

Feuerungstechnische Kenndaten bei der Verbrennung von Biomasse

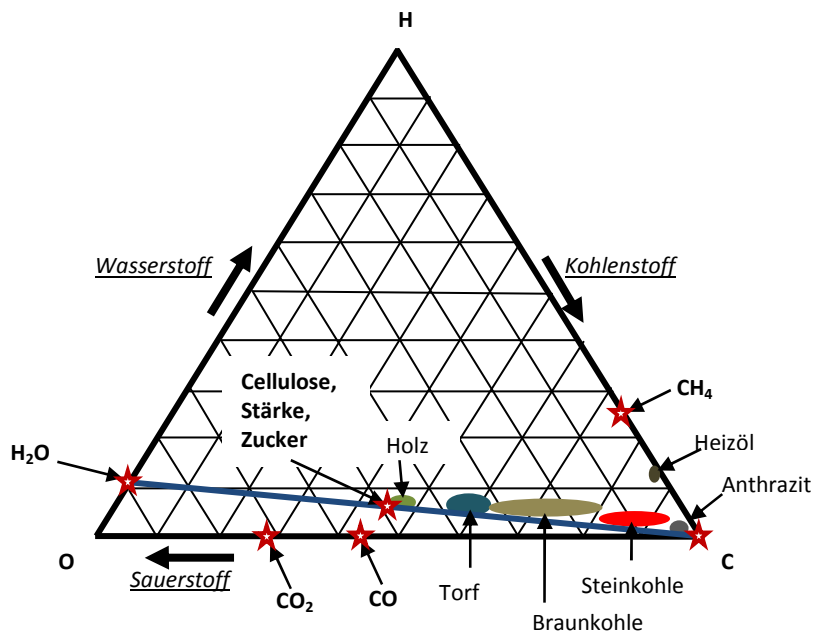
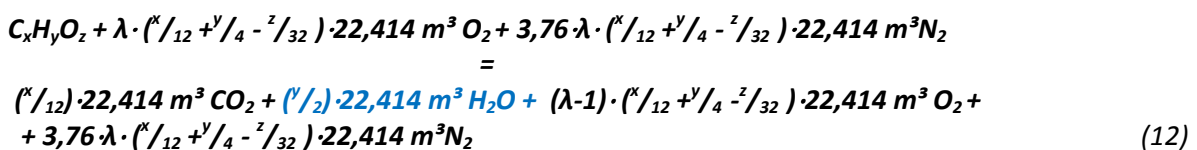


Bild 50: C-H-O-Dreiecksdiagramm einiger Brennstoffe [$\sum(C,H,O) = 100$ Gewichtsprozent]

Bild 50 zeigt die C-H-O-Analyse einiger Brennstoffe in einem Dreiecksdiagramm. Bei einer eindeutigen Elementarzusammensetzung erscheint die C-H-O-Verbindung im Dreiecksdiagramm als Punkt (z.B. **H₂O**, **CO₂**, **CO**, **Kohlenstoff**, **CH₄**, **Cellulose**, **Stärke**, **Zucker**, im Diagrammtext **fett** gedruckt, mit einem roten Stern gezeichnet ★). Brennstoffe, die auf der blauen Linie zwischen **C** und **H₂O** liegen, ergeben bei der stöchiometrischen Verbrennung die maximale CO₂-Konzentration von $CO_{2,max} = 21\%$; Brennstoffe oberhalb dieser Linie führen zu $CO_{2,max} < 21\%$, unterhalb zu $CO_{2,max} > 21\%$.

In Kenntnis des C-H-O-Gehaltes vom Brennstoff und der Luftzahl kann bei einer angenommenen Luft-Zusammensetzung von 21 % O₂ und 79 % N₂ die Reaktionsgleichung der **vollständigen Verbrennung** durch Gleichung (12) beschrieben werden als:



mit λ als die Luftzahl der Verbrennung, x , y und z als der Gewichtsanteil der Elemente C, H und O. Das Luftvolumen der stöchiometrischen Verbrennung von 1 kg Brennstoff wird als L_{min} , das zugehörige wasserfreie Abgasvolumen als $A_{tr,min}$ bezeichnet. Die CO₂-Konzentration im trockenen Abgas der stöchiometrischen Verbrennung wird $CO_{2,max}$ genannt. Die Größen L_{min} , $A_{tr,min}$ und $CO_{2,max}$ sind brennstoffspezifische Kennzahlen. Der Wasserdampfgehalt des (feuchten) Abgases ist in Gl. (12) mit **blauer Farbe** gekennzeichnet: in der Regel bezieht sich die Abgasanalyse auf die „trockene“ Zusammensetzung, bei der der Wasserdampfgehalt nicht mitgezählt wird.

Berechnung der Luftzahl

Die brennstoffspezifischen Kennzahlen können aus der Elementarzusammensetzung für die Luftzahl $\lambda = 1$ nach Gleichungen (12) berechnet werden. In Kenntnis dieser Kennzahlen und der trockenen

Abgaszusammensetzung der vollständigen Verbrennung kann wiederum die Luftzahl der vollkommenen Verbrennung berechnet werden. Die Gleichungen hierzu lauten:

$$\lambda = 1 + \frac{A_{tr.,min}}{L_{min}} \cdot \frac{CO_{2max} - CO_2}{CO_2} \quad (13)$$

und

$$\lambda = 1 + \frac{A_{tr.,min}}{L_{min}} \cdot \frac{O_2}{21 - O_2} \quad (14)$$

Gleichung (14) wird häufig in Rauchgascomputern angewandt. Da die Verbrennung bei Öl- und Gasfeuerungen annähernd vollständig verläuft, ist die Genauigkeit dieser Gleichung für die Brennstoffe Öl und Gas ausreichend.

Die Stückholzverbrennung in handbeschickten Kaminöfen mit Naturzug ist unvollständig, d.h. die Verbrennungsprodukte sind nicht nur CO₂ und H₂O, sondern das Abgas enthält viele unverbrannte Komponenten. Der wichtigste unverbrannte Abgasbestandteil ist das Kohlenmonoxid. Die Reaktionsgleichung der **unvollständigen Verbrennung** lautet, wenn nur ein unvollständiges Verbrennungsprodukt, das Kohlenmonoxid, durch die Gleichung berücksichtigt wird:

$$\begin{aligned} C_xH_yO_z + \lambda \cdot \left(\frac{x}{12} + \frac{y}{4} - \frac{z}{32}\right) \cdot 22,414 \text{ m}^3 O_2 + 3,76 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{x}{12} + \frac{y}{4} - \frac{z}{32}\right) \cdot 22,414 \text{ m}^3 N_2 \\ = \\ \varphi \cdot \left(\frac{x}{12}\right) \cdot 22,414 \text{ m}^3 CO_2 + (1-\varphi) \cdot \left(\frac{x}{12}\right) \cdot 22,414 \text{ m}^3 CO + \\ (1-\varphi) \cdot \left(\frac{x}{12}\right) \cdot 22,414 \text{ m}^3 O_2/2 + \left(\frac{y}{2}\right) \cdot 22,414 \text{ m}^3 H_2O + \\ (\lambda - 1) \cdot \left(\frac{x}{12} + \frac{y}{4} - \frac{z}{32}\right) \cdot 22,414 \text{ m}^3 O_2 + 3,76 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{x}{12} + \frac{y}{4} - \frac{z}{32}\right) \cdot 22,414 \text{ m}^3 N_2 \end{aligned} \quad (15)$$

x, y, z: Gewichtsanteil der Elemente C, H und O

$\lambda = L / L_{min}$

$\varphi = CO_2 / (CO_2 + CO)$, $0 \leq \varphi \leq 1$ vollkommene Verbrennung: $\varphi = 1$

