

Jahrestreffen der ProcessNet-Fachausschüsse „Gasreinigung“ und „Hochtemperaturtechnik“ 17.-18.
Februar 2011, DECHEMA-Haus, Frankfurt am Main
Paper Nr. 5865

Zoltán Faragó

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
DLR_School_Lab Lampoldshausen / Stuttgart
74239 Hardthausen

Feuerungstechnische Kennzahlen bei nachwachsenden Brennstoffen

Nachwachsende Brennstoffe sind

umweltfreundlich, da sie beim Verbrennen die Atmosphäre nicht durch CO₂ belasten

umweltschädlich, da sie beim Verbrennen hohe Emission an CO, C_nH_m, Ruß, Feinstaub, usw. verursachen

Wirkungsgrad und Schadstoffbildung der
Verbrennung werden aus der
Abgasuntersuchung ermittelt

Erster Schritt: Bestimmung der Luftzahl aus

CO₂- und CO-Messung

oder aus

O₂- und CO-Messung

Gl. (1)

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

Gl. (2)

$$\lambda = 1 + \frac{O_2 - \frac{CO}{2}}{O_{2ref} - O_2 + \frac{CO}{2}} \cdot \frac{A_{tr.\min}}{L_{\min}}$$

Gl. (3)

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

Die meisten Näherungsgleichungen für die Berechnung der Luftzahl lassen sich auf die Gleichung (1) oder (2) zurückführen.

Kennzahlen

CO_{2max} Maximaler CO₂-Gehalt im Abgas

(A_{tr.min}/L_{min}) Abgas-Luft-Verhältnis

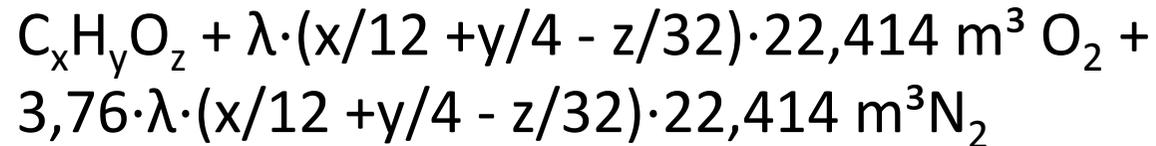
A_{tr.min} Theoretisches Abgasvolumen

L_{min} Theoretischer Luftbedarf

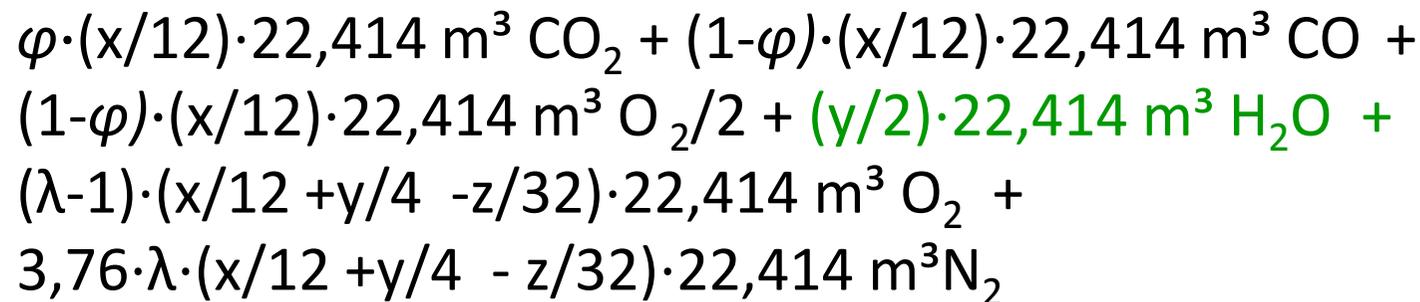
O_{2ref} Sauerstoffgehalt der Luft

Die Kennzahlen können aus der Verbrennungsreaktion Gl. (4) ermittelt werden

Gl. (4)



=



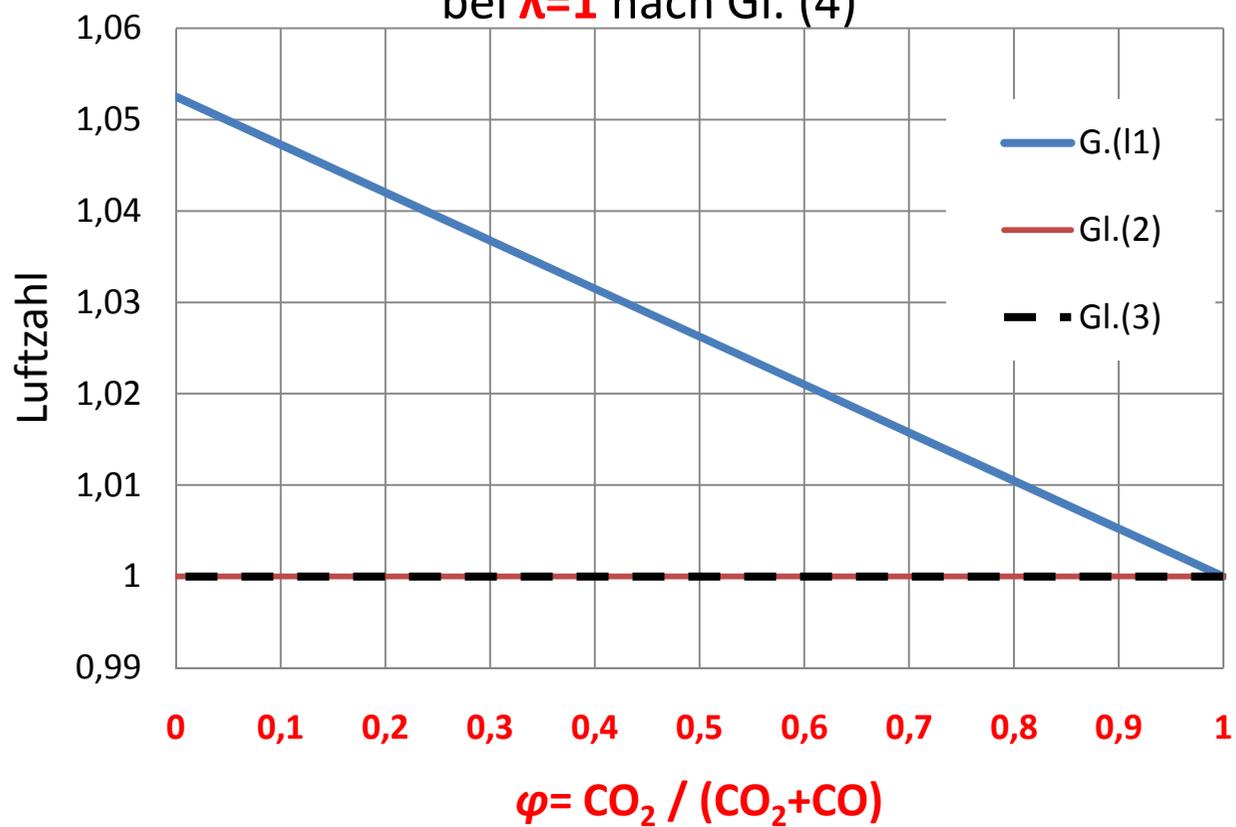
x, y, z: Gewichtsanteil der Elemente C, H und O

