacht	78.2	21.7	.07	2.04 **
DIN	77.7	22.2	.06	2.04
EMPA	78.4	21.5	.06 (.03)*	2.04
Ökozentrum	78.2	21.8	.07	2.04
BLT Laubh.	77.3	22.6	.07	2.01
BLT Nadelh.	78.0	22.0	.06	2.05

Tabelle 10: Fall D ( $T_A = 300$  °C)

\* gemäss EMPA-Formel für Ringversuche (Gleichung 32)

\*\* wird für die Berechnung der Verluste benötigt

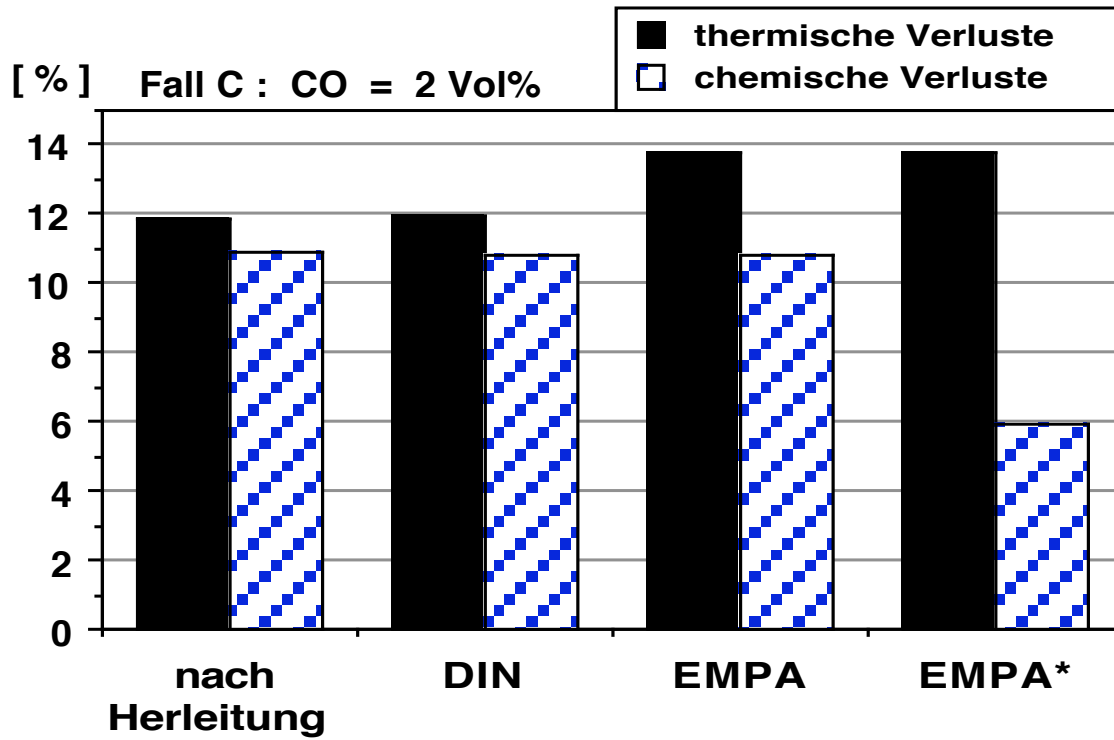
Berechnungsmethode	feuerungst. Wirkungsgrad $\eta_f$ [%]	therm. Verlust $V_{th}$ [%]	chem. Verlust $V_{chem}$ [%]	Lambda $\lambda$ [-]
neue Herleitung	82.5	17.4	.07	2.04 **
vereinfacht	82.4	17.5	.07	2.04 **
DIN	82.4	17.5	.06	2.04
EMPA	82.1	17.9	.06 (.03)*	2.04
Ökozentrum	83.5	16.5	.07	2.04
BLT Laubh.	82.4	17.5	.07	2.01
BLT Nadelh.	82.9	17.1	.07	2.05

Tabelle 11: Fall E ( $u = 100$  %<sub>atro</sub>)

\* gemäss EMPA-Formel für Ringversuche (Gleichung 32)

\*\* wird für die Berechnung der Verluste benötigt

Grössere Abweichungen der verschiedenen Berechnungsmethoden ergeben sich vor allem bei erhöhter CO-Konzentration (Bild 2):



*Bild 2:* Thermische und chemische Verluste für den Fall C  
 ( $\text{CO}_2 = 2 \text{ Vol.-%}$ ,  $\text{CO} = 2 \text{ Vol.-%}$ ,  $T_A = 200^\circ\text{C}$ ,  $u=20\%$ ).  
 EMPA\* : Im Ringversuch verwendete Formel (Gleichung 32).

## 6. Mittelwertbildung und Fehlerbetrachtung

Die hergeleitete Berechnungsmethode erlaubt die Bestimmung des momentanen feuerungstechnischen Wirkungsgrades. In der praktischen Anwendung ist jedoch der Mittelwert über eine bestimmte Betriebsphase von Interesse. Die Mittelwertbildung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Die Bestimmung eines arithmetischen Mittelwertes  $\bar{\eta}_f$  über eine bestimmte Betriebsphase ist nur bei konstanter Feuerungsleistung sinnvoll. Sofern die Feuerungsleistung nicht konstant ist, muss der momentane Wirkungsgrad  $\eta_f(t)$  mit der momentanen Feuerungsleistung  $\dot{Q}(t)$  gewichtet werden. Dies bedeutet, dass die Feuerungsleistung kontinuierlich erfasst werden muss, indem z. B. nebst der Abgaszusammensetzung zusätzlich der Abgas- oder Zuluftvolumenstrom kontinuierlich erfasst wird [Nussbaumer & Wagner 1991, 1992; Gaegauf, Salerno 1991; Gaegauf & Salerno 1992].

- **Gewichtete Mittelwertbildung**

$$\bar{\eta}_{f \text{ gew.}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}(t) \eta_f(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}(t) dt} \quad [\%] \quad (44)$$

oder in Summenschreibweise:

$$\bar{\eta}_{f \text{ gew.}} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \eta_{fi}}{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i} \quad [\%] \quad (45)$$

- **Arithmetischer Mittelwert der Momentanwerte des Wirkungsgrades**

$$\bar{\eta}_{f \text{ arithm.}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \eta_f(t) dt \quad [\%] \quad (46)$$

oder in Summenschreibweise:

$$\bar{\eta}_f \text{ arithm.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{fi} \quad [\%] \quad (47)$$

- **Wirkungsgrad berechnet aus gemittelten Messwerten**

Eine weitere Methode der Mittelwertbildung besteht darin, dass anstelle von momentanen Messwerten ( $T_A(t)$ ,  $CO_2(t)$ ,  $CO(t)$  ...) die arithmetisch gemittelten Messwerte ( $\bar{T}_A$ ,  $\bar{CO}_2$ ,  $\bar{CO}$ , ...) in die Berechnungsformel für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad eingesetzt werden.

$$\bar{\eta}_f \text{ gem.} = \eta_f(\bar{T}_A, \bar{CO}_2, \bar{CO}, \dots) \quad [\%] \quad (48)$$

- **Fallbeispiele**

An zwei Fallbeispielen werden die Unterschiede zwischen gewichteter und arithmetischer Mittelwertbildung verdeutlicht.

**Beispiel 1: Stationärer Abbrand**

Bild 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Feuerungsleistung und des feuerungstechnischen Wirkungsgrades beim kontinuierlichen Abbrand einer Holzcharge in einem Stückholzkessel. Der Abbrand besteht aus Anfeuerphase, stationärer Vollast-, stationärer Teillastphase und Ausbrandphase.

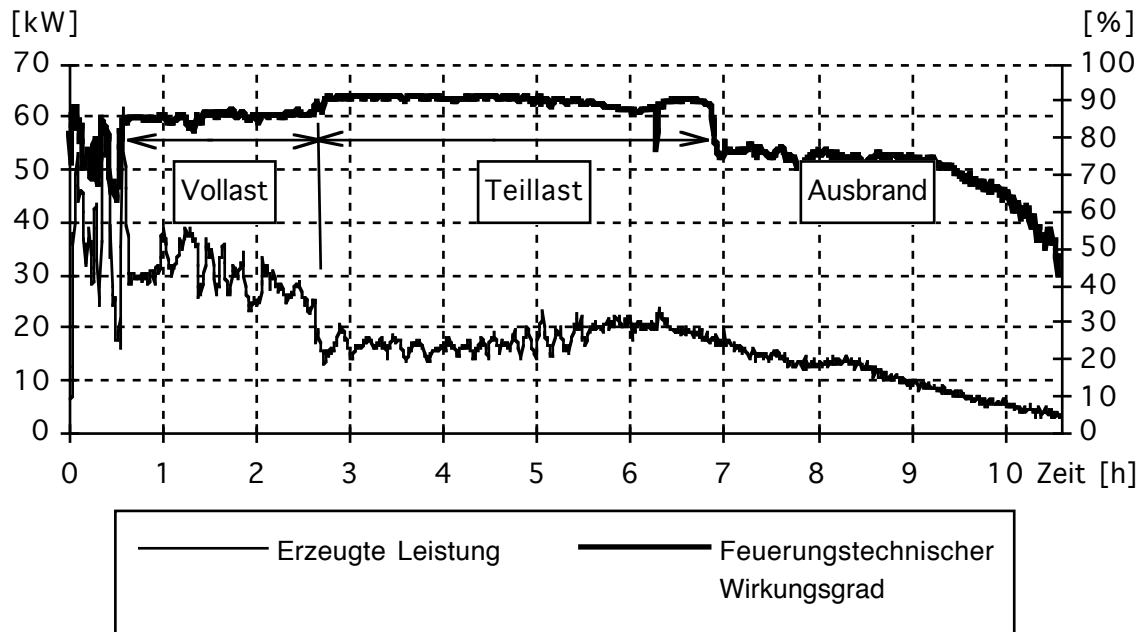


Bild 3 Zeitlicher Verlauf der Feuerungsleistung und des feuerungstechnischen Wirkungsgrades beim stationären Abbrand [ Nussbaumer, Wagner 1993]

Tabelle 12 zeigt die Mittelwerte des feuerungstechnischen Wirkungsgrades und der Messunsicherheit für einzelne Abbrandphasen. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad wird nach der vereinfachten Methode gemäss Kapitel 4.2 berechnet, die Mittelwertbildung erfolgt dabei nach den drei Methoden gemäss Gl. 44, 46 und 48, die mittlere Messungenauigkeit wird gemäss Gl. A34 berechnet.

Methode der Mittelwertbildung	Gesamter Abbrand	Vollast	Teillast	Ausbrand
		$\bar{\eta}_f$ [%]	$\bar{\eta}_f$ [%]	$\bar{\eta}_f$ [%]
$\bar{\eta}_f$ gew. Gl. 44	$84.0 \pm 1.5$	$86.1 \pm 1.3$	$90.1 \pm 1.1$	$72.2 \pm 3.0$
$\bar{\eta}_f$ arithm. Gl. 46	$81.4 \pm 1.5$	$86.1 \pm 1.3$	$90.2 \pm 1.1$	$69.7 \pm 3.0$
$\bar{\eta}_f$ gem. Gl. 48	$85.9 \pm 1.5$	$86.2 \pm 1.3$	$90.3 \pm 1.1$	$75.4 \pm 3.0$

Tabelle 12: Unterschiedliche Mittelwertbildung für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad in verschiedenen Abbrandphasen



## Beispiel 2: Intermittierender Abbrand

Bild 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Feuerungsleistung und des feuerungstechnischen Wirkungsgrades bei intermittierendem Abbrand einer Holzcharge in einem Stückholzkessel.

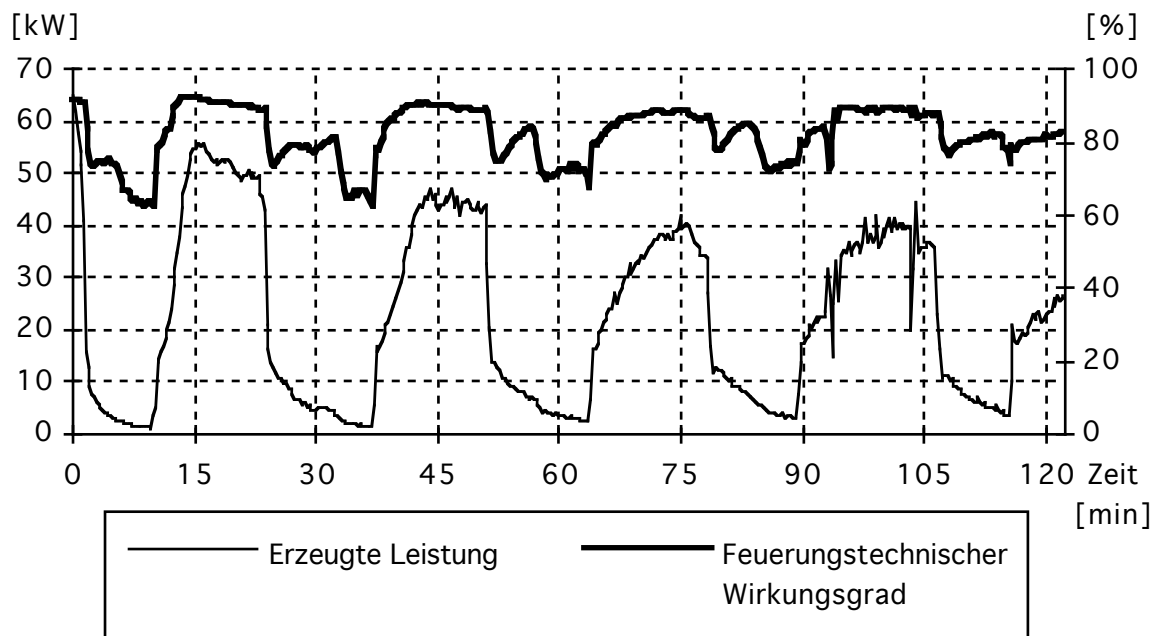


Bild 4 Zeitlicher Verlauf der Feuerungsleistung und des feuerungstechnischen Wirkungsgrades bei intermittierendem Abbrand [ Nussbaumer, Wagner 1993]

Tabelle 13 zeigt die Mittelwerte des feuerungstechnischen Wirkungsgrades und der Messunsicherheit für einzelne Abbrandphasen. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad wird nach der vereinfachten Methode gemäss Kapitel 4.2 berechnet, die Mittelwertbildung erfolgt dabei nach den drei Methoden gemäss Gl. 44, 46 und 48, die mittlere Messungenauigkeit wird gemäss Gl. A34 berechnet.