Für $\lambda=1$ und $\varphi=1 \rightarrow CO_{2max}$, $(A_{tr.,min}/L_{min})$, $A_{tr.,min}$, L_{min}

Die stöchiometrische Globalreaktion der unvollkommenen Kohlenstoff-Verbrennung mit $\varphi = 0$ beschreibt die Kohlenmonoxidbildung, wobei der restliche Sauerstoffgehalt im „Abgas“ genau so hoch ist, dass es genau ausreicht, Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid zu oxidieren:



Die Luftzahl kann auch bei der unvollkommenen Verbrennung aus der trockenen Abgaszusammensetzung berechnet werden. Die Gleichungen hierzu sind:

$$\lambda = 1 + \left(\frac{CO_{2max}}{CO_2 + CO} - 1 \right) \cdot \frac{A_{tr.,min}}{L_{min}} \quad (17)$$

und

$$\lambda = 1 + \frac{A_{tr.,min}}{L_{min}} \cdot \frac{O_2 - \frac{CO}{2}}{21 - O_2 + \frac{CO}{2}} \quad (18)$$

Da die brennstoffspezifischen Kennzahlen $CO_{2,max}$, $A_{tr,min}$ und L_{min} für die vollkommene Verbrennung gelten, jedoch für die unvollkommene Verbrennung angewandt werden, sind die Gleichungen (17) und (18) lediglich Näherungsgleichungen.

$$\lambda = 1 + \frac{CO_{2,max} - \frac{100 \cdot (CO_2 + CO)}{100 - 0,5 \cdot CO}}{\frac{100 \cdot (CO_2 + CO)}{100 - 0,5 \cdot CO}} \cdot \frac{A_{tr,min}}{L_{min}} \quad (19)$$

Gleichung (19) wiederum berücksichtigt die Änderung des Abgasvolumens durch die Unvollkommenheit der Verbrennung und ist daher korrekt. Die Quelle für Gleichung (19) ist: Ernst-Rudolf Schramek: **Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik** 07/08, p. 224, Oldenbourg Verlag.

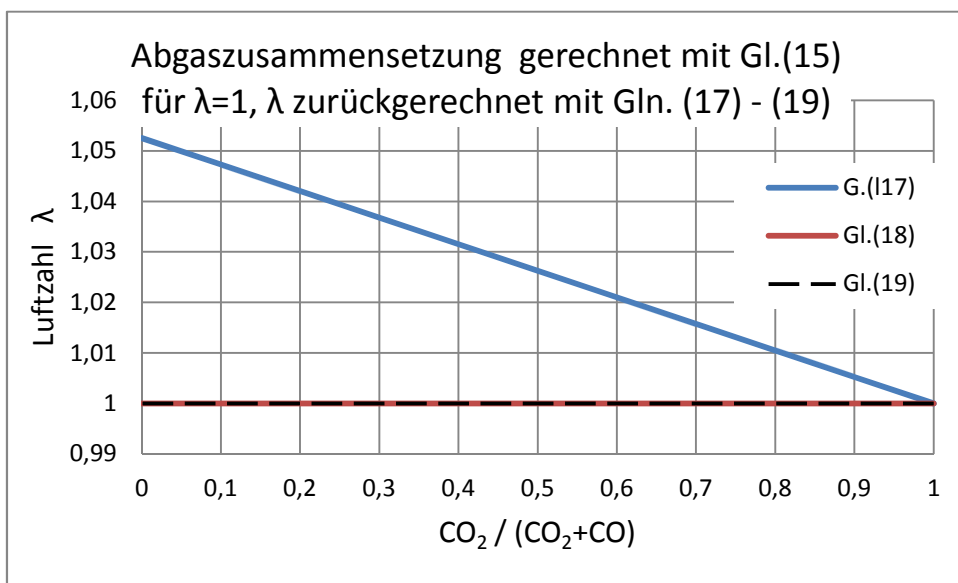


Bild 51: Kontrollrechnung für die Gleichungen (17) - (19) bei stöchiometrischer Verbrennung von CH_4

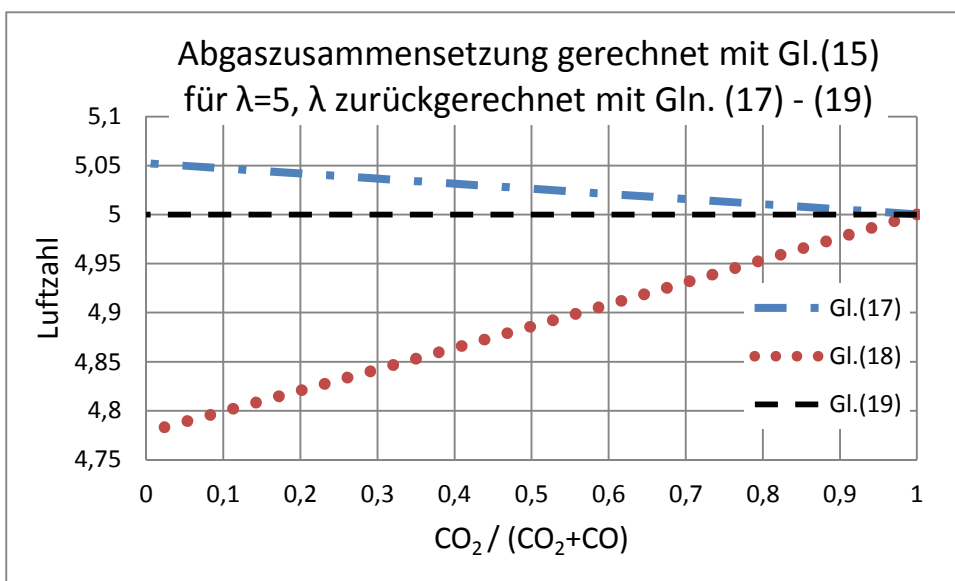


Bild 52: Kontrollrechnung für die Gleichungen (17) - (19) für Verbrennung von CH_4 bei $\lambda=5$

Gleichung (17) ist in DIN 4702 vorgeschlagen für die Berechnung der Luftzahl bei unvollkommener Verbrennung. Die Gleichung ist gut bei niedrigen CO-Konzentrationen, jedoch schwach bei nahstöchiometrischer Verbrennung für hohe CO-Konzentrationen. Bei $\lambda \approx 1$ ist eine genaue Kenntnis von CO_{2max} erforderlich.

Gleichung (18) sollte bei Rauchgascomputern die dort angewandte Gl. (14) ersetzen! Die Gleichung ist gut bei nahstöchiometrischer Verbrennung, jedoch schwach bei hoher Luftzahl für hohe CO-Konzentration.