$\lambda = L / L_{\text{min}}$

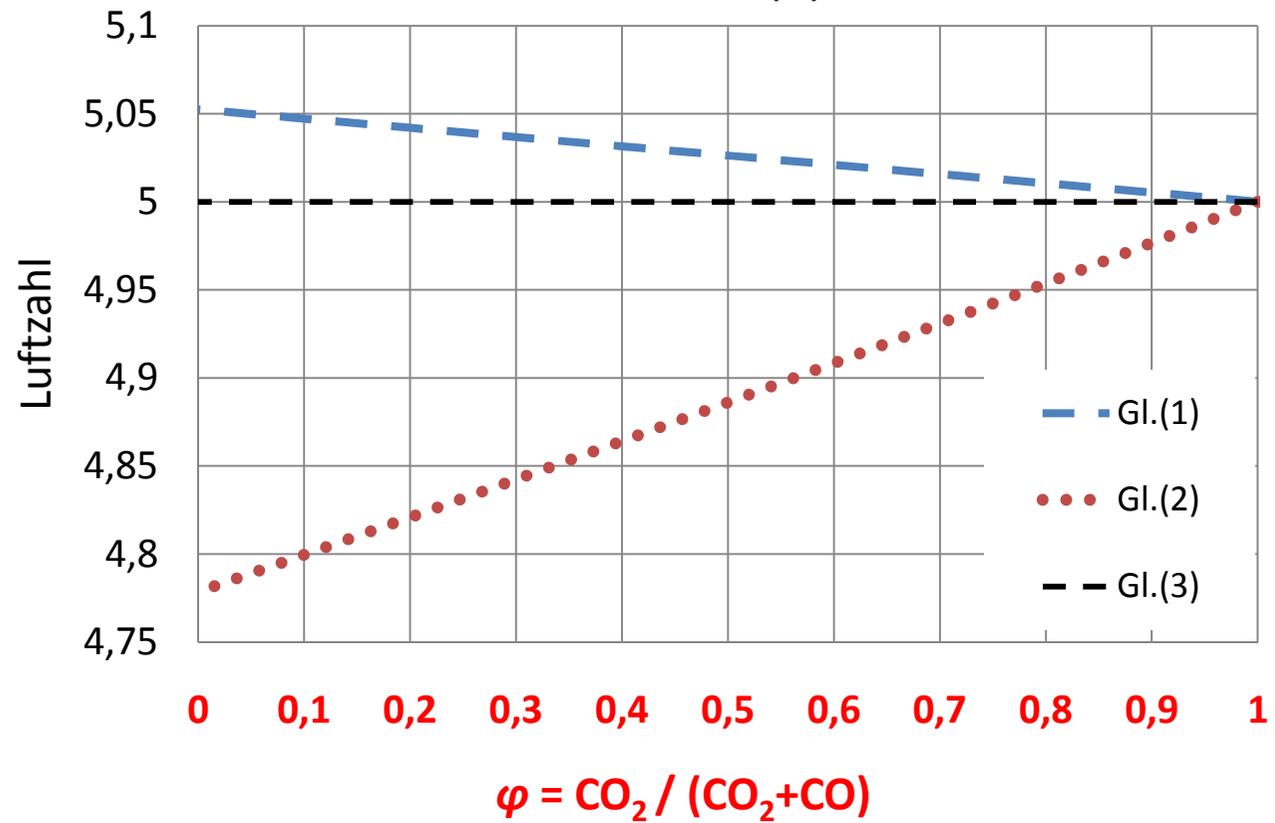
$\varphi = \text{CO}_2 / (\text{CO}_2 + \text{CO}), \quad 0 \leq \varphi \leq 1 \quad \text{Vollkommene Verbrennung: } \varphi = 1$

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

Mit Gln. (1) - (3) zurückgerechnete Luftzahl
bei $\lambda=1$ nach Gl. (4)



Mit Gln. (1) - (3) zurückgerechnete Luftzahl bei
 $\lambda=5$ nach Gl. (4)



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

Gl. (1) nach DIN 4702;

gut bei niedrigen CO-Konzentrationen,
schwach bei $\lambda \approx 1$ und gleichzeitig viel CO;

bei $\lambda \approx 1$ genauer Wert von $CO_{2\max}$ nötig

$$\lambda = 1 + \frac{O_2 - \frac{CO}{2}}{O_{2ref} - O_2 + \frac{CO}{2}} \cdot \frac{A_{tr.\min}}{L_{\min}}$$

Gl. (2) häufig angewandt in

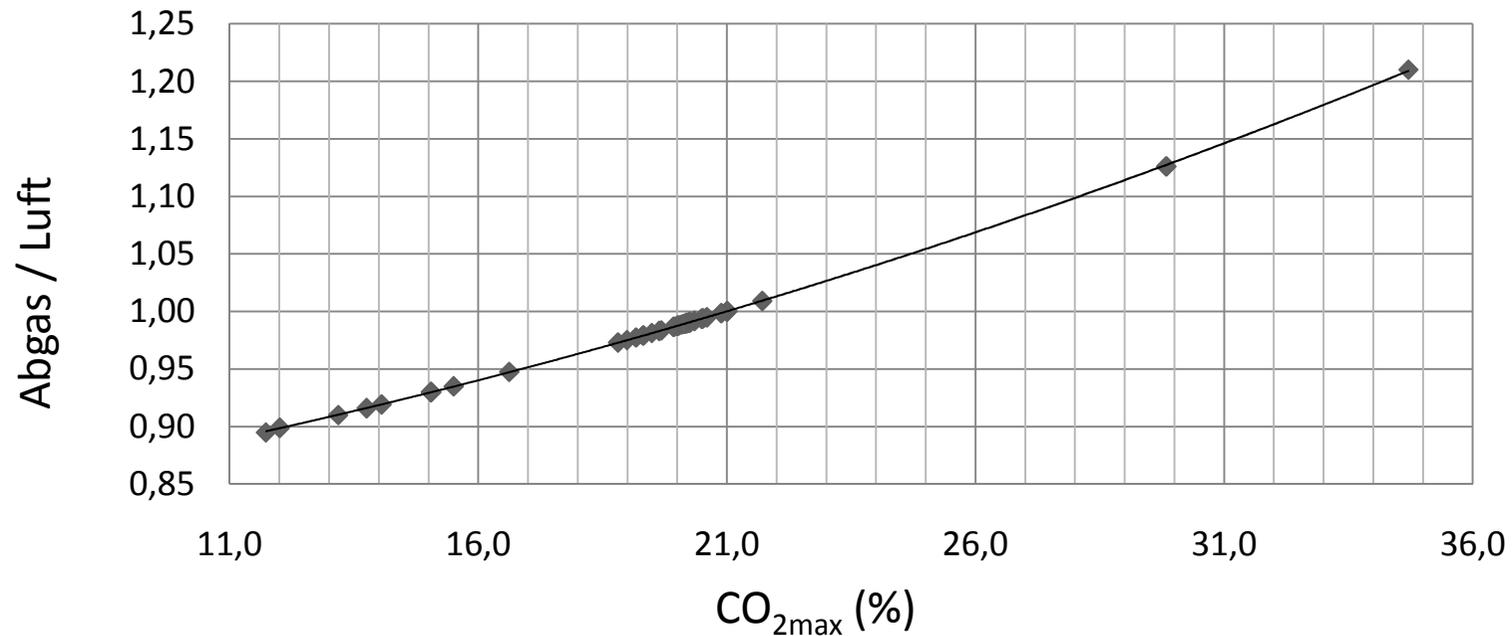
Rauchgascomputern ohne CO_2 -Messung;

gut bei $\lambda \approx 1$, schwach bei $\lambda \gg 1$ und
gleichzeitig viel CO