Methode der Mittelwertbildung	Gesamter Abbrand $\bar{\eta}_f$ [%]	typ. EIN-Phase $\bar{\eta}_f$ [%]	typ. AUS-Phase $\bar{\eta}_f$ [%]	typ. EIN/AUS-Phase $\bar{\eta}_f$ [%]
$\bar{\eta}_f$ gew. Gl. 44	$87.2 \pm 1.8$	$90.3 \pm 1.2$	$78.5 \pm 3.1$	$89.0 \pm 1.6$
$\bar{\eta}_f$ arithm. Gl. 46	$82.6 \pm 1.8$	$88.6 \pm 1.2$	$75.9 \pm 3.1$	$82.4 \pm 1.6$
$\bar{\eta}_f$ gem. Gl. 48	$85.9 \pm 1.8$	$90.3 \pm 1.2$	$78.0 \pm 3.1$	$87.1 \pm 1.6$

Tabelle 13: Unterschiedliche Mittelwertbildung für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad in verschiedenen Abbrandphasen

- **Fazit Mittelwertbildung**

Für eine exakte Mittelwertbildung über einen gesamten Abbrand muss der momentane Wirkungsgrad mit der momentanen Feuerungsleistung gewichtet werden. Zur Bestimmung der momentanen Feuerungsleistung wiederum muss z.B. der Abgas- oder der Zuluftvolumenstrom kontinuierlich erfasst werden, was einen entsprechenden Mehraufwand bei der Messung bedeutet [Nussbaumer & Wagner 1991, Gaegauf & Salerno 1991].

Die beiden Fallbeispiele zeigen, dass die Mittelwertbildung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades durch arithmetische Mittelung von Momentanwerten von  $\eta_f$  nur bei Abbrandphasen mit konstanter Feuerungsleistung zulässig ist, da sonst Abweichungen von bis zu 5 % auftreten.

Die vereinfachte Mittelwertbildung gemäss Gleichung (48) durch Einsetzen von arithmetisch gemittelten Messwerten in die Berechnungsformel für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad weicht auch in instationären Betriebsphasen nur ca. 2 % von der exakten Mittelungsmethode ab und liegt damit innerhalb der Messungenauigkeit. Im Gegensatz zur gewichteten Methode kommt die vereinfachte Mittelwertbildung ohne Berechnung der Feuerungsleistung und somit ohne Messung des Abgas- oder Zuluftvolumenstroms aus.

Wenn keine kontinuierliche Messung des Abgas- oder Zuluftvolumenstroms erfolgt, wird empfohlen, zuerst die Mittelwertbildung der Abgasmessdaten und dann die Wirkungsgradberechnung und die Normierung der Emissionsmessdaten durchzuführen (siehe dazu auch [Kerschbaumer & Nussbaumer 1989]).

- **Fehlerbetrachtung**

Die im Anhang 9.6 durchgeführte Fehlerbetrachtung zeigt, dass die Messunsicherheit während der stationären Betriebsphasen in der Grössenordnung von 1 % bis 3 % liegt, dass sie jedoch in der Ausbrandphase allmählich ansteigt und zum Schluss Werte über 10 % aufweist (Bild 16). Sofern der Heizwert des Brennstoffs nicht durch eine Messung bestimmt wird – was in der Regel nicht der Fall ist und zudem mit Unsicherheiten bei der Probenahme verbunden ist –, wird die Messunsicherheit während der stationären Phase hauptsächlich durch die Unsicherheit der Heizwertberechnung des absolut trockenen Brennstoffs bestimmt. Im weiteren führt auch die Messungenauigkeit der Abgastemperatur zu einem geringfügigen Fehler. Im Vergleich dazu sind die Umgebungstemperatur, der CO<sub>2</sub>-Gehalt, der CO-Gehalt und die Holzfeuchtigkeit von untergeordneter Bedeutung.

## 7. Schlussfolgerungen

- Für die exakte Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrads  $\eta_f$  muss der CO-Gehalt, der während Anfahr- und Ausbrandphasen im Prozentbereich liegen kann, nicht nur für die Bestimmung der chemischen, sondern auch für die Bestimmung der thermischen Verluste berücksichtigt werden.
- Die neu hergeleitete exakte Berechnungsmethode für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad stimmt sehr gut mit der Berechnung nach DIN 4702 und BLT überein. Die Abweichungen bei den Fallbeispielen sind kleiner als 0.2 %.
- Ausgehend von der exakten Methode ist eine vereinfachte Berechnungsmethode für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad abgeleitet worden. Die Differenzen zwischen der exakten und der vereinfachten Berechnungsmethode sind kleiner als 0.3 %.
- Bei tiefem Kohlenmonoxidgehalt stimmt die Berechnung nach EMPA gut mit den anderen Methoden überein (Differenz  $< 0.7$  %). Bei hohem CO-Gehalt im Abgas führt die EMPA-Formel zu Abweichungen im Prozentbereich (Differenz  $\approx 2$  % bei einem CO-Gehalt von 2 Vol.-%).
- Die exakte Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades erfordert die Kenntnis der Brennstoffzusammensetzung und des Heizwertes. Wird mit einer mittleren Brennstoffzusammensetzung und einem mittleren Heizwert gerechnet, so können Fehler in der Größenordnung von 2 % bis 3 % auftreten. Die Genauigkeit der Wirkungsgradbestimmung ist somit nicht durch die Genauigkeit der Formel limitiert, sondern durch die Fehler infolge Unkenntnis der Brennstoffzusammensetzung.
- Die Bestimmung eines gewichteten mittleren feuerungstechnischen Wirkungsgrades über einen ganzen Abbrand erfordert die kontinuierliche Messung des Abgas- oder des Zuluftvolumenstroms. Die arithmetische Mittelwertbildung des momentanen Wirkungsgrades kann zu Fehlern im Prozentbereich führen. Die Mittelwertbildung der Abgasmessdaten und die anschliessende Berechnung des Wirkungsgrades kann auch zu erheblichen Fehlern führen, bei gewöhnlichen Abbrandbedingungen ist diese Berechnungsart jedoch der arithmetischen Mittelwertbildung vorzuziehen.
- Die exakte Berechnungsmethode kann auf beliebige biogene und fossile Brennstoffe übertragen werden, wenn die entsprechende Brennstoffzusammensetzung und der Heizwert bekannt sind.

## 8. Empfehlungen

- Die vorgestellte vereinfachte Berechnungsmethode ist wesentlich einfacher als die Bestimmung nach DIN 4702 und der Berechnungsvorgang ist zudem einfach verständlich und nachvollziehbar. Es wird deshalb vorgeschlagen, für eine einfache Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von Holzfeuerungen die auf S. 37 zusammengefasste vereinfachte Berechnungsformel und für eine rasche grafische Bestimmung die auf S. 38 abgebildeten Nomogramme zu verwenden.
- Wenn sehr hohe Genauigkeit verlangt wird und zur Berechnung eine etwas aufwendigere Berechnungsroutine programmiert werden kann, wird empfohlen, die in Kapitel 4.1 dargestellte exakte Berechnungsmethode anzuwenden. Gegenüber der vereinfachten Methode kann damit der Wirkungsgrad auch bei CO-Gehalten im Prozentbereich noch mit hoher Genauigkeit bestimmt werden – was allerdings bei Holzfeuerungen nach dem heutigem Stand der Technik kaum mehr von Bedeutung ist.
- Zur Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades für beliebige biogene und fossile Brennstoffe wird empfohlen, das im Kapitel 4.1 dargestellte Verfahren anzuwenden, indem die entsprechenden Brennstoffkonstanten eingesetzt werden. Daraus kann sofort die exakte Berechnungsmethode und bei Bedarf analog dem für Holz beschriebenen Vorgehen eine vereinfachte Formel abgeleitet werden.
- Wenn keine kontinuierliche Messung des Abgas- oder Zuluftvolumenstroms erfolgt, wird empfohlen, zuerst die Mittelwertbildung der Abgasmessdaten und dann die Wirkungsgradberechnung und die Normierung der Emissionsmessdaten durchzuführen (zuerst mitteln und dann normieren).

## Vereinfachte Berechnungsmethode

Feuerungstechnischer Wirkungsgrad  $\eta_f$  :

$$\eta_f = 100 - V_{\text{therm}} - V_{\text{chem}} \quad [ \% ]$$

mit:  $V_{\text{therm}}$  = thermische Verluste durch fühlbare Wärme der Abgase [ % ]

$V_{\text{chem}}$  = chemische Verluste durch unvollständige Verbrennung [ % ]

Thermische Verluste  $V_{\text{therm}}$ :

$$V_{\text{therm}} = \frac{(T_A - T_U) \left\{ 1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 u \right\}}{\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u} \quad [ \% ]$$

Chemische Verluste  $V_{\text{chem}}$ :

$$V_{\text{chem}} = \frac{CO}{CO_2 + CO} \frac{11'800}{\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u} \quad [ \% ]$$

Lambda  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{20.4}{CO_2 + CO}$$

Falls  $O_2$  gemessen wird:  $CO_2 = 0.98 (21 - O_2) - 0.61 CO$  [ Vol.-% ]

mit:  $T_A$  = Abgastemperatur [ °C ]

$T_U$  = Umgebungstemperatur [ °C ]

$CO$  = Kohlenmonoxidkonzentration [ Vol.-% ]

$CO_2$  = Kohlendioxidkonzentration [ Vol.-% ]

$O_2$  = Sauerstoffkonzentration [ Vol.-% ]

$u$  = Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz [ % ]

$h_{u\text{atro}}$  = Heizwert pro kg absolut trockenes Holz = 18'500 [ kJ kg<sup>-1</sup> ]

## Nomogramm zur Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrads

Für eine genaue Bestimmung sind die Nomogramme auf S. 54 und 55 je ganzseitig abgebildet.

