

Meßtechnik für Ofenbauer

Unser Nachbarland Schweiz gilt allgemein als führend, was die Verwendung von Holz und anderen nachwachsenden („regenerierbaren“) Brennstoffen betrifft. Insbesondere die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) in Zürich befaßt sich, wie die Leser des K&L-Magazin wissen, mit der Erforschung des Verhaltens dieser Brennstoffgruppe.

Seit einigen Jahren wird über eine EU-weite Vereinheitlichung oder Angleichung des Meßverfahrens für Holzbrandfeuerungen nachgedacht. Das stellt sich als schwieriger als gedacht dar, denn es sind nationale Bestimmungen zu beachten. Der Beitrag der an der ETH und im Ingenieurbüro Verenum tätigen Autoren soll die Diskussion voranbringen. Redaktion.

Einleitung

Die wichtigsten Kenngrößen zur Beurteilung der Qualität einer Holzfeuerung sind die Leistung, die Abbranddauer, der Wirkungsgrad und die Emissionen. Bei der Entwicklung einer Holzfeuerung kann anhand dieser Daten beurteilt werden, ob z. B. durch eine neue Brennraumgeometrie, eine vergrößerte Brennkammer oder eine abgeänderte Luftzuführung eine Verbesserung des Ausbrandes erzielt wird. Die Kenntnis der feuerungstechnischen Kenngrößen ist für den Ofenkonstrukteur somit eine wichtige Hilfe bei der Produktentwicklung.

Eine Qualitätskontrolle von Öfen ist in bezug auf die Abbrandeigenschaften schwierig zu realisieren. Wegen des großen Aufwandes für Messung und Auswertung werden die verfügbaren meßtechnischen Hilfsmittel erst vereinzelt eingesetzt. Es liegt jedoch im Interesse der Branche, gute Produkte zu fördern und eine stete Qualitätsverbesserung der angebotenen Holzöfen zu gewährleisten. Dies ist auch erforderlich, um kommende Vorschriften einhalten zu können und die Konkurrenzfähigkeit des erneuerbaren Energieträgers Holz im Vergleich zu Öl und Gas zu verbessern.

Um die Weiterentwicklung der Holzöfen in der Schweiz zu fördern, werden interessierte Ofenbauer***) vom Verband Schweizerischer Hafner- und Plattengeschäfte (VHP) in Aus- und Weiterbildungskursen geschult. Im neuen Ausbildungszentrum Fro-

*) Anschrift: Verenum, Ingenieurbüro für Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik, CH - 8006 Zürich, Langmauerstrasse 109.

**) Berufsbezeichnung Kachelofen- und Luftheizungsbauer, in der Schweiz: Hafner.

**Dr.-Ing. Thomas Nussbaumer,
Dr.-Ing. Jürgen Good *)**

burg wurde dazu ein Prüfstand eingerichtet, auf dem eine meßtechnische Erfassung von Öfen durchgeführt werden kann. Zur Einführung in die entsprechende Meßtechnik wurde mit Unterstützung des Bundesamtes für Energiewirtschaft im Rahmen des Projekts DIANE 7, Klein-Holzfeuerungen, das Lehrmittel Meßtechnik für Ofenbauer (Good, Nussbaumer 1994) erarbeitet. In einer Serie wird das K&L-Magazin die wichtigsten Teile dieser Broschüre in gekürzter Form drucken.

Das Symbol- und Literaturverzeichnis gilt auch für die folgenden Teile des Beitrags.

1. Kenngrößen der Holzfeuerung

1.1 Übersicht

Die Kenngrößen zur Beurteilung einer Holzfeuerung können unterteilt werden in

- feuerungstechnische Kenngrößen zur Beschreibung der Verbrennung,
- Kenngrößen der Energie und
- Kenngrößen, die vor allem für das Komfortempfinden wichtig sind.

1.2 Luftüberschußzahl Lambda

Die Luftüberschußzahl Lambda (λ) beschreibt das Verhältnis zwischen zugeführter Verbrennungsluftmenge und stöchiometrischer, d. h. theoretisch minimal notwendiger Luftmenge (Gleichung 1). Die Luftüberschußzahl beeinflusst die Verbrennungstemperatur und die Ausbrandqualität in entscheidendem Maß: Ein hoher Luftüberschuß führt zu einer niedrigen Verbrennungstemperatur, da die nicht benötigte Luft die Flamme verdünnt und so abkühlt. Ein zu knapper Luftüberschuß (nahe bei 1) bewirkt dagegen Zonen mit Sauerstoffmangel, was zu einer unvollständigen Verbrennung mit hohen Emissionen an Kohlenmonoxid (CO) und Ruß führt. Zur Bestimmung der Luftüberschußzahl kann bei Kenntnis der Brennstoffzusammensetzung – eine Formel hergeleitet werden, die die Berech-

Feuerungstechnische Kenngrößen	<ul style="list-style-type: none">● Verbrennungstemperatur● Luftüberschuß (λ = Lambda)● Emissionen
Energie-Kenngrößen	<ul style="list-style-type: none">● Brennstoff: Heizwert, Feuchtigkeit● Leistung● Wirkungsgrad bzw. Verluste● Abbranddauer (siehe auch Komfort)
Komfort-Kenngrößen	<ul style="list-style-type: none">● Abbranddauer● Oberflächentemperatur

nung von Lambda durch Messung des O₂- oder des CO₂-Gehalts im Abgas gestattet. Für eine typische Holzzusammensetzung gilt vereinfacht [Good, Nussbaumer 1993]:

$$\lambda = \frac{\text{zugeführte Verbrennungsluftmenge}}{\text{stöchiometrische Verbrennungsluftmenge}} [-] \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{20,4}{\text{CO}_2 + \text{CO}} [-] \quad (2)$$

oder

$$\lambda = \frac{21}{21 - \text{O}_2 + 0,4 \text{ CO}} [-] \quad (3)$$

Emissionsmeßwerte müssen auf die vorgeschriebene Bezugsgröße umgerechnet werden. Diese Umrechnung wird als Normierung bezeichnet. Damit wird verhindert, daß durch Verdünnung der Abgase mit Falschluff (z. B. am Schornsteineintritt) tiefere Emissionswerte ermittelt werden. Die Normierung kann wie folgt durchgeführt werden:

$$C_{\text{normiert}} = C \frac{21 - \text{O}_2 \text{ Bezugsgröße}}{21 - \text{O}_2} \quad (4)$$

C_{normiert}	= Emissionswert normiert	[ppm od. mg/Nm ³]
C	= Emissionswert gemessen	[ppm od. mg/Nm ³]
$\text{O}_2 \text{ Bezugsgröße}$	= Sauerstoffkonzentration der Bezugsgröße	[Vol.-%]

Vereinfachend ist diese Umrechnung (4) gleichbedeutend mit einer Umrechnung vom gemessenen λ auf das λ der Bezugsgröße, wobei λ durch

Messung von O₂ oder CO₂ ermittelt wird.

$$C_{\text{normiert}} = C \frac{\lambda_{\text{gemessen}}}{\lambda_{\text{bei Bezugsgröße}}} \quad (5)$$

1.4 Verbrennungstemperatur

Da die Verbrennungsreaktionen bei hohen Temperaturen schneller ablaufen, ist die Ausbrandqualität von der Temperatur abhängig. Um eine emissionsarme Verbrennung zu gewährleisten, sollte die Verbrennungstemperatur mindestens 800 °C betragen. Die höchste Temperatur bei der Verbrennung von Holz wird in der Regel am Flammenende gemessen. Sie wird beeinflusst durch die Holzfeuchtigkeit, den Luftüberschuß, die Brennkammer und die Abstrahlung an umgebende (Feuerraum-)Wände. Mit der Zunahme des Luftüberschusses (Verdünnung) oder der Holzfeuchtigkeit (Energieverbrauch für Verdampfung) sinkt die Verbrennungstemperatur. Sie sinkt zudem durch direkte Berührung der Flamme mit der Brennkammer-

CO ₂ = Kohlendioxidkonzentration	[Vol.-%]
CO = Kohlenmonoxidkonzentration	[Vol.-%]
O ₂ = Sauerstoffkonzentration	[Vol.-%]
20,4 = CO _{2max} (= maximal möglicher CO ₂ -Gehalt im Abgas)	[Vol.-%]
21 = Sauerstoffkonzentration der Luft	[Vol.-%]

1.3 Bezugsgröße und Normierung

Für den Vergleich von Emissionen verschiedener Feuerungen oder verschiedener Versuche wird eine Bezugsgröße benötigt, z. B. der Sauerstoffgehalt O₂. Ohne Normierung der Emissionswerte auf eine Bezugsgröße ist kein sinnvoller Vergleich mit anderen Daten möglich. Häufig verwendete Bezugsgrößen für Holzfeuerungen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Beispiel:

Meßgrößen: CO = 1600 ppm = 2000 mg/Nm³ (siehe Kap. 1.5)
 O₂ = 8 Vol.-% ($\lambda = 1,615$)
 Bezugsgröße: O₂ Bezugsgröße = 13 Vol.-% ($\lambda_{\text{Bezugsgröße}} = 2,625$)

Berechnung des normierten CO-Gehalts:

$$\text{CO}_{\text{normiert}} = \text{CO} \frac{21-13}{21-8} = 2000 \text{ mg/Nm}^3 \frac{1,6}{2,625} = 1219 \text{ mg/Nm}^3$$

$$\text{oder } \text{CO}_{\text{normiert}} = \text{CO} \frac{\lambda}{\lambda_{\text{Bezugsgröße}}} = 2000 \text{ mg/Nm}^3 \frac{1,596}{2,625} = 1216 \text{ mg/Nm}^3$$

Bezugsgröße O ₂	λ bei Bezugsgröße	Gültigkeit
13 Vol.-%	2,625	TA Luft; Holzfeuerungen < 1 MW ***
11 Vol.-%	2,10	TA Luft; Holzfeuerungen > 1 MW
10 Vol.-%	1,91	Richtlinie CEN-Norm

Tabelle 1: Bezugsgrößen für die Angabe von Emissionswerten.

wand – was bei Holzfeuerungen unbedingt zu vermeiden ist – sowie durch Abstrahlung an wassergekühlte Wände.

***) Gilt für den Bereich häuslicher Feuerstätten wie Kachelöfen, Kamine, Kassetten und Kaminöfen.

1.5 Emissionen

Bei der Verbrennung von Holz sind folgende Emissionen von Bedeutung:
 CO (Kohlenmonoxid)
 NO_x (Stickoxide)
 HC (gasförmige organische Stoffe; Kohlenwasserstoffe)
 Staub (Asche- und Rußpartikel).

$$\text{Wassergehalt } w = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse feuchtes Holz}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (11)$$

oder

$$\text{Holzfeuchtigkeit } u = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse trockenes Holz}} \cdot 100 \text{ [\%]} \text{ [%atro]} \quad (12)$$

$$\text{Umrechnung: } w = \frac{u}{100 + u} \text{ [\%]} \text{ und } u = \frac{w}{100 - w} \text{ [\%]} \quad (13, 14)$$

Umrechnung von ppm auf mg/Nm³

Emissionsmeßgeräte zeigen in der Regel Werte in Vol.-% oder in Vol.-ppm an (ppm = parts per million = ein Millionstel). Grenzwerte sind dagegen häufig in mg/m³ angegeben.

Die Umrechnung von ppm auf mg/m³ erfolgt durch Multiplikation mit der Dichte des Gases bei Normbedingungen (0 °C, 1013 mbar). Der Bezug auf Normbedingungen wird durch die Bezeichnung mg/Nm³ angezeigt (Nm³ = Normkubikmeter).

$$\text{CO in mg/Nm}^3 = 1,25 \text{ CO in ppm} \quad (6)$$

$$\text{NO}_x \text{ als NO}_2 \text{ in mg/Nm}^3 = 2,05 \text{ NO}_x \text{ in ppm} \quad (7)$$

$$\text{HC in mg/Nm}^3 = 0,54 \text{ HC in ppm (für CH}_4 \text{ als Kalibriergas)} \quad (8)$$

$$\text{HC in mg/Nm}^3 = 1,62 \text{ HC in ppm (für C}_3\text{H}_8 \text{ als Kalibriergas)} \quad (9)$$

Beispiel: Meßwert: CO = 3000 ppm = 1,25 · 3000 = 3750 mg/Nm³

Umrechnung von mg/Nm³ auf mg/MJ

Für den Vergleich von Emissionswerten verschiedener Brennstoffe, z. B. Öl und Holz, müssen die Emissionen auf die *erzeugte Energiemenge* in mg/MJ oder mg/kWh bezogen werden. Zur Vereinfachung werden die Emissionen häufig auch auf die zugeführte Energie bezogen; die Umrechnung dazwischen entspricht dem Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad.

Für den Brennstoff Holz gilt: Es muß beachtet werden, daß die zugeführte Energiemenge vom Heizwert und von der Holzfeuchtigkeit abhängig ist. Dies hat zur Folge, daß eine *korrekte Umrechnung nur bei Kenntnis des Heizwertes bzw. der Holzfeuchtigkeit* möglich ist. Vereinfachte Umrechnung:

$$\text{Emissionswert in mg/MJ} = \text{Emissionswert in mg/Nm}^3 \cdot \frac{\lambda_{\text{bei Bezugsgröße}} \cdot V_{\text{min}}}{H_u (1 + u)} \quad (10)$$

$V_{\text{min}} = 4,58 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ (= minimale Verbrennungsluftmenge von absolut trockenem Holz)

H_u = Heizwert in Funktion der Holzfeuchtigkeit (Gleichung 15)

u = Holzfeuchtigkeit (Gleichung 12)

1.6 Wassergehalt und Heizwert Wassergehalt

Die im Brennstoff vorhandene Feuchtigkeit beeinflusst den Heizwert und die Verbrennungstemperatur. Der Wassergehalt bzw. die Holzfeuchtigkeit wird durch Trocknung einer Holzprobe bestimmt. Es werden obenstehende Definitionen verwendet.