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

Gl. (3) immer korrekt, ideal
bei Verbrennung von nach-
wachsenden Brennstoffen; **bei
 $\lambda \approx 1$ genauer Wert von $CO_{2\max}$
nötig**

Berechnetes Abgas-Luft-Verhältnis der stöchiometrischen
Verbrennung versus berechnetes CO_{2max}



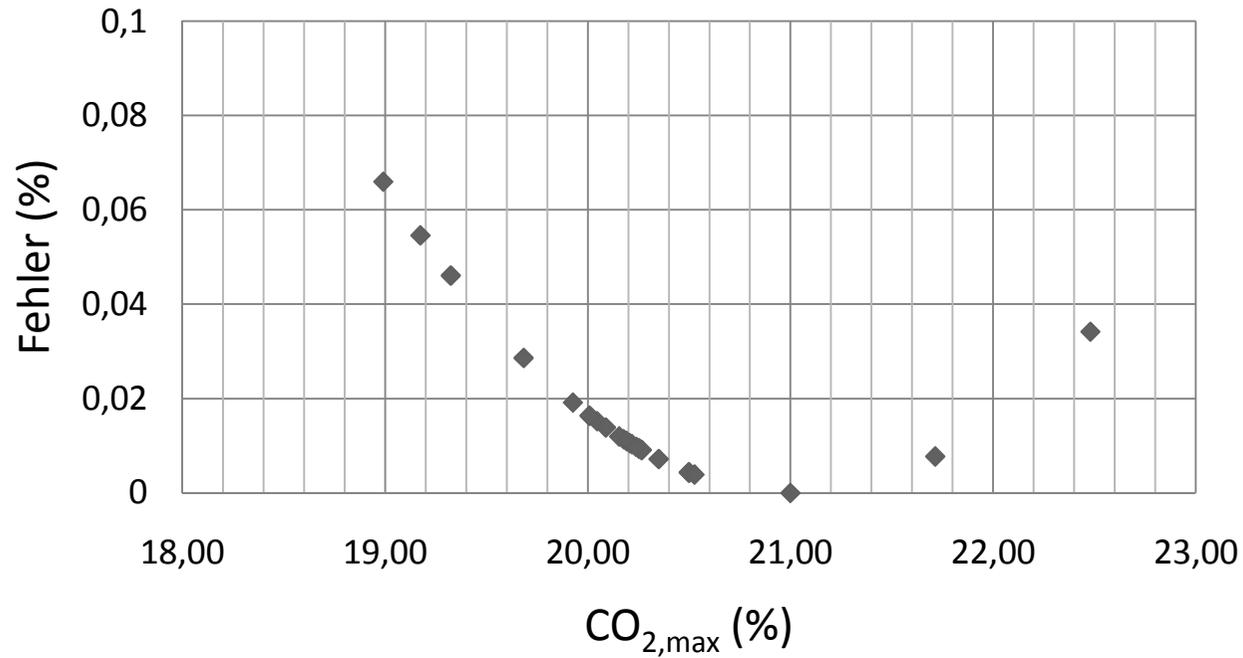
Brennstoffe (von links nach rechts): CH₄, Erdgas H, Erdgas L, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀, CH₃OH, C₁₀H₂₀, Heizöl EL, C₂H₂, Lignin Weichholz, Lignin Hartholz, 24 Holzsorten, je zwei Torf-, Braunkohle- und Steinkohlesorten, Anthrazit, reiner Kohlenstoff, Cellulose C₆H₁₀O₅, Aceton (CH₃)₂CO, Weinsteinsäure C₄H₂O₄ und CO

$$\frac{A_{tr.,min}}{L_{min}} = 0,807 + 0,00556 \cdot CO_{2,max} + 0,000174 \cdot CO_{2,max}^2 \quad \text{Gl. (5)}$$

$$\frac{A_{tr.,min}}{L_{min}} \approx \frac{(100 - O_{2ref}) + (CO_{2,max} - O_{2ref})}{(100 - O_{2ref})} \quad \text{Gl. (6)}$$

Berechnung des Abgas-Luft-Verhältnisses ($A_{tr.min}/L_{min}$) aus der Kennzahl CO_{2max} . Die Näherungsgleichung (5) ist für alle kohlen- und wasserstoffhaltigen Brennstoffe annähernd fehlerfrei. Für nachwachsende Brennstoffe beträgt der Fehler der Gleichung (6) $\varepsilon \leq 0,02\%$ bei der Verbrennung mit Luft ($O_{2ref} = 21\%$).

Fehler der Gleichung (6) versus $\text{CO}_{2,\text{max}}$

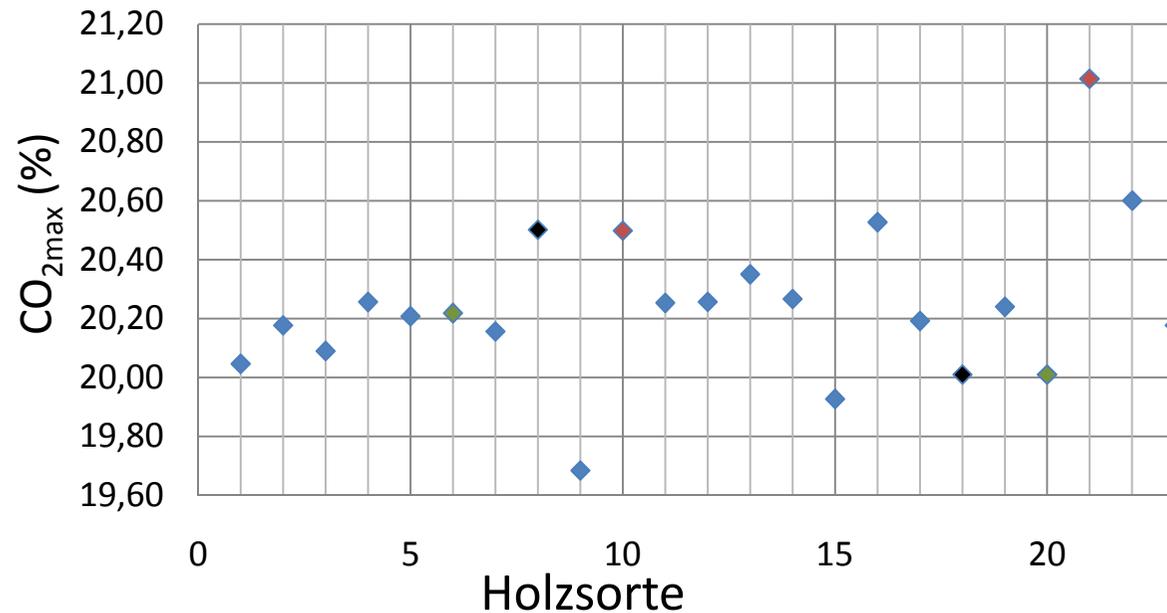


Brennstoffe von links nach rechts: C_2H_2 , Lignin Weichholz, Lignin Hartholz, 14 Holzsorten, Kohlenstoff, $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$, $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_5$ und $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_5$.