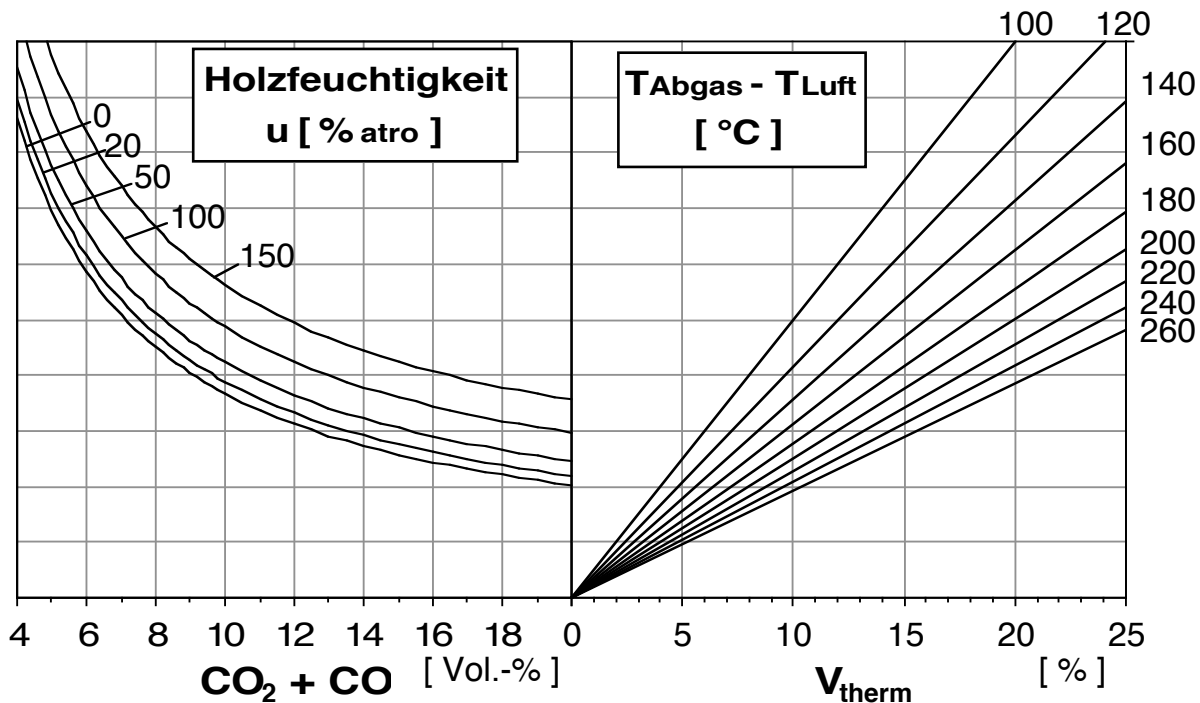


Bild 5: Bestimmung der thermischen Verluste  $V_{\text{therm}}$

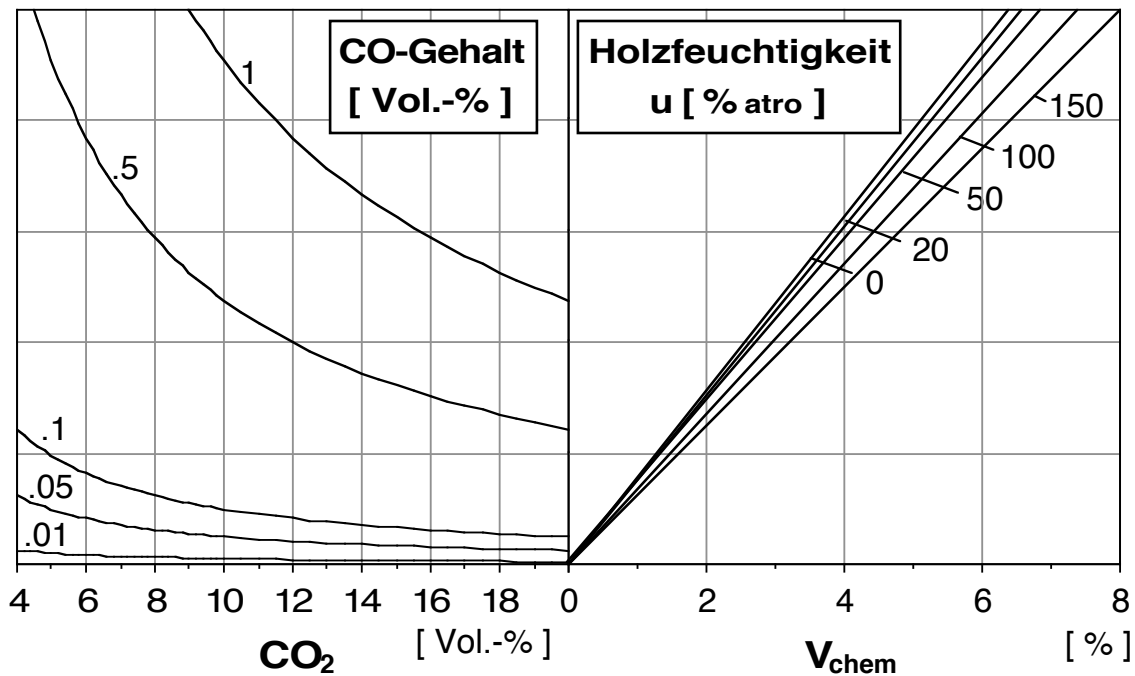


Bild 6: Bestimmung der chemischen Verluste  $V_{\text{chem}}$

$$\eta_f = 100 - V_{\text{therm}} - V_{\text{chem}} \quad [\%]$$

## 9. Anhang

### 9.1. Herleitung der Luftüberschusszahl

#### Über die Kohlendioxidkonzentration:

Aus der Reaktionsgleichung der Verbrennung von feuchtem Holz (6) lässt sich die Volumenkonzentration von Kohlendioxid im trockenen Abgas berechnen. Dabei ist zu beachten, dass der Wasserdampf nicht berücksichtigt wird. Damit folgt:

$$[\text{CO}_2] = \frac{(\text{CO}_2)}{(\text{CO}_2)+(\text{CO})+(\text{O}_2)+(\text{N}_2)} \quad (\text{A1})$$

mit:  $[\text{CO}_2]$  = Volumenkonzentration von Kohlendioxid [-]  
(..) = Anzahl Mole eines Stoffes [-]

Durch Einsetzen der stöchiometrischen Faktoren der Abgaskomponenten (Tabelle 1) folgt:

$$[\text{CO}_2] = \frac{1 - \beta}{1 - \beta + \beta + A\lambda - A + \frac{\beta}{2} + A\lambda\frac{79}{21}} = \frac{1 - \beta}{1 + A\lambda\frac{100}{21} - A + \frac{\beta}{2}}$$

Durch Auflösen nach Lambda erhält man die Formel zur Berechnung der Luftüberschusszahl:

$$[\text{CO}_2] + A\lambda\frac{100}{21} [\text{CO}_2] - A [\text{CO}_2] + \frac{\beta}{2} [\text{CO}_2] = 1 - \beta$$

$$\lambda A \frac{100}{21} [\text{CO}_2] = 1 - \beta - [\text{CO}_2] + A [\text{CO}_2] - \frac{\beta}{2} [\text{CO}_2]$$

$$\lambda = \frac{1 - \beta}{\frac{100}{21} A} \cdot \frac{1 + A - \frac{\beta}{2}}{[\text{CO}_2]}$$

$$\lambda = \frac{21 (1 - \beta)}{A \frac{100}{21} [\text{CO}_2]} + \frac{21}{100} \left( 1 - \frac{1}{A} - \frac{\beta}{2A} \right)$$

Daraus folgt die exakte Berechnungsformel (Gl. 8) :

$$\lambda = \frac{21 (1 - \beta)}{A \text{ CO}_2} + \frac{21}{100} \left( 1 - \frac{1}{A} - \frac{\beta}{2A} \right) [-] \quad (\text{A2})$$

mit:  $\text{CO}_2$  = Kohlendioxidkonzentration in Volumenprozent [Vol.-%]

### Näherungsformel:

In der vereinfachten Form wird der zweite Summand vernachlässigt:

$$\lambda = \frac{21 (1 - \beta)}{A \text{ CO}_2} [-] \quad (\text{A3})$$

Durch Einsetzen von  $\beta$  aus (5) folgt:

$$\lambda = \frac{21 \left( 1 - \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2} \right)}{A \text{ CO}_2} = \frac{21 \frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2}}{A \text{ CO}_2}$$

$$\lambda = \frac{21}{A (\text{CO} + \text{CO}_2)} [-] \quad (\text{A4})$$

Mit  $A = 1.03$  resultiert die einfache Beziehung:

$$\lambda = \frac{20.4}{\text{CO}_2 + \text{CO}} [-] \quad (\text{A5})$$

, für  $\text{CO} = 0$  folgt die häufig verwendete Formel (Gl. 9):

$$\lambda = \frac{20.4}{[\text{CO}_2]} [-] \quad (\text{A6})$$



## Über die Sauerstoffkonzentration:

Aus der Reaktionsgleichung der Verbrennung von feuchtem Holz (6) lässt sich die Volumenkonzentration von Sauerstoff im trockenen Abgas analog berechnen. Damit folgt:

$$[O_2] = \frac{(O_2)}{(CO_2)+(CO)+(O_2)+(N_2)} \quad (A7)$$

mit:  $[O_2]$  = Volumenkonzentration von Sauerstoff [-]  
 (..) = Anzahl Mole eines Stoffes [-]

Durch Einsetzen der stöchiometrischen Faktoren der Abgaskomponenten (Tabelle 1) folgt:

$$[O_2] = \frac{A\lambda - A + \frac{\beta}{2}}{1 - \beta + \beta + A\lambda - A + \frac{\beta}{2} + A\lambda \frac{79}{21}} = \frac{A\lambda - A + \frac{\beta}{2}}{1 + A\lambda \frac{100}{21} - A + \frac{\beta}{2}}$$

Durch Auflösen nach Lambda erhält man die Formel zur Berechnung der Luftüberschusszahl:

$$[O_2] + A\lambda \frac{100}{21} [O_2] - A [O_2] + \frac{\beta}{2} [O_2] = A\lambda - A + \frac{\beta}{2}$$

$$\lambda A \frac{100}{21} [O_2] - \lambda A = -[O_2] + A [O_2] - \frac{\beta}{2} [O_2] - A + \frac{\beta}{2}$$

$$\lambda \left( A \frac{100}{21} [O_2] - A \right) = A [O_2] - A - [O_2] - \frac{\beta}{2} [O_2] + \frac{\beta}{2}$$

$$\lambda = \frac{[O_2] \left( A - 1 - \frac{\beta}{2} \right) - A + \frac{\beta}{2}}{A \frac{100}{21} [O_2] - A} \quad \text{A kürzen}$$

$$\lambda = \frac{[O_2] \left( 1 - \frac{1}{A} - \frac{\beta}{2A} \right) - 1 + \frac{\beta}{2A}}{\frac{100}{21} [O_2] - 1} \quad \text{-21 erweitern}$$

$$\lambda = \frac{21 \left(1 - \frac{\beta}{2A}\right) - 21 \left(1 - \frac{1}{A} - \frac{\beta}{2A}\right) [O_2]}{21 - 100 [O_2]}$$

Daraus folgt die exakte Berechnungsformel (Gl. 8) :

$$\lambda = \frac{21 \left(1 - \frac{\beta}{2A}\right) - \frac{21}{100} \left(1 - \frac{1}{A} - \frac{\beta}{2A}\right) O_2}{21 - O_2} [-] \quad (A8)$$

mit:  $O_2$  = Sauerstoffkonzentration in Volumenprozent [Vol.-%]

#### Näherungsformel:

In der vereinfachten Form wird der zweite Term des Zählers vernachlässigt:

$$\lambda = \frac{21 \left(1 - \frac{\beta}{2A}\right)}{21 - O_2} [-] \quad (A9)$$

Mit  $\beta = 0$  resultiert die häufig verwendete Beziehung (Gl. 10) :

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2} [-] \quad (A10)$$

### Umrechnung zwischen Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalt:

Aus den Gleichungen A2 und A8 lässt sich eine Beziehung zwischen dem Kohlendioxid- und dem Sauerstoffgehalt herleiten. Durch Auflösen der Beziehung

$$\frac{21(1-\beta)}{A \text{ CO}_2} + \frac{21}{100} \left(1 - \frac{1}{A} - \frac{\beta}{2A}\right) = \frac{21 \left(1 - \frac{\beta}{2A}\right) - \frac{21}{100} \left(1 - \frac{1}{A} - \frac{\beta}{2A}\right) \text{ O}_2}{21 - \text{O}_2} \quad (\text{A11})$$

nach  $\text{CO}_2$  resp.  $\text{O}_2$  folgt:

$$\text{CO}_2 = (21 - \text{O}_2) \frac{100}{21 + 79 A} - \text{CO} \left( \frac{21 + 79 A - \frac{79}{2}}{21 + 79 A} \right) [\text{Vol.-%}] \quad (\text{A12})$$

$$\text{O}_2 = 21 - \text{CO}_2 \frac{21 + 79 A}{100} - \text{CO} \left( \frac{21 + 79 A - \frac{79}{2}}{100} \right) [\text{Vol.-%}] \quad (\text{A13})$$

Durch Einsetzen von  $A = 1.03$  folgt:

$$\text{CO}_2 = 0.98 (21 - \text{O}_2) - 0.61 \text{CO} [\text{Vol.-%}] \quad (\text{A14})$$

$$\text{O}_2 = 21 - 1.02 \text{CO}_2 - 0.63 \text{CO} [\text{Vol.-%}] \quad (\text{A15})$$

mit:  $\text{CO}_2$  = Kohlendioxidkonzentration [Vol.-%]  
 $\text{O}_2$  = Sauerstoffkonzentration [Vol.-%]  
 $\text{CO}$  = Kohlenmonoxidkonzentration [Vol.-%]

## 9.2. Herleitung für vereinfachte Berechnung der thermischen Verluste

### Ausgangslage

Annahmen :

- unvollständige Verbrennung, wobei nur CO berücksichtigt wird
- Abgase verhalten sich wie ideale Gase
- Zusammensetzung von Holz:  $\text{CH}_m\text{O}_n$  mit  $m = 1.44$  und  $n = 0.66$
- Sauerstoffbedarf für vollständige Verbrennung gegeben durch Brennstoffkonstante  
 $A = 1 + m/4 - n/2 = 1.03$
- Zusammensetzung der Verbrennungsluft: 21 Vol.-%  $\text{O}_2$  und 79 Vol.-%  $\text{N}_2$
- Luftfeuchtigkeit der Verbrennungsluft wird vernachlässigt
- Stickoxide und Russ werden vernachlässigt
- überstöchiometrische Verbrennung mit  $\lambda \geq 1$
- Abgasekomponenten sind im betrachteten Temperaturbereich gasförmig (keine Kondensation)

Thermische Verluste  $V_{\text{therm}}$  (Gl. 15) :

$$V_{\text{therm}} = \frac{\Delta h}{h_u} 100 \quad [\%]$$

mit:  $\Delta h$  = Enthalpidifferenz der Abgase [kJ kg<sup>-1</sup>]  
 $h_u$  = Heizwert  $h_u$  pro kg Brennstoff [kJ kg<sup>-1</sup>]

Heizwert  $h_u$  (Gl. 12) :

$$h_u = \frac{18'500 - 2'500 \frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \quad [\text{kJ kg}^{-1}]$$

mit:  $u$  = Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz [%]

Enthalpidifferenz  $\Delta h$  (Gl. 20):

$$\Delta h = \frac{V_N}{M_{Br}} \int_{T_U}^{T_A} \left( \sum v_i C_{p_i}(T) \right) dT \quad i = \text{CO}_2, \text{CO}, \text{O}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{N}_2 \quad [\text{kJ kg}^{-1}]$$

mit:	$V_N$	= Normvolumen	$[\text{m}_n^3 \text{ kmol}^{-1}]$
	$M_{Br}$	= Molmasse des Brennstoffs	$[\text{kg kmol}^{-1}]$
	$T_A$	= Abgastemperatur	$[\text{°C}]$
	$T_U$	= Umgebungstemperatur	$[\text{°C}]$
	$v$	= Stöchiometrischer Faktor	$[-]$
	$C_p$	= Spezifische Wärmekapazität	$[\text{kJ m}_n^{-3} \text{ K}^{-1}]$

### Vereinfachungen :

- CO wird vernachlässigt ( $\text{CO} = 0, \beta = 0$ ) ausser bei der Berechnung von Lambda
- Die temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität  $C_{p_i}(T)$  wird durch einen konstanten Wert ersetzt, der den Mittelwert über den Temperaturbereich von 0 bis 180 °C darstellt:

$$C_{p_i}(T) = \overline{\overline{C_{p_i}}}(T_A=180^\circ\text{C}) = \phi \quad [\text{kJ m}_n^{-3} \text{ K}^{-1}] \quad (\text{A16})$$