Heizwert

Der Heizwert H_u pro kg trockene Holzmasse (absolut trocken, atro) variiert zwischen den verschiedenen Holzarten im Bereich von 17 500 kJ/kg bis 19 500 kJ/kg. Zur Vereinfachung wird häufig mit einem mittleren Wert von $H_{u \text{ atro}} = 18 500 \text{ kJ/kg}$ gerechnet. Für eine korrekte Bestimmung der zugeführten Energie muß allerdings eine Heizwertbestimmung vom eingesetzten Brennstoff durchgeführt werden. Mit zunehmender Holzfeuchtigkeit verringert sich der Heizwert H_u , der auf das Gewicht des feuchten Brennstoffs bezogen wird. Näherungsweise kann mit folgender Formel gerechnet werden:

$$H_u = \frac{H_{u \text{ atro}} - 2500 \cdot \frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \text{ kJ/kg} \quad (15)$$

Umrechnung von [kJ/kg] in [kWh/kg]:

$$H_u \text{ [kWh/kg]} = \frac{H_u \text{ [kJ/kg]}}{3600} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} H_{u \text{ atro}} &= 18 500 \text{ kJ/kg} \\ H_{u \text{ atro}} &= 5,14 \text{ kWh/kg} \\ H_u (u = 20 \%) &= 4,17 \text{ kWh/kg} \end{aligned}$$

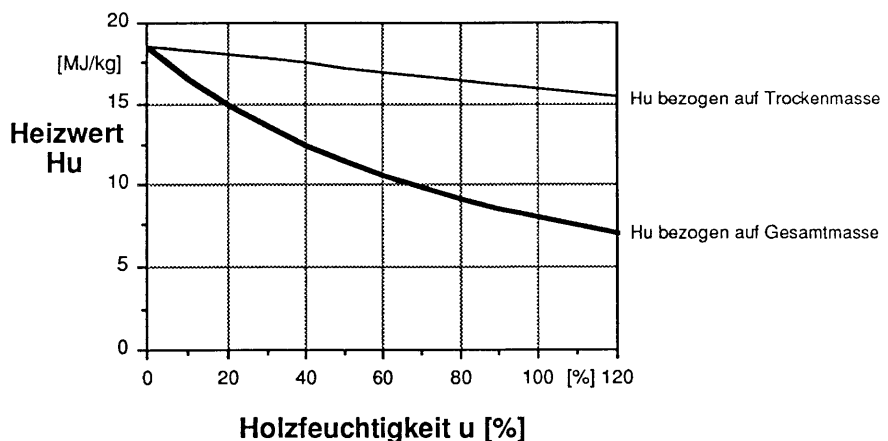


Abbildung 1 Heizwert H_u in Funktion der Holzfeuchtigkeit u .

1.7 Zugeführte Leistung

Die einer Holzfeuerung zugeführte Leistung wird berechnet aus der Brennstoffmenge und dem Heizwert:

$$\dot{Q}_{\text{zugeführt}} = \dot{m}_{\text{Br}} H_u \text{ [kW]} \quad (17)$$

\dot{m}_{Br} = pro Zeit verbrannte Brennstoffmenge [kg/h]

H_u = Heizwert [kWh/kg]

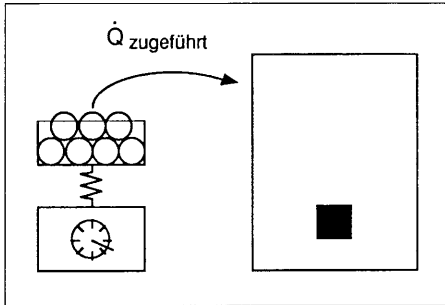


Abbildung 2
Zugeführte Leistung $\dot{Q}_{\text{zugeführt}}$.

Berechnung der zugeführten Leistung aus Brennstoffmenge und Abbranddauer

Die pro Zeiteinheit verbrannte Brennstoffmenge \dot{m}_{Br} kann aus der verbrannten Holzmenge und der Abbranddauer ermittelt werden.

$$\dot{m}_{\text{Br}} = \frac{m_{\text{Charge}}}{t_{\text{Abbrand}}} \text{ [kg/h]} \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{\text{zugeführt}} = \frac{m_{\text{Charge}}}{t_{\text{Abbrand}}} H_u \text{ [kW]} \quad (19)$$

m_{Charge} = Gewicht der Holzcharge [kg]

t_{Abbrand} = Abbranddauer einer Charge [h]

H_u = Heizwert [kWh/kg]

Der Abbrand einer Charge, das ist eine Beschickung mit Holz, beginnt theoretisch beim Anzünden des Streichholzes und er endet mit dem Ausglühen der Holzkohle. Der Beginn der Messung mit dem Anzünden des Streichholzes ist zwar möglich und die Darstellung der Emissionswerte von Beginn an ermöglicht die Veranschaulichung des Prozesses. Eine sinnvolle Auswertung der Emissionsdaten von Beginn des Abbrandes an ist je-

doch schwierig, weil die Abgasmenge nicht von Anfang an das Maximum erreicht. Die Erfassung der Emissionen bis zum Verglühen der Holzkohle ist in der Praxis kaum möglich, da die Gluterhaltung mehrere Stunden dauern kann. Im weiteren nimmt dann im Ausbrand die Abgasmenge wieder ab.

Die alleinige Beurteilung der Schadstoffkonzentration ist nicht sinnvoll, sondern es muß zur Gewichtung der Meßdaten die Abgasmenge kontinuierlich erfaßt werden. Wichtig für die Praxis ist deshalb, daß eine geeignete vereinfachte Auswertung vorgenommen wird, die – unter Inkaufnahme der entsprechenden (tolerierbaren)

Ungenauigkeit – einen Vergleich verschiedener Messungen ermöglicht.

Für eine vereinfachte Auswertung können als Abbruchkriterium zur Mittelwertbildung von Emissionsmessungen verschiedene Kenngrößen verwendet werden. Die wichtigsten sind der CO-Gehalt, der CO₂-Gehalt (oder der Luftüberschuß) sowie die Abgastemperatur. Verbindliche Definitionen der verschiedenen Phasen existieren bisher noch nicht, so daß ein Vergleich verschiedener Messungen häufig nicht möglich ist. Für Klein-Holzfeuerungen wird z. B. folgende Definition der Phasen vorgeschlagen [DIANE 7 1994]:

Beginn Anfeuerphase:	Anzünden des Zündholzes.
Beginn stationäre Phase	Sobald die CO-Emissionen auf einem tiefen Wert stabil sind, d. h.:
(= Ende Anfeuerphase)	CO < 2 g/Nm ³ (bei 13 Vol.-% O ₂), wobei z. B. während > 10 Minuten kein markanter CO-Anstieg erfolgt.
Beginn Ausbrand:	Sobald nach dem Abbrand des Holzes ein stetiger CO-Anstieg erfolgt:
(= Ende stationäre Phase)	CO > 2 g/Nm ³ , ausgenommen bei vorübergehendem CO-Anstieg durch Lochfraß.
Ende Ausbrand	CO ₂ < 2 Vol.-% oder Abgastemperatur < 120 °C, d. h., Abbruch, sobald eine der beiden Bedingungen erfüllt ist.

Umrechnung: 2 g/Nm³ = 0,16 %

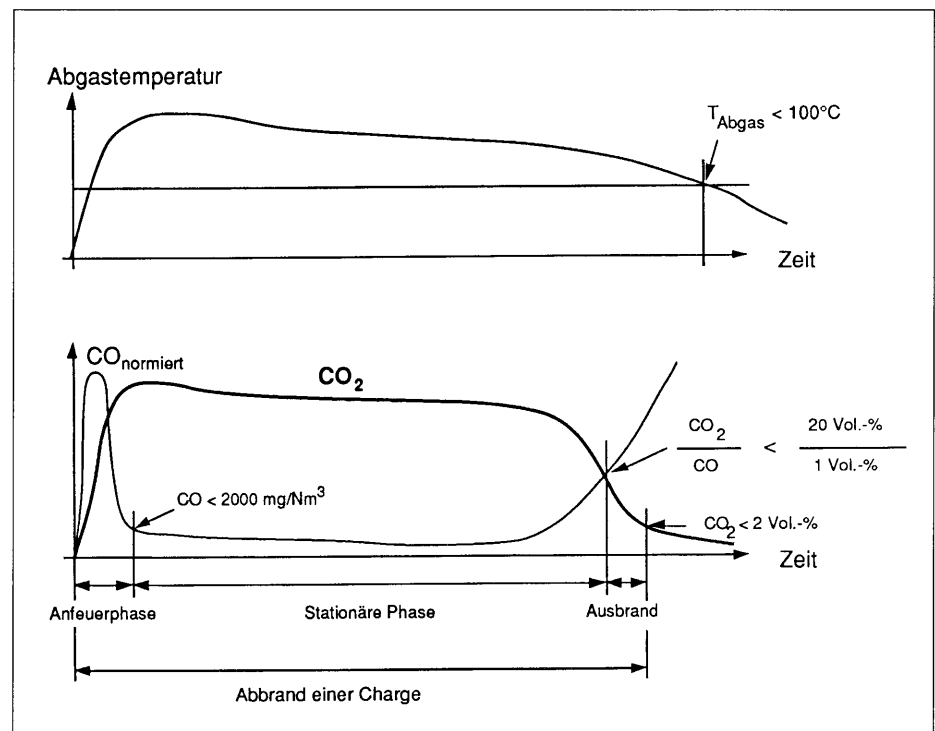


Abbildung 3 Typischer Verlauf des Abbrandes einer Holzcharge und Vorschlag zur Bestimmung der Abbranddauer bei Stückholzkesseln gemäß [DIANE 7, 1994].

Für Stückholzkessel wird auch folgende Definition verwendet [Wagner/Nussbaumer 1994]:

Anfeuerphase, stationäre Phase: wie oben.

Beginn Ausbrand: $\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}} < \frac{20 \text{ Vol.-%}}{1 \text{ Vol.-%}}$

Ende Ausbrand: $\text{CO}_2 < 2 \text{ Vol.-%}$ oder Abgastemperatur $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$ d. h. Abbruch, sobald eine der beiden Bedingungen erfüllt ist.

Die so berechnete zugeführte Leistung entspricht einem Mittelwert über den ganzen Abbrand. Der zeitliche Verlauf der Leistung kann auf diese Weise nicht ermittelt werden, außer wenn die ganze Feuerung auf einer Waage steht und das Gesamtgewicht kontinuierlich erfaßt wird (vgl. hierzu Abb. 3, vorhergehende Textseite).

Berechnung der zugeführten Leistung aus Verbrennungsluftmenge und Luftüberschußzahl

Die pro Zeit verbrannte Brennstoffmenge \dot{m}_{Br} kann aus dem Abgasvolumenstrom und der Luftüberschußzahl ermittelt werden. Sofern bei der Feuerung und im Schornstein keine Falschlucht eintritt, kann anstelle des Abgasvolumenstroms auch die Verbrennungsluftmenge verwendet werden.

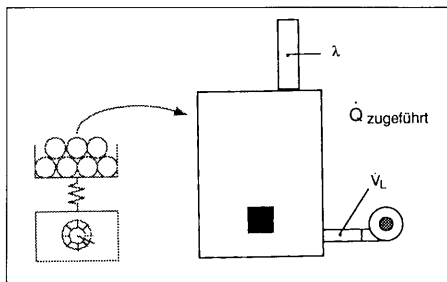


Abbildung 4 Zugeführte Leistung $\dot{Q}_{\text{zugeführt}}$.

$$\dot{m}_{\text{Br}} = \frac{\dot{V}_L}{\lambda \cdot V_{L \text{ min}}} \left(1 + \frac{u}{100}\right) [\text{kg/h}] \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{\text{zugeführt}} = \dot{m}_{\text{Br}} H_u \frac{\dot{V}_L}{\lambda \cdot V_{L \text{ min}}} \left(1 + \frac{u}{100}\right) H_u [\text{kW}] \quad (21)$$

\dot{V}_L	= Verbrennungsluftmenge (Primär- und Sekundärluft)	[Nm ³ /h]
λ	= Luftüberschußzahl	[-]
$V_{L \text{ min}}$	= minimale Verbrennungsluftmenge pro kg trockenes Holz	[Nm ³ /kg]
$V_{L \text{ min}}$	= 4,58 Nm ³ /kg	
u	= Holzfeuchtigkeit, bezogen auf trockenen Brennstoff (atro) [%]	
H_u	= Heizwert [kWh/kg]	

Wenn der Volumenstrom der Verbrennungsluft und die Luftüberschußzahl kontinuierlich gemessen werden, kann daraus der zeitliche Verlauf der zugeführten Leistung während eines Abbrands berechnet werden.

1.8 Abgegebene Leistung

Je nach Feuerungstyp erfolgt die Leistungsabgabe durch Strahlung und Konvektion (Öfen) oder durch Abgabe an einen Heizkreislauf (Zentralheizungsherd, Kessel, Warmwasserensätze). Eine unerwünschte Leistungsabgabe kann zudem durch Verluste erfolgen.