In Kenntnis der Gleichung (5) oder (6) wird für die Berechnung der Luftzahl mit Gl. (1) oder (3) nur eine einzige brennstoffspezifische Kennzahl benötigt :



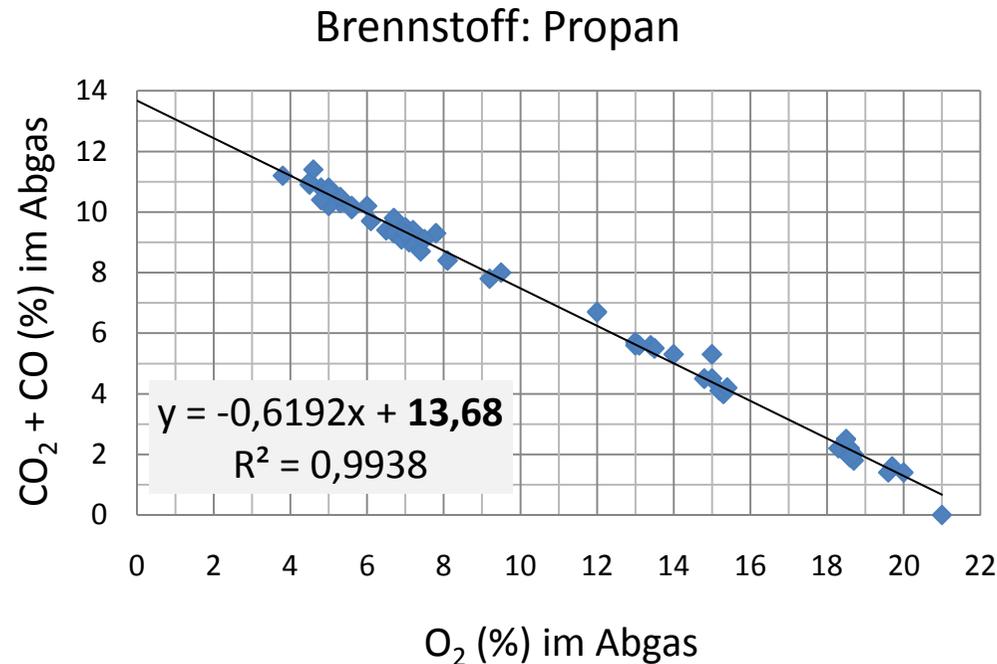
Aus Elementarzusammensetzung mit Gl. (4)
gerechnete $\text{CO}_{2\text{max}}$ -Werte von 21 Holzsorten



Das Diagramm zeigt die Werte von 21 Holzsorten; Eiche (rote Punkte), Buche (schwarz) und Ahorn (grün) sind zweimal vertreten.

Literaturangabe für Pferdemit schwankt zwischen $18 < \text{CO}_{2\text{max}} < 24,5 \%$ (Florian Lange: Dissertation Uni Rostock, pp. 35 - 36, 2007)

Experimentelle Bestimmung von CO₂max



Brennstoff: Propan **CO₂max theoretisch = 13,76 %**

- Abgasmessung: CO₂, CO, O₂ (%) bei verschiedenen Luftzahlen

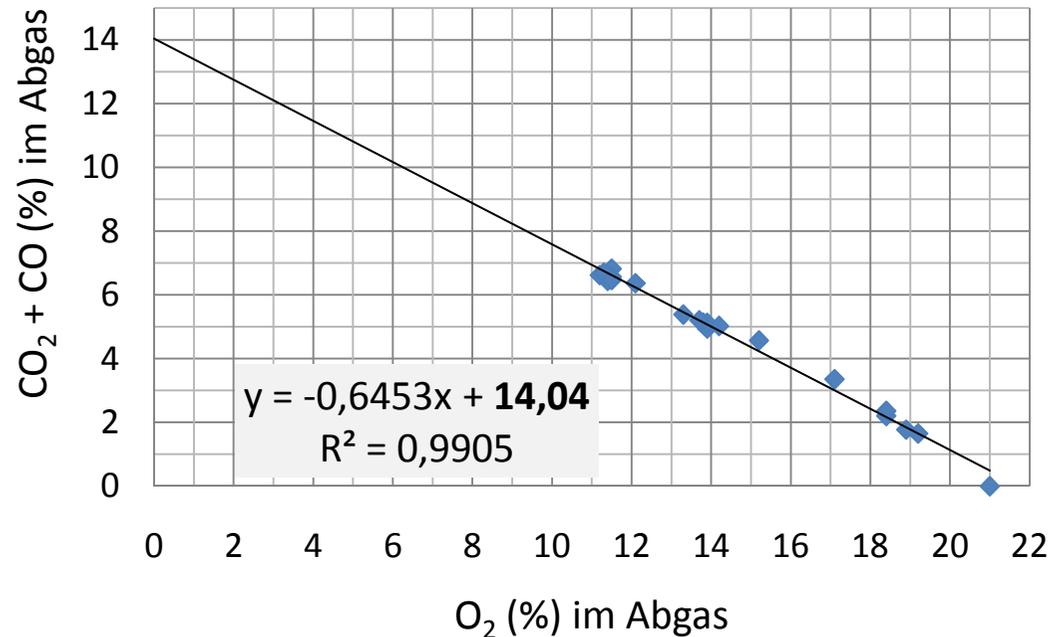
- Darstellung von **(CO₂ + CO)** versus **O₂**