Gleichung (19) ist immer korrekt, daher ideal bei Verbrennung von nachwachsenden Brennstoffen. Bei $\lambda \approx 1$ ist eine genaue Kenntnis von CO_{2max} erforderlich.

Nr.	Quelle	Brennstoff	C (%)	H (%)	O (%)	CO_{2max} (%)	$A_{tr.min} / L_{min}$
1	1	Ulme	50,19	6,43	43,38	20,1	0,988
2	1	Lärche	50,11	6,31	43,58	20,2	0,99
3	1	Tanne	49,95	6,41	43,64	20,1	0,989
4	1	Kiefer	49,94	6,25	43,81	20,3	0,991
5	1	Ahorn	49,80	6,31	43,89	20,2	0,99
6	1	Pappel	49,70	6,31	43,99	20,2	0,99
7	1	Fichte	49,59	6,38	44,03	20,2	0,989
8	1	Eiche	49,43	6,07	44,50	20,5	0,994
9	1	Linde	49,41	6,86	43,73	19,7	0,984
10	1	Esche	49,36	6,08	44,56	20,5	0,994
11	1	Knackweide	48,84	6,36	44,80	20,3	0,991
12	1	Birke	48,60	6,38	45,02	20,3	0,991
13	1	Buche	48,53	6,30	45,17	20,4	0,992
14	2	Hartholz	50,25	6,21	43,54	20,3	0,991
15	2	Weichholz	52,81	6,31	40,88	19,9	0,987
16	3	Eichenrinde	52,71	5,71	41,58	20,5	0,994
17	3	Kiefernrinde	55,06	5,82	39,12	20,2	0,99
18	4	Buche	51,98	6,3	41,72	20,0	0,988
19	4	Ahorn	51,46	6,12	42,42	20,2	0,99
20	4	Pappel	51,98	6,30	41,72	20,0	0,988
21	4	Eiche	49,48	5,38	43,15	21,01	1,0001
22	5	Nadelholz	49,18	6	44,82	20,6	0,995
23	5	Laubholz	50,09	6,31	43,6	20,18	0,99
24	6	Buche	-	-	-	20,9	0,999
	7	Kohlenstoff	100	0	0	21,0	1,0
	7	Cellulose $C_6H_{10}O_5$	44,44	6,47	49,38	21,0	1,0
	4	Lignin Weichholz	63,8	6,3	29,9	19,17	0,977
	4	Lignin Hartholz	60,19	6,44	33,9	19,32	0,979

Tabelle 4: C-H-O-Analyse [$\Sigma(C,H,O)=100$ Gewichtsprozent] verschiedener Hölzer und daraus mit Gl. (12) errechnete Brennstoffkennzahlen CO_{2max} und $A_{tr.min} / L_{min}$. Quellen der Elementaranalysen:

- 1 Meyers Konversations-Lexikon (1888)
- 2 Tillman D. et.al: Wood Combustion, Academic Press., Orlando, p. 43, (1981)
- 3 Anon: Bioresource Technology, 37, p. 161-168, Elsevier Publishers, (1991)
- 4 Thermal Data for Natural and Synthetic Fuels, S. Guar & T. Reed, Marcel Dekker (1998)
- 5 Anon: in G. Baumbach et. al: Wege zu einer sauberen Holzverbrennung, Uni Stuttgart, IVD (2004)
- 6 Zoltán Faragó: Eigene Messung
- 7 Theoretischer Wert

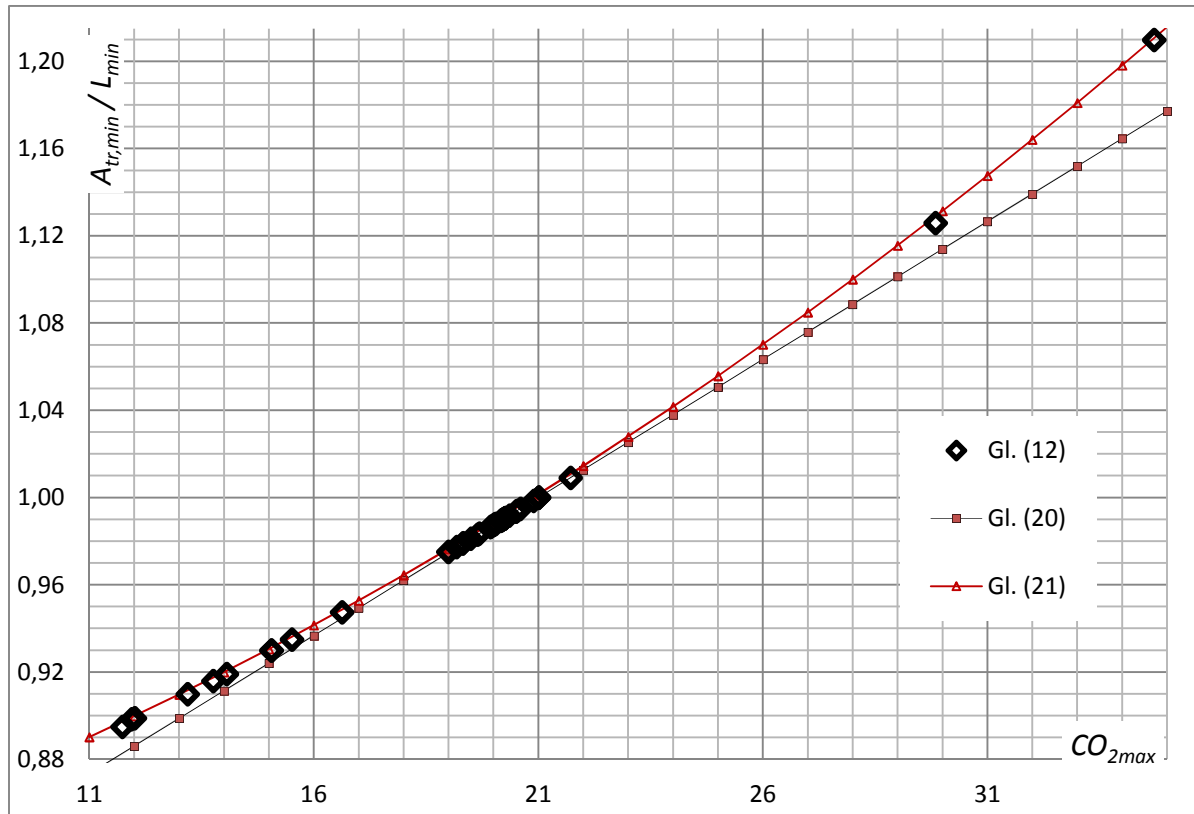


Bild 53: Abgas-Luft-Verhältnis ($A_{tr,min}/L_{min}$) als Funktion von CO_{2max}

In Bild 53 sind die Brennstoffe für die Rechnung mit Gl. (12) von links nach rechts: CH_4 , Erdgas H, Erdgas L, C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , CH_3OH , $C_{10}H_{20}$, Heizöl EL, C_2H_2 , Lignin Weichholz, Lignin Hartholz, 24 Holzsorten, je zwei Torf-, Braunkohle- und Steinkohlesorten, Anthrazit, reiner Kohlenstoff, Cellulose $C_6H_{10}O_5$, Aceton $(CH_3)_2CO$, Weinsäure $C_4H_2O_4$ und CO. Zum Vergleich werden die Rechnungen mit den Näherungsgleichungen (20) und (21) gezeigt.