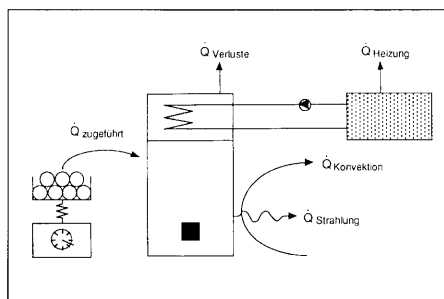


Abbildung 5 Zugeführte und abgegebene Leistung.

Die durch Strahlung und Konvektion abgegebene Leistung ist abhängig von der Wärmeübergangszahl, der Heizfläche sowie der Temperaturdifferenz zwischen Heizfläche und Umgebung. Strahlung und Konvektion

sind meßtechnisch schwierig zu erfassen. Die ans Heizsystem abgegebene Leistung ist abhängig vom Durchfluß und von der Differenz zwischen Vor- und Rücklaufemperatur. Sie wird nach folgender Formel berechnet:

$$\dot{Q}_{\text{Heizkreis}} = (T_{\text{VL}} - T_{\text{RL}}) \frac{c_p \rho_W}{3600} \dot{V}_W [\text{kW}] \quad (22)$$

T_{VL}	= Vorlaufemperatur	[°C]
T_{RL}	= Rücklaufemperatur	[°C]
c_p	= spez. Wärmekapazität von Wasser	[kJ/m ³ K]
ρ_W	= Dichte von Wasser	[kg/m ³]
\dot{V}_W	= Volumenstrom Wasser	[m ³ /h]

1.9 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen der nutzbaren und der zugeführten Leistung. Der Wirkungsgrad kann entweder *direkt* über die abgegebene und zugeführte Leistung bestimmt werden oder *indirekt*, indem die Verluste bestimmt werden.

Direkte Bestimmung des Wirkungsgrads:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{nutzbar}}}{\dot{Q}_{\text{zugeführt}}} 100 [\%] \quad (23)$$

Indirekte Bestimmung des Wirkungsgrads:

$$\eta = 100 - \text{Summe aller Verluste} \quad (24)$$

Bei Holzfeuerungen werden folgende Begriffe verwendet:

- Für alle Feuerungstypen (Öfen und Kessel): ● Feuerungstechnischer Wirkungsgrad.
- Speziell für Kessel: ● Kesselwirkungsgrad, ● Jahresnutzungsgrad.

Feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad η_f wird nach der indirekten Methode bestimmt und beinhaltet die Abgasverluste zusammengesetzt aus:

- thermischen Verlusten durch fühlbare Wärme der Abgase (Menge und Temperatur der Abgase)

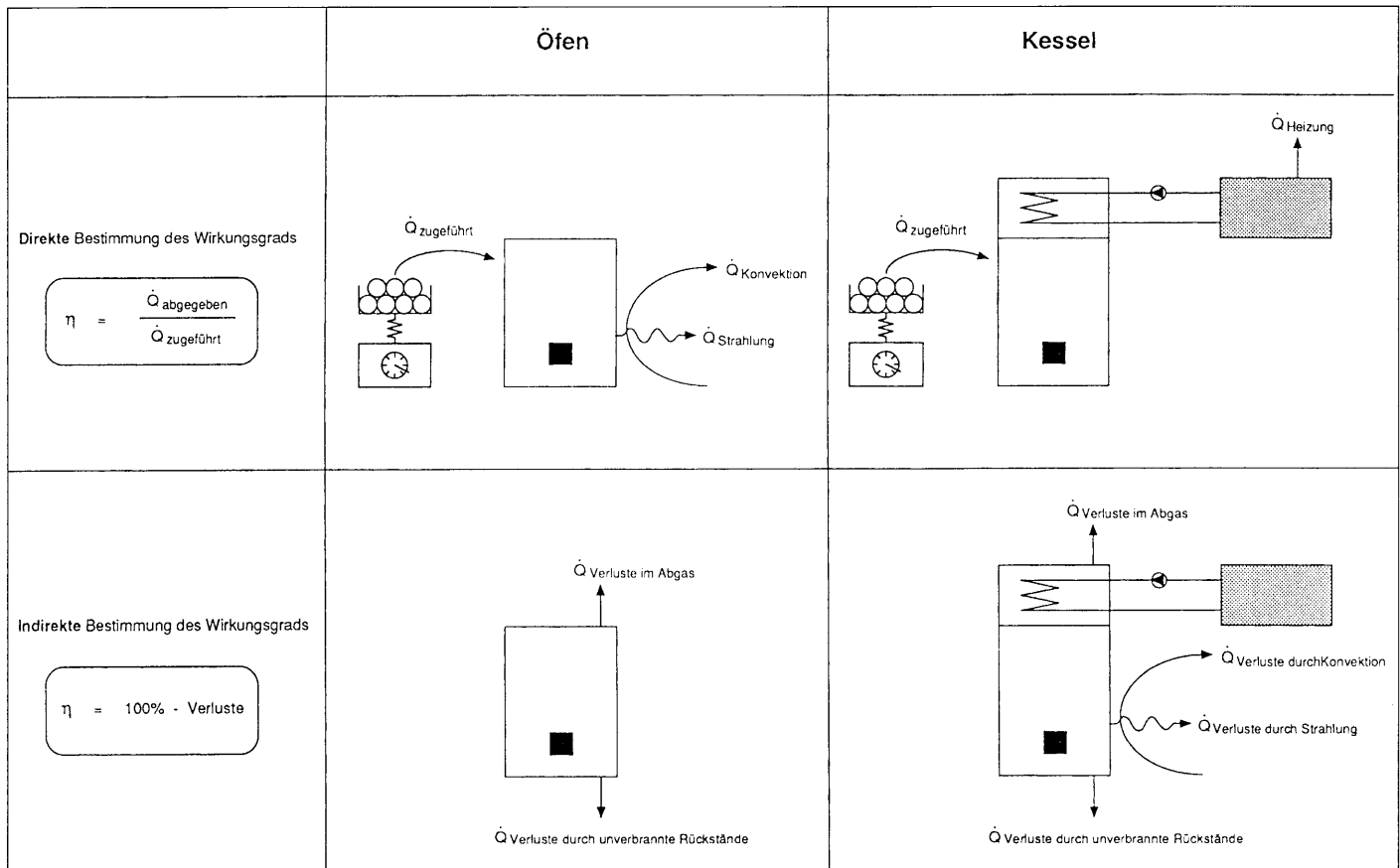


Abbildung 6 Vergleich zwischen direkter und indirekter Bestimmung des Wirkungsgrades.

– chemischen Verlusten durch unvollständige Verbrennung (CO-Gehalt der Abgase).

$$\eta_f = 100 - \text{Abgasverluste} [\%] \quad (25)$$

$$\eta_f = 100 - (V_{\text{therm}} + V_{\text{chem}}) [\%] \quad (26)$$

$$V_{\text{therm}} = \frac{(T_A - T_U) \left\{ (1,39 + \frac{122}{\text{CO}_2 + \text{CO}} + 0,02 u) \right\}}{\frac{H_{u \text{ atro}}}{100} - 0,25 u} [\%] \quad (27)$$

Chemische Verluste V_{chem} :

$$V_{\text{chem}} = \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \frac{11,800}{\frac{H_{u \text{ atro}}}{100} - 0,25 u} [\%] \quad (28)$$

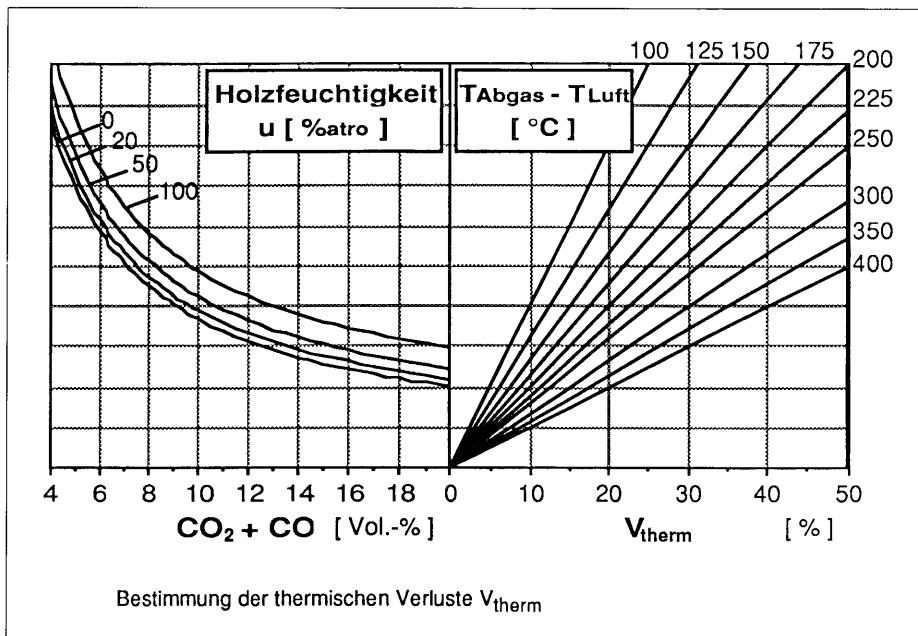
V_{therm} = thermische Verluste durch fühlbare Wärme der Abgase [%]

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

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]

Die thermischen und chemischen Verluste können wie folgt bestimmt werden (vereinfachtes Verfahren nach [Good, Nussbaumer 1993]):

Thermische Verluste V_{therm} :



Kesselwirkungsgrad

Bei Kesseln wird der Kesselwirkungsgrad η_K aus dem Verhältnis von ans Heizsystem abgegebener und zugeführter Leistung bestimmt. Der Kesselwirkungsgrad berücksichtigt:

- Abgasverluste (siehe feuerungstechnischer Wirkungsgrad),
- Strahlungsverluste,
- Rostverluste (unverbrannte Rückstände).

Diese Verluste werden als Betriebsverluste bezeichnet. Bei Feuerungen im Wohnbereich ist die Strahlungswärme kein Verlust, da sie dem Raum nutzbar zugeführt wird.

$$\eta_K = 100 - \text{Betriebsverluste} [\%] \quad (29)$$

Bestimmung nach der direkten Methode:

Bestimmen des Verhältnisses von abgegebener und zugeführter Energiemenge während eines Abbrandes.

Bestimmung nach der indirekten Methode:

Berechnung der Betriebsverluste aus:

- Abgasverlust,
- Strahlungsverlust aus Flächen mal Wärmeübergangskoeffizient a^* (mittlere Oberflächentemperatur – Raumtemperatur),
- Rostverlust (Brennbares in Asche und Rückstand).

Der Kesselwirkungsgrad kann nicht für Öfen angewendet werden.

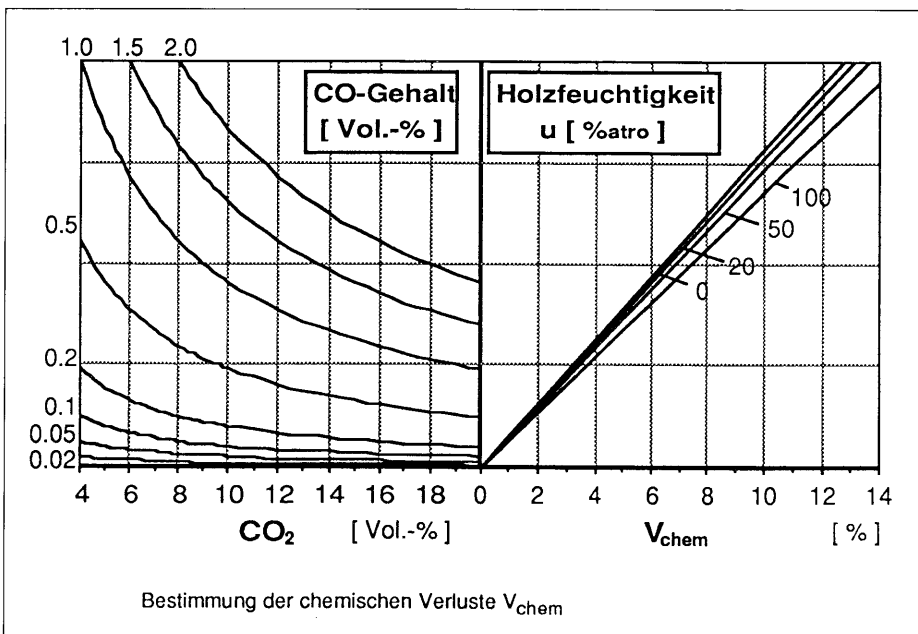


Abbildung 7 Grafische Bestimmung der thermischen und chemischen Abgasverluste.

Jahresnutzungsgrad

Wird über eine ganze Heizperiode die nutzbare und zugeführte Energiemenge erfaßt, kann der Jahresnutzungsgrad bestimmt werden. Er berücksichtigt folgende Verluste:

- Abgasverluste,
- Strahlungsverluste,
- Rostverluste (unverbrannte Rückstände),
- Stillstandsverluste (Auskühlung),
- Verluste von Speicher und Wärmeverteilung.

Der Jahresnutzungsgrad wird nicht nur durch die Feuerung sondern auch durch die Betriebsweise und die Einbettung in das Gesamtsystem beeinflußt. Er wird nach der direkten Methode bestimmt.

Literaturverzeichnis

DIANE 7: Standardauswertungen Meß- und Demoprojekte (Sitzung vom 12. 4. 1994), Paul Schweizer, Liestal 1994.

Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen, Bundesamt für Umweltschutz, 1987.

Luftreinhalte-Verordnung LRV, EDMZ, Bern, Stand 1992.

Schweizerische Richtlinien über die Typenprüfung von Holzheizkesseln, Schweizerische Vereinigung für Holzenergie VHe, Zürich, Juli 1994.