- Lineare Regression, Regressionsgleichung: **$y = -0,6192 \cdot x + 13,68$**

- Messergebnis: **CO₂max = 13,68 %** **$\epsilon = 1,00585$**

Messgerät: **rbr-ecom-J2KN-IB** Abgascomputer

Brennstoff: Butan



Brennstoff: Butan **CO₂max theoretisch = 14,06 %**

- Abgasmessung: CO₂, CO, O₂ (%) bei verschiedenen Luftzahlen

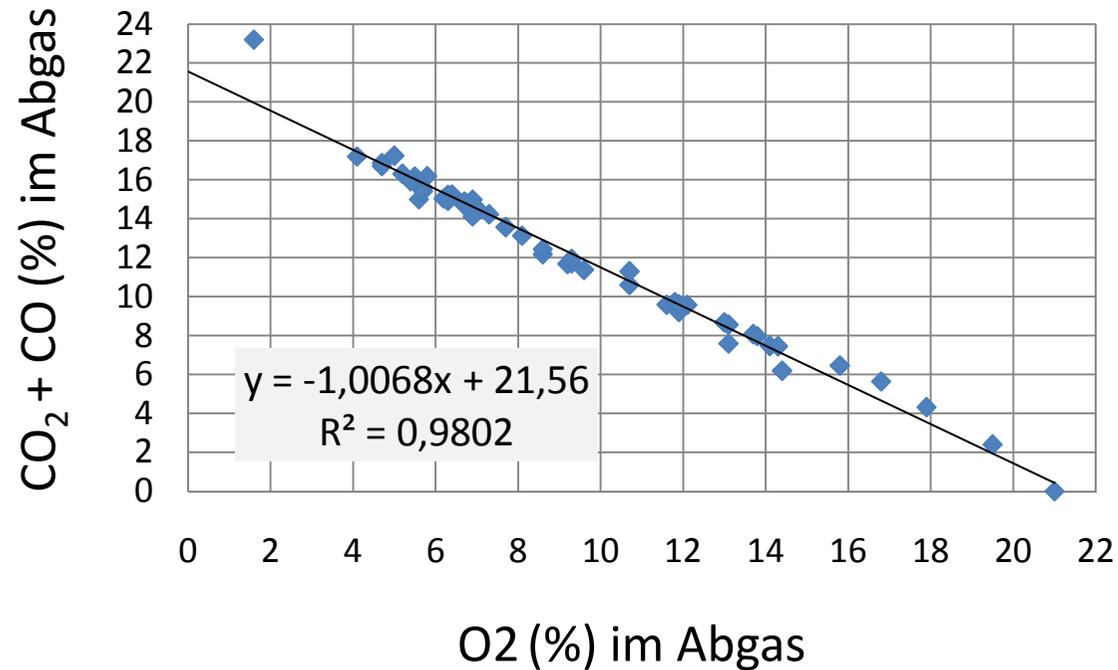
- Darstellung von **(CO₂ + CO)** versus **O₂**

- Lineare Regression, Regressionsgleichung: **$y = - 0,6453 \cdot x + 14,04$**

- Messergebnis: **CO₂max = 14,04%** **$\epsilon = 1,00142$**

Messgerät: **rbr-ecom-J2KN-IB** Abgascomputer

Brennstoff: Holz



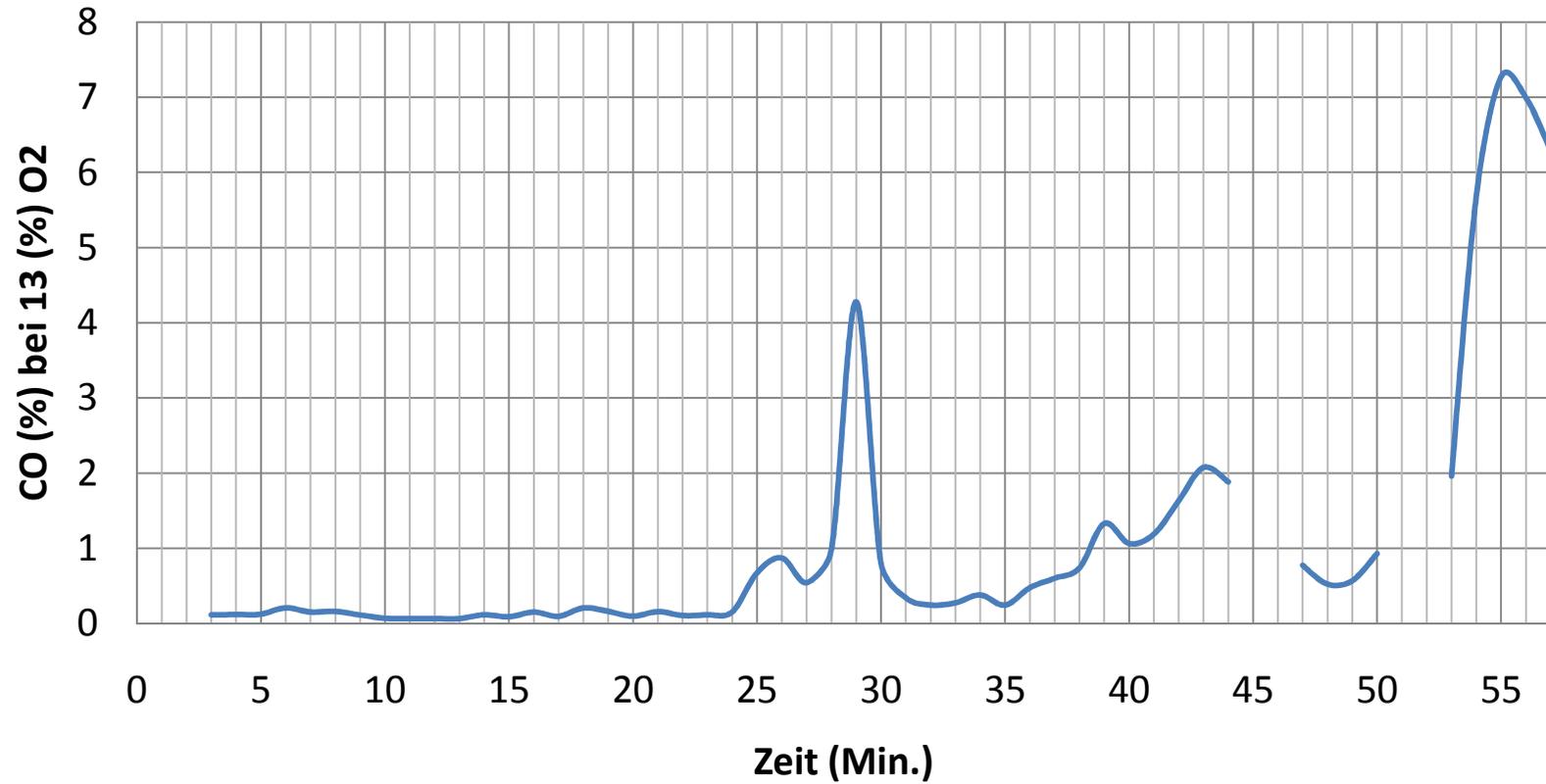
Abgasmessung: CO₂, CO, O₂ (%) bei verschiedenen Luftzahlen