Die Mittelwerte sind in Funktion der Temperatur tabelliert [Baehr]:

$$\overline{\overline{C_{p_i}^0}}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T c_{p_i}(T) dT \quad [\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}] \quad (\text{A17})$$

Mit (17) folgt somit:

$$\overline{\overline{C_{p_i}}}(T_A=180^\circ\text{C}) = \rho_{ni} \overline{\overline{C_{p_i}^0}}(180^\circ\text{C}) \quad [\text{kJ m}_n^{-3} \text{ K}^{-1}] \quad (\text{A18})$$

Komponente	$\overline{c_{pi}^0}$ (180°C) [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	$\rho_n (= M / V_n)$ [kg m <sup>n-3</sup> ]	$\overline{C_{pi}}$ (T <sub>A</sub> =180°C) [kJ m <sup>n-3</sup> K <sup>-1</sup> ]	$v_i$ ( $\beta = 0$ )
CO <sub>2</sub>	.9038	1.97	1.77	1
O <sub>2</sub>	.9327	1.43	1.33	( $\lambda - 1$ ) A
H <sub>2</sub> O	1.8885	0.80	1.51	$\frac{0.72 + \frac{u}{100} M_{\text{Holz}}}{M_{\text{Wasser}}}$
N <sub>2</sub>	1.0338	1.26	1.30	$\lambda A \frac{79}{21}$

Tabelle 12: mittlere spezifische Wärmekapazität und vereinfachte stöchiometrische Faktoren

Damit wird (38) umgeformt:

$$\Delta h = \frac{V_N}{M_{Br}} \left( \sum v_i \overline{C_{pi}}(180^\circ\text{C}) \right) \int_{T_U}^{T_A} dT$$

$$\Delta h = \frac{V_N}{M_{Br}} (T_A - T_U) \left( \sum v_i \overline{C_{pi}}(180^\circ\text{C}) \right) \text{ [kJ kg}^{-1}\text{]} \quad (\text{A19})$$

Die thermischen Verluste können somit folgendermassen formuliert werden:

$$V_{\text{therm}} = 100 \frac{\frac{V_N}{M_{Br}} (T_A - T_U) \left( \sum v_i \overline{C_{pi}}(180^\circ\text{C}) \right)}{\frac{18'500 - 2'500 \frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}}} \quad [\%]$$

Durch Einsetzen von (13) ergibt sich folgende Formel:

$$\Delta h = \frac{V_N (T_A - T_U) \left( \sum v_i \overline{C_{pi}}(180^\circ\text{C}) \right)}{M_{\text{Holz}} (185 - 0.25 u)} \quad [\%] \quad (\text{A20})$$

In diese Formel werden die Zahlenwerte eingegeben:

mit: A	= 1.03	[-]
M <sub>Holz</sub>	= 24.0	[ kg kmol <sup>-1</sup> ]
V <sub>N</sub>	= 22.4141	[ m <sub>n</sub> <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> ]
v <sub>i</sub>	= Stöchiometrischer Faktor	[-]
C <sub>p</sub> i (180°C)	= Spezifische Wärmekapazität	[ kJ m <sub>n</sub> <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]

für λ wird gemäss Gl. A5 (CO wird hier berücksichtigt)

$$\lambda = \frac{20.4}{C_{O_2+CO}} \quad \text{eingesetzt:}$$

$$V_{\text{therm}} = \frac{100 \cdot 22.4141 (T_A - T_U) \left\{ 1.77 + \left( \frac{20.4}{C_{O_2+CO}} - 1 \right) 1.03 \cdot 1.33 + \left( .72 + \frac{u \cdot 24}{10018} \right) 1.51 + \frac{20.4}{C_{O_2+CO}} \frac{1.03 \cdot 79}{21} 1.30 \right\}}{24 \left( 18'500 - 2'500 \frac{u}{100} \right)}$$

$$= \frac{22.4141 (T_A - T_U) \left\{ 1.77 + \left( \frac{20.4}{C_{O_2+CO}} - 1 \right) 1.03 \cdot 1.33 + \left( .72 + \frac{u \cdot 24}{10018} \right) 1.51 + \frac{79}{C_{O_2+CO}} 1.30 \right\}}{24 (185 - .25 u)}$$

$$= \frac{22.4141 (T_A - T_U) \left\{ 1.77 - 1.03 \cdot 1.33 + .72 \cdot 1.51 + \frac{21 \cdot 1.33 + 79 \cdot 1.30}{C_{O_2+CO}} + .02 u \right\}}{24 (185 - .25 u)}$$

$$= \frac{22.4141 (T_A - T_U) \left\{ 1.4873 + \frac{130.63}{C_{O_2+CO}} + .02 u \right\}}{24 (185 - .25 u)}$$

Aus diesen Umformungen folgt eine vereinfachte Formel zur rechnerischen Bestimmung der thermischen Verluste V<sub>therm</sub>:

$V_{\text{therm}} = \frac{(T_A - T_U) \left\{ 1.39 + \frac{122}{C_{O_2+CO}} + 0.02 u \right\}}{185 - 0.25 u} \quad [ \% ]$	(A21)
--	-------

mit: T <sub>A</sub>	= Abgastemperatur	[ °C ]
T <sub>U</sub>	= Umgebungstemperatur	[ °C ]
CO	= Kohlenmonoxidkonzentration	[ Vol.-% ]
CO <sub>2</sub>	= Kohlendioxidkonzentration	[ Vol.-% ]
u	= Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz	[ % ]

### 9.3. Herleitung für vereinfachte Berechnung der chemischen Verluste

#### Ausgangslage

Annahmen :

- unvollständige Verbrennung, wobei nur CO berücksichtigt wird
- Abgase verhalten sich wie ideale Gase
- Zusammensetzung von Holz:  $\text{CH}_m\text{O}_n$  mit  $m = 1.44$  und  $n = 0.66$
- Sauerstoffbedarf für vollständige Verbrennung gegeben durch Brennstoffkonstante  
 $A = 1 + m/4 - n/2 = 1.03$
- Zusammensetzung der Verbrennungsluft: 21 Vol.-%  $\text{O}_2$  und 79 Vol.-%  $\text{N}_2$
- Luftfeuchtigkeit der Verbrennungsluft wird vernachlässigt
- Stickoxide und Russ werden vernachlässigt
- überstöchiometrische Verbrennung mit  $\lambda \geq 1$
- Abgaskomponenten sind im betrachteten Temperaturbereich gasförmig (keine Kondensation)

Chemische Verluste  $V_{\text{chem}}$  (Gl. 22) :

$$V_{\text{chem}} = \frac{\text{CO } V_{\text{Atr}} h_{\text{CO}}}{h_u} \quad [\%]$$

mit:  $\text{CO}$  = Kohlenmonoxidgehalt im trockenen Abgas [ Vol.-% ]  
 $V_{\text{Atr}}$  = Trockenes Abgasvolumen pro kg Brennstoff [  $\text{m}_n^3 \text{ kg}^{-1}$  ]  
 $h_{\text{CO}}$  = Heizwert von CO = 12'640 [  $\text{kJ m}_n^{-3}$  ]  
 $h_u$  = Heizwert des Brennstoffs [  $\text{kJ kg}^{-1}$  ]

Heizwert  $h_u$  (Gl. 12) :

$$h_u = \frac{18'500 - 2'500 \frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \quad [\text{kJ kg}^{-1}]$$



mit:  $u$  = Holzfeuchtigkeit [ % ]

trockenes Abgasvolumen  $V_{A\ tr}$  (Gl. 14) :

$$V_{A\ tr} = \left( 1 + \frac{\beta}{2} - A + \lambda A \frac{100}{21} \right) \frac{V_N}{M_{Br}} \quad [ m_n^3 \text{ kg}^{-1} ]$$

mit:  $V_N$  = Normvolumen [  $m_n^3 \text{ kmol}^{-1}$  ]  
 $M_{Br}$  = Molmasse des Brennstoffs [  $\text{kg kmol}^{-1}$  ]

(Gl. 13):

$$M_{Br} = M_{\text{Holz}} \left( 1 + \frac{u}{100} \right) \quad [ \text{kg kmol}^{-1} ]$$

mit:  $M_{\text{Holz}}$  = Molmasse von  $\text{CH}_{1.44}\text{O}_{0.66}$  = 24.0  $\text{kg kmol}^{-1}$

(Gl. 5):

$$\beta = \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2}$$

mit:  $\beta$  = Molverhältnis von CO zu C im Brennstoff [ - ]  
 $\text{CO}_2$  = Kohlendioxidgehalt der trockenen Abgase [ Vol.-% ]  
 $\text{CO}$  = Kohlenmonoxidgehalt der trockenen Abgase [ Vol.-% ]

### Vereinfachungen :

- Für Lambda wird statt der exakten Formel (Gl. 7) die vereinfachte Formel (Gl. 35) verwendet:

$$\lambda = \frac{20.4}{\text{CO}_2 + \text{CO}}$$

Damit wird Gl. 45 umgeformt:

mit: A = 1.03 [-]  
M<sub>Holz</sub> = 24.0 [kg kmol<sup>-1</sup>]  
V<sub>N</sub> = 22.4141 [m<sub>n</sub><sup>3</sup> kmol<sup>-1</sup>]

$$V_{\text{chem}} = \frac{\text{CO} \cdot 12'640 \cdot 22.4141 \left\{ 1 + \frac{\text{CO}}{2(\text{CO} + \text{CO}_2)} - 1.03 + \frac{20.4}{\text{CO} + \text{CO}_2} \frac{1.03 \cdot 100}{21} \right\}}{24 \left( 18'500 - 2'500 \frac{u}{100} \right)}$$

$$= \frac{22.4141 \cdot 12'640 \cdot \text{CO} \left\{ -0.03 + \frac{\text{CO}}{2(\text{CO} + \text{CO}_2)} + \frac{100}{\text{CO} + \text{CO}_2} \right\}}{24 (18'500 - 25 u)}$$

$$= \frac{22.4141 \cdot 12'640}{24 (18'500 - 25 u)} \left\{ -0.03 \text{CO} + 100 \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2} + \frac{1}{2} \frac{\text{CO}^2}{\text{CO} + \text{CO}_2} \right\}$$

$$= \frac{118}{185 - .25 u} \left\{ -0.03 \text{CO} + 100 \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2} + \frac{1}{2} \frac{\text{CO}^2}{\text{CO} + \text{CO}_2} \right\}$$

$$= \frac{-3.54 \text{CO} + \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2} (11'805 + 59 \text{CO})}{185 - .25 u}$$

Unter Vernachlässigung des Ausdrucks -3.54 CO und 59 CO im Zähler folgt aus diesen Umformungen eine vereinfachte Formel zur rechnerischen Bestimmung der chemischen Verluste V<sub>chem</sub>:

$$\boxed{V_{\text{chem}} = \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \frac{11'800}{185 - 0.25 u}} \quad [\%] \quad (\text{A22})$$

mit: CO = Kohlenmonoxidkonzentration [Vol.-%]  
CO<sub>2</sub> = Kohlendioxidkonzentration [Vol.-%]  
u = Holzfeuchtigkeit [%]

## 9.4. Zusammenstellung der vereinfachten Berechnungsformeln

Die folgenden Formeln sind identisch mit der Zusammenfassung auf S. 37:

### Feuerungstechnischer Wirkungsgrad $\eta_f$ :

$$\eta_f = 100 - V_{\text{therm}} - V_{\text{chem}} \quad [ \% ]$$

mit:  $V_{\text{therm}}$  = thermische Verluste durch fühlbare Wärme der Abgase [ % ]

$V_{\text{chem}}$  = chemische Verluste durch unvollständige Verbrennung [ % ]

### Thermische Verluste $V_{\text{therm}}$ :

$$V_{\text{therm}} = \frac{(T_A - T_U) \left\{ 1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 u \right\}}{\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u} \quad [ \% ]$$

### Chemische Verluste $V_{\text{chem}}$ :

$$V_{\text{chem}} = \frac{CO}{CO_2 + CO} \frac{11'800}{\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u} \quad [ \% ]$$

### Lambda $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{20.4}{CO_2 + CO}$$

Falls  $O_2$  gemessen wird:  $CO_2 = 0.98 (21 - O_2) - 0.61 CO$  [ Vol.-% ]

mit:  $T_A$  = Abgastemperatur [ °C ]

$T_U$  = Umgebungstemperatur [ °C ]

CO = Kohlenmonoxidkonzentration [ Vol.-% ]

CO<sub>2</sub> = Kohlendioxidkonzentration [ Vol.-% ]

u = Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz [ % ]

$h_{u\text{atro}}$  = Heizwert pro kg absolut trockenes Holz = 18'500 [ kJ kg<sup>-1</sup> ]

**Gültigkeitsbereich :**

Parameter	Variationsbreite	V <sub>therm</sub> Exakt [%]	V <sub>therm</sub> Vereinfacht [%]	absolute Differenz [-]
T <sub>A</sub> [°C]	150	10.1	10.1	0.0
	<b>200</b>	14.0	14.0	0.0
	250	18.0	17.9	- .1
	300	22.0	21.7	- .3
CO <sub>2</sub> [Vol.-%]	5	26.2	26.1	- .1
	<b>10</b>	14.0	14.0	0.0
	20	7.9	7.9	0.0
CO [Vol.-%]	<b>.01</b>	14.0	14.0	0.0
	1	12.9	12.9	0.0
	2	11.9	12.0	0.1
u [%atro]	<b>20</b>	14.0	14.0	0.0
	100	17.4	17.5	0.1

Tabelle 13: Vergleich der exakten und vereinfachten Berechnung der thermischen Verluste

Parameter	Variationsbreite	V <sub>chem</sub> Exakt [%]	V <sub>chem</sub> Vereinfacht [%]	absolute Differenz [-]
T <sub>A</sub> [°C]	150	.07	.07	0.00
	<b>200</b>	.07	.07	0.00
	250	.07	.07	0.00
	300	.07	.07	0.00
CO <sub>2</sub> [Vol.-%]	5	.13	.13	0.00
	<b>10</b>	.07	.07	0.00
	20	.03	.03	0.00
CO [Vol.-%]	<b>.01</b>	.07	.07	0.00
	1	5.96	5.96	0.00
	2	10.93	10.93	0.00
u [%atro]	<b>20</b>	.07	.07	0.00
	100	.07	.07	0.00

Tabelle 14: Vergleich der exakten und vereinfachten Berechnung der chemischen Verluste

Parameter	Variationsbreite	$\lambda$ Exakt [-]	$\lambda$ Vereinfacht [-]	absolute Differenz [-]
$T_A$ [°C]	150	2.04	2.04	0.00
	<b>200</b>	2.04	2.04	0.00
	250	2.04	2.04	0.00
	300	2.04	2.04	0.00
$CO_2$ [Vol.-%]	5	4.08	4.07	.01
	<b>10</b>	2.04	2.04	0.00
	20	1.02	1.02	0.00
$CO$ [Vol.-%]	<b>.01</b>	2.04	2.04	0.00
	1	1.85	1.85	0.00
	2	1.69	1.70	- .01
$u$ [%atro]	<b>20</b>	2.04	2.04	0.00
	100	2.04	2.04	0.00

Tabelle 15: Vergleich der exakten und vereinfachten Berechnung von Lambda

### Fazit:

Innerhalb der angegebenen Variationsbreite der Parameter sind die vereinfachten Berechnungsformeln **ohne Genauigkeitseinbusse** anwendbar. Einzig bei den thermischen Verlusten wird die Abweichung mit zunehmendem Kohlenmonoxidgehalt grösser als 1 Prozent.