Good, J.: Verbrennungsregelung bei automatischen Holzschnitzelfeuerungen, Diss. ETH Nr. 9771, Zürich 1992

Good, J.; Nussbaumer, Th.: Meßtechnik für Ofenbauer, DIANE 7, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1994, EDMZ Nr. 805.183 d.

Good, J.; Nussbaumer, Th.: Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1993.

Nussbaumer, Th.: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Diss. ETH Nr. 8838, Zürich 1989.

Nussbaumer, Th.: Emissionen von Holzfeuerungen, 2. Auflage, Zürich 1990.

Profos, P.: Handbuch der industriellen Meßtechnik, 4. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1987.

Schönfelder, G.: Das Meßtechnik Kochbuch, IWT-Verlag, 1993.

Tränkle, H.-R.: Taschenbuch der Meßtechnik, 3. Auflage, Oldenbourg-Verlag, 1992.

Wagner, D.; Nussbaumer, Th.: Meßverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1994.

(wird fortgesetzt)

Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche	[m ²]
b	Umgebungsdruck, Barometerstand	[mbar]
c _p	spez. Wärmekapazität von Wasser	[kWh/m ³ K]
D	Durchmesser	[m]
f	Umrechnungsfaktor	[-]
H _u	Heizwert	[kJ/kg], [kWh/kg]
H _{u atro}	Heizwert pro kg absolut trockenens Holz	[kWh/kg], [kWh/kg]
Q̇	Leistung	[kW]
m _{Br}	Brennstoffmenge pro Zeit	[kg/h]
m	Masse	[kg]
Δp	Druckdifferenz	[mbar]
t	Zeit	[h]
T _A	Abgastemperatur	[°C]
T _{GU}	Temperatur der Gasuhr	[°C]
T _L	Lufttemperatur	[°C]
T _{RL}	Rücklauftemperatur	[°C]
T _{VL}	Vorlauftemperatur	[°C]
T _U	Umgebungstemperatur	[°C]
u	Holzfeuchtigkeit bezogen auf absolut trockenes Holz	[%]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
Ṡ _{AG}	Abgasvolumenstrom	[m ³ /h]
Ṡ _{AG N}	Abgasvolumenstrom bei Normbedingungen	[Nm ³ /h]
Ṡ _L	Verbrennungsluftmenge pro Zeit	[Nm ³ /h]
Ṡ _W	Volumenstrom Wasser	[m ³ /h]
V _{chem}	Chemische Verluste	[%]
V _{GU}	Abgasvolumen bei Gasuhr	[m ³]
V _n	Normvolumen	[Nm ³ /kmol]
V _{therm}	Thermische Verluste	[%]
w	Wassergehalt	[%]
λ	Luftüberschußzahl Lambda	[-]
η	Wirkungsgrad	[%]
η _f	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	[%]
η _K	Kesselwirkungsgrad	[%]
ρ	Gasdichte	[kg/m ³]
O ₂	Sauerstoff	
CLD	Chemilumineszenz-Detektor	
CO	Kohlenmonoxid	
CO ₂	Kohlendioxid	
EMPA	Eidgenössische Materialprüfanstalt	
FID	Flammenionisations-Detektor	
HC, KW	Kohlenwasserstoffe	
IR	Infrarot	
LRV	Luftreinhalte-Verordnung	
NO	Stickstoffmonoxid	
NO ₂	Stickstoffdioxid	
NO _x	Stickoxide (Sammelbegriff für die Summe von NO und NO ₂)	
SO ₂	Schwefeldioxid	□

Meßtechnik für Ofenbauer

Fortsetzung aus Heft 6/95. Der Teil 2 des Beitrags geht auf Meßgeräte und -methoden ein. Redaktion.

Dr.-Ing. Thomas Nussbaumer,
Dr.-Ing. Jürgen Good *)

Meßgrößen, Meßtechnik

2.1 Meßgrößen zur Bestimmung der Kenngrößen

Zur Bestimmung der Kenngrößen einer Holzfeuerung nach Teil 1 des Beitrags sind die in Tabelle 1 aufgeführten Meßgrößen erforderlich.

*) Verenum, Ingenieurbüro für Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik, CH-8006 Zürich.

2.2 Messung der Abgaszusammensetzung Probenahme

Für die Probenahme sind gerade Kanalabschnitte mit konstantem Querschnitt geeignet. Wegen Entmischungsvorgängen sind insbesondere bei Staubmessungen vertikale Kanäle vorzusehen. Die geraden Kanalabschnitte sollen mindestens folgende Längen aufweisen (D ist der Kanaldurchmesser, vgl. Abb. 1):

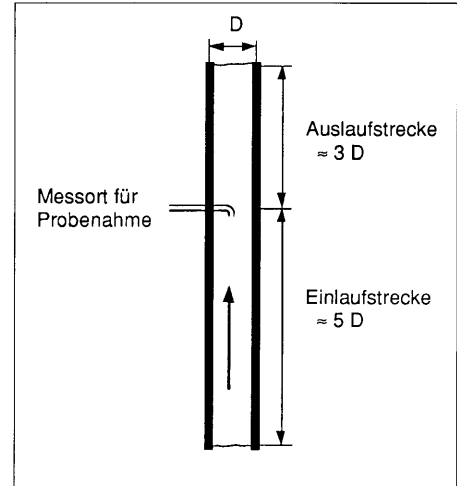


Abb. 1 Meßort im Abgaskanal.

Kenngrößen			Leistung			Wirkungsgrad		Lambda	Emissionen				Brennstoff		
			\dot{Q}_{zu}	\dot{Q}_{zu}	\dot{Q}_{ab}	η_f	η_K	λ	CO	HC	NO _x	Staub	u	w	H _U
Messgrößen			kW	kW	kW	%	%	-	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	%	%	kJ/kg od. kWh/kg
Abgas- kompo- nenten	O ₂ oder CO ₂	Vol.-%		x		x		x	x	x	x				
	CO	ppm		(x)		(x)		x	x						
	HC	ppm								x					
	NO _x	ppm									x				
	H ₂ O	Vol.-%								(x)*					
	Staub	mg										x			
Tempe- raturen	T _{AG}	°C				x									
	T _L	°C				x									
	T _{Flamm}	°C													
	T _{VL}	°C			x		x								
	T _{RL}	°C			x		x								
Durch- fluss	\dot{V}_W	m ³ /h			x		x								
	\dot{V}_L	m ³ /h		x											
Masse	m Holz	kg	x	x		x	x			(x)*			x	x	x
	m Holz atro	kg	x	x		x	x			(x)*			x	x	x
	m Charge	kg	x				x								
Zeit	t Abbrand	h	x												

* HC: Messung im feuchten Abgas bei T≈180 °C, Umrechnung Abgas feucht auf Abgas trocken notwendig

Entweder Messung H₂O-Gehalt im Abgas oder Berechnung mittels Kenntnis von u und λ

Tabelle 1 Kenngrößen mit zugehörigen Meßgrößen.

- Einlaufstrecke (vor dem Meßort) $\geq 5 D$,
- Auslaufstrecke (nach dem Meßort) $\geq 3 D$.

Desweiteren ist dafür zu sorgen, daß zwischen Feuerung und Meßort keine Falschluf durch Ritzen und Spalten in den Abgaskanal gelangt. Die Größe der Meßöffnung im Abgaskanal hängt von den verwendeten Meßgeräten ab.

Gasförmige Komponenten

Für kontinuierliche Emissionsmessungen über mehrere Stunden werden folgende Komponenten benötigt (vgl. Abb. 2):

- Grobfilter (im Schornstein oder außenliegend und beheizt),
- Meßgasleitung (für HC-Messung, beheizt auf 180 °C),
- Gaskühler (Gastrocknung durch Abkühlen auf +5 °C),
- Pumpe, evtl. Durchflußanzeige,
- Feinfilter,
- Analysegeräte.

Meßgeräte

Infrarot-Messung

Für Abnahme- und Emissionsmessungen an Holzfeuerungen werden vor allem Infrarot-Meßgeräte (IR bzw. NDIR) verwendet. Das Meßprinzip beruht auf der Absorption***) von Infrarotstrahlung durch die zu messen-

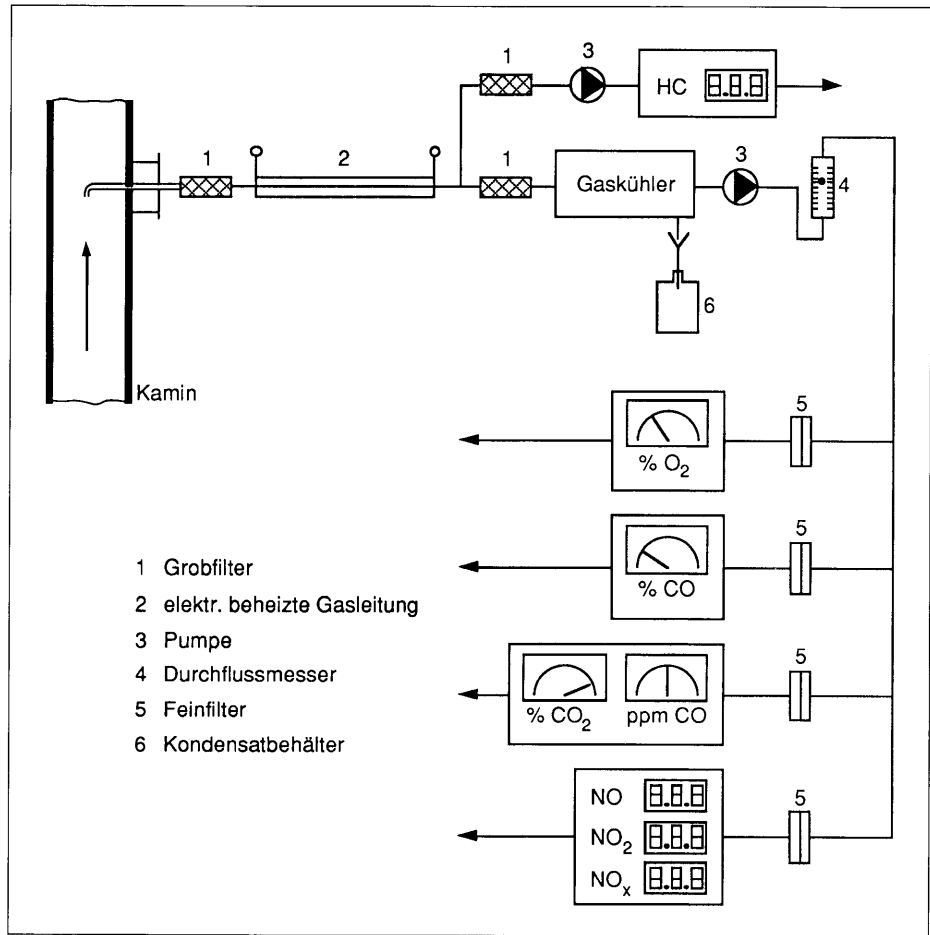


Abb. 3 Erweiterte Emissionsmeßanlage für Holzfeuerung zur Messung von: CO₂, Meßbereich 0-20 Vol.-%; CO, Meßbereich 0-2 Vol.-% bzw. 0-20 000 ppm; HC, Meßbereiche 0 bis jeweils 1, 10, 100, 1000 oder 10 000 ppm (HC-Messung erfolgt im heißen und feuchten Abgas); NO, Meßbereiche 0 bis jeweils 10, 100 oder 1000 ppm; sowie für NO₂ oder NO_x (= Summe aus NO + NO₂), gleiche Meßbereiche in ppm einstellbar.

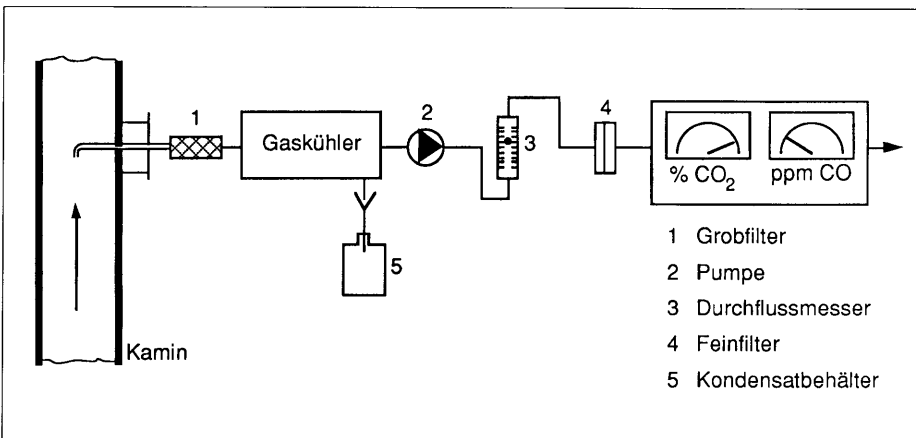


Abb. 2 Einfache Emissionsmeßanlage für Holzfeuerungen. CO₂ in Vol.-%, Meßbereich 0-20 %; CO in ppm, Meßbereich 0-20 000 ppm.

den Gaskomponenten. Für jede Gaskomponente existiert ein charakteristischer Bereich der Wellenlänge, bei dem das Meßgas die infrarote Strahlung (IR) absorbiert. IR-Meßgeräte können unterschiedliche Meßbereiche haben; sie sind genau und wenig

querempfindlich, das heißt, andere Gaskomponenten stören die Messung in der Regel nicht. Allerdings muß das Meßgas zur Verhinderung von Ablagerungen gefiltert und getrocknet werden.

Eine erweiterte Emissionsmeßanlage und deren Meßbereiche zeigt die Abbildung 3.

- Gase: CO₂, CO, HC, NO, CH₄, SO₂ und weitere.
- Einsatzgebiet: Abnahmemessung, Forschung und Entwicklung.