- Darstellung von (CO₂ + CO) versus O₂

- Lineare Regression, Regressionsgleichung: $y = -1,0068 \cdot x + 21,56$

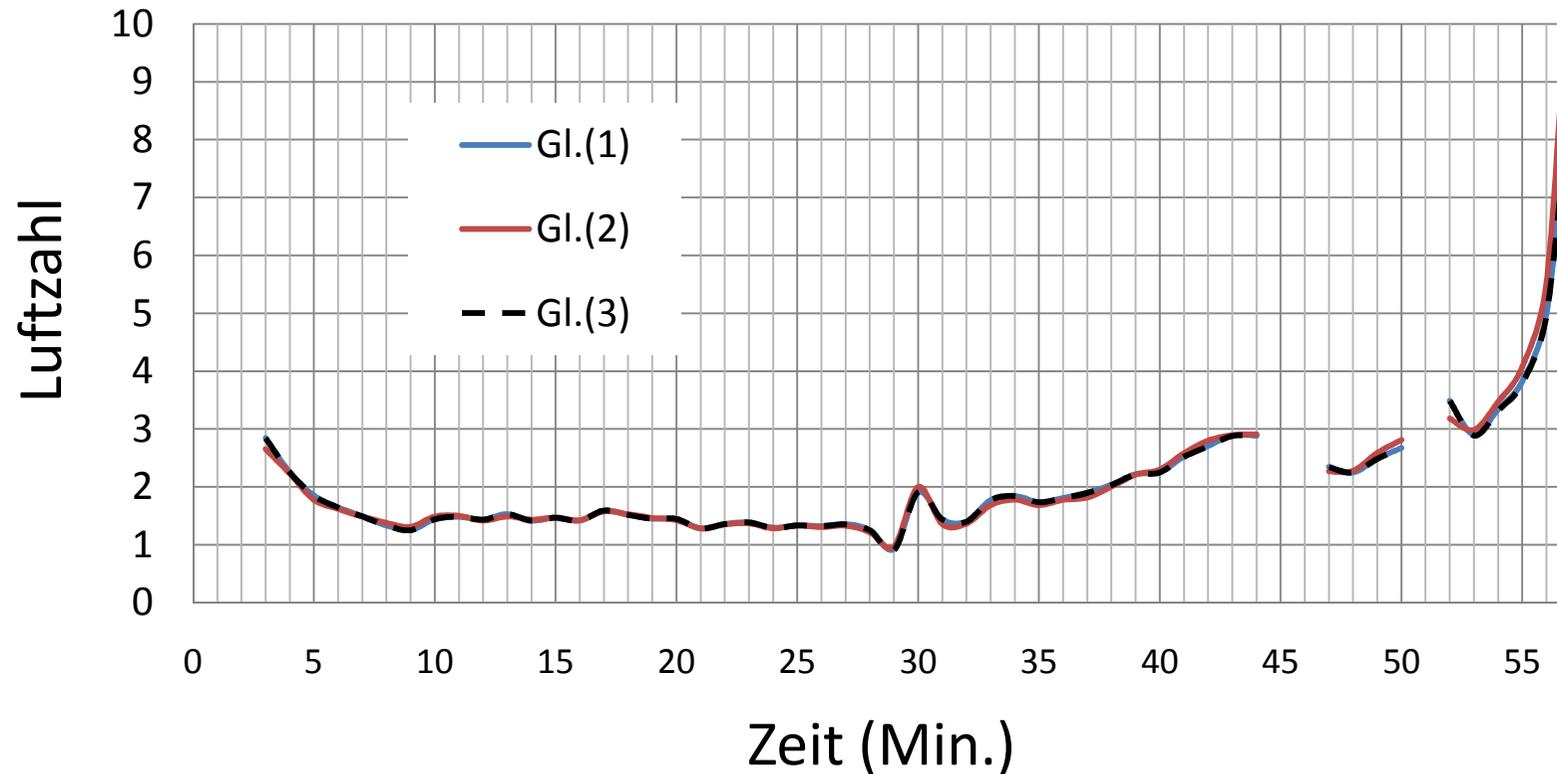
- Messergebnis: **CO₂max = 21,56%**

Messgerät: *rbr-ecom-J2KN-IB* Abgascomputer



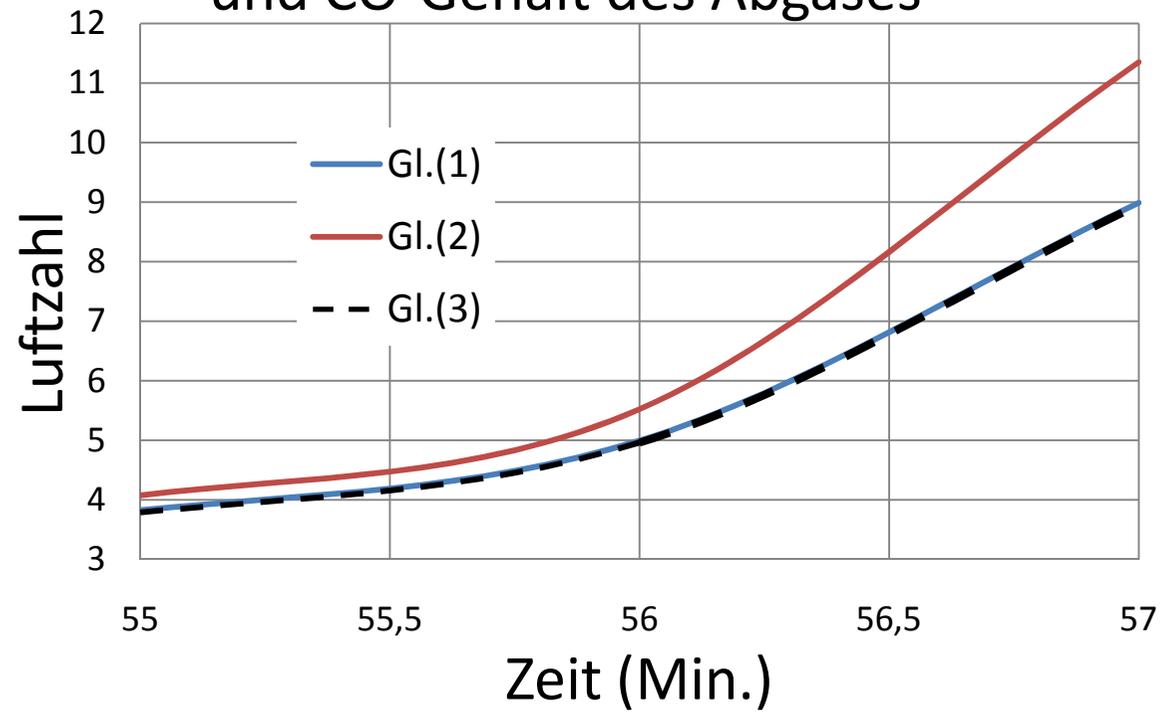
Tulikivi Speicherofen **TU 1000/9**
Holzladung 6,5 kg
Messgerät: **rbr-ecom-J2KN-IB** Abgascomputer