## 9.5. Nomogramme

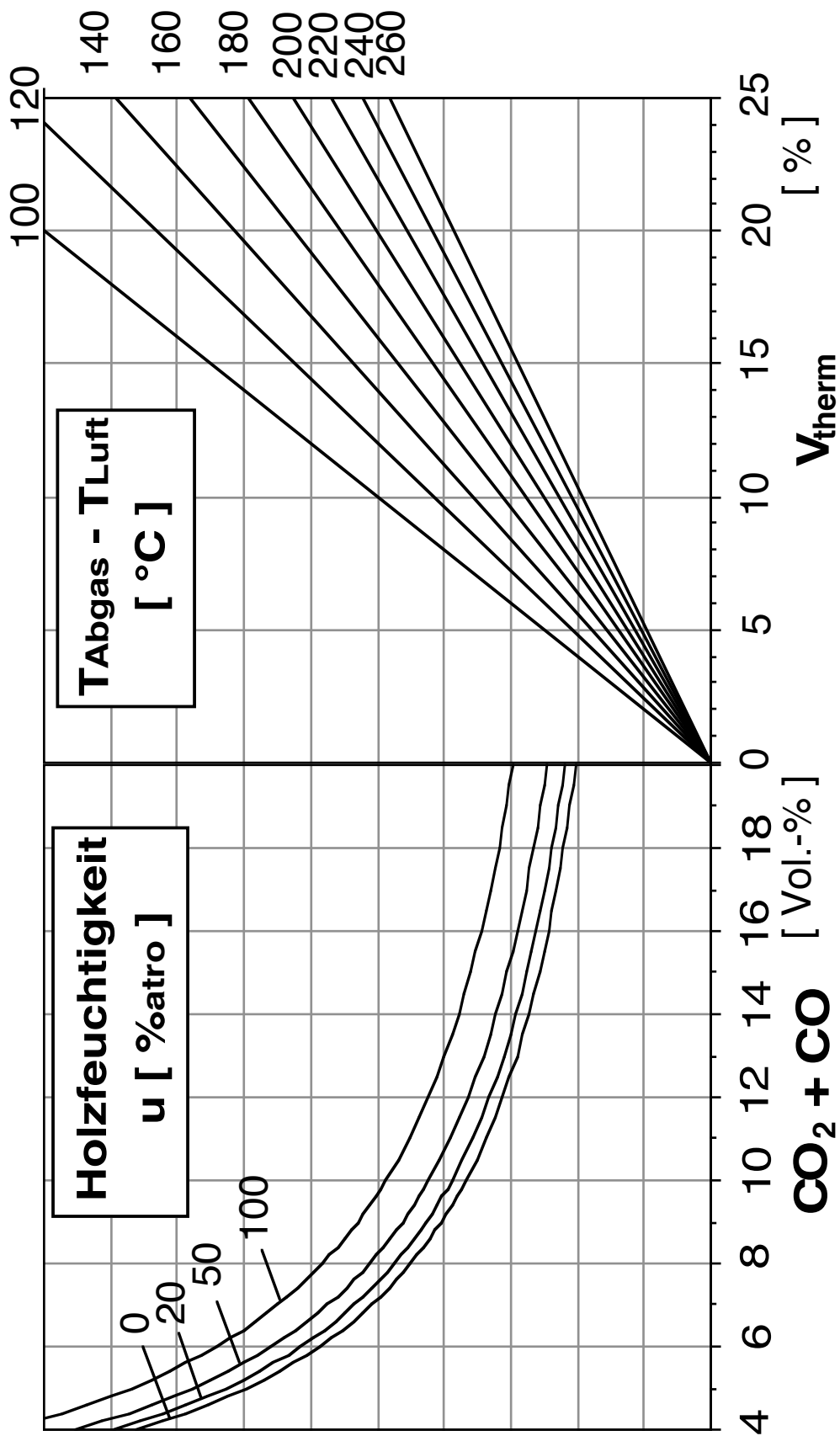


Bild 8 (ganzseitige Abb. von Bild 5): Nomogramm zur Bestimmung der thermischen Verluste  $V_{\text{therm}}$ .

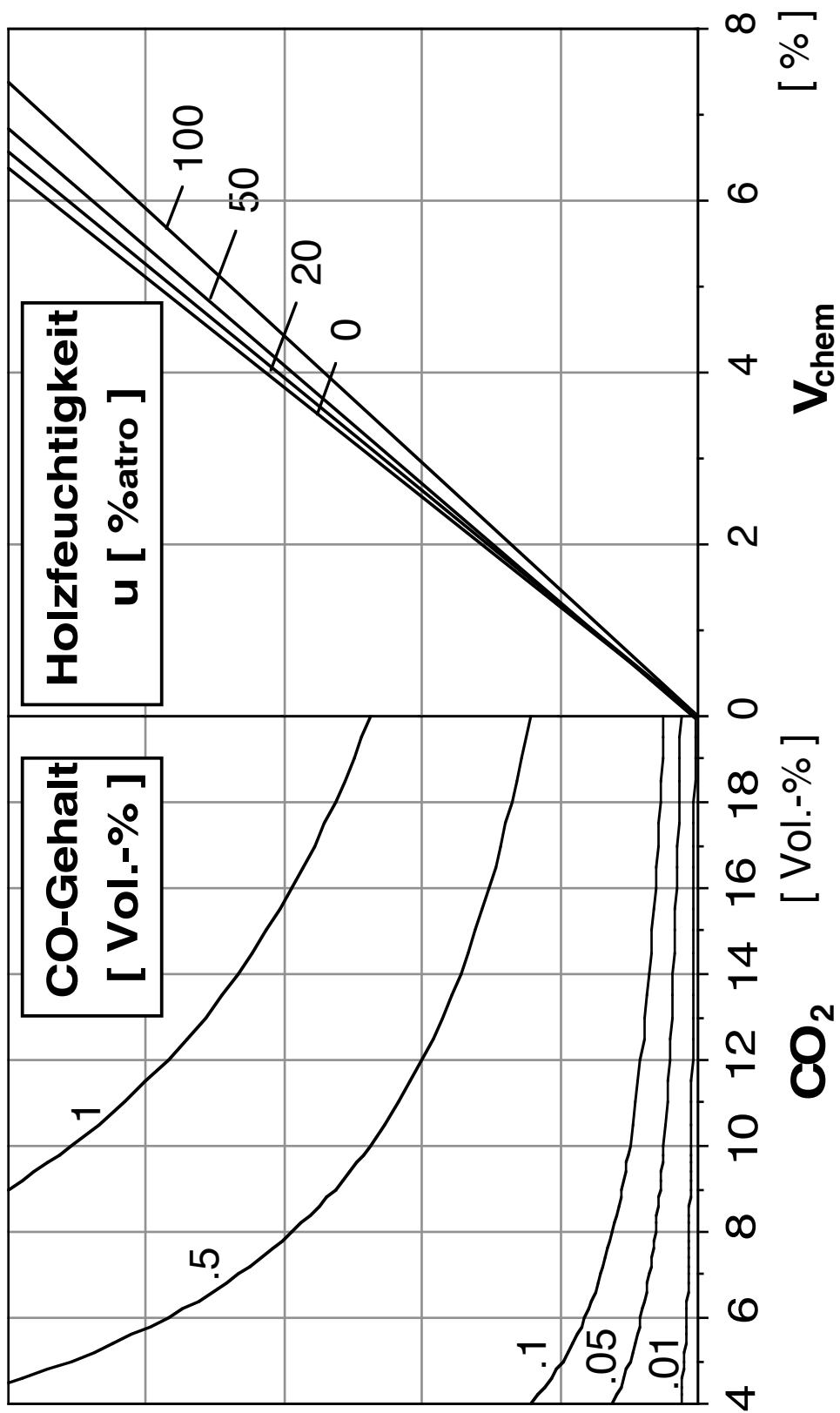


Bild 9 (ganzseitige Abb. von Bild 6): Nomogramm zur Bestimmung der chemischen Verluste  $V_{\text{chem}}$

## 9.6. Fehlerbetrachtung

Ist das rechnerische Ergebnis eine Funktion von n unabhängigen Größen (Messgrößen, Zustandsgrößen, Stoff- und Beiwerte)

$$y = F(x_1; x_2; \dots; x_n), \quad (\text{A23})$$

so ist nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz die Messunsicherheit des Ergebnisses:

$$u_y = \pm \sqrt{\sum \left[ \frac{\delta_y}{\delta_{x_i}} u_{x_i} \right]^2} \quad (\text{A24})$$

und die relative Messunsicherheit

$$\varepsilon_y = \frac{u_y}{y} = \pm \sqrt{\sum \left[ \frac{\delta_y}{\delta_{x_i}} \frac{x_i}{y} \frac{u_{x_i}}{x_i} \right]^2}$$

$$\varepsilon_y = \pm \sqrt{\sum \left[ \frac{\delta_y}{\delta_{x_i}} \frac{u_{x_i}}{y} \right]^2} \quad (\text{A25})$$

(siehe VDI 2048 Abschnitt 4.2.3. oder DIN 1942).

Dieses Verfahren wird in der Folge auf die vereinfachte Methode zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades angewendet. Die Funktion y ist in diesem Fall

$$\eta_f = 100 - \frac{(T_A - T_U) \left\{ 1.39 + \frac{122}{\text{CO}_2 + \text{CO}} + 0.02 u \right\}}{185 - 0.25 u} - \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \frac{11'800}{185 - 0.25 u} \quad [\%]$$

$$\text{resp. mit } 185 = \frac{18'500}{100} = \frac{h_{u \text{ atro}}}{100}$$

$$\eta_f = 100 - \frac{(T_A - T_U) \left\{ 1.39 + \frac{122}{\text{CO}_2 + \text{CO}} + 0.02 u \right\}}{\frac{h_{u \text{ atro}}}{100} - 0.25 u} - \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \frac{11'800}{\frac{h_{u \text{ atro}}}{100} - 0.25 u} \quad [\%] (\text{A26})$$



Die unabhängigen Grössen sind  $T_A$ ,  $T_U$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $u$  und  $h_{u\text{atro}}$ .