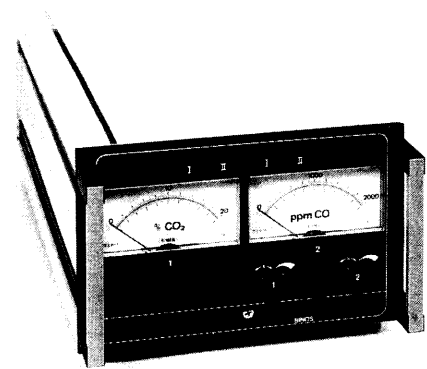


Abb. 4 Infrarotmeßgerät für CO₂ und CO.

- Bedienung: Kalibrierung und Meßgasaufbereitung ist erforderlich.
- Preisklasse: 5000 DM bis 7000 DM pro Gaskomponente (ohne Gasaufbereitung).

**) Das In-sich-Aufnehmen

Sauerstoffmessung

In einem Magnetfeld richten sich Sauerstoffmoleküle wie Kompaßnadeln aus. Sauerstoff ist ein Gas mit sogenannten paramagnetischen***) Eigenschaften. Dieser Effekt läßt sich messen. Die entsprechenden Meßgeräte sind sehr genau und haben variable Meßbereiche, sie reagieren jedoch empfindlich auf Verschmutzung und Erschütterungen.

- Einsatzgebiet: Abnahmemessung, Forschung und Entwicklung.
- Bedienung: Kalibrierung und Messgasaufbereitung ist erforderlich.
- Preisklasse: 5000 DM bis 10 000 DM (ohne Gasaufbereitung).

Ein anderes Meßprinzip benutzt die Eigenschaften des Zirkonoxids. Dieser keramische Halbleiter ist bei Temperaturen über 500 °C leitend für Sauerstoff-Ionen. Entsprechend der Sauerstoffkonzentration entsteht eine meßbare Spannung. Dieses Meßprinzip zeichnet sich aus durch sehr kurze Ansprechzeit und es benötigt keine Messgasaufbereitung. Die Lambda-Sonde (Abb. 5), die in jedem Fahrzeug mit Katalysator eingebaut ist, beruht auf diesem Prinzip.

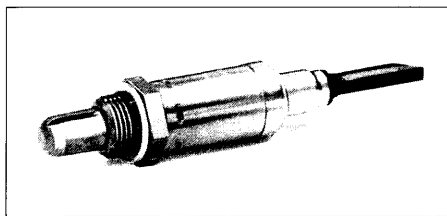


Abb. 5 Lambda-Sonde

- Einsatzgebiet: Entwicklung, Feuerungsüberwachung, Verbrennungsregelung.
- Bedienung: nach der Montage ist die Sonde bedienungsfrei.
- Preisklasse: Meßgeräte 1000 DM bis 3000 DM, Lambda-Sonde allein: 100 DM bis 200 DM.

Flammenionisations-Detektor (FID)

Zur Messung von Kohlenwasserstoffen (KW oder HC) wird – neben IR-Geräten – auch der Flammenionisationsdetektor FID verwendet. Bei diesem Meßgerät werden in einer Wasserstoffflamme die Verbindungen zwischen den Wasserstoff- und Kohlenstoffmolekülen aufgebrochen. Die Anzahl geöffneter Verbindungen erlaubt Rückschlüsse auf die Kohlenwasserstoffkonzentration. Bei diesem Ver-

fahren muß das Meßgas heiß bzw. feucht analysiert werden, die Meßgasleitung muß deshalb auf ca. 180 °C beheizt sein.

- Einsatzgebiet: Abnahmemessung, Forschung und Entwicklung.
- Bedienung: Kalibrierung und Messgasaufbereitung mit Brenngas (H₂) ist erforderlich.
- Preisklasse: 30 000 DM (ohne Gasaufbereitung).

Chemilumineszenz-Detektor (CLD)

Zur Messung der Stickoxide NO_x wird der Chemilumineszenzdetektor****) verwendet. Bei diesem Verfahren werden die NO-Moleküle durch Ozon in einen angeregten Zustand befördert. Die angeregten Moleküle fallen wieder in den Grundzustand zurück und geben dabei die meßbare sogenannte Lumineszenzstrahlung ab.

- Einsatzgebiet: Entwicklung und Forschung, Abnahmemessung.
- Bedienung: hohe Ansprüche (Kalibrieren, Messgasaufbereitung).
- Preisklasse: 30 000 DM (ohne Gasaufbereitung).

Meßgeräte mit elektrochemischen Meßzellen

Für Abgaskontrollen bei Öl- und Gasfeuerungen gibt es verschiedene tragbare Meßgeräte, die teilweise auch bei Holzfeuerungen eingesetzt werden können. Diese Meßgeräte (Abb. 6) haben elektrochemische Meßzellen für O₂ und CO, als Option sind auch Zellen für NO, NO₂, SO₂ und weitere Gase erhältlich. Die Meßzellen unterliegen Alterungsprozessen und können durch zu hohe Konzentrationen „Vergiftungs-“ oder Sättigungsercheinungen zeigen. Sie müssen des-

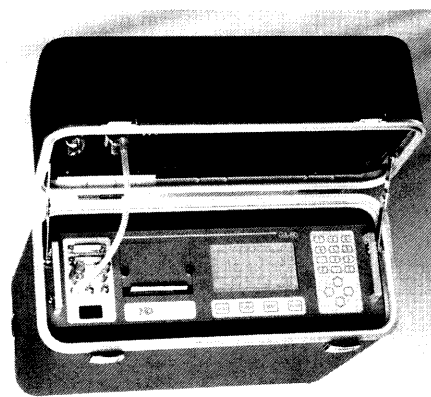


Abb. 6 Tragbares Emissionsmeßgerät mit elektrochemischen Zellen.

halb periodisch, je nach Einsatzdauer mindestens alle ein bis zwei Jahre, ersetzt werden.

Diese Meßgeräte sind teilweise mit Temperaturfühlern, Unterdruck- und Rußmessung ausgestattet. Sie sind bedienungsfreundlich und führen einfache Berechnungen und Normierungen selbsttätig durch. Sie sind mit einer Display-Anzeige und teilweise auch mit einem kleinen Drucker ausgerüstet. Ohne geeignete Messgasaufbereitung (Filter, Gaskühler) können diese Geräte bei Holzfeuerungen nur kurzzeitig (z. B. eine Minute Meßdauer) eingesetzt werden. Das Messen bei hohen CO-Konzentrationen, wie sie nach dem Anfeuern vorkommen, sollte vermieden werden.

- Einsatzgebiet: Kontrollmessungen, kurzfristige Beurteilung.
- Bedienung: Einfach, einschalten

***) den Magnetismus verstärkend durch größere Dichte magnetischer Kraftlinien.

****) durch chemischen Vorgang hervorgerufen Leuchten, „Glühwürmchen-Effekt“

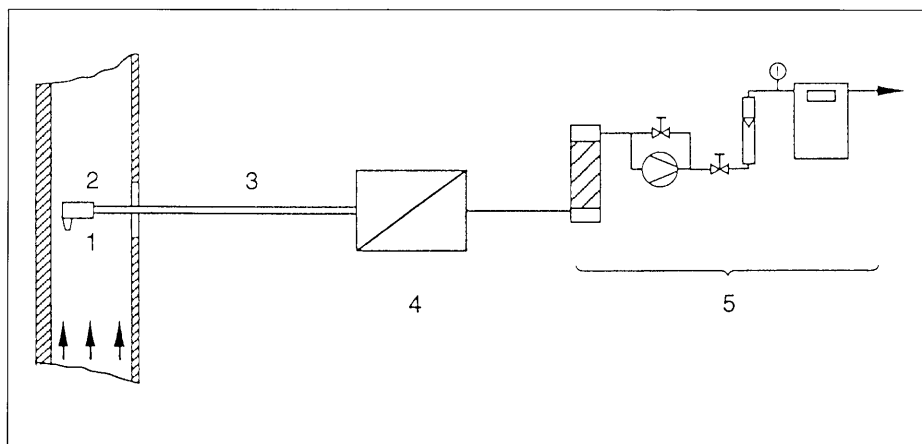


Abb. 7 Schematischer Aufbau der Probenahme-Einrichtung mit innenliegendem Filter. 1 = Entnahmesonde, 2 = Filterkopf und Krümmer, 3 = Absaugrohr, 4 = Kühler mit Kondensatgefäß, 5 = Trockenturm, Pumpe, Rotameter, Gasuhr.

und messen, periodische Kontrolle der Meßzellen.

– Preisklasse: ab ca. 3000 DM bis 20 000 DM (ohne Meßgasaufbereitung).

Feststoffe

Zur Bestimmung des Feststoffgehalts wird dem Abgas ein Teilvolumenstrom isokinetisch entnommen, d. h., die Absauggeschwindigkeit in der Entnahmesonde ist gleich der Abgasgeschwindigkeit. Die Feststoffe werden auf einem Meßfilter abgeschieden und anschließend gewogen. Gleichzeitig wird mit einer Gasuhr das Volumen des abgesaugten Abgases bestimmt. Das Gewicht der abgeschiedenen Feststoffe wird durch das Abgasvolumen dividiert und auf die Bezugsgröße (z. B. 13 Vol-% O₂) normiert. – Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau einer Meßanordnung.

2.3 Temperaturmessung

Zur Messung von Temperaturen werden folgende Meßprinzipien verwendet:

– Mechanische Thermometer: Sie beruhen auf der Ausdehnung von Flüssigkeiten oder Metallen bei zunehmender Temperatur und sind geeignet für eine direkte Anzeige des Meßwertes. Beispiele sind das Quecksilberthermometer und das Bimetallthermometer.

– Widerstandsthermometer: Der elektrische Widerstand eines Metalls oder Halbleiters ändert sich mit der Temperatur. Platinfühler, sogenannte PT 100, werden wegen ihres großen Meßbereichs (–220 °C bis +600 °C) und ihrer hohen Genauigkeit z. B. bei Wärmezählern verwendet.

– Thermoelemente: Bei Thermoelementen sind zwei unterschiedliche Metalldrähte (z. B. Nickel und Nickel-Chrom) an einem Ende zusammen gelötet. Je nach der Temperatur an der Lötstelle entsteht am anderen, offenen Ende der Drähte die sogenannte Thermospannung; sie ist sehr klein. Der Meßbereich von Thermoelementen hängt von den verwendeten Metallen ab. Das Thermoelement Typ K hat einen Meßbereich von –200 °C bis +1300 °C. Thermometer oder Multimeter mit Digitalanzeige sind ab ca. 150 DM erhältlich (Abb. 8).

– Strahlungsthermometer: Jede Oberfläche gibt im infraroten Bereich Wärmestrahlung ab. Die Wärmestrahlung

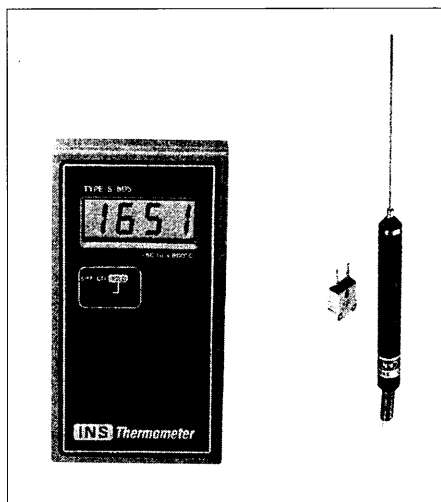


Abb. 8 Temperaturmeßgerät für Thermoelement mit Digitalanzeige.

wird von Infrarot-Detektoren gemessen und auf eine Temperatur umgerechnet. Diese Meßmethode ist geeignet für die Messung von Oberflächentemperaturen und erlaubt eine berührungsfreie Temperaturmessung über eine größere Entfernung. Allerdings besteht das Risiko von Fehlern bei ungenügender Kenntnis der Oberflächenbeschaffenheit und durch Nebeneffekte im Meßgerät. Kosten: ca. 1000 DM bis 3000 DM.

2.4 Durchflußmessung

Die Messung des Durchflusses von Flüssigkeiten ist vor allem bei Wärmezählern für Heizkessel von Bedeutung. Zum Einsatz kommen Flügelradzähler, Geräte mit magnetisch-induktivem Meßprinzip sowie mit Ultraschall.

Zur Bestimmung des Volumensstroms von Gasen wird die Strömungsgeschwindigkeit gemessen und mit dem Kanalquerschnitt multipliziert. Folgende Meßprinzipien werden verwendet:

– Prandtl-Staurohr (Staudruckverfahren, Abb. 9): Das Prandtl-Staurohr erfaßt die Druckdifferenz zwischen dem Staudruck an der Sondenspitze und dem statischen Druck an den seitlichen Öffnungen der Sonde. Aus der Druckdifferenz Δp läßt sich direkt die Strömungsgeschwindigkeit v berechnen:

$$v = \sqrt{\frac{200 \Delta p}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (30)$$

Δp = Druckdifferenz [mbar]

ρ = Gasdichte [kg/m³]

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Luft}} \text{ bei } 0 \text{ }^\circ\text{C} &= 1,27 \text{ kg/m}^3, \\ &\text{ bei } 100 \text{ }^\circ\text{C} = 0,93 \text{ kg/m}^3, \\ &\text{ bei } 200 \text{ }^\circ\text{C} = 0,74 \text{ kg/m}^3, \\ &\text{ bei } 300 \text{ }^\circ\text{C} = 0,61 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

Zur Messung der Druckdifferenz wird ein Druckmeßgerät benötigt. Die Gasdichte ändert allerdings in Abhängigkeit der Temperatur und der Abgaszusammensetzung. In erster Näherung kann für Heizgase von Holz die Dichte von Luft verwendet werden.