$$\frac{A_{tr,min}}{L_{min}} \approx \frac{(100 - O_{2ref}) + (CO_{2max} - O_{2ref})}{(100 - O_{2ref})} \quad \text{mit } O_{2ref} = 21 \% \quad (20)$$

Eine für alle untersuchten Brennstoffe anwendbare Näherungsgleichung für die Berechnung von ($A_{tr,min}/L_{min}$) aus CO_{2max} lautet:

$$\frac{A_{tr,min}}{L_{min}} = 0,807 + 0,00556 \cdot CO_{2max} + 0,000174 \cdot CO_{2max}^2 \quad (21)$$

In Kenntnis der Gleichungen (20) oder (21) wird für die Berechnung der Luftzahl aus der Abgaszusammensetzung mit den Gleichungen (13), (17) oder (19) nur eine einzige brennstoffspezifische Kennzahl benötigt, nämlich

$$CO_{2max}$$

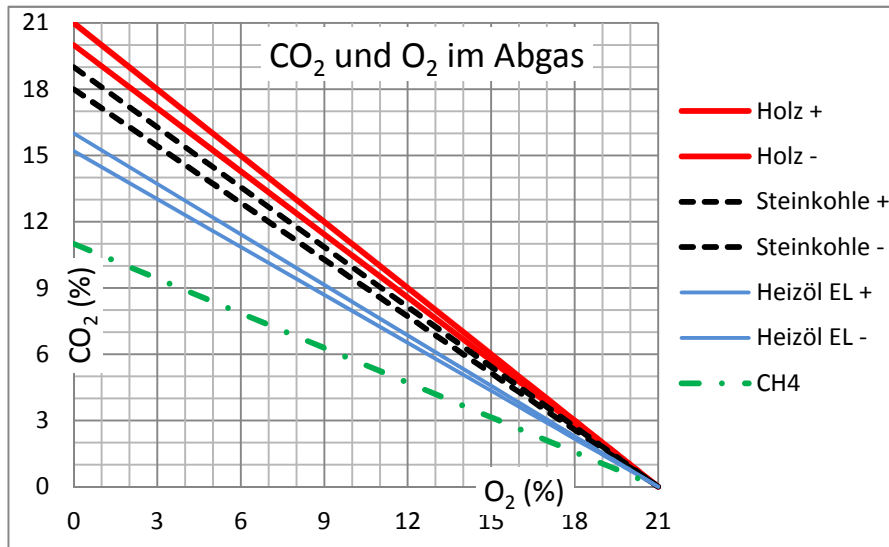


Bild 54: CO₂-Gehalt als Funktion des O₂-Gehaltes im Abgas einiger Brennstoffe (Bunte-Dreieck)

Der maximale CO₂-Gehalt wird in der Literatur für verschiedene Brennstoffe als brennstoffspezifische Kennzahl angegeben. CO_{2max} schwankt je nach Elementarzusammensetzung des Brennstoffes. In Bild 54 wird die Schwankungsbreite für Holz, Steinkohle und Heizöl EL mit „+“ und „-“ gekennzeichnet. Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass zur genauen Bestimmung der Luftzahl der Verbrennung genaue Kenntnis von CO_{2max} benötigt wird. Die Literaturangaben für CO_{2max} verschiedener Brennstoffe sind widersprüchlich (siehe Tabelle 4, Brennstoff Nr. 13/18, 5/19, 6/20, 8/21). Für Pferdemist als Brennstoff schwankt CO_{2max} im Bereich $18 < CO_{2max} < 24,5\%$ (Florian Lange, Dissertation, Uni Rostock, 2007, pp. 35-36)

Bei gleichzeitiger Messung von CO₂, CO und O₂ im Abgas kann der maximale CO₂-Gehalt des jeweiligen Brennstoffes experimentell ermittelt werden, wie dargestellt in Bild 55.

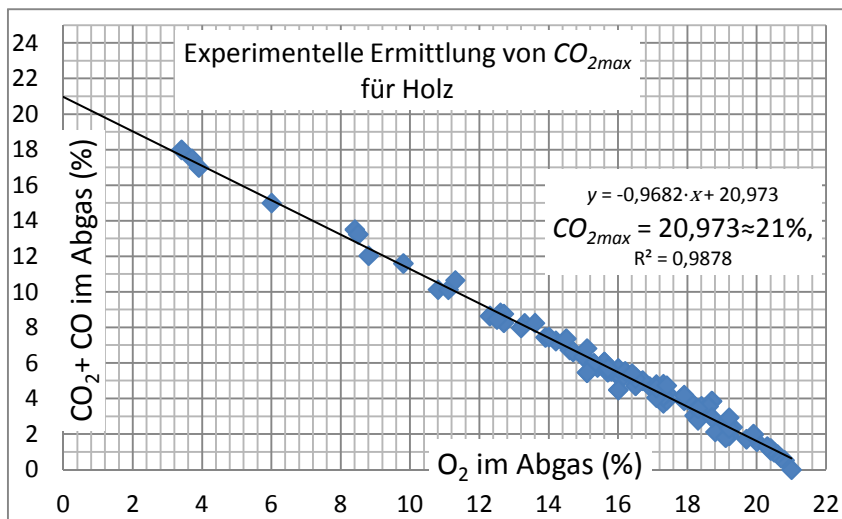


Bild 55: Experimentelle Ermittlung von CO_{2max} (Messung mit rbr-ecom-J2KN).

Für jede Messung in dieser Arbeit wurde CO_{2max} experimentell ermittelt. Die Luftzahlbestimmung erfolgte mit Gl. (19), wobei für den Wert $A_{tr.min} / L_{min}$ immer $A_{tr.min} / L_{min} = 1$ eingesetzt wurde (siehe Tabelle 4, rechte Spalte und Bild 53). Hierdurch vereinfacht sich Gl. (19) zu

$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{100 \cdot (CO_2 + CO)} \cdot \frac{100 - 0,5 \cdot CO}{1} \quad (22)$$

Wirkungsgradbestimmung

Da in der Glutphase der Feuerung der CO-Gehalt der Abgase im Prozentbereich liegen kann, muss sowohl die CO-Konzentration für die chemischen Verluste als auch die Wärmekapazität des Kohlenmonoxids für die thermischen Verluste berücksichtigt werden. Eine ausführliche Behandlung findet sich in

Jörgen Good, Thomas Nussbaumer: *Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen*
Publication Number: 195423;

Die Wirkungsgradbestimmung in dieser Arbeit basiert auf obiger Literaturangabe, Kapitel „**Vereinfachte Berechnungsmethode**“, pp. 37 ff. Dabei werden die Wärmekapazitäten der Abgaskomponenten N_2 , CO_2 , H_2O , O_2 und CO , bezogen auf die Abgastemperatur von $T_{Abgas} = 200\text{ °C}$, und die chemische Enthalpie der CO-Verbrennung berücksichtigt. Bei einer Holzfeuchte von $u = 18\%$ ergeben sich die Gleichungen

$$q_{th} = (T_A - T_L) \cdot \frac{1,41 + \frac{122}{CO_2 + CO}}{182,5} \quad (23)$$

und

$$q_{ch} = \frac{64,66 \cdot CO}{CO_2 + CO} \quad (24)$$

Dabei stehen

q_{th} und q_{ch} (%) für die thermischen und chemischen Verluste,
 T_A und T_L (°C) für Abgas- und Lufttemperatur,
 CO_2 und CO (%) für Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas;
die Zahlenwerte 1,41; 122; 182,5 und 64,66 ergeben sich aus den entsprechenden Stoffwerten.