Die relative Messunsicherheit ist somit

$$\frac{\Delta\eta_f}{\eta_f} = \pm \sqrt{\left[\frac{\delta\eta_f \Delta T_A}{\delta T_A \eta_f}\right]^2 + \left[\frac{\delta\eta_f \Delta T_U}{\delta T_U \eta_f}\right]^2 + \left[\frac{\delta\eta_f \Delta CO_2}{\delta CO_2 \eta_f}\right]^2 + \left[\frac{\delta\eta_f \Delta CO}{\delta CO \eta_f}\right]^2 + \left[\frac{\delta\eta_f \Delta u}{\delta u \eta_f}\right]^2 + \left[\frac{\delta\eta_f \Delta h_{u\text{atro}}}{\delta h_{u\text{atro}} \eta_f}\right]^2} \quad (\text{A27})$$

Die partiellen Ableitungen aus A27 sind:

$$\frac{\delta\eta_f}{\delta T_A} = - \frac{1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 u}{\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u} \quad (\text{A28})$$

$$\frac{\delta\eta_f}{\delta T_U} = + \frac{1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 u}{\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u} \quad (\text{A29})$$

$$\frac{\delta\eta_f}{\delta CO_2} = \frac{(T_A - T_U) \frac{122}{CO_2 + CO} + 11800 \frac{CO}{CO_2 + CO}}{\left[\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u\right] (CO_2 + CO)^2} \quad (\text{A30})$$

$$\frac{\delta\eta_f}{\delta CO} = \frac{(T_A - T_U) \frac{122}{CO_2 + CO} + 11800 \frac{CO_2}{CO_2 + CO}}{\left[\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u\right] (CO_2 + CO)^2} \quad (\text{A31})$$

$$\frac{\delta\eta_f}{\delta u} = \frac{-(T_A - T_U) \left\{ 0.02 \frac{h_{u\text{atro}}}{100} + 0.25 \left( 1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} \right) \right\} - 0.25 \frac{CO}{CO_2 + CO} 11800}{\left[\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u\right]^2} \quad (\text{A32})$$

$$\frac{\delta\eta_f}{\delta h_{u\text{atro}}} = \frac{(T_A - T_U) \left\{ 1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 u \right\} + \frac{CO}{CO_2 + CO} 11800}{100 \left[\frac{h_{u\text{atro}}}{100} - 0.25 u\right]^2} \quad (\text{A33})$$

Zur Bestimmung der mittleren Messungenauigkeit während einer bestimmten Messperiode werden die arithmetisch gemittelten Messwerte in die Gleichungen A28 bis A33 eingesetzt. Anschliessend wird mit Hilfe der Gleichung A27 der Mittelwert der Messungenauigkeit berechnet:

$$\overline{\Delta\eta_f} = \text{Funktion}(\overline{T_A}, \overline{T_U}, \overline{CO_2}, \overline{CO}, u, h_{u\text{atro}}) \quad (\text{A34})$$

In den zwei folgenden Beispielen werden für die Messgenauigkeit folgende Annahmen getroffen:

$\Delta T_A$	=	$\pm 10$	°C	
$\Delta T_U$	=	$\pm 2.5$	°C	
$\Delta CO_2$	=	$\pm 0.4$	Vol.-%	(Genauigkeit: 2 % von 20 Vol.-%)
$\Delta CO$	=	$\pm 0.004$	Vol.-%	(Genauigkeit: 2 % von 0.2 Vol.-%)
$\Delta CO$	=	$\pm 0.08$	Vol.-%	(Genauigkeit: 2 % von 4 Vol.-%)
$\Delta u$	=	$\pm 5$	%atro	
$\Delta h_{u\text{atro}}$	=	$\pm 1000$	kJ kg <sup>-1</sup>	

### Stationärer Abbrand

Der zeitliche Verlauf der aus den einzelnen Messgrössen resultierenden Messunsicherheit ist in den Bildern 10 - 15 dargestellt, Bild 9 zeigt ergänzend den Abbrandverlauf anhand des Kohlendioxid- und des Kohlenmonoxidgehalts .

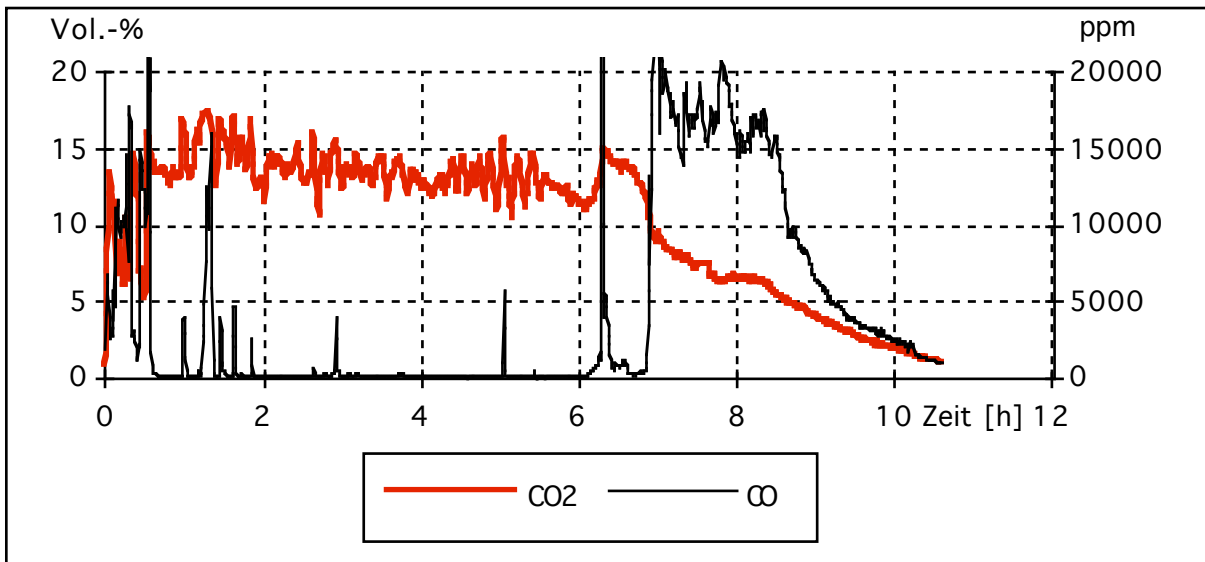


Bild 9: Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidgehalt [Vol.-%, resp. ppm] in Funktion der Zeit [h]

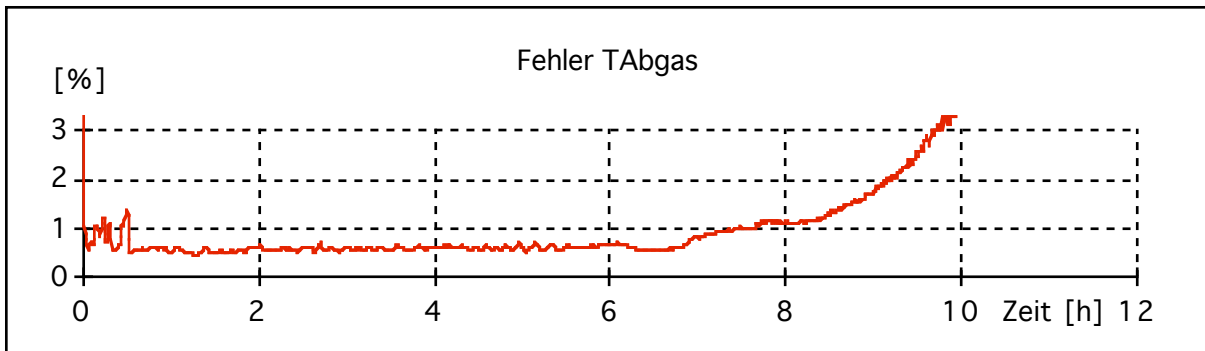


Bild 10 Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich Abgastemperatur in Funktion der Zeit

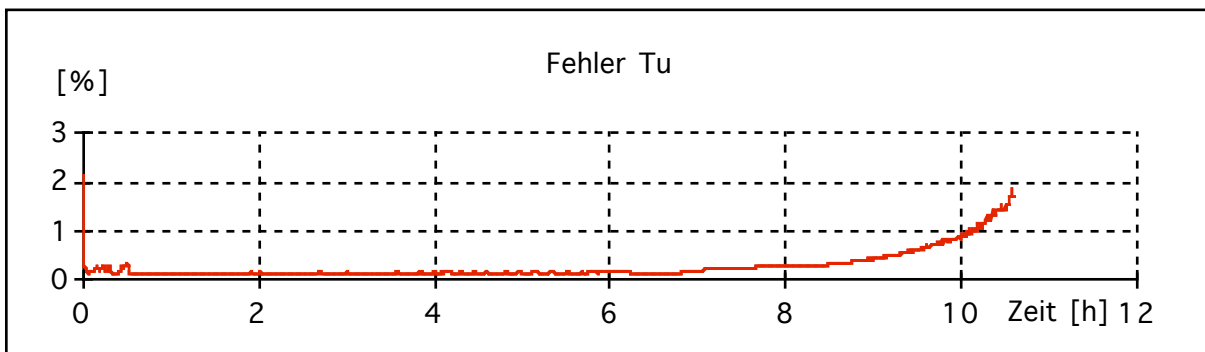


Bild 11: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich Umgebungstemperatur in Funktion der Zeit

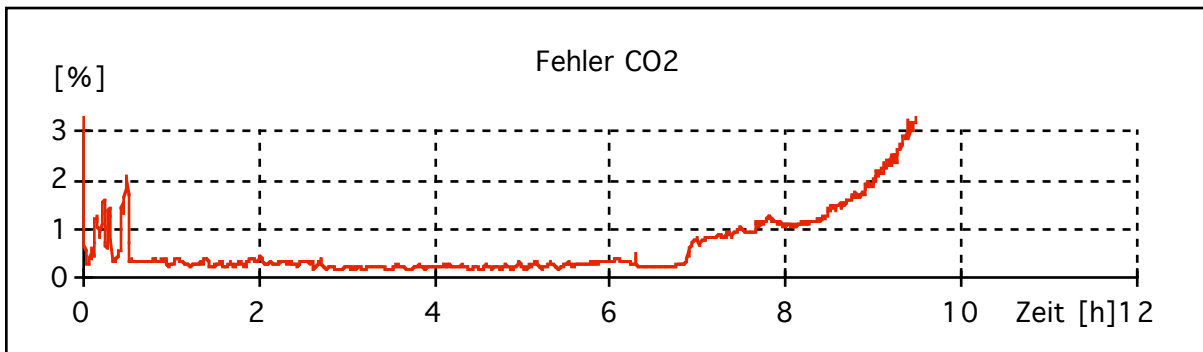


Bild 12: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich  $\text{CO}_2$  in Funktion der Zeit

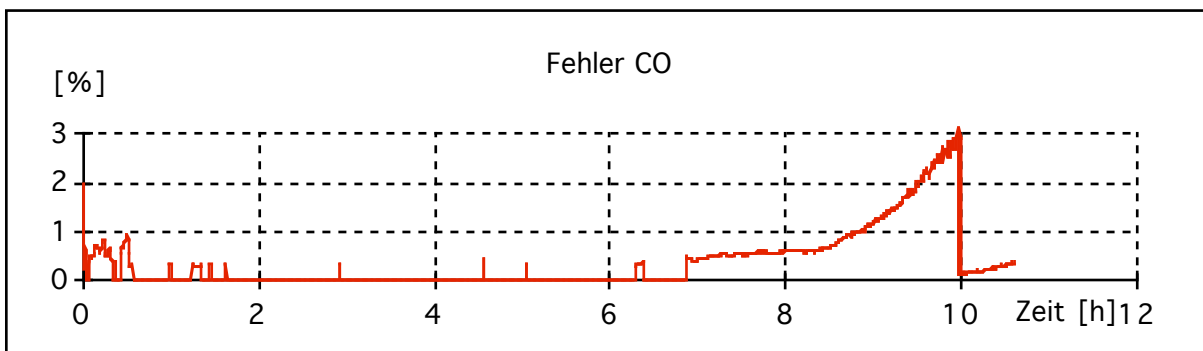


Bild 13: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich CO in Funktion der Zeit

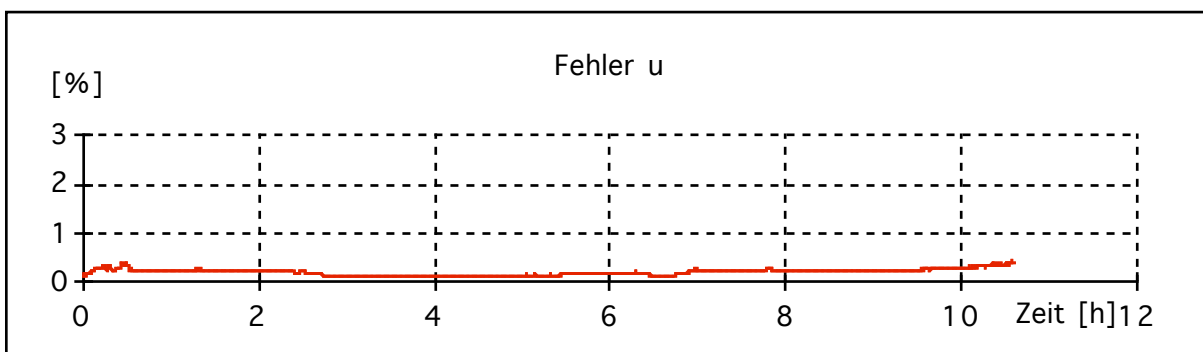


Bild 14: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich Holzfeuchtigkeit  $u$  in Funktion der Zeit

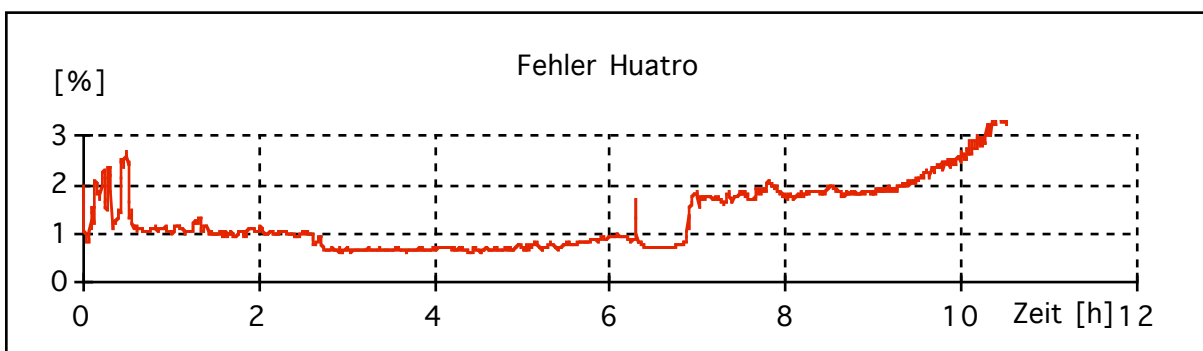


Bild 15: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich  $h_{u\text{atro}}$  in Funktion der Zeit

Die obigen Verläufe zeigen, wie die einzelnen Messgrößen in den verschiedenen Abbrandphasen die Messunsicherheit beeinflussen. Es zeigt sich, dass entsprechend den getroffenen Annahmen bezüglich Messgenauigkeit in der stationären Abbrandphase die Messungenauigkeit des Heizwertes und der Abgastemperatur ( $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  ist allerdings eine sehr pessimistische Annahme) am stärksten in die Messunsicherheit einfließen. In der Ausbrandphase steigt die Messunsicherheit bei allen Messgrößen deutlich an.