– Preisklasse: Staurohr ca. 300 DM, Druckmeßgerät: Schrägrohrmanometer ca. 400 DM, elektronisches Feindruckmeßgerät ca. 5000 DM.

– Flügelrad-Anemometer: Das Flügelrad wird von der Strömung in Drehung versetzt. Die Umfangsgeschwindigkeit ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und hängt zudem von der Dichte des Gases ab. Die Übertragung der Drehzahl erfolgt optisch. Die Reibung des Flügelrades führt dazu, daß es erst bei Geschwindigkeiten über 0,3 m/s zu drehen beginnt. Dies

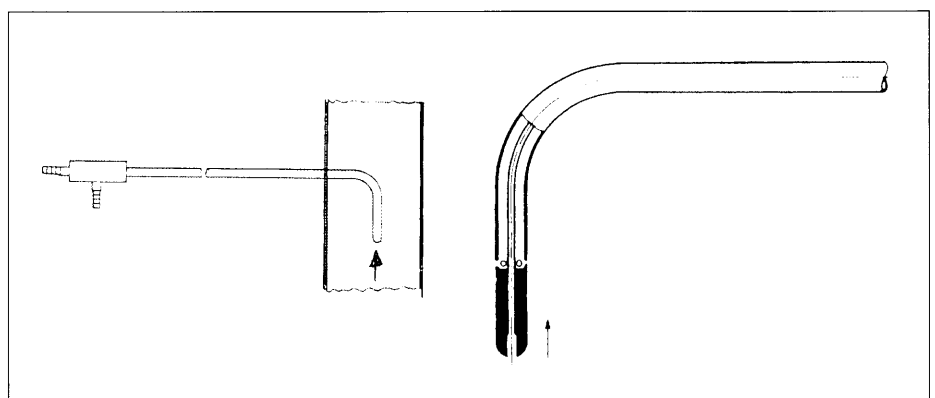


Abb. 9 Prandtl-Staurohr

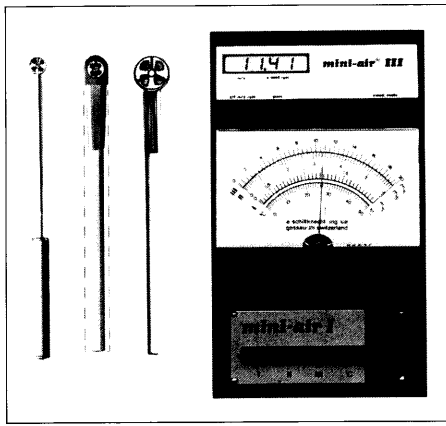


Abb. 10 Flügelrad-Anemometer mit verschiedenen Meßköpfen.

kann bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten zu großen Meßfehlern führen. Die Sonde darf wegen Verschmutzungsgefahr nicht oder nur kurz im Abgas eingesetzt werden. Eine Temperaturmessung ist häufig integriert.

- Meßbereich: 0,3 m/s bis 100 m/s.
- Preisklasse 1500 DM bis 3000 DM.

- Hitzdraht-Anemometer: Ein elektrisch beheizter Platindraht, dessen Widerstand temperaturabhängig ist, wird durch das an ihm vorbeiströmende Gas abgekühlt. Die Wärmeabgabe an das Gas hängt ab vom Unterschied zwischen der Temperatur des Platindrahtes und der Gastemperatur. Hält man den Widerstand des Platindrahtes durch Nachregeln der Heizspannung konstant, dann ist die Heizspannung ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Das Meßprinzip ist sehr exakt und für kleine Strömungsgeschwindigkeiten bis 5 m/s gut geeignet. Meist ist eine Temperaturmessung integriert (Abb. 11).

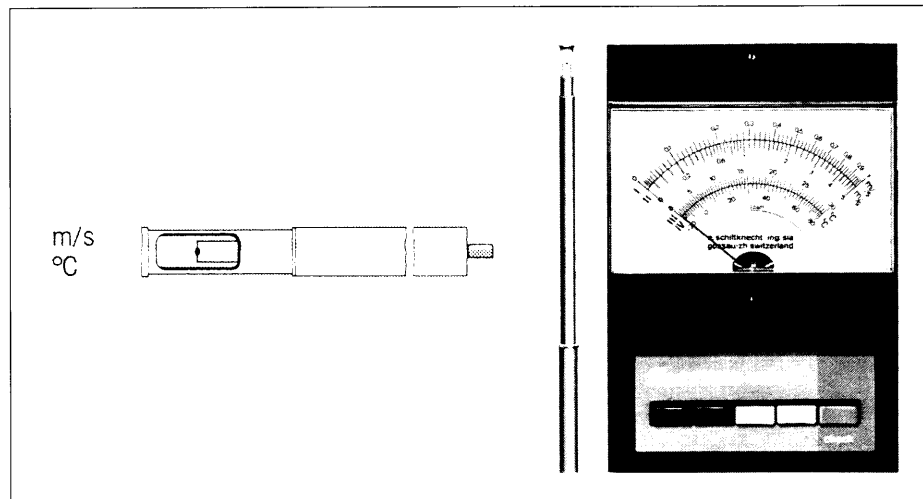


Abb. 11 Hitzdraht-Anemometer. Links, vergrößert, die Sondenspitze mit der punktförmigen Lötstelle.

Beispiel: Bestimmung des Abgasvolumenstroms.

Meßgrößen: $\Delta p = 0,5 \text{ mmWS} = 0,05 \text{ mbar}$, gemessen mit Prandtl-Staurohr, als Mittelwert von mehreren über den Querschnitt verteilten Meßpunkten. $T_{AG} = +200 \text{ }^\circ\text{C}$, gemessen mit Thermoelement, $D = 0,20 \text{ m}$, Innendurchmesser des Abgaskanals.

Berechnungen:
Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{200 \Delta p}{\rho}} \quad [\text{m/s}]$$

Mit der Annahme ρ_{Luft} bei $200 \text{ }^\circ\text{C} = 0,74 \text{ kg/m}^3$ folgt:

$$v = \sqrt{\frac{200 \cdot 0,05}{0,74}} = 3,7 \text{ m/s}$$

Volumenstrom bei T_{AG} :
 $\dot{V}_{AG} = v \cdot A \cdot 3600 \quad [\text{m}^3/\text{h}]$

$$\text{mit } A = \frac{\pi D^2}{4} = 0,031 \text{ m}^2$$

wird $\dot{V}_{AG} = 413 \text{ m}^3/\text{h}$.

Volumenstrom bei Normbedingungen ($T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$\dot{V}_{AG-N} = \dot{V}_{AG} \frac{273}{273 + T_{AG}} \quad [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

$$= 413 \frac{273}{273 + 200} \quad [\text{Nm}^3/\text{h}]$$

$$\dot{V}_{AG-N} = 238 \text{ Nm}^3/\text{h}.$$

- Meßbereich: bis 5 m/s,
- Preisklasse: ca. 3000 DM.

- Grundsätzliches: Die Meßmethoden mit Prandtl-Staurohr, Flügelrad- und Hitzdrahtanemometer liefern die Strömungsgeschwindigkeit nur in einem Punkt. In einem Kanal bildet die Strömung jedoch ein Geschwindigkeitsprofil (vgl. Abb. 12). Um eine mittlere Geschwindigkeit zu erhalten, muß (z. B. im Abgaskanal) an mehreren Orten gemessen und dann gemittelt werden.

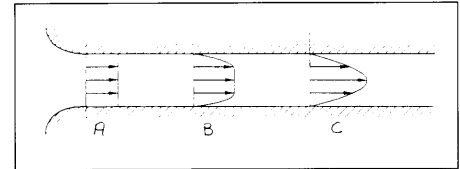


Abb. 12 Geschwindigkeitsprofil in einem Kanal. A: $v_{\text{mittel}} = v_{\text{max}}$; B: $v_{\text{mittel}} \approx 0,8 v_{\text{max}}$; C: $v_{\text{mittel}} = 0,5 v_{\text{max}}$.

2.6 Schornsteinzug

Bei automatischen Holzfeuerungen wird der Unterdruck im Feuerraum überwacht und durch Variation der Drehzahl des Abgasventilators geregelt. In einem Drucksensor wird eine Membrane durch die Druckdifferenz bewegt. Die Auslenkung der Membrane wird in ein elektrisches Signal umgesetzt, das für die Regelung des Unterdrucks benützt wird.

Zur manuellen Messung des Unterdrucks im Brennraum oder im Schorn-

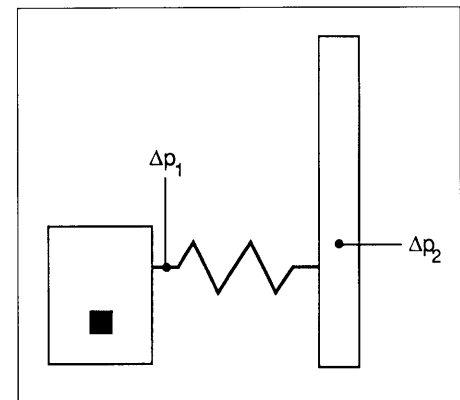


Abb. 13 Druckmessung oder Messung der Druckdifferenz zwischen zwei Meßorten. Links der Feuerraum, rechts der Schornstein, dazwischen die Züge (Nachheizfläche). $\Delta p_1 =$ notwendiger Förderdruck für Verbrennungslufttherbeiführung und Feuerraum (Druckdifferenz gegenüber Umgebung vor den Abgaszügen); $\Delta p_2 = \Delta p_1 -$ Förderdruck der Züge (Druckdifferenz gegenüber Umgebung nach Abgaszügen), zur Verfügung stehender Schornsteinzug. $\Delta p_{\text{Züge}} = \Delta p_1 - \Delta p_2$, Druckabfall über den Verlauf der Abgaszüge.

stein kann z. B. ein Schrägrohrmanometer oder ein Differenzdruckmeßgerät mit optischer Anzeige benützt werden. Die meisten tragbaren Emissionsmeßgeräte verfügen über einen Differenzdruckmesser.

2.7 Brennstoffparameter

Wassergehalt

Zur Bestimmung des Wassergehalts bzw. der Holzfeuchtigkeit*****) wird

*****) vgl. Fachartikel in den Heften 6/95 und 1/96.

eine Brennstoffprobe gewogen, anschließend getrocknet und erneut gewogen. Die Trocknung kann in einem Ofen bei einer Temperatur von ca. 110 °C erfolgen. Aus der Differenz zwischen feuchter und trockener Probe wird die Holzfeuchtigkeit oder der Wassergehalt berechnet.

Feuchtemeßgeräte können den Wassergehalt für verschiedenste Materialien (Holz, Papier, Sand etc.) bestimmen. Der Wassergehalt muß aus dem angezeigten Wert mit Hilfe von Tabellen oder empirischen Bezugswerten berechnet werden.

Umrechnung des Schornsteinzuges:
10 mmWS = 1 mbar = 100 Pa

Heizwert

Für eine exakte Bestimmung des Heizwertes wird eine Brennstoffprobe in einem Kalorimeter verbrannt und die freigesetzte Energiemenge gemessen. Sofern dies nicht nicht möglich ist, kann der Heizwert bei Kenntnis der Holzfeuchtigkeit nach Gleichung (15) berechnet werden.

(Schluß folgt) □

Meßtechnik für Ofenbauer

Fortsetzung aus Heft 1/96. In diesem Teil interpretieren die Autoren Meßergebnisse und definieren Anforderungen an das Meßprotokoll. Es ist zu beachten, daß es vielerlei unterschiedlicher Vorgaben und Anforderungen in den einzelnen Ländern Europas gibt.

Dr.-Ing. Thomas Nussbaumer,
Dr.-Ing. Jürgen Good*)

Red.
dert: Anfeuerphase, stationäre Phase, Ausbrandphase (Bild 1).

3. Darstellung und Interpretation der Kenngrößen

3.1 Zeitlicher Verlauf

Die Darstellung der Kenngrößen (λ = Luftüberschußzahl, CO-Gehalt, Temperaturen, Leistung etc.) in Funktion der Zeit enthält eine Fülle von Informationen über den gemessenen Abbrand. Der Abbrand wird in drei typische Verbrennungsphasen geglie-

– **Anfeuerphase:** Die CO-Emissionen sind zu Beginn hoch und sinken ab, sobald die Verbrennungstemperatur steigt bzw. die Luftüberschußzahl sinkt.

– **Stationäre Phase:** Die CO-Emissionen sind in der Regel auf einem tiefen Niveau. Das Auftreten von Emissionsspitzen deutet darauf hin, daß zeitweise Luftmangel entsteht. Beim Nachlegen von Brennstoff treten ebenfalls kurzfristig Emissionsspitzen auf.

– **Ausbrandphase:** Die Ausbrandphase beginnt, wenn das Holz vollständig entgast ist, d. h., wenn in der Feuerung nur noch Holzkohle vorhanden ist, die langsam und unter Abgabe von

CO verglüht. Dabei sinkt der CO₂-Gehalt, während der CO-Gehalt im Abgas ansteigt.

In der Ausbrandphase steigt zwar der CO-Gehalt an, gleichzeitig nimmt jedoch der Abgasvolumenstrom ab – die CO-Konzentration ist zwar hoch, aber die Abgasmenge klein. Die Abgastemperatur sinkt bei Öfen mit großer Wärmespeicherung langsam ab. Die Ausbrandphase endet mit dem Verglühen der Holzkohle.