Luftzahlberechnung aus CO₂-, O₂- und CO-Gehalt des Abgases

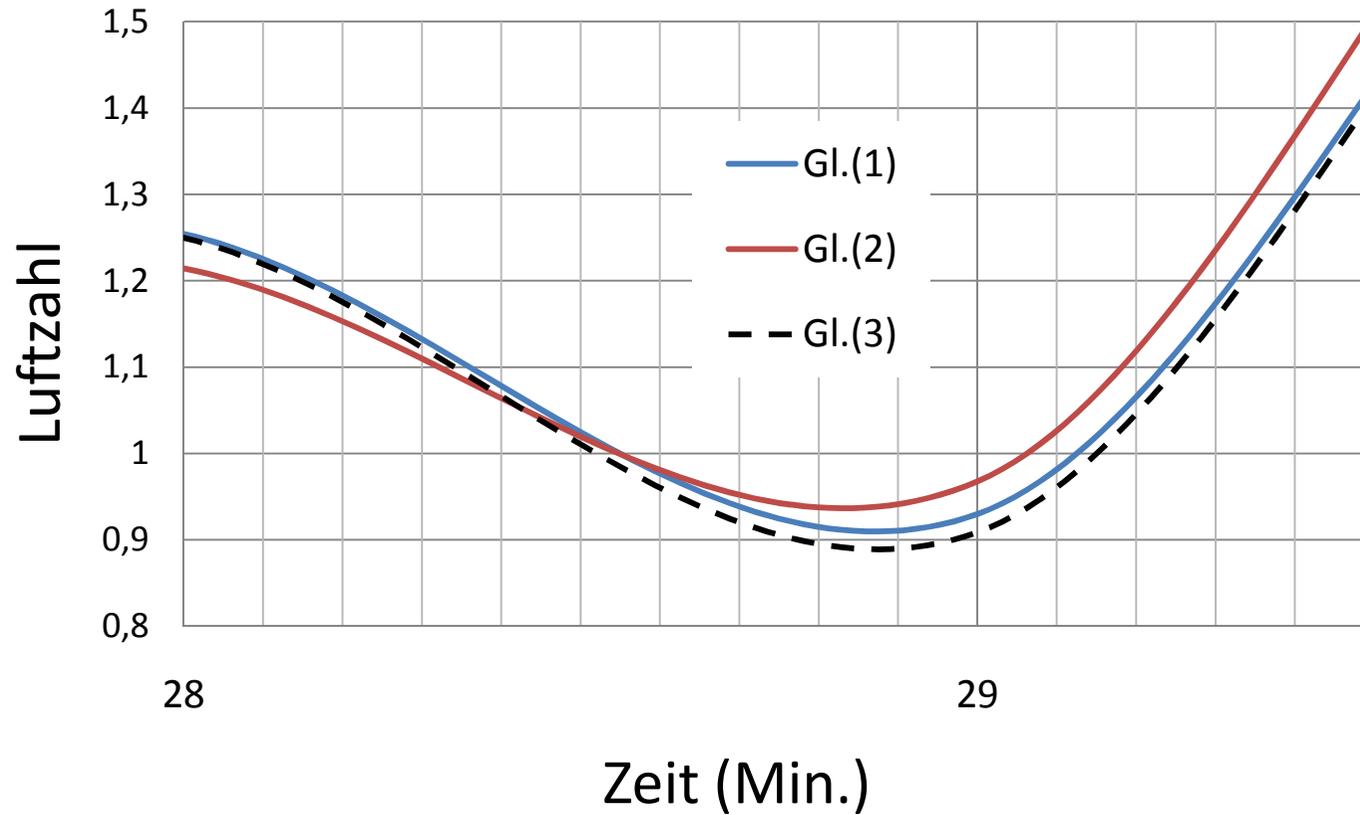


Tulikivi Speicherofen **TU 1000/9**
Holzladung 6,5 kg
Messgerät: **rbr-ecom-J2KN-IB** Abgascomputer

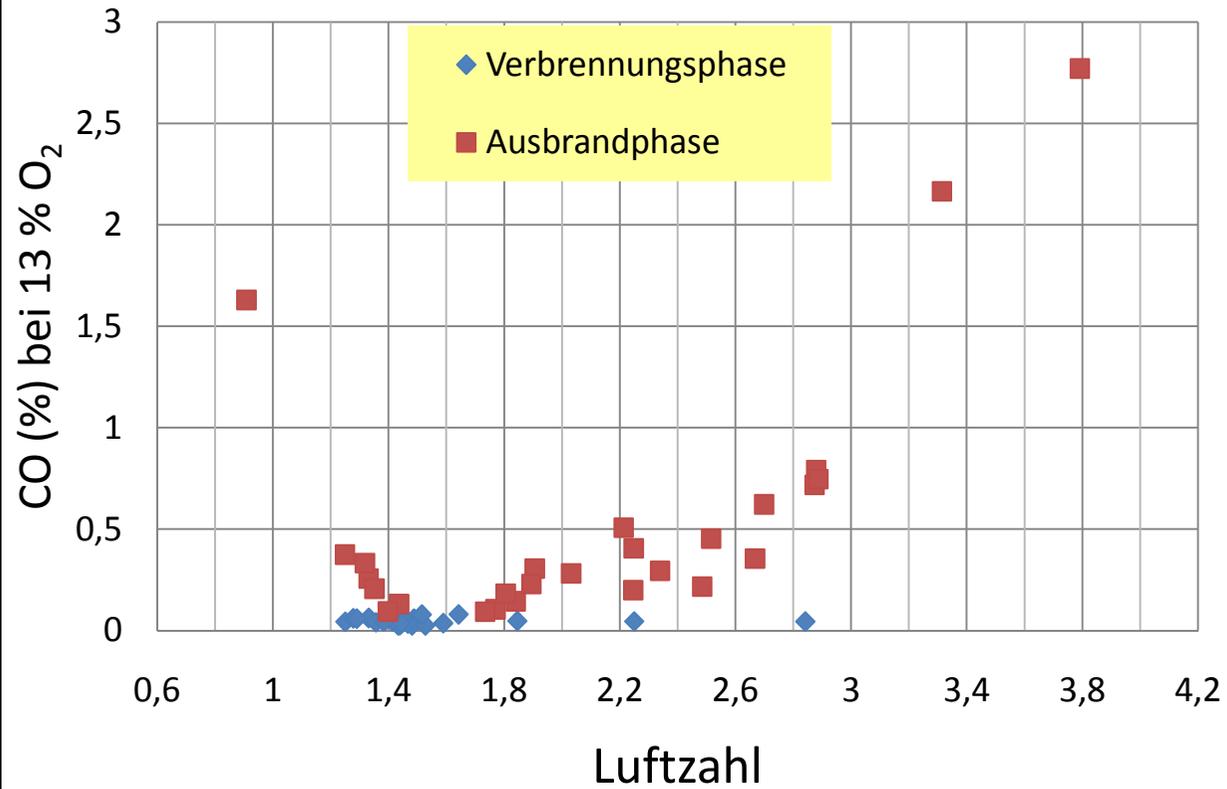
Luftzahlberechnung aus CO₂-, O₂- und CO-Gehalt des Abgases