Im Abgastemperaturbereich von $150\text{ °C} < T_A < 300\text{ °C}$ ist der Fehler der Gleichungen (23) und (24) kleiner als 0,3% im Vergleich zu exakten Berechnung der thermischen und chemischen Verluste.

Berechnung der Emissionsgrenzwerte der Schadstoffbildung

Die gemessene Schadstoffkonzentration ist von der Luftzahl abhängig: *erstens*, weil die Luftzahl die Verbrennung (und damit die Schadstoffbildung) beeinflusst, *zweitens*, weil die Luftzahl das Abgasvolumen beeinflusst, und somit eine höhere Luftzahl durch Verdünnungseffekt auch bei gleicher Schadstoffmenge zu einer niedrigeren Schadstoffkonzentration führt.

Daher wird die gemessene Schadstoffkonzentration zur Vergleichbarkeit auf eine einheitliche Luftzahl umgerechnet. In der Bundesrepublik Deutschland stellt die

„*erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1.BImSchV)*“

die Regeln der Umrechnung auf. Dabei werden Emissionsgrenzwerte für Staub- und Kohlenstoffmonoxid-Massenkonzentration festgeschrieben. Nach

„*Abschnitt 2 Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe § 4 Allgemeine Anforderungen*

(1) Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe; Punkt (2)

*beziehen sich die Emissionsbegrenzungen auf **Sauerstoff im Abgas von 13 %***“. Nach

„*Anlage 2 (zu § 5 Absatz 1, §§ 7, 8, 10, 14 Absatz 4, § 15 Absatz 5, § 25 Absatz 2*

Anforderungen an die Durchführung der Messungen im Betrieb

(2.2): Die Emissionen sind jeweils zeitgleich mit dem Sauerstoffgehalt im Abgas als

Viertelstundenmittelwert zu ermitteln.“

Ebenfalls nach

Anlage 2 (zu § 5 Absatz 1, §§ 7, 8, 10, 14 Absatz 4, § 15 Absatz 5, § 25 Absatz 2

Anforderungen an die Durchführung der Messungen im Betrieb 2.2 sind die gemessenen Emissionen nach der Beziehung

$$E_B = \frac{21 - O_{2B}}{21 - O_2} \cdot E_M \quad (25)$$

zu bestimmen. Es bedeuten:

E_B = Emissionen, bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt

E_M = gemessene Emissionen

O_{2B} = Bezugssauerstoffgehalt in Volumenprozent

O_2 = Volumengehalt an Sauerstoff im trockenen Abgas.

Nach Einsetzen von $O_{2B} = 13 \%$ in Gleichung (14) unter Annahme von $A_{tr,min} / L_{min} = 1$ entspricht der Emissionsgrenzwert für Staubkonzentration der Luftzahl von $\lambda = 2,625$. Eine eindeutige Zuordnung der Luftzahl ist bei CO-Belastung nicht möglich, da bei unvollkommener Verbrennung Gleichung (14) für die Luftzahlbestimmung nicht korrekt ist (Bild 56).

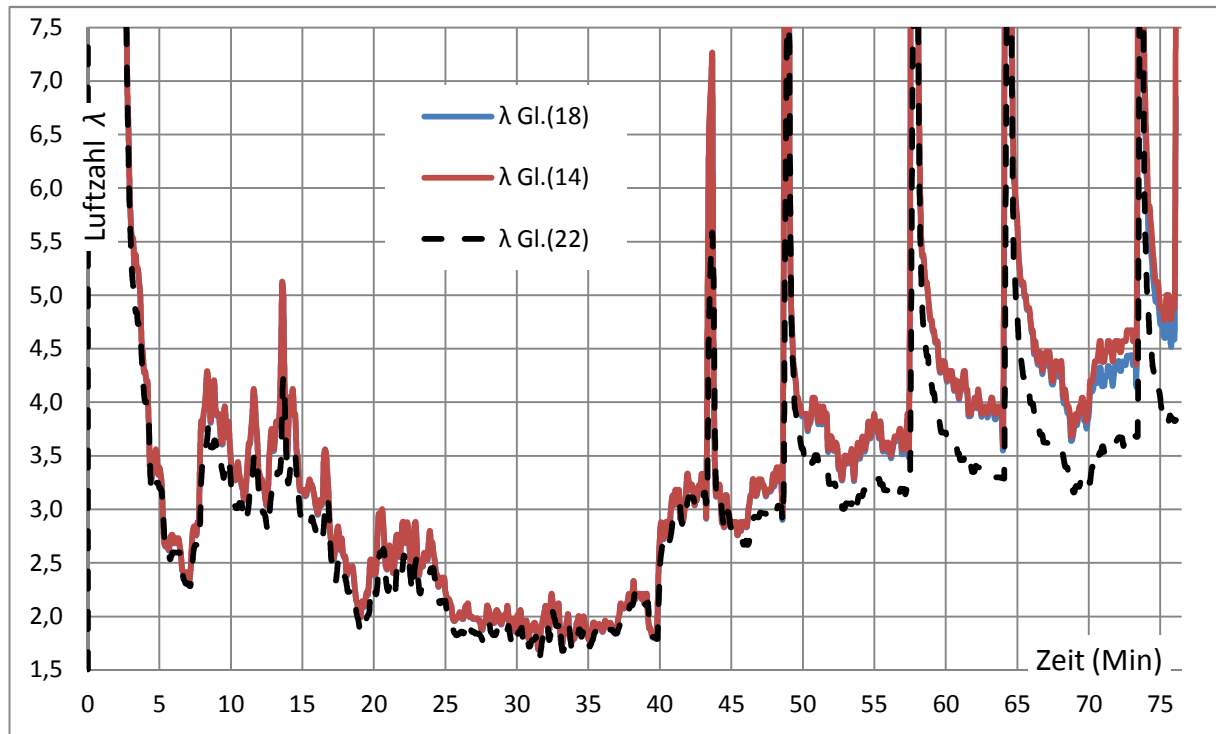


Bild 56: Berechnung der Luftzahl aus der Abgaszusammensetzung; Verbrennung von 5 kg Holz mit oberem Abbrand, siehe auch Bild 57

Bild 56 zeigt die aus der Abgaszusammensetzung ermittelte Luftzahl für einen Brennvorgang im Feuerungsmodus oberer Abbrand bei der Verbrennung von 5 kg Stückholz in einem Kaminofen. Die Schwierigkeiten der Luftzahlbestimmung bei unvollkommener Verbrennung mögen der Grund sein, dass die erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1.BImSchV) nicht die Luftzahl, sondern den Sauerstoffgehalt im Abgas für die einheitliche Emissionsberechnung vorschreibt.