3.2 Mittelwerte

Der Zeitverlauf einer Kenngröße gibt Informationen über den Ablauf der Verbrennung. Um mehrere Versuche an einem Ofen oder Versuche an verschiedenen Öfen miteinander vergleichen zu können, werden die Zeitverläufe gemittelt. Wichtig ist dabei das korrekte Vorgehen von Mittelwertbildung und Normierung wie folgt:

*) Anschrift siehe Teile 1 und 2

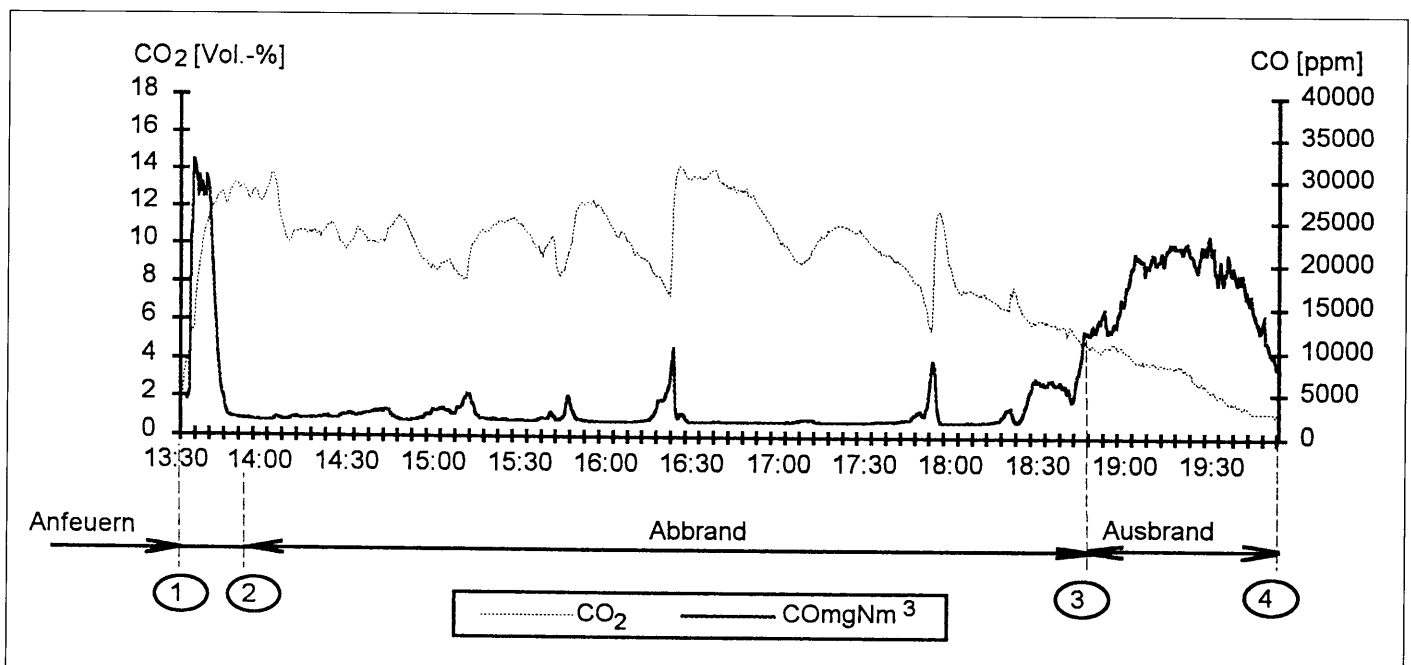


Bild 1: Typischer Zeitverlauf der CO₂- und CO-Konzentration. Beginn und Ende der einzelnen Phasen gemäß Kapitel 1.7, Vorschlag [Wagner/Nussbaumer 1994].

1. Meßwerte mitteln.
2. Anschließend Berechnungen und Normierung durchführen.

Bei einem Mittelwert ist es wichtig zu wissen, ob über den ganzen Abbrand oder nur über eine bestimmte Verbrennungsphase gemittelt wurde. Bei der Mittelwertbildung geht ein Teil der Information des Zeitverlaufs verloren: Aus dem Mittelwert geht nicht hervor, ob der Verbrennungsverlauf stabil war oder ob die Verbrennung zeitweise sehr gut war mit einzelnen Emissionsspitzen (Bild 2).

Bemerkungen

- **Abnahmemessung:** Bei einer Abnahmemessung, bei der die Einhaltung der Grenzwerte überprüft wird, ist der Mittelwert, z. B. über eine halbe Stunde bei Nennlast, ausschlaggebend.
- **Entwicklung von Holzfeuerungen:** Zur Beurteilung, ob eine technische Weiterentwicklung (z. B. andere Sekundärluftzuführung, neue Feuerungsraumgeometrie, etc.) zu einer Ver-

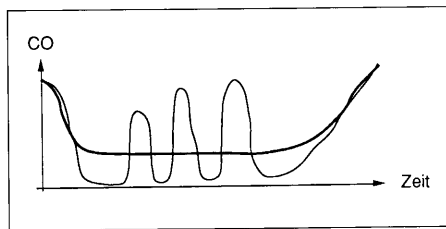


Bild 2: Zwei sehr unterschiedliche Abbrände können denselben Mittelwert haben.

minderung der Emissionen führt, müssen mehrere Versuche mit den gleichen Randbedingungen durchgeführt werden. Des Weiteren muß beachtet werden, daß zur Beurteilung einer Feuerung nicht allein entscheidend ist, daß im optimalen Betriebspunkt ein niedriger CO-Gehalt erzielt wird. Gleichzeitig ist auch das Betriebsverhalten beim Anfeuern und im Ausbrand wichtig – Ziel ist vor allem eine kurze Anfeuer- und Ausbrandphase. Es ist zudem entscheidend, daß die Feuerung ein möglichst unempfindliches Verhalten gegenüber Störungen aufweist.

Zur Beurteilung einer Holzfeuerung wird vorgeschlagen, die Kenndaten (Emissionen, Wirkungsgrad) über die

verschiedenen Betriebsphasen je einzeln zu mitteln und zusätzlich einen Mittelwert über den ganzen Abbrand zu bestimmen (Bild 10). So kann das Emissionsverhalten über einen ganzen Abbrand beurteilt werden, und es kann gleichzeitig abgeschätzt werden, ob z. B. ein hoher Mittelwert auf eine schlechte Anfeuerphase oder auf eine schlechte Verbrennung während der stationären Phase zurückzuführen ist.

3.3 Korrelationen

Die Verbrennungstemperatur, die CO-Emissionen und die Luftüberschusszahl $\lambda = \text{Lambda}$ sind eng miteinander verknüpft. Dieser Zusammenhang wird in Korrelationen***) deutlich, in denen eine Größe in Funktion einer anderen aufgetragen wird. Die Form der Abhängigkeit ist charakteristisch für verschiedene Feuerungstypen.

3.4 Meßbericht

Der Meßbericht dient zur Dokumentation der durchgeführten Mes-

***) wechselseitig voneinander abhängige Beziehungen

CO-Lambda-Korrelation;

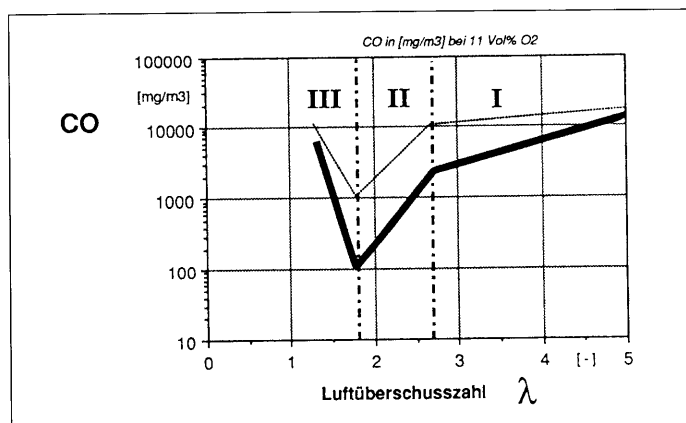


Bild 3: Schematische Darstellung der CO-Lambda-Korrelation. Bereich I: unvollständige Verbrennung bei großem Luftüberschuß und tiefer Verbrennungstemperatur; Bereich II: mit sinkendem Luftüberschuß wird die Verbrennungsqualität besser, weil die Verbrennungstemperatur steigt; Bereich III: mit sinkendem Luftüberschuß wird die Verbrennungsqualität wegen Luftmangel schlechter.

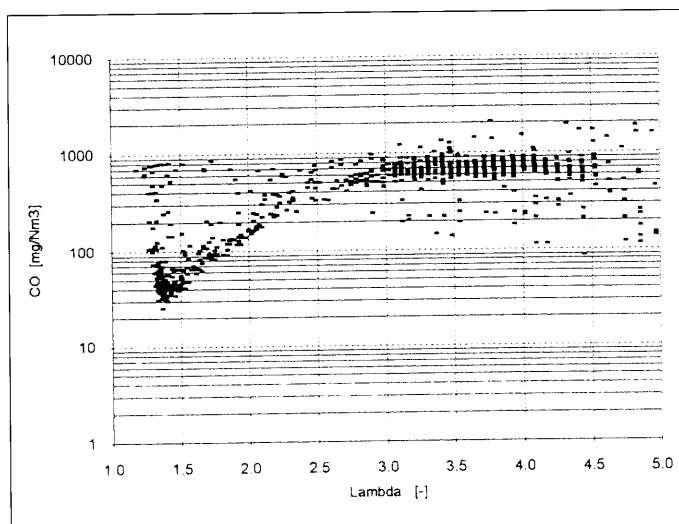


Bild 4: CO-Lambda-Korrelation, gemessen an 1000-kW-Unterschubfeuerungen. Betrieb bei Nennleistung: $\lambda \approx 1,4$; $\text{CO} \approx 50 \text{ mg/Nm}^3$; Betrieb bei Teillast: $\lambda \approx 2,5$; $\text{CO} \approx 500 \text{ mg/Nm}^3$.

Verbrennungstemperatur-Lambda-Korrelation;

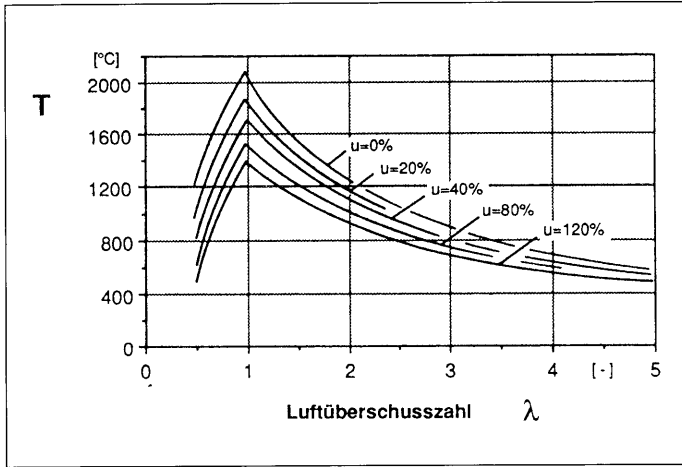


Bild 5: Verbrennungstemperatur-Lambda-Korrelation (berechnete Werte). Mit abnehmendem Luftüberschuß steigt die Verbrennungstemperatur an. Unterhalb von $\lambda = 1$ sinkt die Verbrennungstemperatur wegen unvollständiger Verbrennung ab.

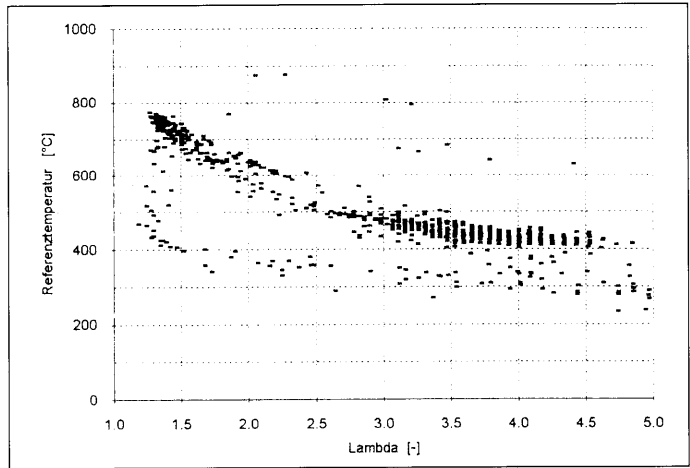


Bild 6: Verbrennungstemperatur-Lambda-Korrelation. Meßwerte einer 1000-kW-Unterschubfeuerung. Der Temperaturfühler ist durch Schamottierung vor zu hoher Temperatur geschützt, die wahre Verbrennungstemperatur liegt mindestens 200 °C höher.

sungen. Aufbau und Inhalt des Meßberichts sollten vor den Messungen festgelegt werden, da sonst wichtige Punkte bei der Messung vergessen werden könnten. Der Meßbericht soll die Nachvollziehbarkeit der Messungen gewährleisten und insbesondere folgende Angaben enthalten

3.5 Beispiele

Beispiel 1: Unterschied zwischen normierter und nicht normierter CO-Emission. Nur auf gleiche Bezugsgröße normierte Emissionswerte dürfen miteinander verglichen werden (siehe Bild 7):

Meßobjekt:

- Ort, Betreiber;
- Anlagenschema (Schnittbild, Aufbau, wichtigste Dimensionen);
- Feuerungstyp und -bezeichnung, Nennheizleistung, Baujahr;

Brennstoff:

- Holzart, Stückigkeit, Durchmesser;
- Holzfeuchtigkeit und Heizwert;
- verfeuerte Brennstoffmenge total, Anzahl der Chargen.