Luftzahlberechnung aus CO₂-, O₂- und CO-Gehalt des Abgases

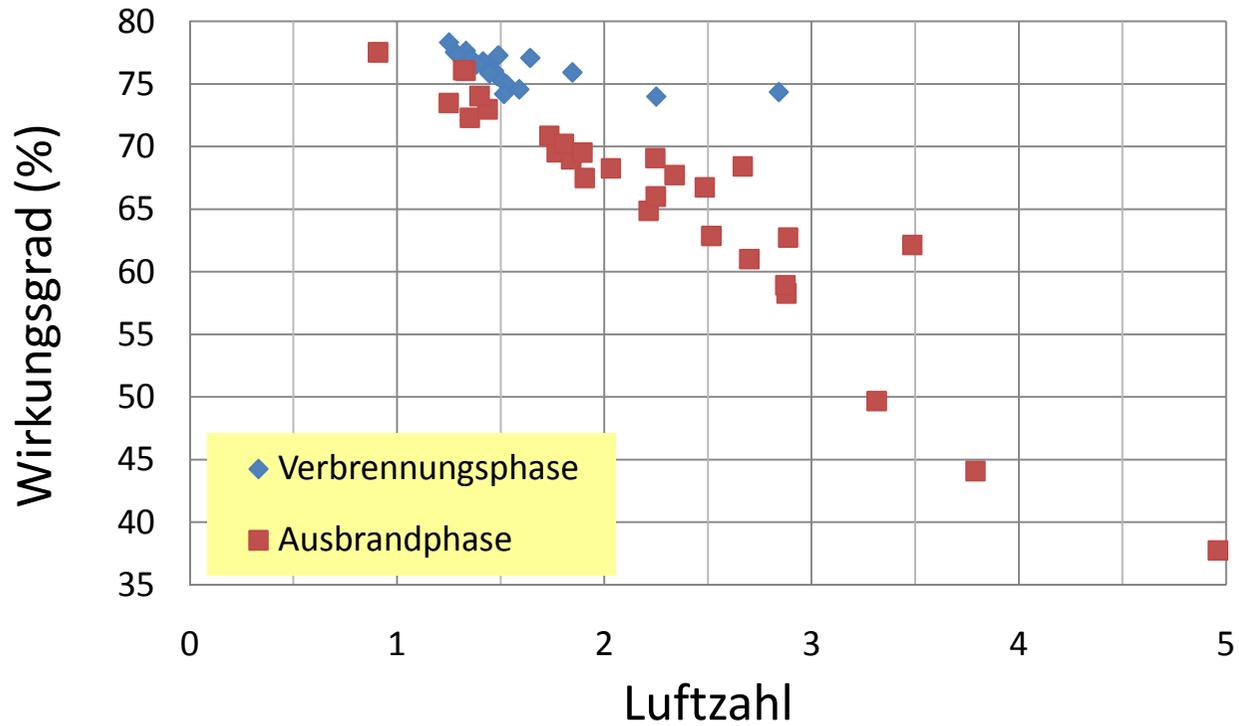


Tulikivi TU 1000/9, Holzladung 6,5 kg

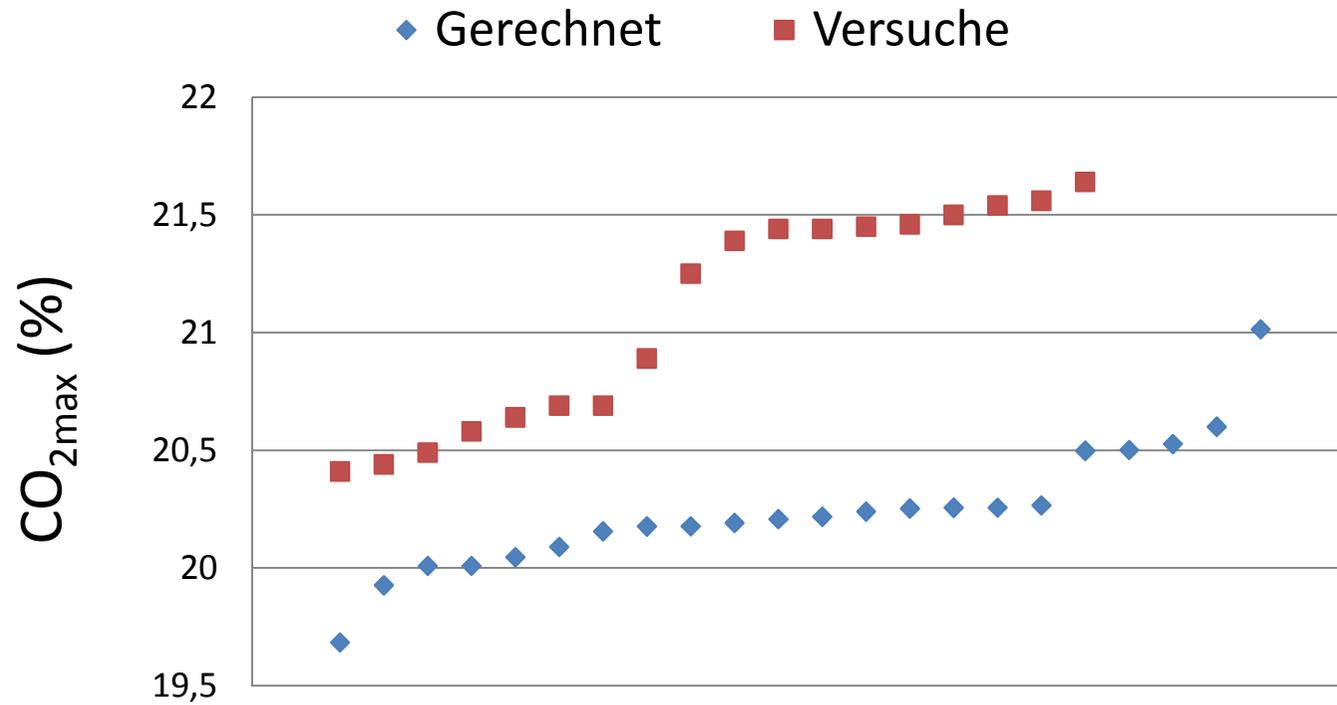


Messgerät: *rbr-ecom-J2KN-IB* Abgascomputer

Tulikivi TU 1000/9, Holzladung 6,5 kg



Messgerät: *rbr-ecom-J2KN-IB* Abgascomputer



Mit Gl. (4) gerechnete und durch Versuche gemessene Werte für $\text{CO}_{2\text{max}}$ bei Holzverbrennung

Schlussfolgerungen:

Für die Bestimmung der Luftzahl der Verbrennung nachwachsender Brennstoffe ist eine genaue Kenntnis von $\text{CO}_{2\text{max}}$ erforderlich.

Der Wert für $\text{CO}_{2\text{max}}$ schwankt stark bei nachwachsenden Brennstoffen. Literaturangaben sind selten und widersprüchlich.

$\text{CO}_{2\text{max}}$ sollte für jede Feuerung durch Messungen ermittelt werden. Bei nahstöchiometrischer Verbrennung kann die fette Verbrennungsseite von der mageren nur bei genauer Kenntnis von $\text{CO}_{2\text{max}}$ unterschieden werden.

Ende