Bild 16 zeigt den feuerungstechnischen Wirkungsgrad und die gemäss des Fehlerfortpflanzungsgesetzes Gl. A20 aus allen Größen resultierende momentane Messunsicherheit in Funktion der Zeit.

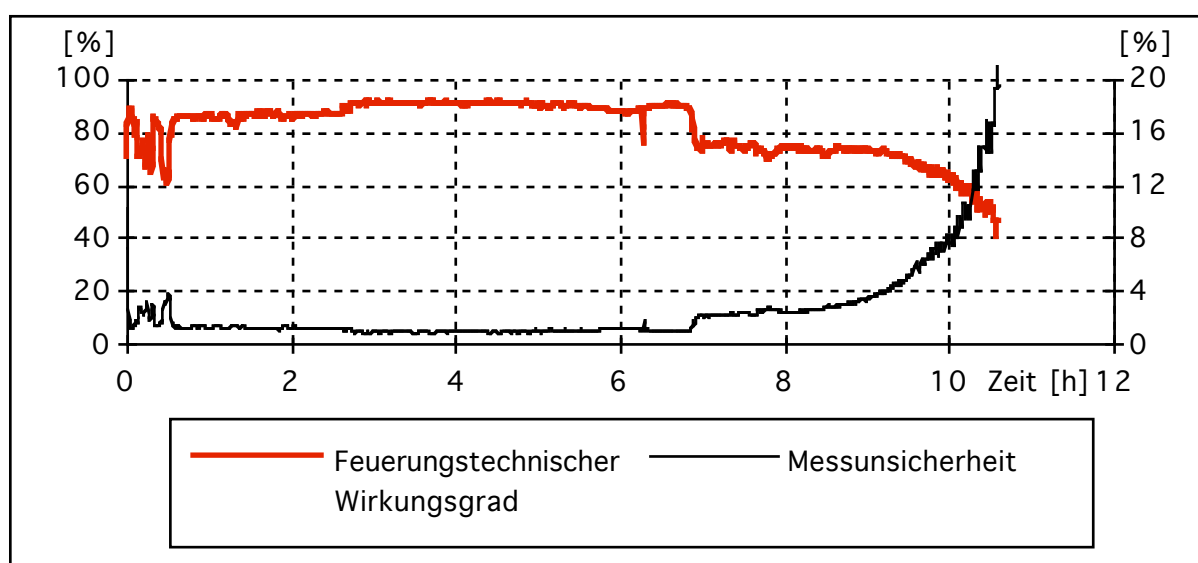


Bild 16: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad und absolute Messunsicherheit in Funktion der Zeit

## Intermittierender Abbrand

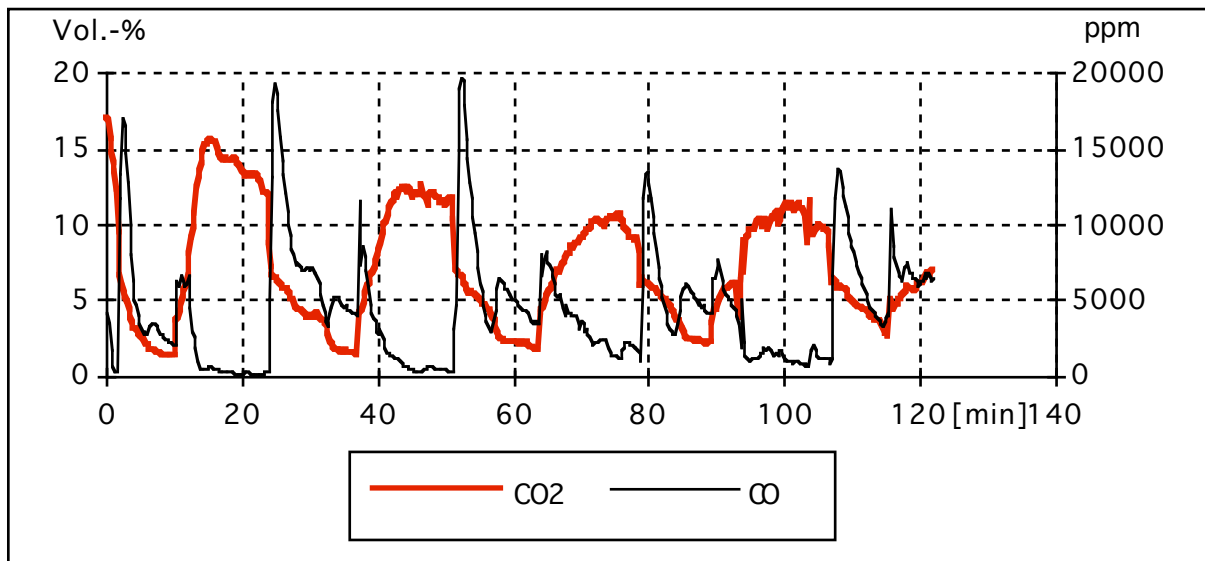


Bild 17: Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidgehalt [Vol.-%, resp. ppm] in Funktion der Zeit [min]

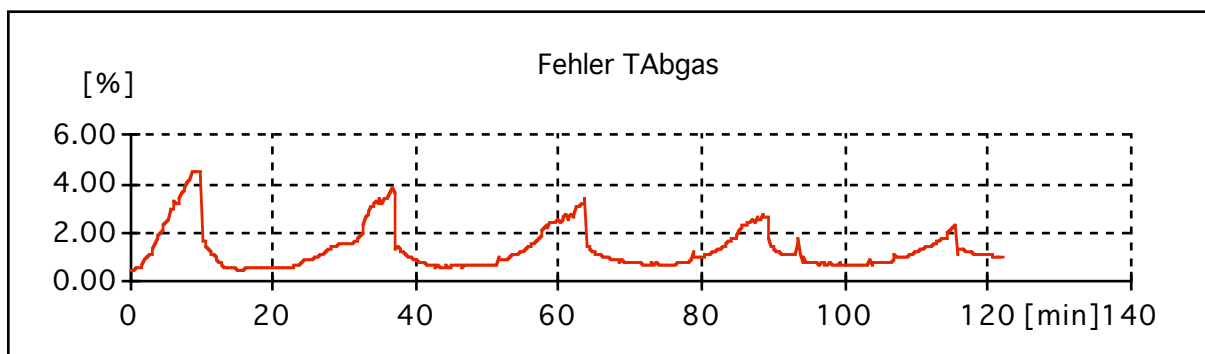


Bild 18: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich Abgastemperatur in Funktion der Zeit

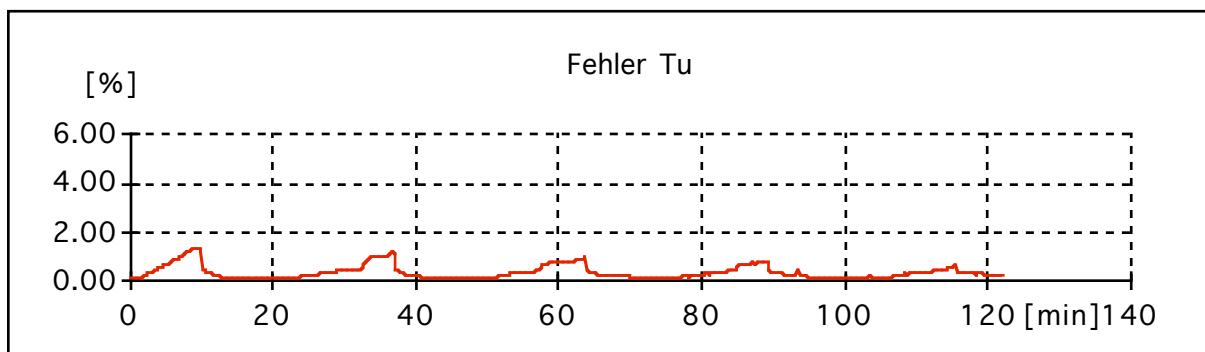


Bild 19: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich Umgebungstemperatur in Funktion der Zeit

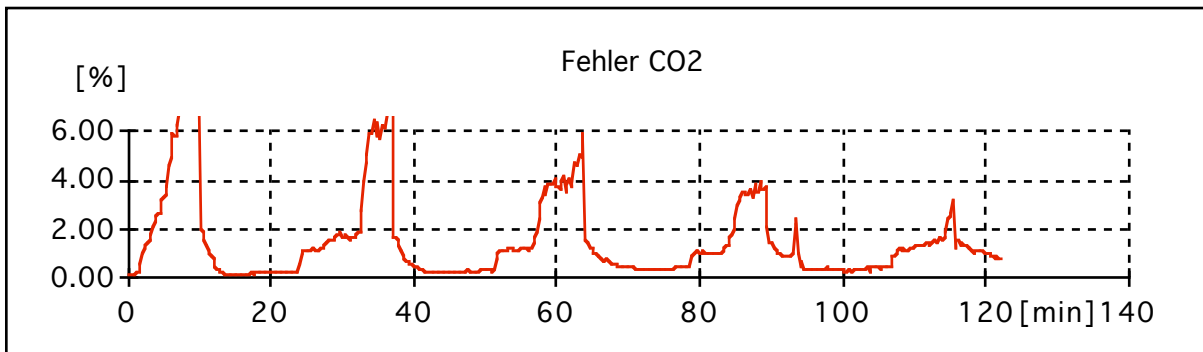


Bild 20: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich CO<sub>2</sub> in Funktion der Zeit

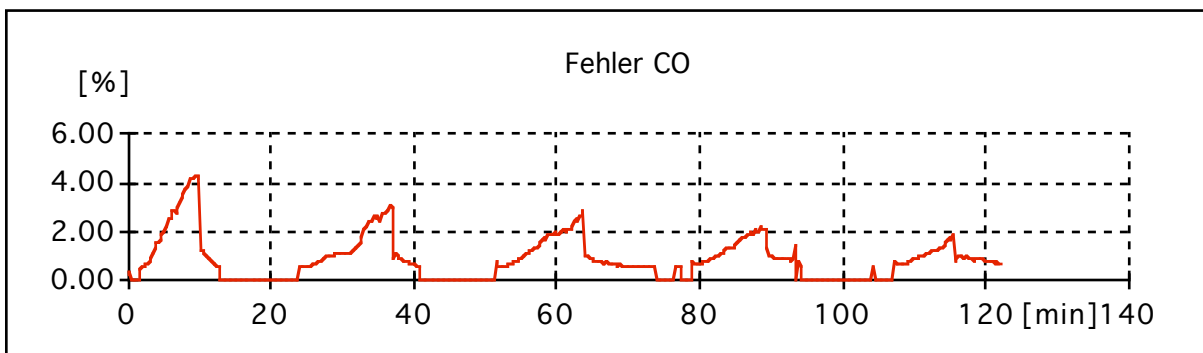


Bild 21: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich CO in Funktion der Zeit

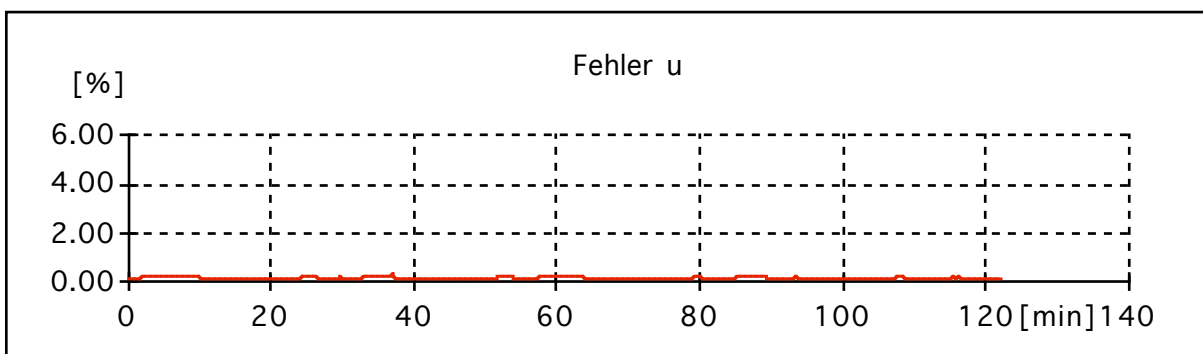


Bild 22: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich Holzfeuchtigkeit u in Funktion der Zeit

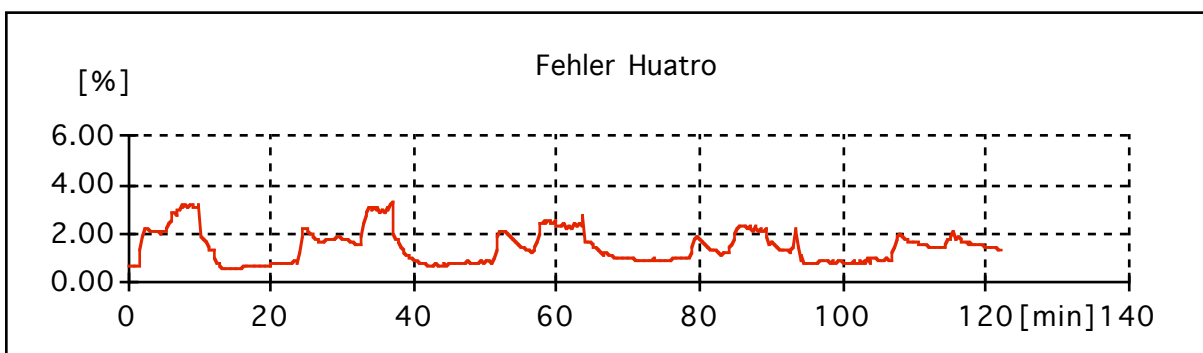


Bild 23: Absolute Messunsicherheit des Wirkungsgrads bezüglich h<sub>u,atro</sub> in Funktion der Zeit