Eine Widersprüchlichkeit bei der Berechnung von E_B besteht trotzdem, wenn die gemessene Emission E_M ein unverbranntes Verbrennungsprodukt ist, welches zur vollständigen Verbrennung Sauerstoff verbraucht, wie dies beim CO der Fall ist. Um bei sauerstoffverbrauchenden und nicht-sauerstoffverbrauchenden Emissionen eine einheitliche Umrechnung von E_M auf E_B zu gewähren, wird in Gleichung (26) eine korrigierte Formel vorgeschlagen:

$$E_B = \frac{21 - O_{2B} - O_{2M}}{21 - O_2 + O_{2M}} \cdot E_M \quad (26)$$

mit

O_{2M} = der Sauerstoffverbrauch in Volumenprozent, der zur stöchiometrischen Verbrennung der gemessenen Emission E_M benötigt wird.

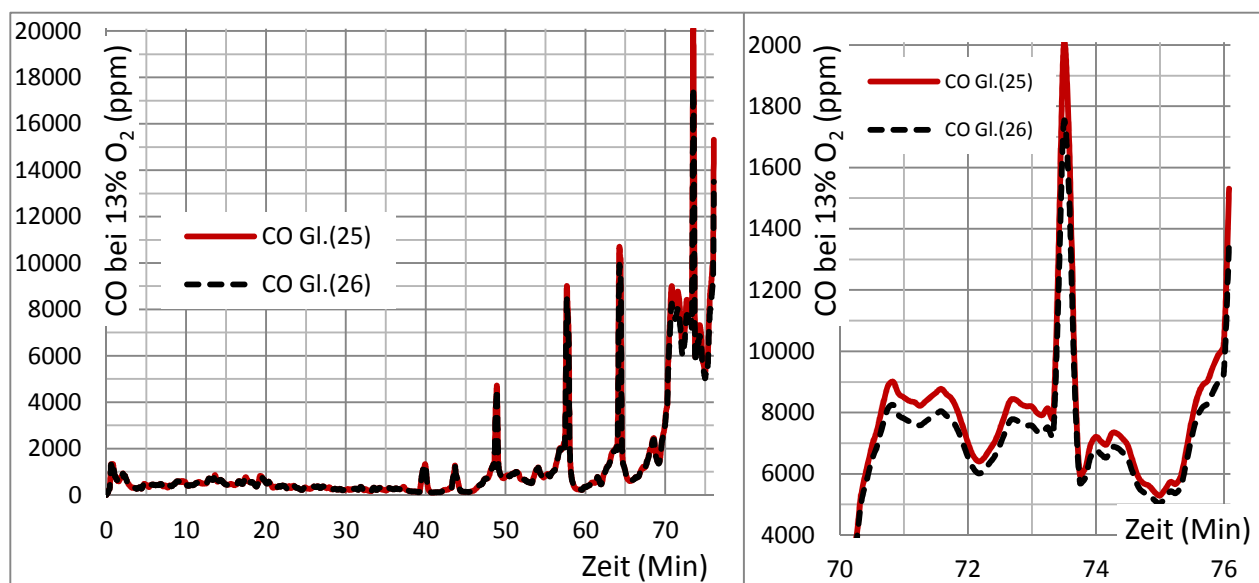


Bild 57: Umrechnung der gemessenen Schadstoffemission CO auf den Bezugssauerstoffgehalt im Abgas; Verbrennung von 5 kg Holz mit oberem Abbrand, siehe auch Bild 56

Um eine Feuerstätte nach der 1.BlmSchV zu zertifizieren, werden Emissionen und der Sauerstoffgehalt im Abgas zeitgleich erfasst und als Viertelstundenmittelwert ausgewertet (1.BlmSchV, Anlage 2, § 2,2). Die Verbrennungsparameter und Emissionen bei Stückholzfeuerung zeigen jedoch eine enorme zeitliche Schwankung, wie dargestellt in den Bildern 56 und 57. Welche Viertelstunde bei der Zertifizierung berücksichtigt wird, ist dem Autor dieser Arbeit nicht bekannt. Tabelle 5 zeigt, wie stark der Zeitpunkt der Messung das Messergebnis beeinflusst:

Verbrennung wie in Bild 56 und 57	CO Emission bezogen auf 13% O ₂ im Abgas; Gl.(25)
Erste Viertelstunde (0 – 15 Min.)	523 ppm
Letzte Viertelstunde (61 – 76 Min.)	4196 ppm
Beste Viertelstunde (24 – 39 Min.)	258 ppm
Zeitlicher Durchschnitt (0 – 76 Min.)	1288 ppm
Grenzwert 1.BlmSchV, Stufe 1 (Kachelofen)	2,0 g/m ³ = 1600 ppm
Grenzwert 1.BlmSchV, Stufe 2	1,25 g/m ³ = 1000 ppm

Tabelle 5: CO-Emission der Feuerung in Kachelofen zu verschiedenen Zeitpunkten (Bild 56, 57)

Parameter	Anheizphase	Hauptverbrennungsphase	Ausbrandphase
	Verbrennungsphase		
Betriebszeit	15	55	30
Energieumsatz	10	70	20
CO Emissionen	20	30	50
OGC (C _x H _y) Emissionen	50	20	30
NO _x Emissionen	10	75	15
Abgasverluste	5	55	40

Tabelle 6: Prozentuelle Aufteilung der Betriebsphasen bei Stückholzverbrennung; (Quelle: Josef Matt: Emissionsmessungen an Kachelöfen, Schriftenreihe Lebensraum Vorarlberg, 2001, ISBN 3-9011487-31-X)
http://www.vorarlberg.at/publikationen/umwelt_und_lebensmittel/luft/SLV/Band48EmissionsmessungenAnKachel%C3%B6fen.pdf

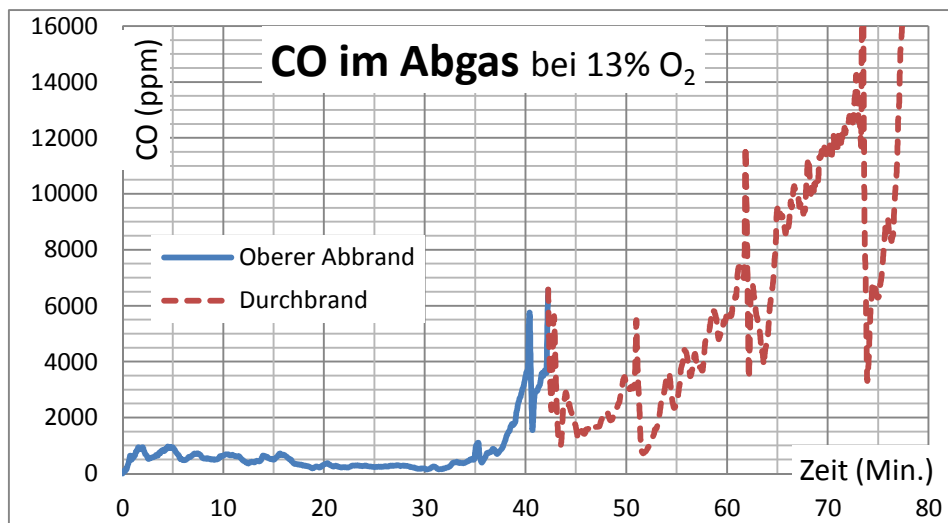


Bild 58: Verbrennung von 6 kg Holz; 4 kg oberer Abbrand, 2 kg Durchbrand; siehe Bild 59