Durchführung der Messung:

- Datum, Zeit, Manipulationen (wie Nachlegen, Luft verstellen, etc.);
- Meßgrößen, Meßgeräte;
- Meßort;
- Meßdatenerfassung.

Berechnungen:

- Bezugsgröße, Normierung, Formeln;
- Mittelwertbildung;

Resultate:

- Mittelwerte (z. B. aufgeteilt nach Betriebsphasen und Mittelwert über ganzen Abbrand);
- zeitlicher Verlauf der Meßdaten;
- evtl. wichtigste Korrelationen.

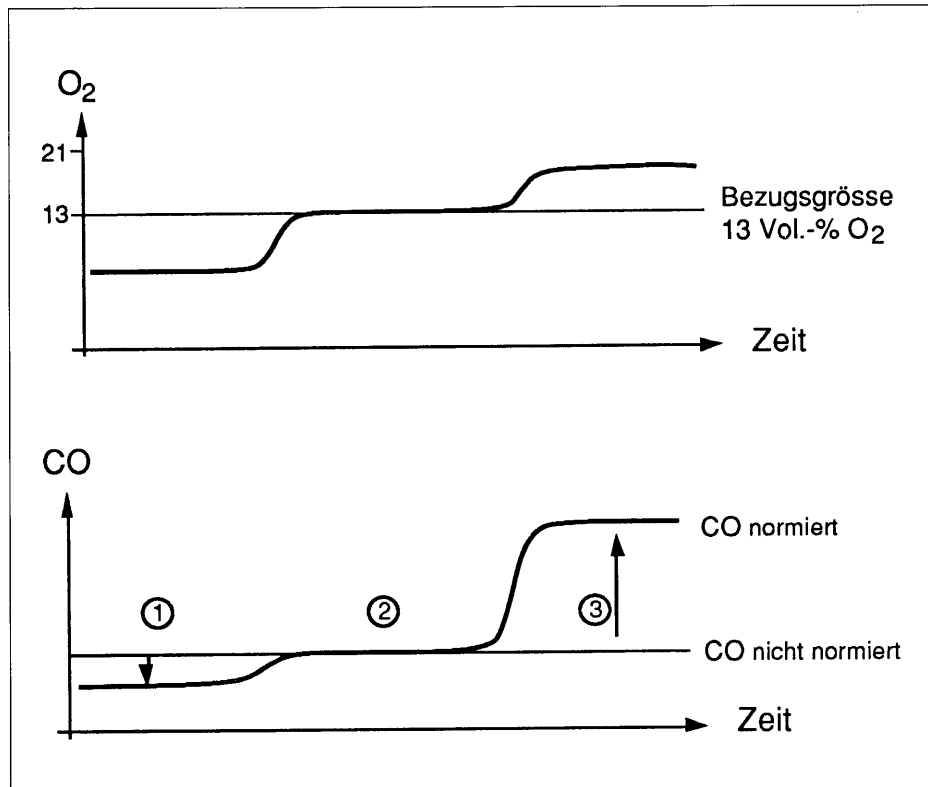


Bild 7: Zusammenhang zwischen CO_{normiert} und $CO_{\text{nicht normiert}}$ bei unterschiedlichem Sauerstoffgehalt. $CO_{\text{nicht normiert}}$ wird als konstant angenommen.
 Fall 1: $CO_{\text{normiert}} < CO_{\text{nicht normiert}}$, wenn O_2 -Gehalt kleiner als Bezugsgröße ist.
 Fall 2: $CO_{\text{normiert}} = CO_{\text{nicht normiert}}$, wenn O_2 -Gehalt gleich Bezugsgröße ist.
 Fall 3: $CO_{\text{normiert}} > CO_{\text{nicht normiert}}$, wenn O_2 -Gehalt deutlich größer als Bezugsgröße ist.

Beispiel 2: Zusammenhang zwischen Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt. Da bei der Verbrennung von Holz Sauerstoff (O_2) in Kohlendioxid (CO_2) umgewandelt wird, besteht zwischen diesen beiden Abgaskomponenten ein gegenläufiger Zusammenhang (Bild 8). Die Summe von O_2 und CO_2 beträgt jeweils ungefähr 21 Vol.-%. Aus dem gleichen Grund kann zur Berechnung der Luftüberschußzahl entweder O_2 oder CO_2 gemessen werden (siehe Bild 8).

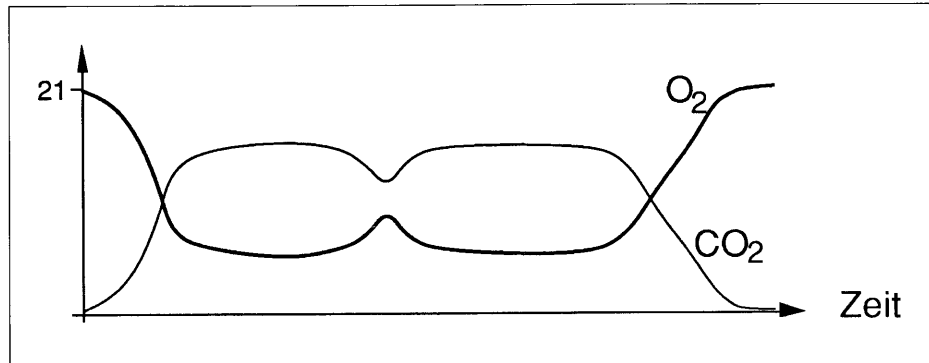


Bild 8: Zusammenhang zwischen Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt bei einem typischen Abbrand.

Beispiel 3: Typischer Verbrennungsablauf (siehe Bild 9).

Beispiel 4: Auswertung eines Abbrandes als Teil des Meßberichts.

Auf der folgenden Seite (Bild 10) sind verschiedene Meßergebnisse über 15,5 Stunden Meßdauer an einem als Beispiel gewählten holzbefeuerten Zentralheizungsherd dem entsprechenden Meßprotokoll mit den Mittelwerten in den einzelnen Phasen und über den ganzen Abbrand gegenübergestellt. Erst durch die Mittelung ergibt die Meßserie ein aussagekräftiges Bild der Abbrandqualität.

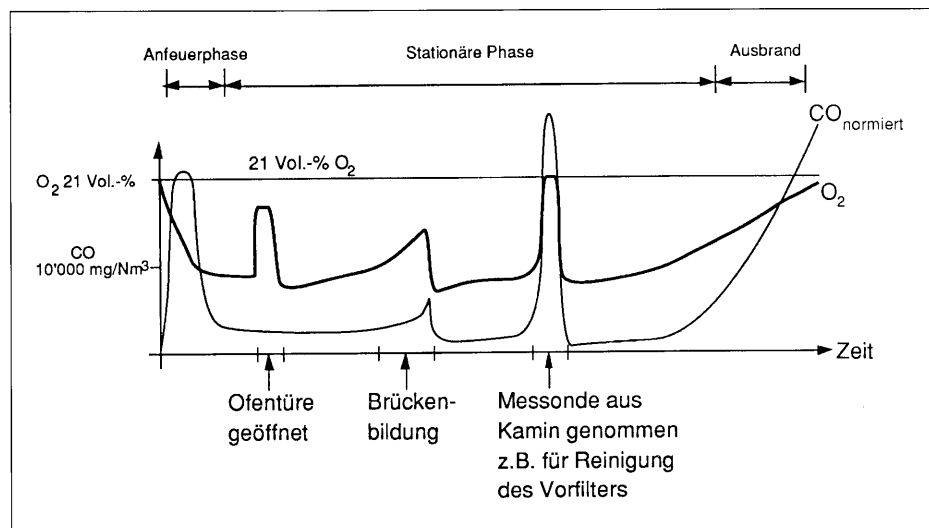


Bild 9: Verlauf der CO-Emission und des Sauerstoffgehalts während eines typischen Abbrandes.

(Schluß) □

Zentralheizungsherd

Prüfstelle : Versuchsstand Typenprüfung

Prüfobjekt

Zentralheizungsherd mit seitlichem unteren Abbrand

Betriebsart

Vollast

Brennstoff

Buche 33 cm

%
MJ/kg
kg

16
15.60
24
2

Holzsorte, Stückgröße
Holzfeuchtigkeit atro
Heizwert
Holzmenge ab stationärem Betrieb
Anzahl Holzchargen

MESSWERTE

Dauer	h	0.42	6.00	8.51	15:33
Unterdruck	mbar	0.25	0.26	0.04	0.17
Abgastemperatur	°C	235	253	57	173
Abgasvolumenstrom	Nm ³ /h	27.2	24.8	4.0	16.5

Anfahrphase	stationärer Betrieb	Ausbrandphase	ganzer Abbrand
-------------	---------------------	---------------	----------------

Emissionsmessung

Kohlendioxid CO ₂	%	12.2	12.1	5.0	9.2
Kohlenmonoxid CO	ppm	3311	320	3653	1860
CO bei 13% O ₂ im Normzustand	mg/Nm ³	2620	268	5701	856
CO Massenstrom	mg/s	31.6	2.9	5.9	5.9
CO bezogen auf die trockene Holzmenge	mg/kg	72	72	3788	565
CO bezogen auf die Feuerungsleistung	mg/MJ	1734	177	3788	565

Stickoxide NO _x	ppm	118	148	33	100
NO _x bei 13% O ₂ im Normzustand	mg/Nm ³	150	195	99	169
NO _x Massenstrom	mg/s	1.8	2.1	0.2	1.3
NO _x bezogen auf die trockene Holzmenge	mg/kg	52	52	97	124
NO _x bezogen auf die Feuerungsleistung	mg/MJ	100	129	97	124

Wärmeleistung

Zugeführte Leistung (Feuerungsleistung)	kW	18.2	16.3	1.6	10.4
Zugeführte Leistung (Holzverbrauch)	kW	17.3	17.3	1.6	6.9
Abgeführte Leistung (Heizleistung Wasser)	kW	5.2	11.2	1.6	6.9

Thermische Verluste	%	14.1	15.4	5.2	11.2
Chemische Verluste	%	2.2	0.2	5.0	2.3
Brennbare Rückstände (Annahme)	%	1.0	1.0	1.0	1.0
Strahlung und Konvektion (Rest)	%	54.0	14.6	-12.7	19.0
Kesselwirkungsgrad (direkt)	%	28.7	68.9	101.4	66.5
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	%	84.5	84.6	85.0	84.6

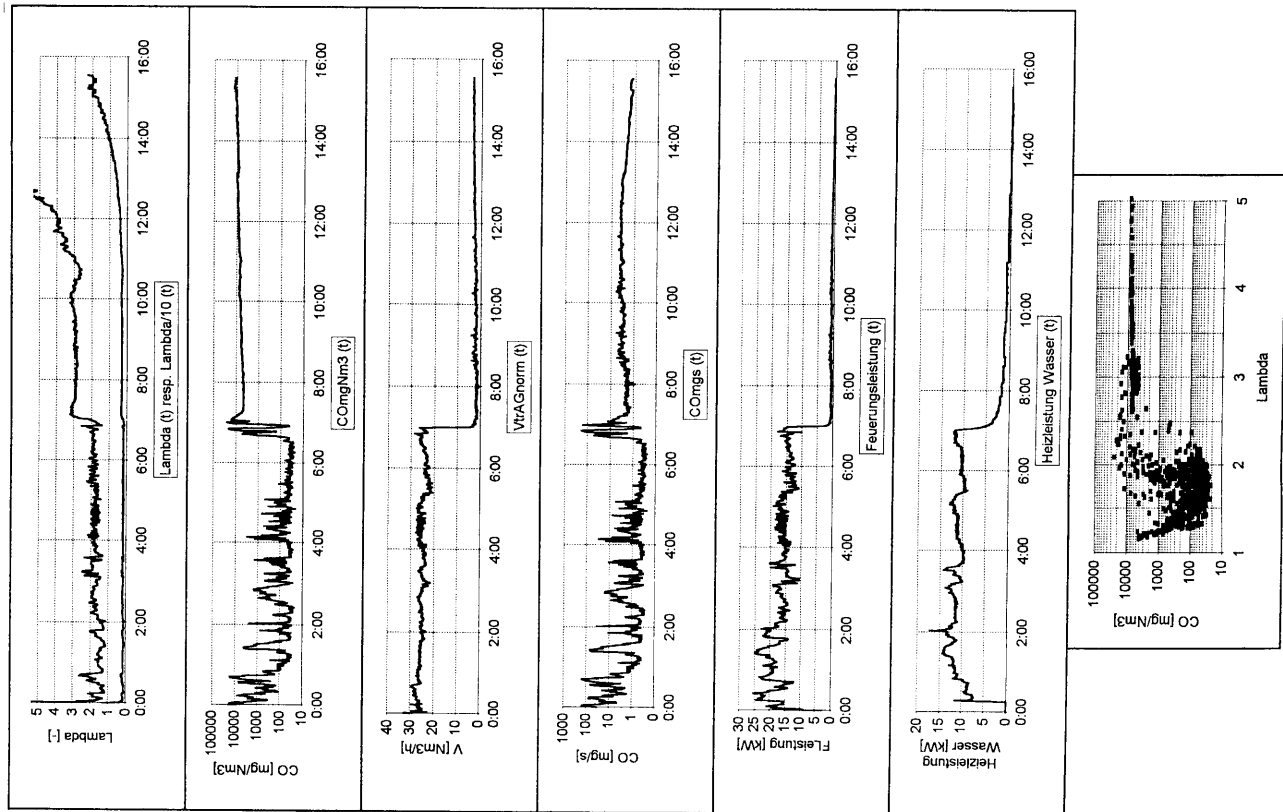


Bild 10: Auswertung eines Abbrandes in einem Zentralheizungsherd [Wagner, Nussbaumer, 1994].