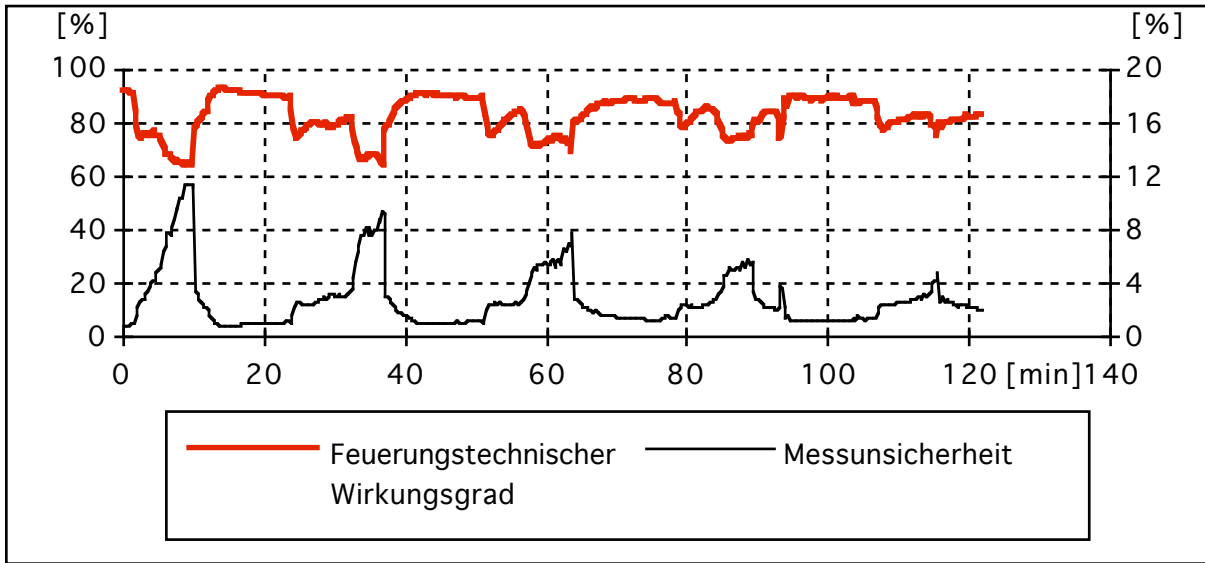


Bild 24: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad und absolute Messunsicherheit in Funktion der Zeit



## 10. Symbolverzeichnis

### Griechisches Alphabet

$\beta$	Molverhältnis von CO zu C im Brennstoff	[-]
$\Delta$	Differenz	
$\eta_k$	Kesselwirkungsgrad	[%]
$\eta_f$	feuerungstechnischer Wirkungsgrad	[%]
$\lambda$	Luftüberschusszahl Lambda	[-]
$\nu$	stöchiometrischer Faktor	[-]
$\rho$	Dichte	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	Siegert'scher Koeffizient	[°C <sup>-1</sup> ]

### Lateinisches Alphabet

a, b, c, d	Polynomkoeffizienten	[-]
A	Brennstoffkonstante	[-]
C <sub>p</sub>	spezifische Wärmekapazität	[kJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
c <sub>p</sub>	spezifische Wärmekapazität	[kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\Delta h$	Reaktionsenthalpie	[kJ kg <sup>-1</sup> ]
$\Delta h_v$	Verdampfungsenthalpie von Wasser	[kJ kg <sup>-1</sup> ]
$\Delta p$	Differenzdruck	[mmWs]
h <sub>CO</sub>	Heizwert von Kohlenmonoxid	[kJ kg <sup>-1</sup> ] resp. [kJ m <sub>n</sub> <sup>-3</sup> ]
h <sub>u</sub>	Heizwert (unterer Heizwert) des Brennstoffs	[kJ kg <sup>-1</sup> ]
h <sub>u atro</sub>	Heizwert pro kg absolut trockenes Holz	[kJ kg <sup>-1</sup> ]
M	Molmasse	[kg kmol <sup>-1</sup> ]
M <sub>Br</sub>	Molmasse des feuchten Brennstoffs	[kg kmol <sup>-1</sup> ]
M <sub>Holz</sub>	Molmasse von Holz CH <sub>1.44</sub> O <sub>0.66</sub>	[kg kmol <sup>-1</sup> ]
M <sub>Wasser</sub>	Molmasse von Wasser	[kg kmol <sup>-1</sup> ]
$\dot{Q}_N$	Erzeugte Wärmeleistung	[kW]
$\dot{Q}_B$	Zugeführte Wärmeleistung	[kW]
T	Temperatur	[K], [°C]
T <sub>A</sub>	Abgastemperatur	[°C]
T <sub>U</sub>	Umgebungstemperatur	[°C]
u	Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz	[%]
V <sub>A tr</sub>	trockene Abgasvolumen pro kg Brennstoff	[m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]

$V_{\text{chem}}$	Chemische Abgasverluste	[%]
$V_{\text{therm}}$	Thermische Abgasverluste	[%]
$V_{\text{F}}$	Verluste durch Brennbares im Feuerungsrückstand	[%]
$V_{\text{Str}}$	Verluste durch Strahlung, Konvektion, Leitung	[%]
$\Delta V_{\text{Kond}}$	Wärmegewinn durch Abgaskondensation	[%]
$\dot{V}_{\text{A}}$	Volumenstrom der Abgase	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$V_{\text{N}}$	Normvolumen	[m <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> ]
$V_{\text{L}}$	Verbrennungsluftmenge	[m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
$\dot{V}_{\text{L}}$	Volumenstrom der Verbrennungsluft	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$w$	Wassergehalt bezogen auf feuchtes Holz	[-]

### *Indices*

arith	arithmetisch gemittelt
atro	bezogen auf absolut trockenes Holz
f	feucht
gem	gemittelt
gew	mit Volumenstrom gewichtet
m	stöchiometrischer Anteil H im Brennstoff
n	stöchiometrischer Anteil O im Brennstoff
n	bei Normbedingungen 0°C, 1013 mbar
tr	trocken

### *Notation für verwendete Konzentrationseinheiten*

$i$	Volumenkonzentration von $i$	[Vol.-%]
( $i$ )	Anzahl Mole von $i$	[-]
[ $i$ ]	Volumenkonzentration von $i$	[-]

### *Komponenten für $i$*

C	Kohlenstoffatom
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
H <sub>2</sub> O	Wasser

N <sub>2</sub>	Stickstoff (molekular)
O <sub>2</sub>	Sauerstoff (molekular)

### *Symbole nach DIN*

$c_{p,m,A}$	mittlere spezifische Wärmekapazität der Abgase im Temperaturbereich $t_L$ bis $t_A$	[ Ws m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
$c_{p,m,Atr}$	mittlere spezifische Wärmekapazität der trockenen Abgase im Temperaturbereich $t_L$ bis $t_A$	[ Ws m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
$c_{p,m,H_2O}$	mittlere spezifische Wärmekapazität des Wasserdampfs im Temperaturbereich $t_L$ bis $t_A$	[ Ws m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
$H_u$	Heizwert des Brennstoffes	[ Ws kg <sup>-1</sup> ]
$L_{min}$	Luftbedarf	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
$t_L$	Temperatur der Umgebungsluft	[ °C ]
$t_A$	Temperatur der Abgase	[ °C ]
$V_A$	Abgasmenge	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
$V_{Atr}$	trockene Abgasmenge	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
$V_{Atr min}$	trockene Abgasmenge bei stöchiometrischer Verbrennung	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
$V_W$	Wasserdampfmenge	[ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
CO	Kohlenmonoxidgehalt der Abgase	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
12'640'000	Heizwert von CO	[ Ws m <sup>-3</sup> ]
CO <sub>2 max</sub>	maximaler Kohlendioxid-Anteil	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
SO <sub>2 max</sub>	maximaler Schwefeldioxid-Anteil	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
(CO <sub>2</sub> + SO <sub>2</sub> ) <sub>gem</sub>	gemessener (CO <sub>2</sub> + SO <sub>2</sub> )-Anteil der Abgase	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
CO <sub>2 gem</sub>	gemessener CO <sub>2</sub> -Anteil der Abgase	[ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]

### *Symbole nach EMPA*

a	Brennstoffkonstante	
$t_L$	Temperatur der Umgebungsluft	[ °C ]
$t_A$	Temperatur der Abgase	[ °C ]
$\sigma$	Siebert'scher Faktor	[ °C <sup>-1</sup> ]
u	Holzfeuchtigkeit	[ kg kg <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]
CO <sub>2 % v<sub>tr</sub></sub>	Kohlendioxidgehalt des trockenen Abgases	[ Vol.-% ]
CO % v <sub>tr</sub>	Kohlenmonoxidgehalt des trockenen Abgases	[ Vol.-% ]

### *Symbole nach BLT*

$C O$	Kohlenmonoxidkonzentration	[ kmol kmol <sup>-1</sup> ]
$[\bar{C}_p]_0^{t_L}$	Mittlere spez. Molwärme von Luft zwischen 0 °C und $t_L$	[ kJ kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$[\bar{C}_p]_0^{t_{RG}}$	Mittlere spez. Molwärme des Gasgemisches zwischen 0 °C und $t_{RG}$	[ kJ kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$h_{CO}$	Heizwert von Kohlenmonoxid	[ kJ kmol <sup>-1</sup> ]
$h_{RG}$	Enthalpie des Abgases	[ kJ kg <sup>-1</sup> ]
$h_L$	Enthalpie der Verbrennungsluft	[ kJ kg <sup>-1</sup> ]
$H_{u_f}$	Heizwert des feuchten Brennstoffs	[ MJ kg <sup>-1</sup> ]
$L_s$	zugeführte Luftmenge	[ kmol kg <sup>-1</sup> ]
$R_{G_{T_s}}$	trockene Abgasmenge	[ kmol kg <sup>-1</sup> ]
$t_L$	Lufttemperatur	[ °C ]
$t_{RG}$	Abgastemperatur	[ °C ]
$w$	Wassergehalt	[ kg kg <sup>-1</sup> ]

### *Symbole nach Ökozentrum*

$t_A$	Temperatur der Abgase	[ °C ]
$t_L$	Temperatur der Umgebungsluft	[ °C ]
$H_u$	Heizwert des Brennstoffs	[ kJ kg <sup>-1</sup> ]
$u$	Holzfeuchtigkeit	[ kg kg <sub>atro</sub> <sup>-1</sup> ]
$C O_2$	Kohlendioxidgehalt des trockenen Abgases	[ Vol.-% ]
$C O$	Kohlenmonoxidgehalt des trockenen Abgases	[ Vol.-% ]
$\lambda$	Luftüberschusszahl	[ - ]
$x$	Wassergehalt	[ kg kg <sup>-1</sup> ]

## 11. Literaturverzeichnis

*Baehr, H. D.:* Thermodynamik, sechste Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1988

*Baehr, H. D.; Diedrichsen, Chr.:* Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie der Komponenten von Luft und Verbrennungsgasen, Brennstoff Wärme Kraft Bd. 40, Nr. 12, 1988

*Bossel, U.; Gunold, B.:* Wärme aus Holz, Holzheizung in Theorie und Praxis, Verlag C. F. Müller, Karlsruhe, 1982

*Brenn, J.:* mündliche Mitteilung, EMPA Dübendorf, 16. 9. 1992

*Bühler, R.:* Ringversuche zur Typenprüfung von Holzheizkesseln, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 1992

Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 14. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1981

Energiehandbuch für die Holzverarbeitenden Betriebe, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1988

*Gaegauf, Ch.; Salerno, B.:* Das Abbrandverhalten von Klein-Holzfeuerungen, Oekozentrum Langenbruck, Langenbruck 1991 / ENET, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1991

*Gaegauf, Ch.; Salerno, B.:* Method to analyse the instationary wood combustion process. In: Bridgwater, A.V. (Ed.): Advances in Thermochemical Biomass Conversion (in press, manuscript received may 1992)

JANAF Thermochemical Tables, 3rd ed. J. Phys. Chem. Ref. Data 14 (1985) Suppl. No. 1

*Kerschbaumer, D.; Nussbaumer, Th.:* Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten, Ergänzungen, Heizung Klima 11, 1989, 107-109

*Nussbaumer, Th.; Kerschbaumer, D.:* Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmessdaten, Heizung Klima 11, 1987, 100-105

*Nussbaumer, Th.:* Emissionen von Holzfeuerungen, Schlussbericht NFP 12-Projekt Nr. 4.971.0.86.12, Institut für Energietechnik, ETH Zürich 1988

*Nussbaumer, Th.; Wagner, D.:* Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen, Jahresbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1991

*Nussbaumer, Th.; Wagner, D.:* A new method to measure the integrated amount of pollutants from non stationary wood combustion processes. In: Brigwater, A.V. (Ed.): Advances in Thermochemical Biomass Conversion (in press, manuscript received may 1992)

*Nussbaumer, Th.; Wagner, D.:* Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen, Schlussbericht, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1993 (in Vorbereitung)

*Schmidt, E.:* Technische Thermodynamik, Grundlagen und Anwendungen, Band 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1975

DIN 1942, Abnahmeversuche an Dampferzeugern, Beuth Verlag GMBH Berlin Köln, Entwurf Juni 1991

VDI 2048, Messungenauigkeiten bei Abnahmeversuchen, VDI-Richtlinien, Beuth Verlag GMBH Berlin Köln, Juni 1978

VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 3. Auflage, Düsseldorf VDI-Verlag, 1977