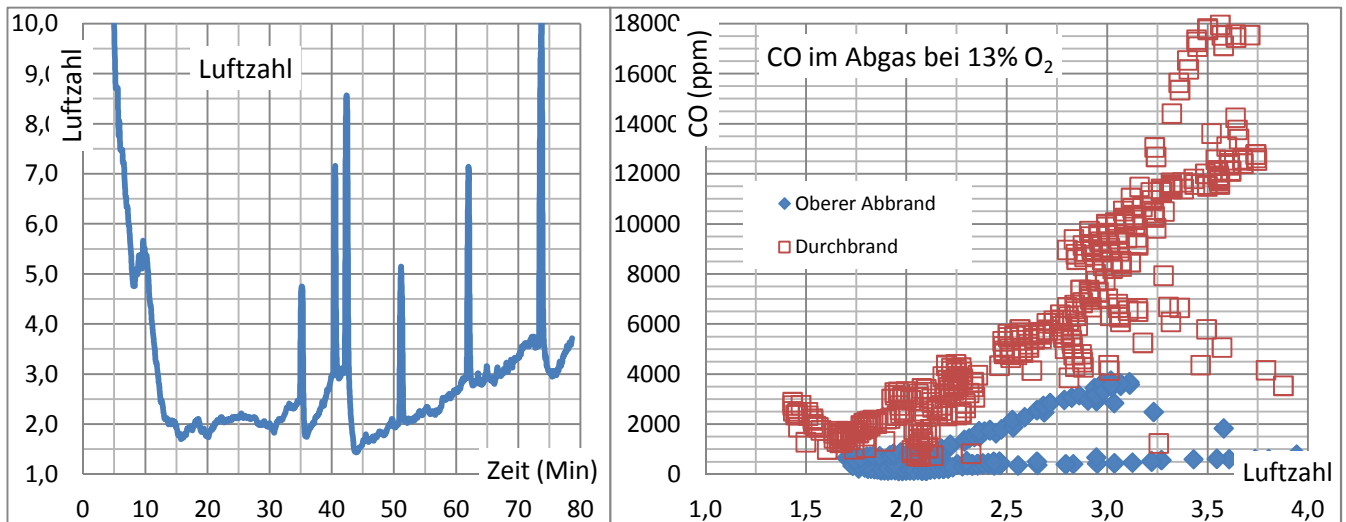


Bild 59: Verbrennung wie in Bild 58, Luftzahl als Funktion der Zeit und CO-Emission als Funktion der Luftzahl

Anhang

Die Abgasverluste und somit der Wirkungsgrad von Öl- und Gasfeuerstätten werden nach der **1.BImSchV, Anlage 2**, § 3.41 mit Hilfe der Siegert'schen Gleichung berechnet:

$$q_{th} = (T_A - T_L) \cdot \left(\frac{A}{21 - O_2} + B \right) \quad (27)$$

mit

q_{th}	=	thermischer Abgasverlust (%)
T_A, T_L	=	Abgas- und Verbrennungslufttemperatur (°C)
O_2	=	Sauerstoff im trockenen Abgas (%)
A, B	=	brennstoffspezifische Kennzahlen nach Tabelle 7

	Heizöl, Pflanzenöl	Erdgas	Kokereigas	Flüssiggas
A	0,68	0,66	0,6	0,63
B	0,007	0,009	0,011	0,008

Tabelle 7: Brennstoffspezifische Kennzahlen der Siegert'schen Gleichung

Die 1.BImSchV beinhalten keine Angaben zur Wirkungsgrad-Ermittlung von Holzverbrennung. Für feste Brennstoffe, wie Holz, fehlen belastbare Literaturangaben für die brennstoffspezifischen Kennzahlen A und B.

In der Bedienungsanleitung des Abgas-Messgerätes **Madur GA-21 plus** wird der Abgasverlust folgendermaßen ermittelt (Quelle: http://www.madurusa.com/vb/data/manuals/ga-21plus/21p_d.pdf):

$$q_{th} = (T_A - T_L) \cdot \left(\frac{A'}{CO_2} + B' \right) \quad (28)$$

mit

CO_2	=	Kohlendioxid im trockenen Abgas (%)
--------	---	-------------------------------------

$$q_{ch} = \frac{\alpha \cdot CO}{CO_2 + CO} \quad (29)$$

mit

q_{ch}	=	chemischer Abgasverlust (%)
A', B', α	=	brennstoffspezifische Kennzahlen nach Tabelle 8
CO_2, CO	=	Kohlendioxid und Kohlenmonoxid im trockenen Abgas (%)

	A'	B'	α
Heizöl	0,5	0,007	52
Erdgas	0,37	0,009	32
Bio-Diesel	0,4567	0,008	52
Braunkohle	0,988 – 1,113	0	69
Steinkohle	0,672 – 0,683	0	69
Holz (lufttrocken)	0,65	0	69

Tabelle 8: Brennstoffspezifische Kennzahlen der Siegert'schen Gleichung und des chemischen Abgasverlustes der Verbrennung

In vielen anderen Abgascomputern wird der Abgasverlust mit der Siegert'schen Gleichung (27 oder 28) ermittelt, wobei die chemischen Verluste oft vernachlässigt werden. Die Gleichungen (24) und (29) für die Berechnung der chemischen Verluste sind annähernd identisch. Der Wirkungsgrad wird in Kenntnis der thermischen und der chemischen Verluste mit Gleichung (30) berechnet:

$$\eta = 100 - q_{th} - q_{ch} \quad (39)$$

mit η = Wirkungsgrad (%).

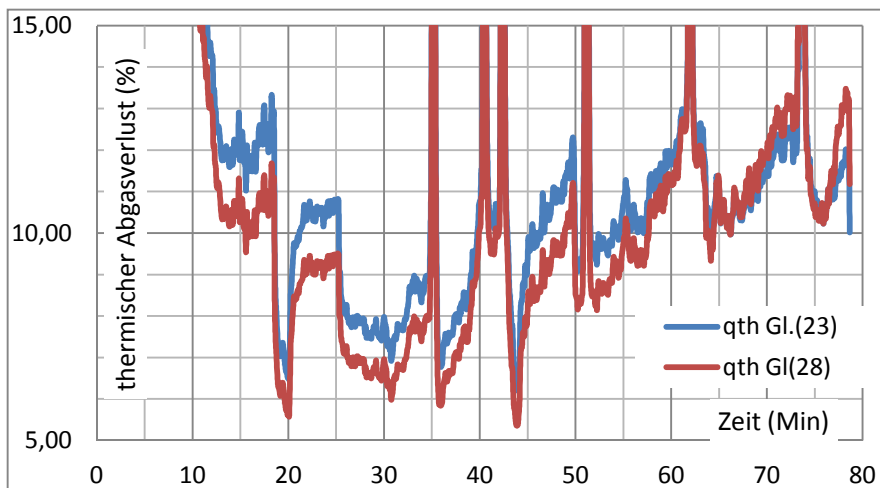


Bild 60: Vergleich der Berechnung der thermischen Abgasverluste; Gl. (23) – Good, Nussbaumer; Gl.(28) – Madur 21 plus; Verbrennung wie in Bild. 58, 59

Bild 60 zeigt, dass die niedrigsten Werte der thermischen Abgasverluste in etwa im Zeitraum 15. bis 60. Minute erzielt wurden, in der Zeit des niedrigsten Luftüberschusses (Bild 59)

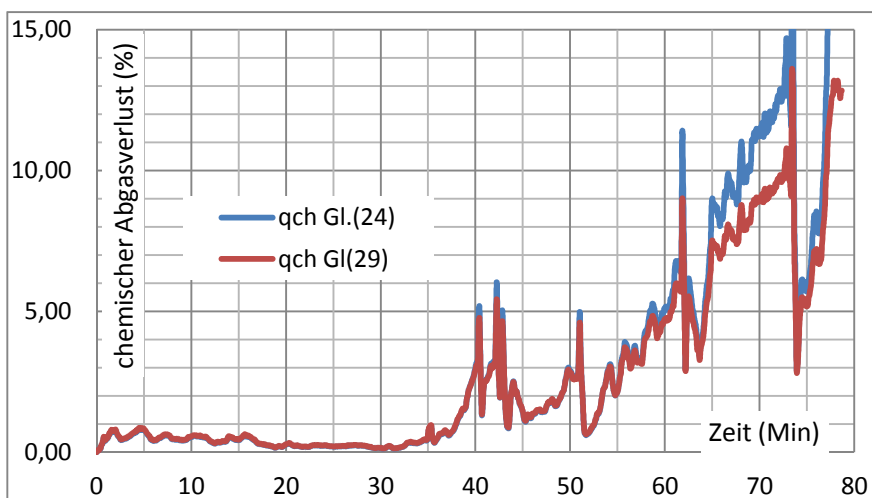


Bild 61: Vergleich der Berechnung der chemischen Abgasverluste; Gl. (24) – Good, Nussbaumer; Gl.(29) – Madur 21 plus; Verbrennung wie in Bild 58, 59

Aus Bild 61 ist ersichtlich, dass die chemischen Verluste in der zweiten „Halbzeit“ stark zunehmen: Nach Bild 58 ist die CO-Bildung in der Abbrandphase deutlich höher als in der Oberbrandphase; die hohen CO-Werte führen zu hohen chemischen Verlusten.

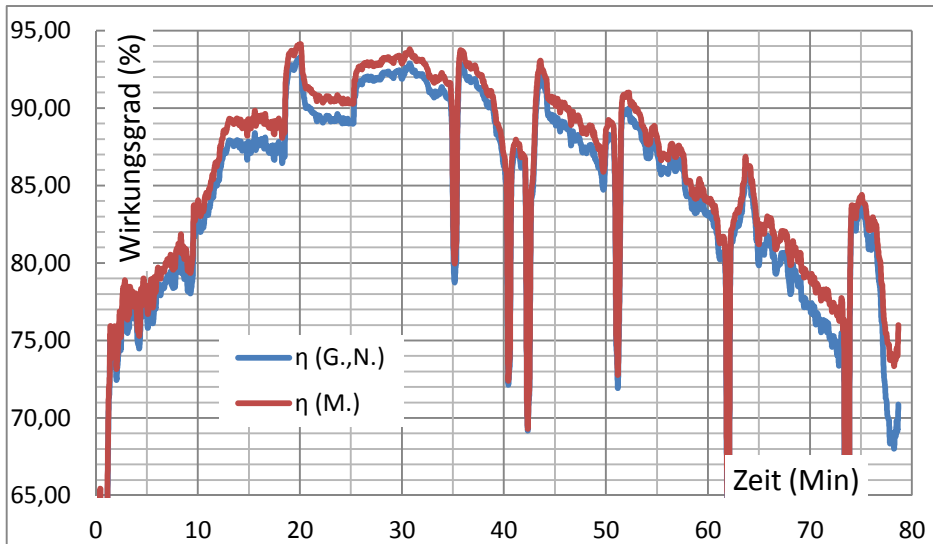


Bild 62: Vergleich der Wirkungsgrad-Berechnung; Verbrennung wie in Bild 58, 59; (Messung mit Wöhler-A-600, Wirkungsgrad-Berechnung $\eta(G., N.)$ =Gleichungen (23),(24), Wirkungsgrad-Berechnung $\eta(M.)$ = Gleichungen (28), (29))

Nach Bild 62 wird der höchste Wirkungsgrad im Zeitraum $\approx 15 < \text{Zeit} < 50$ Minuten erreicht, infolge der geringsten thermischen Verluste. In diesem Zeitraum beträgt die Luftzahl der Verbrennung $\lambda \approx 2$ (siehe Bild 59).

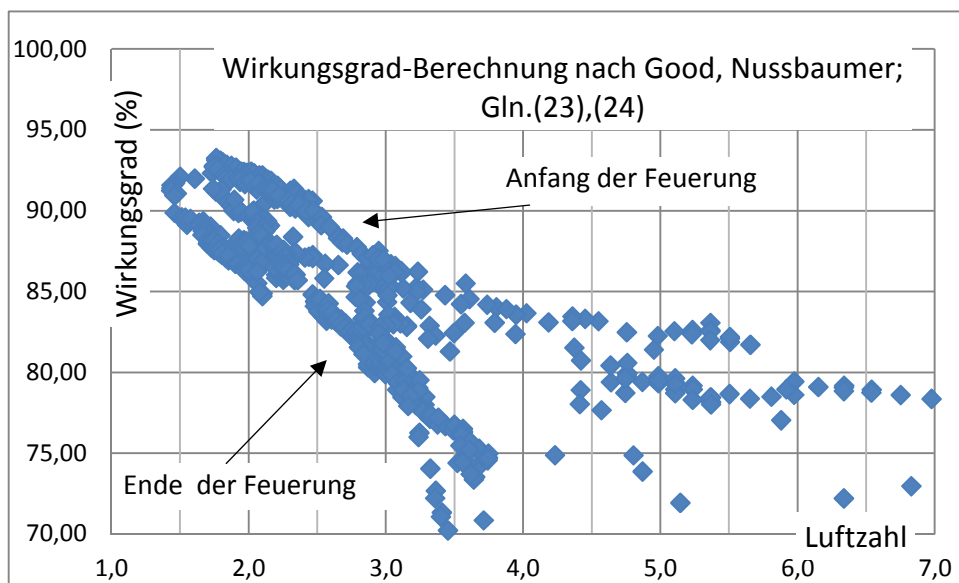


Bild 63: Wirkungsgrad als Funktion der Luftzahl; Verbrennung wie in Bild 58, 59

Bild 63 zeigt, dass der Wirkungsgrad am Anfang der Feuerung höher ist als am Ende. Ebenfalls steigt der Wirkungsgrad mit fallender Luftzahl, bis die Luftzahl ca. $\lambda \approx 1,8$ erreicht bzw. unterschritten wird. Bei weiterem Reduzieren der Luftzahl fällt der Wirkungsgrad infolge steigender chemischer Verluste. Der optimale Betrieb liegt im Luftzahlbereich $\approx 1,8 < \lambda < 2,5$, sowohl bezogen auf den Wirkungsgrad als auch bezüglich der Schadstoffbildung.